

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS CARACTERÍSTICOS DE
MÁQUINAS ELÉCTRICAS ASÍNCRONAS: Diseño e
Implementación de un Instrumento Virtual para el Análisis de los
Resultados de los Ensayos Característicos de un Motor
Asíncrono Trifásico en Entorno LabVIEW**

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

Julio Diego Rodríguez Reategui

ASESOR: Ing. Oscar Melgarejo Ponte

Lima, enero del 2013

RESUMEN

En la actualidad, la utilización de los instrumentos virtuales ha venido incrementándose en aplicaciones enfocadas a las ciencias e ingeniería. Esto se debe a que, a diferencia de los instrumentos tradicionales de laboratorio, estas son herramientas basadas en software, las cuales utilizan el hardware de una computadora o estación de trabajo para realizar las tareas para las cuales han sido diseñadas, lo cual le da grandes ventajas como una mayor portabilidad, personalización, adaptabilidad e interconectividad con otros sistemas.

El objetivo de la tesis es la utilización de un entorno de desarrollo creado por la empresa National Instruments, llamado LabVIEW. En dicho entorno, se diseñará e implementará un instrumento virtual, cuyo propósito es el de ser usado para el análisis de los resultados obtenidos en el proceso de ejecución de los ensayos característicos realizados a un motor asíncrono trifásico. Para ello, el instrumento virtual deberá ser capaz de establecer una comunicación con un hardware externo encargado de llevar a cabo dichos ensayos de forma automática. Dicha comunicación enlazará al instrumento virtual con una tarjeta de adquisición de datos, lo cual permitirá al usuario del instrumento, ingresar datos de placa y parámetros de ensayo pertinentes, para que estos sean enviados al resto del sistema para la correcta realización de los ensayos. Así mismo, el instrumento virtual debe ser capaz de usar esta comunicación para recibir valores correspondientes a los resultados de los ensayos realizados en dicha máquina eléctrica, provenientes de la tarjeta de adquisición de datos mencionada.

Utilizando los valores obtenidos durante el desarrollo de los ensayos, el instrumento realizará cálculos matemáticos pre-programados con la finalidad de poder mostrar en pantalla los parámetros del circuito eléctrico equivalente y las gráficas características correspondientes para el análisis del motor asíncrono trifásico ensayado con el fin de describir, de forma gráfica, su comportamiento y eficiencia.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS	
1.1 DEFINICIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS	2
1.2 EL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO	2
1.2.1 ANÁLISIS DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS	3
1.2.1.1 ENSAYOS TÍPICOS Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	3
1.2.1.2 OBTENCIÓN DE GRÁFICAS	12
1.3 DECLARACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	15
CAPITULO 2: INSTRUMENTOS VIRTUALES	
2.1 ESTADO DEL ARTE	16
2.2 INSTRUMENTOS TRADICIONALES E INSTRUMENTOS VIRTUALES	16
2.3 ENTORNOS DE DESARROLLO	20
2.3.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C/C++	20
2.3.2 MATLAB	20
2.3.3 LABVIEW	21
CAPITULO 3: PLANTEAMIENTO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS DE MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS EN BASE A SUS ENSAYOS CARACTERÍSTICOS UTILIZANDO EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN GRÁFICO LABVIEW	
3.1 CONSIDERACIONES IMPORTANTES	22
3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS CARACTERÍSTICOS DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO	22
3.2.1 ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES PROVENIENTES DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA ENSAYADA	22

3.2.2	ETAPA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES PROVENIENTES DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES SENSADAS	23
3.2.3	ETAPA DE CONTROL DE ALIMENTACIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO	23
3.2.4	ETAPA DEL INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y MUESTRA EN PANTALLA DE RESULTADOS OBTENIDOS	24
3.2.5	DIAGRAMA DE BLOQUES	24
3.3	OBJETIVOS	25
3.3.1	OBJETIVO PRINCIPAL	25
3.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3.4	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	26
3.5	DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL DISEÑO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL	27
3.5.1	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO	27
3.5.2	SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	28
3.5.2.1	ELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	29
3.5.3	ELECCIÓN DEL PROTOCOLO INTERNO DE ENVÍO Y RECEPCIÓN DE DATOS	29
3.5.3.1	JUSTIFICACIÓN	31
3.5.4	ELECCIÓN DEL ENTORNO DE DESARROLLO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL	32
3.5.4.1	JUSTIFICACIÓN	32
3.6	DISEÑO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL	33
3.6.1	PROGRAMA PRINCIPAL	33
3.6.1.1	DIAGRAMA DE FLUJO	33
3.6.1.2	DIAGRAMA DE BLOQUES	35
3.6.2	ETAPA DE REGISTRO Y ENVÍO DE DATOS DE PLACA Y PARÁMETROS DE ENSAYO	36
3.6.2.1	DIAGRAMA DE FLUJO	37
3.6.2.2	DIAGRAMA DE BLOQUES	38
3.6.3	ETAPA DE RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS	38
3.6.3.1	DIAGRAMA DE FLUJO	38

3.6.3.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	40
3.6.4 ETAPA DE CLASIFICACIÓN DE DATOS RECIBIDOS	41
3.6.4.1 DIAGRAMA DE FLUJO	41
3.6.4.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	42
3.6.5 ETAPA DE CÁLCULO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE	43
3.6.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO	43
3.6.5.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	44
3.6.6 ETAPA DE CÁLCULO Y MUESTRA EN PANTALLA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS	45
3.6.6.1 DIAGRAMA DE FLUJO	46
3.6.6.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	46
3.6.7 ETAPA DE CÁLCULO Y MUESTRA EN PANTALLA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE	47
3.6.7.1 DIAGRAMA DE FLUJO	48
3.6.7.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	49
3.7 DETALLE ECONÓMICO	49
CAPITULO 4: IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	
4.1 DETALLES DEL MOTOR A ENSAYAR	50
4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS COMPLETO	51
4.2.1 ETAPA DEL INSTRUMENTO VIRTUAL EN LABVIEW	52
4.3 FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ DE CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS Y RECEPCIÓN DE DATOS	53
4.4 OBTENCIÓN DE VALORES DE LOS ENSAYOS DEL MOTOR ASÍNCRONO UTILIZANDO EL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS	53
4.5 VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
4.5.1 GRÁFICA DE PÉRDIDAS EN VACÍO	59
4.5.2 GRÁFICA DE PÉRDIDAS EN EL COBRE	60
4.5.3 GRÁFICAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR SEGÚN LA VELOCIDAD DE GIRO	60
4.5.4 GRÁFICAS DE EFICIENCIA DEL MOTOR	62
4.5.5 CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE	63

4.5.6 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE	65
CONCLUSIONES	66
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68



ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS

Figura 1.1: Esquema de instrumentos de medida instalados para la realización del ensayo en vacío a un motor asíncrono trifásico	4
Figura 1.2: Conversiones de valores de línea a fase según el tipo de conexión	5
Figura 1.3: Circuito eléctrico equivalente por fase obtenido mediante el ensayo en vacío	5
Figura 1.4: Esquema de instrumentos de medida colocados para la realización del ensayo a rotor bloqueado para motor asíncrono trifásico	7
Figura 1.5: Circuito eléctrico equivalente por fase obtenido mediante el ensayo a rotor bloqueado	7
Tabla 1.1: Relación de reactancias según la clasificación NEMA para los motores	8
Figura 1.6: Circuito eléctrico equivalente total, hallado usando los parámetros obtenidos en los ensayos de vacío y a rotor bloqueado	9
Figura 1.7: Ensayo con carga para motor asíncrono trifásico	10
Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema completo con énfasis en el asunto de estudio de la presente tesis	25
Figura 3.2: Primera parte del diagrama de flujo del programa principal	34
Figura 3.3: Segunda parte del diagrama de flujo del programa principal	35
Figura 3.4: Diagrama de bloques de configuración y envío de datos de placa por serial	36
Figura 3.5: Diagrama de flujo de registro y envío de parámetros de ensayo y datos de placa	37
Figura 3.6: Diagrama de bloques de registro y envío de parámetros de ensayo y datos de placa	38
Figura 3.7: Diagrama de flujo de la etapa de recepción y almacenamiento de datos	39
Figura 3.8: Diagrama de bloques de la etapa de recepción y almacenamiento de datos	40
Figura 3.9: Diagrama de flujo de la etapa de clasificación de datos recibidos	42
Figura 3.10: Diagrama de bloques de la etapa de clasificación de datos recibidos	43

Figura 3.11: Diagrama de flujo simplificado de la etapa de cálculo de parámetros de circuito eléctrico equivalente	44
Figura 3.12: Diagrama de bloques de la etapa de cálculo de parámetros de circuito eléctrico equivalente	45
Figura 3.13: Diagrama de flujo simplificado de la etapa de cálculo y muestra de curvas características	46
Figura 3.14: Diagrama de bloques de la etapa de cálculo y muestra de curvas características	47
Figura 3.15: Diagrama de flujo simplificado de la etapa de cálculo y muestra de curvas de arranque	48
Figura 3.16: Diagrama de bloques de la etapa de cálculo y muestra de curvas de arranque	49
Tabla 3.1: Tabla con información del detalle económico de los elementos de esta tesis	49
Figura 4.1: Motor asíncrono trifásico a ser ensayado y datos de placa del mismo	50
Figura 4.2: Sistema de automatización de ensayos completo conectado y listo para funcionar	51
Figura 4.3: Instrumento virtual del sistema de automatización de ensayos ejecutándose en una laptop	52
Figura 4.4: Interfaz de usuario configurada y mostrando, en pantalla, un mensaje de espera	53
Figura 4.5: Tabla de valores obtenidos en el ensayo en vacío	54
Figura 4.6: Tabla de valores obtenidos en el ensayo a rotor bloqueado	55
Figura 4.7: Tabla de valores obtenidos en el ensayo con carga	56
Tabla 4.1: Valores leídos y calculados del ensayo en vacío realizado manualmente	57
Tabla 4.2: Valores leídos y calculados del ensayo a rotor bloqueado realizado manualmente	58
Tabla 4.3: Valores leídos y calculados del ensayo con carga realizado manualmente	58
Figura 4.8: Gráficas de pérdidas en vacío con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)	59

Figura 4.9: Gráficas de pérdidas en el cobre con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)	60
Figura 4.10: Gráficas de Torque vs. Velocidad, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)	61
Figura 4.11: Gráficas de Corriente vs. Velocidad, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)	61
Figura 4.12: Gráficas de Eficiencia vs. Potencia mecánica, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)	62
Figura 4.13: Gráficas de Factor de potencia vs. Potencia mecánica, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)	63
Figura 4.14: Porción del panel frontal en donde se muestra el resultado del cálculo del circuito eléctrico equivalente	64
Tabla 4.4: Parámetros del Circuito Eléctrico Equivalente obtenidos a partir ensayos manuales y a partir del sistema de automatización de ensayos	64
Figura 4.15: Gráficas de Torque vs. Velocidad (izquierda) y Corriente vs. Velocidad del motor eléctrico en condiciones de arranque y calculadas a partir del CEE	65

INDICE DE ANEXOS (EN CD)

ANEXO 1: Norma Técnica Peruana NTP-IEC 60034-2-2001	i
ANEXO 2-A: Recepción y almacenamiento de datos a RB- Bloques	ii
ANEXO 2-B: Recepción y almacenamiento de datos a RB- Diagrama de Flujo	iii
ANEXO 2-C: Recepción y almacenamiento de datos con Carga- Bloques	iv
ANEXO 2-D: Recepción y almacenamiento de datos con Carga- Diagrama de Flujo	v
ANEXO 3-A: Clasificación de datos recibidos en ensayo a RB	vi
ANEXO 3-B: Clasificación de datos recibidos en ensayo con Carga	vii
ANEXO 4: Cálculo del Circuito Eléctrico Equivalente	viii
ANEXO 5: Cálculo y muestra en pantalla de curvas características	ix
ANEXO 6: Cálculo y muestra en pantalla de curvas características de arranque	x
ANEXO 7-A: Etapa de sensado y acondicionamiento de señales	xi
ANEXO 7-B: Etapa de control del variac	xii
ANEXO 7-C: Etapa de digitalización (Tarjeta de adquisición de datos)	xiii
ANEXO 8: Instrumento Virtual Para el Envío de Valores Obtenidos en Ensayos Manuales	xiv

INTRODUCCION

Los instrumentos tradicionales, presentes en aplicaciones de ciencias e ingeniería son herramientas basadas en hardware con poca adaptabilidad a las cambiantes necesidades de quienes las usan, presentan poca capacidad de integración con otros sistemas para el procesamiento de datos y, en muchos casos, la portabilidad de estos instrumentos es nula.

Por las razones expuestas anteriormente, se presenta una herramienta alternativa con grandes ventajas con respecto a los instrumentos tradicionales: Los instrumentos virtuales. Estos, son una herramienta basada en software, los cuales pueden ser creados bajo un entorno de desarrollo amigable para el programador. Además, pueden integrarse con otros sistemas utilizando las herramientas de comunicación de las computadoras personales para la adquisición de datos. Presentan notables ventajas en cuanto la flexibilidad de funciones, portabilidad y demás factores que los hacen mejores que los instrumentos tradicionales en muchos aspectos.

Bajo este concepto, el objetivo del presente asunto de estudio es la implementación de un instrumento virtual para ser usado en la automatización de la realización de ensayos característicos a un motor asíncrono trifásico, para el posterior análisis del comportamiento y eficiencia de dicha máquina eléctrica. Dicho instrumento virtual, desarrollado en el entorno de programación LabVIEW, será capaz de controlar parámetros de ensayos, almacenar datos provenientes de una etapa de adquisición de datos, procesarlos y finalmente mostrar los resultados de los análisis en la pantalla del computador para la mejor y más rápida comprensión de las características del motor asíncrono trifásico a ser estudiado.

CAPÍTULO 1:

MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS

1.1 DEFINICIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

Una máquina eléctrica es aquel conjunto de mecanismos que transforman un tipo de energía en energía eléctrica o viceversa. Las máquinas eléctricas se clasifican en máquinas estáticas (reactores y transformadores, por ejemplo) y máquinas móviles o de movimiento mecánico lineal (electroimanes de armadura) y de movimiento rotativo (motores y generadores) [1].

Estas últimas se caracterizan por poseer ciertos elementos integrados en una composición constructiva, la cual hace que se tenga una forma particular de realizar la conversión de un tipo de energía a otra diferente a la de los demás tipos de máquinas eléctricas. En toda máquina eléctrica rotativa, se encuentran principalmente los siguientes elementos: En primer lugar, se encuentra el rotor, que es el componente giratorio conformado por un eje cilíndrico de núcleo magnético envuelto por un juego de bobinas. En segundo lugar, se encuentra al estator, la cual es la pieza cilíndrica hueca que envuelve al rotor y está encargada de crear el campo magnético sobre el cual gira el rotor. Por último, se tiene al entrehierro, que no es más que el espacio de aire que separa al rotor del estator y en el cual se encuentra el campo magnético creado por el estator [2]. Dependiendo de si la máquina eléctrica rotativa transforma energía mecánica en energía eléctrica o si transforma energía eléctrica en mecánica, se hablara de un generador o de un motor respectivamente [3].

1.2 EL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotativas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, siendo un motor asíncrono trifásico un tipo de motor cuyo principio de funcionamiento se basa en un campo magnético constante y giratorio producido en el estator al aplicársele tensión alterna trifásica a las tres fases del mismo. Dichas fases están separadas 120° eléctricamente [3] [4].

1.2.1 ANÁLISIS DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS

Existen hoy en día diversas formas establecidas para describir y analizar el comportamiento y la eficiencia de un motor asíncrono trifásico en particular. Dichas técnicas permiten, en primer lugar, modelar al motor asíncrono trifásico representándolo en un circuito eléctrico equivalente, el cual emula, de forma teórica, el comportamiento del motor estudiado ante diversas situaciones y es utilizado para obtener parámetros que permitan el análisis que describen sus características internas y su performance. Por ejemplo, se pueden obtener valores de eficiencia, factor de potencia, comportamiento ante diferentes niveles de cargas, etc.

1.2.1.1 ENSAYOS TÍPICOS Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

Para la obtención de los parámetros que describen el comportamiento del motor asíncrono trifásico y su eficiencia, se realizan tres ensayos característicos de acuerdo a la norma peruana NTP-IED 60034-2, la cual se adjunta en el Anexo1.

- Ensayo en vacío a tensión nominal:

En este ensayo, se alimenta al motor trifásico con tensión nominal. Además, no se conecta ninguna carga mecánica en el eje del rotor, lo que permite que el motor gire a una velocidad mayor que la nominal. Dicho ensayo permite conocer parámetros como la corriente del motor en vacío, las pérdidas en el hierro sumadas con las pérdidas mecánicas [4].

En la figura 1.1, se muestra la conexión requerida para calcular tres valores importantes en este ensayo: la corriente de línea, el voltaje de línea y la potencia activa, la cual es el producto de las dos primeras, multiplicado por el coseno del ángulo de desfase entre ellas.

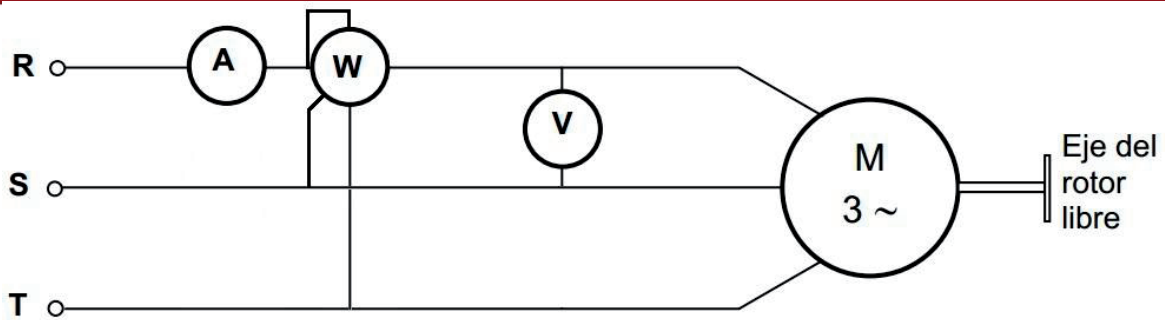


Figura 1.1: Esquema de instrumentos de medida instalados para la realización del ensayo en vacío a un motor asíncrono trifásico (Fuente [4])

Para obtener parámetros del circuito eléctrico equivalente luego de la realización de este ensayo, se deben tomar en cuenta los siguientes valores medidos por los instrumentos colocados en las líneas del motor: Voltaje Nominal de línea (V_N), Corriente de Vacío (I_0) de línea y la Potencia en Vacío trifásica ($P_{0-3\phi}$).

Ya que el circuito eléctrico equivalente es calculado para una sola fase del motor asíncrono, se debe realizar una transformación de valores de línea a valores de fase de los tres datos medidos en un primer momento del ensayo. Para realizar dicha conversión, se debe tener en cuenta el tipo de conexión de las bobinas estáticas en el que se realizó el ensayo.

En la figura 1.2, se muestran los dos tipos de conexiones comunes de un motor asíncrono trifásico. Tal y como se puede observar, en la conexión en estrella, los devanados del estator se posicionan de forma tal que existe un punto común a los tres. Dicho punto, es conocido como punto neutro, sobre el cual se establece la referencia para hallar los distintos valores por fase de dicho motor. En este tipo de conexión, la corriente de la línea, en donde se realizó la medición, es la misma a la que pasa a través del devanado del estator. Sin embargo, la tensión medida entre dos líneas del estator es de un valor raíz de tres veces más grande que la hallada en cada fase del mismo.

En el caso de la conexión delta, cada fase está representada por los extremos opuestos de cada devanado en el estator, motivo por el cual no se tiene acceso a la línea de neutro como en el caso de la conexión en estrella. En este tipo de conexión, a diferencia del anterior, el valor del voltaje medido entre dos líneas del motor es el mismo al voltaje en

cada fase del motor; por otro lado, la corriente medida en cada línea del motor es raíz de tres veces mayor que la hallada en cada fase del mismo. Es importante mencionar que, para ambos casos, la potencia medida entre líneas es igual a tres veces la potencia hallada en cada fase del motor asíncrono trifásico.

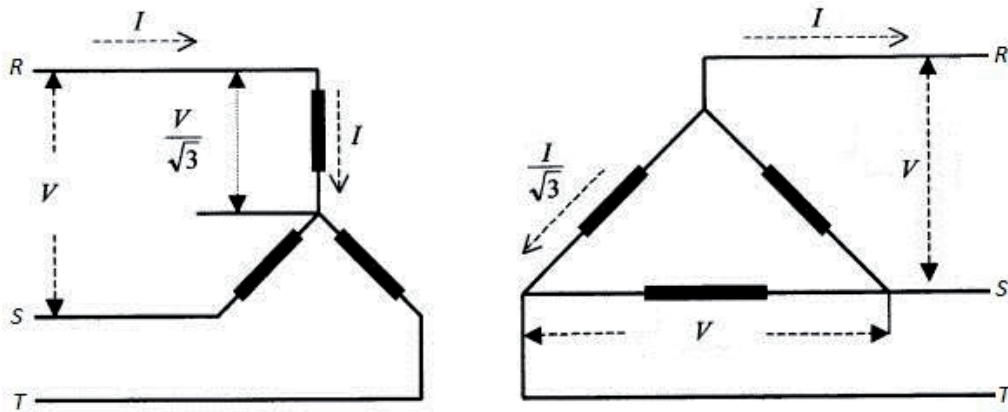


Figura 1.2: Conversiones de valores de línea a fase según el tipo de conexión (Fuente [5])

Teniendo en cuenta el tipo de conexión y habiendo obtenido los valores por fase de los correspondientes valores entre líneas medidos, se pueden obtener los parámetros del circuito eléctrico equivalente mostrados en la figura 1.3.

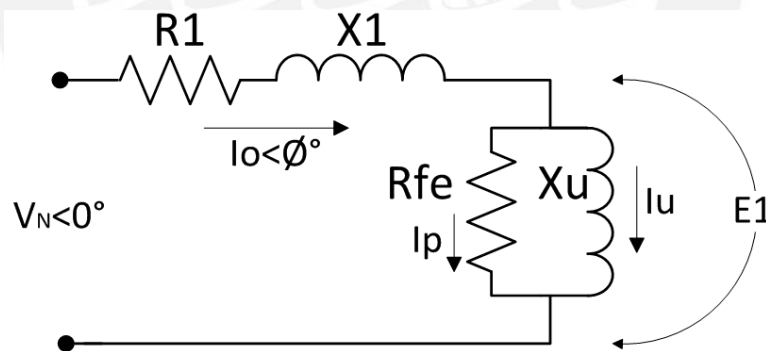


Figura 1.3: Circuito eléctrico equivalente por fase obtenido mediante el ensayo en vacío (Fuente: Elaboración propia)

Donde:

- R_1 es la resistencia del bobinado del estator
- X_1 es la reactancia que representa la dispersión de flujo en el bobinado del estator
- R_{fe} es la resistencia que representa las pérdidas en el hierro

- X_u es la reactancia de magnetización por fase
- $I_0 \propto \phi$ es la corriente en vacío por fase
- I_u es la corriente de magnetización
- I_p corriente de pérdidas en el hierro
- $V_N \propto \phi$ es la tensión nominal de alimentación del motor por fase
- E_1 es la Fuerza electromotriz inducida en el estator por fase

Es importante mencionar que el valor en ohmios de R_1 se obtiene mediante la medición directa de la resistencia óhmica de los bobinados estáticos por fase del motor asíncrono. En algunos casos, se puede tener acceso directo al punto de medición desde cada fase y, en otros casos, se deberá utilizar un voltímetro y un amperímetro para obtenerla mediante la aplicación de la ley de ohm en cada línea de la máquina eléctrica.

Los cálculos matemáticos que se realizan con este ensayo, utilizando los valores eficaces de corriente y voltaje por fase y potencia monofásica obtenidos a tensión nominal durante el ensayo son los siguientes:

$$\cos\phi_0 = \frac{P_o}{V_N * I_o}$$

$$I_p = I_o \cos\phi_0 \text{ A}$$

$$I_u = I_o \sin\phi_0 \text{ A}$$

Donde P_o es la potencia de vacío, la cual es la suma de la potencia de pérdidas en el hierro (P_{fe}) más la potencia de pérdidas en el cobre del estator (P_{cu-e}) más la potencia de pérdidas por fricción y ventilación (P_{f+v}).

- Ensayo a rotor bloqueado

El ensayo se realiza bloqueando o frenando el movimiento de giro en el eje del rotor, a la vez que se va aplicando una tensión de alimentación en el estator que va desde cero hasta el valor de voltaje que hace que se obtenga la corriente nominal del motor. Mediante este ensayo, se pueden hallar las pérdidas en el cobre.

En la figura 1.4, se muestra la conexión requerida para medir tres valores importantes en este ensayo. De modo similar al ensayo en vacío, en el ensayo a rotor bloqueado se mide la corriente de línea, el voltaje de línea y la potencia activa.

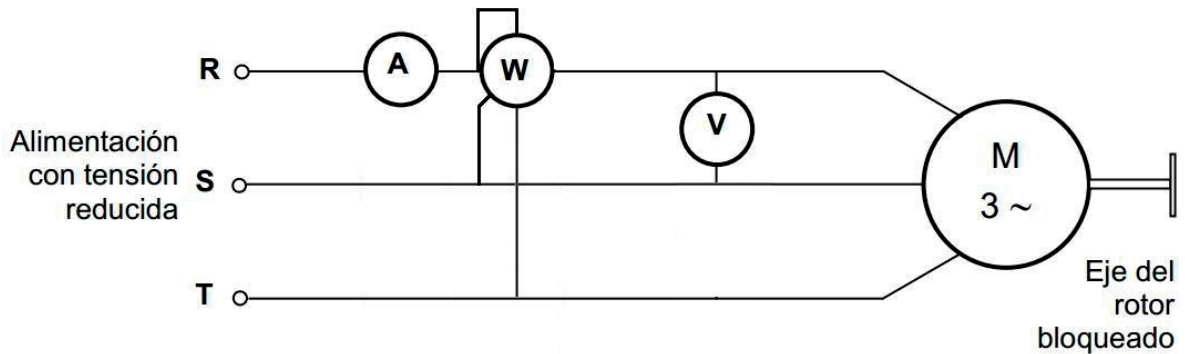


Figura 1.4: Esquema de instrumentos de medida colocados para la realización del ensayo a rotor bloqueado para motor asíncrono trifásico (Fuente [4])

Con la finalidad de obtener parámetros del circuito eléctrico equivalente luego de la realización de este ensayo, se deben tomar en cuenta los siguientes valores medidos por los instrumentos colocados en las líneas del motor: voltaje a rotor bloqueado de línea que hace que el valor de la corriente sea la nominal mientras se frena el eje del motor (V_{RBL}), corriente nominal de línea (I_N) y la potencia trifásica, la cual representa la potencia de pérdidas en el cobre ($P_{cu-3\phi}$).

Luego de obtener las mediciones de los instrumentos y hacer la respectiva conversión a valores por fase, el ensayo permite calcular los siguientes parámetros del circuito eléctrico equivalente:

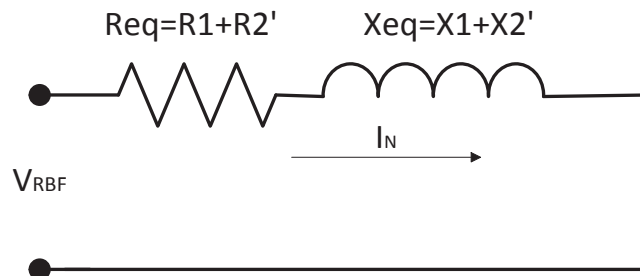


Figura 1.5: Circuito eléctrico equivalente por fase obtenido mediante el ensayo a rotor bloqueado (Fuente: Elaboración propia)

Donde:

- R_2' es la resistencia del rotor referida al estator
- X_2' es la reactancia de dispersión de flujo en el rotor, referida al estator
- I_N es la corriente nominal por fase del motor
- V_{RBF} es la tensión por fase, obtenida luego de transformar el correspondiente valor de línea (V_{RBL}) que hace que el valor de la corriente sea la nominal en el presente ensayo.

Los cálculos matemáticos que se realizan para la obtención de los parámetros antes mencionados con este ensayo son los siguientes:

$$R_{eq} = \frac{P_{cu}}{I_N^2} \Omega$$

$$R_2' = (R_{eq} - R_1) \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{V_F}{I_N} \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \Omega$$

Para poder obtener los valores de X_1 y X_2 es necesario conocer la relación entre dichas reactancias y la reactancia equivalente hallada según norma NEMA (National Electrical Manufacturers Association), la cual se ciñe la tabla 1.1:

Tabla 1.1: Relación de reactancias según la clasificación NEMA para los motores

Clase NEMA	X_1/X_{eq}	X_2'/X_{eq}
A	0.5	0.5
B	0.4	0.6
C	0.3	0.7
D	0.5	0.5
Rotor Boninado	0.5	0.5

(Fuente: Elaboración propia)

Con los datos hallados en este ensayo se reemplazan los valores del ensayo en vacío y se obtienen los siguientes parámetros:

$$E_1 = V \angle 0^\circ - I_0 \angle \phi_0 * (R_1 + jX_1)$$

$$R_{fe} = \frac{|E_1|}{I_p} \Omega$$

$$X_u = \frac{|E_1|}{I_u} \Omega$$

Finalmente, se llega al circuito eléctrico equivalente de la figura 1.6, el cual modela el comportamiento del motor ensayado.

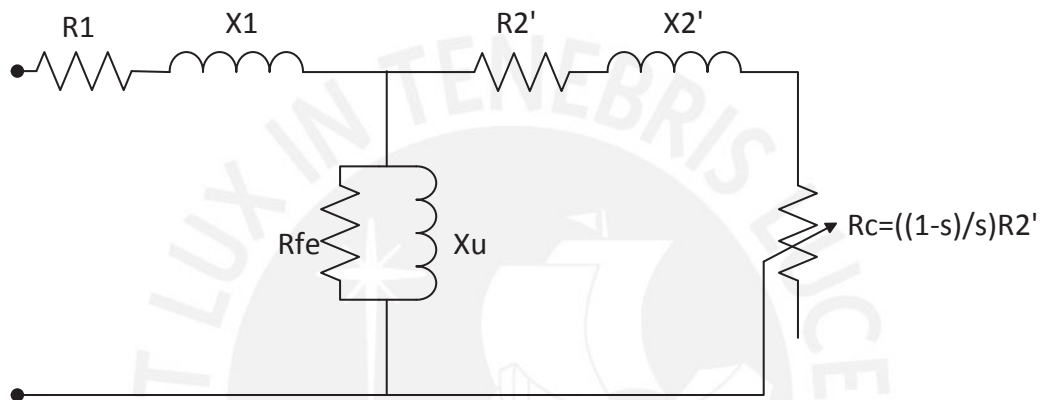


Figura 1.6: Circuito eléctrico equivalente total, hallado usando los parámetros obtenidos en los ensayos de vacío y a rotor bloqueado (Fuente: Elaboración propia)

Donde R_c representa la carga mecánica a la que está conectado el motor y “s” es el deslizamiento del motor hallado según

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s}$$

Donde:

- n es la velocidad mecánica del rotor dependiendo del porcentaje de carga
- n_s es la velocidad de sincronismo del motor (velocidad del campo magnético resultante en el estator) y se halla según:

$$n_s = \frac{120 * \text{frecuencia}}{\#Polos}$$

- Ensayo con carga

Luego de finalizados los ensayos en vacío y a rotor bloqueado, gracias a los cuales ha sido posible hallar el circuito eléctrico equivalente del motor asíncrono ensayado, se procede a realizar el tercer y último ensayo con el fin de poder describir el comportamiento de dicho motor cuando está trabajando con diferentes porcentajes de carga acoplada en su eje. En dicho ensayo, se obtendrán parámetros como la eficiencia, factor de potencia, torque y corriente del motor.

En este ensayo, se deberá registrar dos valores adicionales a los valores de tensión, intensidad de corriente y potencia activa: la velocidad de giro del motor y el torque de la carga que el motor deba mover durante la realización del ensayo.

En la figura 1.7 se muestra el esquema típico para la realización de un ensayo con carga de un motor asíncrono trifásico. El método de ejecución del ensayo correspondiente a dicha imagen se basa en la norma peruana NTP-IED 60034-2.

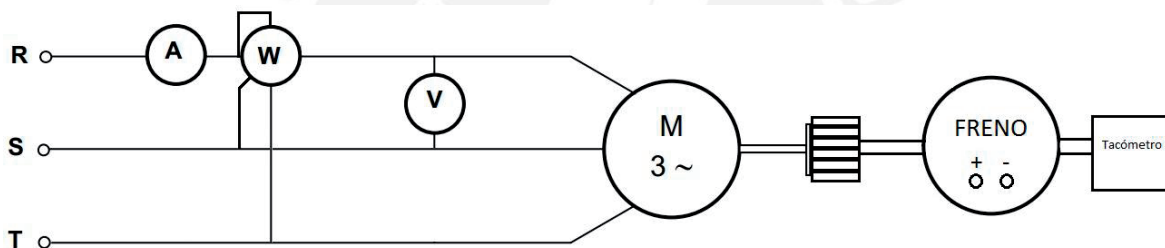


Figura 1.7: Ensayo con carga para motor asíncrono trifásico
(Fuente [4])

En primer lugar, el eje del motor es acoplado mecánicamente a un freno electromagnético controlado por tensión DC, el cual ejerce un torque proporcional a la señal de tensión DC. Este sistema permite simular una carga mecánica regulada según una tensión DC, la cual se varía durante el ensayo para así poder describir el comportamiento del motor a diferentes cargas.

Una vez realizado este acoplamiento mecánico al eje del motor, se procede a alimentarlo con tensión nominal y sin ninguna tensión a la entrada del freno al inicio, lo cual garantiza que el motor gire a velocidad de vacío. Luego, manteniendo constante la tensión de alimentación del motor, se incrementa la tensión DC en la entrada del freno de forma

gradual; esto origina que la velocidad de giro resultante en el eje del rotor del motor disminuya, mientras está siendo medida constantemente durante el ensayo. Del mismo modo, se tendrá un aumento en el valor de intensidad de corriente medida entre las líneas del motor conforme la carga simulada se eleve. El proceso de aumento de tensión en la entrada del freno electromagnético deberá continuar hasta que la corriente medida en las líneas del motor sea la nominal, momento en el cual se suprime la energía que alimenta de tensión al sistema de frenado, dando por terminado el ensayo.

Durante la realización de este ensayo se habrán medido los siguientes valores desde el inicio hasta el fin de este: tensión entre líneas, intensidad de corriente entre líneas, potencia trifásica y velocidad de giro del eje del motor. Así mismo, los valores de torque producidos por estos valores medidos durante el ensayo pueden ser calculados según la siguiente fórmula:

$$T = \frac{3 * P_{mec}}{N * \frac{\pi}{30}}$$

Donde P_{mec} es la potencia mecánica calculada en términos de la potencia eléctrica y la intensidad de corriente medida durante la realización de este último ensayo según la siguiente fórmula:

$$P_{mec} = P_e - (R_{eq} * I_e^2 + P_{e-vacío})$$

Donde:

- P_e es la potencia eléctrica por fase registrada en cada punto de medición del presente ensayo.
- R_{eq} es la suma de R_1 y R_2' halladas previamente en el circuito eléctrico equivalente en el ensayo a rotor bloqueado.
- I_e es la intensidad de corriente por fase registrada en cada punto de medición del presente ensayo.
- $P_{e-vacío}$ es el valor de la potencia eléctrica hallada durante el ensayo en vacío correspondiente al valor de tensión nominal registrada en ese mismo punto de medición.

La obtención de estos parámetros se usa para poder graficar las curvas características que ayudarán a describir el comportamiento del motor eléctrico ensayado para diferentes valores de carga mecánica a los que muy probablemente será sometido.

1.2.1.2 OBTENCIÓN DE GRÁFICAS

El circuito eléctrico equivalente es una forma muy útil para el análisis de una máquina eléctrica, ya que ayuda a estimar su comportamiento en condiciones donde efectuar una medición es complicado, como por ejemplo, en el momento del arranque o cuando se desea estimar el comportamiento del motor para diferentes valores de voltajes y frecuencias de la tensión de alimentación. No obstante, si se deseara conocer características como la calidad del núcleo magnético con el que el motor fue construido o si se requiriese conocer las pérdidas para cargas variables, se emplean curvas características obtenidas mediante la realización de los ensayos típicos descritos anteriormente.

En la presente tesis, se determinarán las curvas características del motor mediante dos formas. La primera es almacenando los valores obtenidos de las lecturas de los instrumentos o sensores de voltaje y corriente empleados en el ensayo. La segunda forma se aplica para obtener curvas que sirven para conocer el comportamiento del torque y de la corriente del motor en condiciones de arranque mediante el uso de los parámetros hallados en el circuito eléctrico equivalente y el uso de fórmulas; de modo tal que las curvas obtenidas son una estimación de las curvas reales, ya que el periodo de duración del arranque de un motor es demasiado corto para anotar los valores que aparecerían en cada instrumento.

Dichas curvas características son:

- Curva de pérdidas en vacío en función de la tensión aplicada:

Esta curva característica se obtiene del ensayo en vacío. Para ello, durante dicho ensayo, se anotan varios valores medidos de tensión, corriente y potencia en vacío, la primera se hace variar desde el valor nominal hasta un valor de tensión cercano a cero, de modo tal que el rotor del motor se detenga. Dichos valores de tensión se tabulan junto con la respectiva potencia monofásica en vacío medida en los mismos puntos en donde se midió la tensión. De este modo y ya que en este ensayo no se conecta ninguna carga mecánica a la salida del motor, la potencia disipada que se observa en esta curva pertenece a la potencia de pérdidas en el fierro del motor ensayado en función de la tensión.

- Curva de pérdidas en el cobre

Esta curva característica se obtiene del ensayo a rotor bloqueado, en donde el motor no produce potencia mecánica debido a que el eje del rotor se encuentra bloqueado. Sin embargo, existe un consumo de potencia eléctrica.

Durante la realización de este ensayo, se puede observar la potencia disipada en el cobre del motor (estator y rotor).

- Curva de torque vs. velocidad

Su gráfica se obtiene a partir de los datos hallados en el ensayo con carga, descrito en la sección 1.2.1.1. Mediante esta esta curva, se puede observar la variación del torque del motor en función de la velocidad de giro del mismo. Para lo cual se deben anotar varios valores medidos de velocidad medida y torque calculado.

- Curva de corriente vs. velocidad

Del mismo modo que en el caso anterior, esta curva es obtenida a partir del ensayo con carga y permite visualizar la variación de la corriente por fase del motor según su velocidad de giro.

- Curva de eficiencia

Esta curva es una de las más importantes en el análisis del comportamiento del motor, pues permite determinar la variación de su eficiencia en función de la potencia mecánica acoplada al eje del rotor.

- Curva de factor de potencia

Esta curva permite al usuario visualizar qué porcentaje de potencia aparente se convierte en potencia activa según la potencia de la carga mecánica que se desea acoplar al eje del rotor.

- Curva de torque vs. velocidad en condiciones de arranque

Esta curva, a diferencia de las anteriores, se halla a partir de los valores hallados en el circuito eléctrico equivalente y se aplica el segundo método para la obtención de curvas de forma estimada.

Para esta curva, se desea conocer la variación del torque en función de la velocidad en condiciones de arranque; para lo cual, el torque puede ser determinado mediante:

$$T = \frac{3 * \left(\frac{V_{nominal}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \right)^2 * \frac{R'_2}{s}}{n_s * \frac{\pi}{30}}$$

Donde el dato de la velocidad requerida para realizar la gráfica es estimada a partir de adjudicarle diferentes valores a la variable deslizamiento. Por ejemplo, se hace variar al deslizamiento desde 0.0001 (lo que se considera como aproximadamente cero o a rotor bloqueado) hasta 1 (lo que se considera como giro libre de carga) con aumentos de 0.0001 en 0.0001.

Al graficar los valores de torque en función de la velocidad calculados a partir de la fórmula anterior, se puede observar una aproximación del comportamiento del torque en el arranque, cuando la variable de deslizamiento es 1 hasta que el motor gira a la velocidad de sincronismo, en donde el deslizamiento es 0.

- Curva de corriente vs. velocidad en condiciones de arranque

Al igual que en el caso anterior, en esta curva se grafica el valor de la corriente calculada en función del deslizamiento a partir de los valores obtenidos del circuito eléctrico equivalente. Dicha corriente se hace variar continuamente y se contrasta con los valores de velocidad hallados en función de dicho deslizamiento.

La fórmula mediante la cual se calculan las corrientes en función del deslizamiento es la siguiente:

$$I'_2 = \frac{V_{nominal}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

Donde:

- I'_2 es la corriente en el rotor referida al estator

Con la obtención de esta curva, se puede visualizar la variación de corriente en función a la velocidad de giro del mismo en condiciones de arranque.

1.3 DECLARACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Este proceso de análisis, basado en el uso de instrumentos tradicionales, es un proceso tedioso para el operario al momento de ensayar un motor asíncrono trifásico, puesto que debe ser muy cuidadoso al anotar las lecturas de todos los instrumentos y sus respectivos valores de incertidumbre afines a todo equipo de medición, lo cual hace que el resultado de los ensayos tengan errores de lectura y pierdan precisión.

Debido a ello, se pretende solucionar estos problemas mediante el diseño e implementación de un sistema de automatización de ensayos característicos y obtención de parámetros utilizando un instrumento virtual ejecutado en una computadora personal o estación de trabajo que forme parte de un sistema completo, en el cual se cuente además con una etapa de sensado y acondicionamiento de señales, una etapa de adquisición y digitalización de datos y una etapa de control de alimentación del motor asíncrono a ser ensayado.

CAPITULO 2:

INSTRUMENTOS VIRTUALES

2.1 ESTADO DEL ARTE

En el ámbito de la ciencia y la ingeniería, así como en el área de la enseñanza de estas materias, se cuenta con herramientas que ayudan a los ingenieros y científicos a simular y/o controlar sistemas, realizar mediciones, procesar señales, entre otras labores. Del mismo modo, sirven como herramientas para que los docentes de materias de ingeniería puedan sustentar de forma práctica y tangible los postulados teóricos de los principios físicos que estos exponen a sus alumnos en clase.

En la presente tesis, se desarrollará un equipo de laboratorio que analice, controle y muestre al usuario los parámetros de un motor asíncrono trifásico en base a sus tres ensayos característicos, los cuales han sido descritos en el capítulo anterior, siendo el objetivo la obtención de los datos que permitan determinar el comportamiento y la eficiencia del motor asíncrono a ensayar.

Previo al desarrollo de lo descrito anteriormente, serán mostradas y documentadas, de forma comparativa, dos tipos de instrumentos, los cuales podrían servir para el desarrollo del sistema en cuestión: Los instrumentos tradicionales, los cuales están basados en hardware y los instrumentos virtuales, cuya fortaleza radica en el software. A continuación, serán expuestas las ventajas que uno tiene sobre el otro. Finalmente, se dará cuenta de una lista en la que se describirán algunos de los más importantes entornos de desarrollo de instrumentos virtuales de la industria.

2.2 INSTRUMENTOS TRADICIONALES E INSTRUMENTOS VIRTUALES

Los instrumentos tradicionales de laboratorio son equipos pensados, diseñados y fabricados por empresas desarrolladoras de tecnología enfocadas tanto a la industria como a la enseñanza, y que, si bien cumplen de forma satisfactoria las tareas para los cuales fueron concebidos, poseen ciertas limitaciones por la misma naturaleza del enfoque sobre la cual se desarrollan.

En primer lugar, los instrumentos tradicionalmente desarrollados presentan un gran problema en la flexibilidad de sus funciones. Esta afirmación no es difícil de asimilar, puesto que es bien sabido que dichos instrumentos son concebidos para cumplir a cabalidad algunas necesidades específicas. Sin embargo y debido a que las necesidades y requerimientos de los científicos e ingenieros varían rápidamente según las diferentes problemáticas a las que se enfrentan, necesitan flexibilidad en sus herramientas para crear sus propias soluciones; en este sentido, un instrumento tradicional se vuelve poco práctico cuando se desea que este sea adaptado para realizar otras funciones y tareas, debido a que el usuario no puede extender o personalizar dichas funciones en el instrumento. Las perillas y botones del instrumento, sus circuitos electrónicos y las funciones disponibles para el usuario son todas específicas a la naturaleza del mismo [6] y están enfocados a realizar tareas que han sido definidas por el fabricante, mas no por el usuario [6].

Otro gran inconveniente de los instrumentos tradicionales es su naturaleza estática. El mundo de la ciencia y la ingeniería se caracteriza por una gran rapidez en el desarrollo en términos de nuevos descubrimientos y creación de nuevas tecnologías. Consecuentemente, las herramientas utilizadas para la creación de soluciones prácticas, así como las usadas para la enseñanza deberían ser concebidas para ser herramientas dinámicas por naturaleza. Esta inconsistencia entre la naturaleza del desarrollo de la tecnología y de los instrumentos tradicionales se convierte en un gran inconveniente en la medida en que el coste económico para adaptar los instrumentos a las nuevas tecnologías, a la rapidez que estas se vienen desarrollando, es demasiado alto a tal punto de hacerse irrealizable. Esto obliga a los ingenieros y científicos a invertir nuevamente en un instrumento, por lo general bastante costoso, que posea funcionalidades que estén acordes con la vanguardia tecnológica. En países subdesarrollados, este inconveniente puede obligar a los científicos e ingenieros a mantenerse “retrasados” tecnológicamente al no adquirir nuevos instrumentos acordes con las nuevas necesidades debido a temas netamente económicos.

Por último y no por eso menos importante, los instrumentos tradicionales presentan otros inconvenientes como la poca portabilidad: estos, por lo general, poseen un hardware pesado, así como instrumentos de medida, control y cableado, los cuales hacen que sean difíciles de transportar de un sitio a otro. Esto obliga a que la aplicación o tarea que el instrumento tradicional realice, en muchos casos, se mantenga permanentemente en el

lugar de trabajo en donde fue instalado. Del mismo modo, otro inconveniente es la falta de interoperabilidad que la mayoría de estos instrumentos presentan. Esto quiere decir que los instrumentos tradicionales, en la mayoría de las ocasiones, no han sido diseñados para integrarse con otros sistemas para procesar la información o realizar alguna tarea adicional que el instrumento, por sí solo, no podría realizar. Por ejemplo, muy pocos instrumentos tradicionales tienen la capacidad de conectarse con una computadora e importar los datos obtenidos en una prueba determinada hacia una hoja de cálculo, para que dichos datos sean procesados. En otras palabras, estos instrumentos son poco prácticos en la medida en que un ingeniero o científico requiera integrar diferentes sistemas, lo cuales realizan diferentes tareas y que, al ser integrados podrían realizar una función mayor en cuanto a complejidad y sobre todo en cuanto a utilidad.

Por lo mencionado en párrafos anteriores, en la presente tesis se presentará una alternativa de solución frente a los inconvenientes que presenta la instrumentación clásica: El uso de los instrumentos virtuales o VI's por sus siglas en inglés (Virtual Instruments).

Los instrumentos virtuales son herramientas que, en esencia, han sido concebidas para realizar las mismas funciones que los instrumentos tradicionales. La diferencia radica principalmente en que los instrumentos virtuales son sistemas centrados en el software y no en el hardware. Esta diferencia es de vital importancia y le da un giro dramático a la aplicación de los instrumentos y herramientas para soluciones en el ámbito de la ciencia y la tecnología.

Al ser un sistema centrado en el software, los instrumentos virtuales son creados bajo las plataformas de una computadora del tipo industrial, o una estación de trabajo equipadas con poderosos programas (software) y hardware muy comercial, los cuales, en conjunto, cumplen las funciones y tareas de los instrumentos tradicionales. Es así que los instrumentos virtuales aprovechan la potencia de cálculo, productividad, exhibición y capacidad de conexión de las computadoras de escritorio, siendo precisamente el software el que realmente provee las herramientas de diseño y concepción del instrumento virtual [6].

Bajo este concepto, la definición que se tenía de un instrumento como herramienta para la búsqueda de soluciones en el ámbito de la ciencia y de la ingeniería cambia de forma radical, ya que, siendo el software el protagonista en el diseño de los instrumentos

virtuales, el usuario puede crear y diseñar uno para una determinada tarea y ajustarla a sus necesidades. Además, luego de concebido el VI, este puede ser modificado por el mismo usuario en pro de cumplir nuevos requerimientos que este defina.

Es así como los instrumentos virtuales vienen revolucionando el ámbito de las herramientas para la solución de problemas de ciencia e ingeniería y también en el ámbito de la enseñanza de estas materias. A continuación, se presentará un listado de las características más importantes que poseen los instrumentos virtuales y las ventajas de estas con respecto a las de los instrumentos tradicionales:

- El parámetro más importante es la flexibilidad, precisamente de la que carecen los instrumentos tradicionales. Al ser un sistema creado mediante software, un instrumento virtual puede ser concebido para cumplir ciertos requerimientos de solución de un problema y puede ser fácilmente modificado para cumplir nuevas funciones según sean requeridas por el usuario sin tener la necesidad de cambiar toda la máquina. Esta naturaleza dinámica implica también que un VI pueda ser modificado para estar a la par con el desarrollo de las técnicas de solución de un problema de ingeniería; y esto es gracias a que los desarrolladores de entornos de diseño de instrumentos virtuales pueden proveer fácilmente de nuevas herramientas de diseño a sus usuarios a través de actualizaciones de software vía internet, como nuevos tipos de librerías de funciones, nuevos comandos para manejo de nuevos protocolos de comunicación, etc.
- Otra ventaja es la interoperabilidad de los instrumentos virtuales con otros sistemas, ya sean otros VI's o elementos físicos del exterior por medio de tarjetas de adquisición de datos, PLC's, entre otros. Esto es posible debido a que un instrumento virtual se desarrolla en la plataforma de una computadora personal, cuyas posibilidades de enlace con otros sistemas son bastante amplios, conocidos y sobre todo comerciales, por lo que hay una gran variedad de información acerca de temas de interconexión entre varios sistemas basados en instrumentos virtuales.
- Para finalizar, otra ventaja que se presentan en los instrumentos virtuales frente a los instrumentos tradicionales es su naturaleza portátil. Al ser, en esencia, un programa que se ejecuta en una computadora personal o estación de trabajo, un instrumento virtual se puede transportar de un lugar a otro por medio de las diversas formas de transferir información que las computadoras personales ofrecen.

2.3 ENTORNOS DE DESARROLLO

De lo expuesto, se puede concluir que hoy en día las herramientas de ingeniería basadas en instrumentos virtuales poseen una gran ventaja con respecto a los instrumentos tradicionales debido a su portabilidad, flexibilidad en interconexión, etc. Sin embargo, es importante analizar los diferentes entornos de desarrollo de instrumentos virtuales que el mercado científico y tecnológico ofrece, ya que la performance de un VI depende en gran medida del entorno en el que se desarrolla y este a su vez está ligado directamente con el propósito para el cual un científico, ingeniero o docente de ingeniería desarrolla un instrumento virtual. Por ello, y con el fin de seleccionar el que posea mejores características para la aplicación a desarrollar en la presente tesis, se mostrarán algunos de los entornos de desarrollo más importantes, los cuales permiten, en todos los casos, diseñar un instrumento virtual de acuerdo a las necesidades de cada usuario:

2.3.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C/C++

El lenguaje C es un lenguaje de programación estructurado basado en texto creado en 1972 por Dennis M. Ritchie en los Laboratorios Bell. Dicho lenguaje está orientado al desarrollo de aplicaciones de propósito general y cuya principal característica es que es uno de los lenguajes más rápidos y potentes que existe hoy en día, con una sintaxis sumamente compacta y de alta portabilidad, lo cual ha permitido que dicho lenguaje sea considerado por muchos ingenieros y científicos como el estándar para la programación de muchas de sus aplicaciones, ya que, conceptualmente, bajo el entorno del lenguaje C se puede desarrollar cualquier programa para cualquier propósito, esto incluye, evidentemente, el desarrollo de instrumentos virtuales [7].

2.3.2 MATLAB

Matlab, a diferencia del lenguaje C, conceptualmente, no es un lenguaje de programación, sino más bien es un sistema de trabajo interactivo cuyo elemento básico son las matrices. Aunque su entorno de desarrollo también está basado en texto muy similar al C, sus instrucciones están orientadas a la computación numérica, lo que permite resolver rápidamente complicados problemas numéricos sin la necesidad de escribir los algoritmos lógicos para su resolución. Esta característica, permite que Matlab se haya convertido en uno de los entornos de desarrollo más importantes para aplicaciones de ingeniería y

ciencias puras, debido a su gran flexibilidad y practicidad al momento de procesar datos numéricos y resolver complicados sistemas de ecuaciones [8].

2.3.3 LABVIEW

LabVIEW es una herramienta de software desarrollada por la empresa National Instruments, que, a diferencia del lenguaje C y Matlab, posee un entorno de programación gráfico y está orientado específicamente al desarrollo de aplicaciones que sirvan como herramientas para facilitar procesos de medición, control y automatización en el ámbito de las ciencias y de la ingeniería. El entorno de programación del LabVIEW es el lenguaje gráfico, también conocido como lenguaje G, el cual consiste en una programación basada en la interconexión de bloques que representan, cada uno, una función específica diferentes. Dichos bloques, al ser conectados de forma correcta según la aplicación que se desee crear, ejecutan sus tareas específicas del mismo modo que lo haría un programa escrito en cualquier otro lenguaje de programación basado en texto; sin embargo, la ventaja de este lenguaje de programación es que permite la creación de todo tipo de aplicaciones reduciendo de forma dramática el tiempo de desarrollo, a su vez, permite que científicos e ingenieros con poco conocimiento de lenguajes de programación estándar puedan desarrollar complejas aplicaciones de ingeniería como instrumentos virtuales enfocados a la medición y automatización. Por último, y no por eso menos importante, con un lenguaje de programación gráfico se acorta la curva de aprendizaje, facilitando la tarea de los docentes y permitiendo que cada vez más alumnos se interesen en el ámbito del desarrollo de aplicaciones virtuales enfocadas a la ciencia y la ingeniería.

CAPITULO 3:

PLANTEAMIENTO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS DE MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS EN BASE A SUS ENSAYOS CARACTERÍSTICOS UTILIZANDO EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN GRÁFICO LABVIEW

3.1 CONSIDERACIONES IMPORTANTES

La presente tesis plantea diseñar e implementar un instrumento virtual para la automatización del proceso de toma de datos del funcionamiento de un motor asíncrono trifásico mediante la realización automática de sus ensayos característicos. Los datos de placa del motor a ensayar se encuentran detallados en la imagen 4.1 del capítulo 4.

Dicho instrumento virtual es un sub sistema, el cual forma parte de un sistema mayor que consta de cuatro partes diferentes, las cuales no han sido desarrolladas en la presente tesis. Sin embargo, ya que se requiere de la integración de todas estas para demostrar y analizar el funcionamiento de todo el sistema en conjunto, se hará mención de ellas para una mejor descripción, comprensión y análisis de la presente tesis.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS CARACTERÍSTICOS DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

Las cuatro etapas del sistema completo se describen a continuación.

3.2.1 ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES PROVENIENTES DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA ENSAYADA

Esta etapa del sistema está encargada de los siguientes procesos: Primero, sensa las señales de voltaje y corriente de las líneas de alimentación del motor asíncrono trifásico ensayado. Luego, acondiciona estas señales con la finalidad de obtener señales proporcionales de amplitudes comúnmente usadas para la posterior digitalización en

micro controladores comerciales. Luego, transfiere las señales acondicionadas a la segunda etapa que será descrita en el siguiente párrafo: la de digitalización.

3.2.2 ETAPA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES PROVENIENTES DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES SENSADAS

Esta segunda etapa se encarga de los siguientes procesos: Primero, recibe los datos de placa del motor asíncrono a ensayar para la correcta ejecución de los ensayos, utilizando un protocolo de comunicación establecido. Dichos datos son enviados desde un instrumento virtual, el cual será descrito en la cuarta etapa del sistema. Posteriormente, y una vez recibidos estos parámetros, esta etapa captura las señales de tensión e intensidad de corriente sensadas y acondicionadas en la etapa previa durante la realización de los ensayos, para lo cual utiliza los canales de conversión analógico- digital (ADC) de un micro controlador para luego digitalizar dichas señales utilizando un algoritmo descrito en lenguaje de programación C. Luego, convierte estos datos capturados a valores numéricos en un formato reconocible por las etapas a las que posteriormente se enviarán dichos datos: la etapa de control de alimentación del motor asíncrono trifásico y al instrumento virtual en LabVIEW.

3.2.3 ETAPA DE CONTROL DE ALIMENTACIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

Esta etapa se encarga de realizar los siguientes procesos: Primero, recibe los valores de los datos enviados por la etapa de digitalización. Segundo, y con la ayuda de los datos recibidos, establece un control de lazo cerrado para alimentar con tensión al motor DC encargado de mover automáticamente un transformador variable (variac). Finalmente, hacer que el motor DC del variac aumente o disminuya la tensión de entrada del motor asíncrono trifásico, estableciendo así, el lazo cerrado de control mencionado. Todas las instrucciones del proceso, descritas en lenguaje de programación C, se ejecutan en un micro controlador PIC 16F877.

3.2.4 ETAPA DEL INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y MUESTRA EN PANTALLA DE RESULTADOS OBTENIDOS

Esta etapa, la cual se desarrolla en el entorno de programación gráfica LabVIEW, es la encargada de realizar los siguientes procesos:

Envía los datos de placa del motor asíncrono trifásico a la etapa de adquisición y digitalización de datos descrita líneas arriba, así como los parámetros pertinentes para la ejecución de los ensayos del mismo. Posteriormente, y una vez iniciado el proceso de realización de ensayos en las etapas externas a esta, se procede a recibir los datos de voltaje, corriente, desfase entre estas y velocidad de giro del motor, enviados por la etapa de digitalización, la cual sensa y digitaliza dichos valores en cada ensayo. Luego, estos datos recibidos se almacenan y ordenen en tablas para que el usuario visualice lo recibido. Una vez terminada la recepción de los datos correspondientes a los tres ensayos del motor asíncrono trifásico, el instrumento virtual calcula el circuito eléctrico equivalente de este, así como las gráficas características que ayudan a describir el comportamiento y la eficiencia específica de dicho motor. Finalmente muestra en pantalla los resultados obtenidos productos de los cálculos realizados.

En la presente tesis se describirá y justificará el proceso de diseño e implementación de la cuarta y última etapa descrita, correspondiente a la elaboración del instrumento virtual encargado de la interfaz hombre- máquina, del procesamiento de datos obtenidos en los ensayos y de la muestra en pantalla de los resultados.

3.2.5 DIAGRAMA DE BLOQUES

A continuación se presenta el diagrama de bloques del sistema desarrollado, cuyas cuatro partes han sido descritas en la sección anterior. En la figura 3.1, se busca destacar la etapa correspondiente al instrumento virtual desarrollado en la presente tesis.

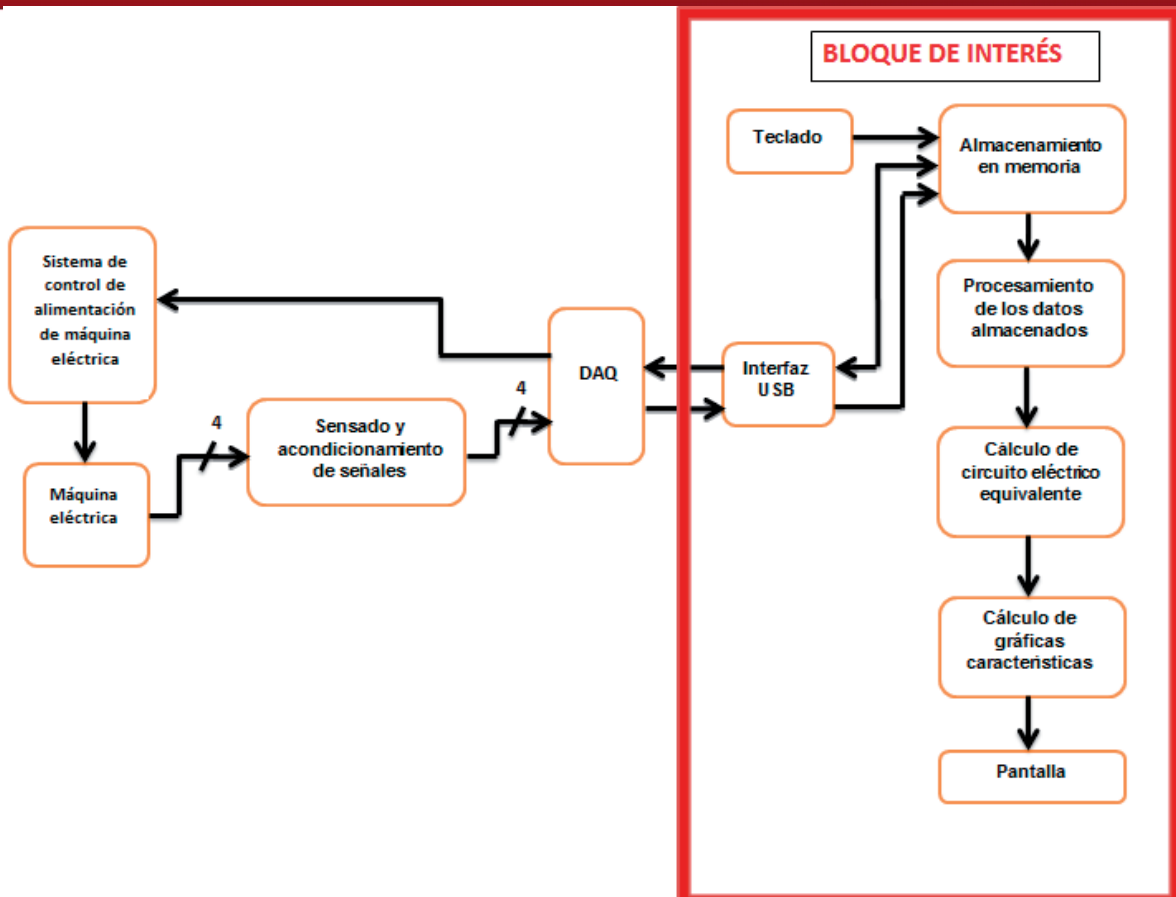


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema completo con énfasis en el asunto de estudio de la presente tesis (Fuente: Elaboración propia)

3.3 OBJETIVOS

La presente tesis plantea los siguientes objetivos de diseño e implementación

3.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Desarrollar un instrumento virtual en entorno LabVIEW que se integre a un sistema de estudio del comportamiento de un motor asíncrono trifásico. Este instrumento virtual tiene la finalidad de capturar y mostrar datos provenientes de una tarjeta de adquisición de datos, correspondiente a la tercera etapa del sistema descrito en la sección 3.2, para luego obtener el circuito eléctrico equivalente de dicho motor, así como las gráficas características.

3.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar e implementar, en lenguaje de programación gráfica usando el entorno LabVIEW, la interfaz de usuario del instrumento virtual para la realización automática de los tres ensayos característicos de un motor asíncrono trifásico: Ensayo en vacío, ensayo a rotor bloqueado y ensayo con carga.

Diseñar e implementar, en lenguaje de programación gráfica usando el entorno LabVIEW, el algoritmo del instrumento virtual que permita el envío y recepción de datos durante cada uno de los tres ensayos realizados al motor asíncrono trifásico a ensayar

Diseñar e implementar, en lenguaje de programación gráfica usando el entorno LabVIEW, el algoritmo del instrumento virtual que permita el cálculo del circuito eléctrico equivalente y la elaboración de gráficas características resultantes de los tres ensayos efectuados al el motor asíncrono trifásico.

3.4 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Establecer un protocolo de comunicación para el envío y recepción de datos durante la ejecución del sistema. Dicho protocolo debe ser de fácil configuración y programación en las etapas involucradas y debe poder transmitir datos a una velocidad lo suficientemente alta como para sensor y transmitir un gran número de datos a medida que se van realizando los ensayos. Además, dicho protocolo debe ser ampliamente utilizado en el mercado, de modo tal que el soporte técnico en su utilización esté garantizado.

Establecer un protocolo de envío y recepción de datos entre las etapas a comunicarse, de modo tal, que los datos enviados posean una misma longitud de bytes lo suficientemente larga para tener un número de cifras significativas adecuado para el tipo de análisis que se llevará a cabo. Del mismo modo, dicho protocolo debe establecer una secuencia de envío y recepción, con la finalidad de poder determinar si el dato recibido corresponde a un dato de voltaje, corriente, desfase o velocidad de giro del motor.

Determinar el circuito eléctrico equivalente y las curvas características de forma automática con la ayuda de un software descrito en un lenguaje de programación que facilite la utilización de diferentes herramientas, no solo de cálculo, sino también de visualización de resultados y control del proceso por el usuario de dicho software.

3.5 DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL DISEÑO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL

En la presente sección se procederá a describir el diseño del instrumento virtual a implementar en la presente tesis, para luego justificar los requerimientos del mismo.

3.5.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

El diseño del instrumento virtual para el análisis de un motor asíncrono trifásico consta de varias etapas, las cuales se deben realizar en forma secuencial y la ejecución de cada una de ellas debe estar sincronizada con la ejecución de los procesos realizados por el resto de las etapas del sistema. En primer lugar, se requiere que el usuario ingrese los datos de placa del motor pertinentes para la realización de los ensayos característicos estándares según la norma peruana NTP-IED 60034-2 (Anexo 1) a través de la interfaz de usuario, algunos de estos datos de placa se envían a la tarjeta de adquisición de datos y otros permanecerán almacenados en la memoria del sistema para su posterior utilización. Finalizada esta etapa, se le solicitará al usuario que dé inicio a la realización del ensayo en vacío para luego comenzar a recibir y almacenar los datos obtenidos a medida que se va realizando el proceso de ejecución de este ensayo en las otras etapas del sistema. Una vez finalizado este primer ensayo, se le muestra al usuario un mensaje en pantalla de finalización del proceso y posteriormente se le solicita que dé inicio al siguiente ensayo: ensayo a rotor bloqueado, y así repetir el proceso. Se procede de la misma manera con el ensayo en carga, el cual es el último ensayo característico. A continuación, el instrumento virtual le comunica al usuario que los ensayos han sido realizados con éxito y le solicita al mismo que dé la orden de inicio de cálculos para la obtención de los resultados de interés. Finalmente y una vez ejecutado el comando de inicio de cálculos, el instrumento virtual procesa los datos obtenidos en los tres ensayos mediante algoritmos matemáticos programados, de los cuales se obtienen, como resultados finales, los parámetros característicos del motor, con los cuales se muestra la figura de su correspondiente circuito eléctrico equivalente. Del mismo modo, se muestran en pantalla las gráficas características que describen a dicho motor y que, a diferencia del circuito eléctrico equivalente, son una herramienta con la que el usuario puede observar y comprender de manera más directa el comportamiento de la eficiencia del motor asíncrono trifásico ensayado.

3.5.2 SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Dentro del universo de alternativas de protocolos de comunicación y conectores, se debe seleccionar uno que cumpla con los requerimientos de velocidad, soporte técnico y practicidad en la programación dentro de las diferentes etapas del sistema establecerán una comunicación. En los siguientes párrafos se indicarán algunas de las posibles alternativas indicando las cualidades que justifican su elección o no a ser el utilizado en el sistema.

- Comunicación por USB: Pueden alcanzarse velocidades de transferencias muy altas, lo cual lo convierte en el sistema más utilizado en aplicaciones en donde la velocidad de transferencia de datos es crítica. Además, en las computadoras comerciales modernas cuentan con las ranuras adecuadas para conectar diversos dispositivos con los cuales se desee establecer comunicación. El inconveniente es que, para ser utilizado, el sistema operativo necesita que se instale el controlador del periférico externo a comunicar, para lo cual, el desarrollador de este debe implementarlo e instalar dicho software antes de establecer una comunicación.
- Comunicación industrial con PROFIBUS: Es un estándar de comunicaciones para aplicaciones industriales. Presenta amplias ventajas en aplicaciones que requieran de conectar un dispositivo “maestro” que transmita datos a dispositivos “esclavos” diversos. Puede alcanzar velocidades de transferencia de hasta 12000 Kbps y distancias de hasta 1200 metros entre un dispositivo y otro. Sin embargo, la ranura para el conector requerido para la utilización de este protocolo no está disponible en las computadoras personales portátiles, ya que, al ser un protocolo concebido para la industria, normalmente dicho conector es compatible con dispositivos concebidos para propósitos afines como los controladores lógicos programables modernos de marcas como SIEMENS, Schneider, etc.
- Comunicación serial: La velocidad de transferencia alcanzada puede llegar a ser hasta de 19200 baudios según el estándar de la norma RS 232C. Dicha velocidad, a pesar de ser menor a la de las alternativas mostradas anteriormente, es suficiente para satisfacer los requerimientos, puesto que el sistema no requiere de una velocidad de transferencia alta. Además, a diferencia de la comunicación en paralelo, los conectores necesarios como el DB9 ocupan menos espacio. El inconveniente es que, al igual que en la comunicación en paralelo, las computadoras modernas no cuentan con las ranuras para los puertos de comunicación serial [9].

3.5.2.1 ELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El protocolo de comunicación serial elegido para las comunicaciones entre las diversas etapas es el de comunicación serial configurado a 9600 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de parada y sin paridad, debido a las siguientes razones:

La velocidad de transferencia no es un parámetro crítico para garantizar el envío y recepción de los datos necesarios durante el proceso de ejecución de ensayos ya que solo se enviarán valores en formato ASCII en ciertos puntos de sensado a medida que se varía el voltaje de alimentación del motor asíncrono trifásico conforme se van realizando los ensayos.

Se requiere de un protocolo cuya configuración en las diferentes etapas del sistema facilite la labor del desarrollador en cuestiones de lógica en la programación. El entorno de desarrollo en LabVIEW posee una paleta de bloques (equivalente a una librería de funciones en lenguaje de programación C), en la cual se encuentran bloques que permiten la configuración del puerto serial y permiten manipular los momentos de escritura, lectura y demás instrucciones de forma rápida y sencilla.

Para solucionar el problema de la falta de ranuras para los conectores de comunicación serial en la computadora en donde se ejecutará el instrumento virtual, se utilizará un conversor comercial de USB a serial, el cual permitirá enviar y recibir datos por medio de un conector de USB comercial, pero utilizando comandos de configuración del protocolo serial.

3.5.3 ELECCIÓN DEL PROTOCOLO INTERNO DE ENVÍO Y RECEPCIÓN DE DATOS

Para el envío y recepción de datos entre las diferentes etapas del sistema, se requiere, además de elegir un protocolo de comunicación, establecer un protocolo interno de envío y recepción de datos que describa qué datos se van a enviar, qué longitud tendrán los datos enviados y el orden en el que estos se enviarán y recibirán. A continuación, se describirá el protocolo interno de envío y recepción de datos utilizado, así como una justificación de su utilización.

Durante la ejecución de los ensayos en vacío y rotor bloqueado, la etapa de sensado y acondicionamiento de señal sensa el valor del voltaje de línea y corriente de línea a la salida del motor asíncrono en todo momento. Posteriormente, en la etapa de digitalización llevada a cabo en la tarjeta de adquisición de datos, primero se captura dichas señales por medio de los canales ADC, luego se calcula la diferencia de los tiempos en los que estas señales toman el valor de cero voltios y cero amperios respectivamente y finalmente se obtienen los valores RMS de las dos ondas sensadas. El conjunto de estos tres datos, puestos en el orden descrito, conforman un “punto de sensado” del sistema.

Conforme se realizan los ensayos, el voltaje de alimentación del motor asíncrono va variando, haciendo que las etapas de sensado y acondicionamiento señal y de adquisición de datos capturen información correspondiente a muchos “puntos de sensado”, los cuales deben ser enviados al instrumento virtual para que este los almacene y procese.

Con la finalidad de que la tarjeta de adquisición de datos y el instrumento virtual “se entiendan”, se estableció que la información en cada punto de sensado será enviada en formato ASCII, en donde cada punto de sensado, con la información de los tres valores que lo conforman, debe tener una longitud de 18 bytes, en los cuales los 6 primeros corresponden al valor del voltaje de fase, los 6 siguientes al valor de la corriente nominal y los 6 últimos al valor del tiempo de desfase entre las dos señales. De este modo se induce que cada punto de sensado contenga 3 datos de 6 bytes cada uno los cuales serán enviados de forma continua.

Para entender de mejor forma el proceso de empaquetar la información de un punto de sensado, antes de que este sea enviado al instrumento virtual, se puede observar la siguiente secuencia:

- Valores de tensión de línea RMS, intensidad de corriente de línea RMS y desfase entre las dos señales obtenidas en la tarjeta de adquisición de datos y que conforman un punto de sensado:

375.3 V	1.65 A	2.65ms
<i>Voltaje</i>	<i>Corriente</i>	<i>Tiempo de desfase</i>

- Construcción, en formato ASCII, de los tres valores de 6 bytes cada uno que conforman un punto de sensado a enviar:

“375.30”	“1.6500”	“2.6500”
<i>Voltaje</i>	<i>Corriente</i>	<i>Tiempo de desfase</i>

- Punto de sensado de 18 bytes empaquetado y listo para ser enviado por comunicación serial al instrumento virtual:

“375.301.65002.6500”
Paquete de datos de 16 bytes

Durante la ejecución del ensayo con carga, la etapa de sensado y acondicionamiento de datos sensa un dato más, el cual es interpretado por la tarjeta de adquisición de datos como la velocidad de giro del motor. Este dato se adiciona al conjunto de tres datos que conforman un punto de sensado, obteniendo así un punto de sensado de cuatro datos de seis bytes cada uno; esta vez, los datos que lo conforman son: el voltaje de línea, la corriente de línea, velocidad de giro del motor y tiempo de desfase. Naturalmente, ya que se tienen cuatro y no tres datos de 6 bytes cada uno, cada punto de sensado a ser enviado está conformado por una cadena de caracteres de 24 bytes y ya no de 18 como en los ensayos previos.

3.5.3.1 JUSTIFICACIÓN

La elección de establecer que cada dato que conforma un punto de sensado sea de seis bytes está directamente relacionada con el número de cifras significativas que tendrá cada valor recibido. A continuación, se expondrán las razones de dicha elección, tomando en cuenta que se procesarán datos con valores de voltaje, corriente, tiempo y velocidad durante la ejecución de los ensayos:

Como se observó en la sección anterior, las variaciones de los valores obtenidos en cada punto de sensado deben ser las suficientes como para poder visualizarlas en los resultados obtenidos. Por ende y dado que el valor con mayor número de cifras enteras es el dato de la velocidad de giro, el cual se espera que sea de un máximo de cuatro

dígitos, se necesita de al menos una cifra significativa asociada a dicho valor para que las variaciones sean apreciables. De este modo, si se tienen cuatro dígitos y se requiere de una cifra decimal, habrá que aumentar un byte más para poder colocar la coma y a ello agregarle un byte más para visualizar la cifra significativa que se desea.

3.5.4 ELECCIÓN DEL ENTORNO DE DESARROLLO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL

En los siguientes párrafos se indicarán las alternativas para la elección del entorno de desarrollo del instrumento virtual. Además también se detallan las cualidades que los hacen indicados o no para el desarrollo del instrumento virtual.

- Programación basada en texto en lenguaje C: Como se mencionó en la sección 2.3.1 el lenguaje C es un lenguaje basado en texto que, al ser creado para desarrollar aplicaciones de propósito general, no está especializado en la creación de instrumentos virtuales. Además, al ser un lenguaje basado en texto, el tiempo de desarrollo es mucho mayor, puesto que es muy propenso a errores de sintaxis por parte del programador.
- Programación en Matlab: El uso de esta herramienta es una opción tentadora en el sentido que ha sido diseñada para la creación y ejecución de complejos algoritmos de cálculo en base a matemática matricial, tal y como se mencionó en la sección 2.3.2; sin embargo, esta herramienta no está especializada en la muestra de versátiles interfaces de usuario, las cuales son requeridas para controlar el inicio y fin de los procesos, así como para visualizar los resultados del mismo.
- Programación en lenguaje gráfico en LabVIEW: Al ser un entorno de programación concebido para la elaboración de instrumentos virtuales y además que facilite la programación, por medio de la descripción de algoritmos en lenguaje gráfico, lo hace la mejor elección frente a las otras alternativas expuestas.

3.5.4.1 JUSTIFICACIÓN

Debido a las características del entorno de desarrollo de instrumentos virtuales que ofrece LabVIEW, en el cual, no solo se tiene la posibilidad de programar en lenguaje gráfico, sino que también se permite el control de los procesos a realizar por medio de las interfaces de

usuario que se desarrollan de forma sencilla en dicho entorno, se estableció que el instrumento virtual descrito en la presente tesis, sea programado utilizando el entorno LabVIEW.

3.6 DISEÑO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL

A continuación se describirán y detallarán las diferentes etapas del instrumento virtual a desarrollar, para lo cual se hará mención breve de los momentos y formas de obtención de los datos requeridos de las partes externas a este instrumento con el fin de lograr una mejor comprensión del funcionamiento del instrumento diseñado e implementado.

Para efectos de descripción del diseño, se llamará programa principal del instrumento virtual al conjunto de instrucciones descritas en lenguaje de programación gráfica del software LabVIEW, las cuales ejecutan diversos procesos de forma secuencial describiendo así el funcionamiento del programa. Dentro de este, se hará mención de las diferentes etapas utilizadas en la secuencia de funcionamiento de forma general, las cuales serán detalladas a partir de la sección 3.6.2.

3.6.1 PROGRAMA PRINCIPAL

Como se mencionó en la sección anterior, en el programa principal estarán establecidas las sentencias que describen la secuencia del funcionamiento del programa para la realización del análisis del motor asíncrono trifásico. Para ello, se contará con una interfaz gráfica en donde el usuario deberá configurar los parámetros del protocolo de comunicación serial a establecer, así como los parámetros de ensayo que serán enviados al resto del sistema; luego de ello, el usuario tendrá el control del inicio y fin de cada uno de los tres ensayos característicos conforme el programa se esté ejecutando.

3.6.1.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En la figura 3.2, se muestra el diagrama de flujo de la secuencia de funcionamiento que se llevará a cabo en el programa principal.

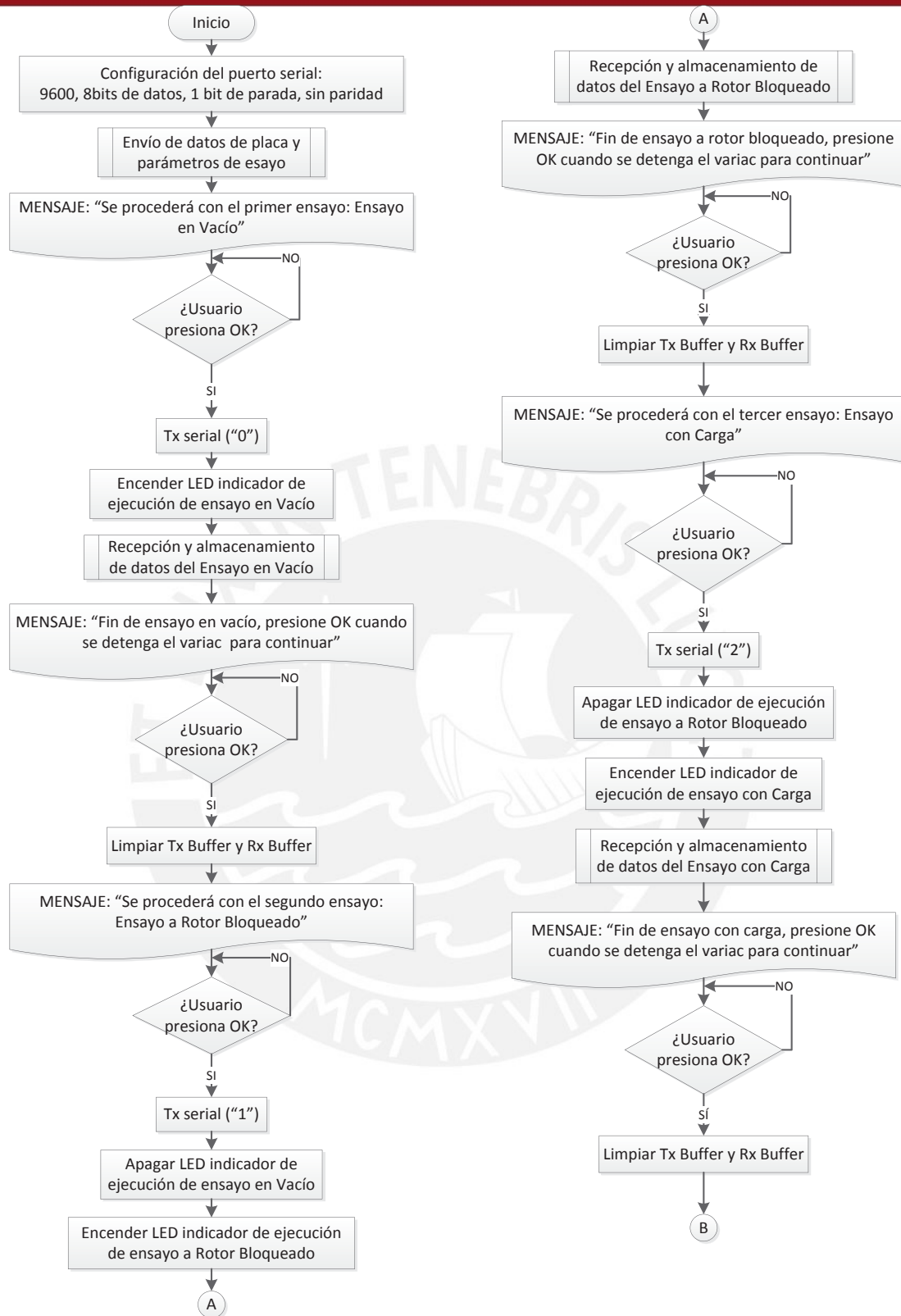


Figura 3.2: Primera parte del diagrama de flujo del programa principal (Fuente: Elaboración propia)

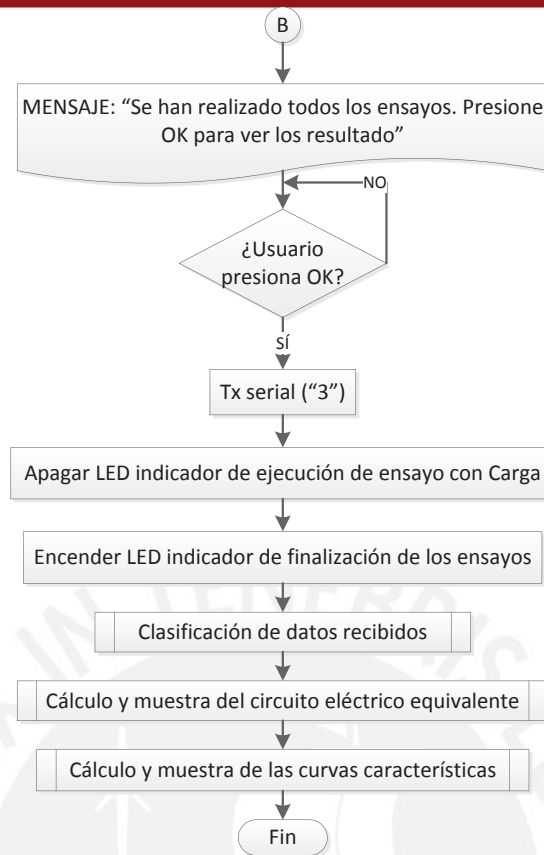


Figura 3.3: Segunda parte del diagrama de flujo del programa principal
 (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar en el diagrama de flujo, el programa establece una interacción continua con el usuario a través de mensajes y de botones que sirven para controlar el inicio y el final de cada uno de los ensayos y demás procesos que se realizan a lo largo de su ejecución. Del mismo modo, a la interfaz se le han agregado luces (leds) virtuales indicadoras con la finalidad de que el usuario pueda visualizar fácilmente en qué etapa de la ejecución de los ensayos se encuentra el programa.

3.6.1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

El entorno de programación gráfica del software LabVIEW permite que el proceso de desarrollo de un instrumento virtual se efectúe en dos partes principales. La primera es el Diagrama de Bloques del instrumento virtual, en donde se describe el funcionamiento del sistema en base a la unión de diversos íconos, los cuales representan, cada uno, una función específica a ser ejecutada. La segunda parte es el Panel Frontal del instrumento

virtual; es en esta parte en donde las entradas y salidas de las diferentes funciones en cada sentencia del código gráfico son visualizadas y manipuladas por el usuario para obtener los resultados según el programa descrito en el Diagrama de Bloques.

En la figura 3.4 se muestra la sección de código gráfico en el Diagrama de Bloques de una parte del programa principal, en donde se puede observar la lógica usada para la configuración del protocolo de comunicación serial, así como la del envío de datos de placa pertinentes para la realización de los ensayos. La presenta figura (la cual será detallada en la sección 3.6.2) no corresponde al programa completo detallado en el diagrama de flujo de la figura 3.2 y 3.3, ya que solo muestra una pequeña porción del mismo. Sin embargo, lo que se busca con la presenta figura es mostrar el modo en el que realiza la programación gráfica en el entorno LabVIEW.

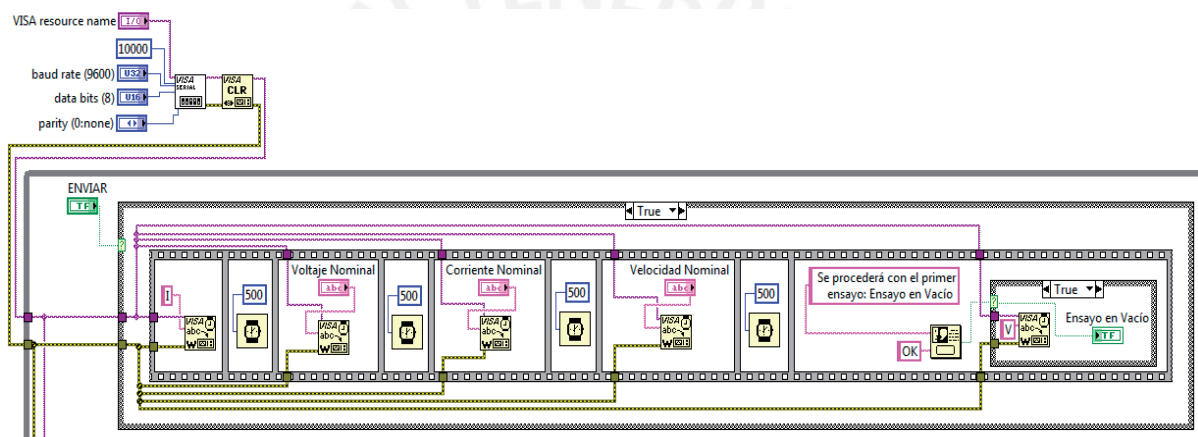


Figura 3.4: Diagrama de bloques de configuración y envío de datos de placa por serial (Fuente: Elaboración propia)

La ventaja de ser un entorno de programación gráfica es que el diagrama de flujo mostrado en la sección anterior se asemeja, en gran medida, a las sentencias descritas en el Diagrama de Bloques presentado en la imagen anterior.

3.6.2 ETAPA DE REGISTRO Y ENVÍO DE DATOS DE PLACA Y PARÁMETROS DE ENSAYO

En esta etapa, el usuario procede a registrar los datos de placa y los parámetros pertinentes para la realización de los ensayos. Cabe resaltar que, en esta sección, solo se muestran los parámetros enviados a la tarjeta de adquisición de datos externa a través del

puerto serial, ya que no todos los parámetros que el usuario ingresará serán enviados. Esto se debe a que el algoritmo descrito en la tarjeta de adquisición de datos necesita solo de los valores de voltaje, corriente y velocidad nominales para hacer un escalamiento propio de esa etapa, la cual no se detalla en la presente tesis. No obstante, los otros datos ingresados por el usuario son variables internas del programa, las cuales serán utilizadas en etapas posteriores aunque no formen parte de la lógica de envío de datos por el puerto serial descrito en el Diagrama de Bloques de la presente etapa.

3.6.2.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En la figura 3.5, se muestra el diagrama de flujo de la etapa de registro y envío de datos de placa y parámetros de ensayo.

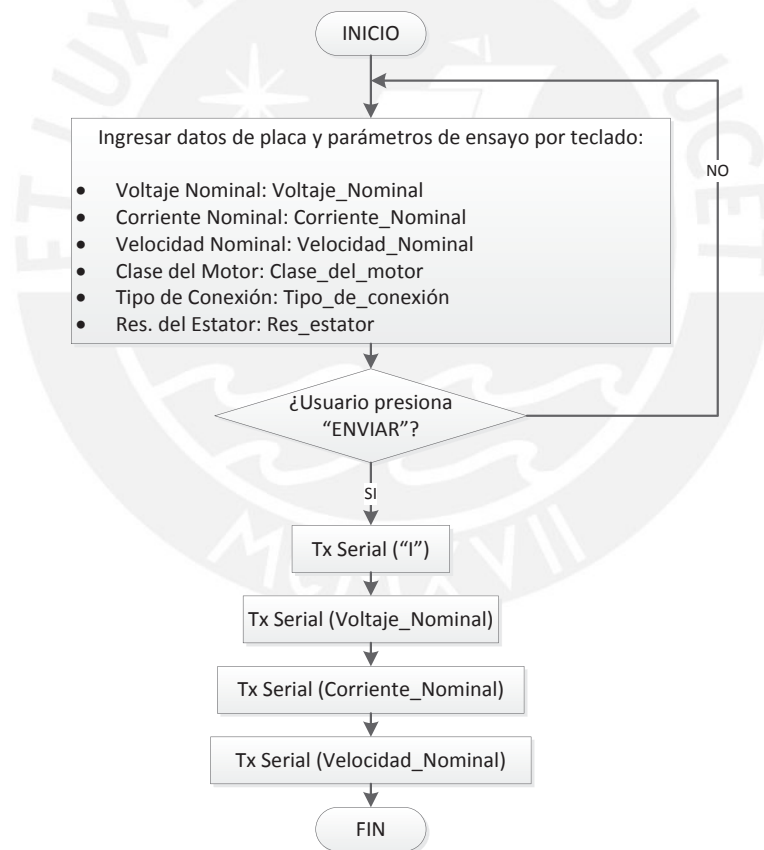


Figura 3.5: Diagrama de flujo de registro y envío de parámetros de ensayo y datos de placa (Fuente: Elaboración propia)

3.6.2.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

En la figura 3.6, se muestra el Diagrama de Bloques correspondiente a la etapa de registro y envío de los datos de placa y parámetros de ensayo que son enviados a través del puerto serial.

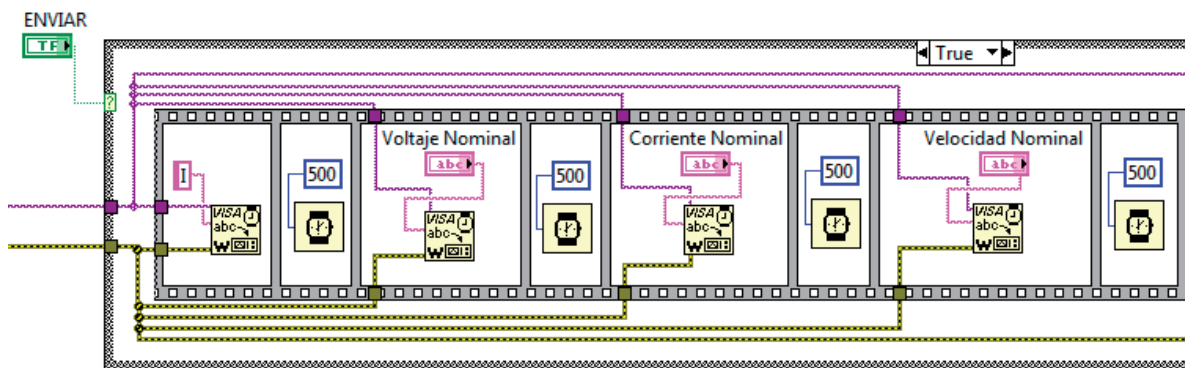


Figura 3.6: Diagrama de bloques de registro y envío de parámetros de ensayo y datos de placa (Fuente: Elaboración propia)

3.6.3 ETAPA DE RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS

Posteriormente a la etapa descrita en la sección anterior, el sistema procede a recibir los datos correspondientes a cada uno de los ensayos para luego procesarlos y mostrar los resultados en las etapas siguientes. Los diagramas de flujo y de bloques que se mostrarán a continuación, solos pertenece a la etapa de recepción y almacenamiento de datos correspondientes al ensayo en vacío. Los diagramas correspondientes a las etapas de recepción y almacenamiento de datos de los ensayos a rotor bloqueado y con carga no serán mostrados en la presente sección, ya que el procedimiento es similar. Para visualizar el diagrama de flujo y el diagrama de bloques de las etapas de recepción y almacenamiento correspondientes a los ensayos a rotor bloqueado y con carga no mostrados en la presente sección, revisar el Anexo 2.

3.6.3.1 DIAGRAMA DE FLUJO

Para la elaboración del código gráfico que describe la etapa de recepción de datos del ensayo en vacío, se estableció un protocolo de recepción en el cual se espera recibir un

número fijo de bytes en total, provenientes de la tarjeta de adquisición de datos a medida que se realiza el presente ensayo; dicha cadena del tamaño ya establecido será dividida luego en datos de 6 bytes cada uno para su posterior clasificación, tal y como se estableció en la sección 3.5.6. De este modo, se llena una tabla con un número de datos conocido, de 6 bytes cada uno, correspondientes a lo obtenido del ensayo en vacío para una posterior clasificación de estos datos. En la figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo descrito en la presente sección.

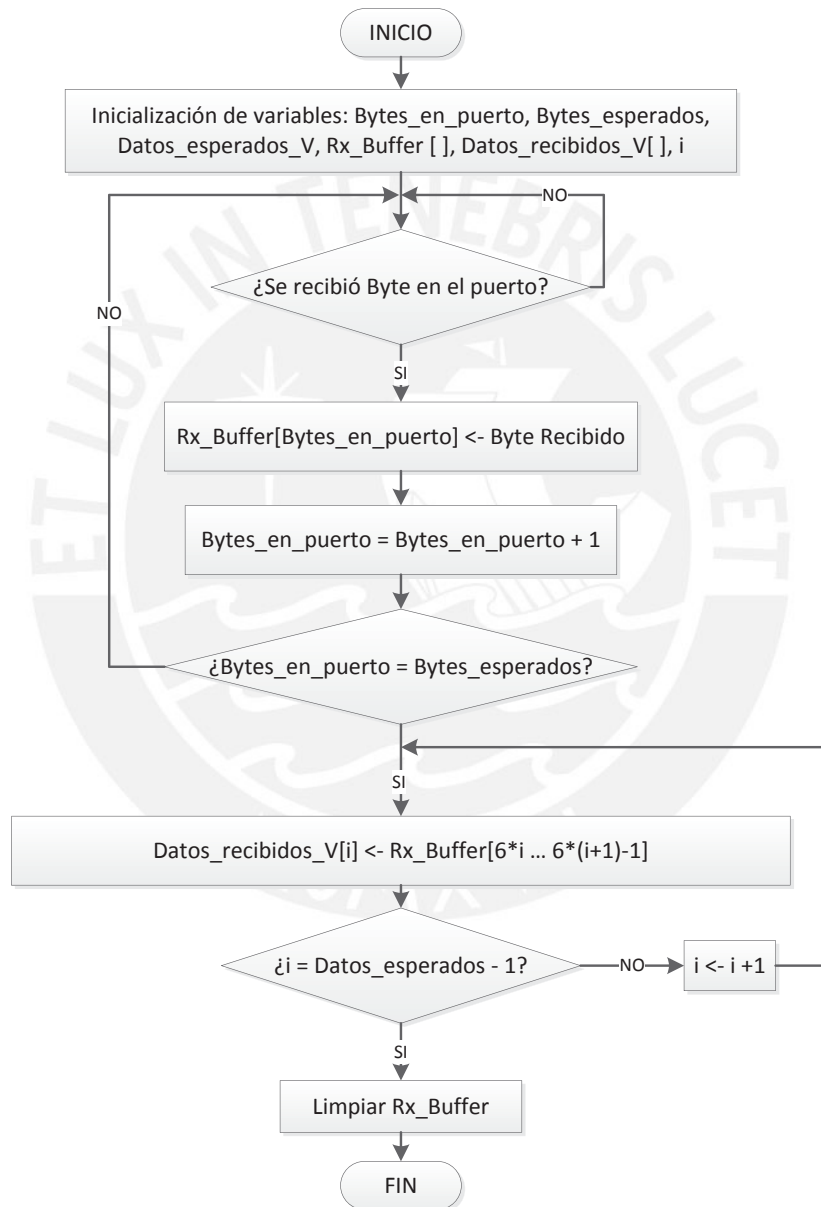


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la etapa de recepción y almacenamiento de datos
Fuente (Elaboración propia)

3.6.3.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

El programa descrito en el Diagrama de Bloques que permite la recepción de los datos correspondientes al ensayo en vacío y el posterior llenado de la tabla de datos recibidos en dicho ensayo se muestra en la figura 3.8.

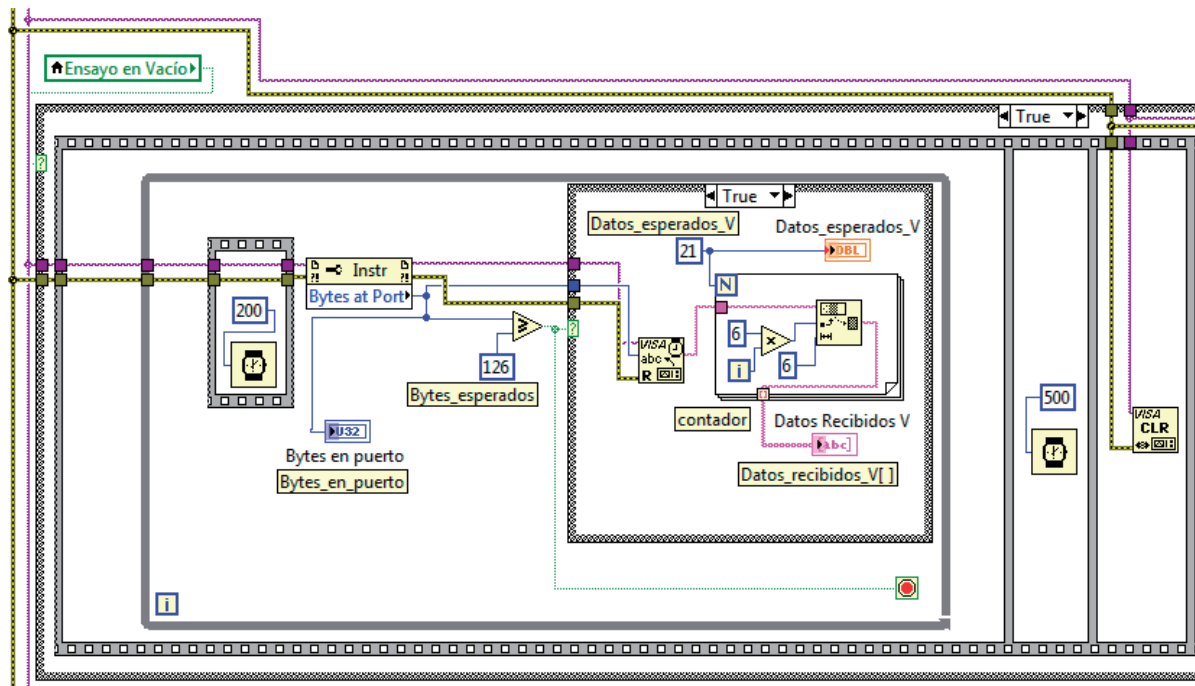


Figura 3.8: Diagrama de bloques de la etapa de recepción y almacenamiento de datos Fuente (Elaboración propia)

En la figura anterior, se observa que el instrumento virtual espera recibir un total de 21 datos, los cuales conformarán un total de 7 puntos de sensado, ya que cada punto deberá contener 3 datos (voltaje, corriente y tiempo de desfase) de 6 bytes cada uno, haciendo un total de bytes esperados de 126 (7 puntos de sensado x 3 datos en cada punto x 6 bytes en cada dato), tal y como se estableció en el protocolo interno de envío y recepción de datos detallado en la sección 3.5.3. De este modo, cuando el buffer de recepción del puerto se llena con 126 bytes, el programa detiene la recepción. Posteriormente, se procede a leer el contenido del buffer mencionado; en dicho proceso, el programa empaqueta los 126 bytes recibidos en paquetes de 6 bytes cada uno en un proceso iterativo que se repetirá 21 veces y envía dichos paquetes de datos a la matriz llamada “Datos Recibidos V” para su calificación en la siguiente etapa según si se trata de un dato de voltaje, corriente o desfase.

3.6.4 ETAPA DE CLASIFICACIÓN DE DATOS RECIBIDOS

En la sección 3.5.3 se estableció y justificó que el protocolo de envío recepción de datos debe tener, no solo una longitud de seis bytes, sino que también una secuencia de envío y recepción entre las etapas involucradas en este proceso, de modo tal que, durante los ensayos en vacío y rotor bloqueado se reciben los datos de voltaje de línea, corriente de línea y desfase correspondientes a un punto de sensado en primer, segundo y tercer orden respectivamente. Además, se estableció que, para el ensayo con carga, aparte de los tres datos antes mencionados, se envíe un cuarto dato: el del valor de la velocidad de giro de motor.

En esta etapa, se detallará el proceso de clasificación de los datos recibidos, según el protocolo de envío y recepción establecido y según el algoritmo que se describirá a continuación.

3.6.4.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En la figura 3.9 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo establecido para la clasificación de los datos recibidos del ensayo en vacío, en el cual, no solo se clasificarán los datos en tablas según si se trata de un dato de voltaje de línea, corriente de línea o desfase, sino que también se obtendrán sus correspondientes equivalentes por fase, gracias a los cuales se calcularán y mostrarán los datos del Factor de Potencia y Potencia Eléctrica correspondientes a cada punto de sensado obtenido en la tarjeta de adquisición de datos externa. Para lograr este cálculo, es en esta etapa donde se utiliza el dato de Tipo de Conexión, ingresada por el usuario en la etapa descrita en la sección 3.6.2. Revisar el Anexo 3 para observar el diagrama de flujo correspondiente a la clasificación de los datos de los ensayos a rotor bloqueado y con carga.

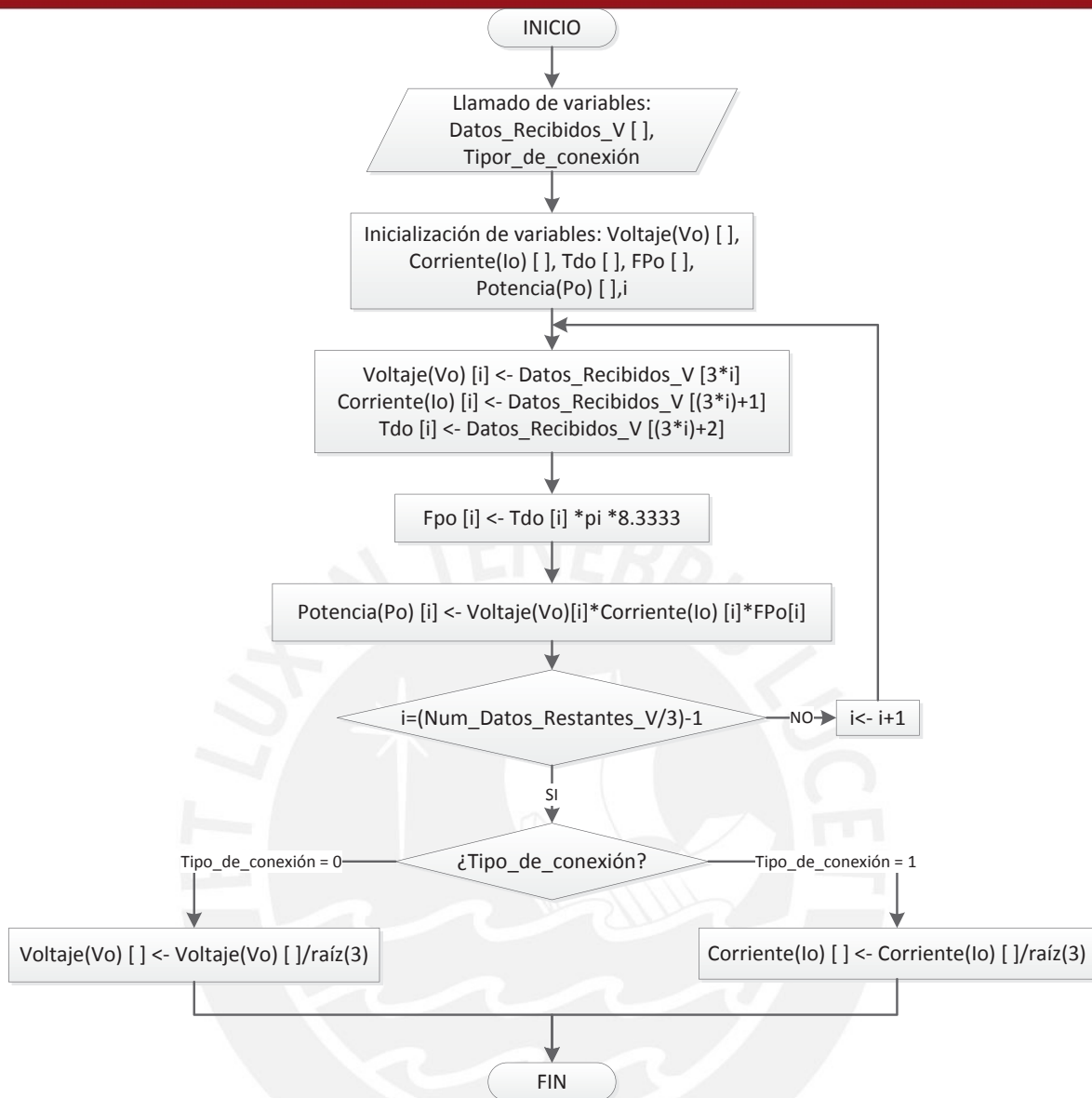


Figura 3.9: Diagrama de flujo de la etapa de clasificación de datos recibidos (Fuente: Elaboración propia)

3.6.4.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

En la figura 3.10 se muestra el Diagrama de Bloques correspondiente a la clasificación y obtención de los datos correspondientes a los tres ensayos realizados. Se observa que, para los datos obtenidos en el ensayo en vacío y a rotor bloqueado, el algoritmo es bastante similar. No obstante, la clasificación de los datos del ensayo con carga requiere

de la clasificación adicional del dato de la velocidad de giro del motor, el cual solo se envía en este último ensayo con el fin de obtener, además de la potencia y del factor de potencia, el dato del torque correspondiente a cada punto sensado.

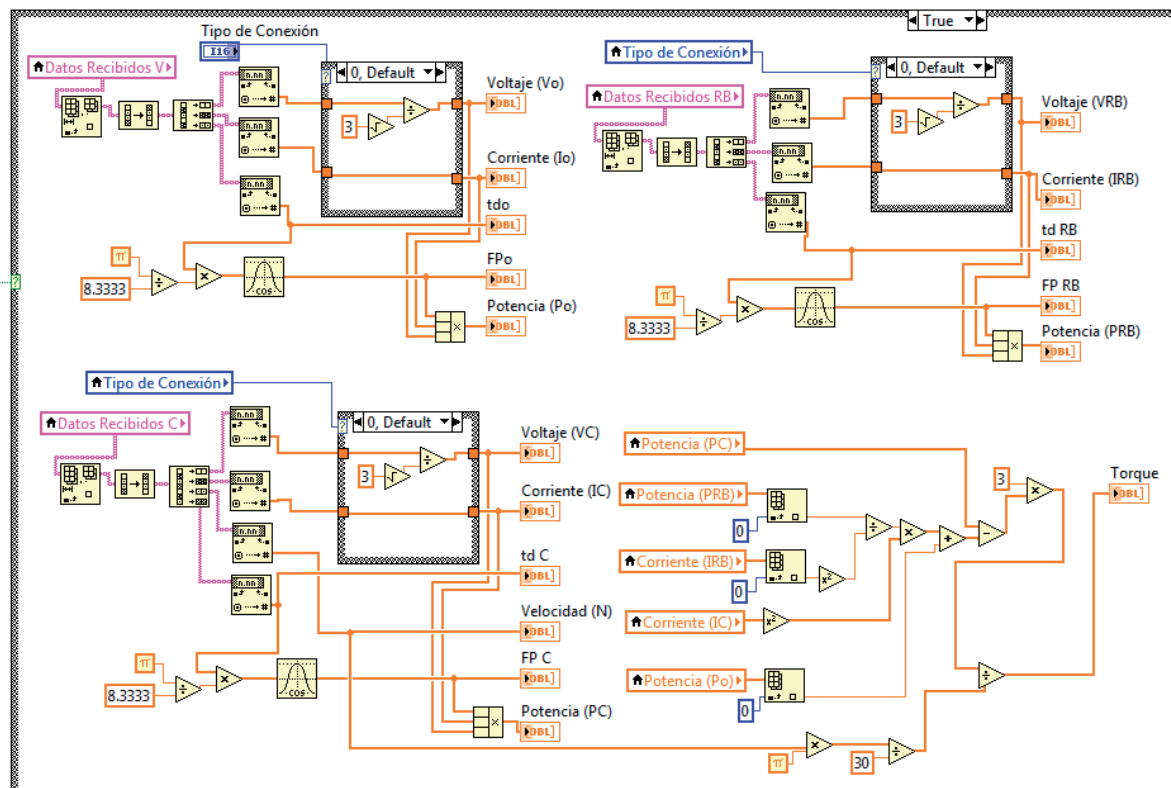


Figura 3.10: Diagrama de bloques de la etapa de clasificación de datos recibidos (Fuente: Elaboración propia)

3.6.5 ETAPA DE CÁLCULO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

En esta etapa, se procede a ejecutar el algoritmo que permite el cálculo de los parámetros del circuito eléctrico equivalente del motor asíncrono trifásico ensayado.

3.6.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En la figura 3.11 se muestra el diagrama de flujo que describe, de forma simplificada, la secuencia de acciones realizadas por el algoritmo mencionado para la obtención de los parámetros del circuito eléctrico equivalente (CEE) del motor asíncrono ensayado. Para observar el diagrama de flujo detallado correspondiente a esta etapa, revisar el Anexo 4.

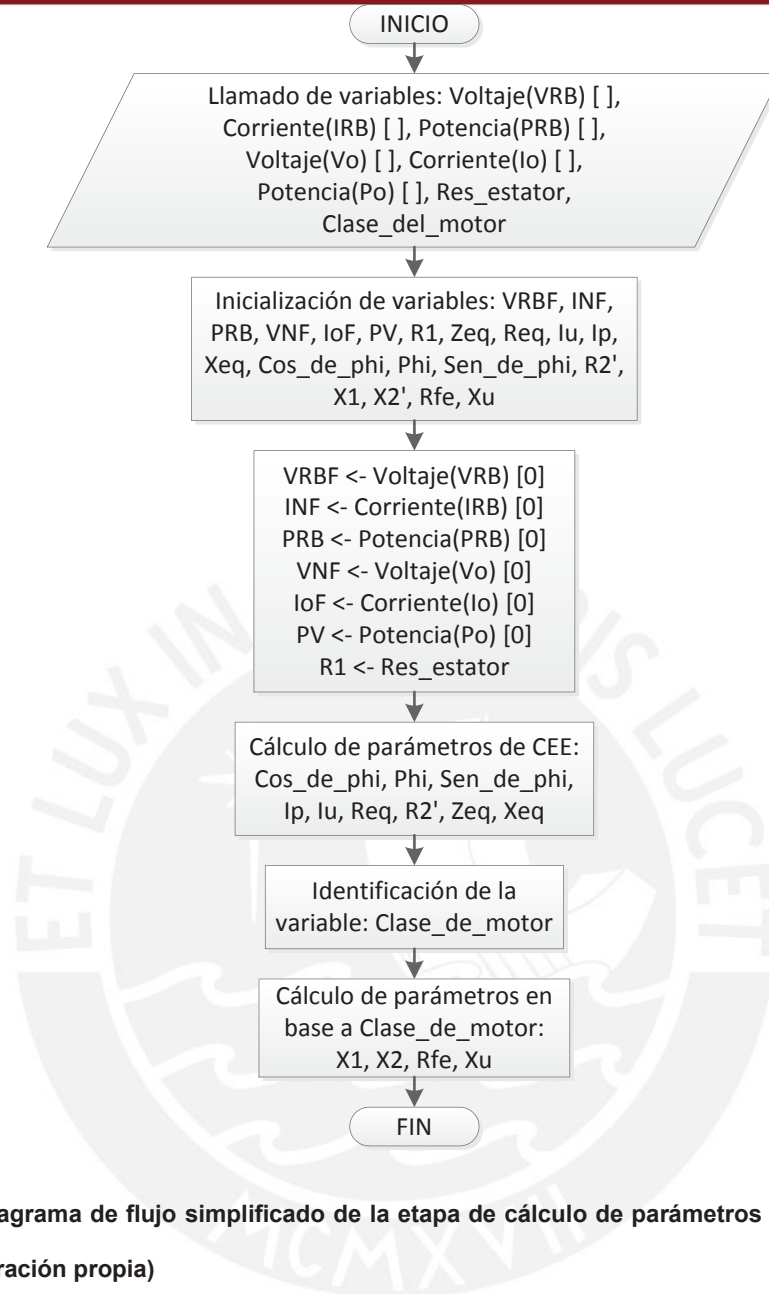


Figura 3.11: Diagrama de flujo simplificado de la etapa de cálculo de parámetros del circuito eléctrico equivalente
(Fuente: Elaboración propia)

3.6.5.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

En la figura 3.12 se muestra el Diagrama de Bloques del algoritmo que permite el cálculo de los parámetros del circuito eléctrico equivalente, así como la muestra en pantalla de estos en el panel frontal.

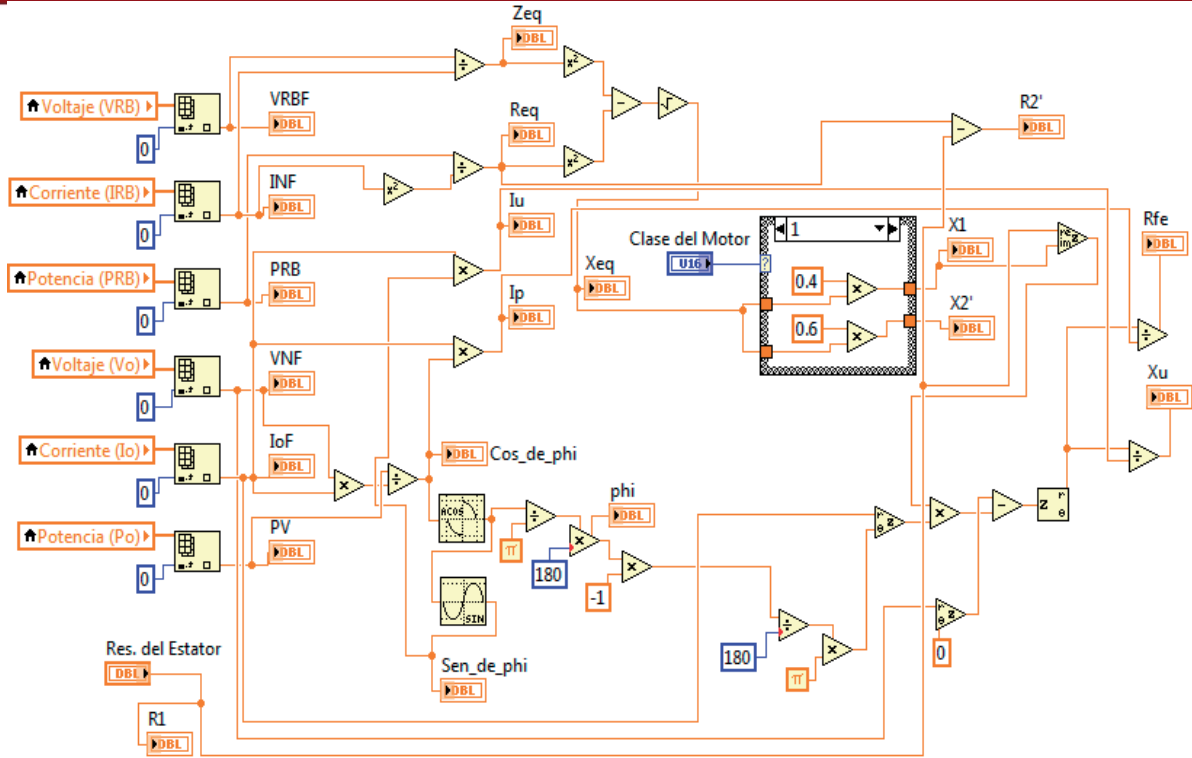


Figura 3.12: Diagrama de bloques de la etapa de cálculo de parámetros del circuito eléctrico equivalente
(Fuente: Elaboración propia)

3.6.6 ETAPA DE CÁLCULO Y MUESTRA EN PANTALLA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS

En esta etapa, el sistema procede a graficar las curvas características para determinar el comportamiento del motor asíncrono trifásico estudiado y la eficiencia del sistema. Las curvas que permiten cumplir con este objetivo son las siguientes:

- Curva de pérdidas en vacío según la tensión aplicada
- Curva de pérdidas en el cobre
- Curva de torque vs. velocidad
- Curva de corriente vs. velocidad
- Curva de eficiencia
- Curva de factor de potencia

3.6.6.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En la figura 3.13 se muestra el diagrama de flujo que describe, de forma simplificada, la secuencia del algoritmo para la determinación de las gráficas mencionadas. Para observar el diagrama de flujo detallado correspondiente a esta etapa, revisar el Anexo 5.

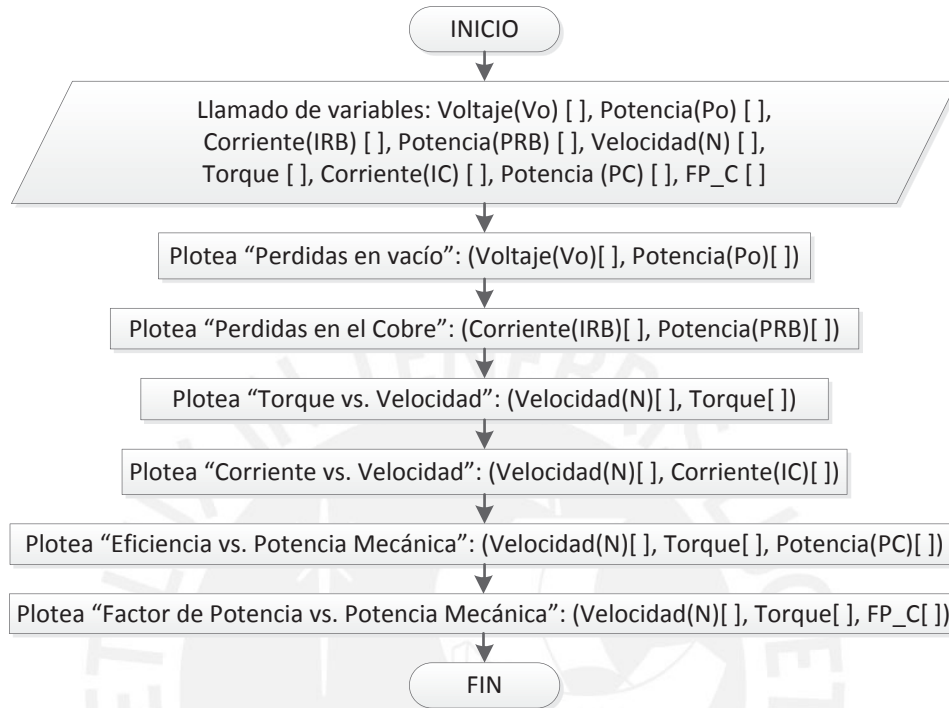


Figura 3.13: Diagrama de flujo simplificado de la etapa de cálculo y muestra de curvas características
(Fuente: Elaboración propia)

3.6.6.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

En la figura 3.14 se muestra el Diagrama de Bloques de esta etapa del instrumento virtual, correspondiente al algoritmo que toma los datos recibidos ya clasificados según el procedimiento descrito en la sección 3.5 para luego realizar las gráfica punto a punto según el conjunto de datos seleccionados para el eje de las abscisas y ordenadas de cada una de las gráficas.

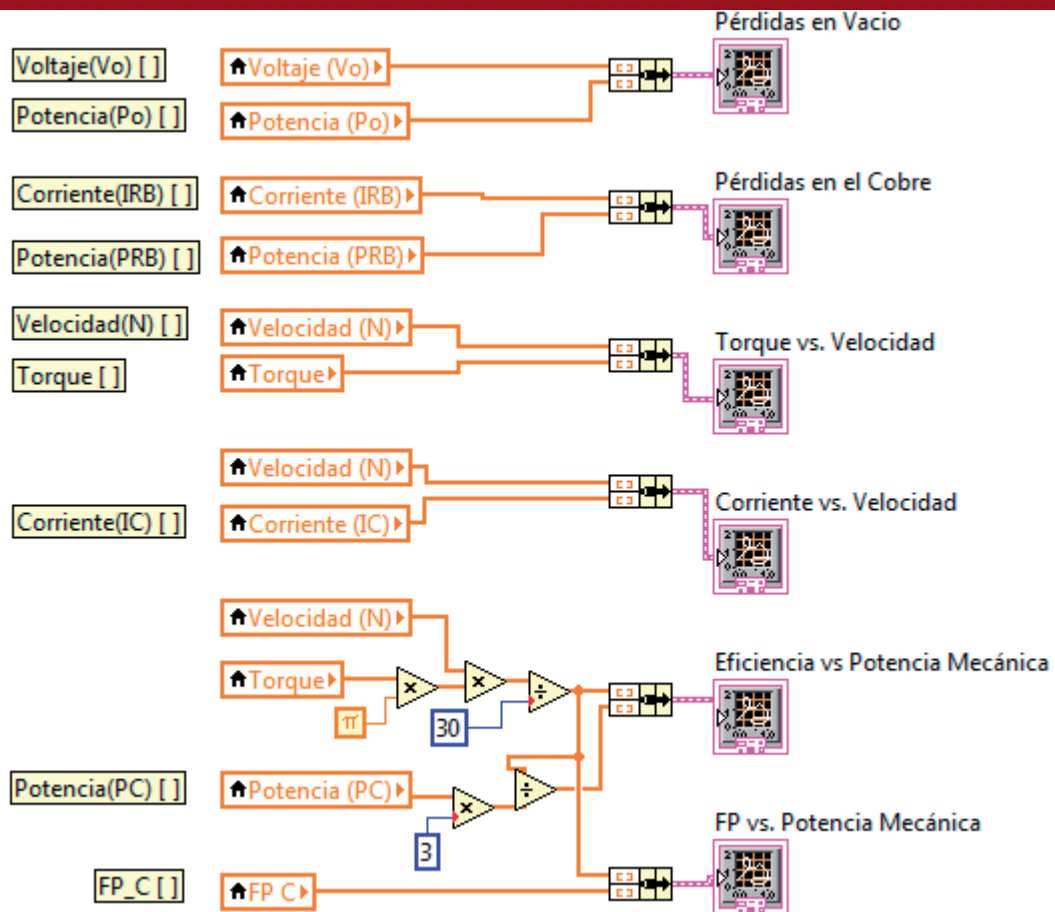


Figura 3.14: Diagrama de bloques de la etapa de cálculo y muestra de curvas características (Fuente: Elaboración propia)

3.6.7 ETAPA DE CÁLCULO Y MUESTRA EN PANTALLA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE

Para efectos de poder visualizar los valores de corriente y torque que entregue el motor en el momento del arranque, en la presente etapa se ha establecido un algoritmo que permite el cálculo de curvas que muestran el comportamiento del motor en dicho instante, en base a los parámetros obtenidos en la etapa de cálculo del circuito eléctrico equivalente y el deslizamiento experimentado por el motor asíncrono trifásico durante la realización de los ensayos. De este modo, se ha logrado el cálculo y muestra en pantalla de las siguientes curvas, con la finalidad de observar el comportamiento del motor asíncrono trifásico en el arranque:

Curva de Torque vs. Velocidad a partir del circuito eléctrico equivalente para el rango de velocidades desde cero hasta la velocidad de sincronismo según el valor del deslizamiento

Curva de Corriente vs. Velocidad a partir del circuito eléctrico equivalente para el rango de velocidades desde cero hasta la velocidad de sincronismo según el valor del deslizamiento.

3.6.7.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En la figura 3.15 se puede apreciar el diagrama de flujo que describe, de forma simplificada, la secuencia del algoritmo, por medio del cual se obtienen las dos curvas características de arranque del motor ensayado. Para observar el diagrama de flujo detallado correspondiente a esta etapa, revisar el Anexo 6.

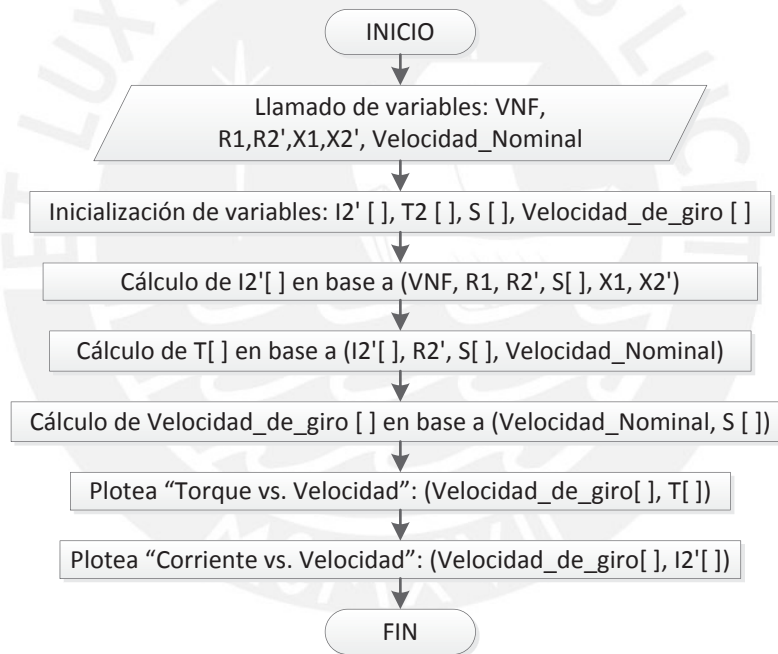


Figura 3.15: Diagrama de flujo simplificado de la etapa de cálculo y muestra de curvas de arranque (Fuente: Elaboración propia)

3.6.7.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

En la figura 3.16 se muestra el Diagrama de Bloques de esta etapa del instrumento virtual utilizada para la obtención de las curvas características de arranque mencionadas en la presente etapa.

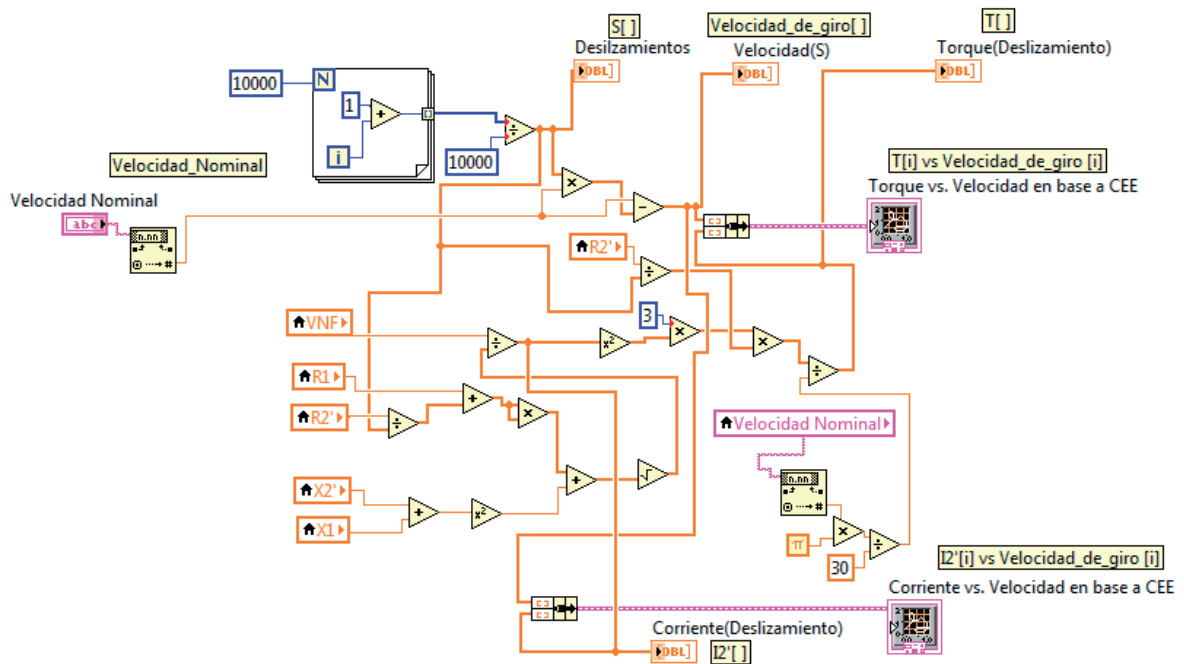


Figura 3.16: Diagrama de bloques de la etapa de cálculo y muestra de curvas de arranque (Fuente: Elaboración propia)

3.7 DETALLE ECONÓMICO

El proyecto de tesis desarrollado requiere de la inversión detallada en la tabla 3.1 que se presenta a continuación.

Tabla 3.1: Tabla con información del detalle económico de los elementos de esta tesis

Detalle	Monto
Sistema de desarrollo LabVIEW para Windows (1 año)	S/.1966.25
Gastos de ingeniería	S/.1100.00
Total	S/.3066.25

(Fuente: Elaboración propia)

CAPITULO 4:

IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS**4.1 DETALLES DEL MOTOR A ENSAYAR**

Para las pruebas del sistema de automatización de ensayos característicos de motores asíncronos, se utilizó un motor asíncrono trifásico de rotor jaula de ardilla, clase B, con un voltaje nominal de 380VAC y una corriente nominal de 2.75A en conexión trifásica de tipo delta; así mismo, posee una potencia nominal de 1.1KW, una resistencia estática de 17ohmios/fase y una velocidad nominal de 1656 RPM. En la figura 4.1 se muestra una imagen tomada al motor a ser ensayado, así como a sus correspondientes datos de placa.

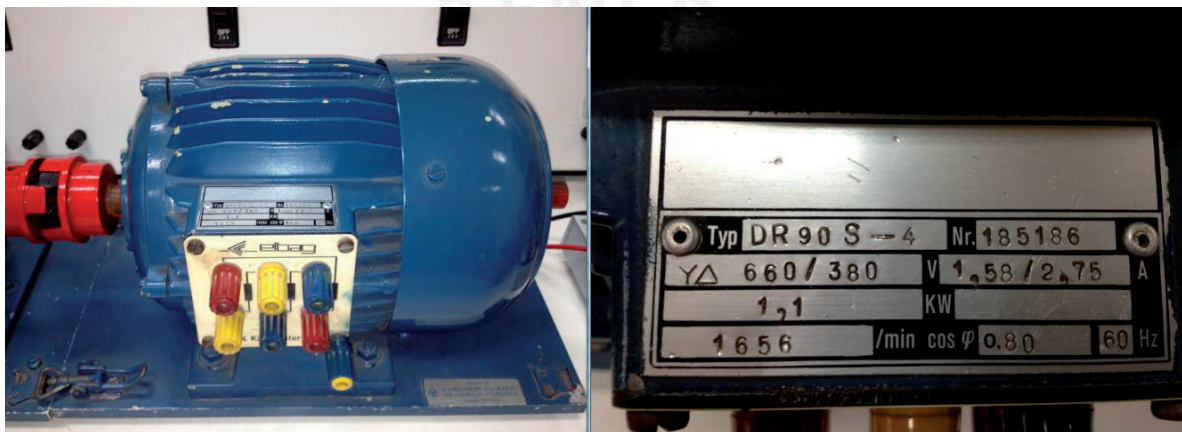


Figura 4.1: Motor asíncrono trifásico a ser ensayado y datos de placa del mismo
(Fuente: Elaboración propia)

La razón por la cual se escogió la conexión delta para la realización de los ensayos, se debe a que, en el laboratorio donde se realizarán dichas pruebas, se cuenta con una alimentación trifásica de 380VAC, lo cual impide trabajar con el otro tipo de conexión (estrella o Y), para lo cual se necesitarían de 660VAC trifásicos tal y como se puede observar en los datos de placa de dicho motor.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS COMPLETO

En la figura 4.2 se muestra una imagen de todo el sistema, cuyas partes han sido adecuadamente conectadas entre sí: El motor será conectado y arrancado mediante un transformador de tensión variable (variac); en los casos de ensayo en vacío y con carga, dicha tensión llegará hasta 380VAC. Además, para lograr que el sistema funcione correctamente, cada una de las etapas ha sido conectada a la respectiva fuente de tensión de alimentación que requiera. De este modo, la etapa de sensado y acondicionamiento de señales se conecta a una fuente externa de ± 15 VDC y $+5$ VDC para alimentar a los circuitos que la conforman. Así mismo, la etapa de adquisición y digitalización de señales (DAQ) se conecta a una fuente de $+5$ VDC. Finalmente, la etapa de control del motor asíncrono trifásico requiere tanto de fuentes de ± 15 VDC como de fuentes de $+5$ VDC, así como de una fuente de poder de 0 a 18 VDC. Siendo esta última la tensión variable de alimentación del motor DC que hace girar al variac.

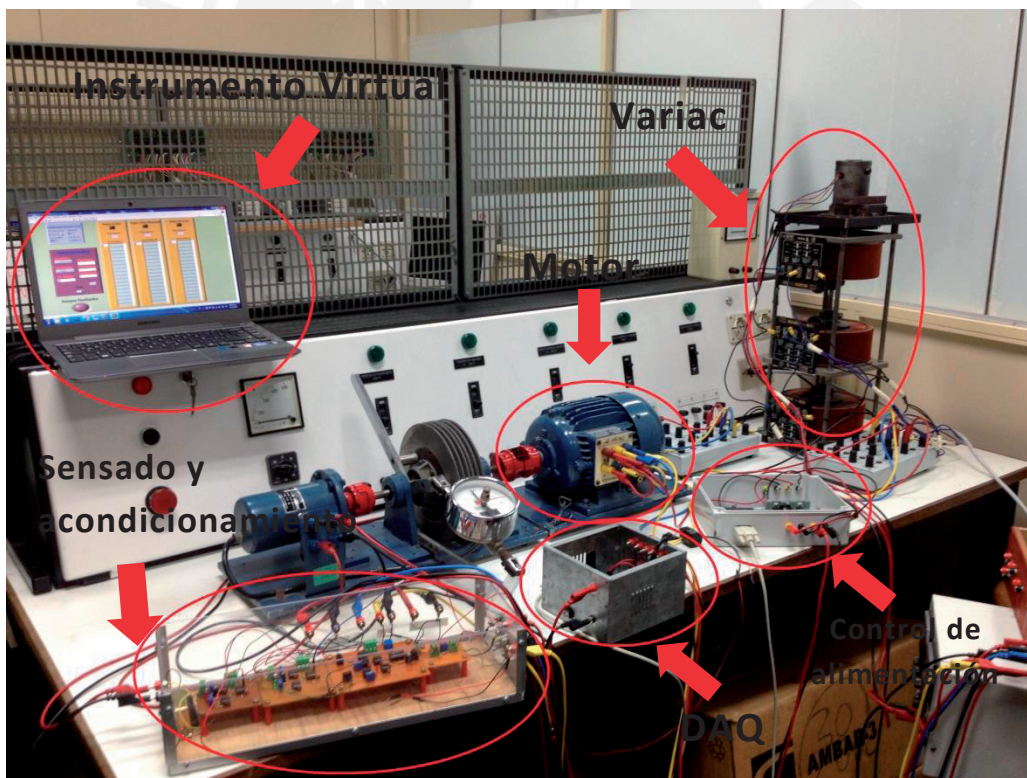


Figura 4.2: Sistema de automatización de ensayos completo conectado y listo para funcionar (Fuente: Elaboración propia)

Dado que el instrumento virtual, el cual se puede apreciar en esta misma figura, está siendo ejecutado en una computadora portátil, no se requiere de una fuente externa especial más que la de la fuente de la misma computadora, la cual se alimenta con 220VAC.

Para visualizar las imágenes tomadas a cada una de las partes del sistema, revisar el Anexo 7.

4.2.1 ETAPA DEL INSTRUMENTO VIRTUAL EN LABVIEW

Esta etapa, objeto de estudio de la presente tesis, es la encargada de capturar todos los datos provenientes de la tarjeta de adquisición de datos durante la realización de cada uno de los ensayos para luego procesarlos y mostrar el circuito eléctrico equivalente del motor ensayado así como sus curvas características para visualizar el comportamiento y eficiencia de dicho motor.

En la figura 4.3 se puede apreciar una parte del panel frontal del instrumento virtual desarrollado en entorno de programación gráfico LabVIEW y ejecutado en una computadora portátil.

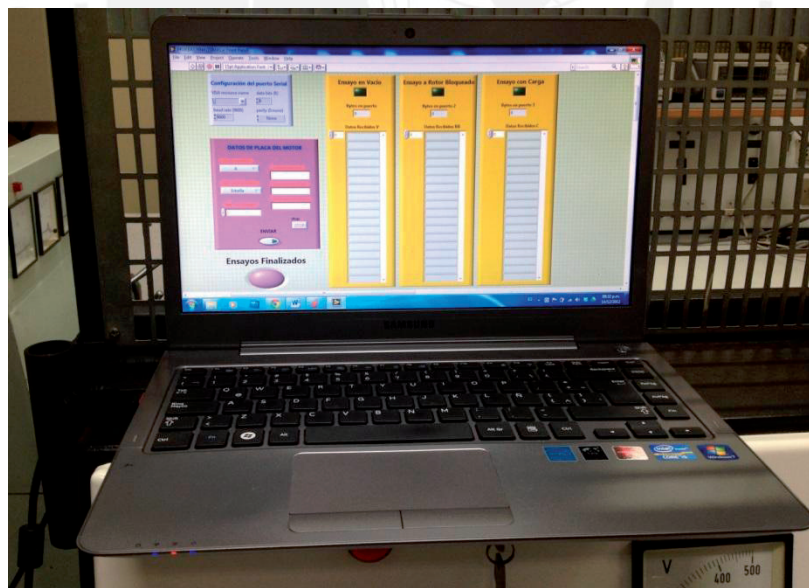


Figura 4.3: Instrumento virtual del sistema de automatización de ensayos ejecutándose en una laptop (Fuente: Elaboración propia)

4.3 FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFÁZ DE CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS Y RECEPCIÓN DE DATOS

En la figura 4.4 se muestra la interfaz del panel frontal, en la cual ha sido configurado el protocolo de comunicación serial y han sido colocados los parámetros de ensayo y los datos de placa del motor a ensayar, los cuales serán enviados a la tarjeta de adquisición de datos externa al instrumento virtual. Al costado del mismo, se puede observar uno de los diversos mensajes de la interfaz de usuario. En este caso, el mensaje informa de que el ensayo en vacío ha sido concluido, los datos de dicho ensayo han sido capturados y que se deberá esperar a que el variac se detenga para comenzar con el siguiente ensayo.



Figura 4.4: Interfaz de usuario configurada y mostrando, en pantalla, un mensaje de espera (Fuente: Elaboración propia)

4.4 OBTENCIÓN DE VALORES DE LOS ENSAYOS DEL MOTOR ASÍNCRONO UTILIZANDO EL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS

Una vez terminada la recepción de datos enviados desde la tarjeta de adquisición de datos externa, la cual, a su vez, capturó y digitalizó datos analógicos provenientes del sensado de los valores de tensión, corriente y tiempo de desfase del motor durante la

realización de los tres ensayos, el instrumento virtual procede a ejecutar los algoritmos para mostrar los resultados en pantalla.

En la figura 4.5 y 4.6 se muestran dos tablas del instrumento virtual correspondientes a los valores de tensión de fase, corriente de fase, tiempo de desfase entre las dos primeras, la potencia activa y factor de potencia en cada punto de sensado durante la realización del ensayo en vacío (figura 4.5) y a rotor bloqueado (figura 4.6)

RESULTADOS DE ENSAYO EN VACIO

	Voltaje (Vo)	Corriente (Io)	tdo	Potencia (Po)	FPo
	384.6	0.7563289	3.71	26.45884	0.1713046
	382.4	0.7343895	3.744	28.00604	0.1586626
	378.6	0.7147596	3.745	26.92321	0.1582904
	374.2	0.7084088	3.743	26.57994	0.1590348
	370.4	0.6910883	3.737	26.80744	0.1612676
	366	0.6818507	3.727	26.04738	0.164987
	362.2	0.6645302	3.716	25.29093	0.1690756
	357.9	0.6495191	3.708	25.90466	0.1720474
	354.6	0.6385494	3.698	26.10602	0.1757599
	350.2	0.6252703	3.689	25.39064	0.179099
	346.4	0.6166101	3.676	25.13457	0.1839185
	341	0.5969802	3.666	25.49947	0.1876228
	337.7	0.5813917	3.658	24.37614	0.1905843
	333.4	0.5640712	3.643	24.29066	0.1961324
	329	0.5444413	3.624	23.62199	0.2031511
	324.1	0.5398225	3.611	23.35573	0.2079473
	319.7	0.5311622	3.597	23.44165	0.2131069
	315.9	0.5311622	3.581	23.17766	0.2189963
	311.6	0.522502	3.563	22.34824	0.2256124
	307.8	0.5271208	3.551	22.63848	0.2300173
	302.3	0.5115323	3.54	22.01622	0.2340511

Figura 4.5: Tabla de valores obtenidos en el ensayo en vacío
(Fuente: Elaboración propia)

RESULTADOS DE ENSAYO A ROTOR BLOQUEADO

Voltaje (VRB)	Corriente (IRB)	td RB	Potencia (PRB)	FP RB
95.3	1.480326	2.765	71.12474	0.5041623
93.7	1.453766	2.768	68.54292	0.5031853
90.4	1.397188	2.764	63.71972	0.5044879
87.2	1.346958	2.762	59.33094	0.5051387
83.3	1.285755	2.762	54.10224	0.5051387
80.6	1.230911	2.764	50.05095	0.5044879
76.8	1.182991	2.764	45.83458	0.5044879
73.5	1.086572	2.77	40.1339	0.5025336
66.5	1.027682	2.77	34.34362	0.5025336
63.7	0.988422	2.768	31.68185	0.5031853
68.1	0.931266	2.742	32.44727	0.5116315
70.3	0.889696	2.739	32.0611	0.5126029
52.3	0.826188	2.748	22.02338	0.5096867
48.5	0.771917	2.757	18.97225	0.5067646
45.2	0.719378	2.762	16.42504	0.5051387
41.9	0.666835	2.763	14.10478	0.5048133
43.6	0.633930	2.78	13.79953	0.4992707
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Figura 4.6: Tabla de valores obtenidos en el ensayo a rotor bloqueado (Fuente: Elaboración propia)

Cabe resaltar que el valor de potencia activa y factor de potencia mostrados, son producto de un cálculo realizado sobre el dato de tiempo de desfase en el instrumento virtual. De este modo:

$$FP = \cos\left(t_d * \frac{\pi}{8.333}\right)$$

$$Pe = V_f * I_f * FP$$

Donde:

- FP es el factor de potencia calculado a partir del dato recibido del tiempo de desfase entre la señal de corriente y la señal de tensión de línea en cada punto de sensado.
- Pe es la potencia activa hallada a partir del valor de tensión de fase, corriente de fase y factor de potencia en cada punto de sensado.

De modo similar, en la figura 4.7 se muestra una tercera tabla del instrumento virtual correspondiente a los valores recibidos y calculados del ensayo con carga realizado al motor asíncrono.

RESULTADOS DE ENSAYO CON CARGA							
Voltaje (VC)	Corriente (IC)	td C	Velocidad (N)	Potencia (PC)	FP C	Torque	
383.5	0.7522874	3.72	1647.4	48.34985	0.1675892	-0.3451592	
385.1	0.7586383	3.731	1647.1	47.76664	0.1634995	-0.3607828	
385.1	0.7782682	3.592	1645.4	64.42236	0.2149482	-0.08821322	
384.6	0.7805776	3.149	1644.3	112.37	0.3743044	0.7450615	
384.6	0.8065583	3.077	1642.1	123.8743	0.3993337	0.9234133	
384	0.8088677	3.008	1640.3	131.3998	0.4230444	1.053745	
383.5	0.8527463	2.931	1639.3	146.8897	0.4491654	1.283731	
383.5	0.8567878	2.84	1638.2	157.5683	0.479546	1.467413	
383.5	0.863716	2.828	1634.4	160.1558	0.4835109	1.509396	
383.5	0.9139455	2.718	1632.4	182.0432	0.5193844	1.8445	
383.5	0.9272245	2.701	1629.7	186.6318	0.5248503	1.914268	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	

Figura 4.7: Tabla de valores obtenidos en el ensayo con carga (Fuente: Elaboración propia)

Al igual que en la figuras 4.5 y 4.6, no todos los elementos mostrados en esta figura han sido obtenidos directamente de la tarjeta de adquisición de datos, ya que los valores de potencia y factor de potencia han sido calculados utilizando las mismas fórmulas descritas anteriormente. No obstante, a diferencia del caso anterior, en el presente ensayo se muestra el dato del torque en cada punto de sensado, el cual fue calculado a partir de las siguientes fórmulas descritas en la programación del instrumento virtual:

$$T = \frac{3 * (P_e - (R_{eq} * I_f^2 + P_{fe}))}{N * \frac{\pi}{30}}$$

Donde:

- P_e es la potencia eléctrica calculada en cada punto de sensado
- R_{eq} es la resistencia eléctrica equivalente entre la resistencia del estator y la resistencia en el rotor referida al estator.

- I_f es la corriente de fase recibida de la tarjeta de adquisición de datos en cada punto de sensado del ensayo con carga
- P_{fe} es la potencia de pérdidas en el fierro
- N es la velocidad de giro motor en RPM recibida de la tarjeta de adquisición de datos en cada punto de sensado del ensayo con carga

A modo de tener un patrón con el cual comparar los resultados que se obtendrán con los datos mostrados en las dos imágenes anteriores, en la tabla 4.1, 4.2 y 4.3, se muestran los datos obtenidos a partir de diferentes puntos de medición en los ensayos característicos realizados de forma tradicional al mismo motor. En dichos ensayos, se hace variar la tensión de alimentación trifásica del motor asíncrono de forma manual y se procede a leer datos de tensión de línea, corriente de línea y potencia trifásica que aparecen en los diferentes instrumentos de medición colocados convenientemente en cada ensayo tal y como se detalló en la sección 1.2.1.1. Así mismo, se muestran los valores del tiempo de desfase y el factor de potencia calculados a partir de la potencia eléctrica leída en cada punto de medición, con el fin de contrastar dichos valores con los recibidos durante la realización de los ensayos de forma automática.

Tabla 4.1: Valores leídos y calculados del ensayo en vacío realizado manualmente

Voltaje de fase (V)	Corriente de fase (A)	Potencia monofásica (W)	tiempo de desfase (ms)	Factor de Potencia
381.10	0.91683	65	3.668848478	0.186030664
357.11	0.81406	55	3.660315262	0.189191749
338.08	0.74998	54	3.595940498	0.212973592
316.73	0.68647	50	3.549742552	0.229963853
301.92	0.64259	43.3	3.567734376	0.223354999
280.53	0.57874	41	3.488067411	0.252536475
258.38	0.52383	39	3.38998407	0.288147881

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4.2: Valores leídos y calculados del ensayo a rotor bloqueado realizado manualmente

Voltaje de fase (V)	Corriente de fase (A)	Potencia monofásica (W)	tiempo de desfase (ms)	Factor de Potencia
80.71	1.570392732	82	2.299411512	0.646961189
76.01	1.431828668	71	2.28053277	0.652373878
64.11	1.20088856	51	2.245137696	0.662432592
58.44	1.11428602	44	2.197846924	0.675687349
47.36	0.906439923	30	2.113365339	0.698828384

(Fuente: Elaboración propia)

En la tabla 4.3, a diferencia de en las tablas 4.1 y 4.2, se muestran además los valores medidos de la velocidad de giro del motor durante la realización del ensayo con carga, así como el valor del torque calculado utilizando la fórmula mencionada en la descripción de la figura 4.7.

Tabla 4.3: Valores leídos y calculados del ensayo con carga realizado manualmente

Voltaje de fase (V)	Corriente de fase (A)	Potencia monofásica (W)	tiempo de desfase (ms)	Factor de Potencia	Velocidad (RPM)	Torque (Nm)
379.7	0.923760431	113	3.29526232	0.3221651	1772.5	0.31720714
379.7	1.039230485	225	2.556181468	0.570203716	1748.666667	2.032921853
379.7	1.096965511	260	2.37751444	0.624223015	1742.166667	2.548606569
379.7	1.162783442	290	2.264873484	0.656838441	1736.166667	2.97083163
379.7	1.26439709	350	1.998973323	0.729027582	1725	3.850318639
379.7	1.541525219	475	1.654650208	0.811525888	1701.833333	5.571684931

(Fuente: Elaboración propia)

4.5 VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la presente sección se mostrarán los resultados obtenidos a partir de los datos recibidos de la tarjeta de adquisición de datos externa y, posteriormente, procesados en el instrumento virtual. Dichos resultados serán visualizados a través de las curvas características y del circuito eléctrico equivalente obtenidos con los datos provenientes de cada uno de los ensayos y serán contrastados con los resultados hallados manualmente, los cuales han sido colocados en la tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Los datos de dichas tablas han sido enviados desde un instrumento virtual externo, cuyo diseño e implementación ha sido

detallado en el Anexo 8. De este modo, el instrumento virtual recibió los datos del ensayo realizado manualmente usando protocolo de comunicación serial y los procesó de la misma forma que lo hizo con los datos recibidos de la tarjeta de adquisición de datos trabajando con el resto del sistema de automatización

4.5.1 GRAFICA DE PÉRDIDAS EN VACÍO

En la figura 4.8, se muestran las curvas de pérdidas en vacío halladas por medio del envío de datos, tanto a través del sistema de automatización de ensayos, como a través del envío de datos obtenidos a partir de la realización de ensayos manuales, utilizando el instrumento virtual descrito en el Anexo 8, ejecutándose en una computadora externa.

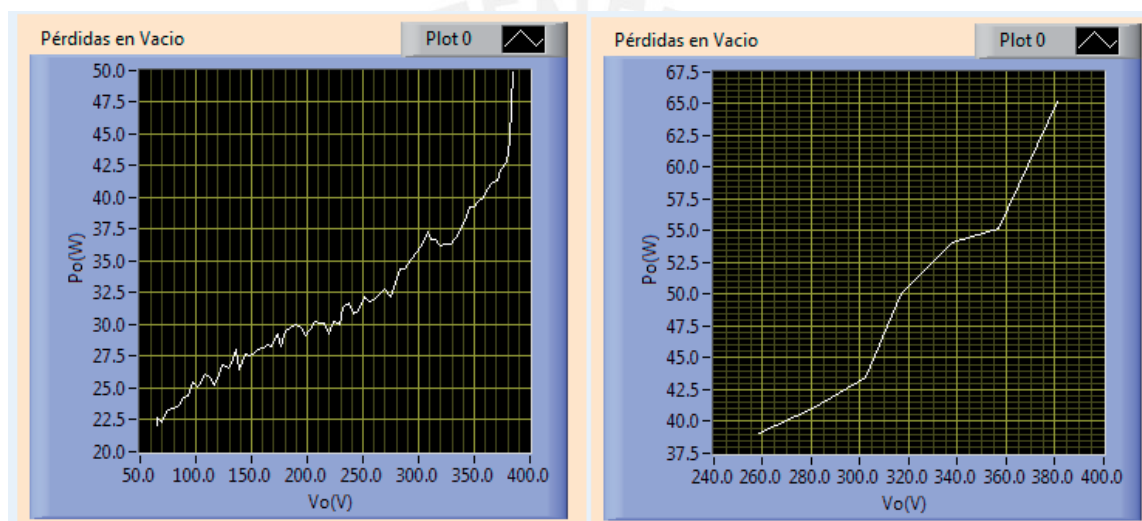


Figura 4.8: Gráficas de pérdidas en vacío con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)
(Fuente: Elaboración propia)

El gráfico correspondiente al sistema de automatización de ensayos (izquierda) es hallado a partir de los datos obtenidos y mostrados en la figura 4.5. Como se observa, en dicho gráfico existen oscilaciones en los valores de potencia calculados a partir del momento en el que el valor de tensión en el eje x es aproximadamente el 81% al de la tensión nominal. Esto puede deberse a que se deben mejorar los filtros de los armónicos de la red de alimentación o también puede deberse a la falta de filtros en los micro controladores del sistema. Sin embargo, la gráfica mostrada en la parte derecha de la figura 4.8 muestra la misma tendencia a la de la gráfica de la izquierda de la misma figura; demostrando así el correcto funcionamiento del instrumento virtual.

4.5.2 GRAFICA DE PÉRDIDAS EN EL COBRE

En la figura 4.9 se muestra la curva de pérdidas en el cobre hallada mediante los dos métodos de envío de datos descrito anteriormente.

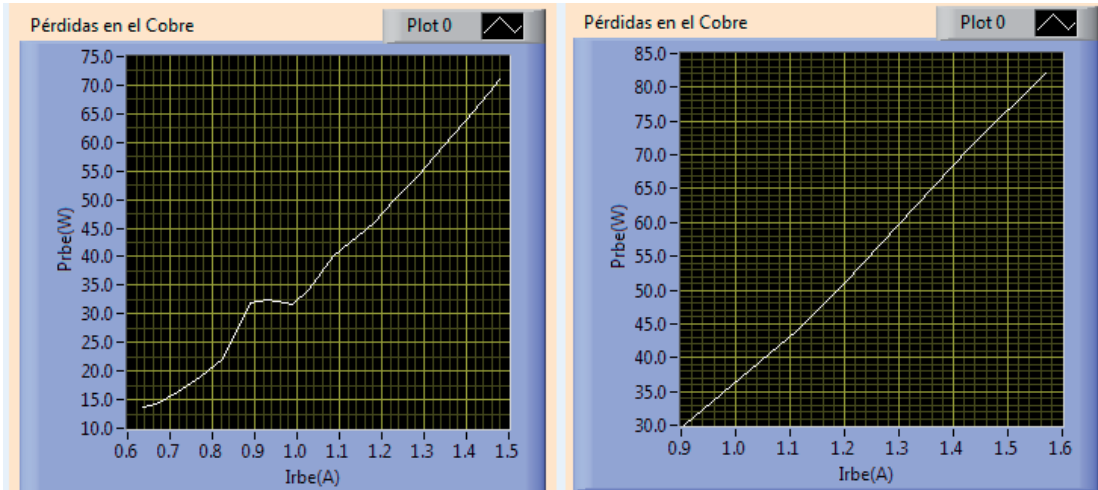


Figura 4.9: Gráficas de pérdidas en el cobre con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)
(Fuente: Elaboración propia)

El gráfico correspondiente al sistema de automatización de ensayos (izquierda) es hallado a partir de los datos obtenidos y mostrados en la figura 4.6, tabulando el valor de potencia versus el valor de la corriente obtenidos en cada punto de sensado. De forma similar a la anterior, se puede observar la misma tendencia de crecimiento de la potencia con respecto a la corriente en ambas curvas.

4.5.3 GRAFICAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR SEGÚN LA VELOCIDAD DE GIRO

En la siguiente sección se muestran las curvas características obtenidas a partir de la realización del ensayo con carga utilizando el sistema de automatización de ensayos (datos mostrados en la figura 4.7) presentado en esta tesis. Dichas gráficas, al igual que en los casos anteriores, se comparan con las curvas calculadas a partir de datos obtenidos de un ensayo realizado en forma manual.

En la figura 4.10 se observan las curvas de Torque vs. Velocidad, en donde se describe el comportamiento del torque a medida que disminuye la velocidad de giro del motor.

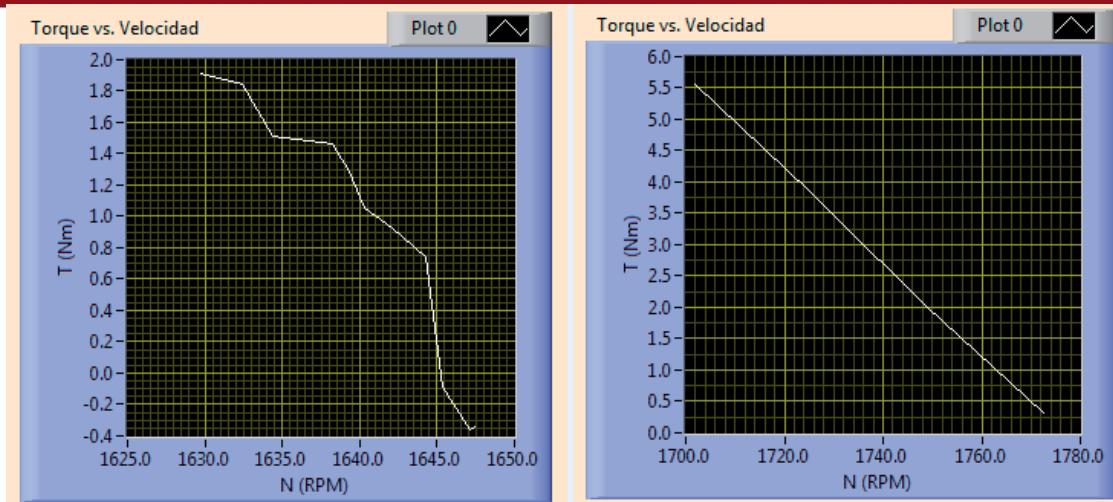


Figura 4.10: Gráficas de Torque vs. Velocidad, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)
(Fuente: Elaboración propia)

En la figura 4.11 se observa el comportamiento de la corriente, la cual tiende a disminuir de forma lineal a medida que la velocidad de giro del motor aumenta.

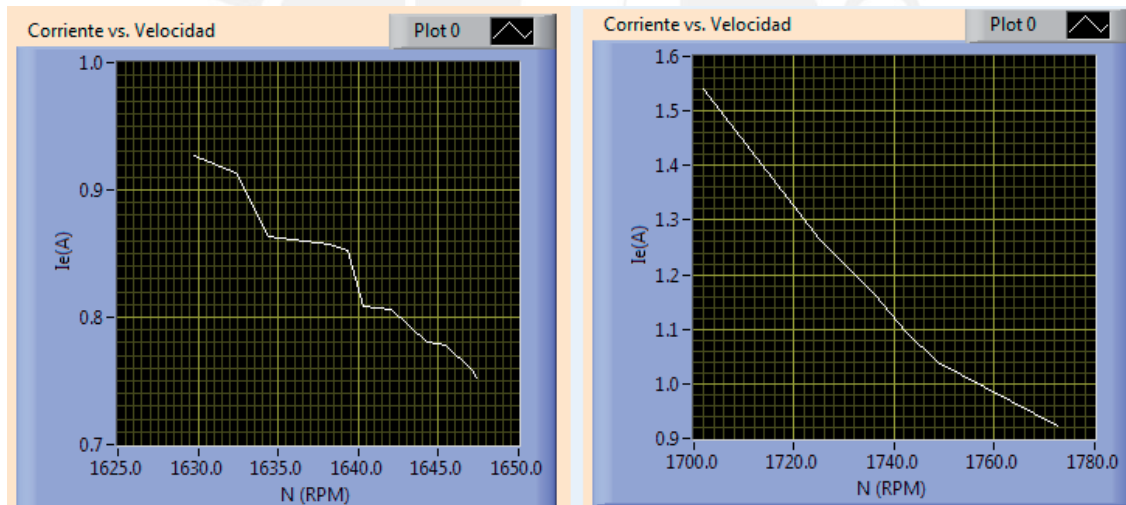


Figura 4.11: Gráficas de Corriente vs. Velocidad, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)
(Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar que las velocidades mostradas en ambas gráficas obtenidas mediante la recepción de datos provenientes del sistema de automatización de ensayos, difieren de las obtenidas con los datos medidos en la realización manual del ensayo con carga. Esto probablemente se deba a una mala calibración en la etapa de digitalización en la tarjeta

de adquisición de datos, en donde probablemente se programó el dato errado de la constante tacométrica que posee el taco generador encargado de entregar tensión AC a la etapa de sensado y acondicionamiento de señales. Dicha tensión es proporcional a la velocidad de giro del rotor, el cual está acoplado al eje de dicho taco-generador.

4.5.4 GRAFICAS DE EFICIENCIA DEL MOTOR

En las figuras 4.12 y 4.13 se presentan las curvas de eficiencia obtenidas a partir de la ejecución del sistema de automatización de ensayos, así como las halladas mediante la obtención de datos provenientes de la realización del ensayo con carga de forma manual y enviados al instrumento virtual mediante el programa descrito en el Anexo 8.

En la figura 4.12, se describe el aumento de la eficiencia del motor a medida que la máquina entrega mayor potencia mecánica a una carga, demostrando que cuando el motor se encuentra en vacío, casi el total de la potencia eléctrica se pierde en el núcleo magnético o parte activa del motor, la cual es de acero al silicio. Esto se debe a que no existe carga mecánica acoplada al eje a la cual entregarle potencia mecánica.

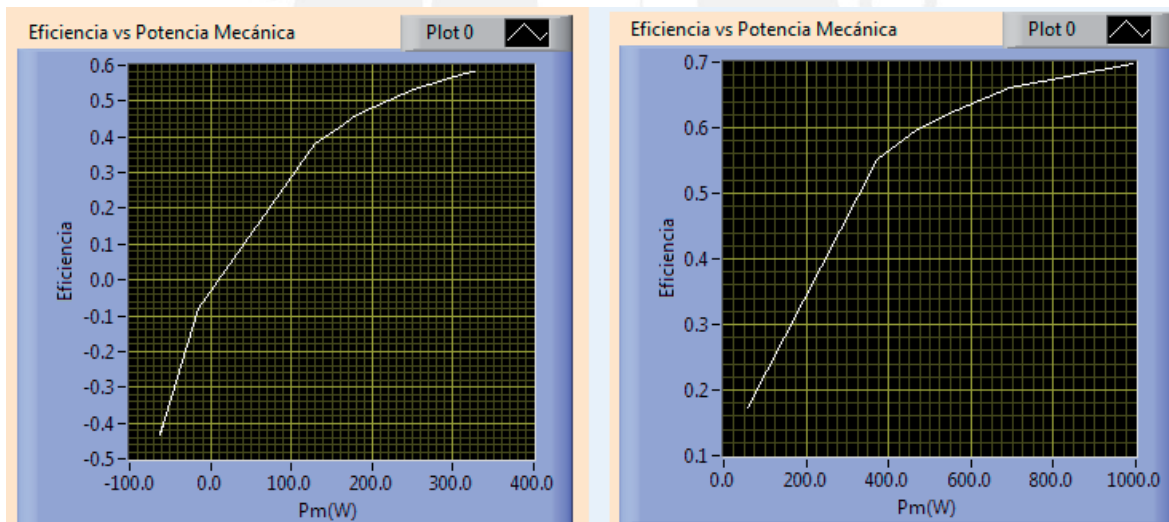


Figura 4.12: Gráficas de Eficiencia vs. Potencia mecánica, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha) (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 4.13 se observa el comportamiento del factor de potencia del motor conforme este entrega mayor potencia mecánica a una carga acoplada a su eje. De modo similar al

anterior, se demuestra que una mayor parte del total de potencia aparente será potencia activa conforme se coloque mayor carga al motor.

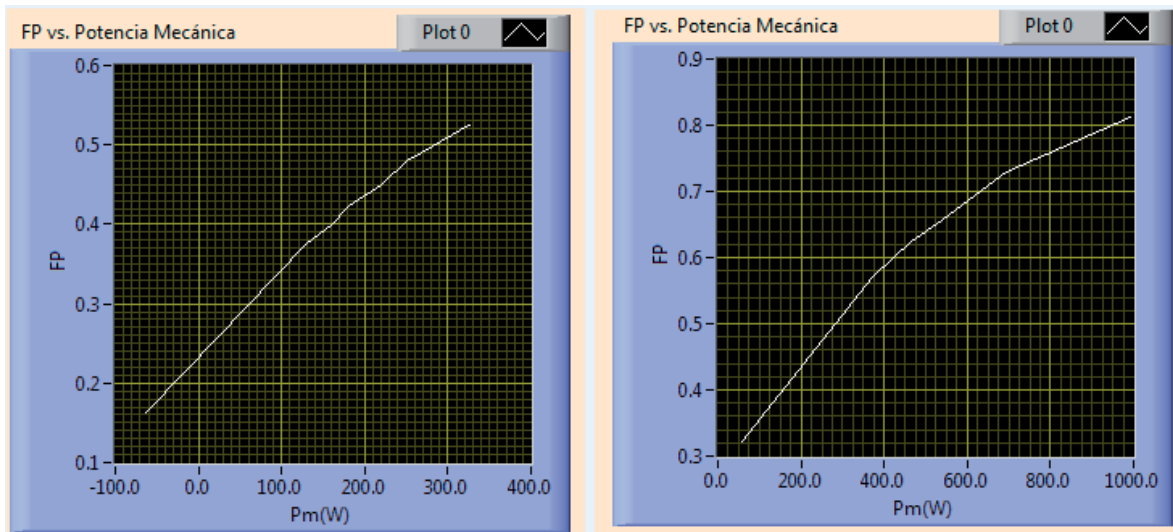


Figura 4.13: Gráficas de Factor de potencia vs. Potencia mecánica, obtenidas con datos enviados desde el sistema de automatización de ensayos (izquierda) y con datos obtenidos manualmente (derecha)
(Fuente: Elaboración propia)

Debido a que el cálculo de la potencia mecánica depende de los resultados obtenidos en el ensayo en vacío y a rotor bloqueado, en donde posiblemente se cometieron errores de sensado y/o digitalización; ambas gráficas presentan un error que ocasiona que los primeros datos de la potencia mecánica que se muestran en la gráfica izquierda de cada figura sean negativos. Además, ambas gráficas poseen un rango de potencias mecánicas en el eje x menor cuando el instrumento virtual es ejecutado conjuntamente con el sistema de automatización de ensayos. Sin embargo, el comportamiento del crecimiento de ambas gráficas es similar, corroborando así el correcto funcionamiento del instrumento virtual tanto como el del motor asíncrono trifásico.

4.5.5 CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

En la figura 4.14, se observa una porción de la interfaz de usuario que muestra el circuito eléctrico equivalente obtenido mediante la realización del ensayo en vacío y a rotor bloqueado realizados en el sistema de automatización implementado.

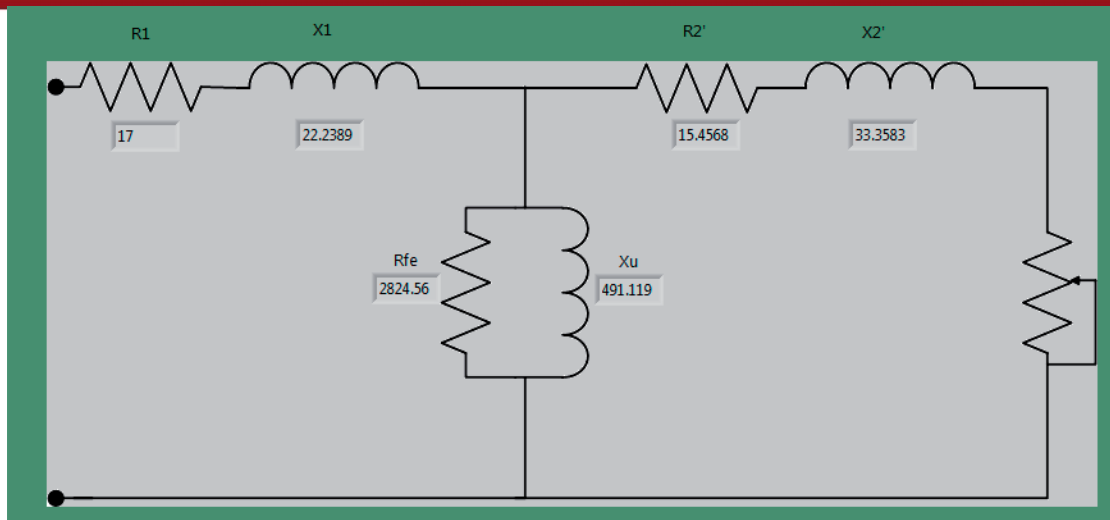


Figura 4.14: Porción del panel frontal en donde se muestra el resultado del cálculo del circuito eléctrico equivalente
(Fuente: Elaboración propia)

Dichos datos han sido contrastados con los parámetros del circuito eléctrico equivalente obtenido mediante la realización de cálculos de forma manual según las fórmulas descritas en la sección 1.2.1.1. Los resultados de estos últimos fueron colocados y contrastados con los ensayos realizados de forma automática (mostrados en la figura 4.14) en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Parámetros del Circuito Eléctrico Equivalente obtenidos a partir ensayos manuales y a partir del sistema de automatización de ensayos

Parámetro	Resultado en ohmios-Ensayos manuales	Resultado en ohmios-Ensayos automáticos
Resistencia del estator (R1)	17	17
Resistencia del rotor referida al estator (R2')	16.264	15.4568
Reactancia de flujos dispersos en el estator (X1)	15.6713	22.2389
Reactancia de flujos dispersos en el rotor, referida al estator (X2')	23.5069	33.3583
Resistencia de pérdidas en el hierro (Rfe)	2129.54	2824.56
Reactancia de magnetización (Xu)	404.444	491.119

(Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar, los valores obtenidos por medio del instrumento virtual trabajando conjuntamente con el sistema de automatización de ensayos son coherentes,

puesto que se sabía de antemano que en este motor se tienen valores de resistencias y reactancias más grandes que los normales, como el valor de 17 ohmios en el estator, el cual fue medido y no calculado.

4.5.6 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE

En la figura 4.15 se muestran las curvas características de arranque calculadas a partir del circuito eléctrico equivalente y mediante las fórmulas descritas en la sección 1.2.1.2. Debido a que la curva depende solo del primer punto de sensado del ensayo en vacío y a rotor bloqueado, y no de todo el conjunto de datos provenientes de la realización de estos, como en el caso de las curvas características anteriores, la variación de las curvas de arranque calculadas a partir del sistema de automatización de ensayos con respecto a las obtenidas mediante la realización de los ensayos de modo manual es mínima, por lo que, en la presente figura, solo se mostrarán las curvas halladas cuando el instrumento virtual trabaja con el sistema de automatización de ensayos.

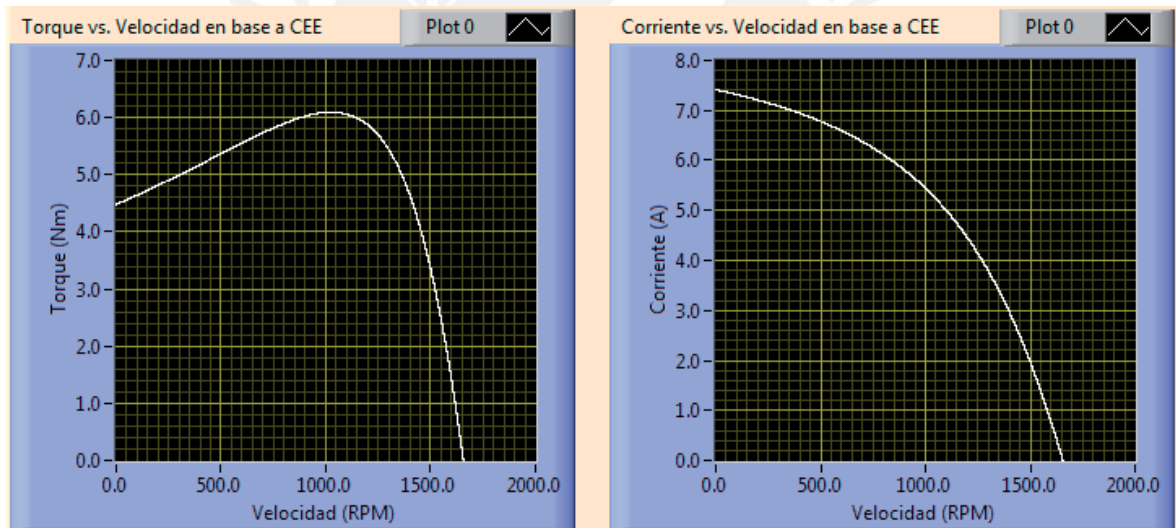


Figura 4.15: Gráficas de Torque vs. Velocidad (izquierda) y Corriente vs. Velocidad del motor eléctrico en condiciones de arranque y calculadas a partir del CEE. (Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar el comportamiento del torque en el momento del arranque a medida que el motor se acerca a su velocidad nominal de giro. Del mismo modo, se puede observar que, en el instante del arranque, la corriente es aproximadamente 2.72 veces la corriente nominal y luego se observa una tendencia a decrecer rápidamente a medida que el motor rompe la inercia y adquiere velocidad de giro.

CONCLUSIONES

- Se logra realizar una interfaz, en entorno LabVIEW, que permite la interacción con el usuario de un sistema de automatización de ensayos característicos de un motor asíncrono trifásico, por medio de paneles de inserción de datos de placa del motor, de parámetros de ensayo y de comunicación. Durante la ejecución de los ensayos, dicha interfaz también logra la interacción con el usuario por medio de mensajes de inicio y fin de obtención de datos recibidos en cada uno de los tres ensayos característicos, los cuales sirven para el análisis del comportamiento del motor asíncrono ensayado: ensayo en vacío, ensayo a rotor bloqueado y ensayo con carga.
- Se logra implementar adecuadamente, en entorno de programación LabVIEW, un algoritmo que permita el envío y recepción de datos entre el instrumento virtual y la tarjeta de adquisición de datos del sistema de automatización de ensayos, utilizando el protocolo de comunicación serial, el cual supera los requerimientos de diseño para la aplicación para la cual fue concebida.
- Se desarrolla, en entorno de programación LabVIEW, un algoritmo que permita el procesamiento de datos recibidos durante la realización de los tres ensayos característicos del motor asíncrono trifásico, con el fin de mostrar las curvas características que permiten visualizar el comportamiento de dicho motor, el circuito eléctrico equivalente y las curvas de Torque vs. Velocidad y Corriente vs. Velocidad en el arranque del mismo.

RECOMENDACIONES

- Para el uso de este sistema de automatización de ensayos, sería deseable realizar los ajustes de calibración con otro equipo de uso comercial, el cual sirva de patrón.
- En las gráficas de torque vs. velocidad (Figura 4.10), de eficiencia vs. potencia mecánica (Figura 4.12) y de factor de potencia vs. potencia mecánica (Figura 4.13) se nota un rango pequeño de valores de potencias en donde se muestran resultados negativos. En un futuro trabajo, el instrumento virtual deberá filtrar los valores erróneos que provoquen este error.
- Se recomienda realizar el ensayo en vacío sin ninguna carga en el eje del rotor.
- Es recomendable trabajar con un número elevado (igual o mayor a cien) de puntos de sensado, con el fin de obtener gráficas con mayor continuidad, lo que evita la necesidad de efectuar ajustes polinómicos para observar una curva característica continua.
- Para la realización de las curvas características de arranque, se recomienda efectuar una variación de 0.0001 en 0.0001 desde 0 hasta 1 en el valor del deslizamiento con el fin de poder obtener 9999 valores tanto de velocidad, torque y corriente de modo tal las curvas obtenidas sean bastante continuas y los valores finales de sus respectivos parámetros sean los más próximos a los reales.
- Al momento de trabajar con el resto del sistema de automatización de ensayos, se recomienda ajustar el valor de bytes esperados con el fin de que el buffer de recepción del instrumento virtual se llene antes de que el sistema deje de enviar datos, con lo cual el intento de ensayo sería fallido.
- En trabajos futuros, se recomienda implementar un protocolo de control de flujo de datos como “Handshaking”, de modo tal que se eviten posibles pérdidas de datos debido a problemas de sincronización entre velocidades de transferencia y de procesamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] VARGAS-MACHUCA SALDARRIAGA, Federico
1990 *Máquinas Eléctricas Rotativas*
Lima: Megaprint Ediciones
- [2] “Máquinas eléctricas rotativas” (En línea)
Formación Online. Sav. Consulta 29 junio 2012
(http://www.sav.us.es/formaciononline/assignaturas/asigte/apartados/textos/apartado2_4.PDF)
- [3] MCGRAW-HILL
“Máquinas eléctricas” (En línea). Consultado 28 junio 2012
(<http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>)
- [4] ÁLVAREZ, Julio
2012 “Motores de inducción” (En línea). Consulta 17 abril 2012
(http://www.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes_EyM/Capitulo_8_Motores_de_Induccion.pdf)
- [5] LEAL SÁNCHEZ, Ramses
2012 “Potencia Eléctrica” (En línea). Consulta 24 Octubre 2012
(<http://potenciaelectrica-ramls95.blogspot.com/2012/05/funciones-trigonometricas-y-conceptos.html>)
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS
2003 “La instrumentación Virtual” (En línea). Consulta 4 de Abril 2012
(<http://www.tracnova.com/tracnova-pub/La%20Instrumentaci%F3n%20Virtual.pdf>)

- [7] FERNÁNDEZ, Javier
2011 “Programación en C” (En línea). Consulta 5 Abril 2012
(<http://aurea.es/wp-content/uploads/1-introduccionlenguajec.pdf>)
- [8] SANTOS, M.
2003 “Introducción al Matlab” (En línea). Consulta 5 Abril 2012
(http://www.fdi.ucm.es/profesor/msantos/manuales/int_matlab.pdf)
- [9] ROMERO TERNERO, María del Carmen
2004 “Transmisión de datos” (En línea). Consulta 14 Noviembre 2012
(<http://www.dte.us.es/personal/mcromero/docs/arc1/tema3-arc1.pdf>)

