



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO EN AUTOMATIZACIÓN  
Y CONTROL**

**TEMA: MÓDULO DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE  
DATOS PARA CARACTERIZACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS  
DE INDUCCIÓN.**

**AUTOR: BOADA GREFFA, PAOLO MARCELO**

**DIRECTOR: ING. YÉPEZ, WILSON**

**CODIRECTOR: ING. ECHEVERRÍA, MARIO**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS – ESPE**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y**  
**CONTROL**

**CERTIFICADO**

Ing. Wilson Yépez

Ing. Mario Echeverría


**CERTIFICAN**

Que el trabajo “Módulo de adquisición y visualización de datos para caracterización de motores eléctricos de inducción”, realizado por Paolo Marcelo Boada Greffa, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación si recomiendan su publicación.


El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a Paolo Marcelo Boada Greffa que lo entregue al Ingeniero Luis Orozco, en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, 11 de Marzo de 2015.



Ing. Wilson Yépez

**DIRECTOR**



Ing. Mario Echeverría

**CODIRECTOR**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS – ESPE**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y**  
**CONTROL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

BOADA GREFFA PAOLO MARCELO

**DECLARO QUE:**

El proyecto de grado denominado “Módulo de adquisición y visualización de datos para caracterización de motores eléctricos de inducción”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorpora en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 11 de Marzo de 2015.

  
Paolo Marcelo Boada Greffa


**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS – ESPE**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y**  
**CONTROL**

**AUTORIZACIÓN**

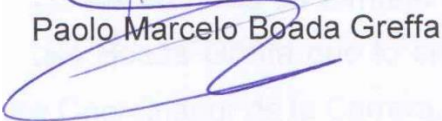
Yo, Paolo Marcelo Boada Greffa

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “Módulo de adquisición y visualización de datos para caracterización de motores eléctricos de inducción”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 11 de Marzo de 2015.



Paolo Marcelo Boada Greffa



## DEDICATORIA

*Por ser el pilar en mi vida y soporte hasta el día de hoy, principalmente dedico este trabajo a mi madre, a quién entrego todo mi sacrificio y esfuerzo. También quiero dedicar este logro a todos los miembros de mi familia, padre, tías y amigos más allegados quién de una u otra manera influyeron y me ayudaron a llegar has aquí.*

**Marcelo Boada.**

## AGRADECIMIENTO

*Por la fuerza y el refugio que encontré en él, agradezco a Dios. Por el apoyo moral emocional y económico agradezco a la persona más importante en mi vida, mi madre. Con mis tías, tíos y padre también quedo inmensamente agradecido. A todas las personas que hicieron realidad la parte de un sueño que está por cumplirse. Gracias por el apoyo a todos mis tutores profesionales quienes supieron guiarme y darme las pautas para seguir y alcanzar una madures profesional e intelectual.*

**Marcelo Boada.**

## Índice

<b>CERTIFICADO .....</b>	<b>ii</b>
<b>DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>iv</b>
<b>DedicatoriA.....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. General.....	4
1.3.2. Específicos .....	4
1.4. Definición de requerimientos.....	4
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>6</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1.1. Motor Asíncrono o de Inducción.....	7
2.1.1.1 Estructura de un motor a inducción .....	8
2.1.1.2 Funcionamiento de un motor a inducción .....	10
2.1.1.3 Curva Característica de un motor .....	13
2.2. ÁMBITOS DE APLICACIÓN .....	17
2.3. TECNOLOGÍAS .....	18
2.3.1. Dispositivos para la medición de datos .....	18

2.3.1.1	Sensores analógicos.....	19
2.3.1.2	Sensores digitales.....	22
2.3.2.	Sistema de adquisición de datos .....	29
2.3.2.1	Sistemas para el acondicionamiento de datos .....	30
2.3.2.2	PLC .....	32
2.3.2.3	DAQ.....	34
2.3.2.4	Plataforma LabVIEW .....	39
<b>CAPITULO 3.....</b>		<b>43</b>
<b>3. ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA .....</b>		<b>43</b>
3.1.	Identificación del sistema .....	44
3.2.	Análisis de posibles soluciones.....	48
3.3.	Definición de la mejor solución.....	50
3.4.	Diseño del sistema.....	54
3.4.1	Adquisición de variables.....	56
3.4.2	Procesamiento para caracterización de datos.....	62
3.4.3	Interfaz gráfica de presentación de datos.....	67
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>80</b>
<b>4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....</b>		<b>80</b>
4.1.	Construcción del módulo físico .....	86
4.2.	Pruebas experimentales .....	90
4.3.	Análisis de resultados .....	95
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>104</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>104</b>
5.1.	Conclusiones.....	104
5.2.	Recomendaciones .....	107



5.3. Bibliografía .....	108
5.4. ANEXOS .....	109
Diagramas Eléctricos.....	109

### Índice de Tablas

Tabla 1. Datos técnicos sensor de corriente .....	20
Tabla 2. Datos técnicos tarjeta ARDUINO .....	38
Tabla 3. Valores para parametrización de Torque .....	74
Tabla 4. Materiales para la construcción del arranque del motor asincrónico .....	86
Tabla 5. Muestras tomadas de valores de variables de salida, variables de entrada, potencias, rendimiento y desplazamientos .....	96
Tabla 6. Tabla de resultados.....	102

### Índice de Figuras

Figura 1. Estructura motor de Inducción .....	8
Figura 2. Estator y bobinas de un motor trifásicos .....	9
Figura 3. Rotor bobinado.....	9
Figura 4. Rotor tipo jaula de ardilla.....	10
Figura 5. Ondas de corrientes en fases R, S, T, en un instante de tiempo .....	13
Figura 6. Tendencia de Curva Corriente de línea vs velocidad angular, ..... en trabajo con carga.....	14

Figura 7.	Variación de la fuerza electromotriz inducida en el rotor con ..... la velocidad de giro .....	14
Figura 8.	Torque de un motor trifásico de inducción en función del ..... deslizamiento .....	15
Figura 9.	Variación de potencia, torque y corriente con respecto a la..... velocidad angular en un motor trifásico.....	16
Figura 10.	Variación del torque de un motor trifásico de inducción con ..... incremento de carga en el rotor .....	16
Figura 11.	Variación de corriente en arranque estrella-triángulo.....	17
Figura 12.	Supresor de tensión transitoria (TVS) .....	19
Figura 13.	Transformador reductor.....	21
Figura 14.	Estructura de un sensor incremental angular o lineal.....	23
Figura 15.	Sensores incrementales de posición a) bobina e imán, ..... b) imán y sensor magneto-resistivo, c) núcleo toroidal. ....	24
Figura 16.	Codificador de posición incremental con escobillas y ..... contacto eléctrico .....	25
Figura 17.	Codificador óptico a) no reflector y b) reflector.....	26
Figura 18.	Codificador incremental de franjas de interferencia .....	27
Figura 19.	Codificador incremental óptico de rejillas .....	28
Figura 20.	Generación de pulsos por rejilla de codificador incremental óptico 28	
Figura 21.	Duplicación de la resolución de encoder incremental con dos..... señales en cuadratura.....	29
Figura 22.	Módulos de intercomunicación estructurales de un PLC.....	33
Figura 23.	Efecto Aliasing .....	36
Figura 24.	Ventana Diagrama de Bloques LabVIEW .....	40
Figura 25.	Paleta de Funciones LabVIEW .....	41

Figura 26.	Circuito equivalente del estator .....	44
Figura 27.	Circuito equivalente del rotor .....	45
Figura 28.	Circuito equivalente de motor trifásico .....	46
Figura 29.	Circuito equivalente motor trifásico .....	46
Figura 30.	Diagrama de bloque de variables de entrada y salida en un ..... sistema de control dinámico .....	47
Figura 31.	Diagrama general del flujo datos.....	48
Figura 32.	Medición de potencia por el método de dos vatímetros .....	53
Figura 33.	Triángulo de potencias .....	54
Figura 34.	Conexión de sensores de voltaje y corriente para el motor ..... trifásico con arranque en estrella .....	55
Figura 35.	Diagrama general de flujo de trabajo .....	56
Figura 36.	Diagrama del proceso de lectura de datos.....	57
Figura 37.	Diagrama de sensores utilizados .....	58
Figura 38.	Diagrama de adecuación de señales medidas.....	59
Figura 39.	Adecuación de señal del sensor de voltaje .....	60
Figura 40.	Diagrama de la distribución de tarjetas ARDUINO.....	61
Figura 41.	Diagrama de flujo del procesamiento de datos .....	63
Figura 42.	Diagrama de flujo de la programación para la interpretación.... de la velocidad angular sensada.....	64
Figura 43.	Adelanto de voltaje a corriente .....	65
Figura 44.	Diagrama de flujo del cálculo del factor de potencia .....	67
Figura 45.	Diagrama de datos a ser mostrados en la interfaz de usuario .	68
Figura 46.	Portada interfaz LabVIEW .....	69
Figura 47.	Sectores de la interfaz gráfica.....	69
Figura 48.	Pestaña de variables de entrada LabVIEW.....	71

Figura 49.	Ventana W1 y W2 de interfaz LabVIEW.....	72
Figura 50.	Pestaña de potencias del sistema.....	73
Figura 51.	Parametrización de torque .....	74
Figura 52.	Variables de salida en interfaz .....	75
Figura 53.	Ventana de deslizamiento .....	76
Figura 54.	Ventana de rendimiento % .....	77
Figura 55.	Gráfica en interfaz de W vs I .....	78
Figura 56.	Gráfica de torque vs velocidad angular .....	78
Figura 57.	Ventana de curvas de variables de entrada .....	79
Figura 58.	Diagrama del flujo de energía eléctrica .....	80
Figura 59.	Motor de inducción MV 1009-405.....	81
Figura 60.	Torquímetro del banco de pruebas .....	82
Figura 61.	Sistema de cargas.....	83
Figura 62.	Fuente del banco de pruebas.....	84
Figura 63.	Diagrama de fuerza para arranque de motor. ....	85
Figura 64.	Construcción del sistema de control y fuerza del arranque..... de un motor trifásico .....	87
Figura 65.	Distribución de dispositivos en el módulo.....	88
Figura 66.	Tarjeta de adquisición de datos ARDUINO UNO .....	89
Figura 67.	Circuito eléctrico de adecuación de señal para valores .....	89
	medidos de V y I.....	
Figura 68.	Circuito del generador con variación de resistencia .....	90
Figura 69.	Interfaz encendida sin arrancar el motor .....	91
Figura 70.	Visualización de V y I en arranque del motor trifásico.....	91
Figura 71.	Deslizamiento con incremento de carga .....	92

Figura 72.	Visualización del rendimiento mientras se alcanza valores..... nominales.....	93
Figura 73.	Curva W vs I.....	94
Figura 74.	Curva T vs W .....	94
Figura 75.	Curva V vs I.....	95
Figura 76.	Curva de variables de entrada .....	97
Figura 77.	Curva de regulación .....	98
Figura 78.	Curva de variables de salida .....	99
Figura 79.	Curva de potencia vs velocidad angular.....	100
Figura 80.	Variación de velocidad con respecto a la corriente de carga .	100
Figura 81.	Variación de la velocidad con respecto a la corriente del ..... estator .....	101

## RESUMEN

Los motores eléctricos son la base de accionamientos mecánicos en procesos productivos o de servicio, por lo que su tiempo de trabajo es prolongado y necesariamente eficiente. Para satisfacer la demanda de trabajo es necesario conocer el estado en el que se encuentra los motores. Como referencia y para lograr un modelamiento se ha trabajado sobre un motor a inducción asincrónico, que forma parte del módulo marca TERCO del laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de Fuerzas Armadas - ESPE, del cual se miden las variables externas del motor para así poder dar un diagnóstico característico del mismo. Las variables de entrada como son voltaje y corriente así como las de salida que son la velocidad angular y torque del motor, son medidas mediante sensores cuyas señales son recogidas por tarjetas de adquisición de datos. Las señales obtenidas serán leídas por la plataforma LabVIEW para diagnosticar el estado de la máquina tratada, visualizando estos resultados en la interfaz humano-máquina, que a manera de indicadores muestra el desempeño del motor a inducción.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **MOTOR A INDUCCIÓN,**
- **POTENCIA,**
- **TORQUE,**
- **VELOCIDAD ANGULAR,**
- **LABVIEW.**

## ABSTRACT

Electric motors are the basis of mechanical drives and production processes or service, so his working time is prolonged and necessarily efficient. To meet the demand for work it is necessary to know the state in which the engines are. As a reference and for attaining a modeling has worked on an asynchronous induction motor which is part of a module TERCO brand of the laboratory of electrical machines of the Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, that of measuring the variable external engine to give a characteristic of the diagnosis. The input variables such as voltage and current, as well as those of output which are the angular velocity and torque of the engine, are measured by sensors whose signals are picked up by data acquisition cards. The signals obtained will be read by the LabVIEW platform to diagnose the state of the machine treated, by viewing these results in the human-machine interface, which has a way of indicators shows the performance of the induction motor.

### KEYWORDS:

- **INDUCTION MOTOR,**
- **POWER,**
- **TORQUE,**
- **ANGULAR VELOCITY,**
- **LABVIEW.**

## CAPITULO 1

### MÓDULO DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS PARA CARACTERIZACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

El banco de pruebas del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, cuenta con varios equipos de marca TERCO, estos módulos de trabajo exclusivamente con fines didácticos están formados por fuentes variables y fijas, motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla, cargas y medidores analógicos para realizar las diferentes prácticas de estudio de laboratorio de circuitos eléctricos en el periodo académico.

Es así que se ha escogido el motor a inducción con rotor en corto circuito, ya que este es el de mayor uso en el mundo industrial, y hacia donde está en gran parte dirigido los conocimientos adquiridos en años de estudio, como es la electrónica, máquinas eléctricas, instrumentación, programación, procesamiento de señales, manejo de tecnologías, etc.

El motor es asíncrono tipo jaula de ardilla, de inducción, cuya alimentación trifásica la toma del transformador de la sub-estación eléctrica



de la Universidad y presenta características como potencia de 1100 W, velocidad de giro 1750 r.p.m. a 60 Hz, con un factor de potencia de 0,77.

El buen funcionamiento a largo tiempo de un motor eléctrico es establecido por todos sus tipos de mantenimientos que se le dé. El visualizar periódicamente de cómo se encuentra su estado, en base a lecturas de factores externos o de potencias de trabajo, es un mantenimiento preventivo, pudiendo realizar acciones necesarias si se diera el caso como mantenimiento predictivo, según el análisis de sus parámetros.

### **1.1. ANTECEDENTES**

Desde la revolución industrial, a principios del siglo XX en adelante, los motores eléctricos forman parte fundamental en la fabricación en serie, siendo el pilar de los accionamientos para la manufactura motriz y por ende la necesidad de su óptimo funcionamiento.

El uso del motor eléctrico se lo puede encontrar en diversas aplicaciones donde se requiere fuerza motriz, desde máquinas pequeñas usadas en aplicaciones domésticas hasta extremadamente grandes en aplicaciones industriales.

Los motores por el hecho de estar conformados por diferentes partes móviles y fijas que interactúan entre sí, además por la frecuencia de uso, carga y aplicación en la que se vayan a desempeñar, están expenso al desgaste y por ende declive de su normal funcionamiento.

En el presente proyecto se pretende desarrollar una aplicación de apoyo al concepto de mantenimiento preventivo y predictivo, mediante la medición y visualización de las características externas de motores eléctricos de inducción, las cuales serán presentadas de forma amigable al usuario y con ellas caracterizar el desempeño de la máquina y así tomar las acciones respectivas sobre el equipo en mención.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Ya que la mayoría de recursos de accionamiento mecánico, en la industria, son basados en motores eléctricos, es importante conocer sus características externas para así establecer un estado de sus condiciones.

Existen muchos planes de mantenimiento periódicos, así como equipos destinados a medir el rendimiento de ciertas características por separado en un instante de tiempo determinado de un motor; pero todo esto implica tiempo, confianza en las correctas y periódicas lecturas que realice el encargado del mantenimiento e incluso recursos económicos para solventar el reemplazo de equipos.

Es por eso que este proyecto pretende atender estos puntos, teniendo una lectura en tiempo real y constante de los parámetros externos de un motor eléctrico y así caracterizar el estado de funcionamiento de la máquina, el cual se debe presentar de manera entendible para el operario, afianzando un mantenimiento preventivo y predictivo, disminuyendo tiempos de paro, evitando gastos innecesarios y llevando un control adecuado del trabajo de los motores eléctricos.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. General**

Diseñar un sistema en LabVIEW para la identificación de las características externas de un motor eléctrico de inducción, aplicado a los equipos del laboratorio de máquinas eléctricas de la ESPE.

#### **1.3.2. Específicos**

- Realizar la identificación del proceso de caracterización de un motor AC.
- Investigar la mejor opción para medir, adquirir y procesar los datos de entrada - salida de los motores de inducción del banco de pruebas del laboratorio.
- Implementar el sistema con la tarjeta de adquisición de datos de entrada-salida y sensores necesarios para procesar las características externas aplicadas al banco de pruebas.
- Elaborar un interfaz humano máquina con el sistema LabVIEW para poder mostrar los resultados.

### **1.4. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS**

Se necesita crear un módulo, el cual sea capaz de atender los siguientes requerimientos, para actuar sobre un motor de inducción trifásico.

El sistema debe adquirir las señales características de trabajo de un motor a inducción trifásico mediante sensores digitales y analógicos, para medir de forma fácil estéticamente, variables como voltajes y corrientes de línea de entrada al motor, así como la velocidad de giro de la máquina. El torque irá variando de acuerdo a la carga aplicada por lo que debe ser medido constantemente.

El módulo debe ser capaz de comunicarse con una PC para presentar el muestreo de las variables medidas de la máquina al usuario de mantenimiento.

En base al conjunto de datos y gráficas obtenidas se puede crear un diagnóstico del equipo, indicando los valores anormales o novedades que presenta el motor en base a la potencia activa, deslizamiento, consumo de corriente, rendimiento, entre otros aspectos que se puedan visualizar de la máquina en trabajo, pudiendo llevar a cabo inclusive un plan de mantenimiento.

## CAPITULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

En un proceso industrial es importante y vital mantener el sistema en óptimo estado para cumplir con la planificación de producción, esto implica evitar fallos en equipos y su detección previa a la puesta en marcha, para eliminar los paros innecesarios, pérdidas de tiempo, pérdidas económicas, incumplimiento con la producción, etc. Inclusive para precautelar el bienestar del factor más importante en una empresa como es el humano.

Los cambios que existan en los procesos pueden ser detectados a tiempo para evitar fallos usando modelos de procesos y sensores. (Frank P.M. & E. Alcorta García, 1997)

Las variables medidas mediante sensores son los determinantes del comportamiento del motor, ya que alguna alteración en el buen desempeño del equipo se reflejará en su vibración, en la velocidad de giro, fugas, calentamiento, consumo de energía, inclusive el ruido producido será diferente, etc.

## 2.1. ESTADO DEL ARTE

### 2.1.1. Motor Asíncrono o de Inducción

Un motor eléctrico rotativo es un transductor que convierte energía eléctrica en energía mecánica. En el caso del motor a inducción, este toma energía de una línea de alimentación eléctrica alterna, y por inducción electromagnéticamente en la parte móvil del motor, produce accionamiento mecánico.

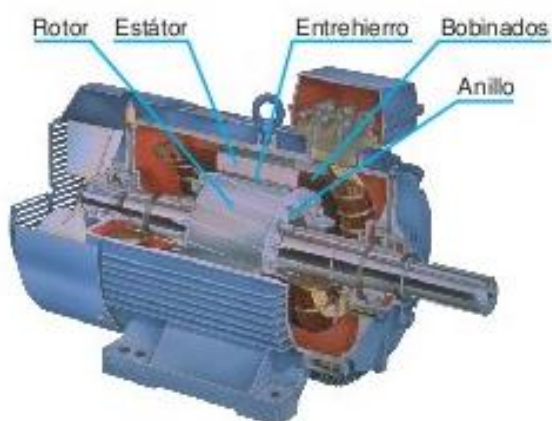
En el mundo industrial, más del 80 % de los accionamientos mecánicos están realizados por motores a inducción, esto debido a su sencillez, robustez y rendimiento. El uso de esta energía mecánica puede ser transmitida de diferentes maneras, como para funciones de bombas, elevadores, cintas transportadoras, sistemas de ventilación, de mezcla, etc.

Su denominación de **motor asíncrono** se da ya que nunca la velocidad de giro en el eje alcanza a la velocidad de sincronismo, que es la velocidad a la que gira el campo magnético. Esta velocidad es fija pero se la puede alterar variando su frecuencia, y esto a su vez en la actualidad se da con los conocidos variadores de frecuencia.

A partir de esta sección, los parámetros que se describen en relación al estator vienen acompañados con el subíndice 1 y los que aparecen en el rotor llevan el subíndice 2.

### 2.1.1.1 Estructura de un motor a inducción

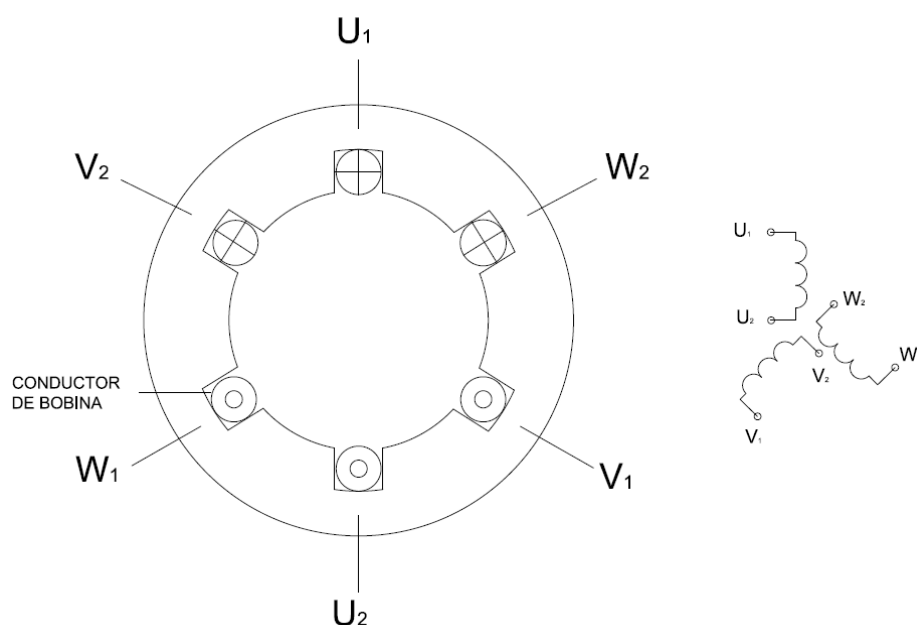
El motor a inducción está formado por dos estructuras funcionales principales que permiten su cometido, una parte móvil denominado rotor y una parte fija denominada estator, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1. Estructura motor de Inducción**

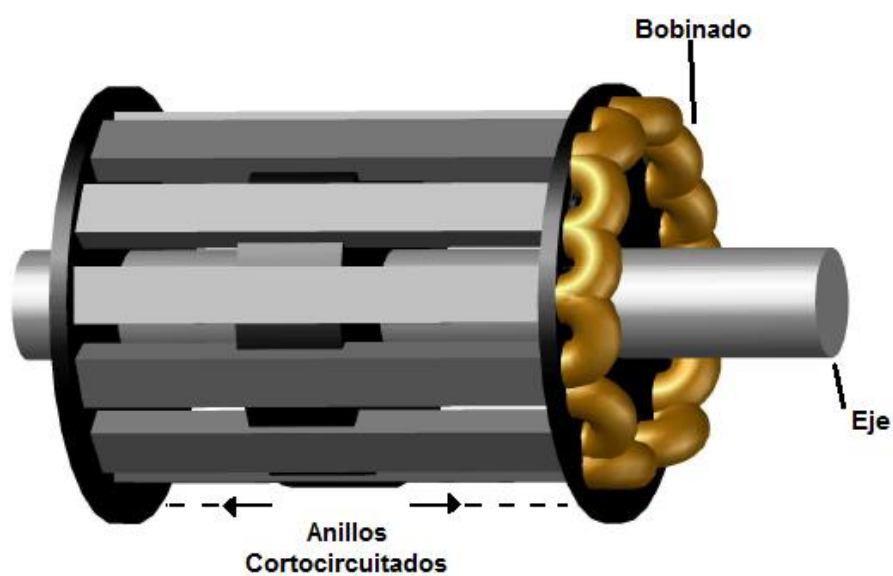
**Fuente:** (SINAIS)

En el estator se encuentran tres devanados dispuestos a  $120^\circ$  de desfase entre ellos y de dos pares de polos, los cuales al ser alimentados por una red trifásica a una frecuencia  $f_1$ , produce una onda senoidal con un efecto físico de giro en el rotor.



**Figura 2. Estator y bobinas de un motor trifásicos**

El devanado del rotor es el devanado inducido, que gira sin necesidad de escobillas o conmutadores, siendo una extensión de este, otra estructura que forma el eje de la máquina, que dependiendo de su disposición estructural puede ser de rotor bobinado o tipo jaula de ardilla.



**Figura 3. Rotor bobinado**



El devanado del rotor tipo jaula de ardilla está constituido por barras de aluminio cortocircuitadas en los extremos por anillos terminales, con la diferencia del de rotor bobinado que en su núcleo magnético se encuentra el bobinado hecho de cable de cobre similar al del estator.

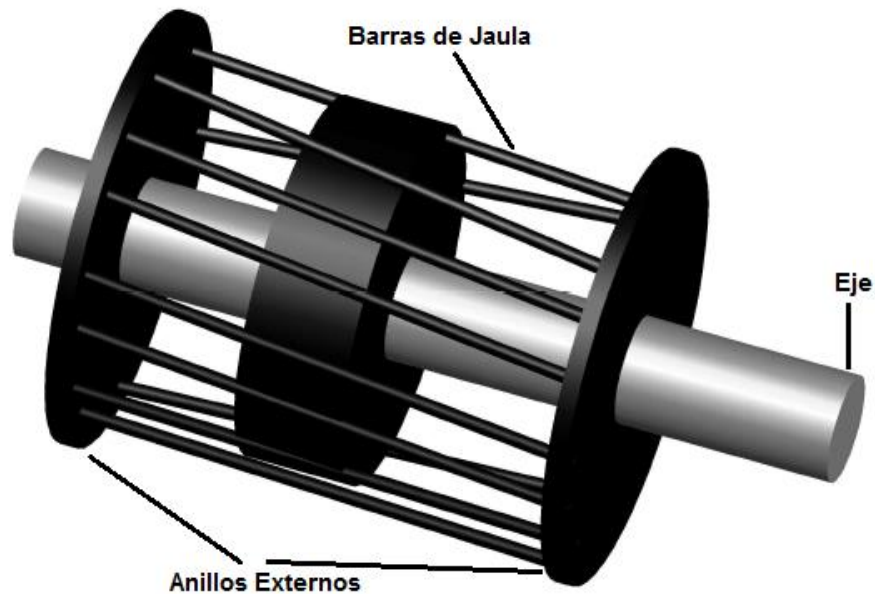


Figura 4. Rotor tipo jaula de ardilla

#### 2.1.1.2 Funcionamiento de un motor a inducción

Al conectar una fuente trifásica al estator de una máquina asíncrona, se introduce corrientes trifásicas en cada uno de los devanados del estator.

$$i_a = I_0 \cdot \cos(f_1 \cdot t)$$

$$i_b = I_0 \cdot \cos(f_1 \cdot t - 2 \cdot \pi/3)$$

$$i_c = I_0 \cdot \cos(f_1 \cdot t + 2 \cdot \pi/3)$$

Según la Ley de Biot-Savart que indica que las corrientes eléctricas generan campos magnéticos:

$$B_a = K \cdot i_a \cdot \cos(\theta)$$

$$B_b = K \cdot i_b \cdot \cos(\theta - 2 \cdot \pi/3)$$

$$B_c = K \cdot i_c \cdot \cos(\theta + 2 \cdot \pi/3)$$

$$B_{total} = B_a + B_b + B_c = (3/2) \cdot K \cdot I_0 \cdot \cos(p\theta - f_1 t)$$

Produciendo un campo magnético total de amplitud constante y una velocidad de sincronismo  $n_1$  en función de la frecuencia de entrada y del número de polos:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \text{ r.p.m.}$$

De esta manera se introduce una fuerza electro-magnética en los conductores del circuito cerrado del devanado secundario a través del campo inducido.

Que de acuerdo a la ley de Faraday, indica que la fem en un conductor de longitud L que se mueve a cierta velocidad V dentro de un campo B está dado por la ecuación:

$$e = \int (V \times B) \cdot dl = (V \times B) \cdot L$$

Donde el rotor gira en sentido contrario al campo, por una fuerza que aparecerá en los conductores del rotor (ley de Laplace), dispuestos de acuerdo a ley de la mano derecha para su sentido:

$$F = i \cdot (L \times B)$$

El momento total de estas fuerzas origina el torque de rotación de la máquina que obliga a girar al rotor siguiendo el movimiento del campo

giratorio, de tal forma que cuando más se aproxime a la velocidad  $n_1$  del campo, tanto menor resulta la fem inducida en los conductores del rotor y en consecuencia, resultan también reducidas las corrientes en el mismo, esto provoca una disminución del torque interno o par electromagnético del motor.

Si como caso límite, el rotor girase a la velocidad de sincronismo  $n_1$ , no habría entonces movimiento del campo giratorio respecto del rotor, desapareciendo con ello la fem inducida y como consecuencia de estos se anularía la corriente y el torque.

De este modo la velocidad de sincronismo  $n_1$  constituye el límite teórico al que puede girar el rotor. Por lo que la relación entre la velocidad de giro del eje del rotor y la velocidad de giro del campo giratorio del estator se denomina **deslizamiento**:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

El valor porcentual de esta característica en motores a plena carga debe oscilar entre el 3% al 8%. Si se incrementa la carga mecánica de la máquina, el torque de motor se hace mayor que el torque interno, variando la velocidad de giro y provocando un aumento del deslizamiento, elevando las corrientes del rotor y el torque, estableciendo un equilibrio dinámico entre los momentos resistentes y de movimiento de motor.

Las frecuencias de las corrientes del rotor están relacionadas con la frecuencia del estator por medio de la expresión:

$$f_2 = s \cdot f_1$$

### 2.1.1.3 Curva Característica de un motor

Para poder caracterizar un motor es importante analizar su comportamiento desde su excitación eléctrica hasta la carga a la cual se le aplica para determinada velocidad angular. Es por esto que las curvas características se representan respecto a la velocidad angular, una con la corriente absorbida y otra relacionada con el torque del motor.

Desde la toma de energía, la oscilación del flujo de corriente como de tensión vienen desfasados y varían de un valor máximo píco a uno mínimo en función del tiempo y frecuencia, en forma de onda senoidal.

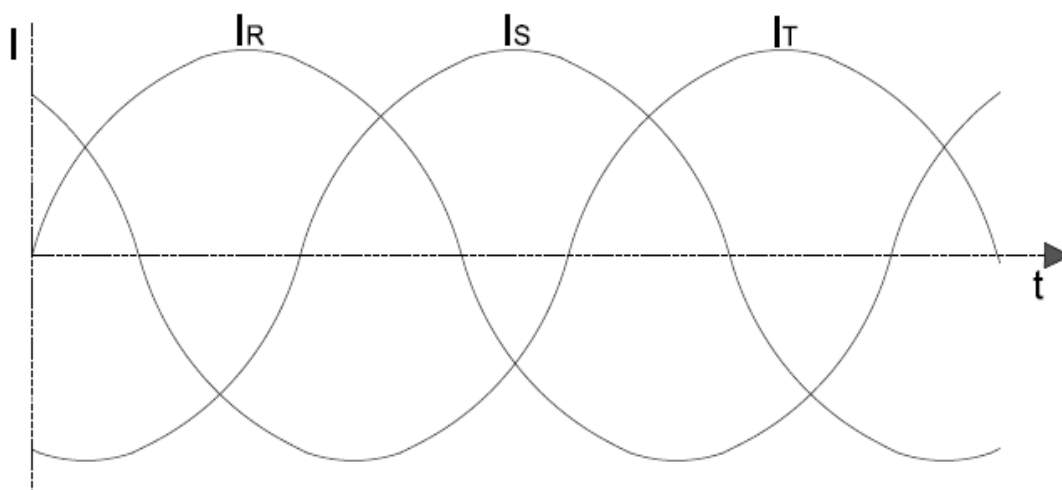
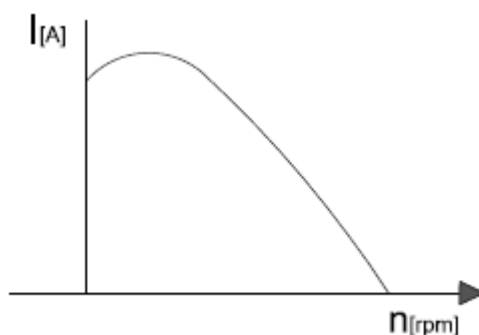


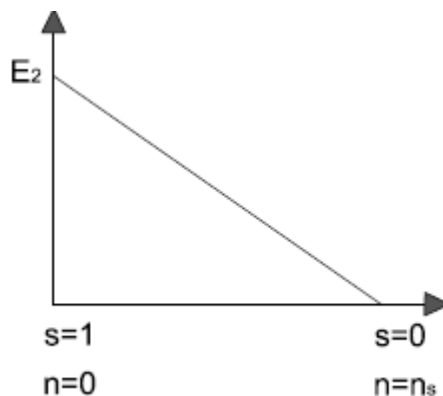
Figura 5. Ondas de corrientes en fases R, S, T, en un instante de tiempo

La corriente de excitación para el motor tiene una relación directamente proporcional a la variación de la carga de trabajo que se aplica al estator, por lo que mientras más carga aplicada el equipo necesitará consumir más corriente de la red eléctrica, para poder realizar su transducción de energía eléctrica a mecánica. De esta manera el incremento de corriente y por ende de la carga, disminuirá la velocidad dinámica del equipo en valores proporcionales a estos como se puede apreciar en la curva de la figura 6.



**Figura 6.** Tendencia de Curva Corriente de línea vs velocidad angular, en trabajo con carga

El sistema parte de una velocidad ( $n$ ) de cero con alto valor de fuerza electromotriz necesaria para el arranque, llegando casi a su velocidad de sincronismo ( $n_s$ ) que es a la cual se desplaza el flujo magnético que excita al rotor. Cuando el valor de velocidad de giro alcanza la velocidad de sincronismo, cosa que no lo puede hacer por sí solo, con la mínima cantidad de fuerza electromotriz no existe deslizamiento.

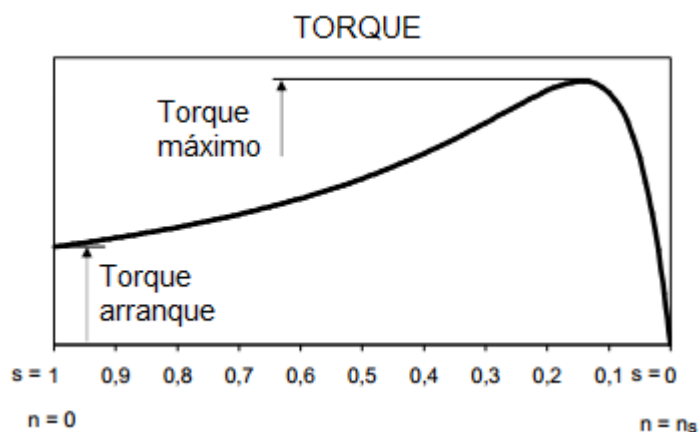


**Figura 7.** Variación de la fuerza electromotriz inducida en el rotor con la velocidad de giro

**Fuente:** (Álvarez, 1990; Álvares, 2009)

En vacío, al arrancar el motor, este aumenta su velocidad y de igual manera aumenta el torque del mismo, hasta poco antes de llegar a su velocidad de

sincronismo que alcanza su torque máximo y velocidad constante en vacío. Estos valores funcionales de estabilización de variaciones, como muestra las gráficas, son mínimas.

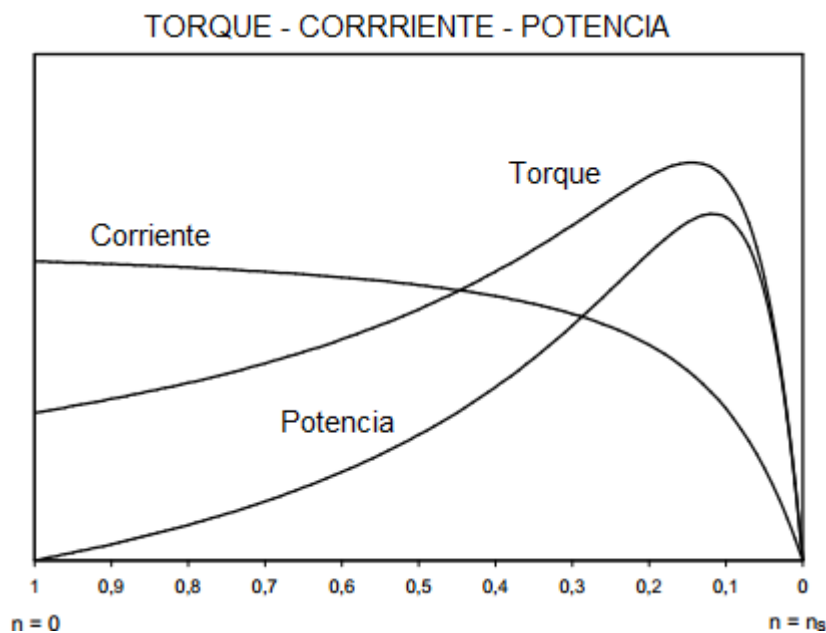


**Figura 8. Torque de un motor trifásico de inducción en función del deslizamiento**

**Fuente:** (Álvarez, 1990; Álvares, 2009)

Desde el momento del arranque hasta que el sistema se estabiliza, la velocidad, corriente, potencia y torque, van a tomar valores crecientes y decrecientes como indica la gráfica de curvas. Todos estos valores muestran el comportamiento del sistema sin carga hasta antes de la velocidad de sincronismo, por lo que mientras se aumenta la carga la velocidad irá disminuyendo.

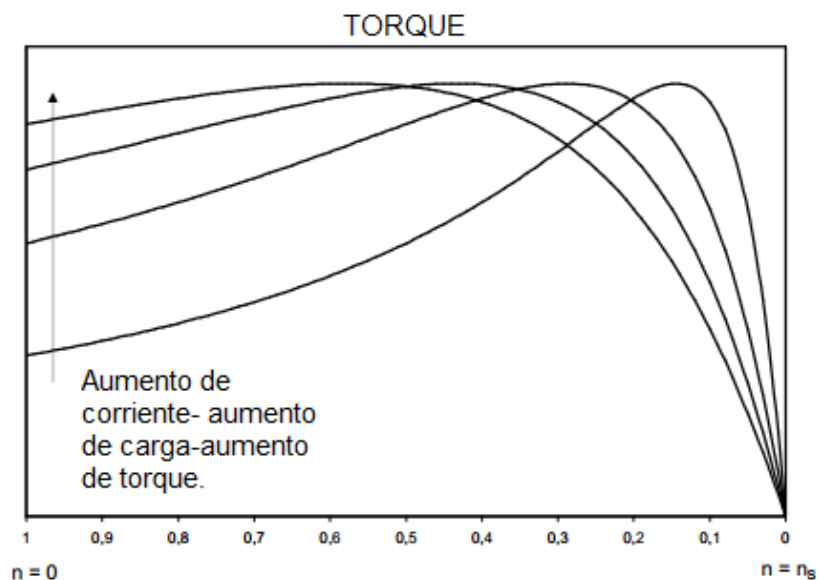
La corriente necesaria en motores asincrónicos en el momento de arranque es elevada y del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal, como se ve en la figura incluso más alto que las curvas par y potencia, hasta llegar a valores de plena carga.



**Figura 9.** Variación de potencia, torque y corriente con respecto a la velocidad angular en un motor trifásico.

**Fuente:** (Álvarez, 1990; Álvares, 2009)

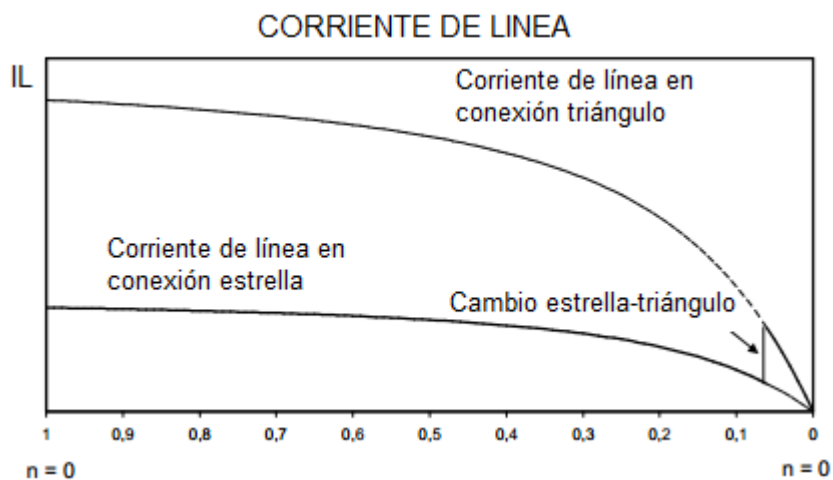
El incremento de la carga producirá un mayor esfuerzo para el torque de arranque hasta llegar a su velocidad nominal.



**Figura 10.** Variación del torque de un motor trifásico de inducción con incremento de carga en el rotor

**Fuente:** (Álvarez, 1990; Álvares, 2009)

El sistema para arrancar en vacío con torque resistencia débil, es el conocido estrella-triángulo, el mismo que consiste en arrancar el motor con sus bobinados conectados en estrella y después de alcanzar una cierta velocidad en un determinado corto tiempo, cambia sus bobinados a conexión en triángulo, recibiendo plena tensión, reduciendo la corriente de línea y el torque del motor a la tercera parte.



**Figura 11. Variación de corriente en arranque estrella-triángulo**

**Fuente:** (Álvarez, 1990; Álvares, 2009)

## 2.2. ÁMBITOS DE APLICACIÓN

La elaboración de un sistema que pueda observar características no visibles y de difícil medición son las principales causas de la elaboración de este proyecto. Los motores eléctricos de inducción presentes en su mayor parte en los procesos industriales, necesitan un óptimo funcionamiento para trabajos precisos o de permanente funcionamiento, inclusive aún si no necesitan constante mantenimiento se puede hacer un seguimiento a los motores que se tiene como back up o los ya usados a ser reemplazados por una línea de producción. El modelo de este sistema dispuesto en un proceso para la visualización constante del trabajo de la máquina, ayuda a ver las



variaciones que se presenta en el proceso de trabajo de un motor trifásico, como son velocidades, variaciones de tensiones, corrientes y potencias.

Existe variedad de equipos de medición como los vatímetros, voltímetros, amperímetros, medidores de factor de potencia, medidores de torque, medidores de velocidad angular, etc., pero todos estos además de su elevado costo, no se relacionan entre sí para poder dar un diagnóstico total, centralizado y entendible de la máquina de inducción tratada hacia el operario de mantenimiento. Es por esto que la aplicación en este proyecto está atendiendo a la necesidad de un conjunto de características medibles y calculables de una máquina asíncrona, de forma visual y adaptable a varios equipos.

## **2.3. TECNOLOGÍAS**

### **2.3.1. Dispositivos para la medición de datos**

Los dispositivos para la medición de datos son los que transmiten el estado del proceso a los controladores, formando parte del primer nivel de la pirámide de automatización, están divididos de acuerdo a su forma de tomar y presentar los datos a ser transmitidos. Su elaboración y costo tecnológico son directamente proporcional a su eficiencia, precisión y sencillez uso.

### 2.3.1.1 Sensores analógicos

#### Transformador de corriente (CT)

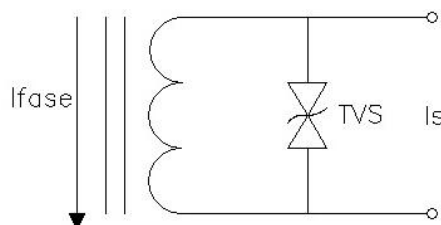


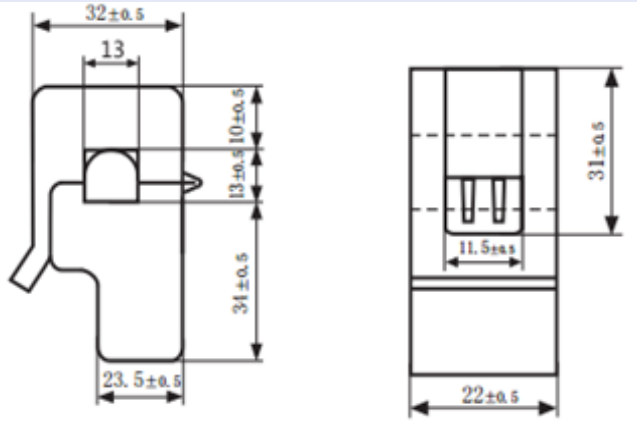
Figura 12. Supresor de tensión transitoria (TVS)

Este es un sensor para medir la corriente alterna mediante un transformador, el cual haciendo uso de la ley de Biot-Savart genera un campo magnético a través del flujo de corriente por un conductor, variando e induciendo sobre el campo inducido del bobinado, el cual generará una variación de tensión en sus terminales.

El sensor de corriente seleccionado es el SCT-013, que se utilizará para realizar las mediciones de corriente a través de cada fase. Este dispositivo fue adquirido debido a su núcleo partido, que brinda la particularidad de ser fácilmente adaptable al medio en el que se va a realizar la medición (enganche) y a sus rangos de funcionamiento que se muestra en la siguiente ficha técnica.

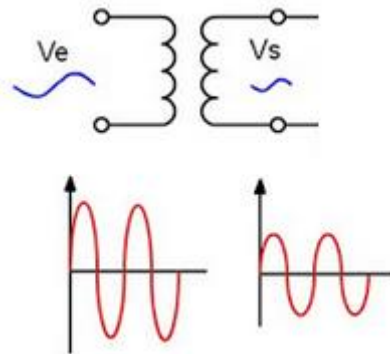
Tabla 1.

## Datos técnicos sensor de corriente

Sensor Transformador de corriente	Modelo: SCT-013-030
 <p>Vista Frontal</p> <p>Vista Lateral</p>	<p>Entrada de corriente: 0-30 A</p> <p>Salida: 1V</p> <p>Grado de resistencia: B</p> <p>No-lineal: <math>\pm 3\%</math></p> <p>Relación de espiras: 100:0.05A</p>

## Transformador de Voltaje (TR)

Un transformador puede aumentar o disminuir el voltaje y la intensidad de entrada que es aplicada al devanado o bobinado primario, actuando sobre el devanado secundario mediante el principio de inducción electromagnética de Faraday. Para este caso el número de vueltas del devanado primario será mayor que el secundario, logrando así cumplir con la necesidad de tener una entrada de 220 V en la entrada del transformador y una salida de 12 voltios en los terminales del devanado secundario, conservando esta relación a una frecuencia de 60 Hz.



**Figura 13. Transformador reductor**

En este transformador de 220V a 12V no habrá otro trato de la señal como es la de rectificación, debido a que la oscilación presente servirá para la identificación de la onda en LabVIEW.

La relación de transformación viene a ser la relación que existe entre el número de espiras y el voltaje de entrada sobre el de salida, sin considerar carga.

$$\frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1}$$

Donde el número de vueltas por voltio viene dada por la relación de la potencia máxima sobre el área del núcleo:

$$\text{número de vueltas} = \frac{P_{max}}{Area}$$

$$\text{Número de vueltas de primario} = \text{vueltas} * V_e$$

$$\text{Número de vueltas de secundario} = \text{vueltas} * V_s$$

El efecto Joule, por pérdida en los devanados en forma de calor, así como pérdidas en el núcleo por histéresis o efecto Foucault, podría ser un factor que

altere a la salida del transformador para obtener una buena lectura, por lo que se obtendrá un transformador comercialmente, para la toma de diferencia de potencial en el devanado secundario.

### **2.3.1.2 Sensores digitales**

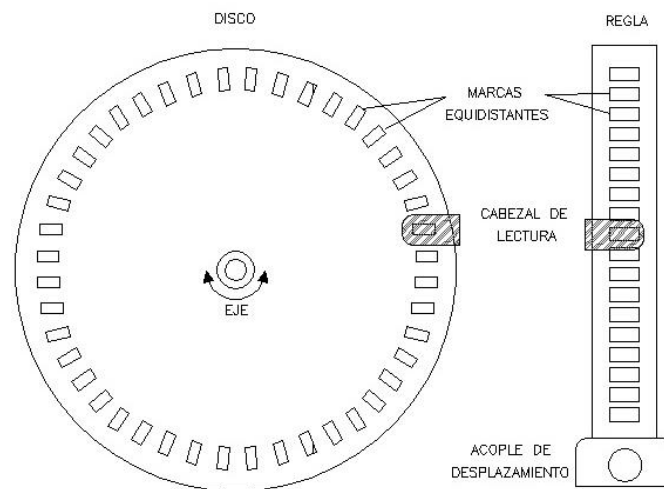
El uso de sensores digitales tiene cada vez mayor presencia en los sistemas digitales, no solo por su facilidad de salida de datos para ser procesadas, sino también por la inmunidad que brinda ante ciertas interferencias electromagnéticas.

Un sensor digital lee una señal analógica para convertirla en una señal digital. Existen dos tipos de sensores digitales, los auto-resonantes que son basados en un fenómeno físico oscilatorio, y los sensores codificadores como los que se usará en el proyecto de caracterización, que convierte una señal analógica en digital.

#### **2.3.1.2.1 Codificadores de posición**

##### **Codificadores incrementales**

Los sensores de posición pueden estar dispuestos de dos maneras: lineal o angular, diferenciando dos partes, una fija que es el cabezal de lectura, y una móvil en la que existe dos marcas de lectura alternadas y equidistantes que van a registrar el desplazamiento. Es por eso que la resolución de un sensor angular está dada por el número de impulsos de salida.



**Figura 14. Estructura de un sensor incremental angular o lineal**

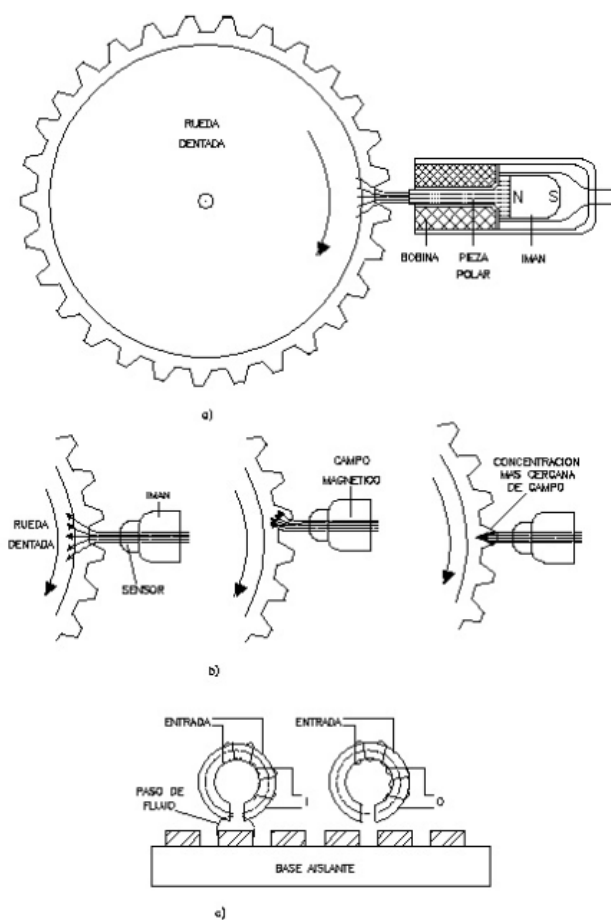
**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

$$N = \frac{\pi D}{2X}$$

Donde D= diámetro del disco y X= anchura de sector codificado.

De esta manera un incremento en la posición produce una lectura del cabezal sobre las partes cambiantes. Los elementos para la diferenciación de los sectores magnéticos, eléctricos u ópticos, dando una salida de pulsos en un ciclo de trabajo del 50%.

En un elemento lineal o circular con dientes de material ferromagnético, se da un impulso cada vez que pase por delante de una bobina fija dispuesta en un campo magnético constante. La forma de la señal obtenida es casi senoidal, pero se puede determinar el paso por cero de esta. Hay una velocidad mínima y máxima que determina el margen de aplicación de este método.



**Figura 15. Sensores incrementales de posición a) bobina e imán, b) imán y sensor magneto-resistivo, c) núcleo toroidal.**

**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

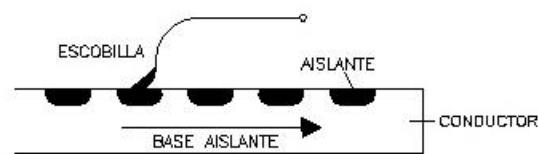
La curvatura de las líneas de campo magnético depende de qué zona de la rueda queda enfrentada al sensor. La salida es independiente de la distancia a la rueda, dentro del margen de medida.

Dos bobinas dispuestas en un núcleo toroidal como se puede ver en la figura 15, en la que una se excita con corrientes de 20 a 200kHz, otra en la que hay un estado de detección de tensión igual a “1” y otra tensión de frecuencia igual a la de excitación “0”. Donde el elemento móvil posee zonas con material magnetizado que cuando éste queda frente el cabezal de lectura se satura por la emanación de flujo del material más el flujo creado por la señal

de excitación. Con el núcleo saturado no se detecta tensión alguna en la segunda bobina ( $e=d\phi/dt$ , con  $\phi$  constante en saturación) estado "1". Cuando delante de la cabeza de lectura hay una zona que no posee material magnetizado, la segunda bobina detecta una tensión inducida por la primera, estado "0". Una variante de la técnica anterior empleada es el detector por efecto Hall o magneto-resistivo.

Los codificadores eléctricos pueden ser capacitivos o de contacto. Los capacitivos emplean una disposición similar al Inductosyn, pero sin apantallamiento eléctrico entre la pista fija y la móvil. De esta forma hay un cambio de capacidad cíclico, con un periodo igual a la distancia entre líneas, que puede ser de 0,4mm.

Los codificadores de contacto, presentan en su parte móvil segmentos conductores que hacen contacto al pasar por escobillas que cierran el circuito de registro al ser desplazados, existiendo así una clara presencia de desgaste y por lo tanto pérdida de contacto.



**Figura 16. Codificador de posición incremental con escobillas y contacto eléctrico**

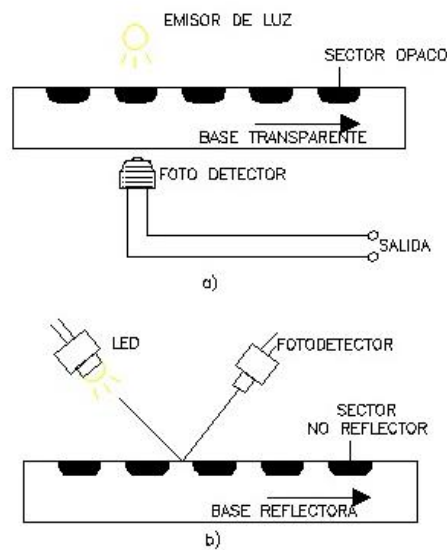
**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

Sin duda los de mayor uso serán los que no se basan en el contacto. En esto se encuentran los ópticos, que pueden ser sensores reflectores y no reflectores, en los que hay una fuente emisora de luz infrarroja (LED) y un



foto-detector que lo recibe. Un problema común en estos es la acumulación de polvo en las ópticas de conducción o las interferencias por vibraciones.

En la parte móvil, que se desplaza para el registro, puede llevar sectores oscuros o transparentes para el caso de los no reflectores y sectores reflectores o no para el otro caso.



**Figura 17. Codificador óptico a) no reflector y b) reflector**

**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

Los codificadores de franjas de interferencia están basados en las figuras de Moiré. En esta presenta una regla móvil y una fija de rayas inclinadas. Si la inclinación  $a$  es tal que  $a=p/d$  cuando hay un desplazamiento relativo de recorrido  $p$  (paso entre líneas) se produce un desplazamiento vertical  $d$  de una franja oscura horizontal. Si la inclinación es  $n$  veces mayor, aparecen  $n$  franjas oscuras horizontales.

Si se trata de un movimiento giratorio se puede utilizar dos discos similares adjuntos, uno fijo y otro móvil, en el que un disco tenga  $N$  franjas en dirección radial y el otro  $N+1$ . También se obtiene franjas de interferencia si en ambos

hay N rayas pero se encuentran descentrados o con distintas inclinaciones. Si se dispone un emisor de luz y un detector que detecta una señal casi senoidal con N ciclos por vuelta si se trata de un codificador angular.

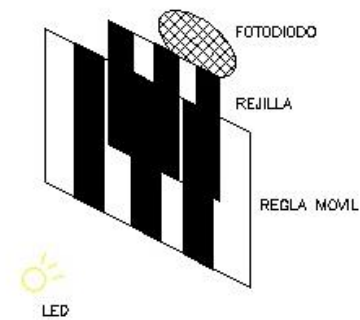


**Figura 18. Codificador incremental de franjas de interferencia**

**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

La resolución obtenida con los codificadores incrementales angulares es del rango de 100 a 6000 cuentas/vuelta, que se puede aumentar fácilmente en un factor de 100 en el caso de que el detector ofrezca varias salidas senoidales desfasadas, entonces es posible interpolar entre máximos sucesivos.

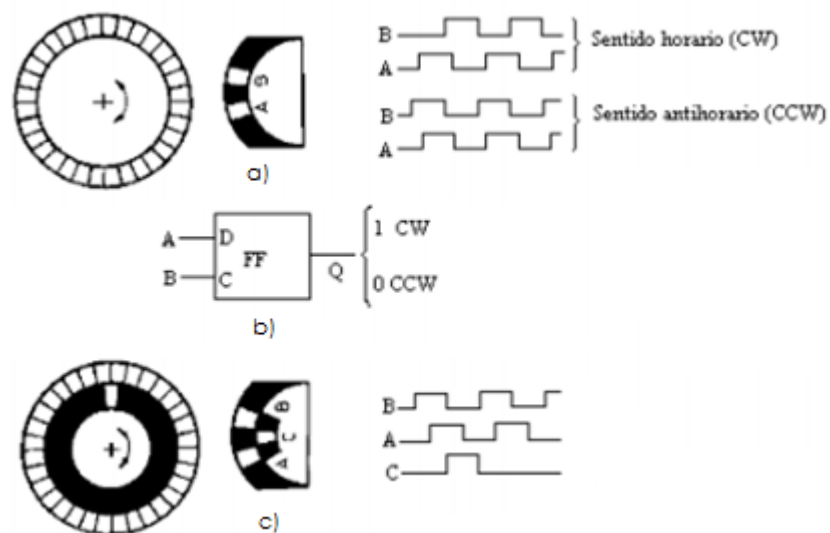
Los codificadores incrementales ópticos son los que brindan mayor resolución en cuanto a medidas, pudiendo aumentar inclusive su resolución disponiendo una o varias rejillas fijas entre el elemento móvil y el detector, que tengan zonas opacas y transparentes con la misma apertura que el elemento codificado para que el detector reciba el máximo de luz cuando las rejillas y el elemento móvil estén perfectamente alineados.



**Figura 19. Codificador incremental óptico de rejillas**

**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

Conforme este último se desplace de dicha posición, la luz recibida irá decreciendo hasta alcanzar un mínimo. El foto-detector promedia la señal de más de una rendija, con lo que compensa posibles desigualdades en éstas. Al disponer de una señal continua entre máximos, es posible interpolar.

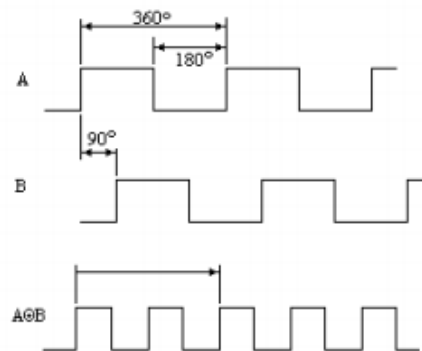


**Figura 20. Generación de pulsos por rejilla de codificador incremental óptico**

**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

Para poder determinar el sentido de avance es necesario añadir otro elemento de lectura, pistas e inclusive circuitos. En los codificadores inductivos se añade otra bobina sensorial que dé una señal desfasada  $90^\circ$  respecto de la anterior, y un detector de fase que dará una indicación del sentido de giro. En los codificadores ópticos y de contacto, se añade una línea de sectores codificados que esté ligeramente desfasada respecto de la primera y con su elemento de lectura correspondiente. En los codificadores de franjas de interferencia y en los ópticos de alta resolución se emplean dos conjuntos ópticos que den salidas a  $90^\circ$  uno del otro, y a veces otros dos conjuntos a  $180^\circ$  de los anteriores para aumentar más la resolución.

Cuando se dispone de dos señales de salida en cuadratura, se puede duplicar la resolución con una O-exclusiva entre ellas. Derivando y rectificando los impulsos se puede duplicar la resolución con la característica de una sola señal.



**Figura 21. Duplicación de la resolución de encoder incremental con dos señales en cuadratura**

**Fuente:** (Blasquez & Viale, 1995)

### 2.3.2. Sistema de adquisición de datos

El paso previo al tratamiento y procesamiento de señales se encuentra en los dispositivos de adquisición de datos, los cuales obtienen las señales

medidas y adecuadas para poder ser procesadas y presentar su resultado al consumidor final.

El proceso de medida de variables hasta el muestreo de dichas señales se realiza en un esquema ordenado de la siguiente manera:

1. Lectura de la medida (sensores)
2. Adaptación de la señal leída (amplificadores operacionales)
3. Sistema de adquisición de datos (hardware de adquisición)
4. Sistema HMI (LabVIEW)

Existe variedad de dispositivos encargados de la adquisición de datos, teniendo factores muy importantes que los diferencian, como son el valor económico, la cantidad de entradas y salidas de datos que puede procesar, el tipo de señales a tratar, velocidad y características de procesamiento de datos, etc.

En el presente proyecto se analizará las características principales y cuál es la de mejor funcionalidad y adecuación para el módulo de caracterización de un motor, tomando en cuenta dos tecnologías de adquisición de datos de mayor aceptación como son los PLC's y las tarjetas DAQ.

### **2.3.2.1 Sistemas para el acondicionamiento de datos**

En la actualidad, la mayoría de los sensores entregan una salida en tensión o corriente, para su fácil acondicionamiento de señal a ser transmitida a un sistema de adquisición de datos.

De acuerdo al tipo y forma de entrega de señal del sensor, los sistemas de acondicionamiento entre los más comunes pueden ser:

- **De filtrado:** el propósito del filtrado es descartar o impedir el paso de señales extrañas que se encuentren sobre la frecuencia de trabajo, evitando así alterar las lecturas y modificación de señales al llegar a la tarjeta de adquisición.
- **De amplificación:** se aplica principalmente cuando la señal proporcionada por el transductor es muy débil o baja, no entra en el rango de lectura del sistema de adquisición. La señal debe ser amplificada de tal manera que su variación entre en la escala de lectura del equipo de adquisición de datos.
- **De comparación:** el principal uso de un comparador se da cuando existe variación de señales y se desea obtener la lectura solo de ciertos niveles, haciendo paso con una fuente externa que contenga los valores necesarios para el siguiente sistema.
- **De conversión por opto-acopladores:** cuando se desea aislar el sistema de medición de señales del sistema de adquisición de datos, con el fin de evitar el uso de masas comunes y derivación de corrientes por ende, se usa un conversor de señal eléctrica a señal óptica.
- **De transformación:** ya que la mayoría de los sensores tienen a su salida variaciones de voltajes y corrientes, con valores muy sobre los aceptados por los equipos de adquisición de datos, por lo que se debe convertir en una diferencia de potencial o intensidad proporcional al valor medido y al rango de valores admisibles por un sistema de adquisición.

- **De excitación:** algunos sensores que realizan un pequeño proceso con la señal medida, como es el de la variación de voltaje o corriente proporcional a la magnitud a seguir, necesita de una excitación externa.

### 2.3.2.2 PLC

Los PLC's o programadores lógicos programables son equipos robustos destinados exclusivamente a la programación para el procesamiento de señales, tanto análogas como digitales, usualmente aplicados en el control de máquinas y procesos industriales. Según la IEC 61131 los define como dispositivo Autómata Programable, cuya definición es *“Un autómata programable (AP) es una máquina electrónica programable diseñada para ser utilizada en un entorno industrial (hostil), que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones orientadas al usuario, para implantar soluciones específicas tales como funciones lógicas, secuencias, temporizaciones, recuentos y funciones aritméticas, con el fin de controlar mediante entradas y salidas, digitales y analógicas diversos tipos de máquinas o procesos”*. (Oviedo)

Formando parte del segundo nivel de la pirámide de automatización que es el nivel de control, estos dispositivos tienen las siguientes características:

- Funcionamiento óptimo y robusto.
- Abarata costos.
- Mejora la calidad.
- Libera tareas repetitivas.
- Aumenta la producción.

Aunque mientras mayor sea el número de componentes será mayor el número de fallas, los fines que persigue son la de confiabilidad y eficiencia. El periodo de tiempo que transcurre entre dos funcionamientos fuera de régimen normal y la respuesta del sistema ante perturbaciones define su confiabilidad.

Una instrumentación inteligente incorpora sensores y actuadores en uno solo, los PLC's son de montaje fácil, manejo simple, fácil conexión en la que la entrada al sistema viene de los sensores y la salida se aplica sobre los actuadores.

La estructura física de un PLC puede ser compactas o modulares:

- **Compactas:** se encuentra en un solo bloque y no puede ser separado, se pueden adicionar entradas y salidas pero con mayor costo que el modular de fuente y procesador en uno solo.
- **Modulares:** en este los módulos pueden ser adicionados.
  - Americano: 1 módulo de fuente y CPU, y otro módulo de entradas y salidas.
  - Europeo: todos los componentes separados en diferentes módulos.

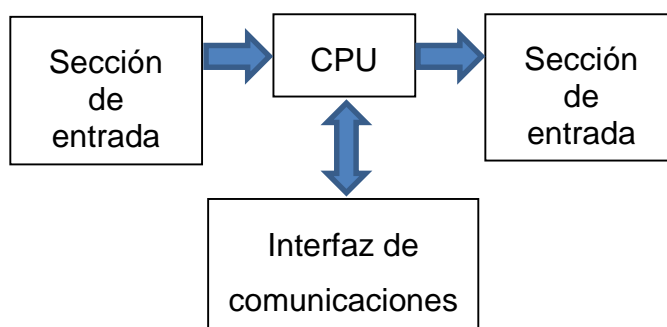


Figura 22. Módulos de intercomunicación estructurales de un PLC



La unidad **CPU** controla los ciclos para ejecutar auto-test, comunicaciones periféricas y la programación, formado por un bloque procesador, otro de memoria y otro circuito auxiliar.

Las diferentes memorias (ROM, RAM, EEPROM) en un PLC se distribuye: una para programación y memoria del sistema (firmware), otra sección de memoria para la tabla de datos y la memoria en la cual se aplica la programación de usuario.

Existen 3 tamaños caracterizados por el número de entradas/salidas disponibles e instrucciones que pueden procesar.

- Gama baja: menor a 128 I/O, menor o igual a 2K instrucciones.
- Gama media: entre 128 y 512 I/O, menor o igual a 16K instrucciones.
- Gama alta: mayor a 512 I/O, mayor a 15K instrucciones.

Según el fabricante, como son los más conocidos y destacados Allen Bradley y SIEMENS, presentan diferentes características eléctricas, de comunicación, de software de programación (por ejemplo: AB-Rslogix, Siemens-Step7), cantidad de entradas y salidas, memoria y capacidad de expansión.

### **2.3.2.3 DAQ**

*“La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido”* (Instruments). Este proceso es el último en la obtención de señales. Las tarjetas de adquisición no son tan robustas como los PLC's, sin embargo son de gran utilidad y fácil manejo, de igual manera para variedad de tipo de

señales y procesamiento según los componentes electrónicos que presente cada diseño de tarjeta.

Las características que describen a una tarjeta son: el número de entradas y/o salidas lógicas o análogas, resolución, velocidad de muestreo y procesamiento, capacidad de temporización, conversores análogo-digital / digital-análogo, y forma de comunicación con otros sistemas.

- **Número de entradas y salidas:** esta característica muestra la cantidad de canales análogos y digitales que puede tener una DAQ. Como por ejemplo en las tarjetas de adquisición mediante un conversor ADC se obtiene la señal adecuada del proceso análogo leído. Las señales de entrada están divididas según el rango de valores que pueden ser medidos para ser procesados, es así que, mientras menor sea el rango de entrada mayor será su precisión de lectura. De igual manera, si mayor es el número de entradas del dispositivo, este sería de mayor capacidad.
- **Resolución:** es el tamaño en bits del conversor análogo digital con el que se realiza el muestreo de señales, por lo que si se tiene mayor número de bits del ADC, la tarjeta tendrá mayor resolución y podrá detectar las pequeñas variaciones que presentan algunos procesos. Donde la resolución se expresa por el valor de rango de entrada sobre los niveles  $2^n$ , donde n es el tamaño de la palabra del conversor (#bits).

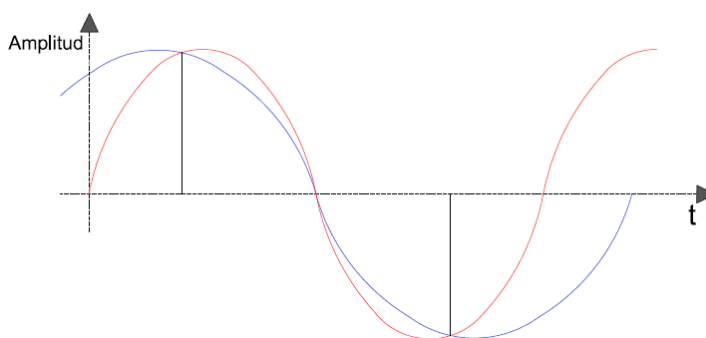
$$resolución = \frac{rango}{2^n}$$

- **Velocidad de muestreo:** según el teorema de Nyquist para una representación más exacta de la señal de entrada, la velocidad de muestreo debe ser mínimo dos veces la frecuencia a la que se encuentra la señal. Por lo que mientras más alta la frecuencia de muestreo más alto

será el número de muestras por segundo y mejor representación de la señal a ser procesada.

Al utilizar una frecuencia inferior se produce un fenómeno denominado Aliasing, que introduce una onda senoidal de frecuencia baja cuando intentamos reconstruir la señal.

Este fenómeno se da cuando las muestras se unen para dar una forma de onda senoidal de frecuencia más baja totalmente diferente a la original.



**Figura 23. Efecto Aliasing**

Mientras se aumenta el número de canales de lectura, disminuirá el número de muestras por segundo a obtener en cada canal.

$$V_{muestreo \times canal} = \frac{V_{muestreo \text{ ADC}}}{\#canales}$$

- **Temporización:** la temporización es una característica propia de cada tarjeta, con la cual se establece tiempos para ciertos eventos, como lecturas, interrupciones, generación de ondas de reloj, entre otras.

- **Comunicación:** el medio de comunicación por cual se puedan transmitir los datos puede ser muy diferentes de acuerdo a los estándares, entre los más usados y de acuerdo a las características propias de cada tarjeta están los:
  - Adquisición de datos wireless: Son los sistemas inalámbricos que eliminan los costos y tiempo invertido en el cableado. Cuentan con transmisores inalámbricos que envían datos a un receptor inalámbrico conectado por USB o Ethernet a un ordenador remoto.
  - Comunicación en serie: Existe varios estándares de comunicación en serie, entre el más común está el RS232, que soporta comunicación de punto a punto a distancias cortas. Mientras que el estándar RS485 soporta distancias de transmisión de hasta 1500m con uno o dos pares de cables, permitiendo también compartir hasta 32 dispositivos en el mismo bus.
  - Vía USB: Bus Serie Universal (USB), es un estándar para conectar PC's a dispositivos periféricos como impresoras, monitores, módems y dispositivos de adquisición de datos. Esta tecnología incluye un mayor ancho de banda de hasta 4,8 Gbits/s como es el caso de la versión 3.0 de super alta velocidad y la capacidad de proporcionar energía al dispositivo periférico. USB es ideal para la adquisición de diferentes datos.
  - Vía Ethernet: La necesidad de integración de sistema de adquisición de datos distribuido sin el costo del cableado adicional, hace que esta solución sea la de mayor adaptación en la mayoría de las instalaciones industriales y comerciales. Muchos de estos dispositivos Ethernet incorporan un servidor web, que transmite a

su propia página web para presentar los datos adquiridos, con lo que cualquier usuario puede ver el banco de datos mediante un navegador web, pudiendo también compartir esta información con varios usuarios remotos.

- Adquisición de datos por plug-in boards: Las tarjetas de adquisición de característica plug-in board, conectan directamente sus terminales al bus de datos de un PC, ofreciendo mayor velocidad de transmisión. Las características propias de cada tarjeta varían dependiendo del número y tipo de entradas, salidas, rangos, velocidad de muestreo, etc. La dirección que toma la tarjeta instalada en el equipo va a un único mapa de ubicación I/O. Este mapa en el ordenador da las ubicaciones de dirección que el procesador deberá tomar para poder acceder al dispositivo.

### Tarjeta ARDUINO UNO R3

Una tecnología que en la actualidad se encuentra con mayor aceptación a baja escala de procesamiento es las tarjetas ARDUINO, la cual es basada en un micro-controlador de referencia de la ATmega328. Cuyos datos técnicos más relevantes en el caso del modelo UNO R3 son:

**Tabla 2.**

**Datos técnicos tarjeta ARDUINO**

COMPONENTE	CARACTERÍSTICA
Micro-controlador:	ATmega328
Voltaje de operación:	5V
Voltajes de entrada (recomendado):	7-12V
Voltajes de entrada (mínimo/máximo):	6-20V

CONTINÚA Tabla 2 -

Pines I/O digitales:	14 (6 proporcionan salidas PWM)
Pines entradas análogas:	6
Corriente DC por pin I/O:	40 mA
Corriente DC para pin 3.3V:	50 mA
Flash Memory:	32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB utilizados por el gestor de arranque.
SRAM:	2 KB (ATmega328)
EEPROM:	1 KB (ATmega328)
Velocidad de temporización:	16 MHz

#### 2.3.2.4 Plataforma LabVIEW

LabVIEW se denomina VI o instrumentos virtuales ya que maneja herramientas gráficas como osciloscopios, tacómetros, pulsadores, luces, tablas, multímetros, etc. Es un lenguaje de procesamiento de datos en paralelo el cual puede ser de código abierto o código cerrado. La interfaz LabVIEW cuenta con dos pantallas: una de usuario y una de terminal (diagrama de bloques), en las que se muestra o no el diagrama de bloques.

Las categorías más importantes de este sistema son los controladores e indicadores:

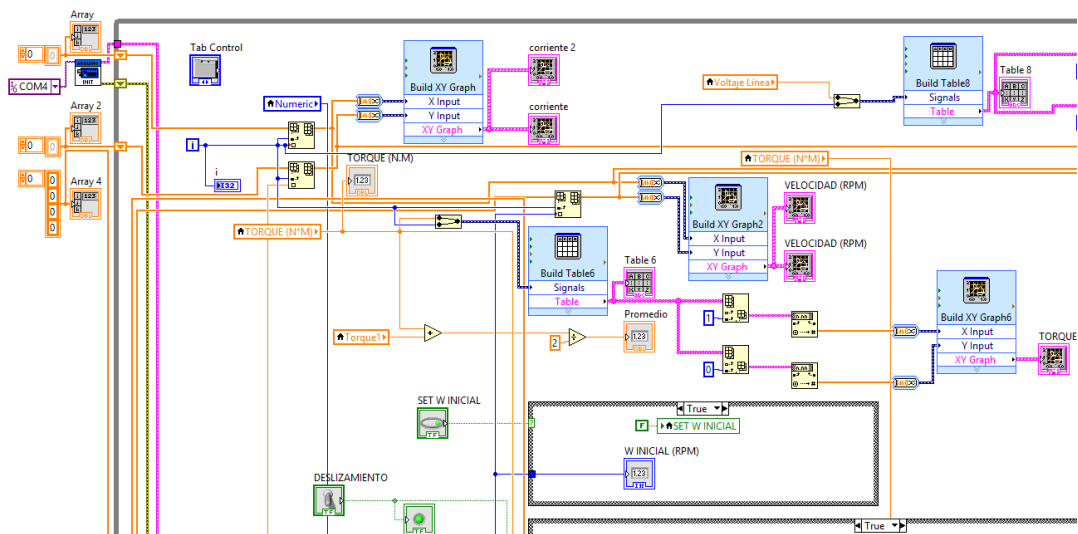
Indicadores: muestra alguna cantidad o magnitud física que este registrando, en otras palabras recibe información.

Los controladores son los que ajustan el valor de alguna variable física, proveyendo la información.

Los indicadores son gráficas, LED, y otros despliegues que después que se ha construido su interfaz, se agrega código utilizando los VI y estructuras para controlar los objetos del panel frontal, conteniendo el diagrama de bloques este código.

Internamente LabVIEW trabaja con 15 dígitos decimales, aunque el usuario normalmente ve solo la parte entera.

En la **ventana de terminal** es donde está la fuente de información y de donde salen los cables de transporte de datos a distintos destinos, lo que se denomina como programación por bloques.



**Figura 24. Ventana Diagrama de Bloques LabVIEW**

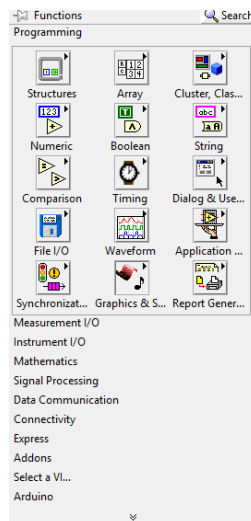
El color simbólico del bloque utilizado indica el tipo de dato que representa, como algunos ejemplos tenemos:

- Número de punto flotante: naranja
- Booleano: color verde
- Entero: azul

- Streang: rosado
- Dinámico: negro

En la sección de bloques, los terminales de borde grueso son distintivos de que la herramienta es un controlador, mientras que terminales de borde fino son indicadores.

Para acceder a todas las características funcionales de bloques en el terminal, damos clic derecho y exploramos las paletas de funciones.



**Figura 25. Paleta de Funciones LabVIEW**

Una función de bloque comúnmente usada es la “Structure” en la cual encontramos lazos cerrados como por ejemplo:

- while loop: permite que lo que hay dentro se va a ejecutar sucesivamente hasta que la condición del lazo lo detenga; el cual se lo puede realizar manualmente con el botón stop. El terminal indicador arranca siempre en cero (i).



La plataforma LabVIEW permite comunicarnos con hardware destinados a la adquisición de datos, dispositivos de control de movimiento y visión, e instrumentos como GPIB, PXI, VXI. RS-232 y RS-485.

## CAPITULO 3

### 3. ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA

El sistema eléctrico del motor se puede asimilar al de un transformador, con un rotor, un entre hierro, con bobinados que forman resistencias y reactancias en el estator para producir el campo rotante.

Las pérdidas que se generan en el entre hierro van reduciendo mientras la velocidad de giro alcanza su valor nominal debido a las frecuencias de corriente, asumiendo al entre hierro con una permeabilidad infinita, considerar estator y rotor lisos, se puede tomar el concepto de que toda energía del campo magnético está en el aire del entrehierro.

Al suponer en este caso una máquina sin desviaciones, que significa una máquina balanceada y con bobinas del estator y rotor iguales entre sí, permite que el modelo matemático a estudiar no resulte complejo.

En el análisis del sistema de caracterización, se presenta claras desviaciones en el caso de existir daños e incluso con un rango de permisividad de optimo trabajo de visualización de alrededor del 10%, cualquier anomalía deberá ser claramente observada, asumiendo valores

mínimos de pérdida en una máquina que debería ser balanceada si está constando en un inventario de un proceso productivo.

### 3.1. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

El sistema eléctrico que representa a un motor trifásico asíncrono, al igual que en un transformador, presenta bobinados y valores característicos del estator que influyen sobre el rotor.

Para el equivalente del circuito en el estator tenemos:

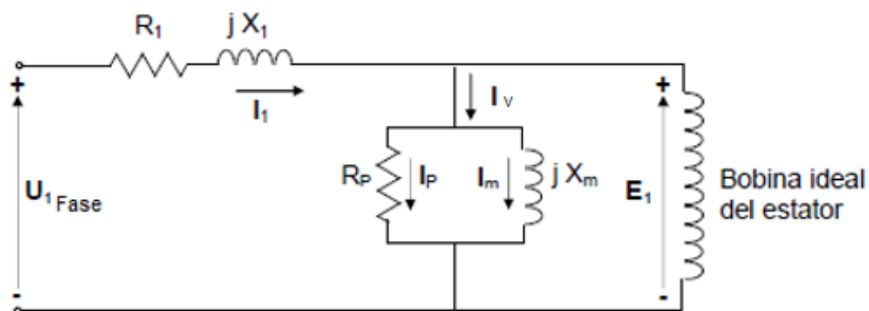


Figura 26. Circuito equivalente del estator

Donde:

$R_1$  representa la resistencia del devanado del estator.

$X_1$  representan las reactancias de los devanados del estator.

$R_p$  representa la pérdidas óhmicas en el entre hierro.

$U_1$  representa la diferencia de tensión de fase.

$I_1$  representa la corriente en el estator.

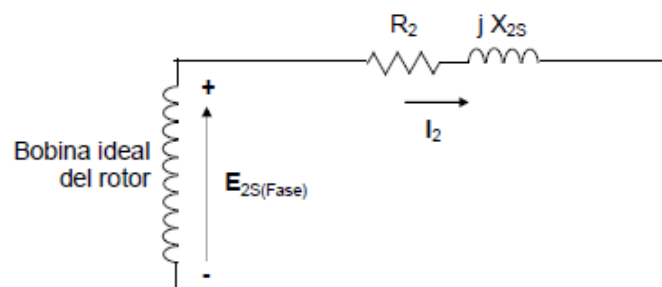
Ya que la corriente de vacío ( $I_v$ ) es pequeña en relación a la corriente nominal absorbida por el estator ( $I_{1N}$ ), se coloca en paralelo  $R_P$  y  $X_M$ . Sin embargo en el caso del motor asincrónico, esta aproximación no es tan buena porque en un motor existe entrehierro (espacio entre el estator y el rotor), por lo que la corriente de vacío alcanza valores típicos entre el 30 y 45 % de la corriente nominal del estator.

Las reactancias( $X$ ) y valores de fem( $E$ ) inducidas cambian mientras la velocidad de giro de la máquina varia, por lo que en un equipo detenido el deslizamiento parte de 1 asociado a estas características en el rotor.

$$X_{2s} = s * X_2$$

$$E_{2s} = s * E_2$$

El rotor presenta otro devanado y si no hay presencia de cargas resistivas este se toma en corto circuito, presentando también valores de resistencia y reactancia en sus conductores como se muestra en la siguiente ilustración de una fase.



**Figura 27. Circuito equivalente del rotor**

Despejando la corriente  $I_2$  del rotor y dividiendo para el deslizamiento tenemos:

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

De esta manera al dejar expresado en valores de reactancia y resistencia al rotor y estator, los podemos asociar en un solo circuito.

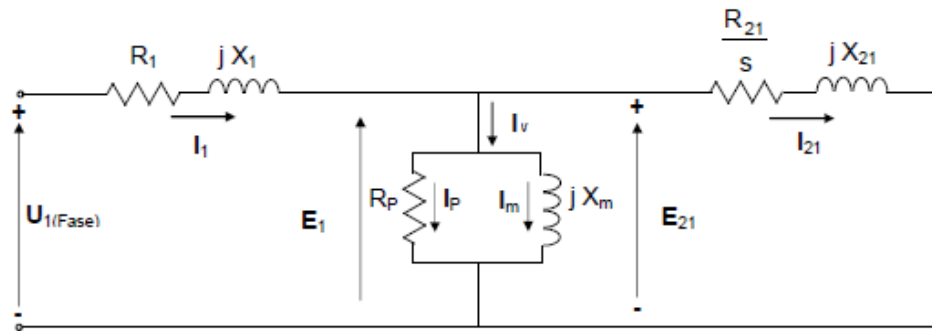


Figura 28. Circuito equivalente de motor trifásico

Para tomar una similitud de la distribución de la parte resistiva y reactiva del estator con el rotor, en el rotor se puede descomponer matemáticamente este componente.

$$\frac{R_{21}}{s} = R_{21} + R_{21} \frac{(1-s)}{s}$$

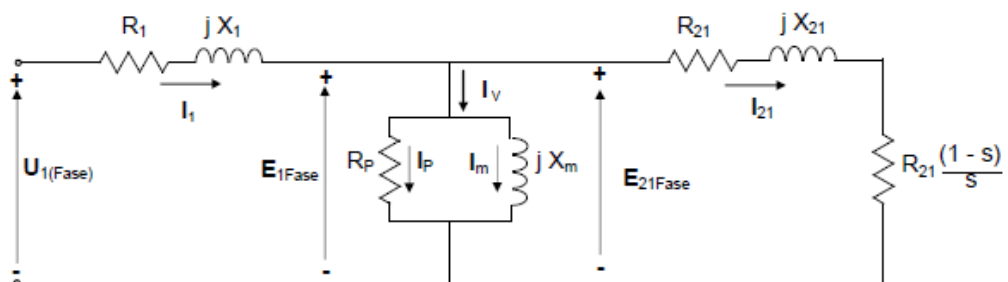


Figura 29. Circuito equivalente motor trifásico

Si realizamos el balance de potencia se puede ver que:

$$P_{Absorbida} = P_{CU} + P_{FE} + P_{Mecánica Total}$$

$$P_{Absorbida} = P_{CU} + P_{FE} + P_{Mecánica\ Util} + P_{Perdidas\ Mecanicas}$$

$$P_{Absorbida} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad \text{Potencia absorbida en las 3 fases}$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_{1L} \cdot I_1 \cdot \cos\varphi$$

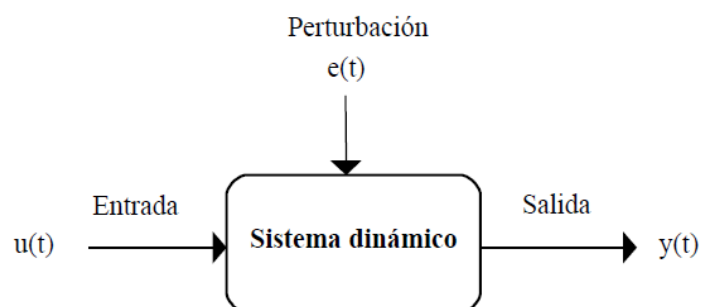
$$p_{CU} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad \text{Pérdidas en cobre de 3 fases del estator}$$

$$p_{FE} = 3 \cdot R_P \cdot I_P^2 = 3 \frac{E_1^2}{R_P} = \frac{E_{1L}^2}{R_P} \quad \text{Pérdidas en el hierro}$$

$$p_{CuR} = 3 \cdot R_{21} \cdot I_{21}^2 \quad \text{Pérdidas en cobre de fases del rotor}$$

Por lo tanto una medición directa sobre los terminales de alimentación de entrada del motor será suficiente para obtener lectura de las variables de entrada del motor como son voltaje y corriente.

En el sistema interactúan variables de diferentes tipos como las señales de entrada, voltaje y corriente, las señales de salida pueden ser observables como es el giro y las no observables como es la potencia, tensión o corrientes de salida. El resto de señales que influyen en la evolución de las salidas pero que no pueden ser manipuladas por el observador vendrían a ser las perturbaciones.



**Figura 30.** Diagrama de bloque de variables de entrada y salida en un sistema de control dinámico

### 3.2. ANÁLISIS DE POSIBLES SOLUCIONES

Para los distintos bloques que conforman el flujo de información a ser tratado, como indica el siguiente diagrama, se analizarán ciertos aspectos ya mencionados que pueden ayudar a elaborar este proyecto.



Figura 31. Diagrama general del flujo de datos

Para el encendido del equipo existen diferentes tipos de arranque, pero debido a que el objetivo de la máquina es testear mediante el aumento de cargas hasta valores nominales, que son lo suficientemente necesarios como para caracterizar el motor, el arranque no necesitará una considerable potencia y lo realizará en estrella-delta.

El control de arranque y conexiones de alimentación se pueden realizar de muchas maneras, una de las más costosas y nada coherente como para realizar este trabajo tan corto es el arranque con un PLC. Lo más razonable por motivos de costo y complejidad es el control encendido de este sistema por contactores, pulsadores, relés y protecciones que son elementos típicos de un control industrial.

La lectura de datos de acuerdo a los sensores utilizados son los que caracterizan la versatilidad, exactitud y facilidad de obtener dichos valores medidos. Para el sistema de velocidad el método de los codificadores incrementales son los más aproximado a la realidad del sistema medido, mientras que para la medición de corrientes y voltajes se puede utilizar desde dispositivos digitales muy costosos hasta el más elemental basado en un transformador, variando de dispositivo a dispositivo de acuerdo a la facilidad de lectura de datos, adecuación al sistema, presión y repetitividad.

De igual manera que para el arranque, el uso de un PLC facilitaría la elaboración del siguiente nivel como es el de procesamiento de datos, ya que gracias a sus diferentes entradas y salidas entregaría diferentes valores ya procesados y necesarios listos para entregar al ordenador. Sin embargo el tema costos y desperdicios, como es el gran número de entradas y salidas que presenta en comparación con lo necesitado para el proyecto, sigue siendo un gran peso en contra del uso de este dispositivo. Mientras que las tarjetas de adquisición de datos en la actualidad brindan ya robustez y facilidad de uso para procesos no tan complejos como este.

Independientemente del dispositivo de procesamiento, los datos previamente adecuados ingresarán para ser tratados y mostrar las siguientes características: voltajes y tensiones de línea, velocidad angular, torque y potencias. Todos estos aspectos se relacionarán para una correcta toma de medidas y por consiguiente sus respectivos cálculos.



Con la medición de voltajes y corrientes los valores de potencia serán fácilmente calculados. Además ya que el valor adimensional  $\varphi$  es diferente para cada motor y necesario para el cálculo de potencias, deberá ser calculado constantemente adicional a la tensión e intensidad.

Debido a que el análisis más concreto del equipo se realizará cuando el sistema ya se encuentre estable y se empieza a aumentar la carga, se podrá ver el creciente consumo de corriente con el incremento de la carga, ocasionando disminución en la velocidad de giro y por ende el esfuerzo necesario para girar, que vendría a ser el torque; sacando así una relación del torque consumido entre la intensidad de corriente absorbida y el valor medido por un torquímetro base.

Dependiendo del equipo de procesamiento de datos, la complejidad, la calidad de visualización y ventajas necesarias, los sistemas SCADA que sirven para diseñar la interfaz del proceso con el usuario, va desde los más sencillos usados en fines educativos y de comunicación hasta los más complejos en procesos industriales, en los cuales se destacan software como Matlab, LabVIEW, Intouch, Ignition, entre otros, para los cuales se debe también considerar la fácil obtención del software y licencias.

Todos estos aspectos deberán ser calculados de tal manera que sea fácil la obtención de los valores que se necesita mostrar.

### **3.3. DEFINICIÓN DE LA MEJOR SOLUCIÓN**

La mejor solución analizada para hardware, software y obtención de cálculos, son descritas a continuación, de acuerdo a la estructura del flujo de información.

## Lectura de datos

- **Sensores de voltaje:** el uso de un transformado para la lectura de voltaje es el más adecuado, gracias a la transformación directa de 220V en corriente alterna a 12 V, relacionado solamente por el número de espiras presente, la cual ocupa poco espacio físico, perdidas mínimas y fácil manejo del rango de señal.
- **Sensor de corriente:** basado en el método del transformador con núcleo partido, el sensor SCT-013-030 es de fácil adecuación a las líneas de cada fase para poder medir el paso de corriente. Además que cuenta con un rango de entrada de lectura de hasta 30 A a una salida de 1 V de forma proporcional.
- **Sensor de velocidad:** ya que uno de los dispositivos más efectivos para la medición de velocidad angular es el codificador, se ha seleccionado el codificador óptico rotativo. La medición de velocidad es muy importante, debe ser precisa, robusta y repetitiva para el correcto y continuo cálculo de valores que describen el comportamiento del sistema. Es así que el codificador seleccionado debe tener un número de pulsos adecuado para la correcta medición de revoluciones en el instante. Este número de pulsos disponibles varía de igual manera según el precio del dispositivo, por lo que se ha escogido un codificador rotativo de 600 pulsos por vuelta.

## Adquisición de datos

La mejor opción para la adquisición de datos en este proyecto es la tarjeta de adquisición, por las siguientes características:

- Fácil manejo

- Suficiente cantidad de puertos I/O para el sistema tratado
- Bajo costo
- Fácil comunicación
- En la actualidad los lenguajes de programación, comunicación y demás sistemas que manejan datos de un proceso a baja escala, ya incorporan en su sistema de plantillas y librerías el uso compartido y conmutado con tarjetas de adquisición de datos como es la ARDUINO.

**Procesamiento de datos:** al utilizar una tarjeta Arduino como método de adquisición de datos, podemos también usarlo como procesamiento de los mismos, sin embargo existe adecuaciones y tratamiento de señales no tan complejas que se las puede realizar en el sistema SCADA como es la plataforma LabVIEW por medio de programación de bloques, sin la necesidad de acudir a otra tarjeta la cual necesariamente incrementa la instrumentación electrónica e inclusive espacio. Además LIFA es una herramienta gratuita que se puede descargar del servidor de National Instrument para adquirir los micro-controladores Arduino y procesarlos en el entorno de LabVIEW.

Es así que la adecuación de señales como es el cálculo de revoluciones a partir de los pulsos generados por el codificador rotativo y el cálculo del  $\cos(\varphi)$  a partir del tiempo medido de desfase entre voltaje y corriente de una línea, se las realizará desde una tarjeta, mientras que el resto de cálculos, como potencias, deslizamientos, etc, se obtendrá directamente con programación de bloques desde el terminal LabVIEW.

Para la medición de potencias se tiene que realizar en las tres fases, sin embargo existe el método de medición de los dos vatímetros, en el cual se realiza la medición de intensidad y tensión de línea en dos de sus fases, reduciendo el número de dispositivos que intervienen en la medición, como muestra en la siguiente figura.

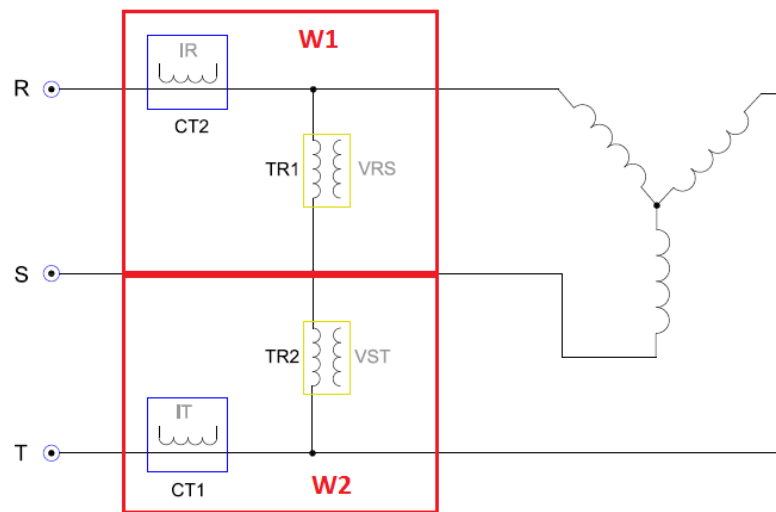


Figura 32. Medición de potencia por el método de dos vatímetros

$$W1 = |V_{RS}| \cdot |I_R| \cos(\theta + 30^\circ) = V_L I_L \cos(\theta + 30^\circ)$$

$$W2 = |V_{ST}| \cdot |I_T| \cos(\theta - 30^\circ) = V_L I_L \cos(\theta - 30^\circ)$$

$$W1 + W2 = V_L I_L \cos(\theta + 30^\circ) - V_L I_L \cos(\theta - 30^\circ)$$

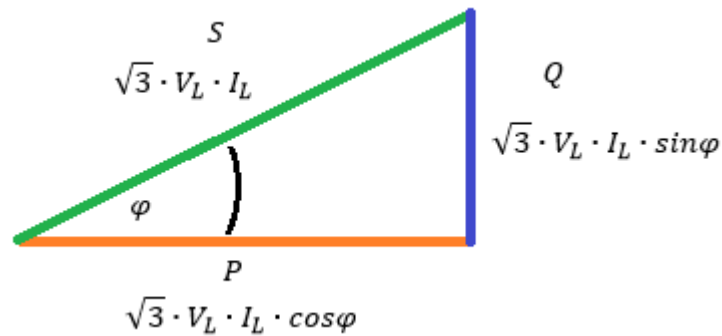
$$W1 + W2 = V_L I_L \cos(30^\circ) \cos(\theta) - V_L I_L \sin(30^\circ) \sin(\theta) + V_L I_L \cos(30^\circ) \cos(\theta) + V_L I_L \sin(30^\circ) \sin(\theta)$$

$$P = W1 + W2 = \sqrt{3} V_L I_L \cos(\theta)$$

Con los valores medidos de voltaje de línea, corriente y factor de potencia que es el ángulo  $\varphi$ , se puede describir ya la potencia activa en las tres fases.

$$P_{Activa} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

Una vez que se tenga la potencia activa (P) será sencillo calcular las demás potencias que se derivan de estos parámetros tal y como se ve en el triángulo de potencias.



**Figura 33. Triángulo de potencias**

Donde la potencia reactiva (Q) se expresará en voltio amperios reactivos, la potencia aparente (S) en voltio amperios y P en vatios.

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

Con la velocidad medida constantemente se puede calcular el deslizamiento ocurrido desde la velocidad inicial hasta la que ocurre después de transcurrido cierto tiempo y variación de cargas.

El cálculo de la eficiencia irá dado por la fórmula en la que se relaciona la potencia de salida sobre la potencia de entrada, donde:

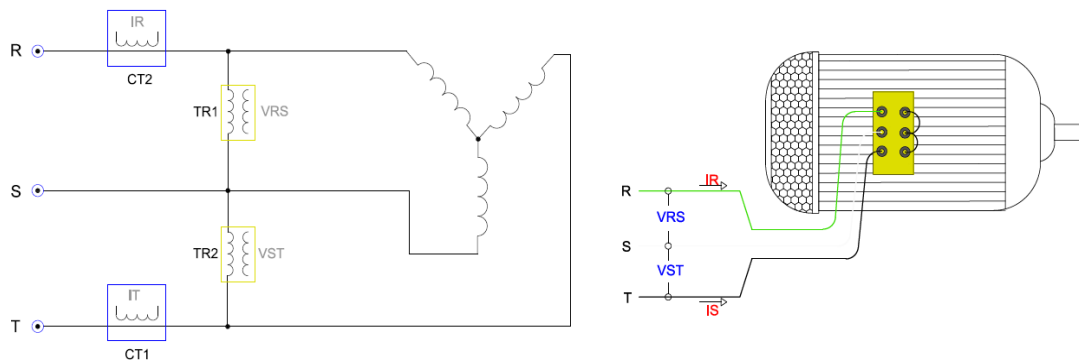
$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}$$

$$\eta = \frac{\tau * \omega}{P}$$

### 3.4. DISEÑO DEL SISTEMA

De la acometida de 210V AC trifásica RST que presenta el laboratorio de máquinas eléctricas, según lo descrito anteriormente, el sistema parte de la

medición de tensiones y corrientes de acuerdo como muestra la imagen para una conexión en estrella del motor de inducción.



**Figura 34. Conexión de sensores de voltaje y corriente para el motor trifásico con arranque en estrella**

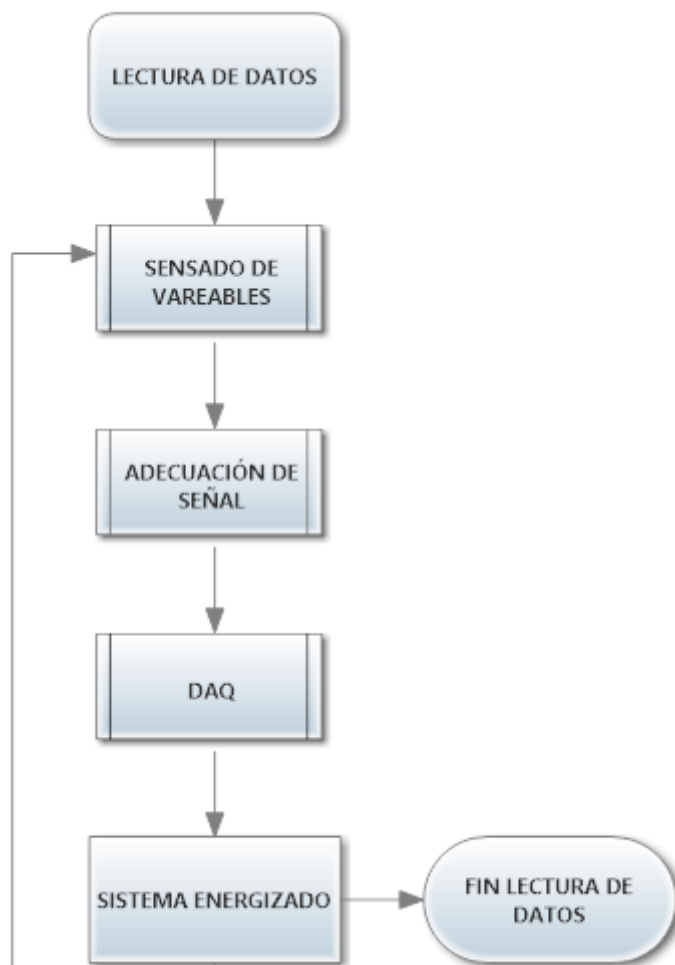
Para continuar con el diseño del sistema se sigue el esquema del diagrama que indica el flujo de datos a través de los diferentes bloques.



Figura 35. Diagrama general de flujo de trabajo

### 3.4.1 Adquisición de variables

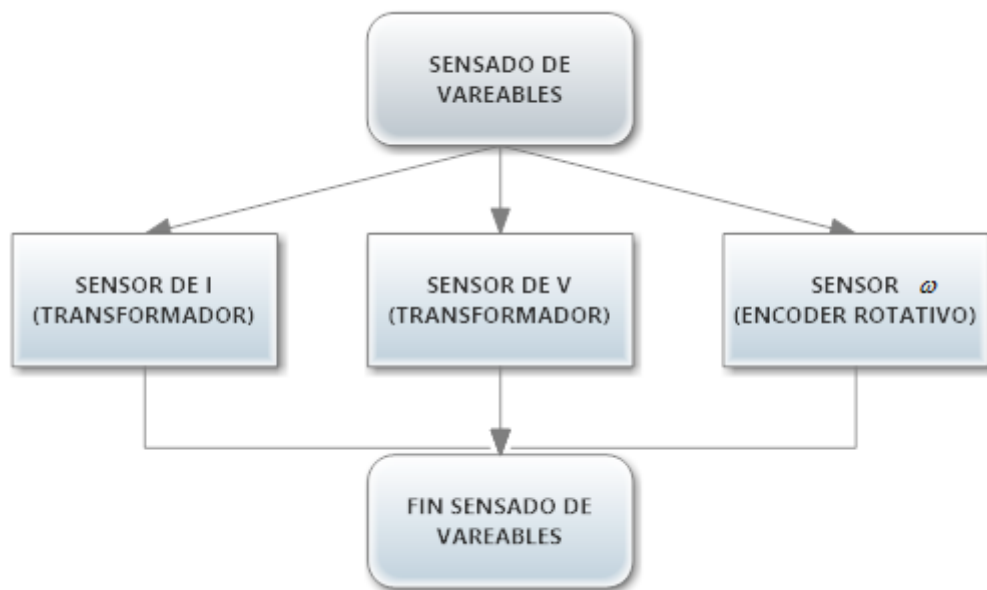
La adquisición de variables implica la obtención de las señales que se desea leer, como es voltaje, corriente y velocidad angular, y entregar los valores de medida ya útiles a ser procesados.



**Figura 36. Diagrama del proceso de lectura de datos**

Iniciando por el nivel de sensores, donde se usan transductores analógicos y digitales como es el transformador de voltaje de 220V a 12V, el transformador de núcleo partido SCT-013 para la medición de corriente y por último el codificador rotativo que sensorá las revoluciones por minuto del motor asincrónico.

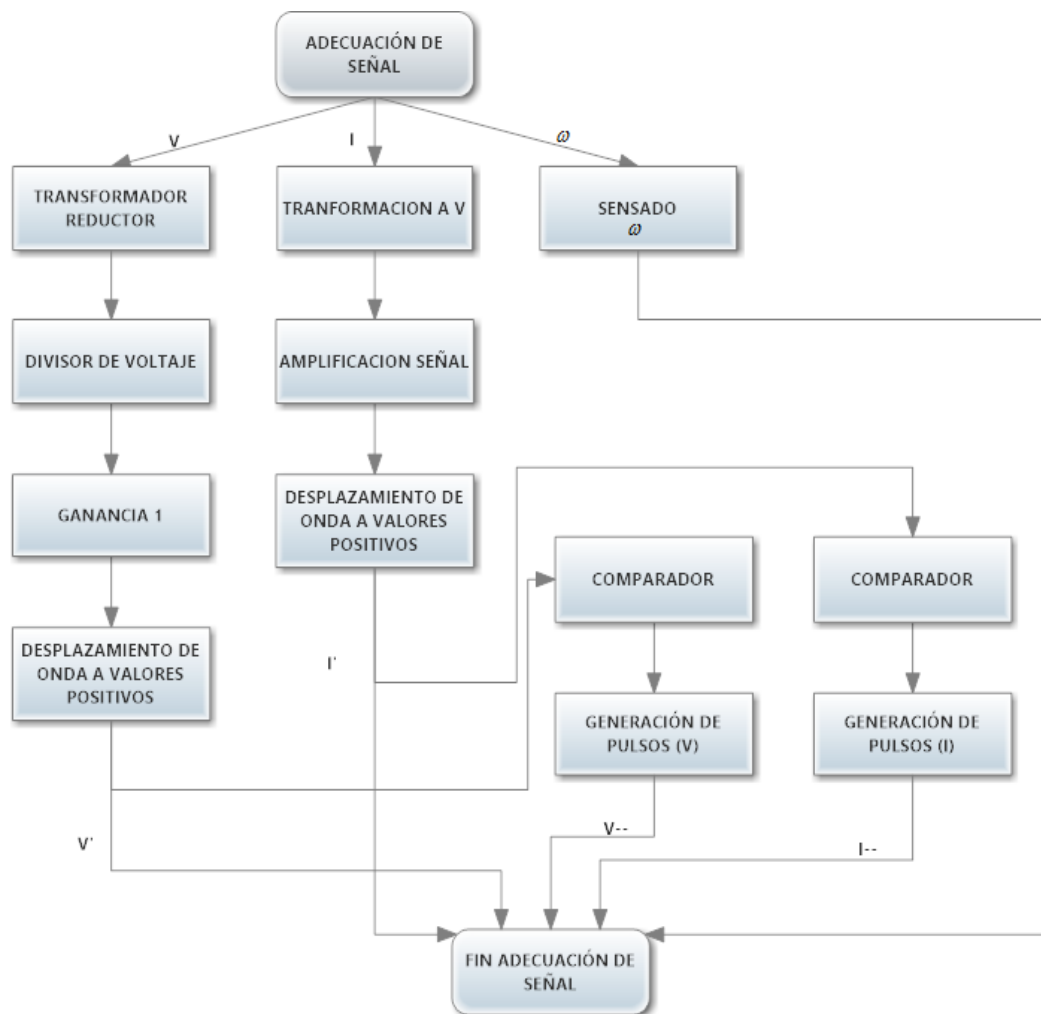




**Figura 37. Diagrama de sensores utilizados**

El sensado de variables entrega un tipo de señal de acuerdo al transductor utilizado, a un determinado rango de valor de lectura que debe ser modificado para su posterior uso. Adecuando características de una señal como amplitud, filtrado y estabilidad para poder ser usadas por el siguiente dispositivo en el nivel de obtención de datos como son las tarjetas de adquisición.

Es por esto que es necesario la aplicación de instrumentación electrónica en la adecuación de señales provenientes del transformador de voltaje, del transformador de corriente y del sensor de velocidad angular, a las características permisibles de una tarjeta (ARDUINO) en la que va tratar estos datos.



**Figura 38. Diagrama de adecuación de señales medidas**

El transformador reductor utilizado para la medición de voltaje, brinda la ventaja de entregar valores de voltaje con igual forma de onda que la tensión en bobinado primario pero con la diferencia de menor amplitud y aún no adecuada para el rango permisible de la tarjeta de adquisición, por lo que es necesario reducir mediante un divisor de voltaje, además que la onda presenta valores negativos al oscilar a través de la referencia cero, por lo que también se hace necesario desplazar la onda a valores solo positivos tomando como referencia a partir de los 2,5V, debido a que la tarjeta ARDUINO sólo puede leer valores positivos.

$$VR_2 = \frac{V_{CC} * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$2,5 = \frac{12 * R_2}{10K + R_2}$$

$$R_2 = 2,6K\Omega$$

Es importante que se tome en cuenta las pérdidas e introducción ruido en la red, por lo que es necesario aplicar una ganancia unitaria que mantenga estable el paso de datos.

$$G = -\frac{R_f}{R_i}$$

$$G = -\frac{10K}{10K} = -1$$

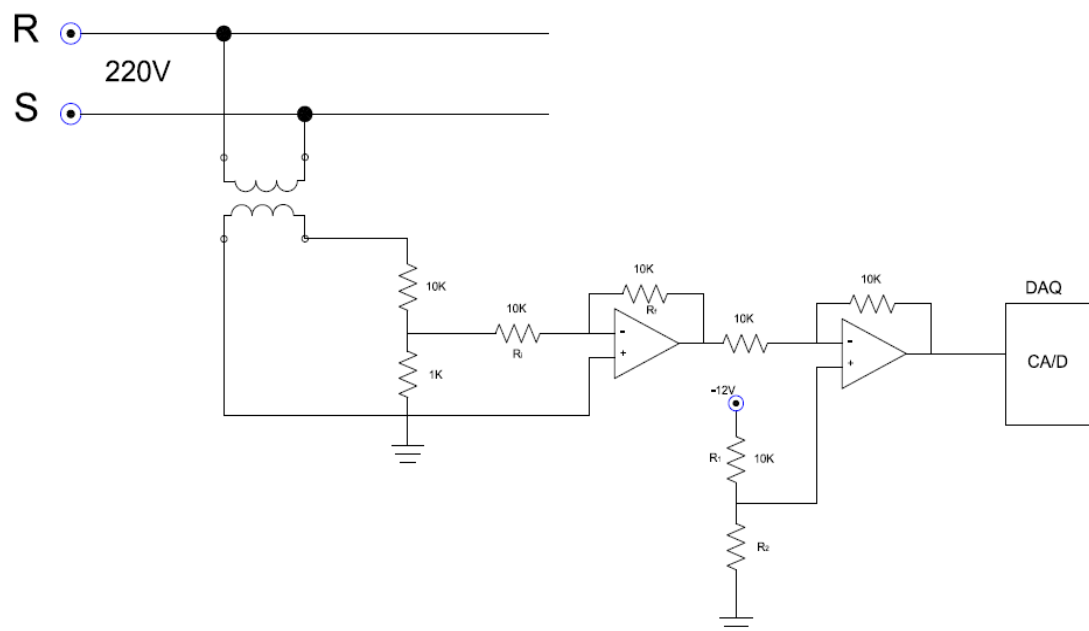
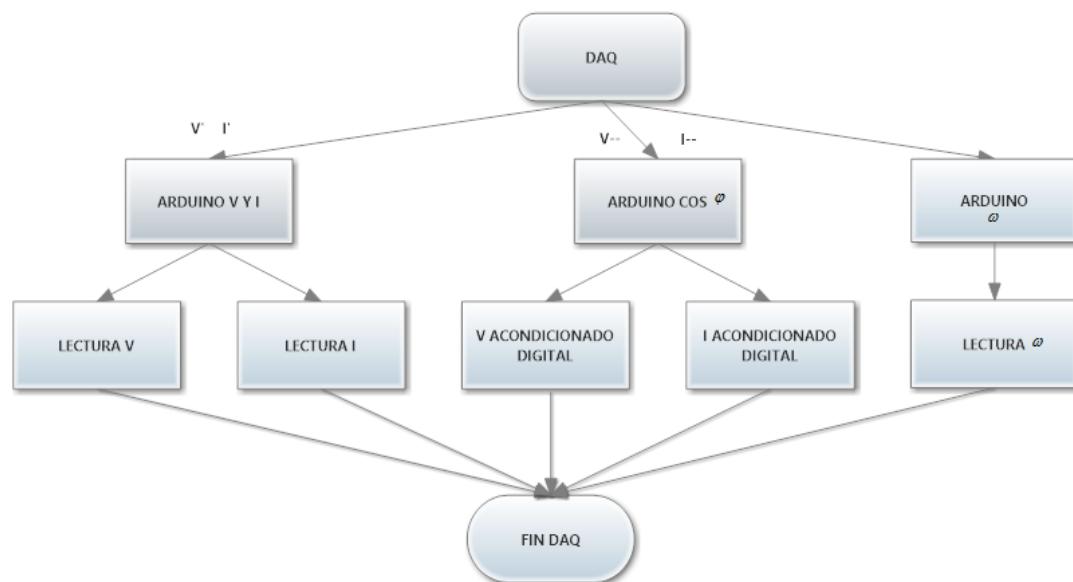


Figura 39. Adecuación de señal del sensor de voltaje

Con respecto al sensor de corriente, éste entrega valores de tensión muy bajos, poco detectables y no estables al momento de apreciar los datos, haciendo necesario amplificar la ganancia de la señal y de igual manera que en el transformador de corriente desplazar el eje de referencia medible al valor operacional de lectura de 2,5V.

El sensor de velocidad angular es un dispositivo que entrega una señal digital, por lo que es estable y adaptable directamente a la tarjeta de adquisición sin previo acondicionamiento.

Finalmente para esta etapa, la recolección de las señales útiles se las realiza con tarjetas de adquisición ARDUINO, distribuidas de la siguiente manera:



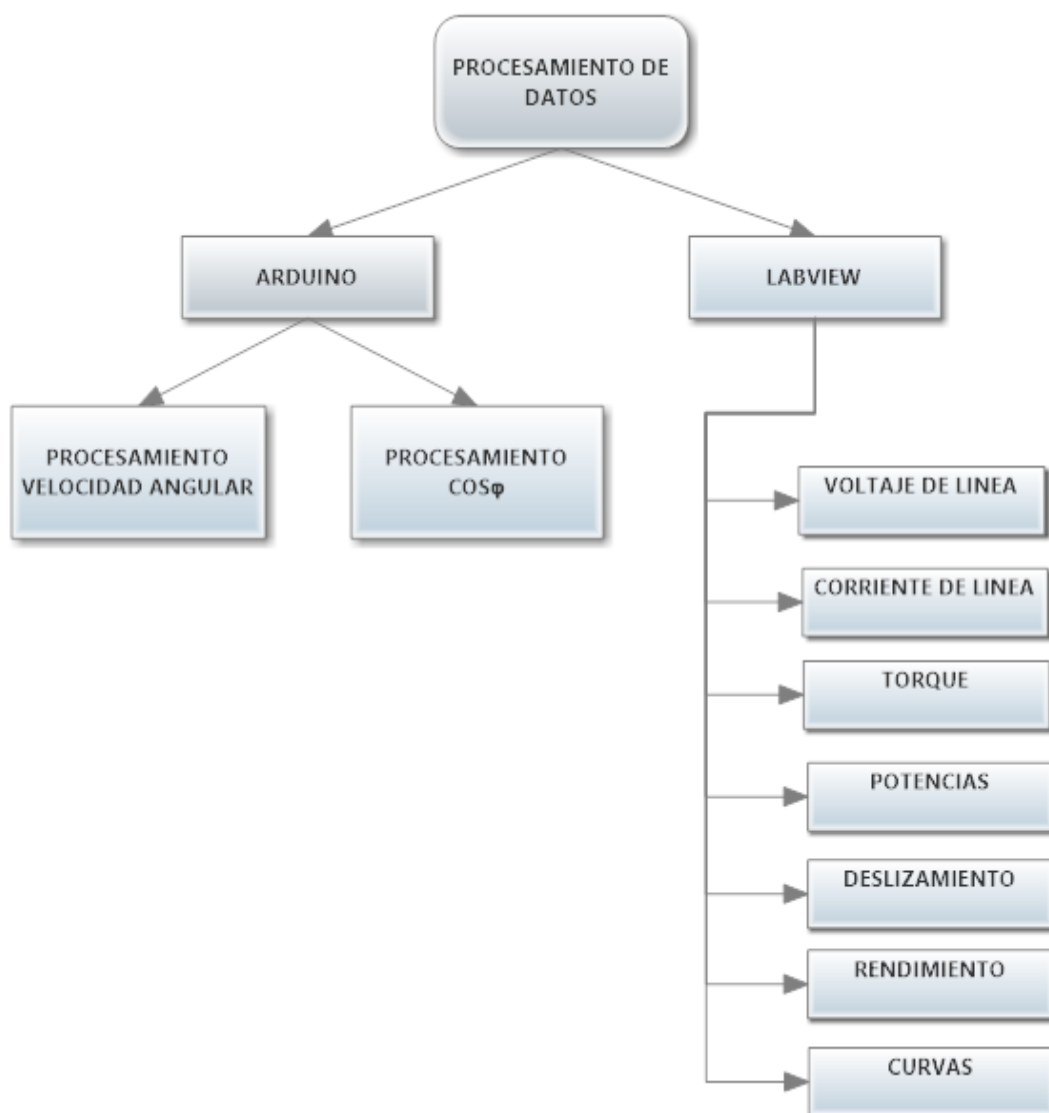
**Figura 40. Diagrama de la distribución de tarjetas ARDUINO**

A parte de la cantidad de I/O usadas, el trabajar con varias tarjetas en el proyecto se debe principalmente al ciclo de frecuencia de muestreo que va de puerto en puerto y que presentan las tarjetas de adquisición para la toma de

datos, ya que al momento de analizar las muestras en el tiempo puede haber cambios en instantes cortos de tiempo en las diferentes variables que no pueden ser apreciadas, solo si se los realiza al mismo tiempo. El uso de interrupciones limitadas en la programación es otro punto por el cual se necesita usar más de una tarjeta de la plataforma Open Hardware de ARDUINO UNO.

### **3.4.2 Procesamiento para caracterización de datos**

El procesamiento de datos, como se mencionó en puntos anteriores, se lo realizará en dos tecnologías como son tarjeta de adquisición y la plataforma de programación y visualización LabVIEW.



**Figura 41. Diagrama de flujo del procesamiento de datos**

En la tarjeta AW será donde se procesa la señal directa proveniente del sensor de velocidad. *DRW\_UNIFILAR*

En el siguiente diagrama de flujo se describe el trato que se da a la señal de pulsos proveniente del sensor, donde se realiza primero una lectura de 1000 muestras de las cantidad de pulsos leídos, luego con el fin de obtener un valor aproximado único de todas las medidas se promedia para finalmente representar la relación en revoluciones por minuto de acuerdo a los 600 pulsos por ciclo que caracteriza a este sensor.

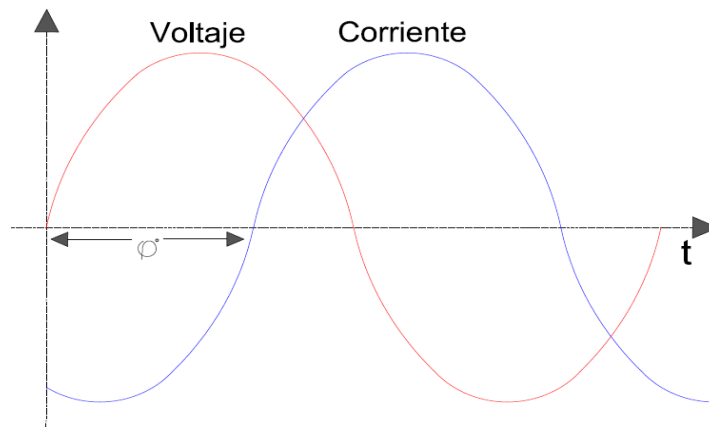


**Figura 42. Diagrama de flujo de la programación para la interpretación de la velocidad angular sensada.**

Este proceso de lectura de revoluciones debe ser constante en su toma de muestras, es por esto que se ha tomado una tarjeta dedicada solo para la medición de estos valores.

Para la obtención del factor de potencia FP o  $\cos(\varphi)$ , debemos precisamente calcular este ángulo  $\varphi$ , el cual se genera por el ángulo de desfase que existe entre el voltaje y corriente de una fase en el tiempo.

Cuando se conecta una carga inductiva al circuito de corriente alterna, la onda de corriente se retrasa en relación a la tensión V.



**Figura 43. Adelanto de voltaje a corriente**

Para realizar este cálculo lo primero que se hace es adecuar la señal a forma digital por medio de pulsos, tanto para corriente como para voltaje. En la adecuación de esta señal se trabaja con un amplificador operacional de carácter comparador para poder detectar el instante que parte la señal y así generar un pulso. De esta manera en la tarjeta de adquisición se puede ver cuando se produce un flanco de subida, tomando este tiempo hasta que se produzca el siguiente flanco de subida de la corriente. Es así que con este conteo de tiempo y tomando un prescalamiento de 16 para la tarjeta ARDUINO UNO de 16 MHz, podemos tomar y hacer la comparación con tiempo transcurrido en un ciclo para conocer el ángulo  $\varphi$ .

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = \frac{1}{60 \text{ Hz}}$$

$$T = 16.6 \text{ ms}$$



$$\frac{360^\circ}{x} = \frac{16,6ms}{timer}$$

$$x = \varphi^\circ = timer * \frac{360}{16,6}$$

Con el ángulo de desfase se puede calcular la función coseno y obtener el factor de potencia del instante del motor asincrónico de inducción.

En la programación utilizada en ARDUINO, para empezar el conteo en el momento que se detectan los flancos de subida se sigue el siguiente esquema para las interrupciones de programa.

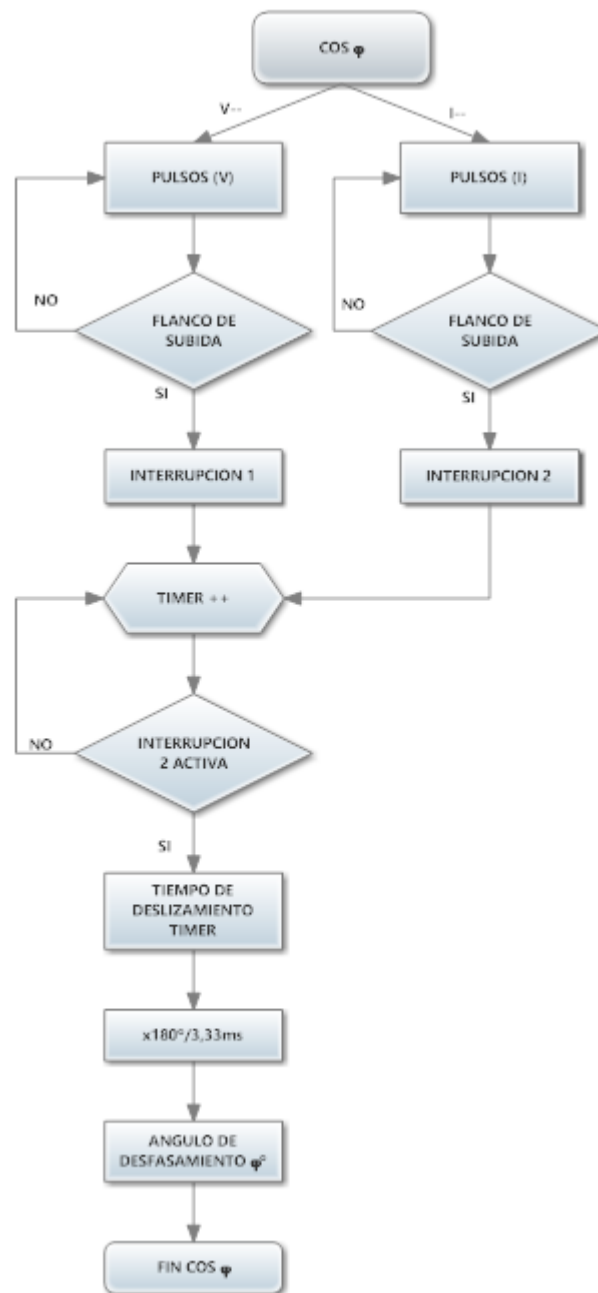
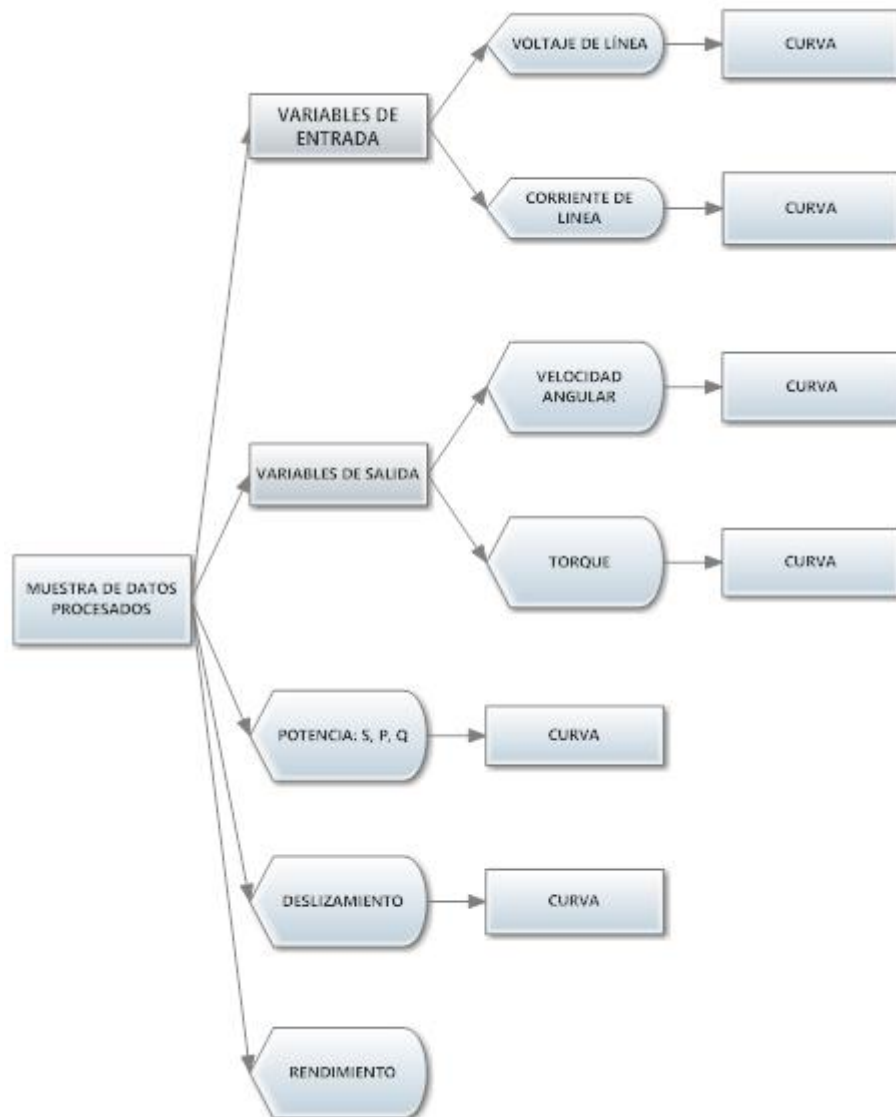


Figura 44. Diagrama de flujo del cálculo del factor de potencia

### 3.4.3 Interfaz gráfica de presentación de datos

La interfaz gráfica que se desarrolla en la plataforma LabVIEW tiene la siguiente estructura para mostrar los datos al usuario.



**Figura 45. Diagrama de datos a ser mostrados en la interfaz de usuario**

El desarrollo de una interfaz humano máquina, es de vital importancia para la visualización y manejo de los procesos, teniendo esta que ser lo más amigable y comprensible para el usuario.

La primera pantalla creada es la portada o carátula donde se distingue el nombre del proceso implementado, el autor de dicho trabajo y entidad o institución de la cual se está presentando el servicio.

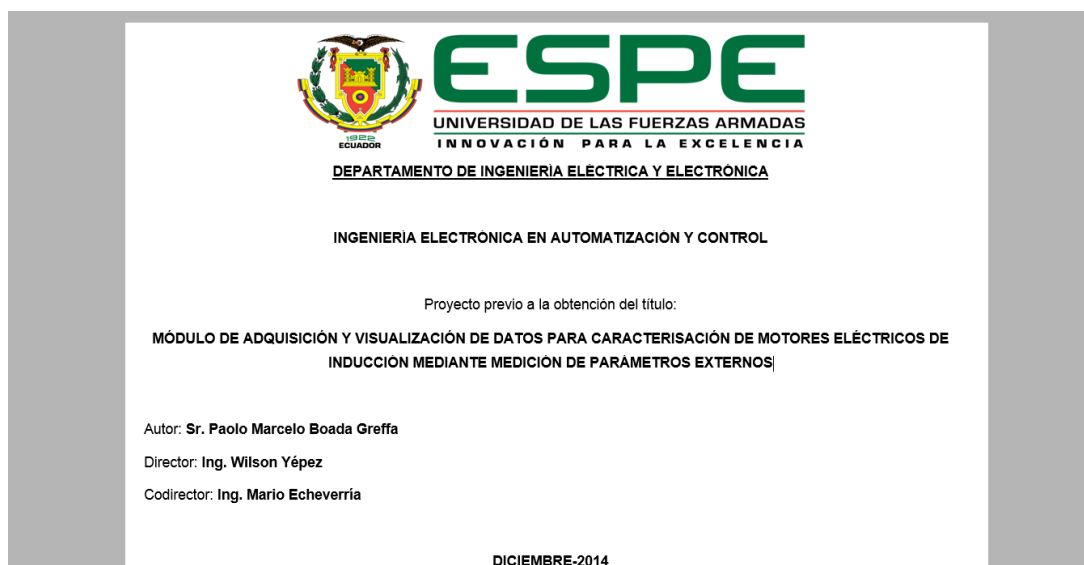


Figura 46. Portada interfaz LabVIEW

La interfaz será manejada a través de ventanas, en las cuales se podrá distinguir 3 sectores principales: uno de navegación a través de pestañas, área gráfica de muestreo de datos y los valores digitales de las variables medidas o calculadas.

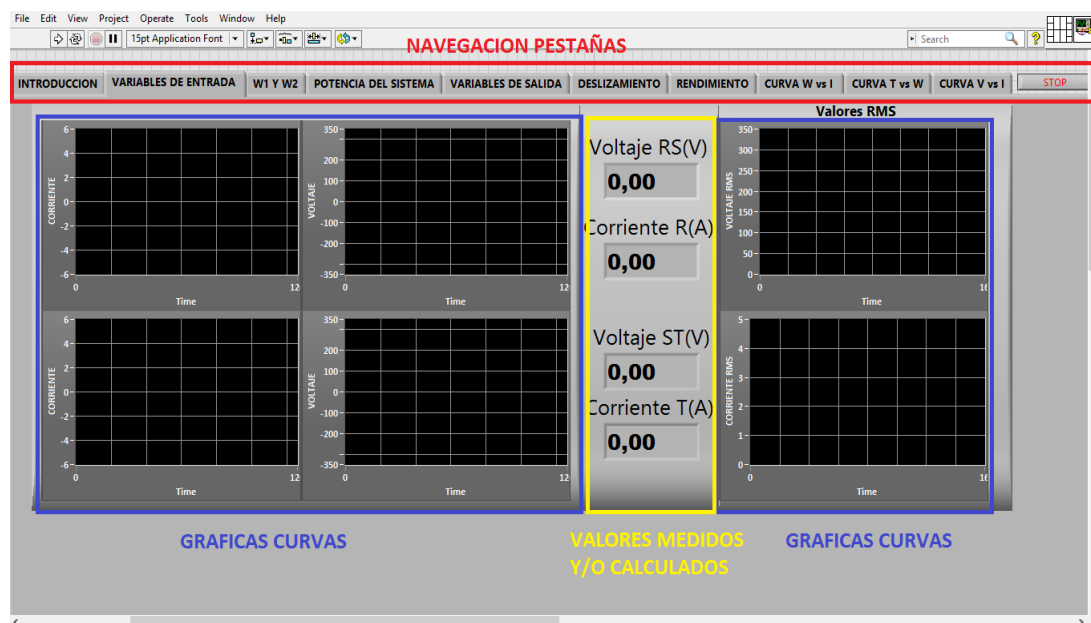


Figura 47. Sectores de la interfaz gráfica

El uso de pestañas para la navegación entre las diferentes pantallas se usa en este sistema por las siguientes razones: la interfaz humano-máquina del módulo de caracterización de un motor a inducción, debe ser clara y fácil de manejar, el mostrar todas las opciones que se pueden visualizar en todo momento y todas las pantallas ayuda a una mejor comprensión y visualización de donde están los parámetros del proceso.

Ya que este sistema es una ayuda para realizar un reporte y seguimiento de los equipos más usados en una industria como son los motores, el manejo del sistema debe ser de lo más sencillo y claro, de tal manera que el operario de turno o el personal que sea asignado para dicha labor pueda recoger los datos, sin necesariamente tener un alto grado de conocimiento del sistema.

### **Variables de entrada**

Para la ventana de variables de entrada el sistema muestra la tensión de línea y corrientes medidas en la acometida R,S,T según el esquema mostrado en la figura 32, que son los necesarios para calcular la potencia por el método de los dos vatímetros.

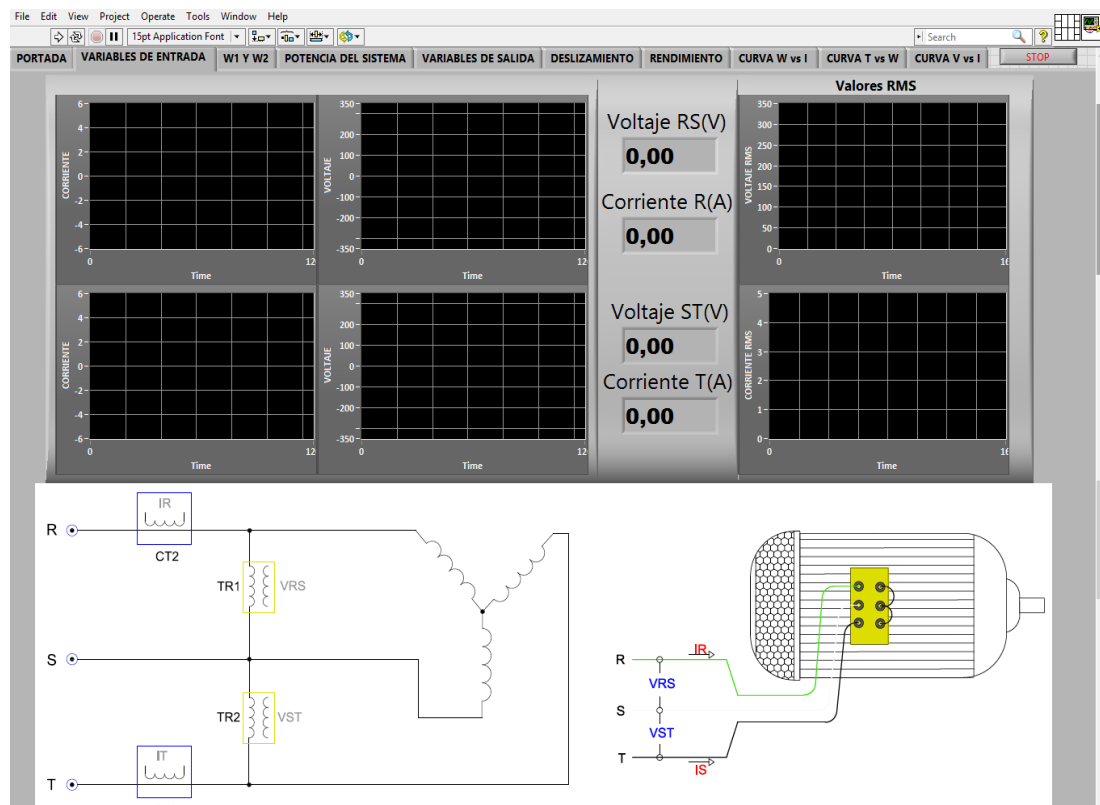


Figura 48. Pestaña de variables de entrada LabVIEW

## W1 Y W2

En la ventana “W1 Y W2” se describe cómo se está obteniendo los valores de W1 y W2 para el cálculo de potencias, los mismos que presentan sus ecuaciones y están representados en programación de bloques en la terminal de diagramas de LabVIEW con los datos medidos de voltajes y corrientes.

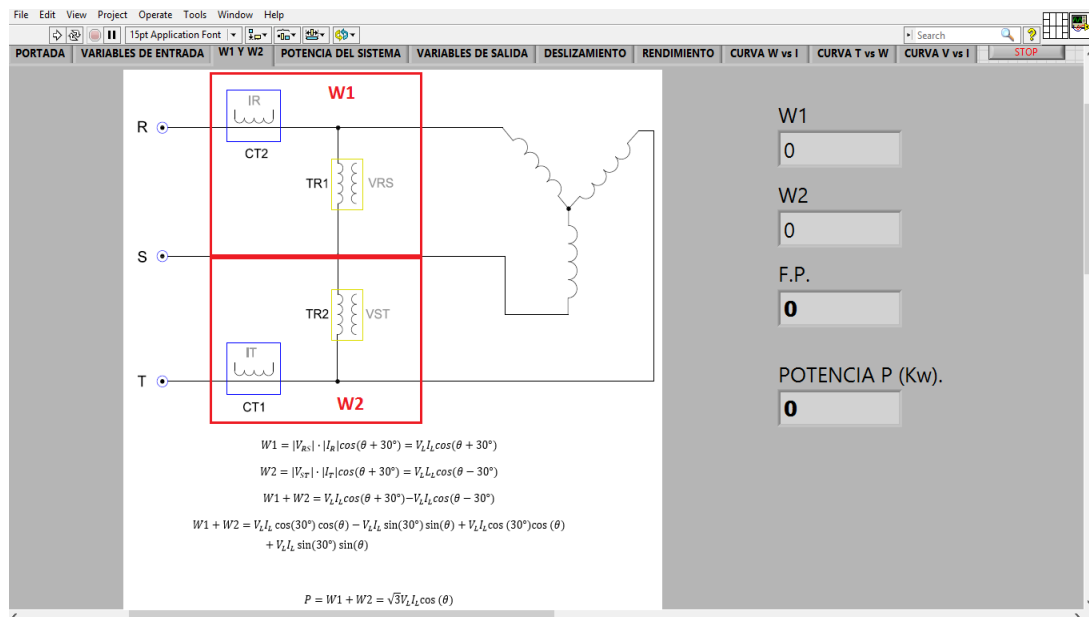


Figura 49. Ventana W1 y W2 de interfaz LabVIEW

## Potencia del Sistema

En el cuadro de potencias del sistema ya se puede visualizar la primera tabla de datos calculados y leídos, donde se muestran los datos coleccionados y calculados como son: voltajes, corrientes, factor de potencia, potencias, velocidad angular y torque.

La potencia activa "P" será representada en k.vatios, la potencia aparente "S" en voltamperios y la potencia reactiva "Q" en voltamperios reactivos.





Tabla 3.

## Valores para parametrización de Torque

Corriente (A)	Torque (N*M)
0,92	0,1
1,21	1
1,75	2
2,5	3
3,6	4

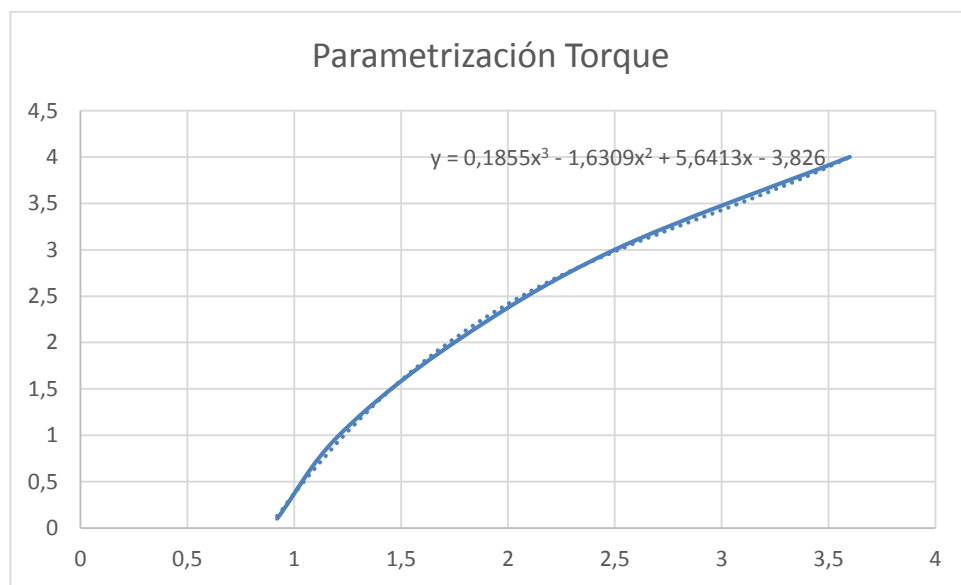


Figura 51. Parametrización de torque

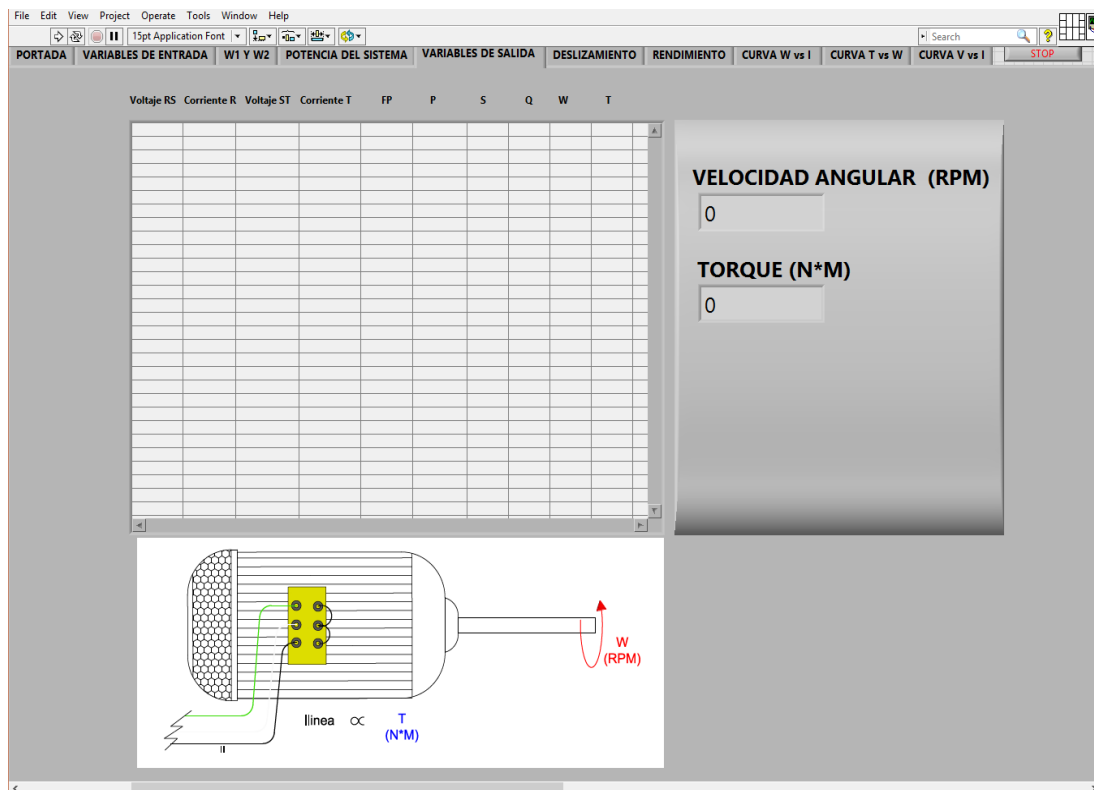


Figura 52. Variables de salida en interfaz

## Deslizamiento

Para la ventana de deslizamiento se puede visualizar las velocidades angulares en revoluciones por minuto, como la velocidad inicial que es de sincronismo ( $W$  INICIAL) y la velocidad en el instante " $W$ " que es a la cual está girando el eje del motor. El deslizamiento se expresa en valores porcentuales conjuntamente con una gráfica de la variación que presenta la velocidad mientras el consumo de corriente se eleva con la carga.

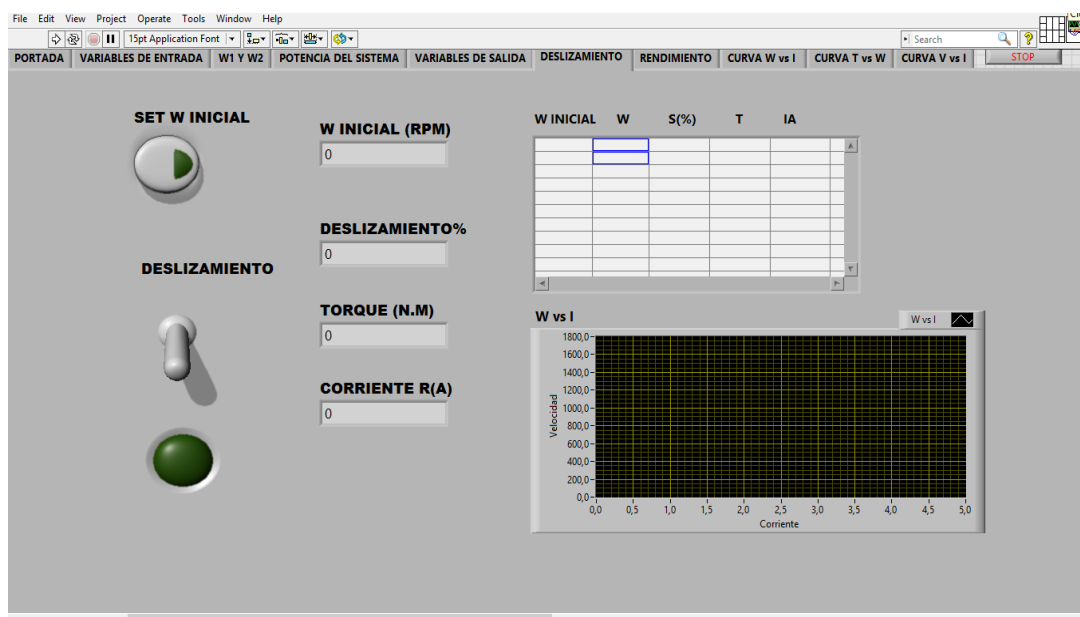
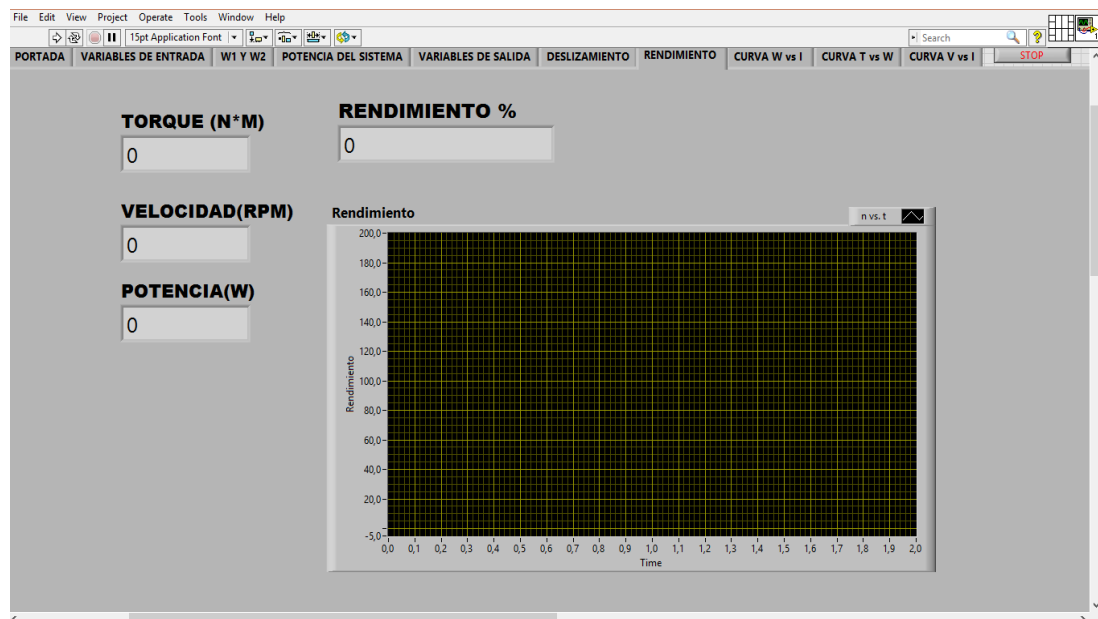


Figura 53. Ventana de deslizamiento

## Rendimiento

El rendimiento del sistema es un factor claro que muestra el estado del equipo y se observa en forma gráfica en el tiempo, un valor porcentual que relaciona la potencia de salida sobre la potencia de entrada al sistema. Este índice es representativos solo en el momento en el que el sistema se encuentre entre sus valores nominales.



**Figura 54. Ventana de rendimiento %**

## Curva W vs I

Las ventanas de curvas representan la variación de los parámetros en el tiempo, como en la figura 55, la velocidad angular vs corriente en estator, que aumenta la carga en cada instante para visualizar el comportamiento lineal de velocidad y corriente. Este sistema de gráfico captura los instantes validos por medio de los pulsadores “Adquirir Datos” y “Reiniciar curva”, los cuales van adquirir las lecturas después de que se haya incrementado o decrecido la carga y esté estable.

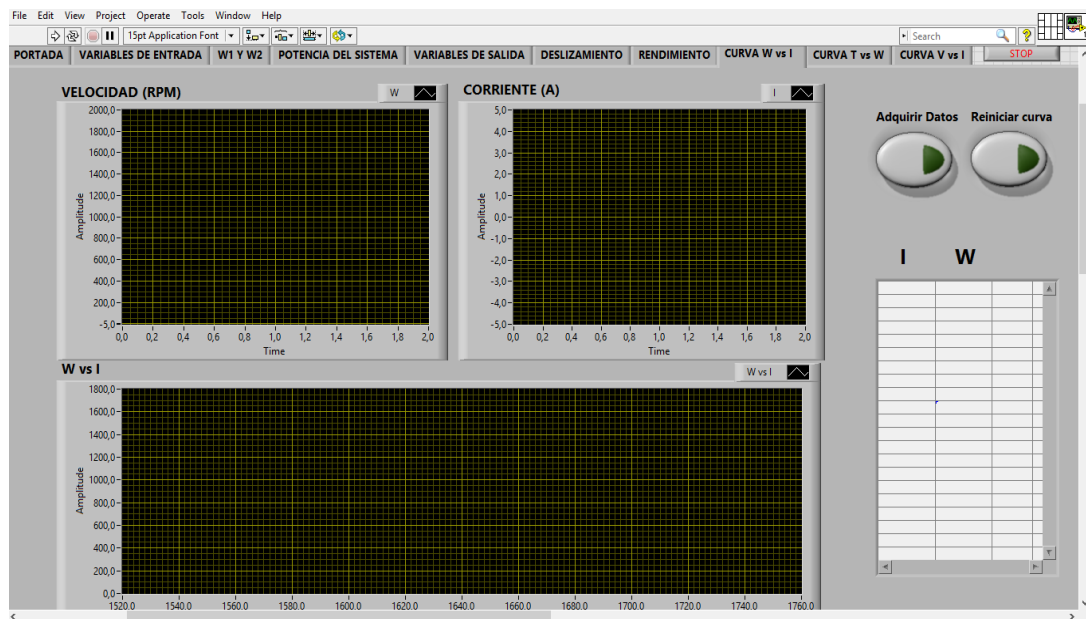


Figura 55. Gráfica en interfaz de W vs I

## Curva T vs W

En esta curva se puede seguir el comportamiento del torque con respecto a la variación de la velocidad angular.

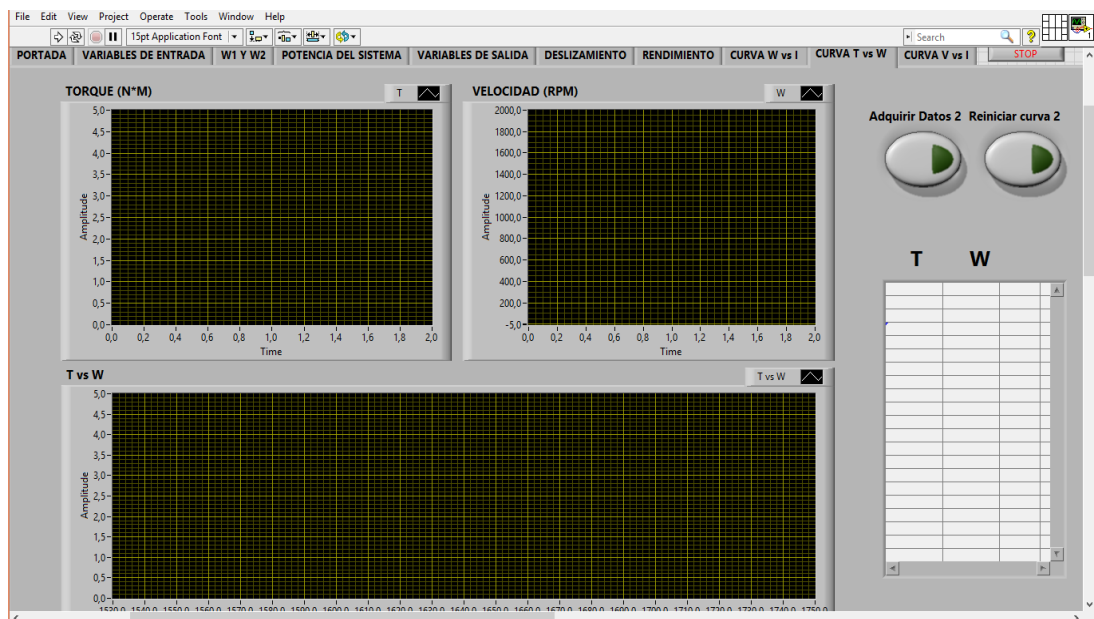


Figura 56. Gráfica de torque vs velocidad angular

## Curva V vs I

El gráfico de las variables de entrada se representa en esta ventana, se visualiza la variación de la corriente en función del estado de la carga mecánica.

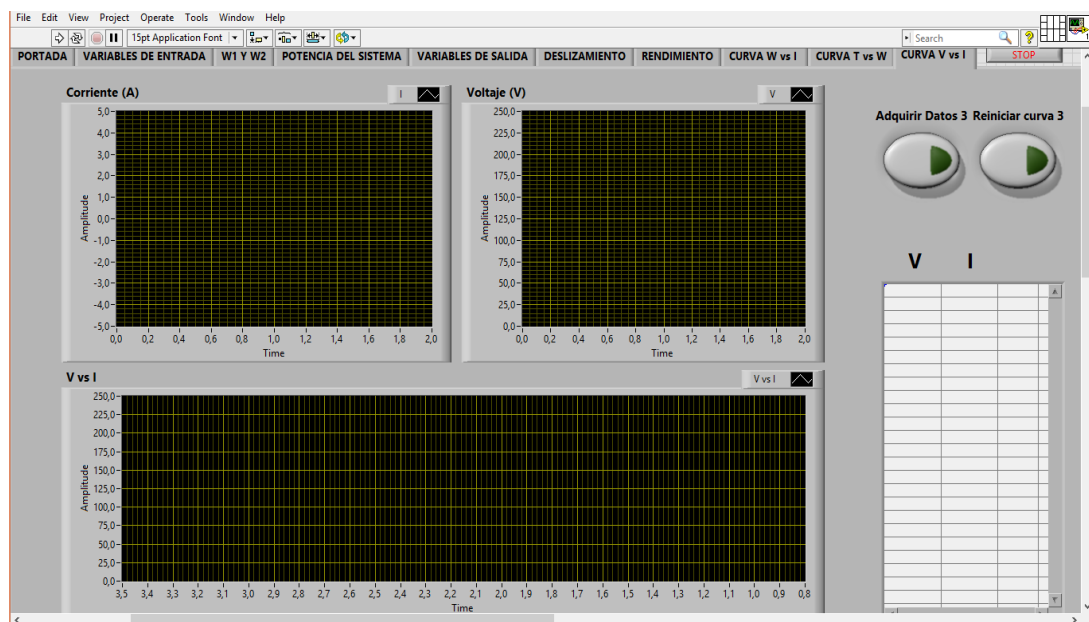


Figura 57. Ventana de curvas de variables de entrada

## CAPÍTULO 4

### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para la implementación física del sistema, se parte del tipo y forma de alimentación a consumir, que es la que suministrará energía a los diferentes dispositivos que interactúan de la siguiente manera:

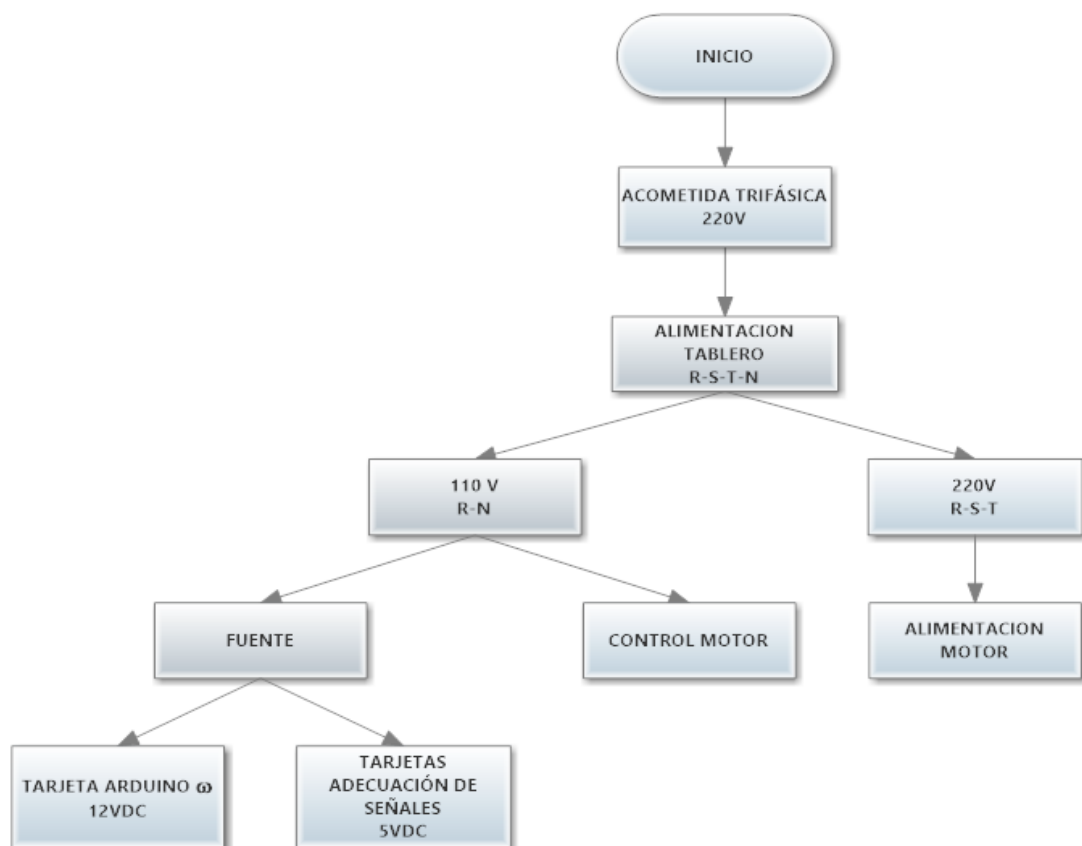


Figura 58. Diagrama del flujo de energía eléctrica

Para la elaboración del presente proyecto se dispone del banco de pruebas del laboratorio de máquinas eléctricas marca TERCO, el cual provee sistemas de aproximadamente 1KW para pruebas de laboratorio y está formado por:

### **Motor de inducción trifásico**



**Figura 59. Motor de inducción MV 1009-405**

**Fuente:** (TERCO, 2005)

El motor MV 1009-405 es una máquina de 4 polos, trifásica tipo jaula de ardilla montado sobre rieles MV 1004 del módulo de prueba.

Datos técnicos:

Dimensiones: 355x300x310 mm

Altura del eje 162mm

Peso: 19 kg

Frecuencia: 60Hz

Factor de Potencia: 0,79

Potencia: 1,1 kW



Corriente  $\Delta/Y= 6,6/3,8$  A

Voltaje  $\Delta/Y= 220/380$  V

Velocidad= 1700rpm

### Torquímetro en máquina DC



**Figura 60.** Torquímetro del banco de pruebas

**Fuente:** (TERCO, 2005)

El sistema del laboratorio Terco brinda un conjunto de elementos para la medición análoga de torque para máquinas eléctricas en unidades de N\*M.

Una máquina de péndulo DC se suspende libremente en los ductos base sobre una placa de aluminio. La máquina DC tiene interpolos.

Velocidad: 0-4000 rpm

Amperímetro: 0-1 A (Field)

Amperímetro: 0-15 A (Arm.)

Torque: 0 –  $\pm$  25 Nm

**Generador:** 2.3 kW 1500 rpm

**Motor:** 2.0 kW 1400 rpm

Excitación: 115 V 0.8 A

Armadura: 115 V 12 A

Dimensiones: 600 x 540 x 960 mm

Peso: 90 kg

### Unidad de carga resistiva



**Figura 61. Sistema de cargas**

**Fuente:** (TERCO, 2005)

La resistencia de carga contiene tres resistencias acopladas con regulación continua, conectadas a los terminales para 3 fases.

#### Datos técnicos

3-fases 3.3 kW, ajustable.

Conexión Y 400 / 230 V 0.8-5 A

Conexión Y 230 / 133 V 0.5-5 A

Conexión  $\Delta$  400 / 230 V 2.4-8.7 A

Conexión  $\Delta$  230 / 133 V 1.3-8.7 A

DC conexión paralelo 220 V 2.3-15 A

Sobre carga, aprox. 20 %.

Dimensiones: 630 x 250 x 890 mm

Peso: 46 kg

### Fuente



**Figura 62. Fuente del banco de pruebas**

**Fuente:** (TERCO, 2005)

Esta fuente particularmente se puede utilizar cuando se requiere CA variable o fija o DC, adecuado principalmente para los demás módulos Terco.

El contactor de tensiones variables está equipado con un fin de carrera de seguridad como protección que no permite conectar altas tensiones por error.

Datos técnicos:

Suministro de voltaje: 220-240 / 127-140 V 50 / 60 Hz 3-ph

Salida de voltaje:

DC fija 220 V 3.5 A

DC variable 0-220 V 16 A

AC fija 230/133 V 10 A 3-ph

AC variable 3 x 0-230 V

10 A 3-ph

Standard: AC 230 V 10 A

Dimensiones: 660 x 435 x 790 mm

Peso: 103 kg

Para tener un mejor manejo de los equipos a tratar, se precisa elaborar un tablero de control en cual contenga el arrancador, como muestra el diagrama de control y fuerza del arranque de motor “*DRW\_ARRANQUE*”

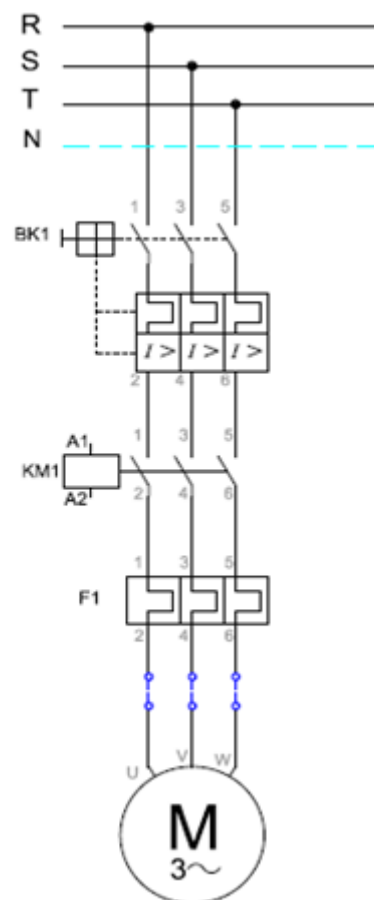


Figura 63. Diagrama de fuerza para arranque de motor.

#### 4.1. CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO FÍSICO

Para la construcción del modelo físico del módulo se usará un tablero de control eléctrico el cual presenta las características descritas en el diagrama “*DRW\_VIST\_TABLERO*”.

El tablero eléctrico sostiene el modelo de protección, control y fuerza de arranque del sistema de manejo del motor y sobre el cual se aplicará la instrumentación electrónica diseñada para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto, como es la obtención y adecuación de señales.

**Tabla 4.**

**Materiales para la construcción del arranque del motor asincrónico**

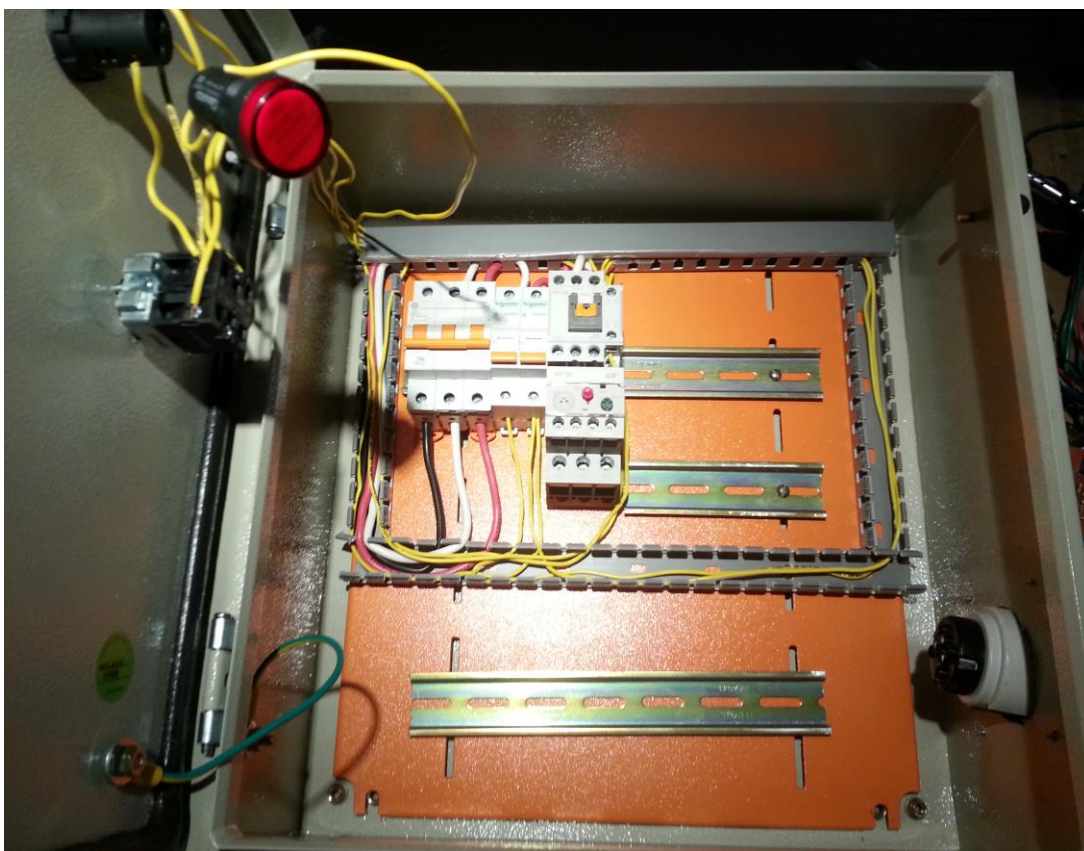
Elemento	Cantidad
Tablero eléctrico 40x20x40	1
Cable sucre 3 fases 12 ø	5 m
Cable sólido 18ø	3 m
Canaleta	3 m
Riel DIM 1,5”	3 m
Contactor de 3 polos 12 A	1
Relé térmico de 16 A	1
Breaker electro magnético de 3 polos 32 A	1
Breaker electromagnético de 1 polo 12 A	2

CONTINÚA Tabla 4->

Pulsador ON/OFF	1
Light indicator	2
Bornera de empalme industrial	6
Toma de 16A	1
Enchufe de 16A	1

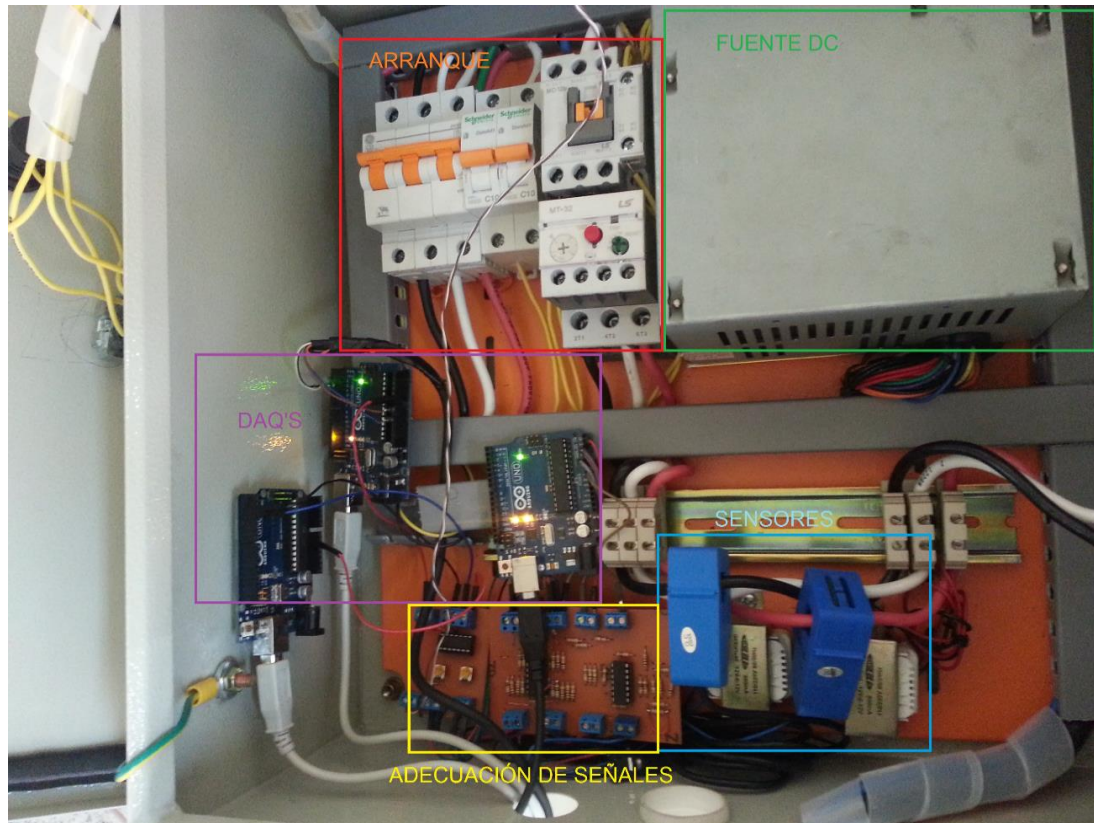
Las conexiones eléctricas de estos elementos para realizar el arranque lo podemos ver en el diagrama “*DRW\_ARRANQUE*”

Lo primero a construir son las divisiones para las diferentes secciones y canaletas por donde se guiará el cableado



**Figura 64. Construcción del sistema de control y fuerza del arranque de un motor trifásico**

De acuerdo al diagrama unifilar “*DRW\_UNIFILAR*”, la distribución de todos los elementos identifica las partes donde se encuentra y se distribuye la energía para el sistema de arranque, la fuente DC, el sistema de sensores donde se toman las mediciones, el conjunto de tarjetas de adecuación de señales (Figura 67) y las tarjetas de adquisición de datos ARDUINO (Figura 66).



**Figura 65. Distribución de dispositivos en el módulo**



Figura 66. Tarjeta de adquisición de datos ARDUINO UNO

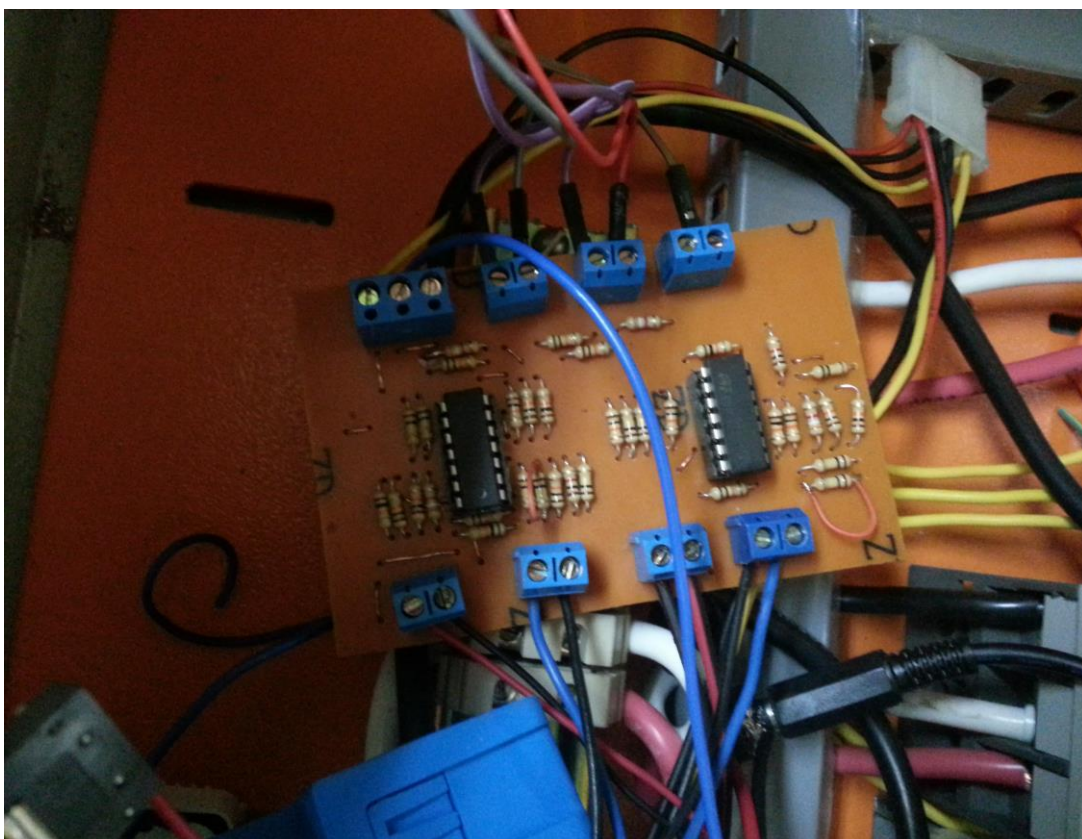


Figura 67. Circuito eléctrico de adecuación de señal para valores medidos de V y I.



## 4.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Con los equipos disponibles que provee el banco de pruebas del laboratorio de máquinas eléctricas, se realiza fácilmente un aumento progresivo del sistema de cargas para analizar las características de entrada y salida del motor a estudiar.

Las pruebas aplicadas se desarrollan en base a cargas externas resistivas ( $R_L$ ) puestas del sistema DC del generador el cual provee un torque resistivo a la libre velocidad angular del eje del motor de inducción, el control de la cantidad de resistencia puesta se maneja de acuerdo a la corriente de carga ( $I_c$ ) consumida en el generador.

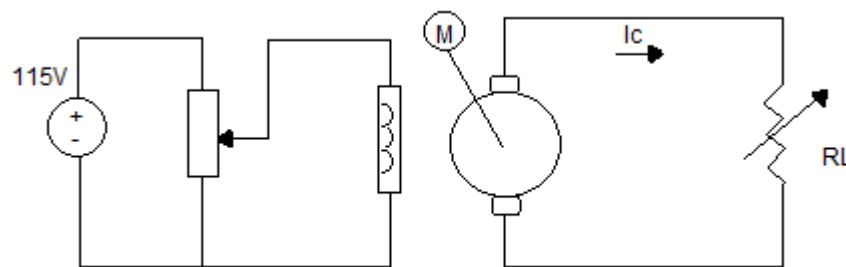


Figura 68. Circuito del generador con variación de resistencia

Al encender la comunicación de la interfaz, se empieza a realizar lecturas y con el sistema de motor apagado solo existe medidas de interferencias y ruido residual en la red y armadura del motor.

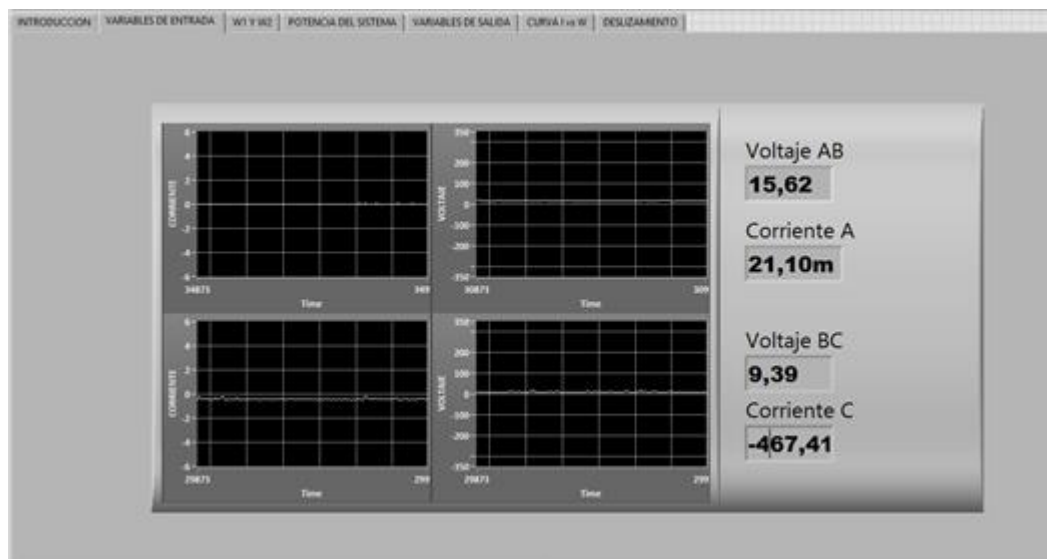


Figura 69. Interfaz encendida sin arrancar el motor

Una vez que se arranca el motor, se puede ver en la ventana de variables de entrada, los valores RMS de tensión e intensidad, el pico generado por el alto consumo de corriente que es de 6 veces el valor nominal (Figura 70) necesario para romper la inercia en el momento del arranque y las formas de onda de las variables de entrada.

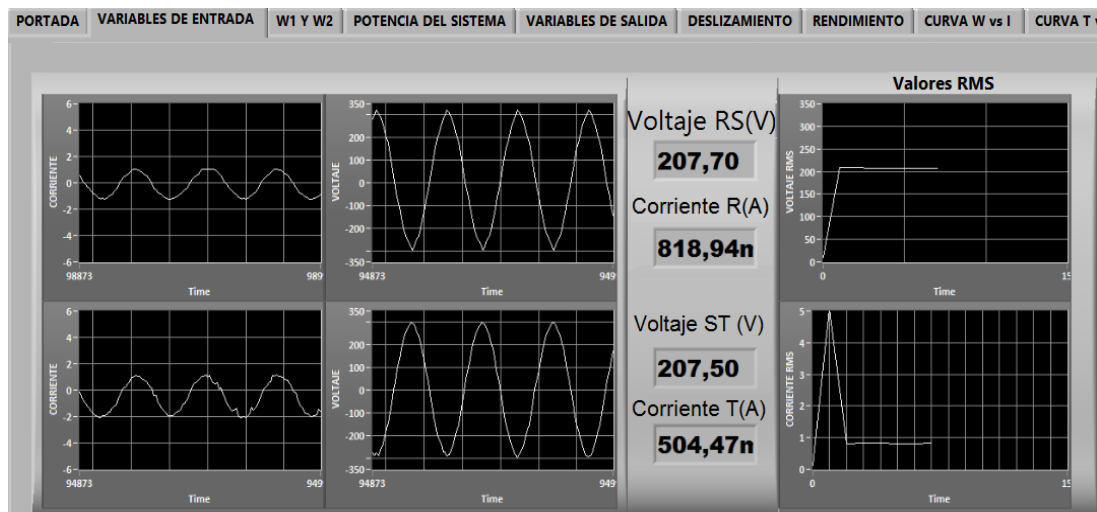


Figura 70. Visualización de V y I en arranque del motor trifásico

Una vez arrancado el sistema y estabilizado, se conecta el módulo de cargas y se incrementando en pasos de 0,5 A la corriente  $I_c$ , mediante la variación manual de la cantidad de carga RL.

De esta manera las lecturas del estado del sistema y las tendencias de los parámetros de caracterización mientras se aumenta el esfuerzo de trabajo son visibles.

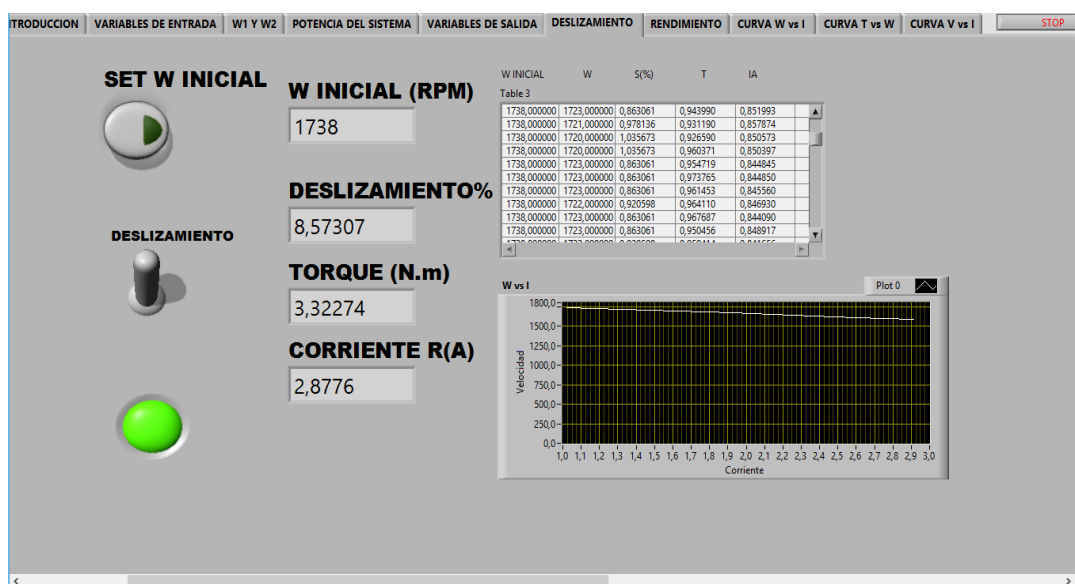
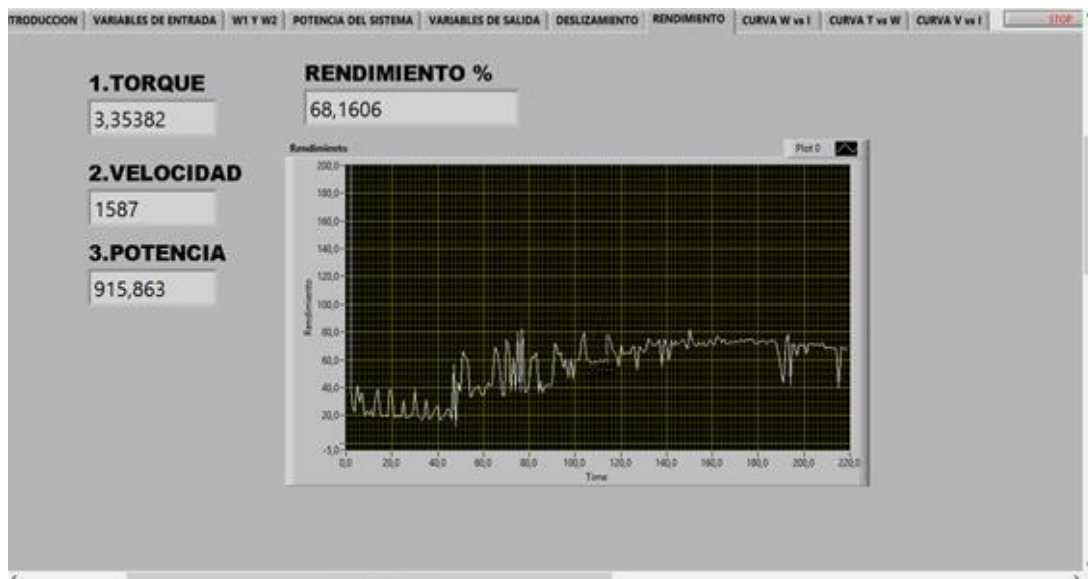


Figura 71. Deslizamiento con incremento de carga

Uno de los parámetros más importantes que caracterizan a un equipo es el deslizamiento, el cual debe estar entre el 3-8% para un óptimo desempeño y se representa cuando la velocidad angular empieza a decrecer como se puede ver en la curva W vs. I de la Figura 71.

Para poder analizar el rendimiento del sistema es necesario esperar que el mismo se estabilice y se acerque a sus valores nominales de corriente en estator y velocidad. Al tener la máquina trabajando en estos valores se puede relacionar la potencia de salida que se está observando sobre la potencia de

entrada que es lo que se está consumiendo y así esperar valores óptimos de desempeño con un rendimiento sobre el 80%.



**Figura 72. Visualización del rendimiento mientras se alcanza valores nominales**

Mientras se eleva la corriente de carga  $I_c$  en pasos de 0,5A, el sistema tiene variaciones hasta estabilizar los valores medidos, por lo que se toma manualmente con el botón de “Adquirir Datos” a cada instante del aumento de intensidad los valores a ser graficados.

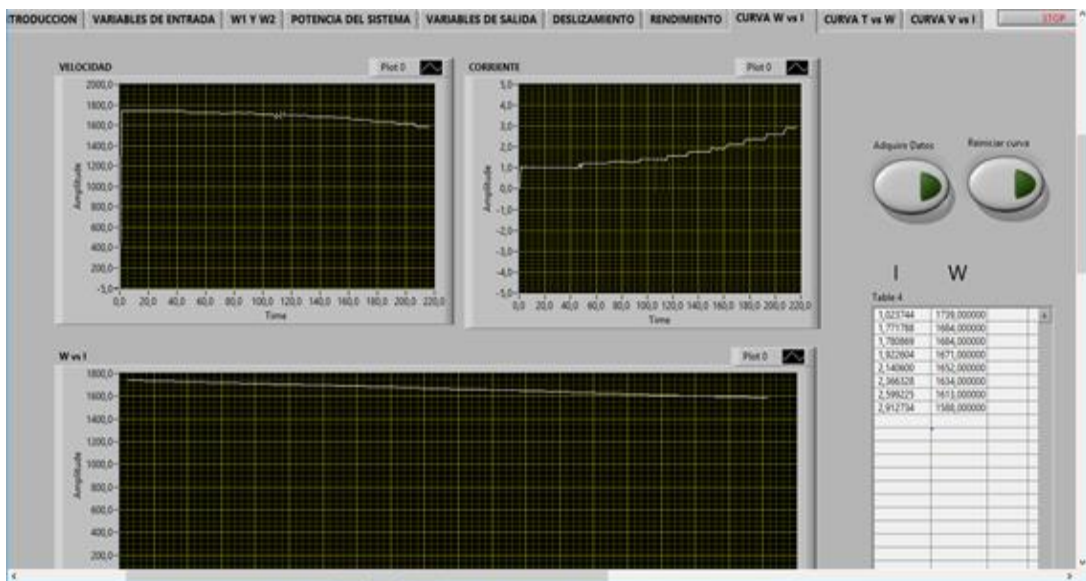


Figura 73. Curva W vs I

Las curvas de aprendizaje además de dar una noción del trabajo realizado por la máquina, brindan una experiencia de cómo deben comportarse los parámetros estudiados en el tiempo, siendo fácil reconocer picos o declives drásticos de valores en las formas habituales de curva.

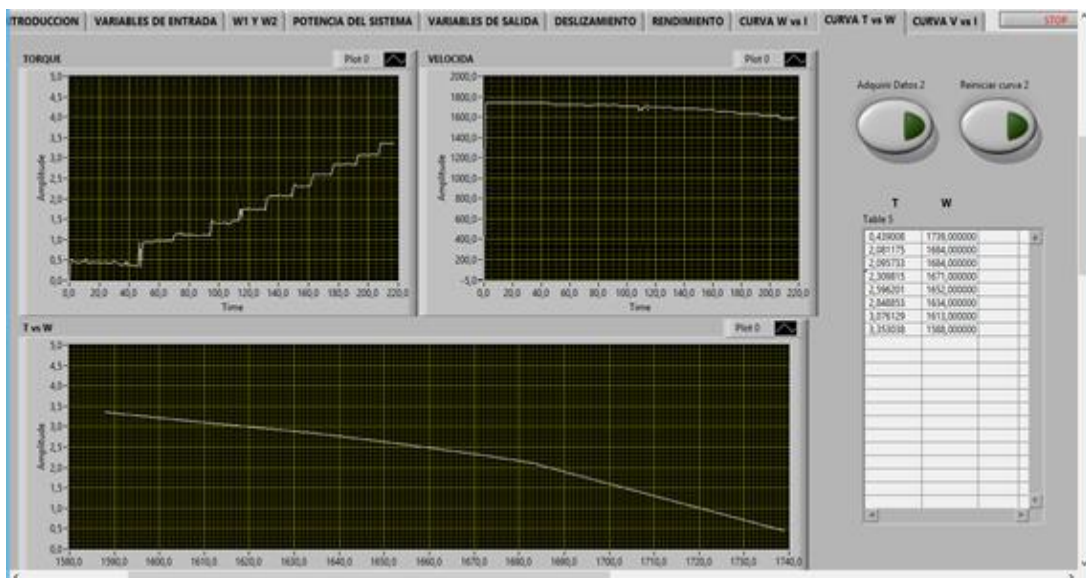


Figura 74. Curva T vs W

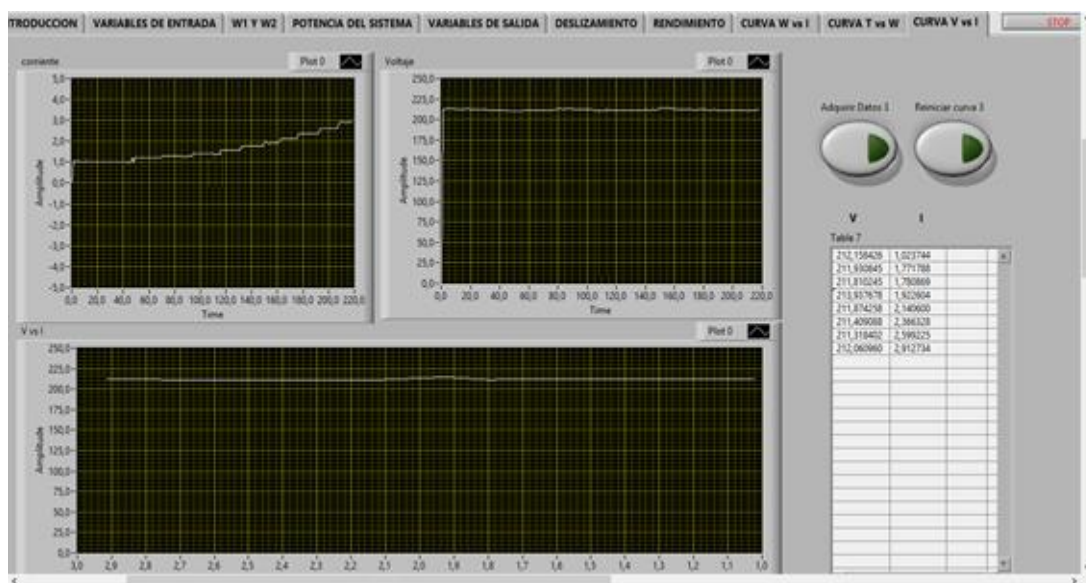


Figura 75. Curva V vs I

Una vez obtenidas todas las curvas y datos para los diferentes valores de corriente de carga, se procede a desconectar el generador adaptado al eje del motor asincrónico, apagándolo, después dando clic en el botón stop se detiene la lectura de datos de la interfaz y finalmente apagamos el motor presionando el pulsador stop del módulo.

### 4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

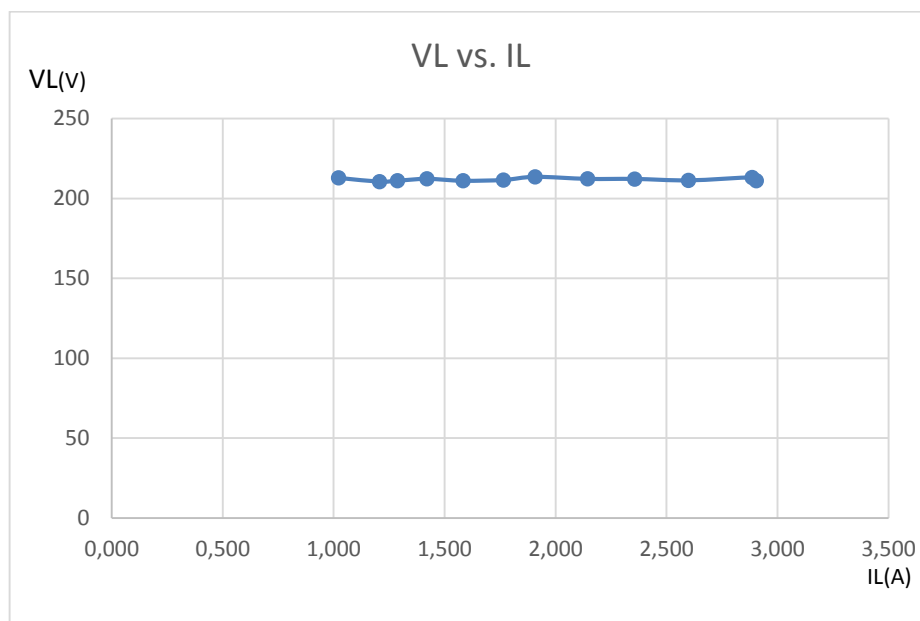
Con la toma de datos y la obtención de tablas se crea un sistema de información en base a valores medidos y calculados para graficarlos y analizar sus resultados, teniendo una idea de la evolución del sistema según el incremento de su trabajo.

La tabla llenada por el módulo de adquisición de datos para caracterizar el equipo describe las siguientes variables para cada instante de tiempo.

Tabla 5.

Muestras tomadas de valores de variables de salida, variables de entrada, potencias, rendimiento y desplazamientos

$I_c$	$E_a$ (VDC)	$I_L$ (A)	$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$V_L$ (V)	$S$ (VA)	$P$ (W)	$Q$ (VAR)	$\omega$ (RPM)	$T$ (NM)	$s$ %	$\eta$ %
0	115	1,023	212,923	0,648	211,638	287,939	241,215	157,240	1738	0,430	0,058	32,429
0,8	110	1,207	210,536	0,858	209,792	666,614	499,093	0,220	1723	0,950	0,863	34,343
1	110	1,288	211,178	0,918	209,365	608,912	543,994	146,910	1718	1,136	1,093	37,543
1,5	108	1,420	212,303	1,082	210,975	730,220	549,721	125,895	1709	1,402	1,784	45,621
2	106	1,583	211,116	1,261	210,151	650,068	563,840	251,545	1695	1,754	2,359	55,189
2,5	105	1,766	211,633	1,445	210,209	656,912	606,883	300,802	1682	2,072	3,107	60,105
3	104	1,908	213,625	1,706	214,079	736,813	616,585	344,389	1671	2,288	3,740	64,907
3,5	103	2,144	212,316	1,960	213,087	837,444	700,796	389,348	1654	2,607	4,891	64,392
4	102	2,356	212,283	2,193	212,712	904,615	757,006	432,021	1635	2,838	5,926	64,161
4,5	100	2,599	211,368	2,466	212,053	1111,222	898,385	464,035	1615	3,076	7,135	57,882
5	98	2,887	213,260	2,732	213,174	1073,561	911,589	536,025	1587	3,322	8,573	60,538
5,5	98	2,905	211,194	2,822	211,538	1089,339	929,900	544,059	1587	3,351	8,631	59,860



**Figura 76. Curva de variables de entrada**

Las variables de entrada es el primer aspecto que da sobre el buen estado de un motor e incluso de tensión e intensidad de la red eléctrica de entrada. Si los valores de tensión no se reducen mientras aumenta la corriente consumida, el trabajo del motor está siendo el correcto.

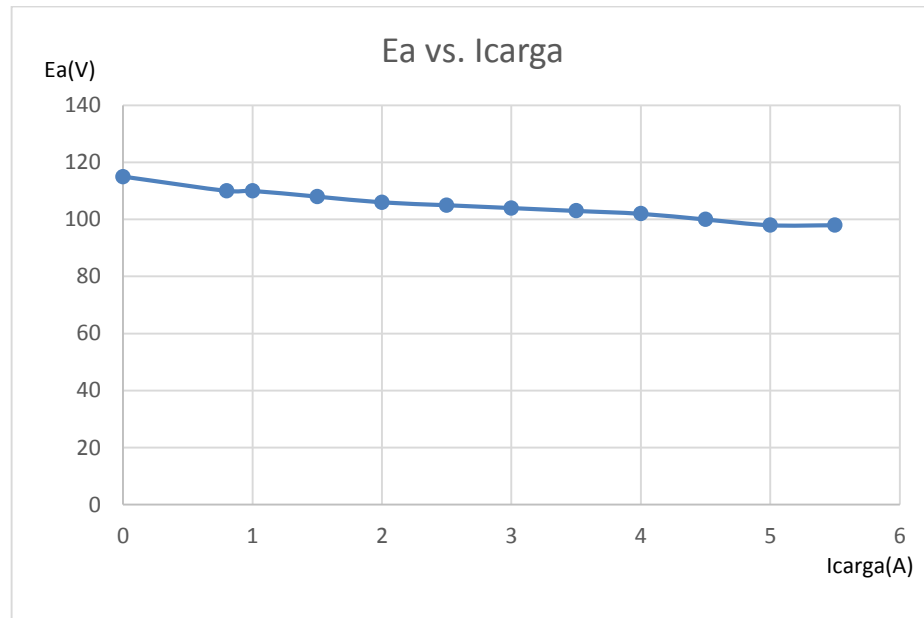
Por el método que se utiliza para la medida de tensión de línea es fácil poder distinguir cuando una de las fases falla o está ausente.

Si hay una pérdida de fase en un motor eléctrico trifásico y se va a poner en funcionamiento sin que el operario se haya dado cuenta de la ausencia de una fase, el motor se puede quemar en el momento del arranque, ya que el consumo de corriente inicial en un instante es alto y este se lo realizará solo en dos fases.

Si el motor se encuentra trabajando cuando existe la pérdida de una fase, las dos restantes absorberán la corriente necesaria para mantener la fuerza y

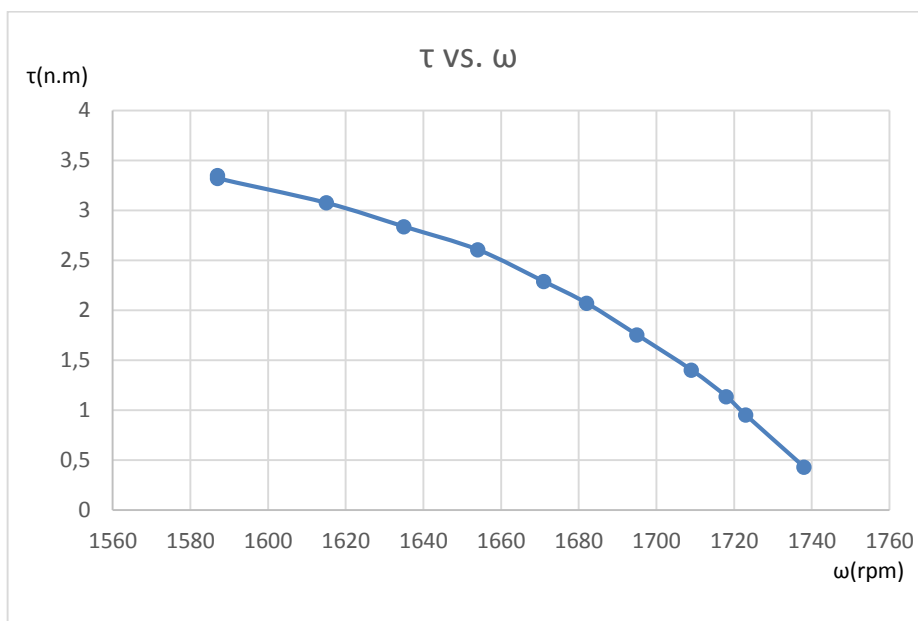


el torque para equilibrar la carga, por lo que sobrecargarán las dos líneas activas y el motor se quemará por sobrecalentamiento.



**Figura 77. Curva de regulación**

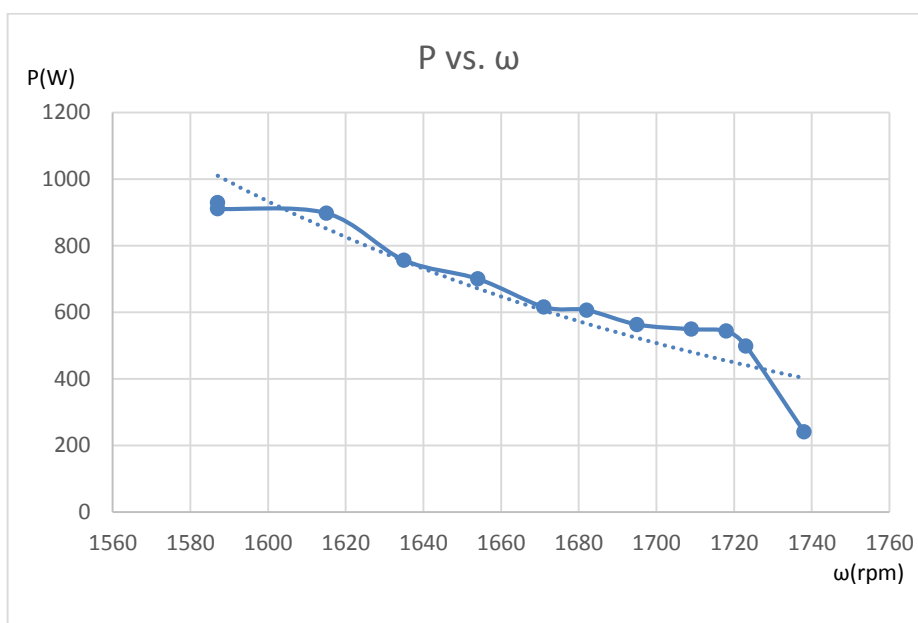
La tensión en armadura del generador presenta un decrecimiento mínimo según el aumento de la corriente de carga que va creciendo; esto implica que existe un flujo constante de excitación de líneas de campo en armadura del generador.



**Figura 78. Curva de variables de salida**

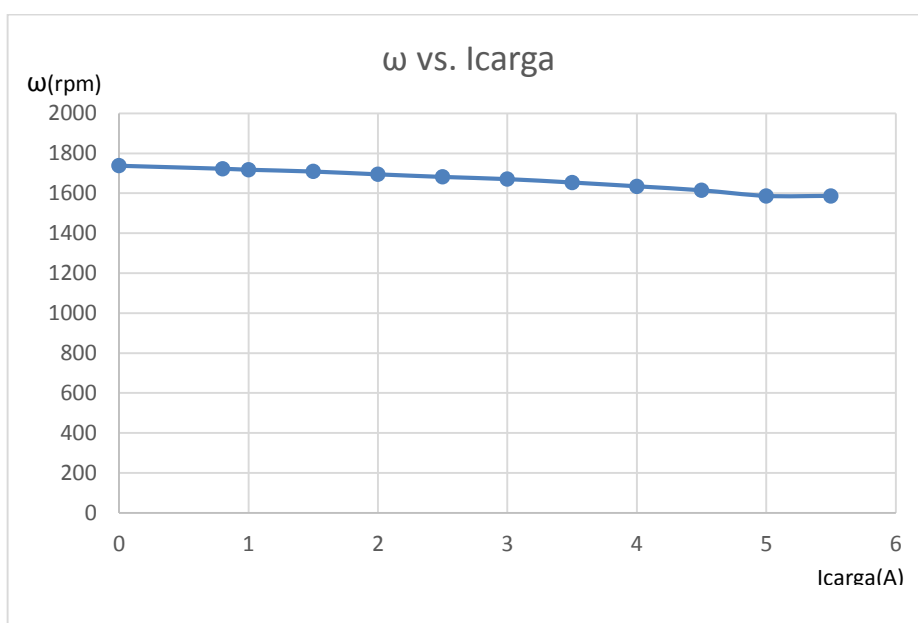
La caracterización con las variables de salida ayuda a ver el trabajo en sí que se encuentra realizando la máquina, distinguiendo una relación de aumento de torque mientras disminuye la velocidad angular. Esta curva deberá ser constante y no presentar picos mientras se alcanza valores nominales de corriente en estator ya que estos valores en condiciones óptimas deberán ser aproximados a los valores dispuestos de la placa técnica del motor de inducción.

En este caso un consumo de corriente en línea de 3 A a unas 1600 revoluciones por minuto da un claro concepto de que la máquina se encuentra en buen estado dentro del 10% de rango de variación de sus valores nominales.



**Figura 79.** Curva de potencia vs velocidad angular

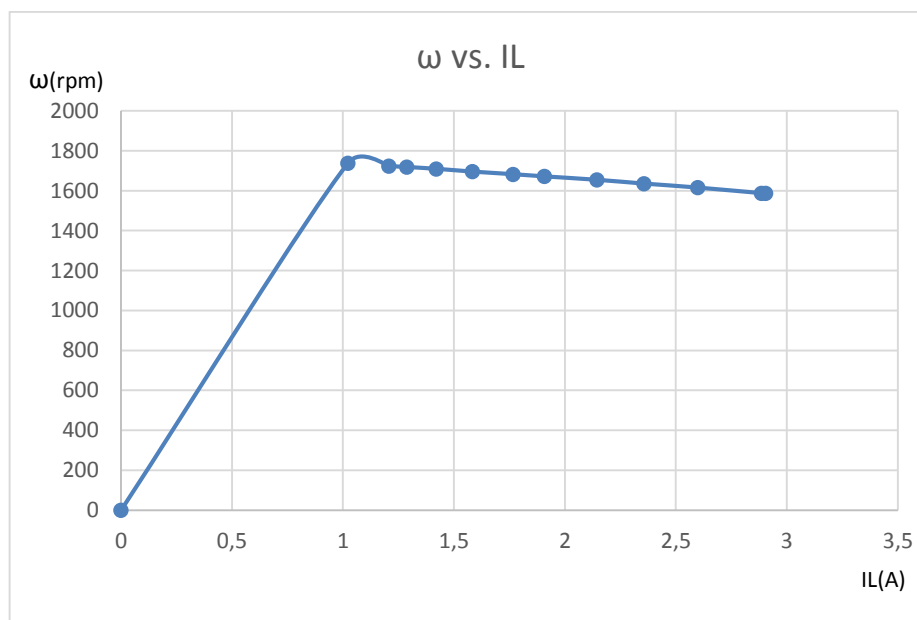
El consumo de potencia activa irá aumentando mientras disminuye las revoluciones, debido al esfuerzo necesario que implica actuar sobre la resistencia y poder compensar el giro.



**Figura 80.** Variación de velocidad con respecto a la corriente de carga

La forma más clara de observar el esfuerzo que se encuentra haciendo el motor para realizar su trabajo es divisando la velocidad a la cual gira el eje, inclusive las vibraciones y ruidos que provoca este. Un sobre esfuerzo que realice la máquina dentro de valores nominales presentará un elevado torque, sobrecalentamiento de conductores, altas vibraciones a un deslizamiento sobre el 10%.

Para este caso el motor tiene un deslizamiento de alrededor 8,6%, lo cual nos indica que se encuentra en el umbral del óptimo desempeño.



**Figura 81. Variación de la velocidad con respecto a la corriente del estator**

La corriente de alimentación aplicada al bobinado del estator, el cual excitará al rotor para generar el giro, partirá desde cero, sin contar con el incremento necesario de 6 a 8 veces su corriente nominal necesaria para romper la inercia, hará incrementar la velocidad en segundos hasta alcanzar un estado estable de velocidad. A partir de ese instante con el aumento de carga la corriente IL consumida irá creciendo para poder compensar la velocidad de giro y que esta no decrezca demasiado.

Con todos estos aspectos, se puede desarrollar una tabla en la cual se definan los parámetros más importantes que caractericen a una máquina, desde su estado de reposo, pasando por el arranque y haciendo variar cargas desde el vacío, como se puede ver en la siguiente tabla:

**Tabla 6.**

**Tabla de resultados**

Análisis	Condiciones Normales	Posibles Causas
1 Obstrucciones en eje, ventilador y sistema eléctrico	Al mover manualmente el eje no debe haber ninguna obstrucción en el deslizamiento del eje, ventilador y buen estado de las conexiones eléctricas.	Desgaste de rodamientos, retenedores, empaques, eje obstruido o desbalanceado.
2 Sobre carga en corriente arranque	de 6 – 8 veces corriente nominal	-Alto torque resistivo necesita mayor corriente para romper la inercia. -Obstrucción en eje. <b>(1)</b> -Desgaste de rodamientos, empaques, retenedores.
3 Consumo excesivo de corriente	Variación proporcional en el crecimiento de corriente y carga aplicada.	-Alto torque resistivo (2) -Pérdida de una fase (5) -Obstrucción en eje (1) -Alta temperatura en bobinados
4 Torque elevado en arranque	Torque de arranque bajo	-Sobre carga en corriente de arranque (2) -Obstrucción en eje (1)
5 Falta de Fase	Consumo de tensión y corriente de línea similares en las tres fases RST	Consumo excesivo de corriente (3)
6 Variación de tensión excesiva	Variación en tensión menor al 10% a plena carga	Variación de tensión en acometida al equipo.
7 Deslizamiento	3 al 8%	-Mal estado de aislamientos y bobinados -Pérdida de fase. -Desgaste de rodamientos.

**CONTINÚA Tabla 6->**

---

<p>Variación drástica de torque, Variación proporcional de velocidad y torque, corriente y carga de alimentación al aumentar la carga</p>	<p>-Variación de tensión.(5) (6) -Alta temperatura en bobinados. -Corto circuito en bobinados (aislamiento de motor)</p>
<p>9 Rendimiento a valores nominales Rendimiento <math>\geq 80\%</math></p>	<p>-Alta temperatura en bobinados. -Corto circuito en bobinados (aislamiento de motor) (8) (7) (5) (3)</p>

---

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Un motor trifásico de inducción de tipo asincrónico es una máquina robusta que requiere un mínimo mantenimiento a corto tiempo, sin embargo si puede existir problemas que alteran el normal desempeño como es el caso del deterioro en rodamientos, desgaste de aislantes, desbalance, falta de lubricación, etc., o problemas externos como son caídas de tensión, pérdidas de fase o inclusive alto torque de resistencia que impide el libre deslizamiento angular del eje.
- En este proyecto se desarrolló un módulo genérico el cual puede ser operable sobre una máquina asincrónica, con la finalidad de medir sus variables de entrada como son voltaje, corriente y de igual manera leer el estado de las variables de salida como son el torque y velocidad angular, para así caracterizar mediante la toma de datos un aprendizaje del trabajo realizado por el motor.

- El módulo para caracterización conforman los siguientes subsistemas:
  - (a) Sistema de arranque de motor
  - (b) Sistema de lectura de datos
  - (c) Sistema de adquisición de datos leídos
  - (d) Sistema de procesamiento de datos
  - (e) Software de interfaz para datos medidos y caracterizados.
  
- Para el sistema de arranque de motor se lo realizó en conexión estrella-delta, mediante electrónica de control en dos etapas, una de fuerza y otra de control, con las debidas protecciones para resguardar el equipo en tensiones y corrientes de circulación.
  
- Los sensores utilizados para la lectura de variables de entrada están basados en las leyes físicas y teoría del transformador; transformador reductor de potencial TR para el caso de voltaje y CT de núcleo partido para la medición de corriente, y un encoder rotativo que entrega 600 pulsos digitales por ciclo de velocidad angular sensada.
  
- Las señales sensadas y adecuadas para rangos admisibles, son recolectados por las tarjetas de adquisición de datos ARDUINO, la cual es una tecnología que se encuentra con mayor aceptación en la actualidad por su facilidad de trabajo y su capacidad de adoptar otros tipos de código de programación así como también la comunicación amigable con otras plataformas de supervisión, monitoreo y control de datos.
  
- El procesamiento de datos se lo realizó de dos maneras, con código abierto de ARDUINO para el cálculo del factor de potencia y medición de



velocidad, y programación de bloques en el terminal LabVIEW para el procesamiento de señales de entrada, cálculos de potencia y muestra de datos digitalizados y muestreados en diagramas de curvas.

- En el estado de transición de la máquina desde su arranque hasta su estado estable, sólo se considera el aumento de corriente de entrada del 6 -8 veces su intensidad nominal, ya que para el resto de cálculos se analiza el comportamiento del sistema a partir del estado estable y aumento de carga, despreciando así pérdidas no significativas que se producen en devanados, núcleo, ruido, etc.
- Para caracterizar el equipo se aplicó una serie de pruebas utilizando un generador eléctrico con carga variable, mismo que permitió alcanzar los niveles de plena carga del motor en prueba.
- La característica propia de un motor cuando se aplica una carga mecánica de torque resistivo en el eje, es de compensar la potencia mecánica con el decrecimiento de la velocidad y aumento de la intensidad de corriente de entrada.
- Una de las principales maneras de caracterizar a un motor es observando el deslizamiento, el equipo de prueba permite realizar la medición de este parámetro mediante la interpretación del valor de deslizamiento que muestra el óptimo desempeño de la máquina cuando se encuentra entre valores del 3% al 8% a plena carga, pudiendo así establecer el ciclo de vida en el cual se encuentra componentes como: aislamiento de motor, rodamientos, retenedores, bobinados, etc.

- La interpretación de los análisis en la máquina de prueba presentan un buen resultado, sus valores de deslizamiento y rendimiento se encuentran en el umbral de óptimo desempeño del equipo, éste cuenta con un correcto comportamiento en estado estable de sus variables de entrada y salida, como se observó en la Tabla 6 de análisis de resultados.
- La introducción de un sistema de control para el mantenimiento de equipos completamente integrados conlleva a una mayor eficiencia debido a la redundancia de equipos, menor costos de mantenimiento, cableado, reparaciones, operación, así como una notable mejora en la calidad y confiabilidad del suministro de la energía eléctrica al sistema.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- El momento que se trabaja con equipos de significativa potencia es importante tomar las debidas precauciones como es la utilización de protecciones de aperturas de línea, las cuales además de proteger al equipo también provee protección a la materia prima de mayor importancia en una industria como es la persona.
- El módulo debe ser manejado solo por los pulsadores de control “Star/Stop” y por la interfaz en la PC cuando se encuentre encendido, para proteger así la integridad del operador y evitar daño en los equipos.
- Para operar el sistema se recomienda realizar las secuencias respectivas:
  - (a) Arranque en vacío
  - (b) Incremento de la carga en pasos establecidos.

- El sistema de comunicación utilizado es USB, el mismo que es sensible a perturbaciones, en consecuencia se recomienda el uso de cables, puertos robustos y confiables para poder tener una buena comunicación.

### 5.3. BIBLIOGRAFÍA

Alicante, U. (s.f.). *Tecnología informática y de computación*. Obtenido de Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos: <http://www.rua.ua.es>

Álvares, J. (2009). Motores Trifásicos de Inducción.

Blasquez, & Viale. (1995). *Tutorial de Sensores*. Obtenido de Laboratorio de Sensores e Instrumentación: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores>

Bort, J. V. (2002). Estudio del Modelo Matemático del Motor Trifásico. Spain: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

D. J. Atkinson, P. P. Acarnley, & J. W. Finch. (1991). Observers for induction motor state and parameter estimation. Newcastle: IEEE Trans. Ind. Appl.

Frank P.M., & E. Alcorta García. (1997). *Deterministic Nonlinear Observer-Based Approaches to Fault Diagnosis*. Germany: Elsevier Science Ltd.

Instruments, N. (s.f.). Obtenido de <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa>

L. Ben-Brahim, & A. Kawamura. (1992). Digital current regulation of field-oriented controlled induction motor base on predictive flux observer. Japan: IEEE Trans. Ind. Appl.

National, I. (2003). *Empezando con LabVIEW*. Obtenido de <http://www.ifug.ugto.mx/~applphy/pdf/Labview1.pdf>

OMEGA. (s.f.). *Medición y Control de Procesos*. Obtenido de <http://es.omega.com/index.html>

Oviedo, U. d. (s.f.). *Autómatas Programables*. Obtenido de [http://isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/plc\\_resumen.pdf](http://isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/plc_resumen.pdf)

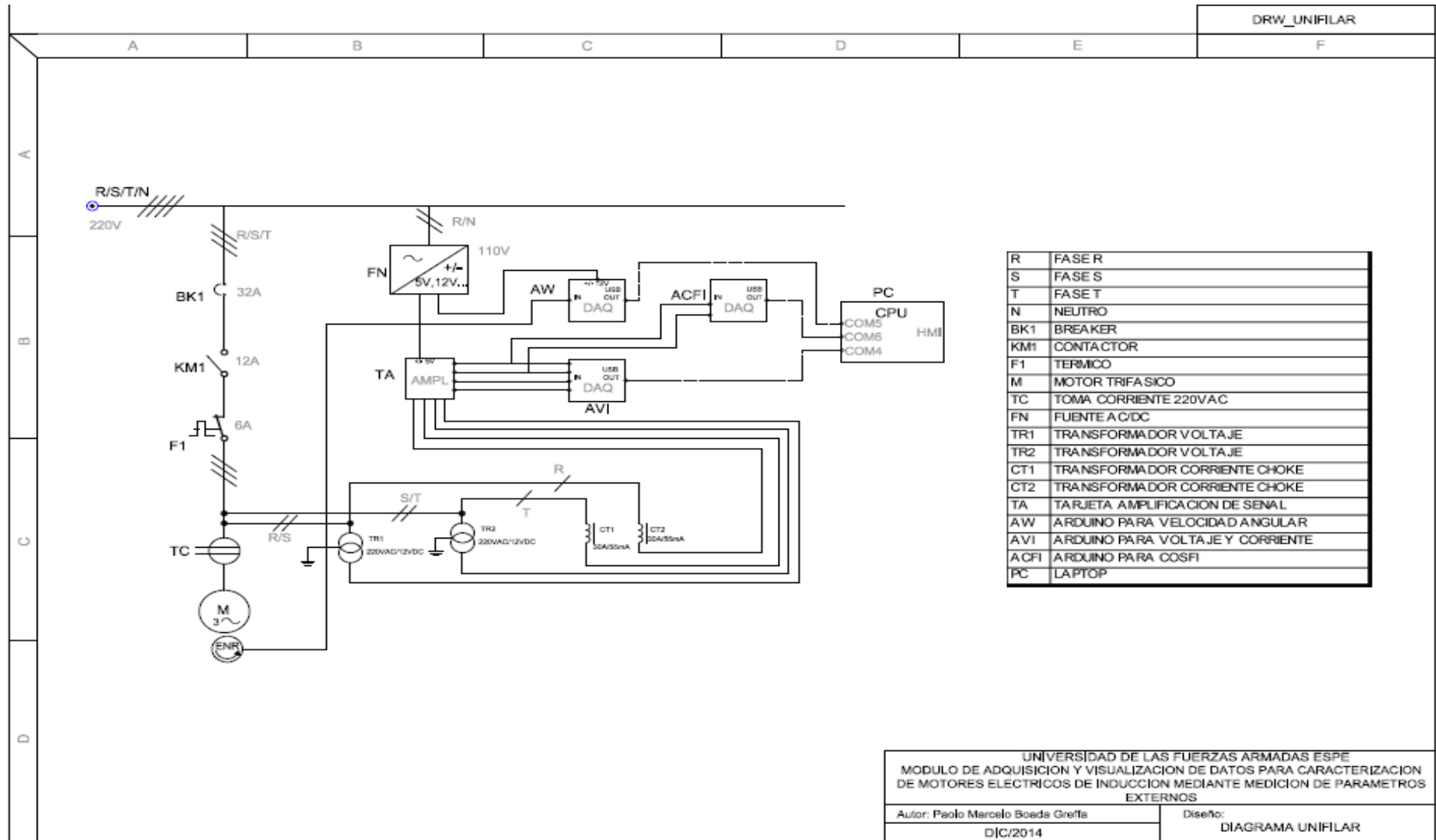
SINAIS. (s.f.). *Ingeniería de Mantenimiento*. Obtenido de Frecuencia de Motores: <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/motores>

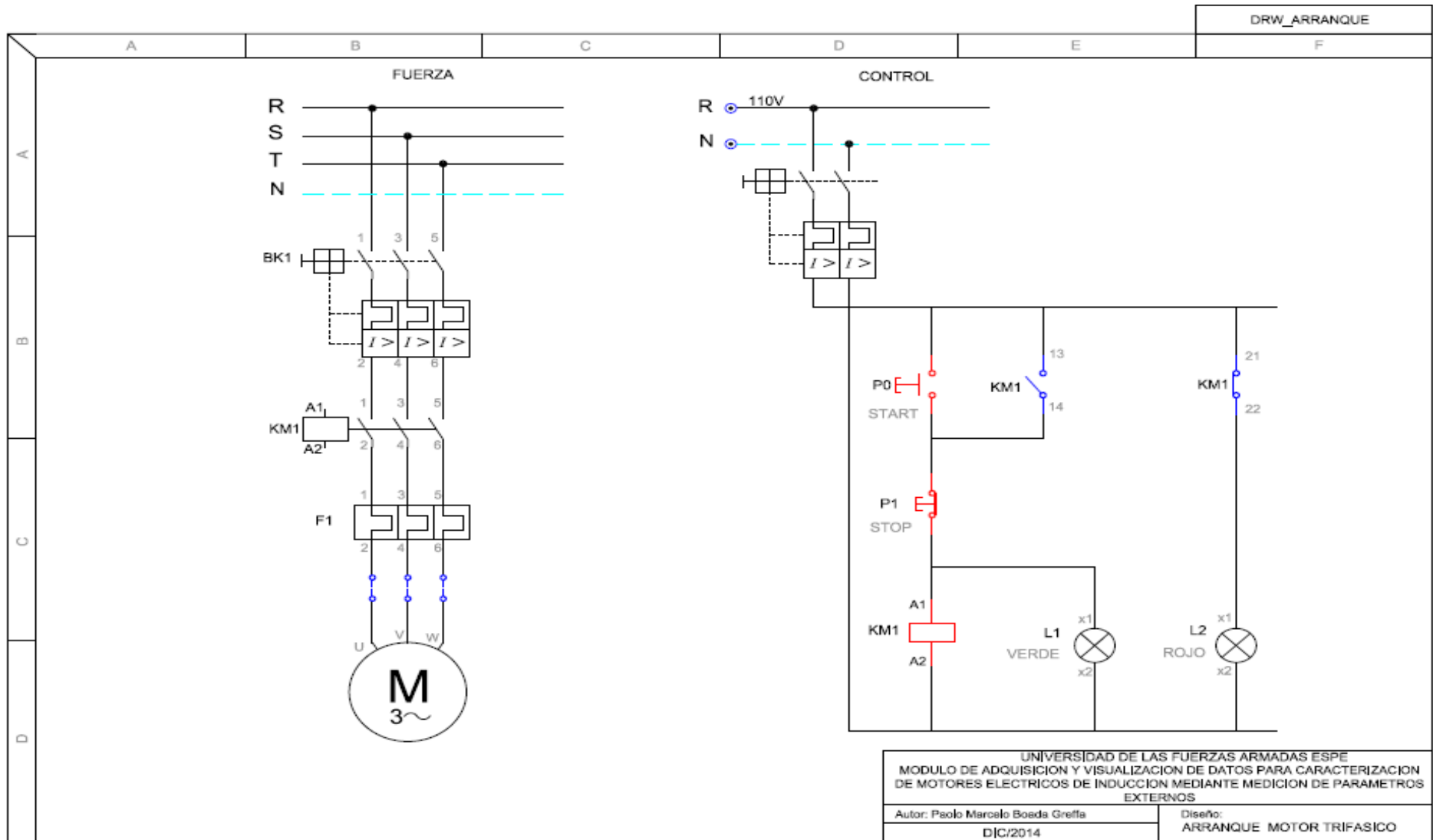
TERCO. (2005). Electrical Machines Laboratory.

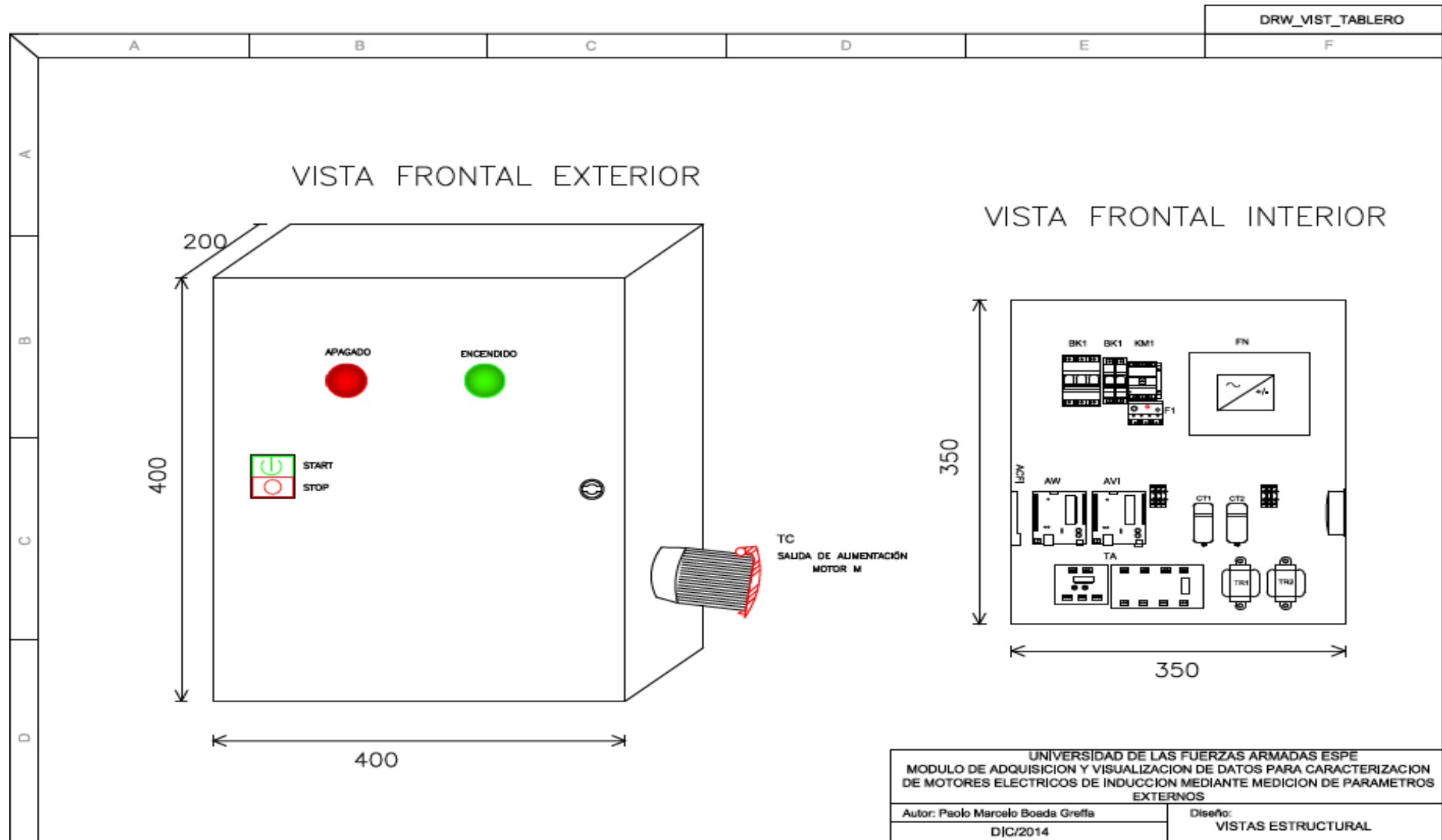
Vas, P. (1992). *Electrical Machines and Drives*. New York: Oxford University Press.

#### **5.4. ANEXOS**

##### **Diagramas Eléctricos**







## ACTA DE ENTREGA

El proyecto fue entregado en la Dirección de la Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, desde:

Sangolquí, 11 DE MARZO de 2015

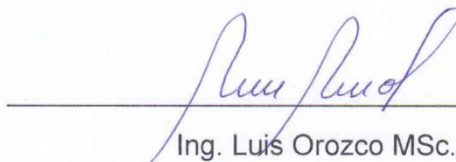
ELABORADO POR:



PAOLO MARCELO BOADA GREFFA

172187353-5

AUTORIDAD



Ing. Luis Orozco MSc.

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

