

Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica



## **Implementación de un banco de pruebas para caracterización de máquinas eléctricas mediante un freno electrodinámico**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

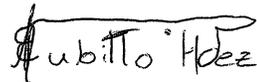
Erickson Cubillo Hernández

Cartago, 26 de junio de 2013



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Erickson Cubillo Hernández

Cartago, 26 de junio de 2013

Céd: 5-0372-0605



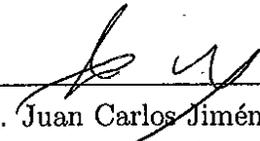
Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica  
Proyecto de Graduación  
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. William Marín Moreno  
Profesor Lector



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles  
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 26 de junio de 2013





# Resumen

A continuación en éste documento se presenta el desarrollo paso a paso del sistema para la medición de eficiencia en máquinas eléctrica rotativas, mediante el uso de un freno electrodinámico por corrientes parásitas el cual permite someter los motores eléctricos a carga nominal, con una capacidad máxima de hasta 200 HP.

Sin embargo, la eficiencia al ser una medición indirecta se requiere la adquisición de algunas variables como la potencia de entrada y la potencia de salida, por lo tanto, también se presenta la teoría necesaria para la comprensión de las variables implicadas en dichas mediciones, y el detalle del Hardware utilizado en cada uno de los casos, así como su configuración y capacidades.

También como parte del proyecto se entra en detalle sobre la aplicación en software desarrollada en LabVIEW 2012, para la integración de datos referentes a cada uno de los dispositivos que adquieren las variables del sistema. Y la debida interfaz gráfica diseñada para la interacción con el operario, con el fin de poder crear informes sobre la calidad del funcionamiento en cada uno de los equipos sometidos a pruebas.

**Palabras clave:** Freno electrodinámico, Momento de torsión, Potencia entrada, Potencia Salida, Eficiencia, LabVIEW.



# Abstract

Below in this document we present the development step by step system for the measurement of efficiency in electrical rotating machines by using an eddy current electrodynamic brake, which allows submit the electric motors to rated load, with a maximum capacity of up to 200 HP.

However, the efficiency to be an indirect measure of acquisition, requires the acquisition of such variables as the input power and output power, thus also presents the theory required for the understanding of the variables involved in such measurements, and the details of the hardware used in each cases, its configuration and capabilities.

Also as part of the project will go into detail on the software application developed in LabVIEW 2012, for the integration of data on each of the devices that acquire the system variables. And the proper GUI designed for interaction with the operator, in order to create reports on the quality of performance in each of the tested devices.

**Keywords:** Electrodynamic break, Torque, Input Power, Output Power, Efficiency, LabVIEW.



*Primero que todo doy gracias a Dios por todas las cosas maravillosas que a puesto en mi vida, alegrías y tristezas, las cuales me han ayudado a crecer como persona y profesional. Sin embargo, Dios nunca me deja solo, ya que a mi lado siempre he tenido dos ángeles que han guiado mis pasos, aún que muchas veces no me comprenden o no saben de que les hablé, siempre tienen tiempo para escucharme y regalarme su apoyo o consejo. Por ello, les agradezco infinitamente que sean mis queridos padres, Hannia Hernández Jaén y Erick Cubillo Vega. Ya que sin ustedes no hubiese podido cosechar éste éxito.*



# Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo y la enseñanza de mis profesores a lo largo del camino desde la escuela, colegio y principalmente ahora en la universidad. Ya que el camino no es fácil, pero si es posible con esfuerzo y dedicación.

A la vez también agradezco a Don Orlando Morera Soto, por la oportunidad de desarrollar el presente proyecto en su empresa, así como la ayuda brindada por el personal de trabajo de la empresa RENAME S.A, personas muy atentas y profesionales en el trabajo que cada uno desempeña, ya que no hace falta tener un título universitario para desempeñar un trabajo profesional y de alta calidad, mucho más cuando existe pasión por la labor realizada.

Erickson Cubillo Hernández

Cartago, 26 de junio de 2013



# Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Problemática existente . . . . .	1
1.2 Solución seleccionada y importancia . . . . .	2
1.3 Objetivos y estructura del documento . . . . .	2
1.3.1 Meta . . . . .	2
1.3.2 Objetivo General . . . . .	2
1.3.3 Objetivos específicos . . . . .	3
<b>2 Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Transformación de energía . . . . .	5
2.2 Máquinas eléctricas . . . . .	6
2.3 Eficiencia . . . . .	6
2.4 Potencia de entrada . . . . .	7
2.5 Potencia de Salida . . . . .	8
2.6 Momento de torsión o par . . . . .	8
2.7 Velocidad angular . . . . .	10
2.8 Curvas de respuestas de la MAT . . . . .	10
2.9 Principio de funcionamiento de freno electrodinámico . . . . .	14
2.9.1 Partes mecánicas y funcionales del freno electrodinámico . . . . .	14
2.9.2 Ley de Lenz . . . . .	15
2.9.3 Corrientes de Foucault . . . . .	16
2.9.4 Fuerza de Lorenz . . . . .	17
2.9.5 Regla de la mano derecha . . . . .	18
2.9.6 Interrelación de variables físicas en proceso de frenado del sistema . . . . .	19
2.10 Hardware utilizado . . . . .	20
2.10.1 Módulo Acuvim-DL . . . . .	20
2.10.2 Celda de carga . . . . .	23
2.10.3 Microcontrolador . . . . .	25
2.10.4 OC2-100 . . . . .	25
2.10.5 Computador . . . . .	26

---

<b>3</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>27</b>
3.1	Método de pruebas en máquinas eléctricas . . . . .	27
3.2	Condiciones y origen del freno electrodinámico proporcionado . . . . .	27
3.3	Proceso de restauración del freno electrodinámico . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Implementación del banco de pruebas máquinas eléctricas</b>	<b>31</b>
4.1	Variables de entrada . . . . .	31
4.2	Momento de torsión . . . . .	36
4.3	Velocidad de rotación . . . . .	41
4.4	Control de tensión de la bobina del freno . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>47</b>
5.1	Parámetros de referencia para mediciones . . . . .	47
5.2	Potencia de entrada del sistema . . . . .	48
5.2.1	Parámetros en momento de arranque . . . . .	48
5.2.2	Características en vacío . . . . .	49
5.2.3	Parámetros de funcionamiento a plena carga . . . . .	50
5.3	Momento de torsión del sistema . . . . .	51
5.4	Velocidad de rotación del motor . . . . .	54
5.5	Medición de eficiencia . . . . .	55
5.6	Análisis económico . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>61</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Partes físicas del freno electrodinámico en proceso de restauración</b>	<b>65</b>
<b>B</b>	<b>Partes mecánicas y dimensiones internas del freno electrodinámico</b>	<b>71</b>

# Índice de figuras

2.1	Distribución de las pérdidas en la MAT . . . . .	6
2.2	Triangulo de potencias . . . . .	8
2.3	Momento de torsión . . . . .	9
2.4	Variables en potencia de salida del freno electrodinámico . . . . .	9
2.5	Curva característica torque – velocidad en una MAT . . . . .	11
2.6	Curva de respuesta par, corriente en función de la velocidad de una MAT . . . . .	11
2.7	Curva de eficiencia y pérdidas en función de la potencia de una MAT . . . . .	12
2.8	Respuesta de la MAT al variar el tipo de jaula de ardilla del rotor . . . . .	12
2.9	Formas de tipo de jaula de ardilla para diferentes clases según NEMA. . . . .	13
2.10	Interrelación de curvas características de la MAT . . . . .	14
2.11	Representación gráfica de la ley de Lenz . . . . .	16
2.12	Interacción de una carga sometida a un campo eléctrico y magnético. . . . .	17
2.13	Determinación de dirección de líneas de campo magnético . . . . .	18
2.14	Determinación de dirección del producto vectorial . . . . .	18
2.15	Representación de las variables físicas en el sistema . . . . .	19
2.16	Galga extensiométrica metálica . . . . .	24
2.17	Configuración básica del puente de Wheatstone . . . . .	24
2.18	Compensación en puente Wheatstone. . . . .	25
2.19	Tarjeta de control de tensión para bobina de freno electrodinámico . . . . .	26
3.1	Estado de abandono de freno electrodinámico parte frontal . . . . .	28
3.2	Estado de abandono de freno electrodinámico parte lateral . . . . .	28
4.1	Diagrama general del sistema . . . . .	31
4.2	Diagrama conexión Acuvim-DL . . . . .	32
4.3	Diagrama conexión alimentación y datos del Acuvim-DL . . . . .	32
4.4	Convertidor RS-485 a USB . . . . .	33
4.5	Comunicación entre convertidor RS-485 y Acuvim-DL . . . . .	34
4.6	Programación en LabView del módulo Acuvim . . . . .	34
4.7	Representación gráfica de un SubVI . . . . .	35
4.8	Contenido de subVI 1 . . . . .	35
4.9	Interfaz gráfica para variables de entrada . . . . .	36
4.10	Programación en LabView para medición de momento de torsión . . . . .	39
4.11	Código fuente de subVI 4 en celda de carga . . . . .	40

4.12	Interfaz gráfica para Momento de torsión . . . . .	41
4.13	Sensor de Hall y su montaje para medición de velocidad . . . . .	41
4.14	Circuito acondicionador para señal del sensor de Hall . . . . .	42
4.15	Circuito esquemático para medición de velocidad . . . . .	43
4.16	Circuito impreso para medición de velocidad . . . . .	43
4.17	Descriptores de Hardware para PIC . . . . .	44
4.18	Diagrama de conexión en tarjeta OC2-100 . . . . .	45
5.1	Parámetros de entrada para un arranque al 45% de potencia total . . . . .	48
5.2	Parámetros de entrada del motor en vacío . . . . .	49
5.3	Parámetros de entrada del motor a carga nominal . . . . .	50
5.4	Momento de torsión en vacío a 45.45% y un 100% de potencia . . . . .	52
5.5	Momento de torsión nominal inmediato . . . . .	53
5.6	Momento de torsión nominal tomando media de los datos . . . . .	53
5.7	Interfaz gráfica para medición de velocidad . . . . .	54
5.8	Código LabVIEW para obtener valor de eficiencia . . . . .	55
5.9	Eficiencia medida para motor WEG 12.5 HP . . . . .	55
A.1	Base del sistema y circunferencia de montaje de roles de estator . . . . .	65
A.2	Tapas del estator, bobina del sistema y tapas del sistema de refrigeramiento . . . . .	66
A.3	Representación de la entrada, salida y sensor de temperatura del refrigerante en la sección del estator . . . . .	66
A.4	Vista lateral del estator con bobina . . . . .	67
A.5	Vista lateral del estator sin bobina . . . . .	67
A.6	Representación de la separación entre rotor, tapas de enfriamiento y aro de cobre . . . . .	67
A.7	Primer etapa de proceso de ajuste del sistema . . . . .	68
A.8	Montaje de la segunda sección del estator . . . . .	68
A.9	Estator listo para ajuste de rotor y montaje de roles en base . . . . .	69
B.1	Sistema de brazos de palanca necesarios para medición de momento de torsión . . . . .	71
B.2	Vistas generales a escala del freno electrodinámico . . . . .	72
B.3	Dimensiones de partes mecánicas mediante un corte lateral . . . . .	72
B.4	Dimensiones de partes mecánicas mediante un corte superior . . . . .	73

# Índice de tablas

2.1	Configuración de Protocolo Modbus RTU . . . . .	21
2.2	Estructura del formato de datos . . . . .	21
2.3	Dirección de los registros de medición . . . . .	22
2.4	Relación de transformación de registros . . . . .	23
4.1	Comandos permitidos por dispositivo de celda de carga . . . . .	37
4.2	Estructura de la función lectura fila . . . . .	38
4.3	Significado de los parámetros de respuesta a la función lectura inmediata . . . . .	38
4.4	Valores para calibración en celda de carga y relaciones para unidades de medida . . . . .	40
5.1	Características eléctricas de motor WEG 12.5 HP de eficiencia estándar . . . . .	47
5.2	Resumen de parámetros de entrada para un arranque al 45% de potencia total . . . . .	48
5.3	Resumen de parámetros de entrada del motor en vacío . . . . .	50
5.4	Resumen de parámetros de entrada del motor a carga nominal . . . . .	51
5.5	Comparación de resultados contra datos del fabricante . . . . .	56
5.6	Detalles del costo de proyecto . . . . .	57
5.7	Análisis económico del proyecto . . . . .	58



# Capítulo 1

## Introducción

En el presente informe se detalla la implementación de un banco de pruebas para máquinas eléctricas rotativas, en el cual se podrá realizar una amplia gama de pruebas de acuerdo a las necesidades y directrices de la empresa *RENAME S.A. (Reconstructora Nacional de Motores Eléctricos)*, ya que el sistema presenta características de muy alta versatilidad. Entre las pruebas que se podrán realizar están la caracterización de motores eléctricos en vacío y a plena carga. Logrando obtener parámetros de entrada como tensiones, corrientes, potencias, factores de potencias en cada fase, así como los valores totales del sistema. Mientras que en la sección de salida se podrá obtener las características de velocidad en el eje y la carga a la que se esta sometiendo la máquina en tiempo real.

### 1.1 Problemática existente

El proyecto que aquí se describe se desarrolló en la empresa fundada en 1970, con la finalidad de brindar soluciones integrales en el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo de diferentes equipos como motores eléctricos, bombas de agua, generadores eléctricos, entre otros. Donde las reparaciones y reconstrucciones hechas a los motores eléctricos no pasaban por ningún proceso de validación de las características eléctricas de funcionamiento de los mismos, y mucho menos el comportamiento de los mismos a plena carga.

Por lo que la empresa vio la necesidad de implementar un sistema el cual respalde a la misma y garantice a sus clientes, las características de funcionamiento de los motores que se estén reparando o en el caso que se desee realizar una certificación de un equipo nuevo y con ello asegurar el adecuado funcionamiento de los sistemas, aumentando con ello la credibilidad y la calidad del trabajo de la empresa.

Convirtiendo a la empresa en una pionera en todo el país en certificación de calidad en los equipos a los cuales se les realice algún tipo de trabajo. Ya que actualmente únicamente el ICE (Instituto Costarricense de Electricidad) cuenta con un laboratorio completamente equipado con equipo de muy alta calidad para la certificación de equipos eléctricos y entre

ellos las máquinas eléctricas rotativas.

## 1.2 Solución seleccionada y importancia

Un factor de suma importancia para realizar las pruebas a las máquinas eléctricas es poder someter las mismas a las cargas para las cuales fueron diseñadas, es decir, que las mismas sean alimentadas con los valores nominales de funcionamiento. Una vez que se logran estas circunstancias se debe determinar todas las características de importancia, ya que muchos de los daños que se dan es los sistemas son debidos a sobrecargas, desbalances en las tensiones, transientes, problemas en las redes eléctricas, entre otros y esta claro que nadie desea que sus sistemas de producción fallen, pero por causas ajenas al control suceden estos problemas. Es en este punto, donde los usuarios solicitan pruebas sobre las fallas, garantías o inclusive una devolución de dinero por mal servicio.

No obstante, la empresa tiene que estar en la capacidad de determinar las causas de las fallas y en capacidad de garantizar que los sistemas cuando salen de ella cumplen con las características que dicta el fabricante, pero lamentablemente sin poder someter los sistemas a carga nominal, no puede brindar esta garantía.

Por consiguiente se utilizó un freno electrodinámico por corrientes de Eddy o Foucault , para someter carga a los motores eléctricos mediante un acople mecánico al freno. Dicho freno por su construcción permite medir la carga a la cual se esta sometiendo el motor, así como la velocidad del mismo. Un aspecto muy importante a tomar en cuenta es la creencia que después de reparar un motor estos disminuyen su eficiencia, lo cual se demostrara que no siempre es cierto, y depende de la causa que ocasiono daño.

## 1.3 Objetivos y estructura del documento

### 1.3.1 Meta

Cabe mencionar que el presente informe resume una primera etapa del proyecto, ya que como meta se espera tener construido a mediano plazo un banco de pruebas lo más automatizado posible, de alto rendimiento energético, calidad, precisión y exactitud para la caracterización de motores eléctricos, siendo este de uso propio de la empresa y como un servicio a la industria. Permitiendo un crecimiento integral en la calidad de productos ofrecidos.

### 1.3.2 Objetivo General

Para la primera etapa se pretende diseñar un sistema de pruebas para máquinas eléctricas con el fin de poder caracterizarlas, y obtener sus características de funcionamiento en

vacío, con carga parcial o nominal.

### 1.3.3 Objetivos específicos

- Determinar el consumo eléctrico y el factor de potencia de máquinas eléctricas sometidas a pruebas, garantizando el adecuado funcionamiento de las mismas. Con un porcentaje de error de consumo eléctrico y factor de potencia menor o igual a 2%.
- Caracterizar el funcionamiento de máquinas eléctricas al someterlas a prueba mediante un freno electrodinámico. Logrando alcanzar al menos un 90% de similitud con respecto a la carga nominal de operación de las máquinas sometidas a prueba.
- Crear un sistema para determinar la eficiencia de máquinas eléctricas rotativas. Con un porcentaje de error total en la eficiencia menor al 3%.

Por lo tanto y de acuerdo a las variables necesarias para cumplir los objetivos planteados se subdividir el proyecto en 4 etapas de control y procesamiento de datos:

- Potencia entrada
- Momento de torsión del motor
- Velocidad de giro del rotor
- Control de energía del freno electrodinámico

Y para comprender de mejor manera los principios de funcionamiento del sistema en el siguiente capítulo se esbozan los fundamentos teóricos necesarios para explicar en el capítulo 4 la solución realizada.



# Capítulo 2

## Marco teórico

En esta sección se pretende dar a conocer los fundamentos necesarios para lograr alcanzar una coordinada y coherente comprensión de las variables y fenómenos físicos en los que se basa en el presente proyecto.

### 2.1 Transformación de energía

La energía según la real academia española [3] se define como la capacidad de realizar trabajo, y esta se mide en julios [ $J$ ] (Símbolo  $E$ ). Y bajo el principio de la conservación de la energía, la misma no se puede crear ni destruir, únicamente se puede transformar. Según Wildi [21] la representación de la energía es muy diversa y se puede representar en diferentes formas ya sea en:

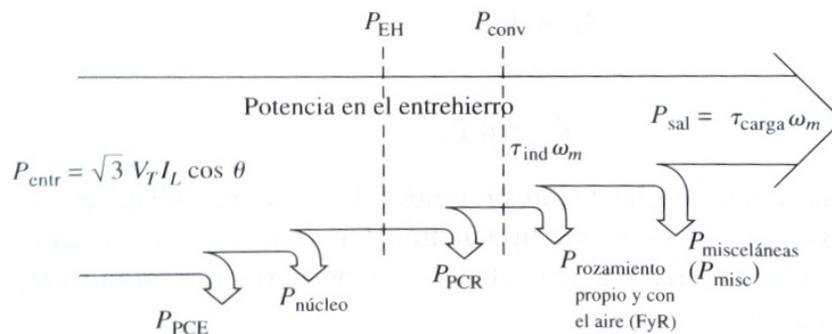
- Energía mecánica
- Energía térmica
- Energía química
- Energía eléctrica
- Energía atómica

Por medio de dispositivos o máquinas apropiadas esta se puede transformar de una a otra, en nuestro caso mediante el uso de máquinas eléctricas rotativas se transforma la energía eléctrica en energía mecánica obtenida esta última a través del eje de dichas máquinas. Desafortunadamente, siempre que se transforma energía, el rendimiento siempre es menor a la energía suministrada a la entrada. Es decir, se tienen pérdidas en ambas partes de la transformación en la entrada se pierde energía en forma de calor en los devanados, y en la parte de salida se pierde energía por fricción en rodamientos y debido a la turbulencia del aire creada por el ventilador de enfriamiento entre otros.

## 2.2 Máquinas eléctricas

Las máquinas eléctricas son dispositivos que transforman la energía eléctrica en otra, o modifican sus características. En máquinas eléctricas tenemos tres tipos: los generadores que transforman energía mecánica en eléctrica, mientras que los motores transforman la energía eléctrica a mecánica obtenida en el eje y estos se subdividen en dos grupos, de corriente continua y corriente alterna, y por último los transformadores que únicamente modifican las características de la energía eléctrica.

Debido a fines del proyecto se trabajaran con máquinas asincrónicas trifásicas (*MAT*), por lo tanto, y mediante el trabajo de Chapman [2] podemos ver representado la distribución de pérdidas que se presentan en el proceso de transformación de la energía en una *MAT* mediante la siguiente figura.



**Figura 2.1:** Distribución de las pérdidas en la *MAT*

Donde:

$P_{PCE}$  : Pérdidas en el cobre del estator

$P_{núcleo}$  : Pérdidas en el hierro del estator

$P_{PCR}$  : Pérdidas en el cobre del rotor

$P_{F+R}$  : Pérdidas por fricción y rodamientos

## 2.3 Eficiencia

Ahora que conocemos los factores que afectan el rendimiento de una máquina eléctrica rotativa podemos hacer mención de la eficiencia, la cual es una relación porcentual de la potencia de entrada y la potencia del sistema. Y apoyándonos en Wildi [21] tenemos claro que viene dado por la siguiente relación.

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{entr}} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde:

$P_{sal}$  : Potencia de salida [W]

$P_{entr}$  : Potencia de entrada [W]

$\eta$  : Eficiencia [%]

Es importante que el lector tome en cuenta que la eficiencia de una máquina eléctrica oscila entre el 75 y 98 por ciento, según el tamaño del motor. Y que la potencia de entrada a tomar en cuenta es la potencia activa, lógicamente para que no exista una coincidencia en las unidades de potencia de entrada y salida; pero la razón formal es porque esta es la potencia real de consumo de la máquina ya sea que se transforma en otra energía o en forma de calor.

## 2.4 Potencia de entrada

Como se mencionó anteriormente para nuestro interés la potencia de entrada importante es la potencia activa o real, la cual según Seener [17] se mide en Watts [W], y está dada por la siguiente ecuación

$$P_{in} = P_1 = \sqrt{3}V_L I_L \cos(\varphi) \quad [W] \quad (2.2)$$

Donde:

$V_L$  : Tensión de línea

$I_L$  : Corriente de línea

$\cos(\varphi)$  : Factor de potencia

Se debe tener claro que a la entrada del sistema existen otro tipo de potencias como son la potencia reactiva se representa mediante la siguiente ecuación

$$Q = \sqrt{3}V_L I_L \sin(\varphi) \quad [VAR] \quad (2.3)$$

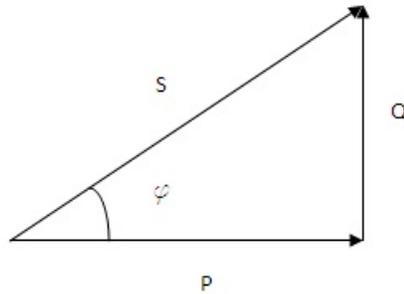
La siguiente sería la potencia aparente que es una mezcla de las dos potencias anteriores representada por

$$S = \sqrt{3}V_L I_L \quad [VA] \quad (2.4)$$

Para tener una mejor apreciación se muestra la siguiente figura que representa las componentes vectoriales de la potencia.

Mediante la figura anterior también se puede apreciar la relación que existe entre P y S, la cual es el factor de potencia donde:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (2.5)$$



**Figura 2.2:** Triángulo de potencias

## 2.5 Potencia de Salida

Para el caso de la potencia de salida tratamos con la transformación de energía por medio de una máquina eléctrica rotativa obteniendo energía mecánica atrás del eje. Según Wildi [21] la potencia mecánica de un motor depende de su velocidad de rotación y del momento de torsión o par que desarrolla. La potencia está dada por:

$$P_{out} = \frac{n\tau}{9.55} \quad (2.6)$$

Donde:

$P$  : Potencia mecánica [ $W$ ]

$\tau$  : Momento de torsión o par [ $Nm$ ]

$n$  : Velocidad de rotación [ $r/min$ ]

9.55 : Constante de ajuste para unidades (valor exacto =  $30/\pi$ )

Otra forma de representar la potencia de salida es como se mostró en la figura 2.1 de la siguiente manera:

$$P_{out} = 2\pi n\tau = \omega\tau \quad (2.7)$$

Donde:

$P$  : Potencia mecánica [ $W$ ]

$\tau$  : Momento de torsión o par [ $Nm$ ]

$n$  : Velocidad de rotación [ $r/s$ ]

$\omega$  : Velocidad angular [ $rad/s$ ]

## 2.6 Momento de torsión o par

Según Serway [15] el momento de torsión o par se produce cuando una fuerza se ejerce sobre un cuerpo y esta tiende a hacerlo girar, a su vez el momento de torsión es una cantidad vectorial por lo cual tiene tanto magnitud como dirección. En nuestro caso únicamente

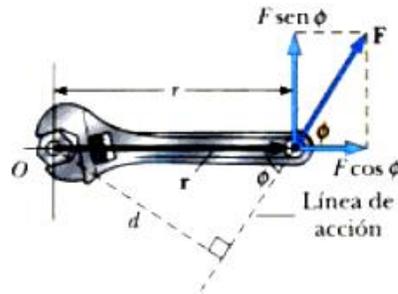
será necesario el uso de la magnitud del momento de torsión. El cual es expresado de la siguiente manera

$$\tau = Fr \text{sen}(\phi) \quad (2.8)$$

Donde:

$r$  : Es la distancia entre el punto de eje y el punto de aplicación de  $F$

$F$  : Fuerza aplicada que actúa a un ángulo  $\phi$  respecto a la horizontal.

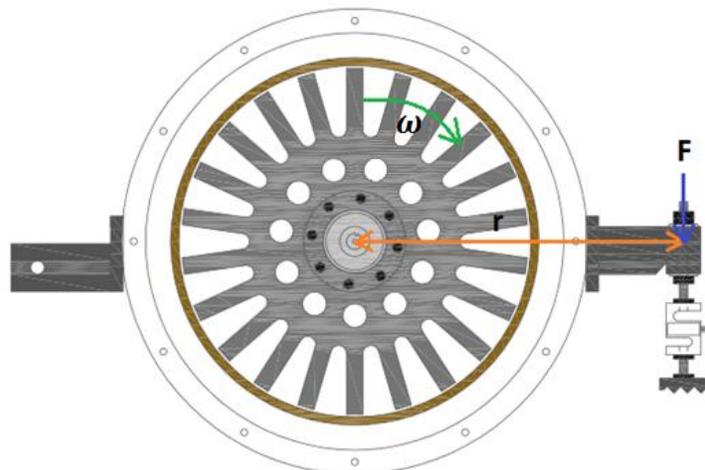


**Figura 2.3:** Momento de torsión

Para el caso de la aplicación que se desarrolló el ángulo de acción respecto a la horizontal será de  $90^\circ$  o muy semejante a ello con una variación máxima de  $\pm 2^\circ$  en el valor de  $\phi$ , por lo tanto podemos aproximar el valor de  $\text{sen}(\phi) \approx 1$ . Obteniendo con ello una forma simplificada de la expresión de momento de torsión mediante la siguiente ecuación

$$\tau = Fr \quad (2.9)$$

De igual manera, y para una mayor comprensión en la siguiente imagen se muestra un esquema de la acción del momento de torsión que se ejerce en el sistema del freno, y a la vez una distribución de las variables necesarias para la determinación de la potencia de salida de la máquina sometida a prueba.



**Figura 2.4:** Variables en potencia de salida del freno electrodinámico

## 2.7 Velocidad angular

Es una medida de la velocidad de rotación de un objeto, y esta es la rapidez con la que varía el ángulo  $\theta$  respecto al tiempo y se mide en radianes por segundo es decir

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.10)$$

También tenemos que

$$\omega = 2\phi f \quad (2.11)$$

Esta velocidad angular sería tomada en el eje de las máquinas que estaríamos probando, y se debe saber que en una máquina eléctrica giratoria tenemos dos tipos de velocidades la velocidad del rotor y la velocidad de giro del campo magnético. Resultando de la diferencia de estas dos un nuevo concepto que en máquinas eléctricas se llama **deslizamiento**, dicha relación entre ambas velocidades tiene un comportamiento lineal, y se expresa de la siguiente forma

$$s = 100 \times \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.12)$$

Donde:

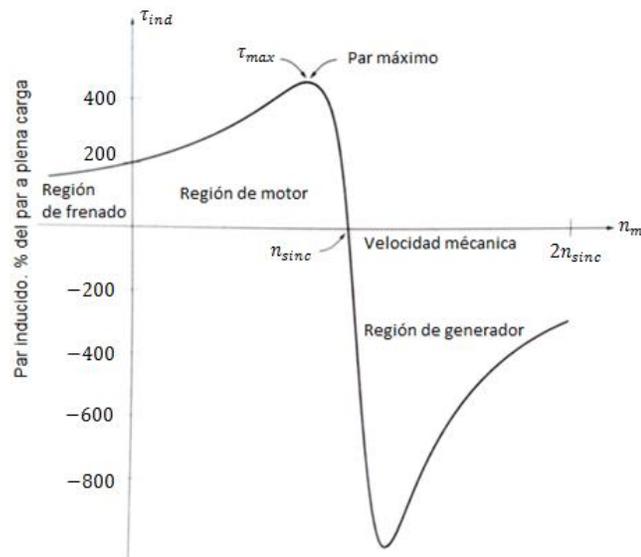
$s$  : Deslizamiento [%]

$n_s$  : Velocidad de giro del campo magnético

$n$  : Velocidad de rotor

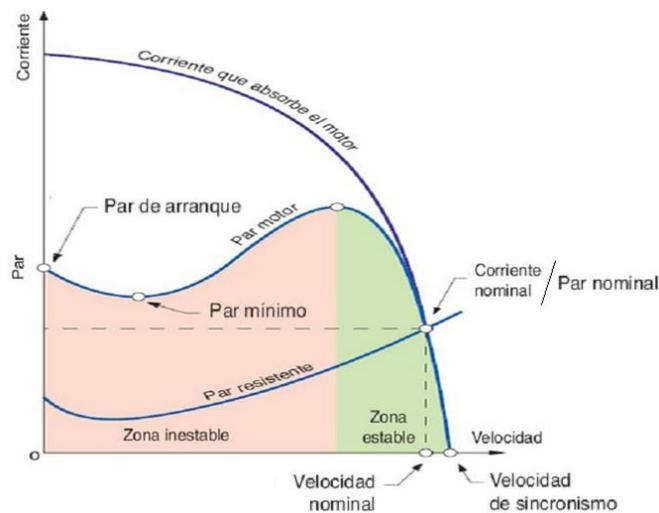
## 2.8 Curvas de respuestas de la MAT

Cada máquina eléctrica tiene diferentes curvas características de respuesta en función de las variables que la caracterizan, pero a continuación se presentará una representación de la forma de respuesta que presentan estas en forma general para una MAT, donde las mismas dependen de su velocidad de giro, la carga y la corriente del sistema. Otro parámetro de importancia es la eficiencia, la cual ve afectada su respuesta en función del factor de potencia como se vara más adelante. La siguiente figura fue obtenida de Chapman [2], y a la vez se hace una interpretación de las misma, ya que muestra la respuesta de la velocidad del rotor en función de la carga, y las regiones de operación de la MAT.



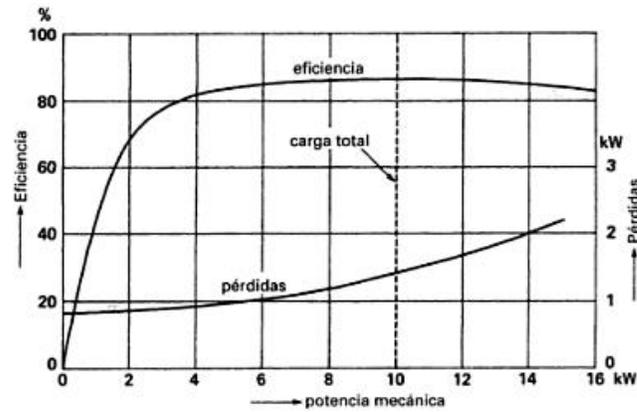
**Figura 2.5:** Curva característica torque – velocidad en una MAT

De la figura anterior se puede resaltar que la MAT se puede sobrecargar hasta el punto  $\tau_{max}$  mientras la velocidad disminuye y después alcanzar el punto  $\tau_{max}$  si la carga sigue en aumento lo que sucede es una disminución abrupta de la velocidad del rotor hasta que se logra bloquear el mismo. Y también en función de la velocidad de sincronismo la MAT se puede comportar como motor o generador. Ahora bien, mediante la siguiente figura tomada de García [5] se ilustra el comportamiento de la MAT en su región de motor; así como la corriente de arranque y el par resistente hasta el punto de operación nominal de la MAT.



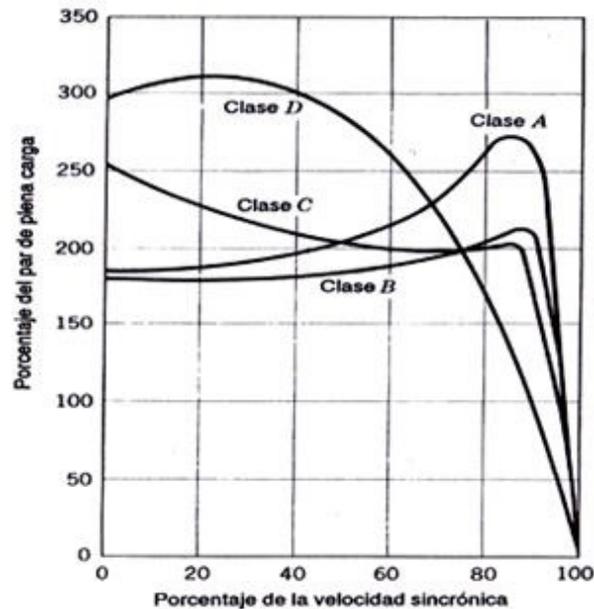
**Figura 2.6:** Curva de respuesta par, corriente en función de la velocidad de una MAT

Como se había mencionado anteriormente al sobrecargar las máquinas eléctricas estas presentan una disminución en su eficiencia por múltiples factores, y con ello un aumento en las pérdidas del sistema, una representación gráfica de ellos se muestra en la siguiente figura.



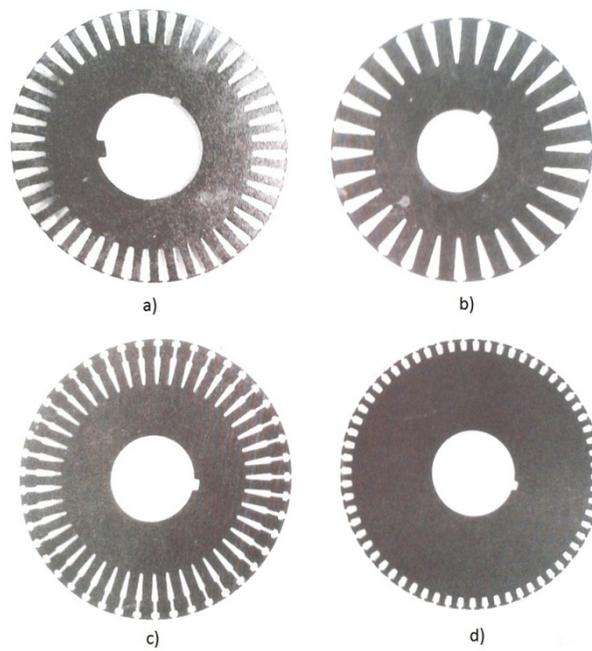
**Figura 2.7:** Curva de eficiencia y pérdidas en función de la potencia de una MAT

A como se mencionó para el caso de la figura 2.6, la corriente de arranque de un motor está directamente relacionada con la torsión del sistema. Pero detrás de esto tenemos los tipos de las jaulas de ardilla del rotor, de los cuales depende la magnitud de torsión y la corriente de arranque. A continuación se presentaran unas figuras tomadas de Chapman [2] que hacen referencia a estas magnitudes anteriores según la clasificación NEMA.



**Figura 2.8:** Respuesta de la MAT al variar el tipo de jaula de ardilla del rotor

Y para una mejor ilustración de la forma de los tipos de jaula de ardilla y según su clasificación NEMA se da en la siguiente figura.



**Figura 2.9:** Formas de tipo de jaula de ardilla para diferentes clases según NEMA.

El valor de  $I_A$  corresponde a la corriente de arranque del motor este valor de corriente será entre 4 y 8 veces la corriente nominal y esta depende del tipo de rotor y el tipo de aplicaciones se requiere veamos a continuación características de corriente y torsión en función de la velocidad según clasificación NEMA en USA y la IEC en Europa según Chapman [2].

**Diseño clase A:** Son los motores de diseño estándar con un par de arranque que es al menos el nominal en motores grande y de un 200% o más en motores pequeños. Presentan bajo deslizamiento menor a 5%. Pero el problema es la elevada corriente de arranque que es alrededor de 500 a 800% de la nominal. Y corresponde a la figura 2.9.a.

**Diseño clase B:** Esta clase produce alrededor del mismo par de arranque que clase A pero con un 25% menos de corriente, aunque se levemente menos al de clase A por el incremento de reactancia en el rotor. Correspondiente a la figura 2.9.b.

**Diseño clase C:** Tienen alto par de arranque, corriente de arranque bajas y deslizamiento bajo (menor de 5%) a plena carga. El par máximo es mayor de los clase A, con un par de arranque de 250% del nominal. Estos rotores son llamado de doble jaula y se puede observar en la figura 2.9.c.

**Diseño clase D:** Tienen un par de arranque muy alto (275% o más del par nominal), y una baja corriente de arranque, pero tienen un alto deslizamiento a plena carga. Inclusive el par más alto se puede presentar a velocidad cero, debido a la alta resistencia del rotor y por ello el alto deslizamiento, este tipo de rotor se observa en la figura 2.9.d.

Para concluir con esta sección y según Metalcorte [8] a continuación se muestra una representación gráfica de la interrelación de la corriente, velocidad, eficiencia y factor de potencia en función de la carga del sistema.

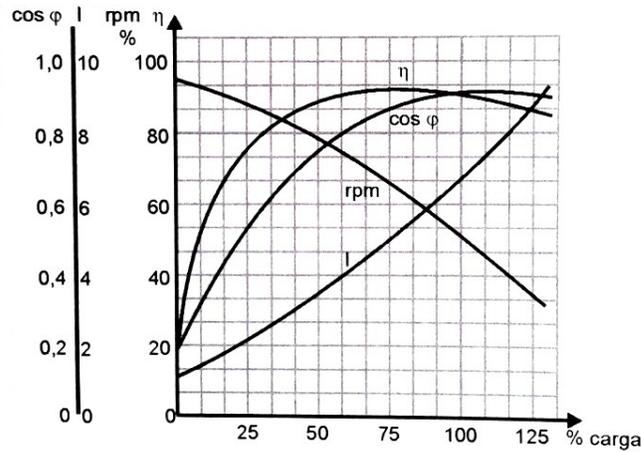


Figura 2.10: Interrelación de curvas características de la MAT

Datos importantes de rescatar en la gráfica anterior son los valores de eficiencia y factor de potencia a un 100% de carga, donde la eficiencia anda alrededor de un 90% y con un factor de potencia de aproximadamente 0.93. Cuyos datos se encuentran dentro de los márgenes permisivos.

## 2.9 Principio de funcionamiento de freno electrodinámico

El principio de funcionamiento de nuestro freno se rige bajo varias leyes físicas, eléctricas y mecánicas, las cuales se tratarán de explicar de la forma más simple posible. Según Plonus [11] tendremos reflejado una aplicación muy útil de la fuerza magnética y del principio de reacción electromagnética (ley de Lenz), también la densidad de corriente  $J$ , que está relacionado con el campo eléctrico inducido  $E$  por la ley de ohm. Pero primero que todo veamos las partes mecánicas que constituyen el freno.

### 2.9.1 Partes mecánicas y funcionales del freno electrodinámico

En toda máquina eléctrica desde el más pequeño tornillo es de importancia pero aquí haremos reseña en las partes de importancia según nuestros objetivos. Para una mejor representación en forma gráfica consultar el anexo B.

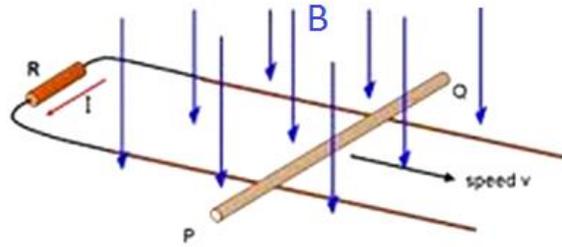
- **Bobina de estator:** Esta es la encargada de generar un campo magnético contante en el sistema, al ser alimentada por medio de una fuente de corriente directa. A la misma se le realizaron una serie de medidas como su resistencia eléctrica la cual nos dio un valor de  $13.6\Omega$ , y como dato adicional en el manual del freno dice que la corriente máxima de está es de  $10 A$ .
- **Rotor dentado:** Esta sección del freno es la que se tiene que acoplar mecánicamente

a los motores que se sometan a prueba, para que estos últimos al transfieran el movimiento de giro y el rotor comience a cortar las líneas de campo magnético generados por la bobina y de esta manera se producen corrientes inducidas en los dientes o polos con un total de 22 en su circunferencia. Es importante tener en cuenta que el hierro que existe entre las tapas de enfriamiento y el rotor es de  $1\text{ mm}$ , mientras que el entrehierro radial con el anillo de cobre es de  $4\text{ mm}$ , ver anexo B. Más adelante se estudiara como se generan las corrientes inducidas y su dirección.

- **Aro de cobre:** Esta sección es de suma importancia, ya que el mismo sirve como espaciador ente ambas tapas laterales del freno, permitiendo con ello poder lograr el ajuste tan fino que el rotor requiere.
- **Tapas de enfriamiento:** Estas se encuentran ubicadas a ambos lados del rotor con una separación de tan solo  $1\text{ mm}$  con el rotor, internamente por estas tapas circula algún tipo de refrigerante en nuestro caso sería agua. Esto se debe a que durante el proceso de frenado la energía mecánica del eje es convertida en energía calórica y esta tiene que ser extraída rápidamente del sistema para evitar sobrecalentamientos, sin embargo en cada una de estas tapas se encuentran un interruptor de temperatura que desactiva el sistema de control en caso de censar una temperatura en el refrigerante de alrededor de  $100^\circ\text{C}$ .
- **Brazo de palanca:** Este se encuentra ubicado sobre la circunferencia del estator de manera que se pueda acoplar a la celda de carga que en nuestro cargo vamos a utilizar para medir la fuerza ejercida por el estator a una distancia de  $48\text{ cm}$  del punto de eje del sistema. Dicho brazo de palanca tiene que tener otro brazo de palanca diagonalmente opuesto de manera que sirva de contrapeso para el primer brazo. Evitando con ello que la celda de carga mida valores ajenos a la fuerza ejercida por el estator.
- **Disco dentado:** Acoplado en el eje al extremo opuesto de donde se conecta mecánicamente los motores sometidos a prueba, se encuentra un disco dentado con 60 dientes, cuya profundidad, grosor y ángulo de los dientes son específicos para operar con un sensor de Hall de la marca Ono sokki de tal manera que se pueda obtener la frecuencia de la señal generada y con ello la velocidad de sistema, necesaria para el cálculo de la potencia de salida.

### 2.9.2 Ley de Lenz

Para explicar el funcionamiento de nuestro freno tenemos que entender el concepto de la ley de Lenz, con la ayuda de la siguiente imagen explicaremos la aplicación de dicha ley.



**Figura 2.11:** Representación gráfica de la ley de Lenz

Según Serway [16] y en función del caso de la figura 2.11 como la barra se está moviendo hacia la derecha implica que el área del circuito está aumentando y con ello la intensidad del campo magnético que atraviesa a éste, la ley de Lenz dice que en la barra se induce una fuerza electromotriz y producto de ella en un circuito cerrado una corriente inducida, donde el sentido de la corriente tiene que ser tal que, el campo magnético que está crea se oponga al cambio del campo magnético externo. Por lo tanto, si la barra se desplaza hacia la derecha se producirá una corriente en contra de las manecillas del reloj, de tal manera que el campo magnético producto de las corrientes inducidas traten de cancelar el campo magnético original y viceversa. Una forma de corroborar el sentido de la corriente es por medio de la regla de la mano derecha, la cual nos dice la dirección de las líneas de campo magnético en función de la dirección de una corriente determinada. Donde el dedo pulgar indica la dirección de la corriente y los demás dedos indican las líneas de campo magnético.

### 2.9.3 Corrientes de Foucault

Como vimos anteriormente cuando se da una variación de flujo magnético en un circuito, en éste se inducen una fuerza contraelectromotriz y si el circuito eléctrico es cerrado por consiguiente surgirán corrientes inducidas tal que el campo que forman se oponen al cambio del campo externo que las crea. Y según Plonus [11] éstas corrientes existen siempre y cuando la resistencia del circuito no sea infinita, por lo tanto existirá una corriente  $I$  asociada a la fuerza contraelectromotriz que dará lugar a pérdidas  $I^2R$ , conocidas como pérdidas por corrientes de Foucault, corrientes turbillonarias, corrientes parásitas y por el nombre de corrientes de Eddy, del inglés Eddy current. Ahora bien, la densidad de estas corrientes inducidas está relacionada con el campo eléctrico inducido  $E$  de la ley de ohm, que viene dada por la siguiente

$$J = \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.13)$$

Donde  $J$  tiene sentido y dirección de  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , siendo  $\mathbf{v}$  la velocidad,  $\mathbf{B}$  el campo magnético y  $\sigma$  la conductividad del material. Según Tipler [12] dichas corrientes de Foucault son perjudiciales en máquinas eléctricas y transformadores, ya que las mismas pueden producir pérdidas importantes de potencia y es de importancia reducirlas. Esto se logra

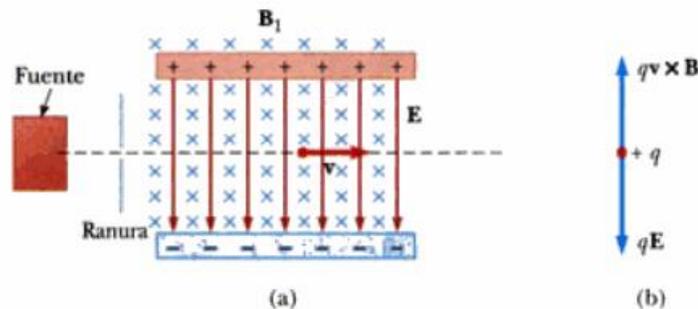
aumentando la resistencia de los posibles caminos que han de seguir las corrientes de Foucault mediante el uso de láminas aisladas, de esta manera la magnitud de las corrientes inducidas se vuelve mínima. Ahora bien, Tipler también comenta que no siempre son perjudiciales estas corrientes, ya que las mismas tienen muchísimas aplicaciones industriales y comerciales, un uso común es en la reducción de oscilaciones molestas, como balanzas mecánicas muy sensibles. Otro uso sería en tacómetros de vehículos y en sistemas de frenado, como en los vagones de los trenes de alta velocidad y como en nuestro caso donde aprovechamos el efecto de estas corrientes bajo un campo magnético, para producir una fuerza que nos proporcione un frenado en el sistema. Es por ello que el núcleo de nuestro rotor es de hierro sólido, para que las corrientes que se induzcan en él sean en magnitud lo más grandes posibles y a la vez lograr una mayor fuerza de frenado.

### 2.9.4 Fuerza de Lorentz

La fuerza de Lorentz nos explica el efecto que sufre una carga al someterse con movimiento a un campo eléctrico o magnético. Según Serway [14] una carga moviéndose a una velocidad  $\mathbf{v}$  en un campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y un campo magnético  $\mathbf{B}$  experimenta una fuerza eléctrica  $q\mathbf{E}$  y una fuerza magnética  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . La fuerza total llamada fuerza de Lorentz, que actúa sobre la carga es:

$$F = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.14)$$

La aplicación de la fuerza de Lorentz tiene muchas aplicaciones, para nuestro caso bastaría con explicar el efecto de someter una carga en movimiento a la interacción en un campo eléctrico y uno magnético. La siguiente figura nos ayudaría a explicar el fenómeno.



**Figura 2.12:** Interacción de una carga sometida a un campo eléctrico y magnético.

La figura anterior corresponde a un esquema de un selector de velocidad, el principio es que la carga por medio de las dos fuerzas que interactúan sobre ella puedan ser iguales de manera que la carga pueda viajar en línea recta con velocidad variable al cambiar la relación  $\frac{E}{B}$ .

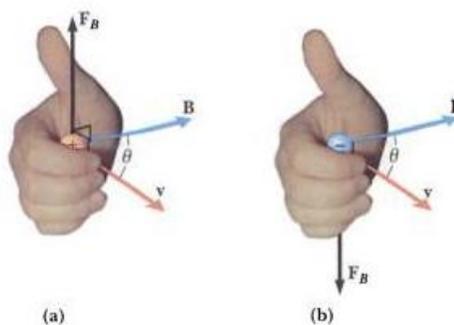
### 2.9.5 Regla de la mano derecha

La regla de la mano derecha es una herramienta muy útil para poder determinar direcciones de fuerzas producto de dos vectores, y nos permite determinar la dirección de las líneas de campo magnético producidas por una corriente en un conductor. Donde nuestro dedo pulgar indica la dirección de la corriente y los demás dedos la dirección de las líneas de campo magnético a como se muestra a continuación.



**Figura 2.13:** Determinación de dirección de líneas de campo magnético

También, a como mencionamos anteriormente nos permite determinar la dirección de la fuerza que tendrá una carga ya sea positiva o negativa, como resultado del producto vectorial de  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  cuando esta lleva una velocidad y se somete a un campo magnético. Dicha herramienta se ilustra mediante la siguiente figura

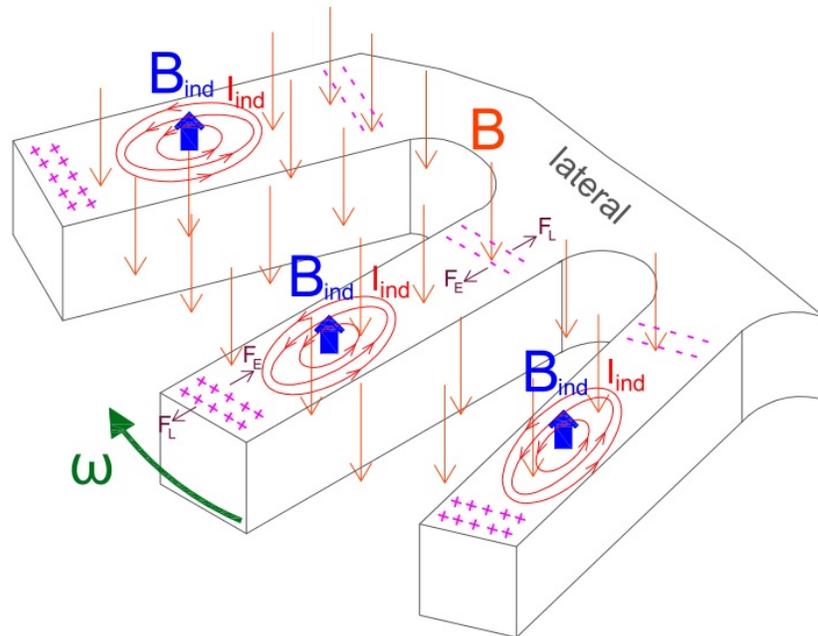


**Figura 2.14:** Determinación de dirección del producto vectorial

En la figura anterior se observa la dirección que tendría la fuerza producto del vector  $\mathbf{v}$  y el vector  $\mathbf{B}$ . Donde el dedo índice indica la dirección de la velocidad, mientras que el dedo medio indica la dirección del campo magnético. Y el dedo pulgar indicaría directamente la dirección de la fuerza para una carga positiva, mientras que para una carga negativa sería en dirección contraria a la que nos da el dedo pulgar.

## 2.9.6 Interrelación de variables físicas en proceso de frenado del sistema

Anteriormente resaltamos las partes y la teoría principal detrás del funcionamiento de nuestro freno electrodinámico. Ahora bien mediante la siguiente figura se hace referencia a los fenómenos que se presentan en la parte funcional del eje dentado de nuestro freno electrodinámico, y se explicará cómo se interrelacionan las magnitudes físicas que hacen posibles el principio de frenado en el sistema.



**Figura 2.15:** Representación de las variables físicas en el sistema

Haciendo uso de la figura anterior se explica paso a paso el principio de funcionamiento del sistema.

- Ahora que conocemos las variables que influyen en el mismo, es importante resaltar y mediante la ecuación 2.13 se afirma que, si existe ausencia de la velocidad  $[v]$  ó el campo magnético  $[B]$  en el sistema, no se inducirán corrientes en los dientes del rotor.
- Las corrientes inducidas en los dientes de rotor son corrientes de remolino o de Foucault. Pero éstas tienen que tener un sentido de giro tal que produzcan un campo magnético inducido que vaya en contra del cambio del campo que lo crea. A como se ilustra en el caso de la figura 2.15, el campo magnético inducido tiene dirección contraria al campo original. Respetando con ello la ley de la conservación de la energía.
- Por fuerzas de Lorentz las cargas positivas se acumulan en la parte externa de los dientes con fuerza en dirección radial hacia afuera, mientras que las cargas negativas se acumulan en dirección contraria con dirección radial hacia adentro a como se

muestra en la figura anterior. Y a la vez formando de esta manera un campo eléctrico en el cada uno de los dientes del rotor.

- A como se vio en la sección de fuerzas de Lorenz esta también tiene un aporte del campo eléctrico. De manera tal que el campo eléctrico formado en el diente del rotor aplica una fuerza tal sobre las cargas negativas del interior que cancela la fuerza magnética, ya que la fuerza del campo eléctrico sería en dirección radial hacia afuera en las cargas negativas. Mientras que en las cargas positivas del exterior sucede el mismo efecto, el campo eléctrico produce una fuerza sobre las cargas positivas en la dirección contraria a las fuerzas producto del campo magnético, produciendo una cancelación de fuerzas en las mismas.
- Ahora bien, los campos magnéticos son los que nos producirán el efecto de frenado ya que estos tienen dirección contraria, por lo cual tendrían la misma polaridad ya sea norte-norte y sur-sur. Creando una repulsión entre el estator y el rotor, y la ley de la fuerza magnética dice que “polos magnéticos iguales se repelen y polos magnéticos diferentes se atraen”.
- Por último la fuerza que se induce en el estator, medida a una distancia de 48 *cm* del eje de rotación, y con el producto de fuerza – distancia obtenemos el momento de torsión del sistema.
- También se explicó anteriormente el problema de calentamiento producido por las corrientes de Foucault, por lo que es imprescindible el uso del refrigerante para la puesta en marcha del sistema.

## 2.10 Hardware utilizado

A falta del sistema de control original del freno electrodinámico se procedió a la compra de una serie de equipos necesarios para poder determinar en forma conjunta la eficiencia de las máquinas eléctricas sometidas a prueba. A continuación se explica la función de cada componente adquirido para el desarrollo del proyecto

### 2.10.1 Módulo Acuvim-DL

Como parte de las mediciones que se tienen que realizar en el banco de pruebas están las características de potencia de entrada. Para ello se adquirió este módulo que permite obtener múltiples variables eléctricas, con la ventaja que cuenta con un puerto de comunicación *RS – 485* permitiendo el envío de datos al computador por medio de un protocolo de comunicación Modbus RTU. La información relevante al protocolo de comunicación, forma de direccionamiento, configuración que se puede ver con más detalle en los manuales técnicos del fabricante [10].

## Protocolo Modbus

El modo de transmisión define la estructura de datos dentro de un marco y las reglas que se utilizan para transmitir los datos. La configuración del modo Modbus RTU se define en la siguiente tabla.

Sistema de codificación	8 bits binario
Bit de inicio	1
Paridad	Acuvim-AI/BL/CL/DL: no paridad; Acuvim-EL/KL:NON1/NON2/Par/Impar
Bit de parada	1 o 2
Comprobación errores	verificación CRC

**Tabla 2.1:** Configuración de Protocolo Modbus RTU

Por otra parte tenemos la estructura del formato de datos representado en la siguiente tabla.

Dirección	Función	Datos	Verificación
8-bits	8-bits	$N \times 8$ -bits	16-bits

**Tabla 2.2:** Estructura del formato de datos

La comunicación por Modbus es una comunicación de un solo Maestro con múltiples esclavos donde el campo de **dirección** de la estructura del mensaje contiene 8 bits y en estos se representan las direcciones válidas para los dispositivos esclavos, que tienen un rango de 0 – 247 decimal.

Mientras que el campo de función contiene el código de función por ejecutar y los códigos válidos están en el rango de 1 – 255 decimal.

Mientras en campo de datos contiene  $N$  grupos de dos dígitos hexadecimales que representan la información enviada por el esclavo después de una solicitud.

Y en el campo de verificación de errores en cada mensaje se incluye esta información basado en el método de verificación de redundancia cíclica (*CRC*) del inglés Cyclical redundancy Check.

Es de suma importancia conocer la dirección de los registros donde se encuentran los datos de las mediciones realizadas por el dispositivo, para poder acceder a estos y lograr procesar los mismos de acuerdo a las necesidades del proyecto.

En la siguiente tabla se muestra las direcciones de los registros con sus respectivas variables físicas de medición.

Dirección memoria	Parámetro	Rango	Tipo dato	Tipo acceso
130H	Frecuencia $F$	4500 ~ 6500	palabra	R
131H	Tensión Fase $V_1$	0 ~ 65535	palabra	R
132H	Tensión Fase $V_2$	0 ~ 65535	palabra	R
133H	Tensión Fase $V_3$	0 ~ 65535	palabra	R
134H	Tensión Línea $V_{12}$	0 ~ 65535	palabra	R
135H	Tensión Línea $V_{23}$	0 ~ 65535	palabra	R
136H	Tensión Línea $V_{31}$	0 ~ 65535	palabra	R
137H	Corriente Fase ( <i>Línea</i> ) a $I_1$	0 ~ 65535	palabra	R
138H	Corriente Fase ( <i>Línea</i> ) a $I_2$	0 ~ 65535	palabra	R
139H	Corriente Fase ( <i>Línea</i> ) a $I_3$	0 ~ 65535	palabra	R
13AH	Corriente Línea Neutral $I_n$	0 ~ 65535	palabra	R
13BH	Potencia de fase $P_a$	-32768 ~ 32767	entero	R
13CH	Potencia de Fase $P_b$	-32768 ~ 32767	entero	R
13DH	Potencia de Fase $P_c$	-32768 ~ 32767	entero	R
13EH	Potencia del sistema $P_{sum}$	-32768 ~ 32767	entero	R
13FH	Potencia reactiva de fase $Q_a$	-32768 ~ 32767	entero	R
140H	Potencia reactiva de fase $Q_b$	-32768 ~ 32767	entero	R
141H	Potencia reactiva de fase $Q_c$	-32768 ~ 32767	entero	R
142H	Potencia reactiva del sistema $Q_{sum}$	-32768 ~ 32767	entero	R
143H	Potencia aparente del sistema $S_{sum}$	0 ~ 65535	palabra	R
144H	Factor de potencia de fase $PF_a$	1000 ~ 1000	entero	R
145H	Factor de potencia de fase $PF_b$	-1000 ~ 1000	entero	R
146H	Factor de potencia de fase $PF_c$	-1000 ~ 1000	entero	R
147H	Factor de potencia del sistema	-1000 ~ 1000	entero	R
148H	Factor de desbalance de tensión	0 ~ 1000	palabra	R
149H	Factor de desbalance de corriente	0 ~ 1000	palabra	R
14AH	Carga natural RT ( $L/C/R$ )	76/67/82	palabra	R
14BH	Potencia aparente de fase $S_a$	-32768 ~ 32767	entero	R
14CH	Potencia aparente de fase $S_b$	-32768 ~ 32767	entero	R
14DH	Potencia aparente de fase $S_c$	-32768 ~ 32767	entero	R
14EH	Reservado			
14FH	Demanda potencia aparente $S_{Dem}$	-32768 ~ 32767	entero	R
150H	Demanda potencia $P_{Dem}$	-32768 ~ 32767	entero	R
151H	Demanda potencia reactiva $Q_{Dem}$	-32768 ~ 32767	entero	R
152H	Demanda corriente de fase $A$	0 ~ 65535	palabra	R
153H	Demanda corriente de fase $B$	0 ~ 65535	palabra	R
154H	Demanda corriente de fase $C$	0 ~ 65535	palabra	R
155H	Reservado			

**Tabla 2.3:** Dirección de los registros de medición

Ahora bien la relación que existe entre entre los valores numéricos de los registros del

Acuvim-DL y las variables físicas se muestra en la siguiente tabla donde  $R_x$  representa el valor numérico del registro,  $PT_1$  y  $PT_2$  son las relaciones de transformación de tensión primaria y secundaria respectivamente, mientras  $CT_1$  y  $CT_2$  son las relaciones del transductor de corriente primaria y secundaria respectivamente.

Parámetro	Relación	Unidades
Tensión $V_1, V_2, V_3, V_{12}, V_{23}, V_{13}$	$U = R_x \times (PT_1/PT_2) / 10$	Volt(V)
Corriente $I_1, I_2, I_3, I_n$	$I = R_x \times (CT_1/CT_2) / 1000$	Amp (A)
Potencia $P_a, P_b, P_c, P_{sum}$	$P = R_x \times (PT_1/PT_2) \times (CT_1/CT_2)$	Watt(W)
Potencia Reactiva $Q_a, Q_b, Q_c, Q_{sum}$	$Q = R_x \times (PT_1/PT_2) \times (CT_1/CT_2)$	var
Potencia Aparente $S_a, S_b, S_c, S_{sum}$	$Q = R_x \times (PT_1/PT_2) \times (CT_1/CT_2)$	VA
Factor de potencia $PF_a, PF_b, PF_c, PF_{sum}$	$PF = R_x / 1000$	NA
Frecuencia	$F = R_x / 100$	Hz
Carga natural (R/L/C)	76/67/82	NA
Factor desbalance Tensión o Corriente $U_{Desbal}, I_{Desbal}$	$Desbal = (R_x / 1000) \times 100\%$	NA

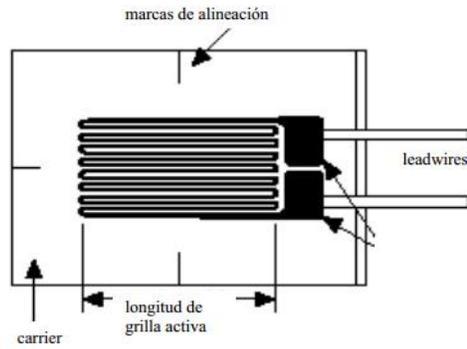
**Tabla 2.4:** Relación de transformación de registros

### 2.10.2 Celda de carga

Según Cañaverl [1] la celda de carga es un instrumento electromecánico, basado en la deformación mecánica que hace variar el valor de una resistencia interna en el dispositivo. Esta resistencia recibe el nombre de galga extensiométrica y se encuentra junto con otras resistencias o galgas, formando un puente Wheastone. El cual es alimentado con una tensión de corriente directa entre dos de sus terminales, obteniendo en los otros dos terminales en forma diferencial una tensión variable en el orden de milivoltios en forma lineal con la carga y la tensión de alimentación. Dichas celdas de cargas son fabricadas de acuerdo a la aplicación ya que estas van desde aplicaciones médicas hasta aplicaciones de industria pesada. Estos dispositivos son comúnmente utilizados para medir peso, pero su aplicación real es medir fuerza de tensión o compresión, y en nuestro caso la utilizaremos para medir la potencia de salida de las máquinas eléctricas.

#### Galga extensiométrica

Según Sosa [19] este es un dispositivo de medición universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas como pueden ser la presión, carga, torsión, deformación, posición, etc. Se entiende por strain o esfuerzo a la cantidad de deformación de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él. El parámetro que mide la galga puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión). Y para medir esfuerzo se utilizan comunmente una galga extensiométrica, la cual esta formada de un cable muy fino o papel aluminio colocado en forma de grilla como se muestra en la siguiente figura.



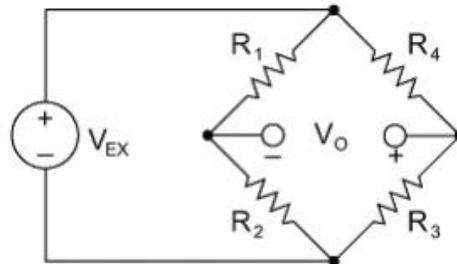
**Figura 2.16:** Galga extensiométrica metálica

Estas galgas tienen valores nominales de entre  $30\ \Omega$ – $3000\ \Omega$ , con  $120$ ,  $350$  y  $1000\ \Omega$  los valores más comunes. Y es de tener en cuenta que la variación de resistencia de estos dispositivos es muy pequeño alrededor de  $0.1\%$  es decir para una galga de  $120\ \Omega$ , la variación será de apenas  $0.12\ \Omega$ . Por ello es que dependiendo de la aplicación se utiliza arreglos de éstas en puentes de Wheatstone para una mayor variación de tensión y compensación de temperatura.

### Puente Wheatstone

Para la utilización de galgas extensiométricas por lo general siempre se utilizan en configuración de puente con excitación externa. En general el puente de Wheatstone consiste en cuatro brazos resistivos con una excitación de tensión,  $V_{EX}$ , que se aplica a través del puente. La tensión de salida del puente,  $V_o$ , es igual a

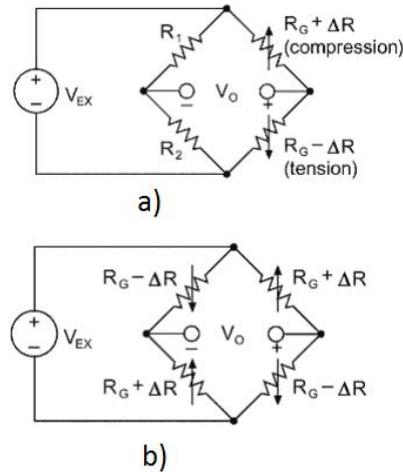
$$V_o = \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \times V_{EX} \quad (2.15)$$



**Figura 2.17:** Configuración básica del puente de Wheatstone

Y se dice que el puente de Wheatstone está balanceado cuando la tensión de salida  $V_o = 0$ , y esto implica que  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$ , por lo tanto al colocar una galga extensiométrica en cualquier posición de las resistencias anteriores producirá un desbalance del sistema y con ello una salida de tensión proporcional al esfuerzo de la galga. Estas mismas son susceptibles a la

temperatura, pero este problema se soluciona usando una configuración de medio puente, es decir con dos galgas, o de puente completo con cuatro galgas a como se muestra en la siguiente figura



**Figura 2.18:** Compensación en puente Wheatstone.

a) Configuración de medio puente b) Configuración de puente completo

### 2.10.3 Microcontrolador

En este caso utilizaremos el PIC18F4550 cuyo fabricante es microchip [9] y el mismo nos proporciona las hojas de datos y la información pertinente al dispositivo. Este pic nos permitirá una comunicación USB con la computadora, atención de interrupciones externas, mediciones de valores analógicos y también es capaz del control de salidas digitales. Éste lo utilizaremos para determinar la última variable necesaria para la medición de eficiencia en nuestro sistema que sería la velocidad de giro del motor sometido a prueba. Para crear el código de ejecución del pic se utilizara el software de programación CCS el cual esta basado en un lenguaje de programación en C.

### 2.10.4 OC2-100

Este elemento forma parte de los elementos de control del sistema, ya que esta tarjeta es la encargada de suplir la tensión de corriente directa necesaria para la alimentación de la bobina del freno electrodinámico. Como características generales esta permite suplir tensiones entre  $0 - 90\text{VDC}$  con una corriente máxima de salida de  $8\text{A}$ . Para mayor información consultar hoja de datos del fabricante [13].



**Figura 2.19:** Tarjeta de control de tensión para bobina de freno electrodinámico

### 2.10.5 Computador

En nuestro caso se utiliza un computador de uso común, donde procesaremos los datos de los tres dispositivos ya antes mencionados. Sin embargo y a pesar de que el módulo Acuvim-DL y la celda de carga cuentan cada uno con un software específico, esto no nos sirve de nada, ya que cada uno de los datos por separado no proporcionan mayor información de acuerdo a nuestro objetivo que es lograr medir eficiencia.

Por lo tanto para lograr integrar todos los datos se decidió utilizar LabVIEW 2012 por la disponibilidad del mismo el cual es un software de programación gráfico, de la firma National Instruments [6]; que por su versatilidad, herramientas y fácil uso, permite mejorar y reducir los tiempos en el desarrollo de aplicaciones.

# Capítulo 3

## Antecedentes

### 3.1 Método de pruebas en máquinas eléctricas

El presente proyecto nace de la necesidad que presenta la empresa cuando se tienen que hacer pruebas de funcionamiento a los motores eléctricos con los que trabajan diariamente. En RENAME S.A se trabaja con equipo de alta calidad y personal muy calificado, los cuales reparan, reconstruyen y prueban motores eléctricos monofásicos, trifásicos, de corriente directa e inclusive todo tipo de compresores. Antes de salir el motor de la empresa como directriz interna se prueba el motor después del proceso al que fue sometido, para verificar el adecuado funcionamiento del mismo. Pero dicha prueba se realizaba en vacío (sin carga en el eje), lo cual limita la medición de las características reales de funcionamiento de la máquina.

Sin embargo, muchas veces se ven en la obligación de realizar las pruebas en motores a plena carga teniendo que frenar el eje con dos reglas de madera mediante fricción, lo cual lleva a muchas limitantes en cuanto a constancia de la carga y tiempo de prueba. Una forma de solucionar este problema es mediante un tipo de freno, la empresa se encargó de buscar un sistema el cual fuera funcional para la tarea que se necesitaba realizar, y una vez el sistema se encuentre en marcha aprovechar las múltiples pruebas que se podrían desarrollar a las máquinas eléctricas para montar un pequeño laboratorio de pruebas y medición.

### 3.2 Condiciones y origen del freno electrodinámico proporcionado

El sistema que se proporcionó para el proyecto fue un freno electrodinámico de la marca BORGHI & SAVERI, cuyo principio de funcionamiento es por corrientes parásitas o corrientes de Foucault de tipo SE, el mismo formaba parte de los activos del ITCR. No obstante, después que el equipo no cumplió con el objetivo por el cual fue adquirido se

desechado después de muchos años de estar quitando campo en las bodegas, eliminándolo del control de activos. Por un largo periodo el sistema en su totalidad estuvo llevando agua y sol, después fue rescatado por el profesor Arnoldo Rojas Coto del ITCR. Sin embargo, cuando procedimos a la ubicación del freno, fue una sorpresa ver las condiciones de abandono del mismo, las cuales se muestran en las figuras [2.1,2.2].



**Figura 3.1:** Estado de abandono de freno electrodinámico parte frontal



**Figura 3.2:** Estado de abandono de freno electrodinámico parte lateral

Posteriormente se trasladó la máquina a las instalaciones de RENAME en La Lima, Cartago, con el fin de realizar pruebas y mantenimiento al equipo.

### 3.3 Proceso de restauración del freno electrodinámico

A continuación se enumeran las tareas que se realizaron durante el proceso de restauración del sistema.

1. Primeramente se procedió a buscar información sobre el sistema consiguiendo unos manuales que se encontraban en italiano, correspondiente a la nacionalidad de la máquina, donde explican el principio de funcionamiento y los diagramas de control, a estos últimos físicamente les faltaban componentes y ya tenían reparaciones en las tarjetas, por lo cual se tomó la decisión de desechar por completo los equipos de control y medición. Un factor que llevó a esta decisión fue la apreciación de corrosión y deterioro de los componentes debido a las condiciones de abandono antes planteadas.
2. Parte esencial del freno es el giro del mismo tanto rotor como estator, gran alegría fue saber que el sistema giraba sin mayor esfuerzo, evidenciando con ello el buen estado aparente de los roles.
3. El siguiente paso fue buscar los componentes principales para realizar las medidas de potencia de salida, es decir, el medidor de frecuencia y la celda de carga. Para el primer componente del sistema previamente mencionado se tiene un detector de rotación magnetoeléctrico de la marca Ono Sokki, donde se necesitó de un osciloscopio para detectar si el dispositivo funcionaba correctamente ya que al girar una rueda dentada frente al mismo se produce una onda de salida cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de rotación. Y en el caso del segundo componente, (en este caso) la celda de carga, cuya ubicación era en uno de los brazos del estator, se nos comentó que fue dañada y que la misma estaba únicamente como muestra.
4. Por último y quizás lo más importante era probar la bobina de corriente directa ubicada en el estator, la misma se debe encargar de generar el campo magnético necesario para producir el efecto de frenado. Cuando se fueron destapando los terminales de conexión y el cable de alimentación que se dirige al interior de la bobina estos se arrancaban podridos debido a la corrosión, por lo cual se tomó la decisión de abrir por completo el sistema para realizar una nueva conexión de alimentación a la bobina lo más cercano que se pudiera a las pegas del alambrado de cobre, es decir, lo más cerca posible sin tener que quitar la protección de barniz en el que se encuentra la bobina.
5. También como parte del sistema tiene que existir un sistema de enfriamiento para drenar la energía en forma de calor que se genera debido a las corrientes de Foucault. En el estator a ambos lados del mismo se tiene una entrada de agua en la parte inferior y una salida en la parte superior, con el fin de que exista un flujo continuo de refrigerante mientras el sistema esté en funcionamiento, dicho flujo tiene que estar dado a través de bombas de agua, y en este caso las bombas de agua no existían y los dos acoples de las salidas de agua se tuvieron que fabricar en el taller de mecánica de precisión de la empresa por la inexistencia de estas.
6. Este sistema también cuenta con accesorios para la protección del mismo. Por ejemplo, cuenta con un interruptor de temperatura en cada una de las tapas del estator para controlar la temperatura del refrigerante, dichos interruptores al censar una temperatura de alrededor de  $100^{\circ}\text{C}$  hacen el cambio de NC (Normally Close) a NO (Normally Open), interrumpiendo de esta forma el paso de corriente al sistema de control deteniendo el proceso. También cuenta con un presostato de agua el cual

censa si existe agua fluyendo en el sistema y funciona de la siguiente manera, al censar la presión de agua cambia su estado de NO a NC permitiendo el paso de corriente en el sistema de control. Ambos dispositivos fueron probados independientemente, los primeros calentando agua y con la ayuda de un termómetro se comprobó el cambio en los terminales de salida, en el caso del presostato este se le conecto una entrada de agua verificando el cambio en los terminales de conexión.

7. Cabe resaltar que el proceso de reconstrucción y mantenimiento del sistema lo realicé personalmente con ayuda de los compañeros de la empresa, ya que estos no iban a tener tiempo para realizar esta tarea que era ajena a sus funciones. En el mismo proceso de restauración se quitaron las tapas del estator, los brazos donde va la celda de carga y el contrapeso de la misma, los roles fueron limpiados y engrasados, y se le dio una limpieza general a la base del sistema y cada parte del mismo, aplicando una capa de primer y una capa de pintura automotriz para mejorar la estética y protección del sistema.

El armar el sistema fue bastante laborioso, debido a inconvenientes del proceso sufrí un accidente donde me maje dos dedos de la mano izquierda sufriendo una fisura en una de los huesos del dedo, y rompimiento de tejido en donde me tuvieron que suturar produciendo una incapacidad por 22 días. En consecuencia a esto y a pesar de que todas las partes estaban bien almacenadas el armado del sistema en su totalidad fue un rompecabezas pero al final se logró de manera excelente, pero claro está que hizo falta un respaldo mediante fotografías de la posición de las partes. Y la primera vez que se armó el sistema no se le pudo dar el ajuste al rotor ya que este es de apenas de 1 *mm*, por lo cual se procedió a desarmarlo, estudiar cómo dar el ajuste y por último realizar el montaje de la forma correcta. Para más detalle del proceso de restauración del equipo consultar el Anexo A, donde se muestran una serie de figuras que ilustran el proceso de reconstrucción del sistema y las partes internas del sistema.

# Capítulo 4

## Implementación del banco de pruebas máquinas eléctricas

En la presente sección se muestra como se abordó el problema y los diseños hechos para alcanzar los resultados esperados de acuerdo a los objetivos planteados. Siendo así a continuación se muestra un diagrama de bloques que representa el conjunto del banco de pruebas.

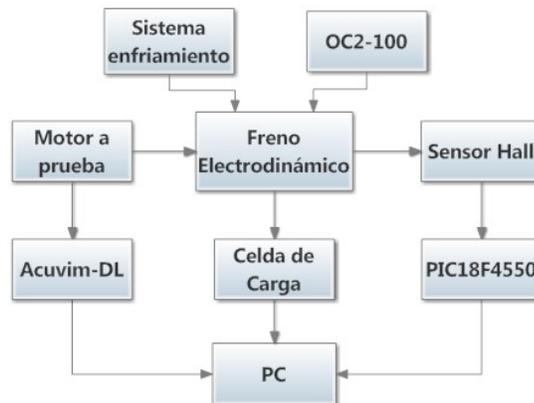


Figura 4.1: Diagrama general del sistema

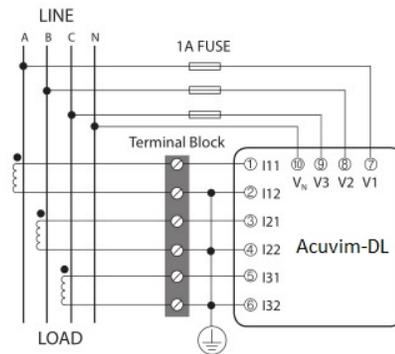
### 4.1 Variables de entrada

En esta sección como se mencionó en el marco teórico lo que se necesita conocer es la potencia de entrada, pero al tratarse de sistemas trifásicos necesitamos los valores de tensión, corriente, y factor de potencia de cada una de las fases. Y es importante que la fuente de alimentación de los motores, sea lo más simétricamente posible para reducir la influencia del desbalance en las líneas (amplitudes de las fases).

Por otro lado para reducir los porcentajes de error y evitar el desarrollo de un sistema que realice estas mediciones, donde sería necesario el uso de transductores de tensión y

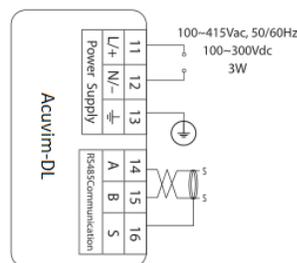
corriente, agregando a esto la frecuencia de muestreo necesaria para poder determinar el factor de potencia en cada una de las fases, lo cual implicaría con ello un excesivo costo en los transductores y el equipo de muestro, sin tomar en cuenta el tiempo de desarrollo. Por ello se decidió la compra del módulo Acuvim-DL, el cual es un sistema compacto que internamente es capaz de realizar estas mediciones y algunas otras, las cuales se señalan en el marco teórico mediante la tabla 2.3. En cuanto a la exactitud y precisión de las mediciones, para nuestra primer etapa del proyecto nos da una muy buena referencia de las mediciones, ya que el sistema utiliza 16 bits de exactitud en las mediciones, con una resolución de uno o dos valores decimales dependiendo de las mediciones.

Ahora bien el sistema del Acuvim-DL permite diferentes tipos de conexión ya sea midiendo sistemas monofásicos a una o dos líneas, o para nuestro caso sistemas trifásicos a dos líneas si el sistema es balanceado o a tres líneas, siendo esta última configuración la que seleccionamos ya que nuestra fuente de energía eléctrica es directamente la provista por la JASEC, cuyas líneas tienen un alto grado de desbalance. El diagrama de cableado de la sección de potencia se muestra a continuación mediante la siguiente figura.



**Figura 4.2:** Diagrama conexión Acuvim-DL

Mientras que la sección de alimentación y el puerto de comunicación se muestra a continuación.



**Figura 4.3:** Diagrama conexión alimentación y datos del Acuvim-DL

De las figura anterior [4.2,4.3] podemos resaltar puntos importantes, que fueron decisivos en la elección de este dispositivo.

- **Conexión directa para medir tensión:** Como se ve en la figura las líneas de tensión se conectan directamente al dispositivo a través de unos fusibles de protección, esto es importante ya que los motores que se estarán probando operan a tensiones de 480VAC trifásico máximo, y el módulo Acuvim-DL permite un máximo en tensión de entrada de 400VLN/690VLL trifásico; en caso contrario si fuese mayor la tensión de operación del sistema se necesitaría el uso de transformadores de potencial (PT del inglés Potential Transformer), pero este no es nuestro caso.
- **Medición de corriente:** Para poder medir la corriente de las líneas a como se muestra en la figura 4.2 es necesario el uso de transformadores de corriente (CT del inglés Current Transformers). Con la ventaja que estos transformadores comúnmente tienen como salida estándar 5A, sin embargo el módulo Acuvim-DL permite la conexión de CT con salida de 1A. Mientras que el valor de CT en el primario depende del valor que se desee en la aplicación en nuestro caso se adquirieron CT de 100:5, , aunque existen en una amplia variedad 50:5, 400:5, entre otros.
- **Alimentación del módulo:** Esta conexión se facilita en gran medida ya que la entrada de alimentación tiene un rango de 100 415Vac, 50/60Hz, a como se muestra en la figura 4.3, permitiendo la alimentación directamente desde una de las líneas de potencia, sin la necesidad de un transformador de instrumentación.
- **Comunicación PC:** A pesar de que existen otros instrumento similares a éste, el mismo cuenta con la ventaja de permitir el envío de datos a través del puerto de comunicación RS-485, permitiéndonos unificar los datos de éste con las demás variable que se necesiten obtener.

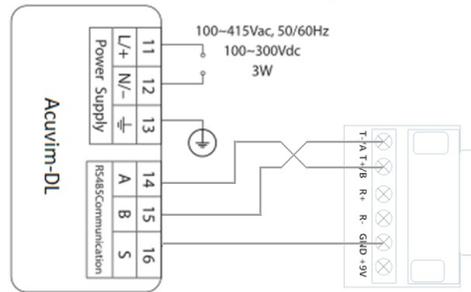
Sin embargo, un inconveniente con el puerto de comunicación RS-485 es la disponibilidad de éste en las computadoras actuales, las cuales tienen en su gran mayoría únicamente puertos USB, y a lo mucho un puerto serial RS-232. Por este motivo fue necesario adquirir un convertidor de RS-485 a USB, el cual se muestra a continuación.



**Figura 4.4:** Convertidor RS-485 a USB

Una vez adquirido el convertidor se realizó la conexión, y se hicieron pruebas de funcionamiento con el inconveniente de que no se lograba la comunicación con la PC, a pesar que en el display del Acuvim-DL se podían observar todas las mediciones realizadas. El motivo del problema era la conexión entre el módulo Acuvim-DL y el convertidor RS-485 a USB, ya que en ambos componentes están marcadas las señales A y B, por lo que se realizó la conexión A-A y B-B respectivamente, sin embargo y después de realizar unas pruebas se comprobó que la rotulación estaba mal hecha; de manera que la conexión se hi-

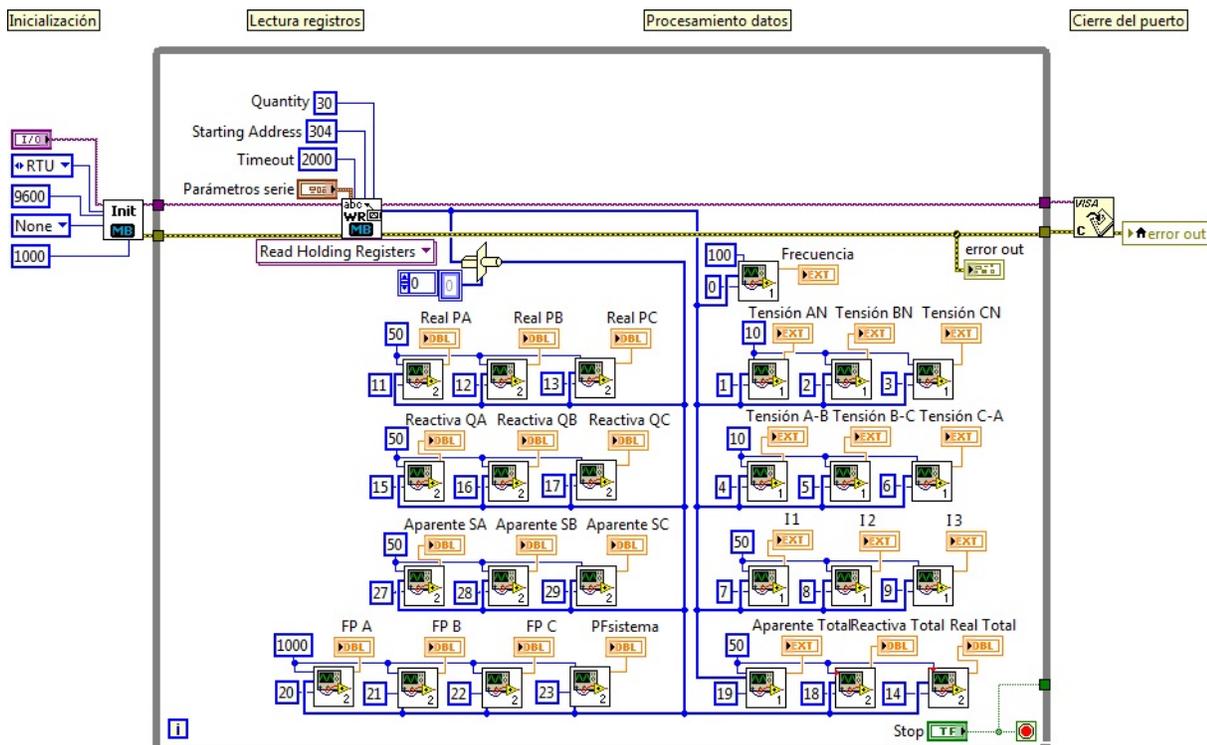
zo A-B y B-A respectivamente a como se muestra en la figura 4.5, después de este cambio la comunicación entre la PC y el módulo Acuvim-DL se dio en perfectas condiciones. Tomando en cuenta que primero instaló el controlador del convertidor, y en posteriormente se hicieron pruebas con el software propietario del dispositivo.



**Figura 4.5:** Comunicación entre convertidor RS-485 y Acuvim-DL

Una vez realizadas las pruebas de funcionalidad, se procedió al desarrollo del software en LabVIEW, y mediante la siguiente imagen se muestra el desarrollo hecho para la sección de adquisición de datos del módulo Acuvim, la cual se divide en 4 partes.

- Inicialización de puerto
- Lectura de registros
- Procesamiento de datos
- Cierre de puerto



**Figura 4.6:** Programación en LabView del módulo Acuvim

La ventaja del uso de LabVIEW es su amplia versatilidad y uso de librerías, y en este caso se descargó la librería de NI Modbus la cual permite una simple comunicación y manejo del protocolo. Ahora bien, con la ayuda de la figura anterior 4.6 podemos observar que en la sección de inicialización se selecciona el modo RTU con el cual es compatible el Acuvim, ya que el protocolo ModBUS permite a la vez la comunicación en modo ASCII. De igual manera se selecciona un Baud Rate de 9600, aunque también es posible utilizar las velocidades de 1200, 2400, 4800, 19200 y 38400. También es importante conocer que no se utiliza paridad, ni control de flujo, ya que el modelo Acuvim-DL no tiene incorporada esta funcionalidad.

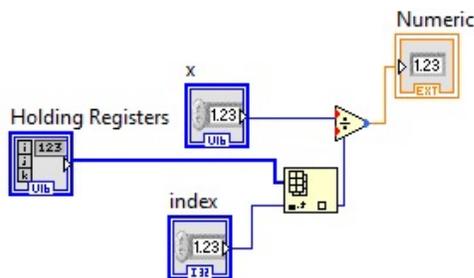
Mientras tanto en la sección de lectura de registros se utiliza el bloque de la librería "WR", con la función "Read Holding Registers", la cual es una función establecida en el protocolo, al igual que las funciones "Read Coils, Read Discrete Inputs, Read Input Registers, Write Single Coin, Write Single Registers, entre otras". Pero en nuestro caso la función Read Holding Registers cuyo código de función es 03, nos permite la lectura simultanea de una cantidad  $N$  de registros, a partir de una dirección inicial dada. Ahora bien, gracias al manual del fabricante sabemos que la dirección de inicio de las variables medidas se encuentra en la posición de memoria  $130H$  lo cual se puede verificar en la tabla 2.3, y se hace una lectura de 30 registros, ya que hasta éste último registro es que se encuentran los datos de importancia para nuestro proyecto. Como parte de los datos al bloque "WR" se le debe dar la dirección del dispositivo al que se va a realizar la lectura, ya que aunque solo tenemos un dispositivo conectado al mismo puerto, se podrían tener conectados inclusive un máximo de 248 dispositivos.

En la sección de procesamiento de datos, tenemos subVIs



**Figura 4.7:** Representación gráfica de un SubVI

Estos bloques llamados subVI son una función de LabVIEW para reutilizar código y obtener una programación ordenada, los cuales, dentro de los mismos se encuentran albergados secciones de código fuente. En la sección de procesamiento se utilizó para reutilizar el siguiente código.



**Figura 4.8:** Contenido de subVI 1

Esta sección de código se utiliza para convertir el valor numérico que entrega el Acuvim en el valor de la magnitud física correspondiente al registro que se este accediendo mediante el index, cuyo index corresponde a la posición del arreglo que se leyó con la ayuda de la función Read Holding Registers. Mientras que el valor de la casilla x de la figura 4.8 corresponde al valor numérico por el que tenemos que dividir el dato que entrega en Acuvim de acuerdo a la relación que se obtiene según los parámetros de cada registro representados en la tabla 2.4, cuyas variables seria las relaciones de los transductores de corriente CTs y las relaciones de las transformaciones de potencial PT.

Ahora, si se observa con cuidado la figura 4.6 se puede distinguir que existen dos canales de flujo de datos de salida, esto debido al formato de los registros ya que algunos son de tipo "entero" y los otros de tipo "palabra", es decir, valor representados en 16 bits con signo y sin signo respectivamente. Por último, se debe de cerrar el puerto de comunicación para poder realizar nuevamente el proceso y con ello una nueva lectura de datos provenientes del modulo Acuvim.

Sin embargo, el usuario final del sistema tiene que tener un fácil acceso y una forma cómoda de leer los datos durante las pruebas realizadas. Por ello es que se realizó la siguiente interfaz gráfica con las mismas herramientas de LabVIEW, para que se puedan visualizar en tiempo real las variables necesarias e importantes para el desarrollo del sistema.

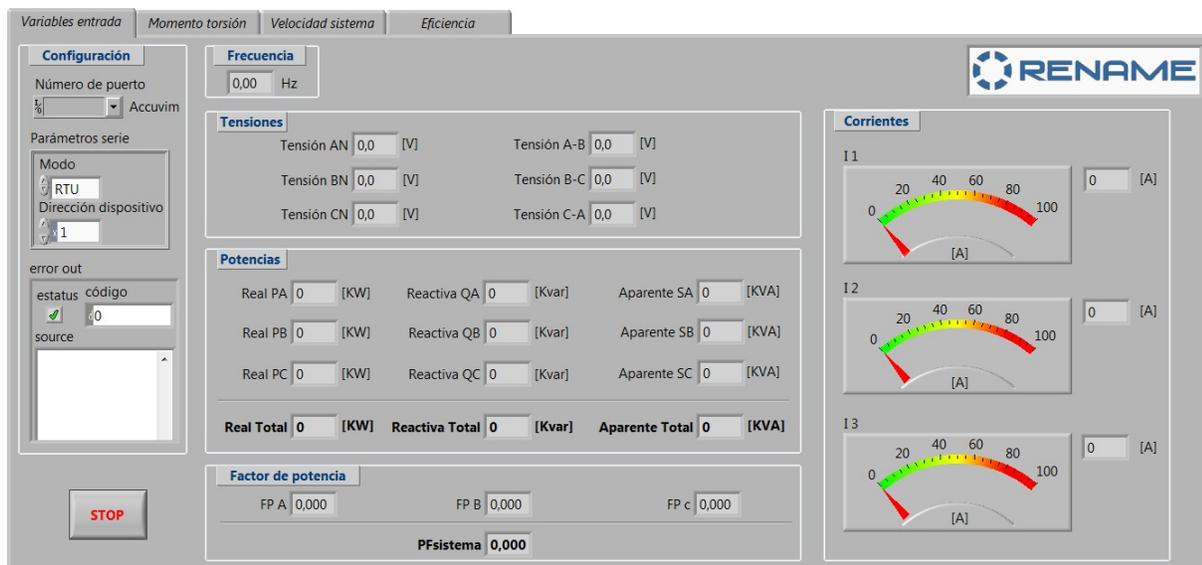


Figura 4.9: Interfaz gráfica para variables de entrada

## 4.2 Momento de torsión

Tal como se explicó en el marco teórico, el momento de torsión es la fuerza que se ejerce en un punto a una distancia "r" del punto de rotación. Para la aplicación del banco de pruebas de máquinas eléctricas se utiliza una celda de carga de la marca Interface

Force [4], con una capacidad máxima de 5000 Newton y un acondicionador de señal de la misma firma, el cual se encarga de convertir la señal analógica proveniente del puente de Wheatstone en una señal digital, a parte del envío del valor medido por medio de un puerto USB a la computadora, sin embargo, cabe mencionar que utiliza un protocolo serie RS-485; por lo tanto, el computador detecta el dispositivo como puerto COM virtual, y los parámetros de la comunicación serían un Baud rate de 115200, 8 bits de datos, un bit de parada, y sin paridad. Toda la comunicación se maneja por paquetes de telegramas en lugar de bytes individuales. Dichos telegramas son variables en tamaño en función del tipo solicitud y la respuesta.

Formato de telegrama:

- STX (Start Text)
- Byte de comando
- RX (Dirección del receptor)
- TX (Dirección del Transmisor)
- Número de parámetros en bytes
- Parámetros (opcional)
- Suma de verificación
- Suma de pesos de verificación

Siendo así, cada telegrama contiene dos direcciones el del transmisor y el receptor, dependiendo de la dirección en que se de la comunicación los valores cambiarán entre sí. Pero se debe considerar que el Maestro tiene que tener la dirección 255 mientras que los dispositivos pueden tener direcciones entre 1 y 249. Mientras que los comandos permitidos se muestran en la siguiente tabla

Comando	Código función	Valor ASCII
SCMD_ACK	0×06	0×06
SCMD_NACK	0×15	0×15
SCMD_Hello	0×40	'@'
SCMD_ReadRaw	0×41	'A'
SCMD_ReadStatus	0×42	'B'
SCMD_ReadStatusShort	0×43	'C'
SCMD_ReadConfig	0×44	'D'
SCMD_WriteFullStroke	0×45	'E'
SCMD_WriteConfig	0×46	'F'
SCMD_ReadConfigHalfBlock	0×48	'H'
SCMD_WriteConfigHalfBlock	0×49	'I'
SCMD_RestartDevice	0×4B	'K'
SCMD_GotoSpecialMode	0×5a	'Z'

**Tabla 4.1:** Comandos permitidos por dispositivo de celda de carga

Ahora bien como el dispositivo ya se encuentra configurado, y para evitar la susceptibilidad a que sea dañado por una mala configuración debido a una errónea operación del

operario. Únicamente es suficiente el uso de la función ReadRaw cuyo código de función es 0×41 y la secuencia de bytes para esta instrucción se muestra a continuación.

Comando	Dirección RX	Dirección TX	Número de parámetros	Parámetros
Solicitud lectura inmediata	1	255	0	
Respuesta lectura inmediata	255	1	9	ver tabla 4.3

**Tabla 4.2:** Estructura de la función lectura fila

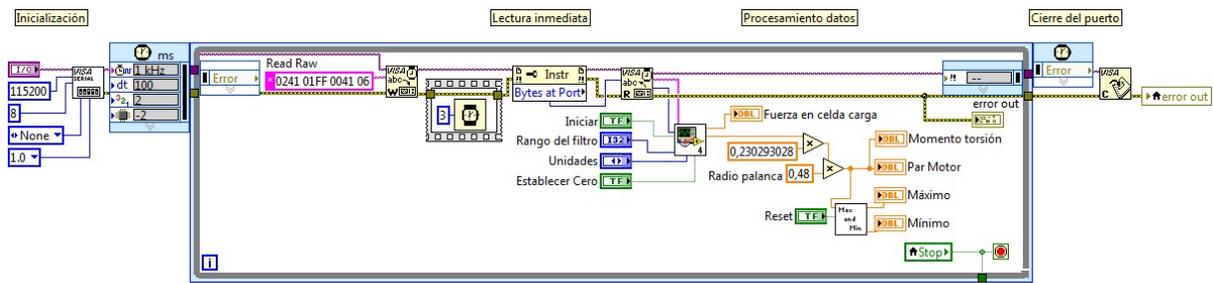
En la tabla anterior 4.2 se puede observar que para la función de lectura inmediata el dispositivo devuelve 9 parámetros o bytes correspondiente a los valores de las mediciones realizadas, los mismos se explican a continuación y la relación tienen cada uno de los parámetros con los canales de medición del hardware mediante la siguiente tabla 4.3.

Valor de retorno para función de Lectura inmediata		
Offset	Valor	Comentario
0	Inmediato 0 byte alto	Valor de medición del canal 0 Rango:
1	Inmediato 0 byte bajo	Dispositivo 12 bits: ±16383 (0×3FFF) Dispositivo 16 bits: ±32767 (0×7FFF)
2	Inmediato 1 byte alto	Valor de medición del canal 1 Rango:
3	Inmediato 1 byte bajo	Dispositivo 12 bits: ±16383 (0×3FFF) Dispositivo 16 bits: ±32767 (0×7FFF)
4	Calibrado 0 byte alto	Valor calibrado del canal 0
5	Calibrado 0 byte bajo	rango es ±32767 (0×7FFF)
6	Calibrado 1 byte alto	Valor calibrado del canal 1
7	Calibrado 1 byte bajo	rango es ±32767 (0×7FFF)
8	Bandera de estructura completa	1 si estructura esta completa, si no 0

**Tabla 4.3:** Significado de los parámetros de respuesta a la función lectura inmediata

El valor calibrado y de medición de los canales se manejan en el formato de 16 bits con signo, ya que la celda de carga es capaz de medir tanto contracción como expansión. Y es importante marcar que el hardware acondicionador de señal se presenta en dos versiones una de dos canales y el otro de un canal simple, siendo este último el hardware que se adquirió para el desarrollo del banco de pruebas de máquinas eléctricas. Por lo tanto el valores de la medición obtenida mediante la respuesta de la función lectura inmediata será el mismo en el canal 0 como en el canal 1.

Una vez conocida toda la información pertinente a la celda de carga y a su hardware se procedió al diseño del software en LabVIEW donde se obtuvo como resultado el siguiente código fuente, necesario para la adquisición y procesamiento de señal correspondiente a la fuerza ejercida en la celda de carga.



**Figura 4.10:** Programación en LabView para medición de momento de torsión

En la imagen anterior se puede observar los parámetros de la configuración inicial del dispositivo, como el Baud Rate, bits de datos y la paridad. Ahora bien, en el bloque de escritura "WR" se tiene como dato de entrada el código para la solicitud de lectura inmediata el cual es "02 41 01 FF 00 41 06", donde

- 02: STX (Start Text)
- 41: Código operación (Lectura inmediata)
- 01: RX (Esclavo)
- FF: TX (Maestro)
- 00: Número de parámetros
- 41: Suma de verificación
- 06: Suma de pesos de verificación

Posteriormente a la solicitud de lectura inmediata se espera por la respuesta del dispositivo esclavo donde por ejemplo para una lectura del dispositivo sin estar la celda de carga conectada (a lazo abierto) se obtiene la siguiente respuesta "02 41 FF 01 09 FF FF FF FF 7F FF 7F FF 00 42 7E"

- 02: STX (Start Text)
- 41: Código operación (Lectura inmediata)
- FF: RX (Maestro)
- 01: TX (Esclavo)
- 09: Número de parámetros
- FF FF: Valor de medición del canal 0
- FF FF: Valor de medición del canal 1
- 7F FF: Valor calibrado del canal 0
- 7F FF: Valor de calibrado del canal 1
- 42: Suma de verificación
- 7E: Suma de pesos de verificación

Rescatando del ejemplo anterior podemos ver que los valores del canal 0 y el canal 1 son iguales, por lo cual basta tomar uno de los valores calibrados que corresponden a la medición actual de celda de carga. Sin embargo, la celda de carga es muy sensible a variaciones, al punto tal que es capaz de medir variaciones de inclusive 0.0229 Kgf, de manera tal que el mismo viento es capaz de introducir ruido a la medición. Para mantener el orden del código fuente, garantizar que el valor recibido es el solicitado, filtrar la señal y

realizar las conversiones numéricas se crea el subVI #4 el cual se muestra a continuación

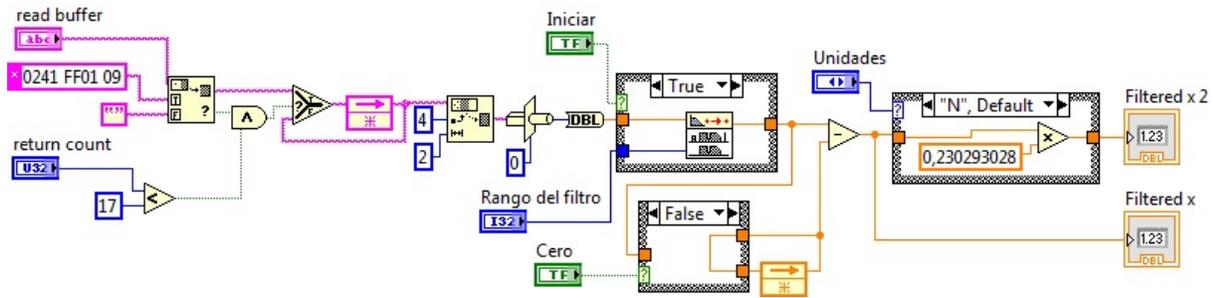


Figura 4.11: Código fuente de subVI 4 en celda de carga

La primera sección del código es utilizada para garantizar que el código de respuesta sea el esperado, y LabVIEW con la función utilizada al verificar que el inicio dato es igual a los caracteres de entrada, elimina los caracteres de comparación a la salida del bloque y existe una segunda verificación para garantizar que el número de caracteres sea igual a 16, que es el número de bytes esperados. Posteriormente se hace un desplazamiento en la trama de datos para adquirir únicamente el valor calibrado del canal cero, se hace el filtrado si la función estuviese activada, se establece el valor de cero en el momento que se selecciona la función. Por último en este subVI se hace la conversión de unidades para la medición de masa directamente en la celda de carga.

No obstante, para poder obtener el valor de medición real que entrega el dispositivo se debe conocer la relación entre dicho valor numérico adimensional y la magnitud física de fuerza, en éste caso en unidades de Newton. Para ello el fabricante envía una certificación de calibración de la celda de carga, donde dice la relación entre el valor numérico entregado y el valor de medida real.

1.5 mV/V	=	10000 ADU
1.5 mV/V	=	2302.93028 N
<b>1 ADU</b>	=	<b>0.230293028 N</b>
1 ADU	=	0.051771931 lbf
1 ADU	=	0.022923997 Kgf

Tabla 4.4: Valores para calibración en celda de carga y relaciones para unidades de medida

Como filtrado de la señal se utiliza un filtro media de orden N, cuyo orden se puede modificar en tiempo real. Además de varias funcionalidades como un indicador de valor máximo y mínimo del momento de torsión, así como la sección donde se puede ver el valor medido directamente en la celda de carga en unidades de Kg, lb, N y ADU. Para poder establecer un valor cero en la medición se tiene un botón en la interfaz que realiza esta función tomando el valor actual como referencia de la medición, a continuación se muestra la interfaz gráfica creada para la sección del momento de torsión.

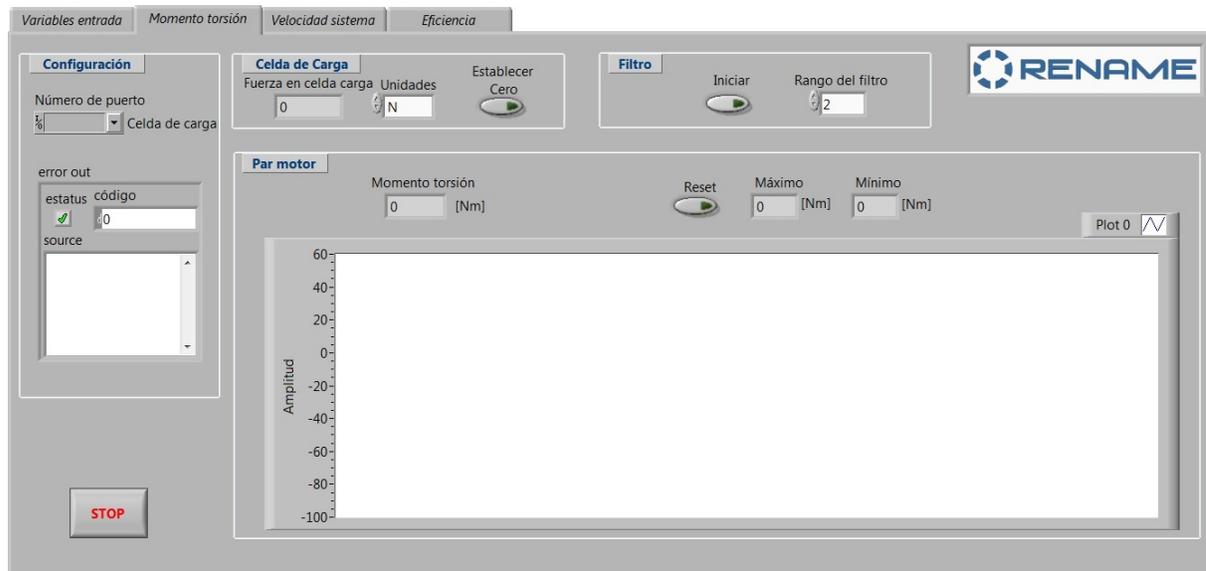


Figura 4.12: Interfaz gráfica para Momento de torsión

### 4.3 Velocidad de rotación

Para poder determinar la potencia de salida en máquinas eléctricas rotativas es necesario conocer la velocidad de giro de dichas máquinas, en revoluciones por segundo, según la ecuación 2.7 del marco teórico. Para ello, acoplado al eje del freno en el extremo opuesto donde se acopla el motor, existe un circunferencia dentada con un número de 60 dientes y a una distancia entre  $0.5 - 1 \text{ mm}$  se coloca un sensor de Hall de la marca Ono Sokki el cual se ilustra a continuación, así como su montaje.



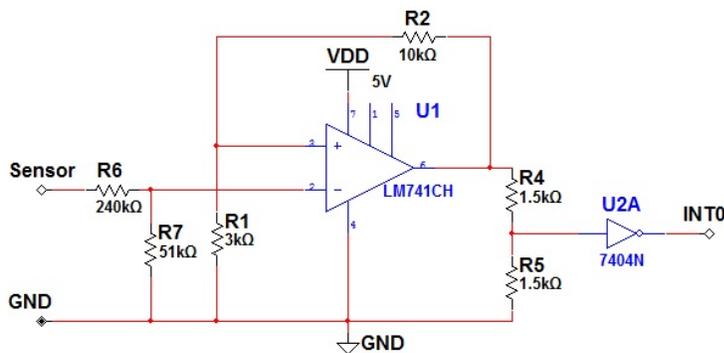
Figura 4.13: Sensor de Hall y su montaje para medición de velocidad

Para éste caso práctico la información de importancia de la señal obtenida es la frecuencia de la misma, la cual varía en función de la velocidad, al igual que su amplitud cuyo valor máximo nos registra  $29 \text{ Vp}$  al girar el eje a una velocidad de 3500 RPM, siendo la máxima velocidad que llegará alcanzar el sistema para una motor de dos polos y a medida que aumente el número de pares de polos esta velocidad disminuirá.

Por consiguiente al necesitar el valor de la velocidad de rotación, se implementó un hardware basado en un PIC 18F4550, por la disponibilidad y la experiencia de trabajo con

el mismo. El cual atenderá una interrupción externa con cada flanco positivo producto de la señal del sensor Hall. Sin embargo, la forma de onda generada es senoidal con una amplitud máxima de 29 Vp, por lo cual es necesario un acondicionamiento previo de la señal, ya que se debe tomar en cuenta que el PIC trabaja a una tensión de alimentación de 5 V, y además necesita de una señal cuadrada para poder detectar las interrupciones, por lo tanto, se diseñó un circuito para obtener la característica de frecuencia de la señal del sensor de Hall, teniendo como resultado una señal cuadrada con amplitud de 0 a 5 Voltios.

Primeramente se utilizó un divisor de tensión para tener la señal a 5 V, seguido de un comparador de tensión con Schmitt trigger utilizando un amplificador operacional LM741 y por último un inversor lógico 74LS04 para garantizar la salida de 0 y 5 V, y el circuito esquemático que realiza las funciones anteriores se muestra a continuación.



**Figura 4.14:** Circuito acondicionador para señal del sensor de Hall

Es importante también mencionar el uso de las resistencias R4 y R5 a la salida del amplificador operacional, mostradas en la figura anterior, ya que durante la etapa de pruebas se tenía una salida del amplificador de 4.75 V para el nivel alto y 1 V para el nivel bajo. Por lo cual el inversor detectaba la señal únicamente como un 1 lógico, obteniendo a la salida el valor de 0 V. Se utilizó la característica de offset null del 741, pero los resultados no fueron los esperados. Por lo cual se decidió utilizar un divisor de tensión a la salida del amplificador, logrando tensiones de 2.3 V para el nivel alto y 0.5 V para el nivel bajo, cuyos valores son detectados perfectamente por el 74LS04 como un 1 y un 0 lógico, obteniendo a la salida los valores deseados, necesarios para activar la interrupción externa del PIC.

El PIC18F4550 permite la conexión directamente al puerto USB de la computadora permitiendo la comunicación con la misma, pero para ello se necesita utilizar un cristal de cuarzo para generar la señal de reloj necesaria para la operación del puerto USB del PIC, también como parte del diseño se dejan previstos dos relés para el control de periféricos, así como dos DIO/AI configurables por software. Siendo así, se desarrolló un circuito impreso utilizando el software EAGLE y el resultado se muestra a continuación

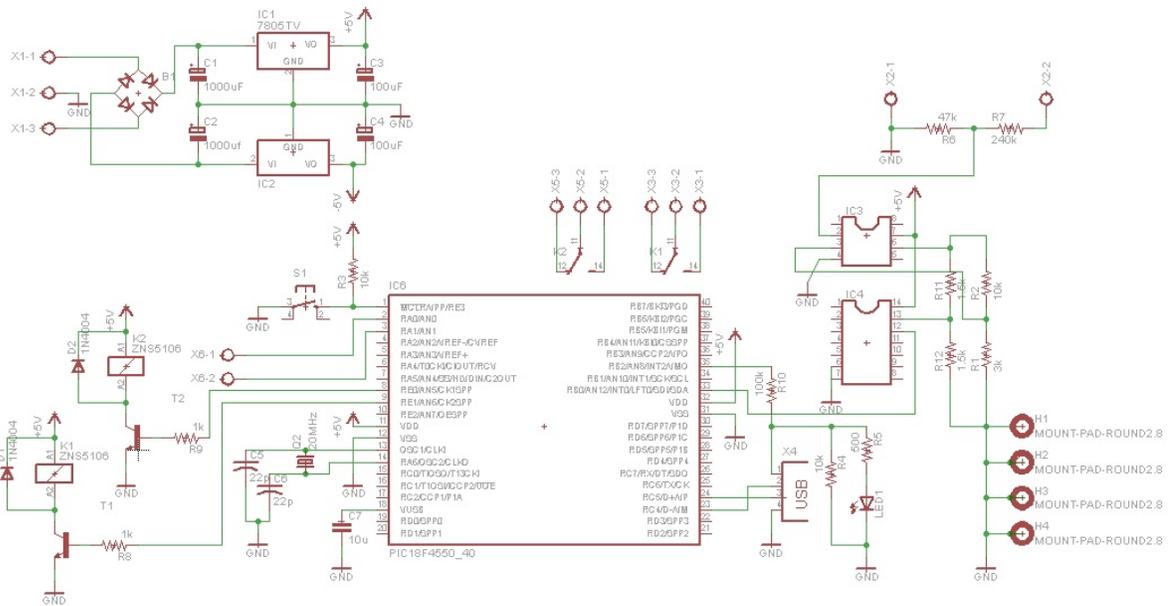


Figura 4.15: Circuito esquemático para medición de velocidad

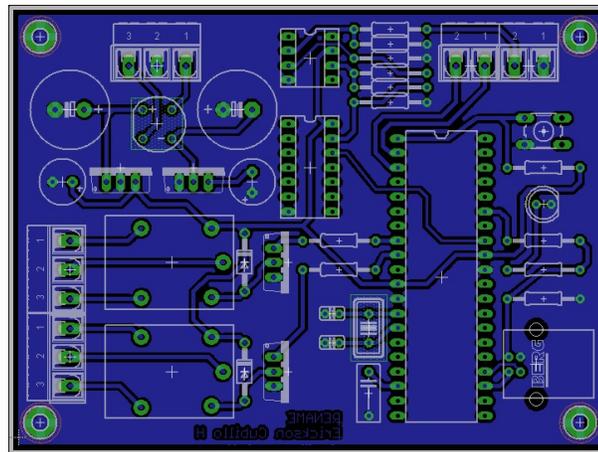


Figura 4.16: Circuito impreso para medición de velocidad

Una vez terminada la sección correspondiente al hardware, se procedió al desarrollo del software. Para éste proyecto y la programación del PIC se trabajó con el software PIC C Compiler 4.1 (CCS C Compiler).

Es importante durante el desarrollo del software la adecuada configuración de los fuses, para garantizar entre otras cosas la configuración del reloj para la comunicación USB, la cual internamente necesita un reloj de 48 MHz. También se deben de incluir las librerías correspondientes a la comunicación USB `usb_cdc.h` ya que se utiliza la clase CDC (Communication device class), donde los tipos de transferencias soportadas son del tipo interrupción y Bulk. Utiliza también driver estándar incluidos ya en el sistema operativo, según el sistema operativo utilizado precisará o no de la instalación del archivo `.INF` el cual se puede descargar directamente de la página de Microchip, por ello es indispensable

verificar el valor de los descriptores en las librerías que nos proporciona CCS. Para la comunicación USB utilizando la clase CDC existe un archivo el `usb_desc_cdc.h` donde se guarda la información perteneciente a los descriptores del dispositivo, ese archivo podemos editarlo y con ello modificar los descriptores perteneciente al VID, PID, consumo del dispositivo y versión del firmware. Los valores que se deben de ingresar se muestran a continuación

```

////////// config options, ////////////////////////////////////////////
#define USB_CONFIG_PID      0x000A
#define USB_CONFIG_VID      0x04D8
#define USB_CONFIG_BUS_POWER 100 //100mA (range is 0..500)
#define USB_CONFIG_VERSION  0x0100 //01.00 //range is 00.00 to 99.99
////////// end config ////////////////////////////////////////////

```

**Figura 4.17:** Descriptores de Hardware para PIC

Ahora bien, el PIC se encarga de incrementar un contador interno en 1 cada vez que recibe una interrupción externa, de manera tal que en intervalos de tiempos definidos se realiza una solicitud por software del valor del contador y posteriormente al envío del valor del contador el mismo es reiniciado hasta la próxima solicitud de lectura.

## 4.4 Control de tensión de la bobina del freno

Para el control del frenado del sistema se necesita variar la tensión de alimentación de la bobina del freno electrodinámico que permite una tensión máxima de 90 VDC, y una corriente de 10 A. Por ello se realizó la compra de la tarjeta OC2-100 la cual se mencionó en el marco teórico. Dicha tarjeta está diseñada para el control de velocidad de motores de corriente directa la cual entrega 100 VDC de campo y los necesarios 0-90 VDC de armadura utilizados para el proyecto. El control de la tensión de salida se hace en forma manual, mediante un potenciómetro que viene incluido junto con la tarjeta permitiendo variar una tensión de 0-6 VDC en una patilla de control cuya relación es lineal a la tensión de salida. La tarjeta OC2-100 se alimenta con una fuente de 115 VAC + 10%, una fase y 50/60 Hz + 5%, y para rectificar la señal de salida utilizan SCRs (Silicon Controlled Rectifier). A continuación se presenta el diagrama de conexión para la entrada y salidas de la tarjeta.

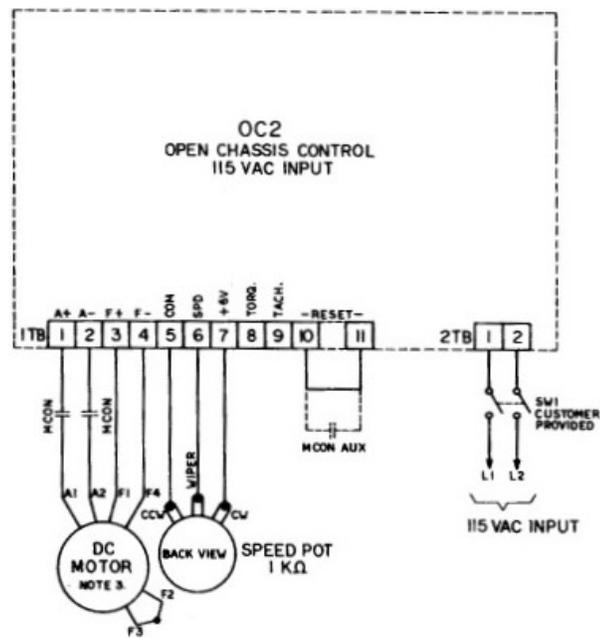


Figura 4.18: Diagrama de conexión en tarjeta OC2-100



# Capítulo 5

## Resultados y análisis

### 5.1 Parámetros de referencia para mediciones

Para tener una referencia respecto a los valores de medición obtenidos mediante el sistema de pruebas, se designó para dichas pruebas un motor de eficiencia estándar de la marca WEG, 12.5 HP, 220/440V a 60 Hz y dos polos, el cual fue rebobinado por la empresa RENAME y era el que se encontraba a plena disponibilidad para realizar las pruebas necesarias, por lo tanto es de esperar que los datos obtenidos tengan mínimas variaciones respecto a los datos del fabricante, o los debidos a variantes en el proceso de reconstrucción. Siendo así y mediante la siguiente tabla se resumen los datos técnicos de dicho motor los cuales fueron tomados de los manuales del fabricante [20].

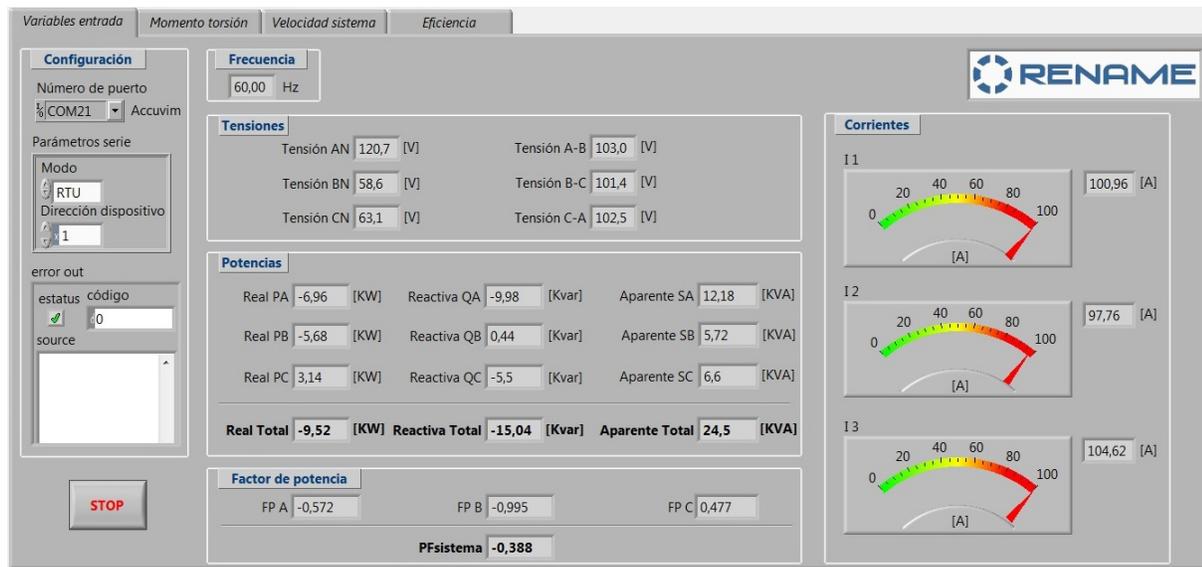
Característica	Valor	Característica	Valor	
Cascasa	132M	Clase aislamiento	F	
Potencia	12.5 HP	Tiempo de rotor bloqueado	7 s (caliente)	
Frecuencia	60 Hz	Factor de Servicio	1.15	
# Polos	2	Temperatura Ambiente	$-20^{\circ}C - +40^{\circ}C$	
Rotación nominal	3520	Altitud	1000 m	
Deslizamiento	2.22 %	Protección	IPW55	
Voltaje nominal	220/440 V	Masa aproximada	69 kg	
Corriente nominal	31.2/15.6 A	Momento de inercia	0.02518 kgm <sup>2</sup>	
Corriente de arranque	237/119 A	Nivel de ruido	72 dB(A)	
$I_p / I_n$	7.6	Eficiencia (%)	50 %	87.5
Corriente en vacío	12.0/6.00 A		75%	88.0
Par nominal	25 Nm		100%	88.0
Par de arranque	230 %	Factor de potencia (%)	50 %	0.76
Par máxima	290 %		75%	0.85
Elevación de temperatura	80 K		100%	0.88

**Tabla 5.1:** Características eléctricas de motor WEG 12.5 HP de eficiencia estándar

## 5.2 Potencia de entrada del sistema

### 5.2.1 Parámetros en momento de arranque

En el caso de la conexión física el motor ésta se realizó a 220 V por capacidad de la red de alimentación, y a la vez se debe de hacer un arranque suave con autotransformador con una conexión en V para disminuir la elevada corriente de arranque logrando arrancar el motor a un 45% de la potencia total obteniendo los siguientes datos mediante la interfaz gráfica de LabVIEW.



**Figura 5.1:** Parámetros de entrada para un arranque al 45% de potencia total

Y para una mejor apreciación de los datos de la figura anterior, se resumen los valores de mayor relevancia para obtener la eficiencia del sistema, mediante la siguiente tabla

Parámetro	Valor
Tensión A-B	103.0 V
Tensión B-C	101.4 V
Tensión C-A	102.5 V
Corriente I1	100.96 A
Corriente I2	97.76 A
Corriente I3	104.62 A
Factor de potencia del sistema	-0.388
Potencia aparente total	24.5 KVA
Potencia reactiva total	-15.04 Kvar
Potencia real total	-9.52 KW

**Tabla 5.2:** Resumen de parámetros de entrada para un arranque al 45% de potencia total

Es importante resaltar que el signo negativo de la potencia se debe a la convención relativa para cargas, la cual nos dice y según Duncan [7], que si  $P$  ( $Q$ ) es negativa, entonces se está entregando potencia real (reactiva) positiva.

Ahora bien, de la tabla anterior se puede obtener que la tensión de línea con que se arranca el motor es en promedio de 100 V, y teniendo la potencia total un valor en tensión de línea de 220 V podemos obtener que el sistema se arranca con un 45.45% del máximo. Ahora bien, si tenemos una corriente de línea con un valor 100 A a un 45.45%, este valor a un 100% de potencia al arranque tendríamos un valor de 220 A en la línea, lo cual provoca el disparo de los breakers de protección que tienen un valor de 100 A.

## 5.2.2 Características en vacío

Una vez que el motor ha vencido la inercia del arranque se pasa el mismo a un 100% de potencia, con el fin de obtener mediciones lo más precisas posibles con referencia a los datos del fabricante, realizando las mediciones bajo las mismas características que se dictan en la tabla 5.1. Por lo tanto, a continuación se muestran las características en vacío del motor con un 100% de potencia de alimentación.

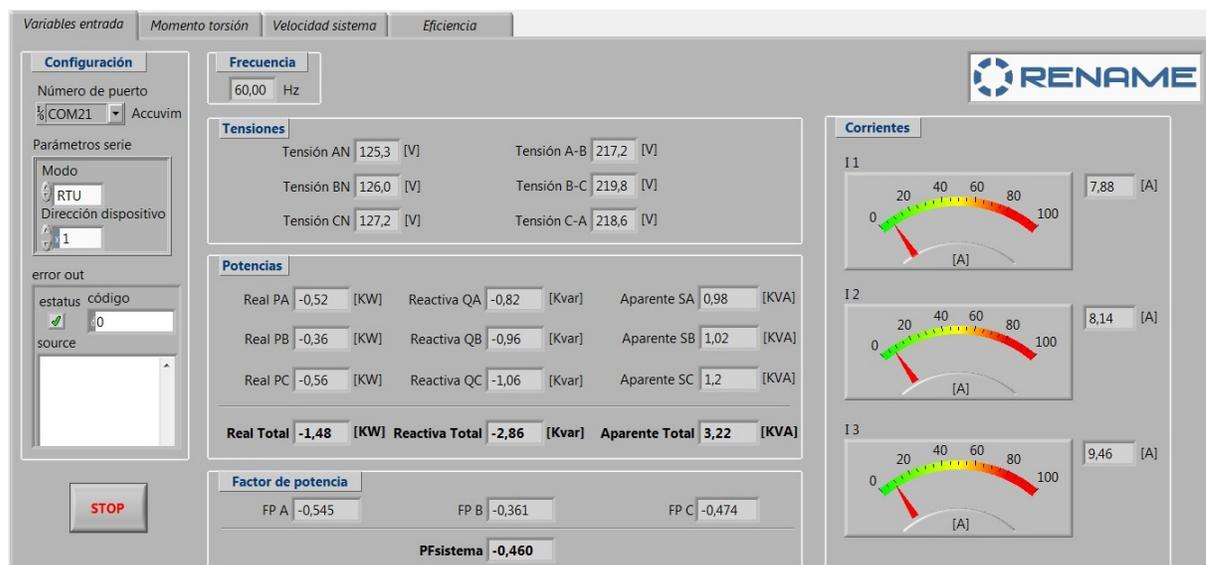


Figura 5.2: Parámetros de entrada del motor en vacío

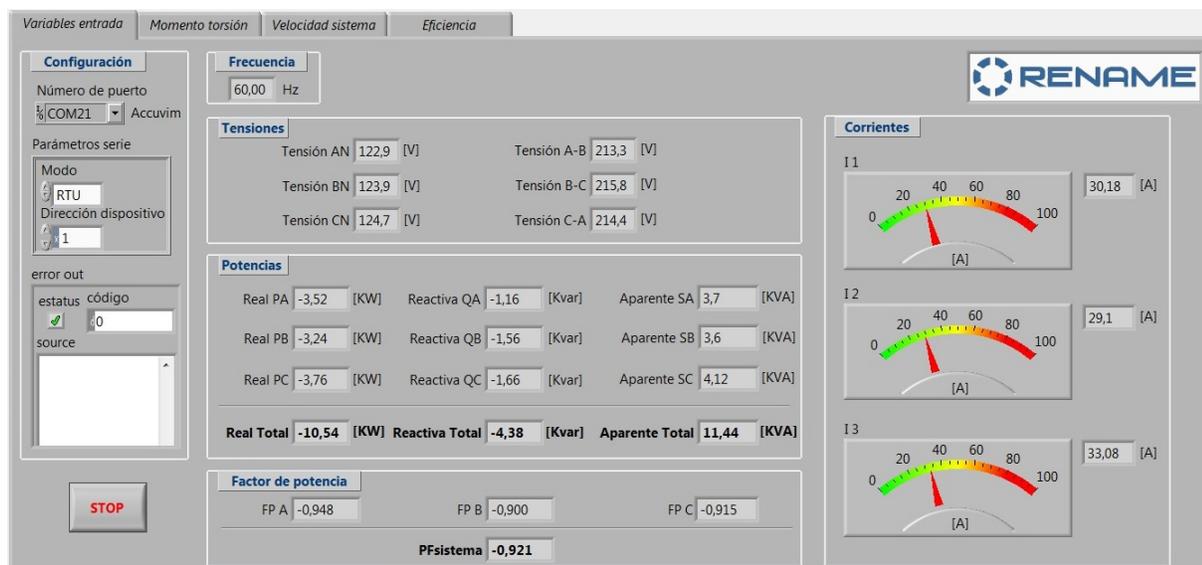
De la igual manera que en la sección anterior se resumen los valores de mayor relevancia en la siguiente tabla

Parámetro	Valor
Tensión A-B	217.2 V
Tensión B-C	219.8 V
Tensión C-A	218.6 V
Corriente I1	7.88 A
Corriente I2	8.14 A
Corriente I3	9.46 A
Factor de potencia del sistema	-0.460
Potencia aparente total	3.22 KW
Potencia reactiva total	-2.86 KW
Potencia real total	-1.48 KW

**Tabla 5.3:** Resumen de parámetros de entrada del motor en vacío

### 5.2.3 Parámetros de funcionamiento a plena carga

Una vez que el motor se encuentra funcionando a un 100% de potencia, con ayuda de la fuente de corriente directa se suministró energía a la bobina del freno electrodinámico para lograr llevar el motor a carga nominal, logrando un ajuste en forma manual hasta alcanzar una corriente de línea en el motor de 31.2 A o lo más aproximadamente a éste, cuyo valor de corriente nominal es el que dicta el fabricante mediante la tabla 5.1. Y para lograr cargar el motor mediante el freno electrodinámico y obtener los datos que a continuación se presentan, la tensión de suministro de la bobina fue de 4.2 VDC, suficiente para obtener los siguientes resultados.



**Figura 5.3:** Parámetros de entrada del motor a carga nominal

En la tabla que se muestra a continuación se resumen los datos que se muestran en la figura anterior, así como los datos de tensión y corriente medidos con la ayuda de un

multímetro para tener un parámetro de comparación respecto a la exactitud con que son medidos los datos con la ayuda del sistema Acuvim-DL

Parámetro	Valor Acuvim	Valor Multímetro	% error
Tensión A-B	213.3 V	212.9	0.19
Tensión B-C	215.8 V	215.5	0.14
Tensión C-A	214.4 V	214.0	0.19
Corriente I1	30.18 A	29.8	1.2
Corriente I2	29.1 A	28.8	1.0
Corriente I3	33.08 A	32.8	0.8
Factor de potencia del sistema	-0.921	—	
Potencia aparente total	11.44 KW	—	
Potencia reactiva total	-4.38 KW	—	
Potencia real total	-10.54 KW	—	

**Tabla 5.4:** Resumen de parámetros de entrada del motor a carga nominal

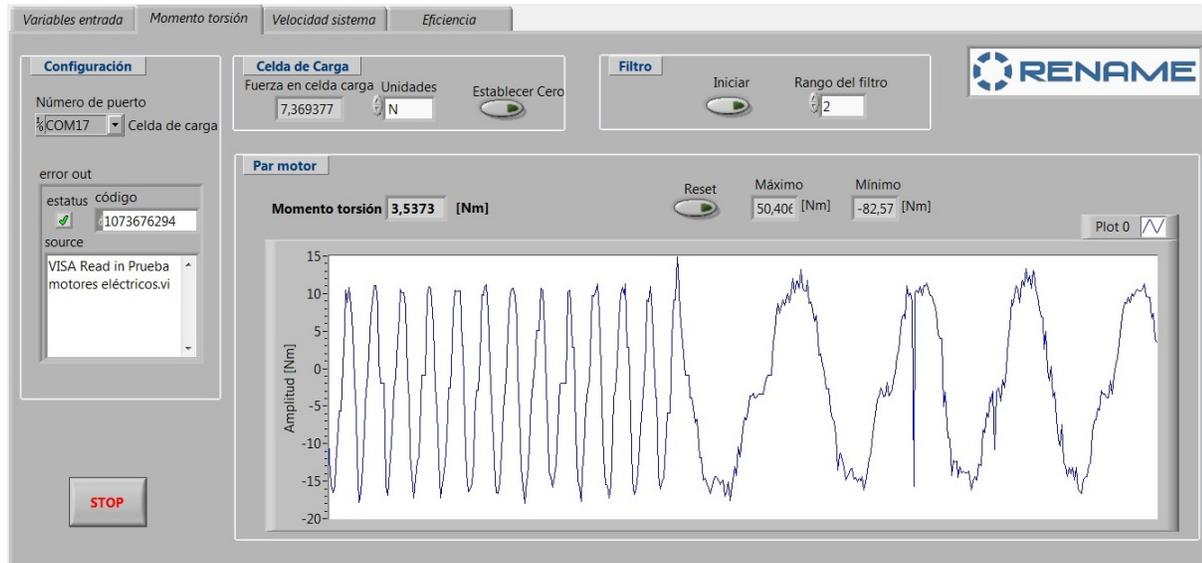
### 5.3 Momento de torsión del sistema

En esta sección se explica el proceso realizado para lograr adquirir el momento de torsión, especialmente cuando el sistema se encuentra a plena carga, no obstante se puede obtener el momento de torsión para diferentes valores de carga. En el caso práctico se tomó el momento de torsión nominal cuando el motor tiene una corriente de línea nominal para un valor de 31.2 A, siendo el éste el valor que dicta el fabricante. A bien, como se explicó en el capítulo 2 del marco teórico, el momento de torsión se obtiene al multiplicar el valor de la fuerza ejercida sobre la celda de carga por el radio de palanca respecto al eje de rotación.

Sin embargo, obtener un valor confiable en la medición tuvo muchas dificultades debido el ruido mecánico presente en el sistema, debido a un leve desalineamiento del eje del motor con el eje del freno. Y al estar girando el motor a 3520 RPM las vibraciones producidas eran preocupantes, las cuales podían dañar el equipo. Entre las causas del desalineamiento se puede mencionar al tipo de acople rígido entre ambos equipos, la dificultad de ajuste que presenta la mesa de montaje donde se fija el motor a prueba y lo que mayor problemas dio fue una de las secciones del acople mecánico el cual presentaba un fuerte desbalance, lo cual se corrigió sometiendo la pieza a una rectificación en el torno de precisión.

Otra característica de importancia a resaltar es la alta sensibilidad de la celda de carga, la cual inclusive al estar el computador conectado a la fuente de alimentación externa, se le introduce ruido producto de la señal de 60 Hz de la línea eléctrica y cuando equipos conectados a la misma red son accionados se presentan grandes fluctuaciones en el valor de los datos obtenidos. Por lo cual, al momento de realizar las mediciones se tenía la batería del computador cargada a un 100%, evitando de ésta manera las fluctuaciones provenientes de la red eléctrica respecto a la celda de carga.

Aunque, al estar el sistema en estado completamente estático y el computador con su fuente de energía propia, en la celda de carga se obtienen variaciones de hasta 0.4 Nm. Ahora bien, una vez que se corrigió en gran medida el problema de las vibraciones mecánicas se realizaron las mediciones del momento de torsión primeramente sin carga en el freno, a un 45.45% y posteriormente al 100% de la potencia eléctrica, dichos resultados se graficaron en una misma referencia y se muestran en la siguiente figura.



**Figura 5.4:** Momento de torsión en vacío a 45.45% y un 100% de potencia

La figura anterior se obtiene con una frecuencia de muestreo de la señal de 100 ms al igual que las demás gráficas del momento de torsión que en esta tesis se presentan. Siendo así, se puede observar la forma de onda sinusoidal que se obtiene en la primera parte con una frecuencia mayor a la de la segunda mitad, siendo la primera parte correspondiente a los datos obtenidos para una potencia del 45.45% y la segunda parte para una potencia de 100%. Sin embargo, el objetivo de mostrar este resultado parcial es el porque se usa para la obtención del resultado final la media de N valores, ya que después de muchas pruebas realizadas se concluye que las oscilaciones se dan alrededor del valor de medida real. Por lo tanto, para representar lo antes dicho se presentan las siguientes dos figuras [5.5,5.7], la primera representa el cambio desde el estado en vacío hasta la carga nominal mostrando los valores inmediatos de medición (sin media de los datos) y la segunda muestra los datos obtenidos a carga nominal, en la primera parte tomando las mediciones inmediatas de los valores, y seguidamente tomando la media de 200 datos a como se muestra en la interfaz de la figura 5.7.



Figura 5.5: Momento de torsión nominal inmediato

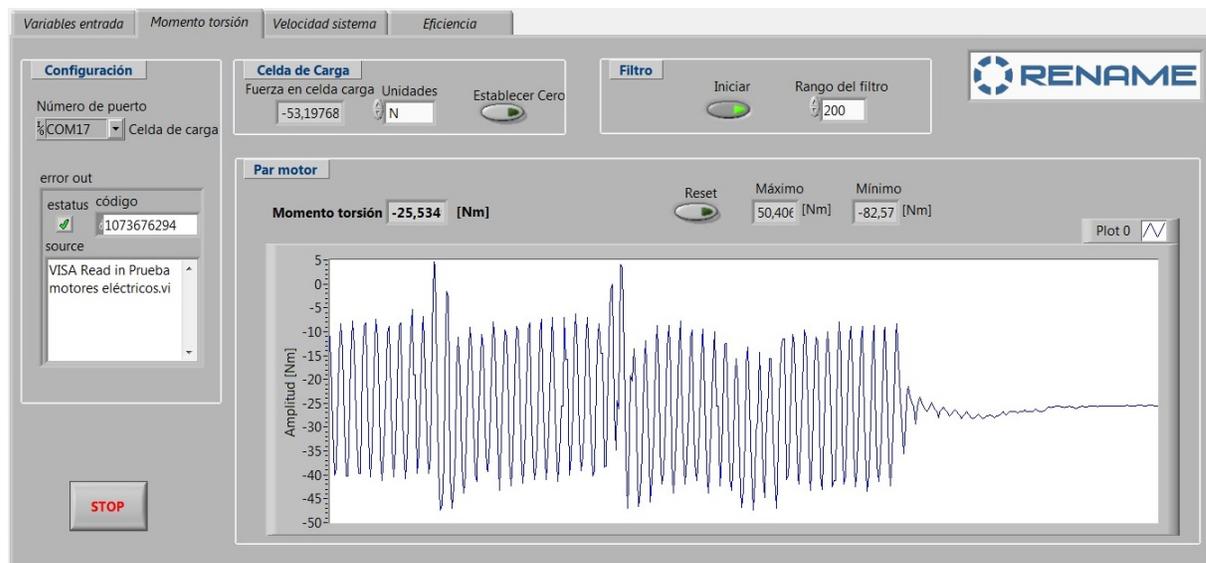


Figura 5.6: Momento de torsión nominal tomando media de los datos

Ahora bien, de la figura anterior se puede obtener el valor nominal del momento de torsión en ese instante de tiempo cuyo valor es de **23.534 Nm**. Sin embargo, en la medición se presenta una variación alrededor de 1 Nm es decir entre 22.5 y 23.5 Nm, mientras que el signo menos lo que nos indica es la dirección en que se da la fuerza sobre la celda de carga, que en este caso al tener un valor negativo significa que la celda de carga se estaba comprimiendo cuando se hizo la medición. Y es de esperar que ésta variación en el momento de torsión implique un rango de variación en la medición de eficiencia a como se mostrara más adelante.

## 5.4 Velocidad de rotación del motor

Para esta sección se tiene que explicar que surgieron algunos inconvenientes que impidieron concluir con la medición de esta variable. A pesar de que se desarrollo un hardware utilizando un microcontrolador PIC18F4550, para determinar la frecuencia de la señal generada por el sensor de Hall. A dicho sensor no se le habían podido realizar pruebas de funcionamiento, ya que se requería que el eje del freno girara a velocidad nominal para poder obtener las características de amplitud y frecuencia de la señal generada, para su debido acondicionamiento y lo más importante el procesamiento de frecuencia generada.

Dicho sensor forma parte del sistema original, el cual estuvo sometido a las inclemencias del clima, como previamente se señaló en la sección de antecedentes 3. Una vez que se conectó el sensor al hardware creado, las mediciones de velocidad obtenidas eran de 3 veces o más los valores esperados, ya que la rueda dentada presenta 60 P/R (Pulsos por revolución), y el motor al girar a 3600 RPM a la salida del sensor se debería de obtener según el fabricante Ono Sokki [18], un señal en frecuencia de 3600 Hz o aproximado en función de la velocidad.

Sin embargo, al obtener datos fuera del rango esperado, se midió la señal generada a velocidad nominal con la ayuda de un osciloscopio. Una vez obtenida la señal se corroboró que la señal estaba mal, al tener a la salida un frecuencia de aproximadamente 10.5 KHz donde debería de tener una señal de 3520 Hz, para un error del 198%. Por lo tanto, se concluyó que el sensor se encuentra dañado, y procede a la cotización de uno nuevo mediante el mismo fabricante del primero. No obstante, el nuevo equipo no llegará a tiempo para la defensa ante el tribunal evaluador. Y se debe considerar que es un asunto que se sale del control tanto de mi persona como del personal de la empresa.

Ahora bien, a continuación se presenta la interfaz gráfica que se diseñó para la adquisición de la variable velocidad

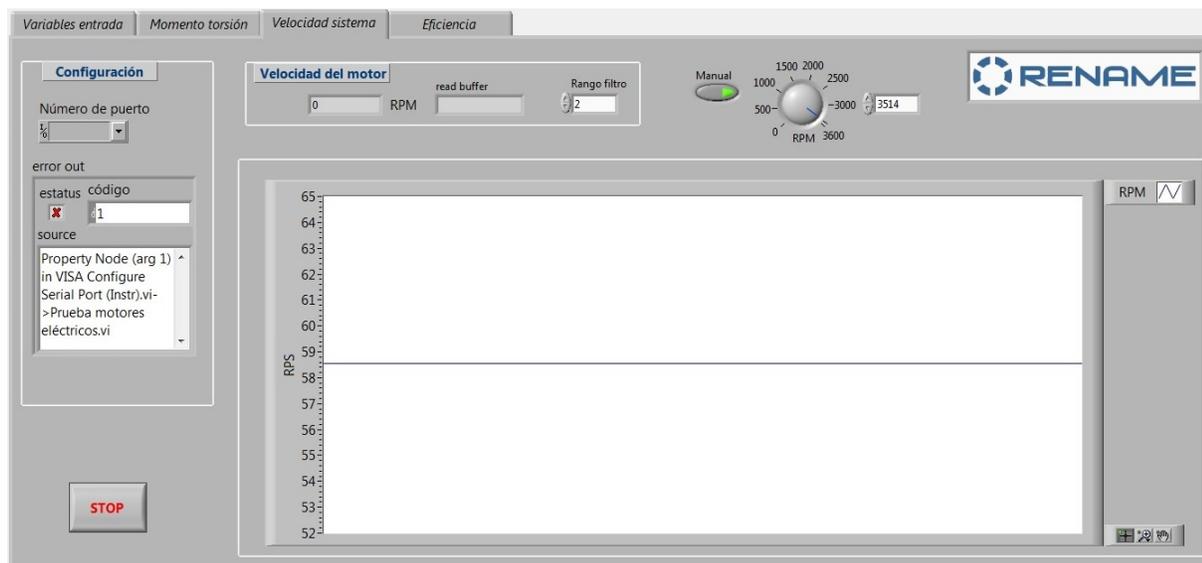


Figura 5.7: Interfaz gráfica para medición de velocidad

Por consiguiente, para lograr realizar la medición de eficiencia del sistema a prueba, en la interfaz gráfica mostrada anteriormente se creó una función donde se puede ingresar el valor de velocidad manualmente, cuyo dato es medido con un tacómetro digital portable. Logrando de ésta manera realizar la medición de eficiencia del sistema aunque no se haya logrado concluir con el objetivo de la adquisición de la variable velocidad.

## 5.5 Medición de eficiencia

Éste parámetro es el resultado de operar las siguientes variables, potencia de entrada, momento de torsión y velocidad de giro, mediante la ecuación 2.1, mientras que en LabVIEW la operación se realizó de la siguiente manera.

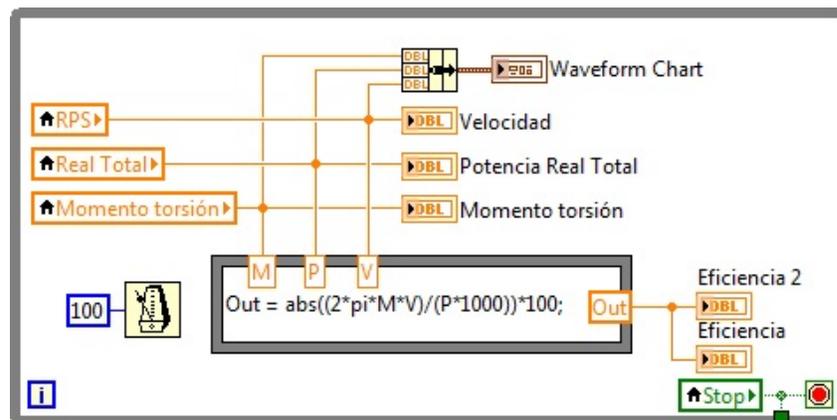


Figura 5.8: Código LabVIEW para obtener valor de eficiencia

Y para mostrar el resultado obtenido se diseñó la siguiente interfaz gráfica donde se muestran los valores inmediatos obtenidos de las variables anteriores, así como una gráfica donde se muestran las tres variables en una misma escala adimensional, con el fin de presentar la variación entre ellas, en sus respectivas magnitudes.

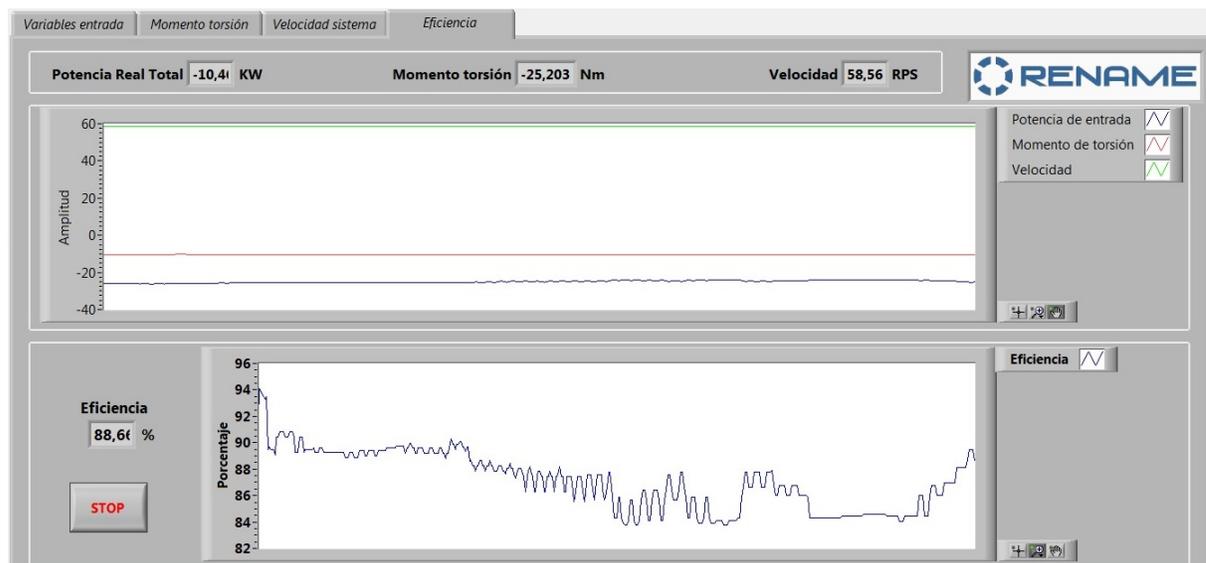


Figura 5.9: Eficiencia medida para motor WEG 12.5 HP

De igual manera se presenta una segunda gráfica que representa la variación de la eficiencia en el tiempo. Sin embargo, la magnitud mostrada correspondiente a un **88.66%** fue capturada en un momento específico mientras el motor a prueba se encontraba a plena carga, pero a la vez se puede observar en el transcurso del tiempo que el valor de eficiencia presenta variaciones en un rango entre 85% y un 89% debido a la variación de 1 Nm en el momento de torsión.

Ahora bien, una vez que se explicaron los datos experimentales anteriores, se pueden comparar todos estos con los datos del fabricante [20], mediante la siguiente tabla, tomando en cuenta que las líneas de alimentación eléctrica que provee la JASEC al estar desbalanceadas, introducen variantes a las condiciones en las cuales el fabricante tomó sus resultados. Por ello es que en la tabla se presentan datos medios para los valores de tensión y corriente.

Parámetro	Teórico	Experimental	% error
Cascasa		132M	–
Potencia	12.5 HP	14.12 HP	12.96
Frecuencia		60 Hz	–
# Polos		2	–
Rotación nominal	3520	3514	0.2
Deslizamiento	2.22 %	2.45 %	10.36
Voltaje nominal	220 V	214.5 V	2.5
Corriente nominal	31.2 A	30,79 A	1.31
Corriente de arranque	237 A	220 A	7.17
$I_p / I_n$	7.6	7.14	6.05
Par nominal	25 Nm	24.5 Nm - 25.534 Nm	2 - 2.13
Par de arranque	230 %	–	–
Par máxima	290	–	–
Factor de potencia (100%)	0.88	0.921	4.7
Eficiencia (100%)	88.0 %	85 % - 89 %	1.1 - 3.4

**Tabla 5.5:** Comparación de resultados contra datos del fabricante

## 5.6 Análisis económico

En la presente sección se pretende dar a conocer los costos del proyecto en materiales, equipo, mano de obra y el periodo de recuperación de acuerdo a las expectativas de la empresa, con una TIR (Tasa Interna de Retorno) del 10 %

Para ello en la siguiente tabla se presentan en detalle los costos durante el desarrollo del proyecto.

Detalle		Costo (\$)
Compra de módulo Acuvin-DL	Valor	364
	Trans + I.N.	109
Compra de celda carga y accesorio	Valor	1110
	Trans + I.N.	333
Tarjeta regulación tensión OC2-100	Valor	312
	Trans + I.N.	95
Materia para mesa de ajuste		500
Horas mecánico de precisión		150
Horas soldador		100
Contactor + botoneras		150
Transformadores de corriente		53
Material para conexiones de equipo		200
Gastos miselaneos		200
Material oficina		100
Computador		800
Restauración freno		500
Salario estudiante		2500
<b>TOTAL</b>		<b>7576</b>

**Tabla 5.6:** Detalles del costo de proyecto

La expectativa del vida del sistema es de 10 años y para gastos en mantenimiento se tiene que invertir \$ 200 cada 2 años, esperando obtener ganancias anuales por un monto de \$ 2000 y se espera recuperar después del tiempo de vida del sistema \$ 600 en ese momento. Ahora bien se debe considerar el costo del capital para el inversionista y se debe prever la inflación, tomando valores de un 20% y un 5% respectivamente.

Ahora bien, podemos calcular la TMAR (Tasa Máxima Atractiva de Retorno) de la siguiente manera

$$TMAR = (0.15 + 0.05) + (0.15 * 0.05) = 0.2075 \quad (5.1)$$

Es decir nuestros cálculos se debe realizar considerando una tasa del 20.75%,y para el cálculo del VP (Valor Presente) éste se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$VP = \frac{VF}{(1+r)^t} \quad (5.2)$$

Donde:

- VF: Valor Futuro
- r: Costo de capital
- t: Periodo a evaluar

Ahora bien, a continuación se presenta la siguiente tabla donde se hace analizar los datos de acuerdo a la TIR presentada por la empresa.

Año	Gastos (\$)	Ingresos (\$)	Valor presente (\$)
0	7576	-	-7576
1	0	2000	1656.31
2	200	1800	1234.52
3	0	2000	1135.97
4	200	1800	846.69
5	0	2000	779.1
6	200	1800	580.7
7	0	2000	534.34
8	200	1800	398.27
9	0	2000	366.47
10	0	2600	394.55
<b>Valor Total</b>			<b>7926.93</b>

**Tabla 5.7:** Análisis económico del proyecto

Por lo tanto, se obtiene un VPN (Valor Presente Neto) de \$ 350.93, por lo se puede decir que el proyecto es viable, y atractivo para el inversionista, siendo en éste caso la empresa RENAME S.A, donde aparte del beneficio económico, contaría con una nueva herramienta para garantizar sus trabajos y se convierte a la vez en un plus en los servicios brindados.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Ahora bien el trabajo realizado se puede considerar un éxito, a pesar de que no se están cumpliendo a en su totalidad los objetivos planteados, ya el sistema desarrollado para la prueba de máquinas eléctricas rotativas permite someter todo motor eléctrico a una carga nominal hasta un rango de 200 HP de potencia, considerando que anteriormente al desarrollo del proyecto no se contaba con una herramienta para realizar éste tipo de operación.

Y a continuación se presentan puntualmente las conclusiones obtenidas basadas en nuestros objetivos planteados para la primera etapa del proyecto.

- Se logra realizar en forma muy exacta y precisa la medición de las características de entrada de los motores como la tensión, corriente, potencia y factor de potencia con un porcentaje de error menor al 1 % a como se muestra en la tabla 5.4. Y a la vez el sistema de medición es muy versátil, ya que se pueden tomar todas las características mencionadas anteriormente, independientemente si el sistema esta operando completamente, es decir, que aunque no se esté realizando la medición de eficiencia se pueden medir todas los parámetros bajo una prueba rápida en vacío que es un caso muy común durante la labor diaria en la empresa RENAME S.A.
- Mientras que la carga a la que se someten los motores a prueba, se logra mediante el freno electrodinámico, el cual fue sometido a un proceso de restauración debido al estado en abandono en que se encontraba, y el grado de carga al que se sometió el motores a prueba se logró con un porcentaje de error del 12.96 % con referencia a los datos del fabricante. Sin embargo, esto equivale a una sobre carga del motor a como se muestra en la tabla 5.5, pero se debe a se tomó como referencia la corriente de línea nominal para llevar el motor a ese punto de operación, mediante la regulación de la tensión de corriente directa que se le aplica a la bobina del freno logrando una regulación fina y en forma manual de la carga, mediante la tarjeta de regulación de tensión OC2-100 de polyspede, que permite una variación lineal de 0-90 VDC.
- En cuanto a la medición del momento de torsión se obtienen fluctuaciones alrededor del valor real obteniendo con un porcentaje de error en la medición entre el 2 % y

el 2.13 %. Debido a que el hardware utilizado presenta una muy alta resolución en la medida, pero al estar tratándose de un sistema donde existe ruido mecánico se presentan variaciones alrededor de 1 Nm en las mediciones obtenidas.

- En cuanto al objetivo que se no se logró cumplir a tiempo fue la medición de velocidad, ya que el sensor de Hall con el que se contaba no se había podido verificar su funcionamiento debido a las características de operación del mismo, y en el momento que se probó el resultado fue que se encontraba dañado arrojando mediciones fuera de rango, con un porcentaje de error del 198%. Sin embargo, mediante una pequeña función en la aplicación desarrollada se le puede ingresar un valor de velocidad en forma manual, obtenido por medio de un tacómetro digital portable, permitiendo de igual manera obtener el valor de la eficiencia desarrolla por la máquina a prueba.
- Mientras que la eficiencia al ser una medición indirecta producto de las mediciones anteriores, se ve afectada por la variación de las mismas. Por lo tanto, para los resultados obtenidos se obtiene un rango de eficiencia entre el 85% y el 89%, para un porcentaje de error entre el 1.1 % y el 3.4 %, siendo un porcentaje de error aceptable pero que, sin embargo se puede mejorar considerablemente. Dichas fluctuaciones en el valor de salida es debido a las variaciones en la medición del momento de torsión, producto en parte de las vibraciones del sistema y la alta sensibilidad del equipo.

No obstante, los resultados finales obtenidos son positivos y avalados por el personal de la empresa RENAME S.A, que consideran el proyecto de gran uso, y ayuda para el desarrollo integral de la empresa.

# Capítulo 7

## Recomendaciones

A pesar que el sistema se encuentra en un estado completamente funcional, se deben de hacer una serie de ajustes y mejoras para obtener mejor resultados y hacer el proceso de medición de eficiencia en el menor tiempo posible. Por lo tanto a continuación se marcan recomendaciones para mejorar el sistema en su función

- Crear un sistema de acople mecánico que permita el rápido y eficiente acople del motor a prueba, al freno electrodinámico. ya que dar el alineamiento del motor con el eje del freno es una tarea de mucha precisión y el sistema actual no permite dar un ajuste tan fino como el que se requiere. Además del tiempo que lleva realizar el mismo es relativamente alto, tomando en cuenta que se requiere la ayuda de incluso el mecánico de precisión para crear piezas de ajuste de acuerdo al frame de cada motor.
- Realizar el modelado del freno electrodinámico con el objetivo de realizar un control automático en el ajuste de la carga requerida, reduciendo con ello la intervención del operario en la prueba que se realice, el cual tiene que regular en forma manual la carga a la que se somete el motor.
- También se debe de poner en operación el sistema de enfriamiento, ya que las pruebas que se hicieron fueron con motores de baja potencia por lo cual no fue necesaria dicha refrigeración. Sin embargo, el sistema tiene que estar completamente listo, para el momento que se desee probar un motor de alta potencia.
- Por último se debería crear un manual de características de los motores que con mayor frecuencia son atendidos para tener un parámetro de comparación después de realizar las pruebas con el sistema desarrollado, brindando de ésta manera un mayor grado de confianza al cliente final sobre el trabajo hecho.



# Bibliografía

- [1] G. Cañaveral. Celda de carga [online, visitado el 14 de marzo de 2013]. URL <http://www.gerardocanaveral.com/productos/celdas-de-ca>.
- [2] S. Chapman. *Máquinas eléctricas*. McGraw Hill, 4ta edition, 2005.
- [3] Real Academia Española [online, visitado el 4 de marzo de 2013]. URL <http://www.rae.es/rae.html>.
- [4] Inteface Force. INF-USB2 and SI-USB Universal Serial Bus Output Modules [online, visitado el 14 de junio de 2013]. URL <http://www.interfaceforce.com/inf-usb2-and-si-usb-universal-serial-bus-output-modules-p-129.html>.
- [5] García Ibáñez. Formación y aprendizaje: Motores asíncronos. [online, visitado el 14 de marzo de 2013]. URL <http://automatismoidustrial.com/motores-asincronos/>.
- [6] National Instruments. Software de desarrollo de sistemas NI LabVIEW [online, visitado el 25 de mayo de 2013]. URL <http://www.ni.com/labview/esa/>.
- [7] Mulukutla S. Sarma J. Duncan Glover. *Sistemas de Potencia: Análisis y diseño*. International Thomson, 3ra edition, 2004. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 12 de junio de 2013].
- [8] Metalcorte. Manual de motores y asistencia técnica, Marzo del 2011.
- [9] Microchip. Pic18f4550 [online, visitado el 25 de mayo de 2013]. URL <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010300>.
- [10] MicroDAQ. Acuvim-l Series Multifunction Power Meter [online, visitado el 23 de mayo de 2013]. URL <http://www.microdaq.com/accuenergy/power-meter.php>.
- [11] M.Plonus. *Electromagnetismo aplicado*. Reverte, 1994. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 11 de marzo de 2013].
- [12] G. Mosca P. Tipler. *Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y Magnetismo*, volume 2A. Reverte, 2005. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 12 de marzo de 2013].

- [13] Polyspede. Heavy duty SCR Open Chasis OC Series [online, visitado el 25 de mayo de 2013]. URL [http://www.polyspede.com/oc\\_series.html](http://www.polyspede.com/oc_series.html).
- [14] J. Jewett R. Serway. *Física II*. International Thomson, 2004. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 15 de marzo de 2013].
- [15] J. Jewett R. Serway. *Física para ciencias e ingeniería*, volume I. International Thomson, 6ta edition, 2005. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 4 de marzo de 2013].
- [16] J. Jewett R. Serway. *Física para ciencias e ingeniería*, volume II. International Thomson, 6ta edition, 2005. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 7 de marzo de 2013].
- [17] A. Senner. *Principios de electrotecnia*. Reverte, 1994. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 4 de marzo de 2013].
- [18] Ono Sokki. Digital Tachometers/Sensors and Peripherals [online, visitado el 14 de junio de 2013]. URL [http://www.onosokki.co.jp/English/hp\\_e/whats\\_new/Catalog/PDF/tach\\_selec\\_1e.pdf](http://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/whats_new/Catalog/PDF/tach_selec_1e.pdf).
- [19] J. Sosa. Galgas extensiométricas, strain gages 1 [online, visitado el 14 de marzo de 2013]. URL [http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain\\_Gages\\_1.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf).
- [20] WEG. W22 Motor Eléctrico trifásico [online, visitado el 05 de junio de 2013]. URL [http://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_dat\\_web.asp](http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_dat_web.asp).
- [21] T. Wildi. *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. Pearson Educación, 6ta edition, 2007. URL <http://books.google.co.cr/> [visitado el 4 de marzo de 2013].

# Apéndice A

## Partes físicas del freno electrodinámico en proceso de restauración

Durante el proceso de restauración del freno surgieron múltiples inconvenientes pero entre ellos el de mayor dificultad a tratar fue el excesivo peso del sistema por lo que se necesitó la ayuda del montacargas en reiteras ocasiones, posteriormente se consiguió un tecele manual de media tonelada con el que se trabajó e inclusive con esta capacidad del tecele apenas era posible manipular la carga para tener una referencia del peso del sistema. A continuación se presentan las imágenes del sistema y sus partes después del proceso de limpieza y de haber aplicado una capa de primer como base para la pintura final. La siguiente figura muestra la base del sistema y la sección donde se montan los roles que permiten el movimiento del estator de nuestro freno, y en el fondo de la foto sobre la carreta se muestra la camisa externa del estator.



**Figura A.1:** Base del sistema y circunferencia de montaje de roles de estator

La siguiente imagen muestra las dos tapas del estator, la bobina de sistema y uno de los platos de enfriamiento, donde se puede observar en la estructura interna de la tapa

la forma de los canales por donde fluye el agua, de manera que se recorre toda el área logrando extraer la máxima cantidad de energía calórica mediante el agua.



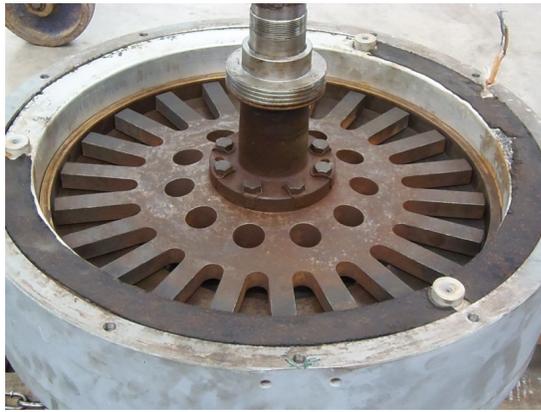
**Figura A.2:** Tapas del estator, bobina del sistema y tapas del sistema de refrigeramiento

Ahora bien, para poder apreciar las entradas y salidas del refrigerante del sistemas a través de las tapas del estator, se muestra la siguiente figura donde se encuentra una de las secciones del estator sin la tapa del sistema de enfriamiento, donde se puede observar claramente la entrada y salida del agua, y una pequeño orificio donde iría el interruptor de temperatura ubicado en el último canal, el cual se dirigiría a la salida del refrigerante.



**Figura A.3:** Representación de la entrada, salida y sensor de temperatura del refrigerante en la sección del estator

Y mediante la próximas dos figuras se ilustra una vista lateral del sistema, con y sin la presencia de la bobina del estator, donde se puede observar lo robusto que es el sistema y las partes que componen internamente el mismo.



**Figura A.4:** Vista lateral del estator con bobina



**Figura A.5:** Vista lateral del estator sin bobina

Para ilustrar debidamente la separación que existe entre el rotor, las tapas de enfriamiento y el aro de cobre se presenta la siguiente figura, y las dimensiones de estas secciones se pueden apreciar en el anexo B.



**Figura A.6:** Representación de la separación entre rotor, tapas de enfriamiento y aro de cobre

Y para concluir ésta sección se presentan tres imágenes donde se muestra parte de las etapas en el proceso de armado y ajuste del sistema, ya que antes de montar la segunda

sección del estator, el rotor tiene que estar con un ajuste aproximado, ya que la primera sección que se debe montar es la de ajuste, y si la misma no tiene el debido ajuste previo la segunda sección no se puede acoplar a la camisa del estator.



**Figura A.7:** Primer etapa de proceso de ajuste del sistema



**Figura A.8:** Montaje de la segunda sección del estator



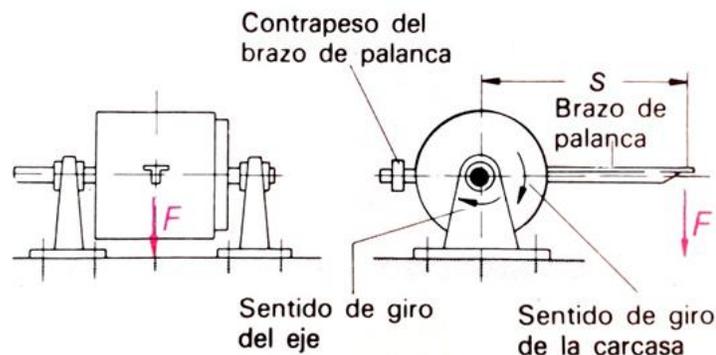
**Figura A.9:** Estator listo para ajuste de rotor y montaje de roles en base



## Apéndice B

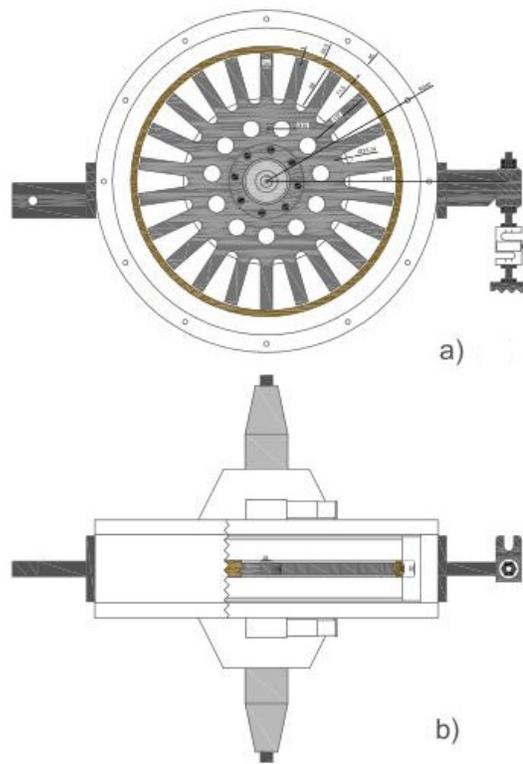
# Partes mecánicas y dimensiones internas del freno electrodinámico

En esta sección se da a conocer las dimensiones internas de las partes estáticas y móviles que constituyen el sistema, para que en un eventual mantenimiento o corrección se tomen en cuenta las dimensiones de dichas partes y el preciso ajuste que estas requieren, ya que las distancias entre partes estáticas y móviles es de apenas mm. Por lo tanto, se comienza mostrando las partes externas del freno electrodinámico necesarias para la medición del momento de torsión y a la vez el sentido de giro del estator en función del giro del rotor cuando se aplique una determinada carga al sistema.



**Figura B.1:** Sistema de brazos de palanca necesarios para medición de momento de torsión

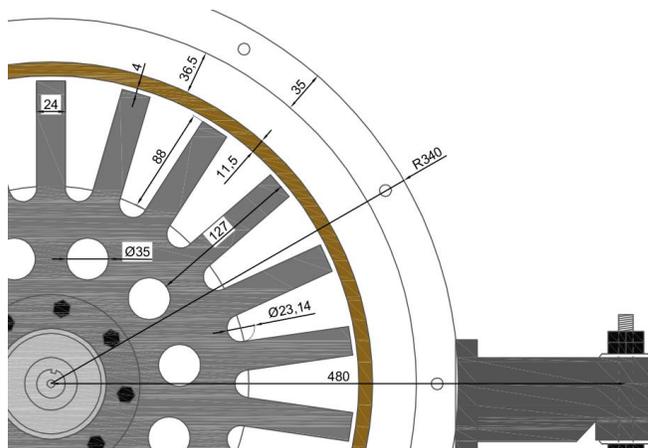
Y seguidamente se presentan a escala las partes internas que constituyen el freno, primeramente en forma general a la vista superior y la vista lateral del freno electrodinámico, dichos dibujos fueron desarrollado en AutoCAD con el inconveniente que cuando se pasa el dibujo a un formato de imagen se pierde la relación de escalas, por ello es que más adelante se presentan otras dos figuras con las cotas importantes del sistema y las mismas se presentan en milímetros.



**Figura B.2:** Vistas generales a escala del freno electrodinámico

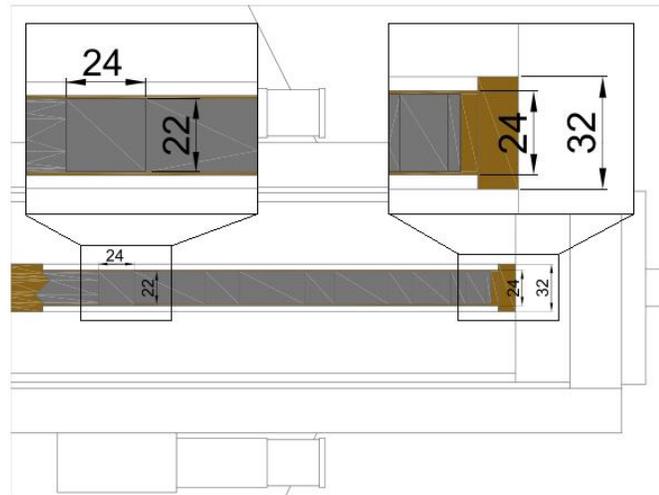
Para poder apreciar las dimensiones y el grado de ajuste que se debe de realizar en un sistema tan robusto como el freno electrodinámico en el que se esta trabajando se presentan las dos siguientes figuras donde se resaltan las dimensiones que se consideran de mayor interés para el lector.

En esta primera figura se debe resaltar las dimensiones del área efectiva de los dientes del rotor que se someten al campo magnético generado por la bobina del estator, dicha dimensión es de  $88\text{mm} \times 24\text{mm}$ , y con una separación de tan solo  $4\text{mm}$  entre el diente y aro de cobre que resguarda el rotor. Y quizás la medida más importante es el radio del eje de rotación al punto donde se realiza la medición de fuerza para obtener el momento de torsión, con una distancia de  $480\text{mm}$ .



**Figura B.3:** Dimensiones de partes mecánicas mediante un corte lateral

Y para la siguiente figura se puede señalar el espesor del diente del rotor con una magnitud de  $24\text{mm} \times 22\text{mm}$ , y también cuando se hace referencia al ajuste fino que se debe realizar se debe a la separación de  $1\text{mm}$  que quedará entre el rotor y las tapas de enfriamiento del sistema. Y esta separación debe ser lo más pequeña posible para lograr el efecto de frenado, de manera que los campos magnéticos generados al estar tan cerca uno de otro produzcan la fuerza de repulsión necesaria para frenar el rotor del sistema.



**Figura B.4:** Dimensiones de partes mecánicas mediante un corte superior

