

**MOTORES DE INDUCCIÓN. VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE  
ARRANQUE.**

**JAIME LÓPEZ ACOSTA  
ROQUE DAVID SÁNCHEZ AGUIRRE**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**MOTORES DE INDUCCIÓN. VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE  
ARRANQUE.**

**JAIME LÓPEZ ACOSTA  
ROQUE DAVID SÁNCHEZ AGUIRRE**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Electricistas**

**Director  
JULIO AUGUSTO GÉLVEZ FIGUEREDO  
Ingeniero Electricista, MPE.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## AGRADECIMIENTOS

“Agradezco a mis padres Jaime y Elsa siempre incondicionales por su apoyo, sus enseñanzas y su esfuerzo para hacer esto posible. Porque cada día se encargan de mostrarme un motivo para dar lo mejor y luchar por mis sueños. Gracias a mis hermanos Joselin y Luz Mery por ser ejemplo de trabajo, dedicación y sacrificio. A mis sobrinos José, Danna y Alejandra, quienes me sacan una sonrisa aun en los días difíciles. Gracias a Cristina Aparicio mi compañera de vida, quien ha sido fundamental en la consecución de este logro, pues en los días difíciles su sonrisa es la caricia que llena de calma mi alma y su mano el apoyo incondicional que me fortalece en cada paso de mi camino. Gracias a Roque Sánchez quien ha sido mi compañero y amigo durante todo mi proceso de formación universitario, por su entrega y dedicación que hicieron posible la realización de este trabajo. Gracias al profesor Julio Gélvez quien confió en nosotros, nos permitió ser parte de este trabajo y compartió su conocimiento. Porque más que un profesor es una gran persona y maestro. Gracias a todos mis amigos, porque a diario me recuerdan el valor de la amistad, cada uno tiene una cualidad especial que los hace únicos. Me gustaría nombrarlos a todos, pero no terminaría. Dicen que los verdaderos amigos se pueden contar con los dedos de la mano, pero los míos son muchos más. Esta pequeña meta, más que un logro personal significa la culminación de una etapa inspirada por todos mis seres queridos, quienes ven en mi la satisfacción del deber cumplido y quienes en algún momento dudaron de mis capacidades y me llevaron a mejorar para demostrar que podía lograrlo”

**JAIME**

“Darle gracias a mi familia, mi padre Roque, mi madre Nancy y mis hermanas Maty y Moni que siempre creyeron en mí y que nunca dudaron de mis capacidades.

Gracias mamá y papá siempre han sido un ejemplo a seguir, gracias por tanto sacrificio para conmigo, gracias por criarme y darme esta oportunidad de vida.

Gracias a Jaime López mi compañero de aprendizaje desde primer semestre y una amistad que espero dure toda la vida.

Gracias al profesor Julio Gélvez por el conocimiento que se obtiene al trabajar con él y por el tiempo que nos dedicó para realizar este trabajo de grado.

Gracias a todos los amigos que fueron parte de este proceso y que me ayudaron a culminar esta primera meta.

Para terminar solo expresar que este es el comienzo de obtener más conocimiento, que es lo que más deseo”.

**ROQUE**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	22
1. OBJETIVOS.....	23
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. REVISIÓN DEL TRABAJO DE GRADO “BANCO DE PRUEBAS DINÁMICO PARA ARRANCADORES DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO MEDIANTE EL SOFTWARE LABVIEW” .....	24
2.1 REVISIÓN DEL DOCUMENTO .....	24
2.1.1 Observaciones referentes a la prueba de resistencia del estator .....	24
2.1.2 Observación de la conexión del motor .....	25
2.1.3 Observación sobre la información del variador de velocidad .....	26
2.1.4 Observación referente a la medición de la velocidad.....	27
2.1.5 Observación a la configuración de la tarjeta de adquisición .....	27
2.1.6 Observación referente a la conexión de los elementos constituyentes del banco y manual de uso .....	28
2.2 REVISIÓN DEL BANCO .....	29
2.2.1 Diagnóstico de la disposición interna de los elementos del banco .....	29
2.2.2 Variador de velocidad .....	30
2.2.3 Organización externa del banco .....	31
2.3 REVISIÓN DEL PROGRAMA .....	32
2.3.1 Problema de comunicación entre la tarjeta de adquisición y el ordenador ...	32
3. REGISTRO DE LA SEÑAL DE CORRIENTE POR FASE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	34
3.1 ELEMENTOS REQUERIDOS PARA LA ADQUISICIÓN DE LAS SEÑALES DEL PRESENTE TRABAJO DE GRADO .....	34

3.1.1 Gabinete de arrancadores .....	34
3.1.2 Sondas de efecto hall .....	35
3.1.3 Tarjeta de adquisición .....	36
3.1.4 Caracterización de las sondas de efecto hall.....	37
3.2 PRUEBAS PARA CARACTERIZAR LOS PARÁMETROS DE LAS SONDAS DE EFECTO HALL .....	37
3.2.1 Sonda de efecto hall acs712elctr-30a-t de allegro microsystems .....	37
3.2.2 Sonda de efecto hall CSLA2CF de 0 a 125 a de micro Switch .....	40
3.3 PRUEBAS DE ARRANQUE DIRECTO .....	46
3.3.1 Sonda de efecto HALL ACS712ELCTR-30A-T.....	46
3.3.2 Sensor de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A.....	50
3.4 FACTOR DE RELACIÓN SENSOR DE EFECTO HALL CSLA2CF DE 0 A 125 A .....	54
4. DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LABVIEW.....	56
4.1 GENERALIDADES DEL PROGRAMA.....	56
4.1.1 Tarjeta de adquisición de datos: modo de empleo.....	56
4.1.2 Descripción de la secuencia lógica del programa desarrollado .....	60
4.1.3 Funciones y herramientas de LabVIEW usadas en el programa .....	61
4.2 REGISTRO DE LA CORRIENTE EN UNA FASE DURANTE EL ARRANQUE DEL MOTOR .....	62
4.2.1 Frecuencia de muestreo .....	62
4.2.2 Almacenamiento de las muestras .....	62
4.2.3 Cálculo del valor eficaz de la corriente durante el arranque directo.....	68
4.2.3.1 Posición del primer cruce por cero en el vector de muestras S .....	69
4.2.3.2 Cálculo del número de muestras por ciclo de la señal .....	70
4.2.3.3 Ecuación para calcular el valor eficaz de la corriente a partir del cruce por cero.....	71
4.2.3.4 Cálculo del valor eficaz de la corriente a partir del cruce por cero .....	72
4.2.4 Registro de la corriente en arranque estrella-triángulo .....	74
4.2.5 Registro de la corriente en arranque por variador de velocidad.....	76

4.2.5.1 Configuración del variador SINAMICS V20 SIEMENS.....	76
4.2.5.2 Filtrado de la señal.....	78
4.2.5.3 Cálculo del valor eficaz de la corriente durante el arranque con variador de velocidad.....	80
4.3 REGISTRO DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE PARA LAS TRES FASES .....	83
4.3.1 Adquisición de la señal .....	83
4.3.1.1 Muestreo por los tres canales .....	83
4.3.1.2 Frecuencia de muestreo .....	84
4.3.1.3 Adquisición y almacenamiento de las señales de corriente .....	86
4.3.2 Cálculo del valor eficaz de la corriente para las tres fases durante el arranque .....	87
4.3.3 Corriente máxima y relación de la corriente de arranque .....	87
4.4 REGISTRO DE LA VELOCIDAD DURANTE EL ARRANQUE .....	89
4.4.1 Registro de la señal de velocidad .....	89
4.4.2 Almacenamiento y gráfica de la velocidad .....	91
4.5 PANEL FRONTAL .....	93
5. ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS OBTENIDAS .....	95
5.1 ARRANQUE DEL MOTOR SIEMENS .....	95
5.1.1 Arranque directo .....	95
5.1.1.1 Análisis de la forma de onda, gráfica de corriente eficaz y velocidad obtenida .....	96
5.1.1.2 Cálculo de la corriente aproximada de arranque directo del motor SIEMENS.....	99
5.1.1.3 Comparación de la magnitud de la corriente obtenida durante el arranque directo con los valores de referencia .....	100
5.1.2 Arranque estrella-triángulo.....	102
5.1.2.1 Análisis de la forma de onda, gráfica de corriente eficaz y velocidad obtenida .....	102

5.1.2.2 Cálculo de la corriente aproximada de arranque estrella-triángulo del motor SIEMENS.....	107
5.1.2.3 Comparación de la magnitud de la corriente obtenida durante el arranque estrella-triángulo con los valores de referencia .....	108
5.1.3 Arranque por variador de velocidad .....	110
5.1.3.1 Análisis de la forma de onda, gráfica de corriente eficaz y velocidad obtenida .....	110
5.1.3.2 Comparación de la magnitud de la corriente obtenida durante el arranque por variador de velocidad con los valores de referencia.....	113
6. MANUAL DE USO DEL BANCO DE PRUEBAS DINÁMICO CON EL PROGRAMA VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE .....	116
6.1 INTRODUCCIÓN.....	116
6.2 OBJETIVO .....	116
6.3 DIRIGIDO A .....	116
6.4 REQUISITOS DEL PROGRAMA .....	117
6.5 TABLA DE COMPATIBILIDAD ENTRE LABVIEW Y NI-DAQMX .....	117
6.6 ELEMENTOS DE MANDO Y CONEXIONADO DISPONIBLES EN EL GABINETE.....	119
6.7 FUNCIONAMIENTO DEL MODO LOCAL .....	123
6.7.1 Descripción del modo local .....	123
6.8 USO DEL PROGRAMA PARA EL MOTOR SIEMENS DISPONIBLE EN EL BANCO DINÁMICO .....	124
6.8.1 Pasos generales .....	124
6.8.2 Arranque directo .....	128
6.8.3 Arranque estrella-triángulo.....	131
6.8.4 Arranque por variador .....	133
6.9 OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DINÁMICO CON EL PROGRAMA VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE PARA OTRO MOTOR DE INDUCCIÓN .....	135
6.9.1 Consideraciones para conectar un motor .....	135

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....	137
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
BIBLIOGRAFÍA.....	141
ANEXO .....	142

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Conexiones Típicas De Las Borneras.	25
Figura 2: Esquema De Bloques Del Variador Sinamics V20 Siemens.	26
Figura 3: Circuito Convertidor De Frecuencia Voltaje Lm2907.	27
Figura 4: Disposición Interna Del Banco De Arrancadores.	29
Figura 5: Identificación De Las Borneras Para Cada Tipo De Arranque.	31
Figura 6: Lógica Booleana De Las Entradas Digitales.	32
Figura 7: Esquema Implementado En El Laboratorio De Máquinas Para Realizar La Prueba De Sensibilidad.	38
Figura 8: A) Gráfica De La Prueba De Sensibilidad Para El Sensor Acs712elctr-30a- T. B) Gráfica Extraída Del Datasheet Del Sensor.	40
Figura 9: Imagen Del Sensor Csla2cf.	41
Figura 10: Gráfica De La Prueba De Sensibilidad Para La Sonda Csla2cf Con Una Vuelta Y Energizada A 8 Vdc.	43
Figura 11: Gráfica De La Prueba De Sensibilidad Para La Sonda Csla2cf Con Dos Y Tres Vueltas, Energizada A 8 Vdc.	44
Figura 12: Esquema Utilizado Para Realizar El Arranque Directo.	47
Figura 13: Display Del Osciloscopio Durante La Toma De Un Arranque Directo Con La Sonda Acs712elctr-30a-T Energizada A 5 Vdc.	47
Figura 14: Gráfica Obtenida Del Arranque Directo Al Motor De Lorenzo DI 1021n Con La Sonda Acs712elctr-30a-T Energizada A 5 Vdc Mediante Excel.	49
Figura 15: Display Del Osciloscopio Durante La Toma De Un Arranque Directo Con La Sonda Csla2cf De 0 A 125 A, Con Una Vuelta Y Energizada A 8 Vdc.	53
Figura 16: Gráfica Obtenida Del Arranque Directo Al Motor De Lorenzo DI 1021n Con La Sonda Csla2cf De 0 A 125, Con Una Vuelta Y Energizada A 8 Vdc Mediante Excel.	54

Figura 17: Entrada Analógica Diferencial.	57
Figura 18: Entrada Analógica Sin Referencia Común.	58
Figura 19: Entrada Analógica Con Referencia Común.	59
Figura 20: Diagrama De Bloques Del Programa En Labview.	60
Figura 21: Diagrama De Bloques Para La Adquisición Y El Almacenamiento De La Corriente En Una Sola Fase.	63
Figura 22: Configuración Del Daq Assistant Para Una Sola Fase.	64
Figura 23: Configuración De La Función Write To Measurement File.	65
Figura 24: Configuración De La Función Read From Measurement File.	66
Figura 25: Algoritmo Utilizado Para Registrar El Inicio De La Puesta En Marcha Del Motor.	67
Figura 26: Esquema Para El Muestreo Durante Dos Segundos.	68
Figura 27: Diagrama De Bloques Para El Cálculo Del Valor Eficaz De La Corriente.	69
Figura 28: Diagrama Para Determinar El Primer Cruce Por Cero.	70
Figura 29: Diagrama De Bloques Utilizado Para El Cálculo Del Valor Eficaz De La Corriente A Partir De Tener La Posición Del Primer Cruce Por Cero.	72
Figura 30: Gráfica Del Valor Rms Durante El Arranque Directo Del Motor Siemens.	74
Figura 31: Gráfica De La Corriente Durante El Arranque Estrella-Triángulo Para El Motor Siemens.	75
Figura 32: Diagrama De Bloques El Cual Se Utiliza Para Reconstruir El Vector De Muestras.	76
Figura 33: Gráfica De La Corriente Durante El Arranque Por Variador De Velocidad Para El Motor Siemens.	78
Figura 34: Sección Del Diagrama De Bloques Donde Se Presenta El Filtro Utilizado Para El Variador De Velocidad.	79
Figura 35: Configuración Del Filtro	80
Figura 36: Sección Del Diagrama De Bloques Para Determinar Todos Los Cruces Por Cero De La Señal De Corriente.	81

Figura 37: Diagrama De Bloques De La Sección Implementada Para Estimar La Variación Del Valor Rms Considerando El Cambio De La Frecuencia Durante La Puesta En Marcha Por El Variador De Velocidad.	82
Figura 38: Gráfica De La Forma En Que Muestra La Tarjeta De Adquisición.	83
Figura 39: Configuración Del Daq Assistant Para Tres Canales.	85
Figura 40: Etapa De Adquisición Y Almacenamiento Para Tres Canales.	86
Figura 41: Sección Del Diagrama De Bloques Para Obtener La Corriente Máxima Rms Y La Relación Entre Esta Y La Corriente Nominal Del Motor.	88
Figura 42: Montaje Del Sensor De Velocidad.	90
Figura 43: Circuito Integrado Lm2907 (Convertidor De Frecuencia A Tensión).	90
Figura 44: Diagrama En El Que Se Observa Donde Se Almacenan Las Diferentes Señales.	91
Figura 45: Diagrama Implementado Para Realizar La Gráfica De La Velocidad.	92
Figura 46: Panel Frontal Del Programa Elaborado En Labview.	93
Figura 47: Panel Frontal Del Programa “Visualización De La Corriente De Arranque” En La Ejecución De Un Arranque Directo.	96
Figura 48: Forma De Onda De La Corriente En Las Tres Fases Del Motor De Inducción Siemens Para Un Arranque Directo.	97
Figura 49: Gráfica De La Corriente Eficaz Por Fase Durante El Arranque Directo Del Motor Siemens.	98
Figura 50: Gráfica De La Velocidad Durante El Arranque Directo Del Motor Siemens Promediada Cada 1/60 Segundos.	99
Figura 51: Panel Frontal Del Programa “Visualización De La Corriente De Arranque” En La Ejecución De Un Arranque Estrella-Triángulo.	103
Figura 52: Forma De Onda De La Corriente En Las Tres Fases Del Motor De Inducción Siemens En Conexión Estrella Durante Un Arranque Estrella-Triángulo.	104
Figura 53: Forma De Onda De La Corriente En Las Tres Fases Del Motor De Inducción Siemens En La Conmutación De Estrella A Triángulo.	105

Figura 54: Gráfica De La Corriente Eficaz Por Fase Durante El Arranque Estrella-Triángulo Del Motor Siemens.	106
Figura 55: Gráfica De La Velocidad Durante El Arranque Estrella-Triángulo Del Motor Siemens Promediada Cada 1/60 Segundos.	107
Figura 56: Panel Frontal Del Programa “Visualización De La Corriente De Arranque” En La Ejecución De Un Arranque Por Variador De Velocidad.	110
Figura 57: Forma De Onda De La Corriente En Las Tres Fases Del Motor De Inducción Siemens Para Un Arranque Por Variador De Velocidad.	111
Figura 58: Gráfica De La Corriente Eficaz Por Fase Durante El Arranque Por Variador De Velocidad Del Motor Siemens.	112
Figura 59: Gráfica De La Velocidad Durante El Arranque Por Variador De Velocidad Del Motor Siemens Promediada Cada 1/60 Segundos.	113
Figura 60: Elementos Que Constituyen El Panel Frontal Del Banco De Arrancadores.	120
Figura 61: Software Labview.	125
Figura 62: Ventana De Labview, Para Abrir Un Archivo.	126
Figura 63: Ventana De Documentos Para Seleccionar El Archivo “Visualización De La Corriente De Arranque”.	127
Figura 64: Conexión Del Puerto Usb De La Tarjeta Ni 6008 Al Computador.	127
Figura 65: Conexión Para Realizar El Arranque Directo.	128
Figura 66: Sel_4 En La Posición De Arranque Directo.	129
Figura 67: Cuadro Para Ingresar El Arranque Directo Y La Corriente Nominal Del Motor De Inducción Utilizado.	129
Figura 68: Esquema Que Indica El Botón De Correr El Programa.	130
Figura 69: Conexión Para Realizar El Arranque Estrella-Triángulo.	131
Figura 70: Sel_4 En La Posición De Arranque Estrella-Triángulo.	131
Figura 71: Cuadro Para Ingresar El Arranque Estrella-Triángulo Y La Corriente Nominal Del Motor De Inducción Utilizado.	132
Figura 72: Esquema Que Indica El Botón De Correr El Programa.	132
Figura 73: Conexión Para Realizar El Arranque Por Variador De Velocidad.	133

Figura 74: Sel_4 En La Posición De Arranque Por Variador De Velocidad.	133
Figura 75: Cuadro Para Ingresar El Arranque Por Variador De Velocidad Y La Corriente Nominal Del Motor De Inducción Utilizado.	134
Figura 76: Esquema Que Indica El Botón De Correr El Programa.	134
Figura 77: Esquema Que Se Debe Utilizar Si La Tensión Nominal Del Motor Es Menor De 220 Volts.	135

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Entradas digitales de la tarjeta NI 6008.	28
Tabla 2: Parámetros y valores hallados en el variador de velocidad SINAMICS V20 SIEMENS.	30
Tabla 3: Elementos internos del tablero.	34
Tabla 4: Placa característica del motor de inducción SIEMENS 1LE0142-0DB36-4AA4-Z (Tomado textualmente de la placa).	35
Tabla 5: Características generales de los tipos de sensores utilizados.	36
Tabla 6: Características básicas de la tarjeta de adquisición NI 6008.	36
Tabla 7: Instrumentos y equipos implementados en el laboratorio de máquinas eléctricas.	37
Tabla 8: Valores de la prueba de sensibilidad para la sonda ACS712ELCTR-30A-T.	39
Tabla 9: Valores de la prueba de sensibilidad para el sensor CSLA2CF con una vuelta.	42
Tabla 10: Valores de la prueba de relación para el sensor CSLA2CF con dos y tres vueltas.	44
Tabla 11: Error relativo porcentual dependiendo del número de vueltas dadas a la sonda.	46
Tabla 12: Valores obtenidos de la prueba de arranque directo con la sonda ACS712ELCTR-30A-T, energizada a 5 Vdc.	49
Tabla 13: Valores obtenidos de la prueba de arranque directo con la sonda CSLA2CF DE 0 A 125 A, con dos vueltas y energizada a 8 Vdc.	51
Tabla 14: Valores obtenidos de la prueba de arranque directo con la sonda CSLA2CF DE 0 A 125 A, con una vuelta y energizada a 8 Vdc.	52

Tabla 15: Funciones y herramientas implementadas en el programa de LabVIEW.	61
Tabla 16: Configuración del variador SINAMICS V20 SIEMENS.	77
Tabla 17: Especificaciones del sensor de velocidad QRD1114 de DYNAMIC ELECTRONICS.	89
Tabla 18: Valores calculados por el programa “Visualización de la corriente de arranque” para la corriente máxima RMS y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, para el arranque directo.	101
Tabla 19: Valores promedio y errores relativos porcentuales de la corriente máxima y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, en el arranque directo.	101
Tabla 20: Valores calculados por el programa “Visualización de la corriente de arranque” para la corriente máxima RMS y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, para el arranque estrella-triángulo.	108
Tabla 21: Valores promedio y errores relativos porcentuales de la corriente máxima y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, en el arranque estrella-triángulo.	109
Tabla 22: Valores calculados por el programa “Visualización de la corriente de arranque” para la corriente máxima RMS, para el arranque por variador de velocidad.	114
Tabla 23: Valores promedio y errores relativos porcentuales de la corriente máxima, en el arranque por variador de velocidad.	114
Tabla 24: Compatibilidad entre la versión de LabVIEW y el driver correspondiente.	117

## LISTA DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
Ecuación 1: Resistencia del estator en conexión Y.	24
Ecuación 2: Resistencia del estator en conexión $\Delta$ .	24
Ecuación 3: Corriente pico para una onda senoidal pura.	39
Ecuación 4: Corriente pico para una onda senoidal pura que depende del número de vueltas que se le dé a la sonda.	41
Ecuación 5: Error relativo porcentual.	45
Ecuación 6: Relación dada por el fabricante.	55
Ecuación 7: Factor de relación.	55
Ecuación 8: Cálculo del número de muestras.	71
Ecuación 9: Cálculo de la corriente RMS a partir de muestras.	71
Ecuación 10: Límite inferior de la sumatoria.	72
Ecuación 11: Límite superior de la sumatoria.	72
Ecuación 12: Vector de muestras de velocidad.	92
Ecuación 13: Corriente de arranque para un motor de inducción.	99
Ecuación 14: Corriente de arranque para un motor de inducción en conexión estrella.	108

## RESUMEN

**TÍTULO:** MOTORES DE INDUCCIÓN. VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE\*.

**AUTORES:** JAIME LÓPEZ ACOSTA  
ROQUE DAVID SÁNCHEZ AGUIRRE\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Software LabVIEW, tarjeta de adquisición (DAQ), arranque del motor, arranque directo, arranque estrella-triángulo, arranque por variador de velocidad, motor de inducción, banco de pruebas dinámico, driver NI-DAQmx, Variador de velocidad, sonda de efecto hall.

### DESCRIPCIÓN:

La corriente de arranque en los motores de inducción alcanza un valor transitorio cuya magnitud y duración dependen del deslizamiento, el momento de inercia y el par de aceleración, típicamente se dice que es de 5 a 7 veces la corriente nominal. Este instante tiene gran impacto sobre el sistema al que se conecta la máquina de inducción. Actualmente el laboratorio de máquinas no cuenta con un equipo apropiado para medir y visualizar el comportamiento de dicha corriente, con lo cual, se trunca la posibilidad de obtener un mayor conocimiento respecto al funcionamiento del motor de inducción y se pierde la opción de un mejor aprovechamiento de los elementos disponibles en el laboratorio.

Con el presente trabajo de grado se pretende aprovechar la existencia del gabinete de arrancadores [1] que permite poner en marcha un motor de inducción trifásico en tres diferentes tipos de partida, por variador de velocidad, arranque estrella-triángulo y directo, además de visualizar las corrientes en la máquina desde el instante en que se energiza y durante un tiempo previamente programado (segundos), de esta manera permitir que los estudiantes de las asignaturas de máquinas eléctricas y accionamientos eléctricos puedan afianzar de mejor manera los conceptos relacionados con el arranque del motor de inducción.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Julio Augusto Gélvez Figueredo.

## ABSTRACT

**TITLE:** INDUCTION MOTORS. VISUALIZATION OF THE STARTING CURRENT \*.

**AUTHORS:** JAIME LÓPEZ ACOSTA  
ROQUE DAVID SÁNCHEZ AGUIRRE\*\*

**KEYWORDS:** LabVIEW Software, Data Acquisition (DAQ), motor starting, direct starting, star-triangle starting, induction motor, bank for dynamic testing engine starters, driver NI-DAQmx, Variable speed drive, Hall effect probe.

### DESCRIPTION:

The starting current in induction motors reaches a transient value whose magnitude and duration depends on the slip, the moment of inertia and the acceleration torque, typically is over 5 to 7 times the rated current. This instant has a great impact on the system to which the induction machine is connected. Currently the electrical machines laboratory does not have an appropriate equipment to measure and visualize this current. The condition mentioned before does not allow the possibility to obtain knowledge of the performance of the induction motor and the option of a better use of the elements available in the laboratory is not feasible.

The present work of degree pretends to take advantage of the existence of the cabinet starters [1] that allows to start a three-phase induction motor in three different types of starters: variable speed drive starter, star-triangle starter and direct starter. Also, visualize the instantaneous current in the energized machine during a programmed time. The visualization of the starting current will be done by the LabVIEW graphic instrumentation software and Data Acquisition NI 6008. With this tool the students of the subjects of electrical machines and electric drives will appropriate the concepts related to the start of an induction motor.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Julio Augusto Gélvez Figueredo.

## INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander es una de las instituciones de educación superior más destacadas del país por la capacidad, calidad y ética de sus egresados. La escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, en uno de sus laboratorios posibilita a los estudiantes formación en el área de las máquinas eléctricas.

Con la evolución de los variadores de velocidad y los diferentes métodos de arranque, la máquina asíncrona ha tomado gran importancia, puesto que uno de los principales problemas de su aplicación es el pico máximo de corriente alcanzado durante la puesta en marcha. Actualmente el laboratorio de máquinas eléctricas no cuenta con un instrumento adecuado para analizar el transitorio de la corriente del motor de inducción.

Con el desarrollo de este trabajo de grado, se busca suministrar un medio para visualizar la corriente de arranque de un motor de inducción disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas, de forma que los estudiantes tanto de esta materia como de accionamientos eléctricos puedan afianzar los conceptos teóricos mediante el contraste con situaciones reales. Se pretende aprovechar un banco de pruebas dinámico [1] desarrollado en un proyecto anterior para realizar diversos tipos de arranque y apreciar diferentes escenarios de puesta en marcha, con lo cual, los estudiantes tendrán una herramienta para interiorizar su conocimiento en motores de inducción.

El marco teórico utilizado en la elaboración del presente trabajo de grado no se incluye en este informe, puesto que dicha información está disponible en los diferentes textos de máquinas eléctricas, así como en el marco teórico de [1].

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Visualizar la forma de onda para la corriente de arranque de un motor de inducción trifásico del laboratorio de máquinas eléctricas aprovechando un gabinete existente que permite realizar tres tipos de arranque; arranque directo, arranque estrella-triángulo y por variador de velocidad.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Registrar la señal de corriente durante el arranque para las tres fases del motor de inducción trifásico.
- Desarrollar un programa en LabVIEW para visualizar la corriente del motor de inducción trifásico durante el arranque, inmediatamente después de la puesta en marcha.
- Comparar la magnitud de la corriente obtenida durante el arranque del motor de inducción respecto a los datos suministrados por la placa y a los valores obtenidos empleando la ecuación de la corriente de arranque que aparece en los textos de máquinas eléctricas.

## **2. REVISIÓN DEL TRABAJO DE GRADO “BANCO DE PRUEBAS DINÁMICO PARA ARRANCADORES DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO MEDIANTE EL SOFTWARE LABVIEW”**

### **2.1 REVISIÓN DEL DOCUMENTO**

Se realizó una revisión al documento del trabajo de grado para conocer en detalle el proyecto, los elementos que componen el gabinete de arrancadores, la implementación del mismo y su modo de uso. Se hacen algunas observaciones a la memoria escrita del proyecto [1] y al gabinete de arrancadores.

**2.1.1 Observaciones referentes a la prueba de resistencia del estator** En el documento se evidencia la realización de una serie de pruebas al motor de inducción SIEMENS ubicado junto al banco. Las pruebas realizadas fueron: prueba de resistencia del estator, prueba de rotor bloqueado y la prueba sin carga.

La prueba de resistencia del estator “Se realiza para determinar la resistencia de cada devanado de fase del estator, se mide la resistencia aplicando una tensión DC en cada bobina para obtener un valor de  $R_1$ ” [1].

**Ecuación 1: Resistencia del estator en conexión Y.**

$$R_1 = 0.5R_f \text{ en Y}$$

Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 27, Ecuación 8.

**Ecuación 2: Resistencia del estator en conexión  $\Delta$ .**

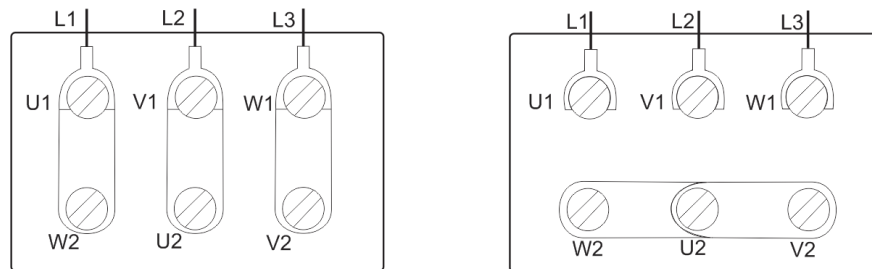
$$R_1 = 1.5R_f \text{ en } \Delta$$

Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 27, Ecuación 9.

En [1] se muestra la Ecuación 1 y la Ecuación 2, utilizadas en el cálculo de la resistencia del estator, no se indica el procedimiento realizado para obtener el valor de  $R_f$ .

**2.1.2 Observación de la conexión del motor** [1] presenta información acerca del tipo de conexiones que se pueden realizar para un motor de inducción. En la Figura 1 se muestra las conexiones disponibles.

**Figura 1: Conexiones típicas de las borneras.**

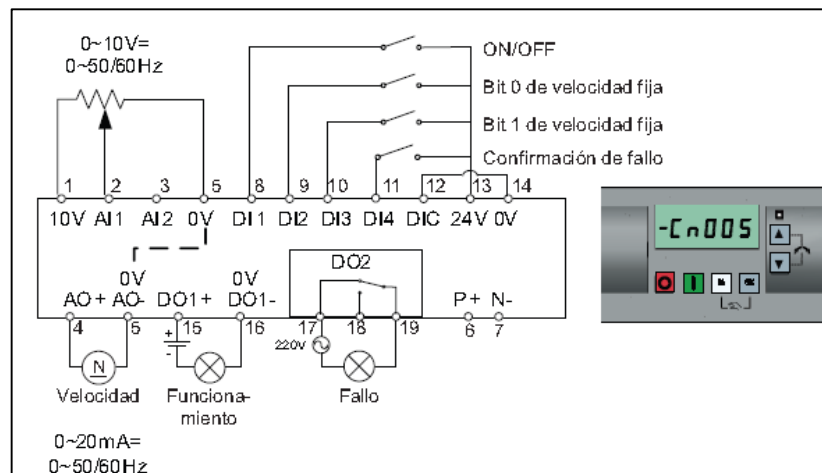


Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 35, Figura 10.

Para la ejecución de los diferentes arranques mediante el banco de pruebas dinámico se utilizó el motor SIEMENS, del cual no se hace claridad del tipo de conexión, ni la forma como unir los terminales para ejecutar los tres tipos de arranque. En la Figura 65, 69 y 73 del presente documento se muestran las conexiones que se deben realizar para los diferentes arranques.

**2.1.3 Observación sobre la información del variador de velocidad [1]** presenta información sobre variadores SINAMICS V20 de distintos tamaños (Tamaño de bastidor A, Tamaño de bastidor B y Tamaño de bastidor C). Se muestra el esquema de conexión de la Figura 2, pero no se hace claridad de la conexión utilizada en la implementación del banco de pruebas dinámico.

**Figura 2: Esquema de bloques del variador SINAMICS V20 SIEMENS.**



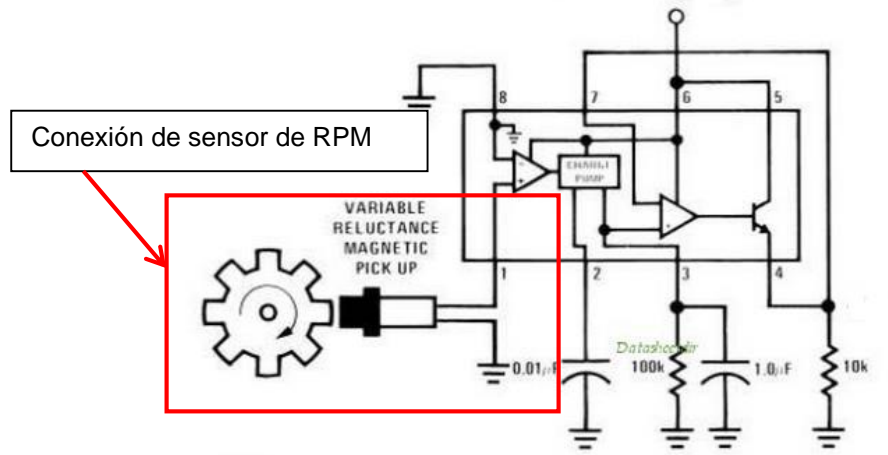
Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 50, Figura 21.

La información disponible en [1] no incluye los parámetros completos de la configuración realizada al variador, ni sus respectivos valores.

Se encontró una contradicción respecto del funcionamiento del variador, puesto que un objetivo del proyecto era: “Implementar un algoritmo en LabVIEW que permita realizar encendido/apagado e inversión de giro mediante un variador de velocidad en un motor de inducción trifásico”. Con la configuración del variador implementada para lograr dicho objetivo no se puede ejecutar el arranque con variador dispuesto en el modo de operación local del banco.

**2.1.4 Observación referente a la medición de la velocidad** En [1] se menciona un circuito dedicado a la medición de la velocidad, que se muestra en la Figura 3; donde se representa el diagrama esquemático de conexión del circuito.

**Figura 3: Circuito convertidor de frecuencia voltaje LM2907.**



Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 56, Figura 27.

Al revisar en [1] no se encontró información relacionada con el sensor de velocidad, ni las características eléctricas del circuito integrado conversor de frecuencia a tensión. La tarjeta dispuesta para entregar la salida de la velocidad en valores de tensión no funciona.

**2.1.5 Observación a la configuración de la tarjeta de adquisición** En [1] se muestra la Tabla 1, donde se enumeran las diferentes entradas digitales empleadas en la tarjeta DAQ NI 6008, dispuesta en el gabinete de arrancadores.

**Tabla 1: Entradas digitales de la tarjeta NI 6008.**

<b>Entradas Digitales</b>	<b>Pin</b>	<b>Notación</b>
Parada de emergencia	P0-5	PE
Arranque directo	P0-4	R1
Arranque estrella-triángulo	P0-3	R2
Arranque con variador	P0-2	R3
Sistema en modo local	P0-1	SW1
Sistema en modo remoto	P0-0	SW2

Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 66, Tabla 11.

La información correspondiente a las diferentes entradas analógicas y su respectiva configuración no se encuentra registrada en las memorias del proyecto.

**2.1.6 Observación referente a la conexión de los elementos constituyentes del banco y manual de uso** En [1] se muestra a manera de anexos los circuitos de potencia y control del banco de prueba dinámico, pero no se registra la existencia del plano de conexiones de los elementos eléctricos que conforman el gabinete.

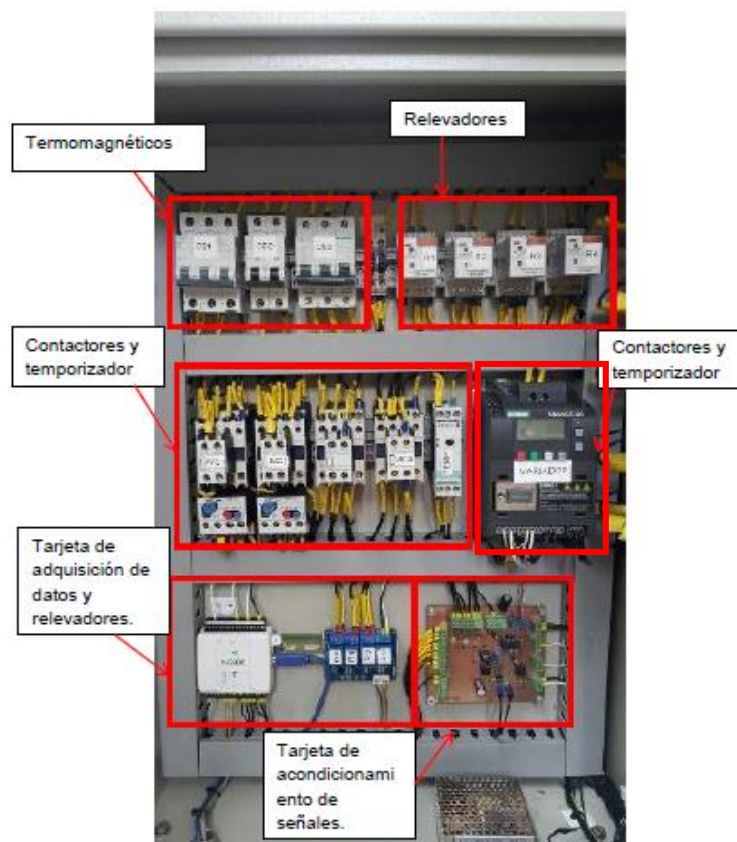
En [1] se presenta un guía para realizar prácticas en el gabinete, pero en ningún aparte del documento se especifica la forma a realizar el conexionado de los bornes en el tablero de conexiones del banco para cada tipo de arranque.

## 2.2 REVISIÓN DEL BANCO

Se llevo a cabo una revisión del estado y funcionamiento de los elementos constituyentes del banco de arrancadores.

**2.2.1 Diagnóstico de la disposición interna de los elementos del banco** Se realizó un diagnóstico del estado y la configuración interna de los elementos del banco de pruebas dinámico. En la Figura 4 se muestra la disposición interna del gabinete.

**Figura 4: Disposición interna del banco de arrancadores.**



Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 65, Figura 34.

En la Figura 4 se presenta la configuración interna registrada [1], donde no se especifican los disyuntores termomagnéticos ni el variador de velocidad. En su configuración interna el banco esta seccionado por seis bloques, un bloque de interruptores termomagnéticos, uno de relés, uno de contactores y temporizadores, el variador de velocidad, la tarjeta de adquisición y la tarjeta de acondicionamiento de las señales.

**2.2.2 Variador de velocidad** Se llevo a cabo la verificación de los parámetros de configuración del variador de velocidad, donde se encontraron algunas inconsistencias en la programación. La Tabla 2 muestra los parámetros y valores encontrados en el variador de frecuencia.

**Tabla 2: Parámetros y valores hallados en el variador de velocidad SINAMICS V20 SIEMENS.**

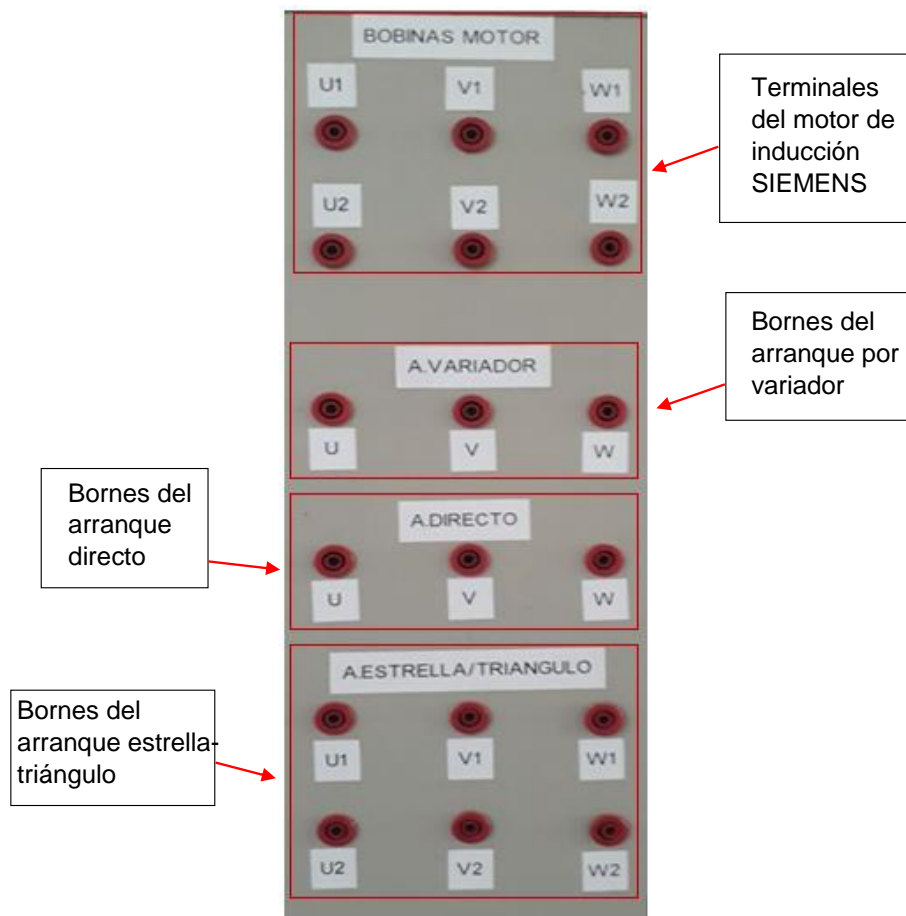
Parámetro	Significado	Valor Encontrado
P0003	Nivel de acceso de usuario	3
P0004	Filtro de parámetros	3
P0100	Modo de operación Europea/ USA	1
P0304	Tensión nominal del motor [V]	230
P0305	Corriente nominal del motor [A]	0,61
P0307	Potencia nominal del motor	1 hp
P0308	Factor de potencia nominal del motor	0,886
P0309	Eficiencia nominal del motor [%]	95
P0310	Frecuencia nominal del motor	60
P0311	Velocidad nominal del motor [RPM]	1680
P0700	Selección de fuentes de señales de mando	3
P0701	Función de la entrada digital 1	12
P1000	Selección de consigna de frecuencia	2
P1080	Frecuencia mínima [Hz]	0
P1082	Frecuencia máxima [Hz]	60
P1120	Tiempo de aceleración [s]	0,5
P1121	Tiempo de desaceleración [s]	0,5

Fuente: Los autores.

Al examinar los valores asignados a los parámetros del variador se pudo observar que algunos de estos datos no coincidían con los datos de placa del motor SIEMENS (Tabla 4), como son los datos de tensión nominal, corriente nominal, factor de potencia nominal, eficiencia nominal y la velocidad nominal del motor (Enmarcados en rojo).

**2.2.3 Organización externa del banco** El banco de pruebas dinámico posee en su parte lateral derecha un tablero de conexiones. En la Figura 5 se distinguen los bornes dispuestos para cada uno de los arranques, así como los terminales del motor de inducción.

**Figura 5: Identificación de las borneras para cada tipo de arranque.**



Fuente: Los autores.

La configuración de los bornes de conexión resulta poco eficiente, puesto que lo que se esperaría de un banco de arrancadores es una menor intervención del operario.

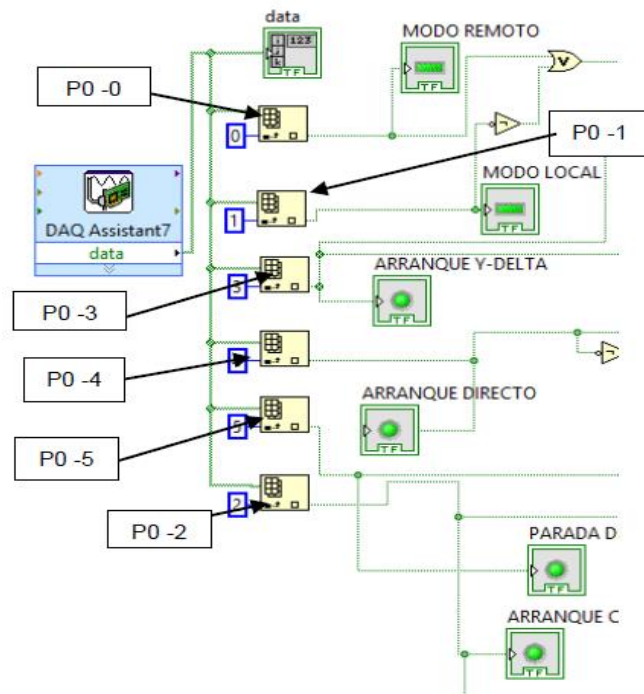
## 2.3 REVISIÓN DEL PROGRAMA

En el archivo asociado a [1] se muestra que uno de los propósitos por los cuales se desarrolló este gabinete, era su control empleando el software LabVIEW.

### 2.3.1 Problema de comunicación entre la tarjeta de adquisición y el ordenador

Para la inspección del programa adjunto en el CD que contiene [1] facilitado por biblioteca UIS, se conectó la tarjeta de adquisición de datos y se ejecutó dicho programa. Se encontró que las salidas digitales mencionadas en [1] (Tabla 1) no corresponden a la conexión realizada.

**Figura 6: Lógica booleana de las entradas digitales.**



Fuente: Trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”, página 74, Figura 40.

En la Figura 6 se muestra el diagrama de bloques de LabVIEW usado para controlar el funcionamiento del gabinete de forma remota. Se intentó ejecutar este programa y se encontró que el software de instrumentación gráfico reporta un error. Cada vez que los contactores conmutaban se pierde la comunicación entre la tarjeta de adquisición y el ordenador.

En conclusión, no se pudo verificar el correcto funcionamiento del programa desarrollado en LabVIEW.

### 3. REGISTRO DE LA SEÑAL DE CORRIENTE POR FASE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

#### 3.1 ELEMENTOS REQUERIDOS PARA LA ADQUISICIÓN DE LAS SEÑALES DEL PRESENTE TRABAJO DE GRADO

**3.1.1 Gabinete de arrancadores** En la implementación del presente trabajo de grado se aprovechó el gabinete de arrancadores existente en el laboratorio de máquinas eléctricas, el cual ofrece la opción de llevar a cabo tres tipos diferentes de arranque para el motor de inducción. En la Tabla 3 se enlistan los principales elementos que constituyen el gabinete de arrancadores.

**Tabla 3: Elementos internos del tablero.**

No	Elementos	Cantidad
1	Tarjeta de Adquisición NI 6008	1
2	Juego de relevadores de 5 V , 4 canales, marca songle	1
3	Interruptor termomagnético siemens 3x32 Ref: 5SY6332-7	1
4	Interruptor termomagnético siemens 2x16 Ref: 5SY6216-7	1
5	Interruptor termomagnético siemens 3x16 Ref: 5SY6316-7	1
6	Acople térmico para contactor Chint	2
7	Bloque aditivo de contactos auxiliares 1No 1Nc Ref: 3SB3400-0A	3
8	Bloque aditivo de contactos auxiliares 1Nc Ref: 3SB3400-0C	1
9	Relé de 11 pines Siemens de 220Vac Ref: REV0017	4
10	Contactores 18-10 Chint de 220V	4
11	Relé de tiempo Siemens Ref: 3RP1512-1AP30	1

No	Elementos	Cantidad
12	Variador Sinamics V20 Siemens SNC-A5E03262889 Ref:	1
13	Fuente de 220V/12 V	1
14	Sonda de efecto Hall ACS712ELTCR-30A-T	1
15	Sensor QRD1114 DYNAMIC ELECTRONICS	1

Fuente: Los autores.

Además de los elementos ya mencionados también se utilizó un motor de inducción SIEMENS, cuyas principales especificaciones aparecen en la Tabla 4.

**Tabla 4: Placa característica del motor de inducción SIEMENS 1LE0142-0DB36-4AA4-Z (Tomado textualmente de la placa).**

3~MOT. 1LE0142-0DB36-4AA4-Z			80M IM B3 IP 55		LMH-1506/800011683230/009		
V	Hz	HP	A	EFF	cos $\phi$	r/min	EFF.C1
220/380DD/YY	60	1	3,15/1,82	77,00%	0,81	1710	IE1
440D	60	1	1,57	77,00%	0,81	1710	IE1
ROD LA 6204 2Z C3			ROD LNA 6204 2Z C3		Aisl. F	AMB 40°C	
0CV1083B			IEC 60034		S1	Tarr/Tn: 2,0	
Peso neto: 16,5 Kg					SF1,15	Iarr/In: 6,0	

Fuente: Los autores.

**3.1.2 Sondeas de efecto hall** En el registro y almacenamiento de las muestras de las señales de corriente se utilizaron sensores de efecto hall. Para este trabajo de grado se consideraron dos opciones: La sonda de efecto hall ACS712ELCTR-30A-T de Allegro MicroSystems [2] y la sonda de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A de Micro Switch [3], cuyas características generales se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5: Características generales de los tipos de sensores utilizados.**

Especificaciones	CSLA2CF	ACS712ELCTR-30A-T
Fabricante	Micro Switch	Allegro MicroSystems
Tipo de corriente detectada	ac or dc	ac or dc
Rango de corriente detectada	0 A to 125 A	0 A to 30 A
Tipo de salida	Voltage	Voltage
Sensibilidad	19.6 mV N* ± 1.3 @ 8 Vdc	66 mV/A
Corriente de suministro	20 mA max	11 mA max
Tensión de alimentación	5.4 Vdc to 13.2 Vdc	4.5 Vdc to 5.5 Vdc
Tiempo de respuesta	3 µs	7 µs
Rango de temperatura de funcionamiento	-25 °C to 85 °C	-40 °C to 85 °C

Fuente: Los autores.

La sonda ACS712ELCTR-30A-T estaba disponible en el gabinete de arrancadores, mientras que las sondas de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A se compraron a la empresa MOUSER ELECTRONICS.

**3.1.3 Tarjeta de adquisición** La obtención de las señales de corriente se realizó empleando la tarjeta de adquisición NI 6008 de National Instruments [4], esta permite hacer la adquisición de señales analógicas y digitales. La principal ventaja de su utilización es la facilidad de poder elaborar un programa en LabVIEW para procesar la información registrada. En la Tabla 6 se presentan sus características básicas.

**Tabla 6: Características básicas de la tarjeta de adquisición NI 6008.**

Entradas analógicas	Resolución de entrada (bits)	Frecuencia de muestreo máximo (kS/s)	Salidas Analógicas	Resolución de salida (bits)	Tasa de salida (Hz)	Líneas de E/S digitales	Contador de 32 bits	Triggering
8 single-ended/4 differential	12	10	2	12	150	12	1	Digital

Fuente: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>.

**3.1.4 Caracterización de las sondas de efecto hall** En el presente proyecto se ejecutaron pruebas de caracterización de las sondas para su aplicación en una carga continua y en el arranque directo del motor de inducción. En estos ensayos se usaron algunos equipos disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas, los cuales se listan en la Tabla 7.

**Tabla 7: Instrumentos y equipos implementados en el laboratorio de máquinas eléctricas.**

No	Elemento	Referencia
1	Autotransformador DE LORENZO HTN450/8	75539
2	Bombillos incandescentes	-
3	Fuente de corriente continua BK PPRECISION 1672	86767
4	Motor de inducción DE LORENZO DL 1021N	75563
5	Multímetro Fluke 117 TRUE RMS	129047
6	Osciloscopio GW INSTEK GDS-2082	86663
7	Pinza amperimétrica AMPROBE AMP-320	131370
8	Tacómetro UNI-T UT372	H150674547

Fuente: Los autores.

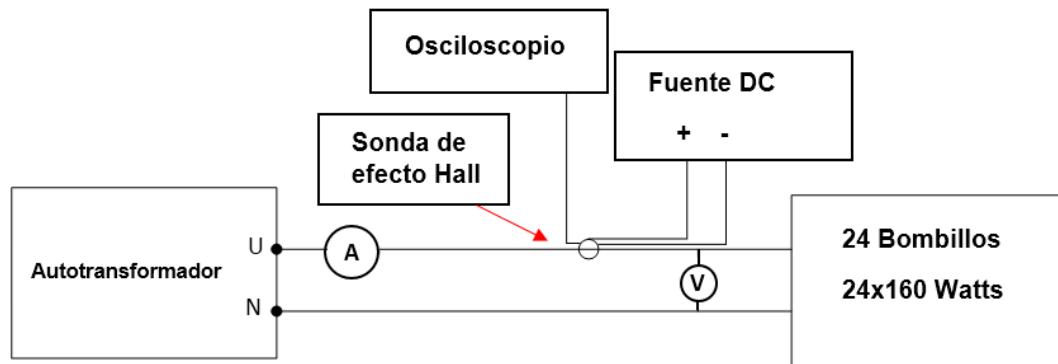
### **3.2 PRUEBAS PARA CARACTERIZAR LOS PARÁMETROS DE LAS SONIDAS DE EFECTO HALL**

En la fase preliminar al desarrollo del trabajo se llevó a cabo la caracterización de los parámetros de las sondas de efecto hall a implementar en el gabinete. Para esto se utilizó un arreglo de cargas compuesto por 24 bombillos incandescentes, cada uno de 160 Watts de potencia, 230 volts de tensión nominal, disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad Industrial de Santander.

**3.2.1 Sonda de efecto hall acs712elctr-30a-t de allegro microsystems** Se llevó a cabo la prueba para corroborar la información disponible en el datasheet correspondiente a la sensibilidad de la sonda de efecto hall ACS712ELCTR-30A-T. La sensibilidad es la relación entre la corriente pico sensada y la tensión pico a la

salida del sensor. En esta prueba se realizó el montaje que se muestra en la Figura 7.

**Figura 7: Esquema implementado en el laboratorio de máquinas para realizar la prueba de sensibilidad.**



Fuente: Los autores.

En este ensayo, se conectó directamente la carga al autotransformador, la sonda se energizó con una fuente de corriente continua a 5 volts y la salida del sensor se monitoreó por medio del osciloscopio. La tensión del autotransformador se varió de 0 a 130 volts RMS, de manera que la corriente alcanzara el valor máximo 8 amperes, en pasos de 0,5 amperes aproximadamente. Las medidas registradas de la prueba fueron: La corriente eficaz que circula por los conductores de la carga, la tensión eficaz en la salida de la sonda y la tensión pico a pico en la salida de la sonda (Sin componente continua).

Para la estimación del valor pico a partir del valor eficaz de la corriente, se utilizó la aproximación del factor de amplitud ( $F_A = \sqrt{2}$ ) aplicable a una onda senoidal pura, debido a que la carga es netamente resistiva. En el cálculo del valor pico se usó la Ecuación 3.

**Ecuación 3: Corriente pico para una onda senoidal pura.**

$$I_p = F_A * I_{RMS} [A]$$

Fuente: Los autores.

Donde  $I_p$  es la corriente pico en amperes e  $I_{RMS}$  el valor eficaz de la corriente en amperes. Los datos medidos y calculados en esta prueba se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8: Valores de la prueba de sensibilidad para la sonda ACS712ELCTR-30A-T.**

Valores medidos			Valores calculados	
Vrms (mV) Sonda	Vpp (mV) Sonda	Irms (A) Carga	Vp(mv) <sup>1</sup>	Ip(A)
115,00	340,00	1,03	170,00	1,46
165,00	472,00	1,52	236,00	2,15
220,00	632,00	2,07	316,00	2,93
267,00	760,00	2,47	380,00	3,49
322,00	904,00	2,99	452,00	4,23
379,00	1080,00	3,54	540,00	5,01
422,00	1220,00	4,01	610,00	5,67
475,00	1360,00	4,50	680,00	6,36
527,00	1520,00	5,00	760,00	7,07
582,00	1680,00	5,50	840,00	7,78
642,00	1840,00	6,01	920,00	8,50
694,00	1960,00	6,51	980,00	9,21
746,00	2120,00	7,02	1060,00	9,93
797,00	2240,00	7,50	1120,00	10,61
855,00	2420,00	8,02	1210,00	11,34

Fuente: Los autores.

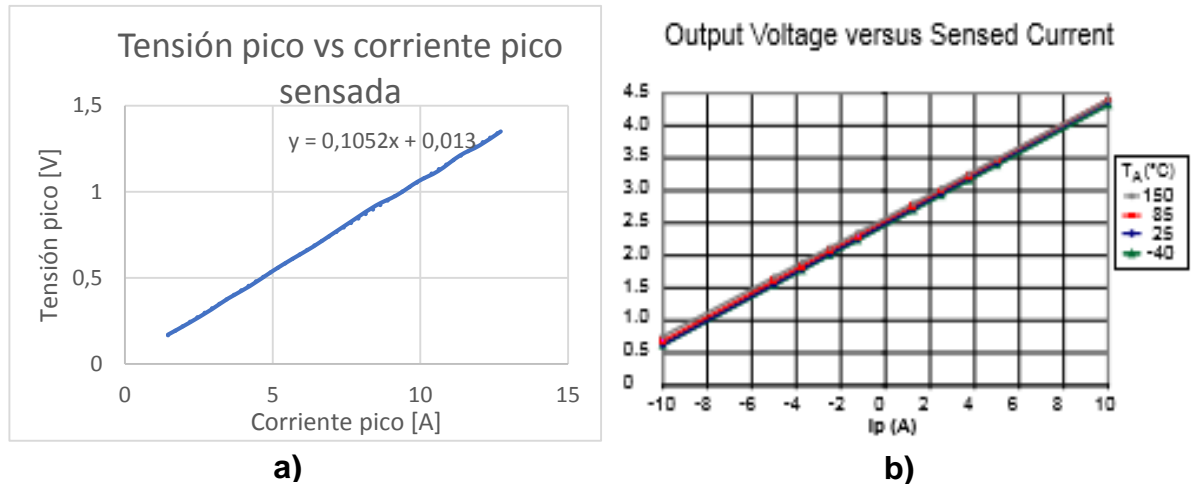
Con base en los datos obtenidos en el ensayo, por medio de una regresión lineal se encontró la relación de tensión pico de salida respecto a la corriente pico medida

---

<sup>1</sup> Donde  $V_p = V_{pp}/2$

por la sonda, esta se muestra en la Figura 8 a). La Figura 8 b) presenta la información suministrada por el fabricante Allegro Microsystems [2] respecto a esta relación (Medida con la componente de continua).

**Figura 8: a) Gráfica de la prueba de sensibilidad para el sensor ACS712ELCTR-30A- T. b) Gráfica extraída del datasheet del sensor.**



Fuente: a) Los autores.

b) <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.

La sensibilidad obtenida para el sensor de efecto hall ACS712ELCTR-30A-T no coincide con la suministrada por el fabricante, la cual se observa en la Tabla 5. Esta presenta mayor similitud a la sensibilidad de un sensor de efecto hall ACS712ELCTR-20A-T del mismo fabricante, pero con capacidad de corriente menor.

**3.2.2 Sonda de efecto hall CSLA2CF de 0 a 125 a de micro Switch** Al sensor de efecto hall CSLA2CF de 0 a 125 A se le realizó la misma prueba. Debido a las características constructivas y eléctricas de esta sonda se ejecutaron tres pruebas; se realizó el ensayo con una, dos y tres vueltas del conductor a través de la sonda.

**Figura 9: Imagen del sensor CSLA2CF.**



Fuente: GALCO [en línea] disponible en: <https://www.galco.com/buy/Honeywell-Microswitch/CSLA2CF>.

En este ensayo se le dio una vuelta al toroide con el alimentador de la carga resistiva, esto con el fin de multiplicar por dos la corriente por el conductor; puesto que la fuente disponible en el laboratorio tiene una capacidad máxima de 8 amperes RMS, valor que resulta pequeño respecto de la capacidad máxima de la sonda que es de 125 amperes pico. La sonda se energizó con una fuente de corriente continua a 8 volts, ya que la sensibilidad nominal de esta viene dada para dicho valor de tensión (ver Tabla 5). Las medidas registradas de la prueba fueron: La corriente eficaz que circula por los conductores de la carga, la tensión eficaz en la salida de la sonda y la tensión pico a pico en la salida de la sonda (ver Figura 7).

Los datos medidos de la prueba se registran en la Tabla 9, donde además se muestra el valor pico de la tensión y el valor pico de la corriente sensada por la sonda. La corriente pico se calculó por medio de la Ecuación 4.

**Ecuación 4: Corriente pico para una onda senoidal pura que depende del número de vueltas que se le dé a la sonda.**

$$I_p = F_M * F_A * I_{RMS}$$

Fuente: Los autores.

Donde  $I_p$  es la corriente pico real medida por la sonda en amperes,  $F_A$  es el factor de amplitud para ondas senoidales puras,  $I_{RMS}$  es la corriente eficaz en amperes medida en el conductor que energiza la carga y  $F_M$  es el factor que incluye el efecto multiplicador causado por el número de vueltas a la sonda. En este caso  $F_M$  es 2 (Número de vueltas más 1).

**Tabla 9: Valores de la prueba de sensibilidad para el sensor CSLA2CF con una vuelta.**

Valores medidos			Valores calculados	
$I_{rms}$ (A) Carga	$V_{pp}$ (mV) Sonda	$V_{rms}$ (mV) Sonda	$I_p(A)^2$	$V_p(mV)^3$
0,64	96,00	27,50	1,81	48,00
1,06	133,00	44,30	3,00	66,50
1,53	196,00	64,60	4,33	98,00
2,03	244,00	84,10	5,74	122,00
2,50	320,00	101,00	7,07	160,00
3,00	350,00	121,00	8,49	175,00
3,53	396,00	142,00	9,98	198,00
4,01	448,00	157,00	11,34	224,00
4,49	500,00	176,00	12,70	250,00
5,00	556,00	191,00	14,14	278,00
5,50	608,00	216,00	15,56	304,00
6,01	660,00	237,00	17,00	330,00
6,52	736,00	258,00	18,44	368,00
7,05	784,00	279,00	19,94	392,00
7,51	840,00	297,00	21,24	420,00
8,03	888,00	315,00	22,71	444,00

Fuente: Los autores.

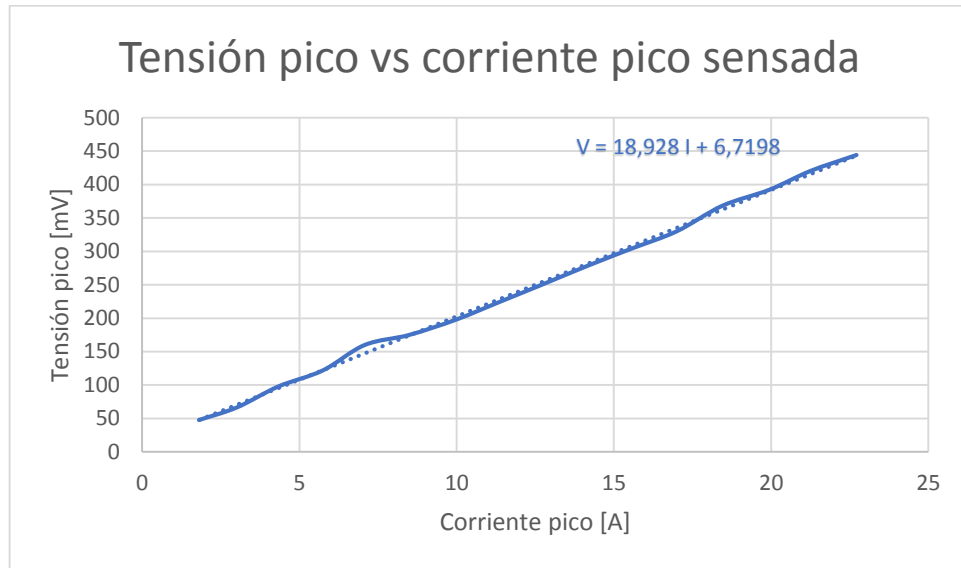
En la Figura 10 se muestra la gráfica de los valores calculados de tensión pico respecto a los calculados de corriente pico (Tabla 9). A partir de estos datos se

<sup>2</sup>  $I_p(A)=2*(I \text{ pico en el conductor})$

<sup>3</sup> Donde  $V_p=V_{PP}/2$

realizó una regresión para estimar la sensibilidad de la sonda en las condiciones de la prueba (Una vuelta del alimentador de la carga a través de la sonda).

**Figura 10: Gráfica de la prueba de sensibilidad para la sonda CSLA2CF con una vuelta y energizada a 8 Vdc.**



Fuente: Los autores.

La relación de salida que se obtuvo fue:  $V = 18,928 I + 6,7198$ , donde “I” es la corriente instantánea en amperes que pasa por el conductor que atraviesa la sonda y “V” la tensión pico en la salida de la sonda en milivolts.

Se ejecutó la misma prueba con dos y tres vueltas del alimentador de la carga a través de la sonda. Se calcularon los valores de tensión pico y corriente pico por medio de la ecuación 4 ( $F_M=3$  para dos vueltas y  $F_M=4$  para tres vueltas). Los datos medidos de la prueba y los valores calculados se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10: Valores de la prueba de relación para el sensor CSLA2CF con dos y tres vueltas.**

2 Vueltas					3 Vueltas				
Valores medidos			Valores calculados		Valores medidos			Valores calculados	
I <sub>rms</sub> (A) Carga	V <sub>pp</sub> (mV) Sonda	V <sub>rms</sub> (mV) Sonda	I <sub>p</sub> (A) <sup>4</sup>	V <sub>p</sub> (mV) <sup>5</sup>	I <sub>rms</sub> (A) Carga	V <sub>pp</sub> (mV) Sonda	V <sub>rms</sub> (mV) Sonda	I <sub>p</sub> (A)	V <sub>p</sub> (mV)
2,50	436,00	155,00	10,61	218,00	2,49	564,00	197,00	14,09	282,00
3,00	524,00	185,00	12,73	262,00	3,00	688,00	239,00	16,97	344,00
3,51	612,00	217,00	14,89	306,00	3,45	784,00	279,00	19,52	392,00
4,01	696,00	245,00	17,01	348,00	3,95	888,00	315,00	22,34	444,00
4,50	784,00	279,00	19,09	392,00	4,47	992,00	357,00	25,29	496,00
5,01	872,00	310,00	21,26	436,00	5,02	1110,00	400,00	28,40	555,00
5,53	960,00	341,00	23,46	480,00	5,54	1230,00	440,00	31,34	615,00
6,00	1030,00	370,00	25,46	515,00	6,02	1340,00	472,00	34,05	670,00
6,52	1120,00	399,00	27,66	560,00	6,54	1460,00	516,00	37,00	730,00
7,01	1190,00	427,00	29,74	595,00	7,05	1600,00	560,00	39,88	800,00
7,51	1280,00	459,00	31,86	640,00	7,59	1720,00	601,00	42,94	860,00
8,03	1360,00	491,00	34,07	680,00	8,04	1840,00	646,00	45,48	920,00

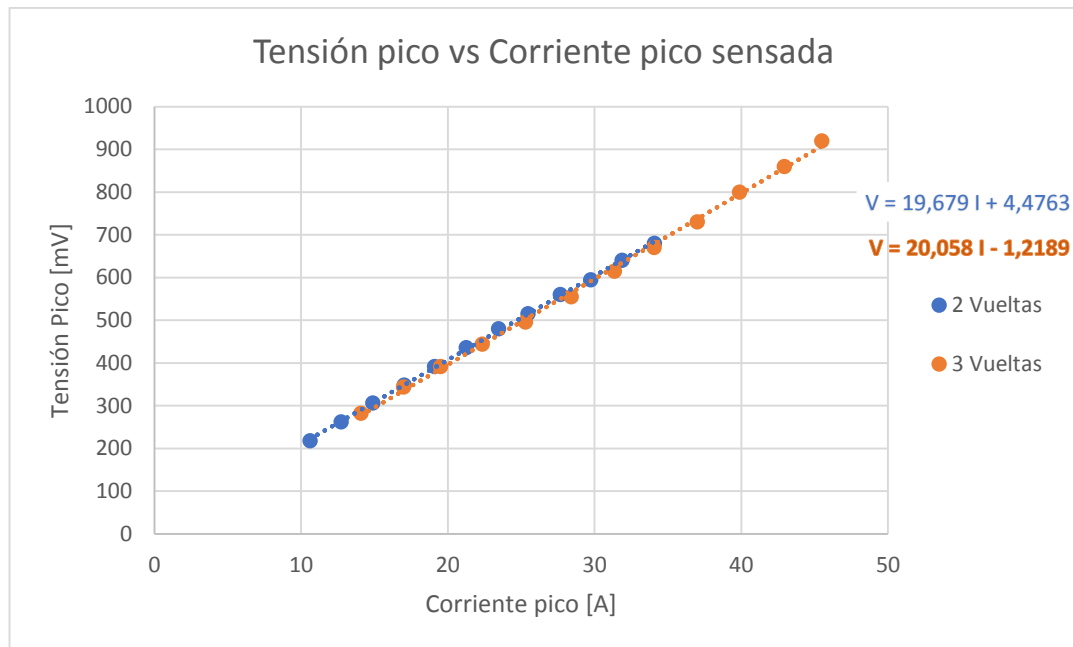
Fuente: Los autores.

En la Figura 11 se presentan las gráficas de los valores calculados de tensión pico respecto a los calculados de corriente pico (Tabla 10), para la prueba con dos y tres vueltas. A partir de estos datos se realizó una regresión para estimar la sensibilidad de la sonda en los dos casos (Con dos y tres vueltas del alimentador de la carga a la sonda).

**Figura 11: Gráfica de la prueba de sensibilidad para la sonda CSLA2CF con dos y tres vueltas, energizada a 8 Vdc.**

<sup>4</sup>  $I_p(A)=3*(I \text{ pico en el conductor})$

<sup>5</sup> Donde  $V_p=V_{pp}/2$



Fuente: Los autores.

Las relaciones de salida que se obtuvieron fueron:  $V = 19,679 I + 4,4763$  y  $V = 20,058 I - 1,2189$ , para dos y tres vueltas respectivamente. Donde “I” es la corriente instantánea en amperes que pasa por el conductor que atraviesa la sonda y “V” la tensión pico en la salida de la sonda en milivolts.

Con los valores obtenidos de la sensibilidad en los tres ensayos para la sonda de efecto hall CSLA2CF de 0 a 125 A se calculó el error relativo porcentual por medio de la Ecuación 5 .

**Ecuación 5: Error relativo porcentual.**

$$ER_{\%} = \left| \frac{V_R - V_E}{V_R} \right| * 100$$

Fuente: Osorio, Carlos. “ Manual de laboratorio de electromagnetismo, vibraciones & ondas “. Universidad Industrial de Santander.

Donde  $ER_{\%}$  es el error relativo porcentual,  $V_R$  es el valor de referencia (Sensibilidad nominal de la sonda, Tabla 5) y  $V_E$  es el valor experimental (Sensibilidad estimada

por medio de las regresiones). Los valores calculados de la sensibilidad y el error relativo porcentual se observan en la Tabla 11.

**Tabla 11: Error relativo porcentual dependiendo del número de vueltas dadas a la sonda.**

<b>Sensor</b>			
<b>Número de vueltas</b>	<b>Valor de referencia (mV/A)</b>	<b>Valor experimental (mV/A)</b>	<b>Error relativo porcentual (%)</b>
1	19,600	18,928	3,429
2	19,600	19,679	0,403
3	19,600	20,058	2,337

Fuente: Los autores.

Con esta prueba se corrobora la veracidad de la información proporcionada por el fabricante (Micro Switch) y la conveniencia de usar dos vueltas en la implementación del proyecto para duplicar la corriente que sensa la sonda, puesto que en este caso se obtuvo el menor porcentaje de error (0,403%).

### **3.3 PRUEBAS DE ARRANQUE DIRECTO**

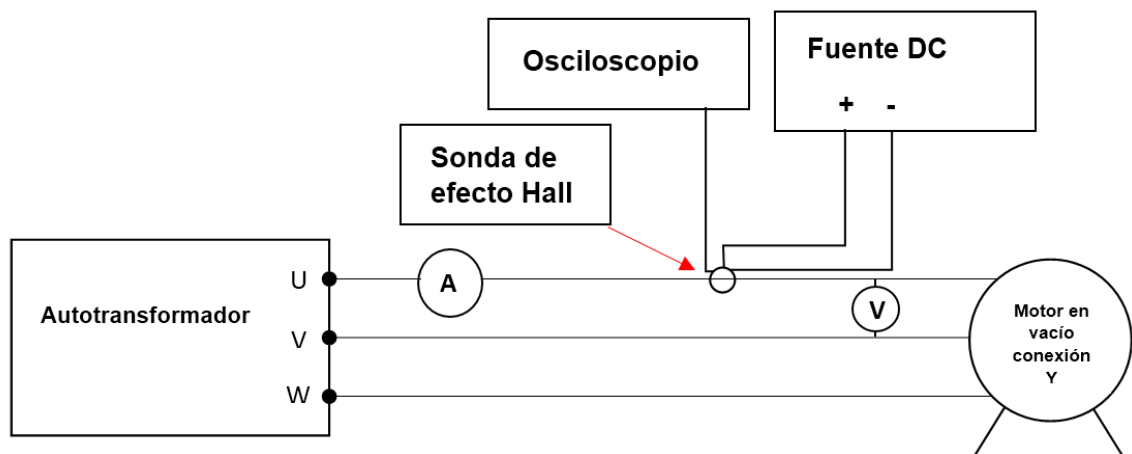
En el caso de este trabajo de grado, se observa el comportamiento de la corriente durante la puesta en marcha de un motor de inducción para tres tipos de arranque; arranque estrella-triángulo, con variador de velocidad y arranque directo. Con el fin de elegir las sondas apropiadas para el registro de la señal de corriente, se ejecutaron pruebas de arranque directo, ya que durante este la máquina se pone en marcha de forma plena, es decir se presenta el pico máximo posible de corriente.

**3.3.1 Sonda de efecto HALL ACS712ELCTR-30A-T** Para verificar la conveniencia de emplear la sonda de efecto hall ACS712ELCTR-30A-T se ejecutó un ensayo en

el laboratorio de máquinas eléctricas, en el cual se puso en marcha en vacío el motor DE LORENZO DL 1021N de forma directa, en repetidas ocasiones. En cada toma se midió la tensión pico máxima en los terminales de la sonda, la tensión eficaz de línea en los bornes de la máquina, la corriente eficaz y la velocidad del motor en régimen estable operando en vacío. Los valores medidos se muestran en la Tabla 12.

En la Figura 12 se ilustra el esquema de conexión para los distintos elementos implementados en la prueba de arranque directo.

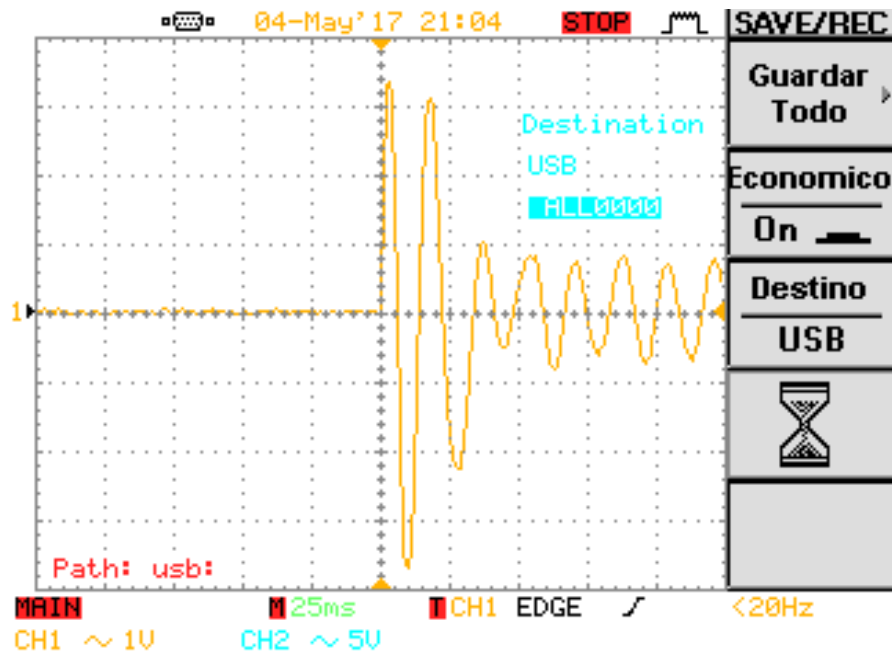
**Figura 12: Esquema utilizado para realizar el arranque directo.**



Fuente: Los autores.

En este ensayo, se conectó el motor directamente al autotransformador en conexión estrella, la sonda se energizó con una fuente de corriente continua a 5 volts y la salida del sensor se registró por medio del osciloscopio.

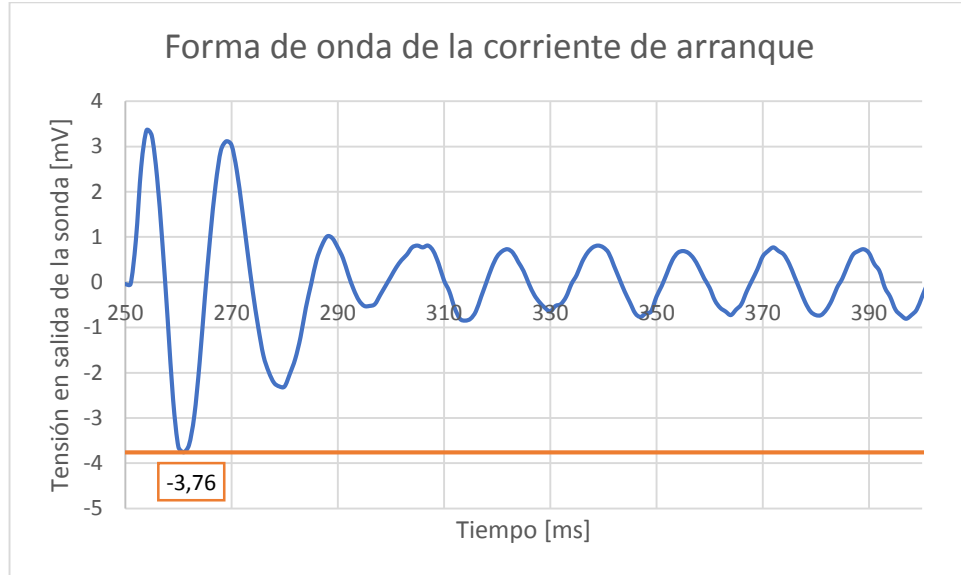
**Figura 13: Display del osciloscopio durante la toma de un arranque directo con la sonda ACS712ELCTR-30A-T energizada a 5 Vdc.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 13 se presenta la forma de onda de la corriente de un arranque del motor registrada en el osciloscopio, en esta no se aprecia información suficiente para el análisis del transitorio; por esto se usó la función “SAVE/REC” disponible en el osciloscopio, para guardar los registros correspondientes a los diferentes arranques durante el ensayo. A partir de los datos almacenados, mediante la herramienta EXCEL se analizaron las medidas registradas.

**Figura 14: Gráfica obtenida del arranque directo al motor DE LORENZO DL 1021N con la sonda ACS712ELCTR-30A-T energizada a 5 Vdc mediante EXCEL.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 14 se aprecia la gráfica de tensión en la salida del sensor durante el arranque directo del motor, en esta toma ocurrió el pico máximo de corriente durante la prueba. Según la sensibilidad nominal del sensor de efecto hall ACS712ELCTR-30A-T (Tabla 5) el pico de corriente máximo fue de 56,97 amperes (-3,76 volts en la salida del sensor).

**Tabla 12: Valores obtenidos de la prueba de arranque directo con la sonda ACS712ELCTR-30A-T, energizada a 5 Vdc.**

Vp (V) Sonda	V fuente (V)	I <sub>rms</sub> (A) Motor	N (Rpm)
3,76	219,60	4,63	1797,20
3,48	219,60	4,66	1797,10
3,56	219,40	4,67	1798,20
3,44	219,60	3,65	1797,80
3,48	218,70	4,66	1796,40

<b>Vp (V) Sonda</b>	<b>V fuente (V)</b>	<b>Irms (A) Motor</b>	<b>N (Rpm)</b>
3,72	219,20	4,62	1797,20
3,72	221,10	4,72	1798,60
3,72	220,30	4,72	1797,80
3,72	220,40	4,70	1799,10
3,44	221,10	4,67	1797,40

Fuente: Los autores.

Los valores de tensión pico registrados fluctuaron entre 3,44 y 3,76 volts, los cuales según la sensibilidad de la sonda corresponden a 56,12 y 56,97 amperes pico respectivamente. Con esto se concluye que la corriente del motor en cuestión supera la capacidad nominal de la sonda de efecto hall ACS712ELCTR-30A-T que es de 30 amperes pico, por lo tanto, se pierde confiabilidad de los datos medidos y se descarta la utilización de esta sonda en la implementación del presente trabajo de grado.

**3.3.2 Sensor de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A** Se llevó a cabo la prueba de arranque directo para la sonda de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A, alimentada a 8 volts de corriente continua. En la ejecución del ensayo se usó la sonda con dos vueltas, debido a que de esta forma se multiplica la señal de corriente sensada. Se midió la tensión pico en la salida del sensor durante la puesta en marcha por medio del osciloscopio (función "SAVE/REC"), la tensión en bornes del autotransformador, la corriente eficaz por los alimentadores del motor y la velocidad de operación, estos datos se muestran en la Tabla 13.

**Tabla 13: Valores obtenidos de la prueba de arranque directo con la sonda CSLA2CF DE 0 A 125 A, con dos vueltas y energizada a 8 Vdc.**

<b>Vp (V) Sonda</b>	<b>V fuente (V)</b>	<b>Irms (A)<sup>6</sup> Motor</b>	<b>N (Rpm)</b>
2,76	220,60	4,80	1795,40
2,68	220,30	4,79	1797,60
2,64	220,30	4,81	1797,10
2,76	219,70	4,81	1795,90
2,36	220,10	4,80	1797,10
2,44	219,70	4,73	1796,60
2,72	219,20	4,74	1796,70
2,60	220,30	4,82	1798,60
2,64	220,40	4,77	1797,10
2,84	220,90	4,83	1797,90

Fuente: Los autores.

El principal parámetro que se monitoreó durante la prueba fue la tensión pico a la salida de la sonda, puesto que este valor es quien determina el máximo de corriente sensada. Los valores de tensión pico oscilaron entre 2,36 y 2,84 volts, correspondientes a 120,40 y 144,89 amperes pico respectivamente.

El máximo valor de corriente pico medido durante la prueba fue de 144,89 amperes, este valor excede el límite permisible por las características de la sonda de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A (125 amperes pico), por esto se realizó la prueba con una vuelta. Los datos medidos se presentan en la Tabla 14

---

<sup>6</sup> Corriente medida en terminales del motor funcionando en vacío.

**Tabla 14: Valores obtenidos de la prueba de arranque directo con la sonda CSLA2CF DE 0 A 125 A, con una vuelta y energizada a 8 Vdc.**

<b>Vp (V) Sonda</b>	<b>V fuente (V)</b>	<b>Irms (A)<sup>7</sup> Motor</b>	<b>N (Rpm)</b>
1,60	221,30	4,65	1797,00
1,56	220,60	4,68	1798,00
1,42	220,40	4,60	1797,00
1,66	220,20	4,58	1798,00
1,68	220,20	4,61	1798,00
1,76	219,90	4,61	1796,00
1,76	219,70	4,58	1799,00
1,40	221,40	4,61	1798,00
1,44	221,10	4,69	1797,00
1,64	220,20	4,68	1798,00

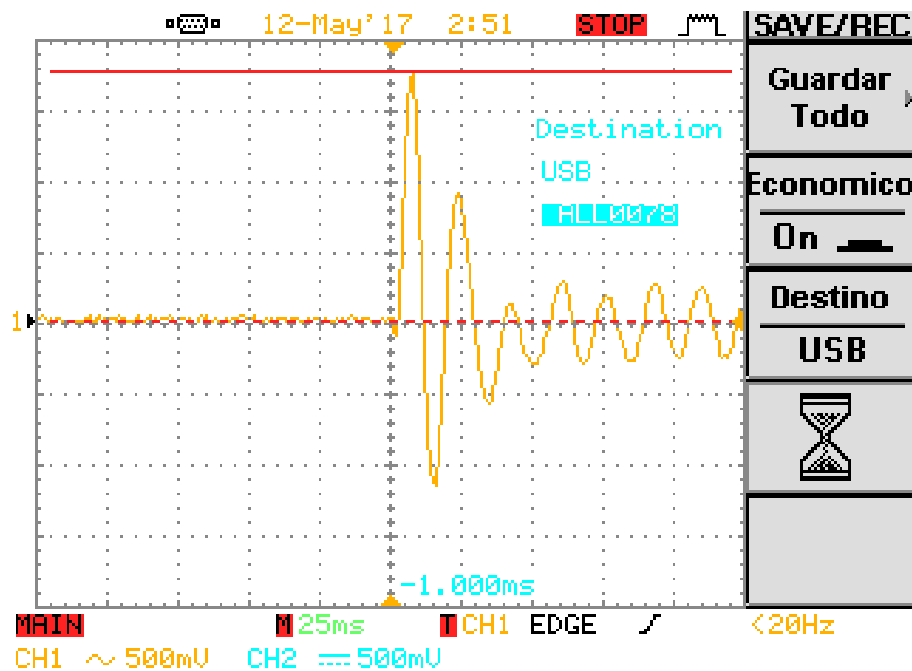
Fuente: Los autores.

Esta vez, los valores de tensión pico a la salida de la sonda oscilaron entre 1,40 y 1,76 volts, correspondientes a 71,43 y 89,80 amperes pico respectivamente. Al incluir el efecto multiplicador de la vuelta a la sonda se obtiene que la corriente pico en el motor es de 35,72 y 44,9 amperes.

---

<sup>7</sup> Corriente medida en terminales del motor funcionando en vacio.

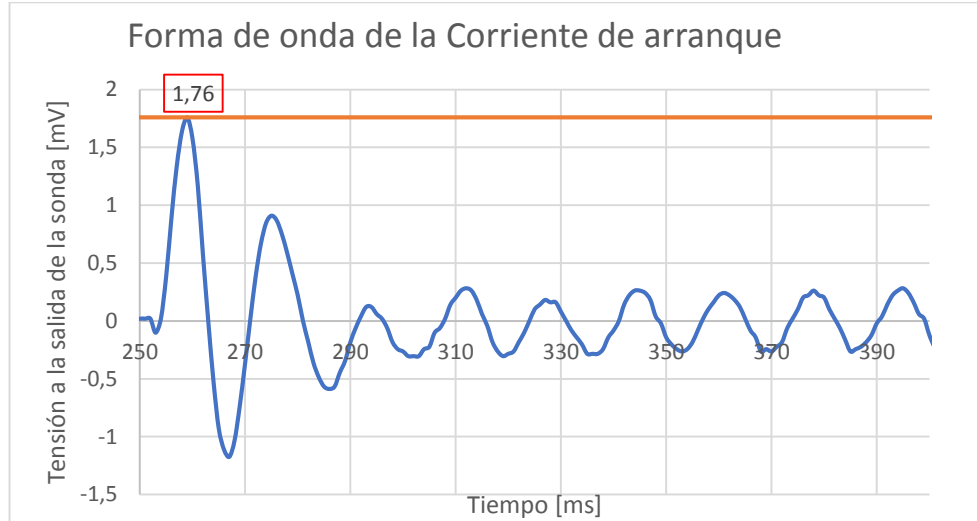
Figura 15: Display del osciloscopio durante la toma de un arranque directo con la sonda CSLA2CF DE 0 A 125 A, con una vuelta y energizada a 8 Vdc.



Fuente: Los autores.

En la Figura 15 se presenta el oscilograma de un arranque del motor DE LORENZO, en esta no se aprecia información suficiente para el análisis del transitorio; por esto se usó la función “SAVE/REC” disponible en el osciloscopio, para guardar los registros correspondientes a los diferentes arranques durante el ensayo. A partir de los datos almacenados, mediante la herramienta EXCEL se analizaron las medidas registradas.

**Figura 16: Gráfica obtenida del arranque directo al motor DE LORENZO DL 1021N con la sonda CSLA2CF DE 0 A 125, con una vuelta y energizada a 8 Vdc mediante EXCEL.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 16 se muestra la forma de onda durante el arranque directo del motor de inducción, el pico máximo de tensión en los terminales de la sonda fue de 1,76 volts. Se observa que el motor tarda aproximadamente dos ciclos (32 milisegundos) en estabilizarse, momento en el cual, la onda presenta asimetría por medio ciclo y finalmente toma el comportamiento senoidal esperado.

### **3.4 FACTOR DE RELACIÓN SENSOR DE EFECTO HALL CSLA2CF DE 0 A 125 A**

Debido a que la información suministrada por el fabricante acerca de la sensibilidad del sensor de efecto hall ACS712ELCTR-30A-T no ofrece confiabilidad y que la corriente máxima excede el límite permisible, se decide que el sensor a implementar será la sonda de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A [3] con una vuelta ( $F_M=2$ ).

En la adquisición de las señales de corriente necesarias para el presente trabajo de grado, se conectó la salida de la sonda a las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición, por lo tanto, los datos registrados por la tarjeta son muestras de tensión. Para el cálculo de la corriente real, se utiliza la Ecuación 6.

**Ecuación 6: Relación dada por el fabricante.**

$$I[n] = \frac{V[n]}{19,6 * F_M}$$

Fuente: Los autores.

Donde  $I[n]$  es el vector de corriente real (calculada mediante LabVIEW) en amperes,  $V[n]$  es el vector de muestras de tensión registradas por la tarjeta de adquisición en volts, 19,6 es la sensibilidad en milivolts sobre amperes de la sonda de efecto hall CSLA2CF DE 0 A 125 A, cuando se energiza a 8 volts de corriente continua y  $F_M$  es el factor que incluye el efecto multiplicador causado por el número de vueltas a la sonda. Al sustituir el valor del factor multiplicador por 2 (Una vuelta) y multiplicar la Ecuación 6 por 1000 para realizar la conversión de milivolts a volts de la sensibilidad, se obtiene la Ecuación 7.

**Ecuación 7: Factor de relación.**

$$I[n] = 25,51 * V[n]$$

Fuente: Los autores.

Donde el 25,51 es el factor de relación en amperes sobre volts. Este factor se multiplica por las muestras de tensión para calcular el valor real de la corriente que se gráfica en LabVIEW.

## 4. DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LABVIEW

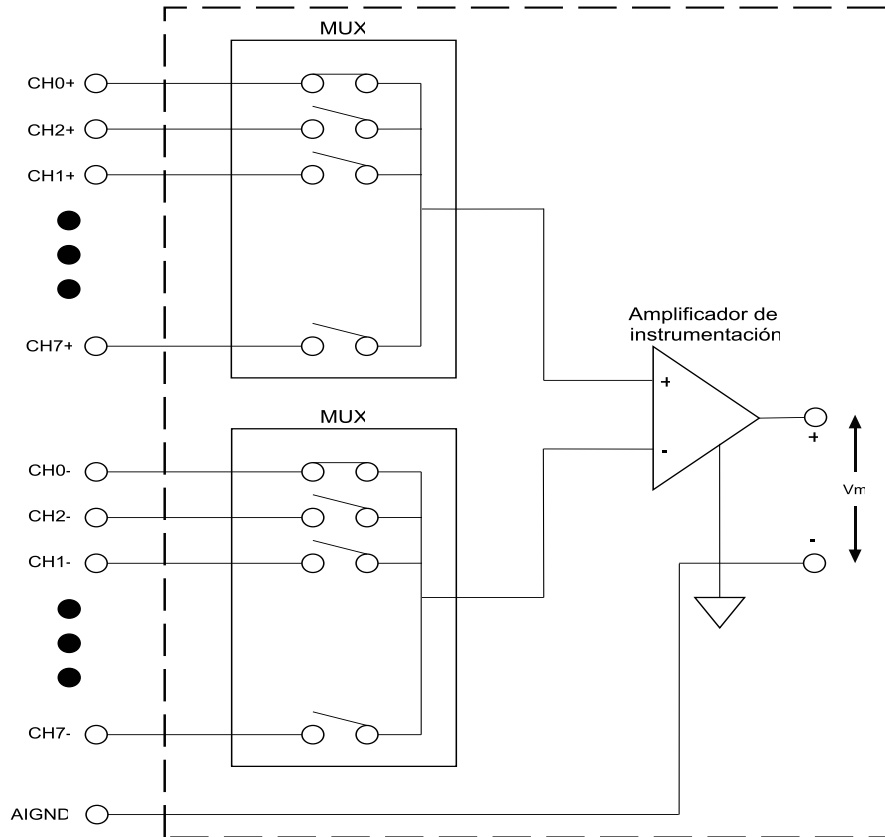
### 4.1 GENERALIDADES DEL PROGRAMA

Se desarrolló un programa en LabVIEW con el propósito de visualizar el comportamiento de la corriente durante el arranque de un motor de inducción. Este se elaboró para tres tipos de arranque; arranque estrella-triángulo, arranque por variador de velocidad y arranque directo. La ejecución del programa está condicionada a la operación del banco de pruebas dinámico en modo local.

Las entradas del programa son: la corriente nominal del motor y el tipo de arranque que se desea ejecutar. Las salidas del programa son: La gráfica de la forma de onda de la corriente por fase durante el arranque del motor, la gráfica del valor eficaz de la corriente por fase durante el arranque, la gráfica de la velocidad durante el arranque, el ángulo de las corrientes por cada fase del motor, la corriente eficaz máxima por fase durante el arranque y la relación entre corriente eficaz máxima de arranque y la corriente nominal del motor.

**4.1.1 Tarjeta de adquisición de datos: modo de empleo** Las señales necesarias para este trabajo de grado son: Las corrientes instantáneas del motor de inducción, la velocidad del motor y el flanco de arranque (Canal digital PFI 0). En el registro de estas señales se utilizó una tarjeta de adquisición NI 6008 de National Instruments, disponible en el gabinete de arrancadores. La tarjeta permite hacer la adquisición de señales analógicas de tensión en modo diferencial, referenciada a un punto y no referenciada.

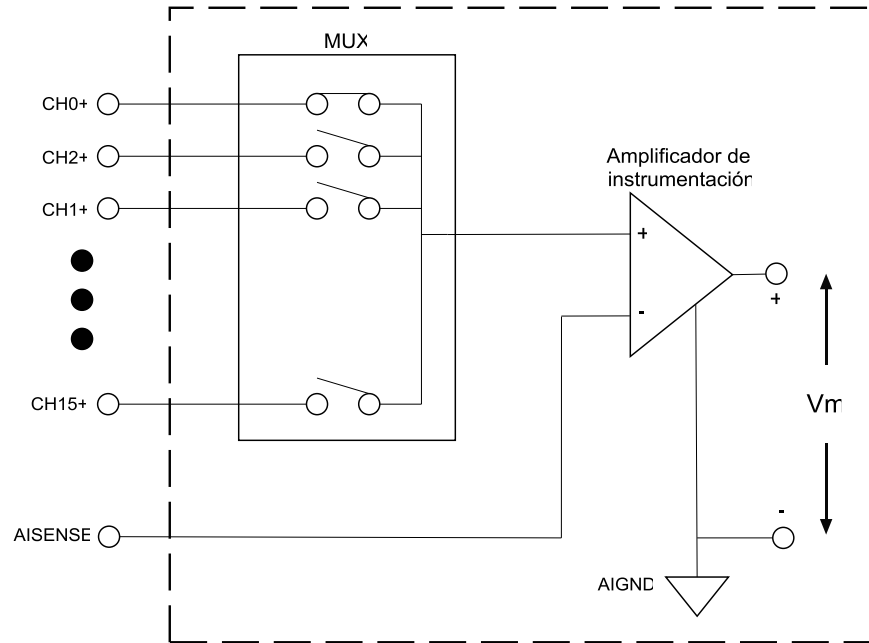
**Figura 17: Entrada analógica diferencial.**



Fuente: J. Lajara and J. Sebastián, Libro, LabVIEW Entorno gráfico de programación, 2007, página 163, Figura 7-3.

En la Figura 17 se muestra la configuración interna de la tarjeta de adquisición registrando una señal de tensión en modo diferencial por el canal "0", en este modo de funcionamiento se toma la diferencia entre las dos líneas (CH0+ y CH0-); su principal ventaja es que no tiene una referencia común, por lo tanto, reduce los posibles errores a causa de ruido y otros factores asociados al nodo común.

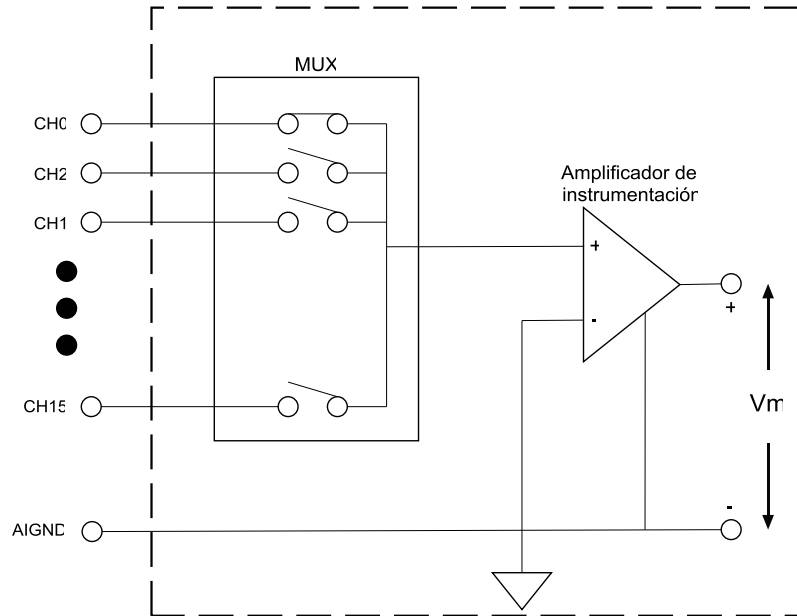
**Figura 18: Entrada analógica sin referencia común.**



Fuente: J. Lajara and J. Sebastián, Libro, LabVIEW Entorno gráfico de programación, 2007, página 164, Figura 7-5.

Para la adquisición sin referencia, el libro LabVIEW entorno grafico de programación señala: “En las medidas sin referencia (nonreferenced single-ended, NRS) la señal exterior y la circuitería de la tarjeta DAQ no tiene ninguna referencia común. En el circuito de la Figura 18, se muestra como la señal exterior esta referenciada al terminal AISENSE, mientras que la tensión en el interior de la tarjeta DAQ tendrá como referencia AIGND” [5].

**Figura 19: Entrada analógica con referencia común.**



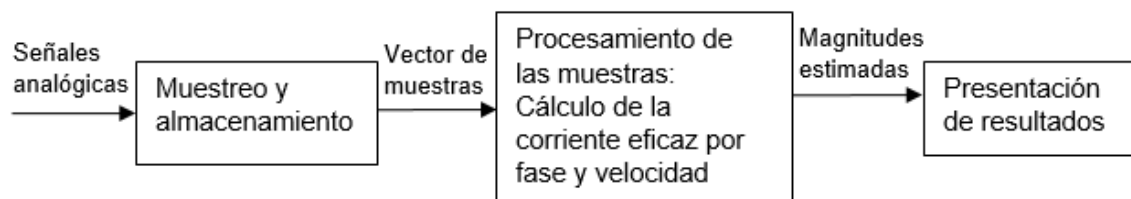
Fuente: J. Lajara and J. Sebastián, Libro, LabVIEW Entorno gráfico de programación, 2007, página 163, Figura 7-4.

En la Figura 19 se muestra la configuración interna de la tarjeta de adquisición registrando una señal de tensión medida con referencia al canal "0". En este modo de funcionamiento si existe punto común entre el exterior y la tarjeta DAQ, una de las principales ventajas es que se dispone de más canales; por este motivo en el presente trabajo se decidió hacer la toma de muestras de forma referencial, con miras a ofrecer la opción futura de mejorar el proyecto existente. Las señales de corriente se conectaron a la tarjeta de adquisición por medio de los canales analógicos AI0, AI1 y AI2, correspondientes a las fases U, V y W, respectivamente.

En la implementación para el trabajo de grado fue necesario sincronizar el inicio de muestreo de la tarjeta DAQ con la puesta en marcha del motor, para esto se configuró la entrada digital PFI 0 (Entrada de alta frecuencia) como trigger con flanco descendente. La señal que ingresa al canal digital PFI 0 se obtiene de un contacto que conmuta durante el arranque del motor.

**4.1.2 Descripción de la secuencia lógica del programa desarrollado** En la elaboración del programa en LabVIEW se consideró la secuencia lógica mostrada en la Figura 20, la cual está compuesta por tres bloques; un bloque de muestreo y almacenamiento, un bloque de procesamiento de las muestras y un bloque de presentación de resultados.

**Figura 20: Diagrama de bloques del programa en LabVIEW.**



Fuente: Los autores.

En el bloque de muestreo y almacenamiento entran las señales de corriente (Fase U-AI0, fase V-AI1 y fase W-AI2), velocidad (AI3) y la señal del flanco de arranque (PFI 0). La tarjeta DAQ permanece en espera de detectar el flanco, una vez esto ocurre, empieza a muestrear durante 2 segundos, tiempo suficiente para registrar el arranque del motor y finaliza almacenando las muestras.

Al bloque de procesamiento de muestras entra el vector almacenado, con estos datos se calcula la corriente eficaz por fase del motor, la relación entre la corriente eficaz de arranque y la corriente nominal del motor, el ángulo de fase en grados por fase del motor y finalmente, la velocidad.

La presentación de resultados; en este bloque se presentan las gráficas de la corriente eficaz por fase y la velocidad durante el arranque. Se muestran las magnitudes calculadas de corriente eficaz máxima por fase, las magnitudes de los ángulos de fase y la relación entre la corriente eficaz de arranque y la nominal.

**3.1.3 Funciones y herramientas de LabVIEW usadas en el programa** En la Tabla 15 se muestran las diferentes herramientas y funciones del software LabVIEW usadas en la implementación del programa:

**Tabla 15: Funciones y herramientas implementadas en el programa de LabVIEW.**

<b>Diagrama de bloques</b>		
<b>Functions</b>	<b>Submenu</b>	<b>Tools</b>
Programming	Structures	For Loop
		While Loop
		Case Structure
		Flat Sequence
		Formula Node
		Local Variable
		Decorations
	Array	Index Array
		Build Array
		Max & Min
		Splid 1D Array
	Numeric	Add
		Subtract
		Multiply
		Divide
	Boolean	And
		Or
		Not
	Comparison	Equal?
	File I/O	Write To Measurement File
		Read From Measurement File
Measurement I/O	NI_DAQmx	DAQ Assistant
Signal Processing	Waveform Conditioning	Filter

<b>Diagrama de bloques</b>		
<b>Functions</b>	<b>Submenu</b>	<b>Tools</b>
	Waveform Measurements	Extract Single Tone Information
<b>Panel frontal</b>		
<b>Functions</b>	<b>Submenu</b>	<b>Tools</b>
Modern	Numeric	Numeric Control
		Numeric Indicator
	Boolean	Pus Button
	Graph	Waveform Graph

Fuente: Los autores.

Se recomienda ver el anexo A (Tabla de símbolos de LabVIEW), donde se muestran detalladamente los iconos y descripciones de las funciones de la Tabla 15.

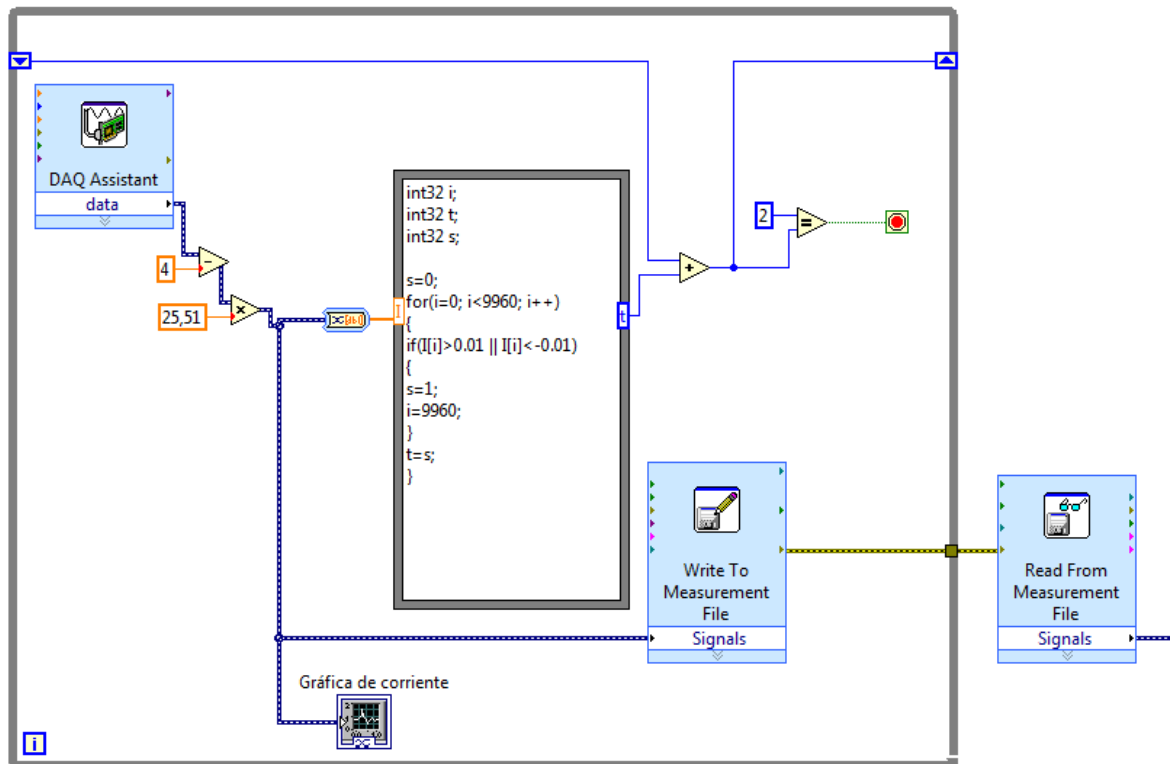
## **4.2 REGISTRO DE LA CORRIENTE EN UNA FASE DURANTE EL ARRANQUE DEL MOTOR**

Se llevó a cabo el desarrollo de un programa en LabVIEW para registrar la forma de onda de la corriente y graficar la corriente eficaz durante el arranque del motor en una sola fase.

**4.2.1 Frecuencia de muestreo** La frecuencia de muestreo seleccionada para la tarjeta DAQ fue de 9960 S/s (Máxima posible), la cual es un múltiplo entero de la frecuencia de la red, cumple con el criterio de Nyquist y es menor a la frecuencia máxima de muestreo de la tarjeta de adquisición (Tabla 6).

**4.2.2 Almacenamiento de las muestras** Se configuró el programa para muestrear y almacenar muestras durante 2 segundos después del instante en que ocurre el arranque.

**Figura 21: Diagrama de bloques para la adquisición y el almacenamiento de la corriente en una sola fase.**

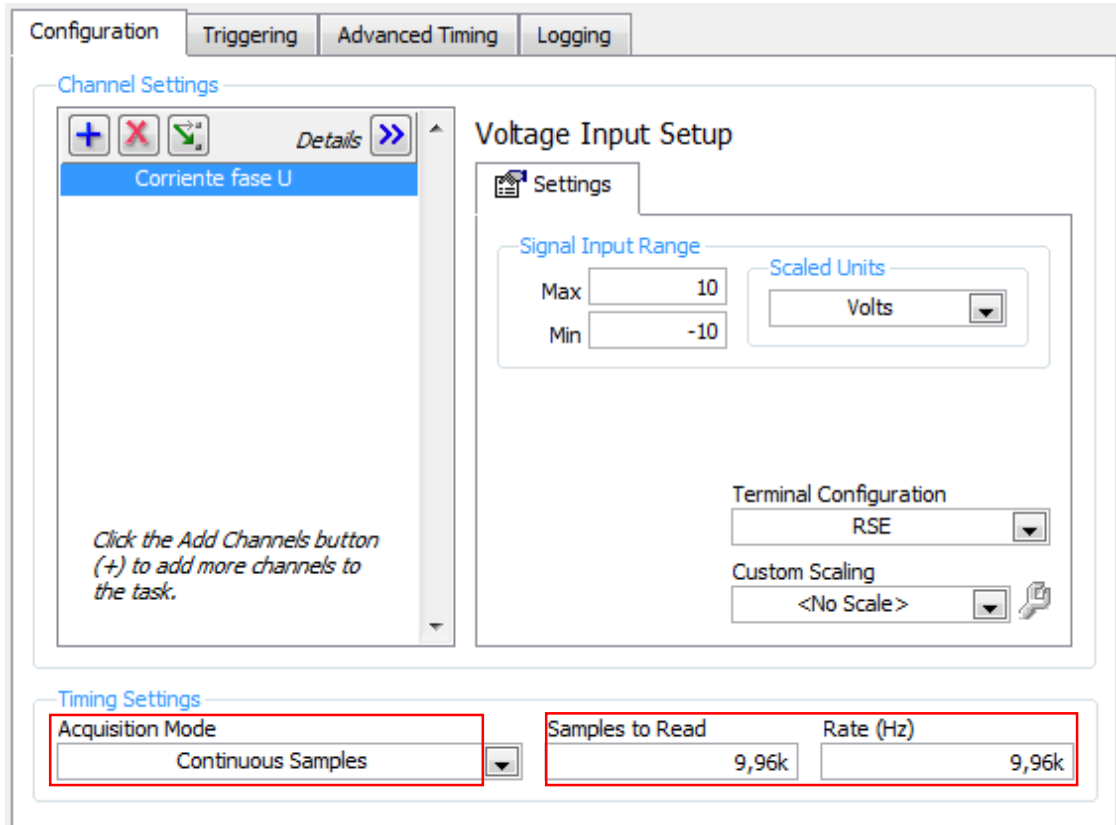


Fuente: Los autores.

En la Figura 21 se muestra un diagrama de bloques en LabVIEW implementado para muestrear y almacenar las muestras en el programa, en esta se observan las diferentes funciones del software utilizadas.

El DAQ Assistant se utilizó para adquirir la señal de corriente por medio de la tarjeta DAQ, su configuración se observa en la Figura 22. Esta función se configuró para adquirir una señal analógica de tensión (salida de la sonda de efecto hall CSLA2CF de 0 a 125 A), con una frecuencia de muestreo de 9960 S/s y muestreando en forma continua.

**Figura 22: Configuración del DAQ Assistant para una sola fase.**

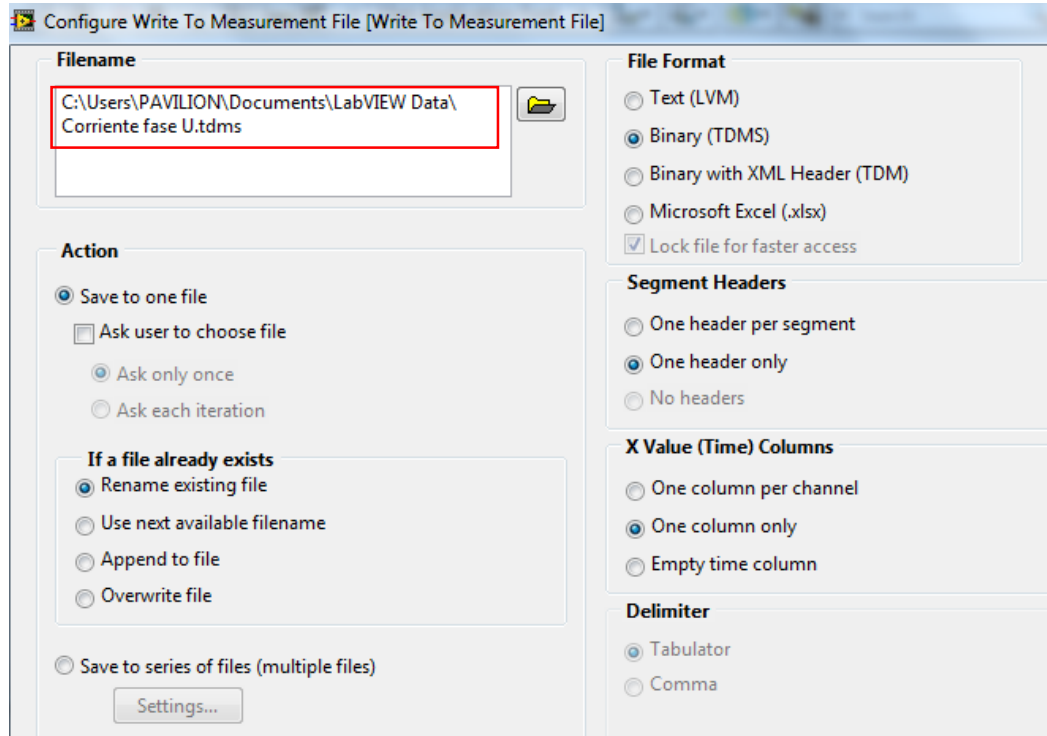


Fuente: Los autores.

Se usó la función matemática “Resta” para eliminar el nivel de continua (4 volts) que se introduce en la señal debido a la alimentación de la sonda, puesto que esta sólo entrega a la salida valores positivos de tensión. La función “Multiplicación” se empleó para convertir los datos de tensión muestreados por la tarjeta a valores de corriente, multiplicando las muestras por el factor de relación (25,51).

La estructura “While Loop” se utilizó para que la tarjeta de adquisición muestree de forma continua y la estructura “Formule Node” se utilizó junto con un comparador lógico para controlar el muestreo y almacenamiento de las muestras durante 2 segundos después de ocurrido el arranque.

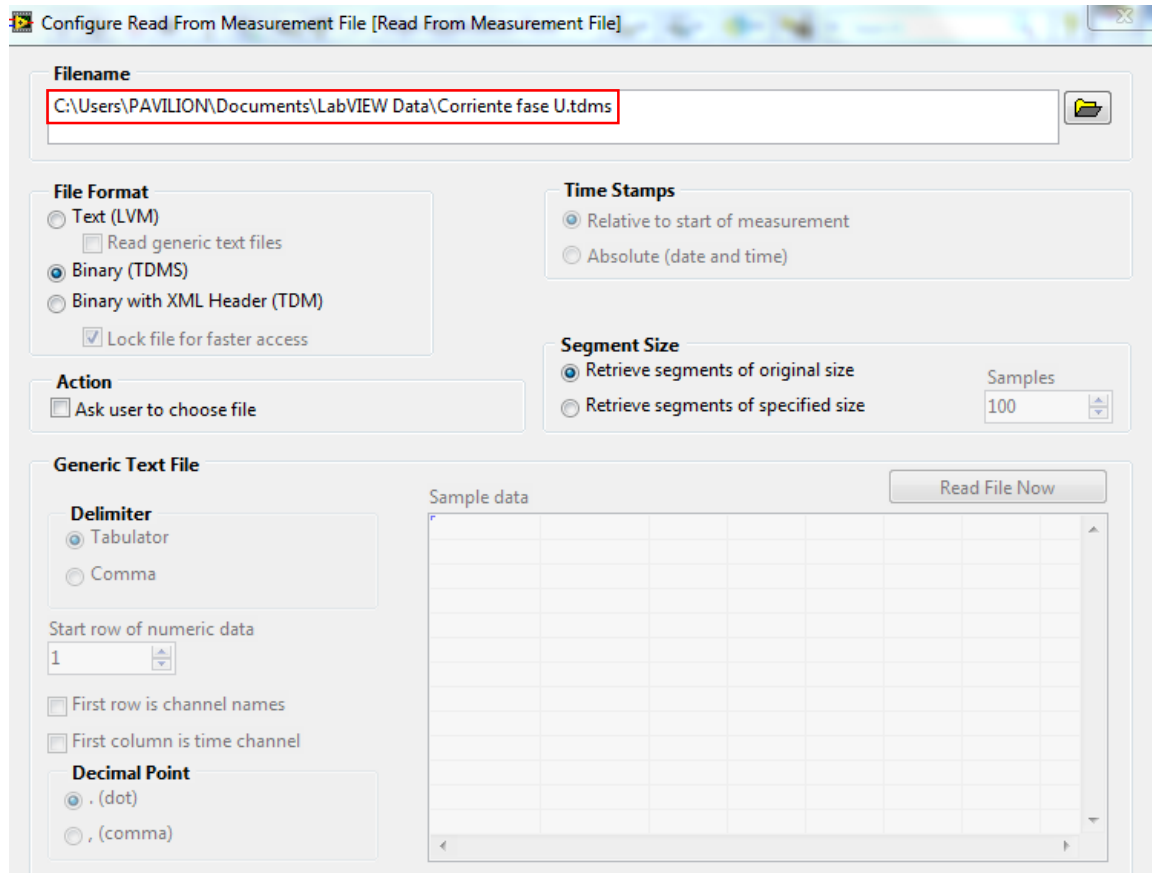
**Figura 23: Configuración de la función Write To Measurement File.**



Fuente: Los autores.

La función Write To Measurement File se usó para guardar las muestras de corriente, su configuración se muestra en la Figura 23. Esta función se ajustó para guardar las muestras en el archivo “Corriente fase U”, en formato binario (TDMS), solamente un encabezado y como un arreglo de una sola columna.

**Figura 24: Configuración de la función Read From Measurement File.**



Fuente: Los autores.

La función Read From Measurement File se utilizó para leer las muestras de corriente almacenadas, su configuración se muestra en la Figura 24. Esta función se ajustó para leer las muestras del archivo “Corriente fase U” (Debe ser el mismo archivo de la función Write To Measurement File) , en formato binario (TDMS).

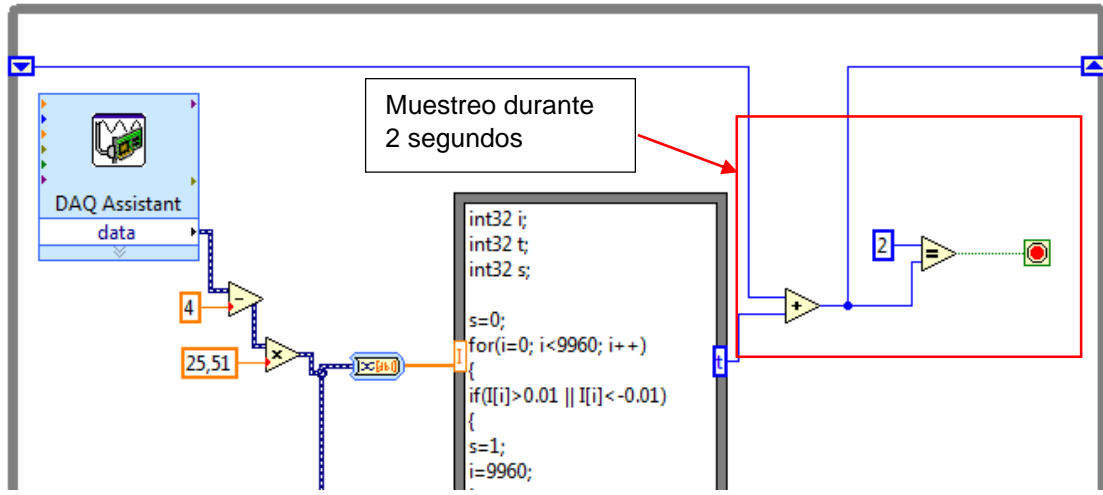
**Figura 25: Algoritmo utilizado para registrar el inicio de la puesta en marcha del motor.**

```
int32 i;  
int32 t;  
int32 s;  
  
s=0;  
for(i=0; i<9960; i++)  
{  
  if(I[i]>0.01 || I[i]<-0.01)  
  {  
    s=1;  
    i=9960;  
  }  
  t=s;  
}
```

Fuente: Los autores.

En la estructura “Formula Node” que se muestra en la Figura 25, se implementó un algoritmo para registrar el instante en que inicia la puesta en marcha de la máquina, donde la salida es una variable de estado (0 ó 1). El vector de muestras de corriente entra a la estructura “Formula Node”, se recorre por un ciclo “For”, el cual se detiene una vez registrado el arranque del motor y se entrega a la salida de la estructura la variable “t” (t=1).

Figura 26: Esquema para el muestreo durante dos segundos.

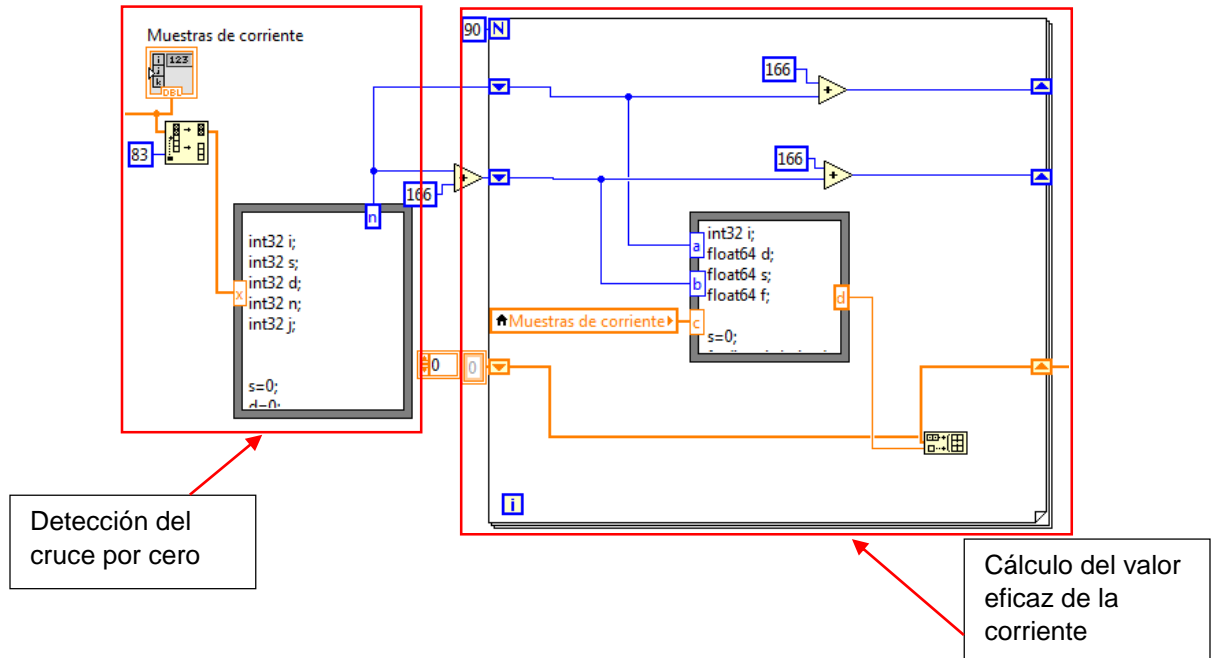


Fuente: Los autores.

El operador lógico, la función “Suma” y el “Shift Register” se presentan en la Figura 26, se utilizaron para controlar el muestreo y almacenamiento durante 2 segundos después de registrado el arranque del motor.

**4.2.3 Cálculo del valor eficaz de la corriente durante el arranque directo** En el cálculo del valor eficaz de la corriente durante el arranque directo se consideró el primer cruce por cero del vector de muestras de la señal de corriente y el número de muestras por ciclo de la señal, el cual se asumió constante (Se asumió la frecuencia de la red constante en 60 Hz).

**Figura 27: Diagrama de bloques para el cálculo del valor eficaz de la corriente.**

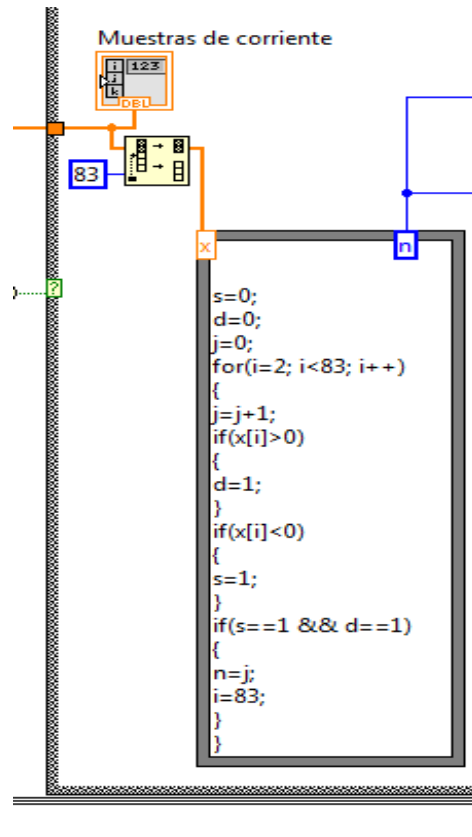


Fuente: Los autores.

En la Figura 27 se muestra el diagrama de bloques en LabVIEW implementado para calcular el valor eficaz de la corriente, se diferencian dos secciones; la sección de encontrar la posición, en el vector de muestras, del primer cruce por cero y la sección para calcular el valor eficaz de la corriente a partir del primer cruce por cero de la señal.

**4.2.3.1 Posición del primer cruce por cero en el vector de muestras** Se determinó la posición del primer cruce por cero en el vector de muestras de la señal de corriente. La sección del programa elaborada para esto se muestra en la Figura 28.

Figura 28: Diagrama para determinar el primer cruce por cero.



Fuente: Los autores.

La función "Split 1D Array" se usó para dividir el vector "Muestras de corriente" en dos subvectores, uno desde la posición 0 hasta la 82 y el otro desde la posición 83 hasta la 19919 (Durante 2 segundos se almacenan 19920 muestras). El primer subvector entra a la estructura "Formula Node" que se observa en la Figura 28, donde se recorre en un ciclo "For" hasta la posición en que se detecta el primer cambio de signo de la señal. Una vez encontrada la posición, finaliza el ciclo "For" y sale de la estructura "Formula Node" la posición del primer cruce por cero (n).

**4.2.3.2 Cálculo del número de muestras por ciclo de la señal** Se calculó el número de muestras que la tarjeta adquiere durante un ciclo de la señal (1/60 segundos), para esto se usó la Ecuación 8.

### Ecuación 8: Cálculo del número de muestras.

$$N_c = \frac{F_s}{f_R}$$

Fuente: Los autores.

Donde  $F_s$  es la frecuencia de muestreo en muestras por segundo (9960 S/s),  $f_R$  es la frecuencia de la red (60 1/s) en ciclos por segundo y  $N_c$  es el número de muestras en un ciclo por periodo. Al sustituir los valores, se obtuvo:

$$N_c = 166 \text{ [Muestras]}$$

**4.2.3.3 Ecuación para calcular el valor eficaz de la corriente a partir del cruce por cero** El cálculo de la corriente eficaz durante el arranque en una sola fase del motor se llevó a cabo con las muestras de la señal de corriente almacenadas, para esto se utilizó la Ecuación 9.

### Ecuación 9: Cálculo de la corriente RMS a partir de muestras.

$$I_{RMS}[i] = \sqrt{\frac{\sum_{n=N_{inf}}^{N_{sup}} I[n]^2}{N_c}}$$

Fuente: Los autores.

Donde  $N_c$  es el número de muestras en un ciclo de la señal,  $N_{sup}$  es el límite superior de la sumatoria,  $N_{inf}$  es el límite inferior de la sumatoria,  $I$  es el vector de muestras de corriente en amperes e  $I_{RMS}$  es el valor eficaz de la corriente para el ciclo “i-ésimo” en amperes (2 segundos tienen 120 ciclos).

Los límites superior e inferior de la sumatoria toman valores de acuerdo con las Ecuaciones 10 y 11.

**Ecuación 10: Límite inferior de la sumatoria.**

$$N_{inf} = N_c * (i - 1) + n_0 \quad i = 1,2,3 \dots 120$$

Fuente: Los autores.

**Ecuación 11: Límite superior de la sumatoria.**

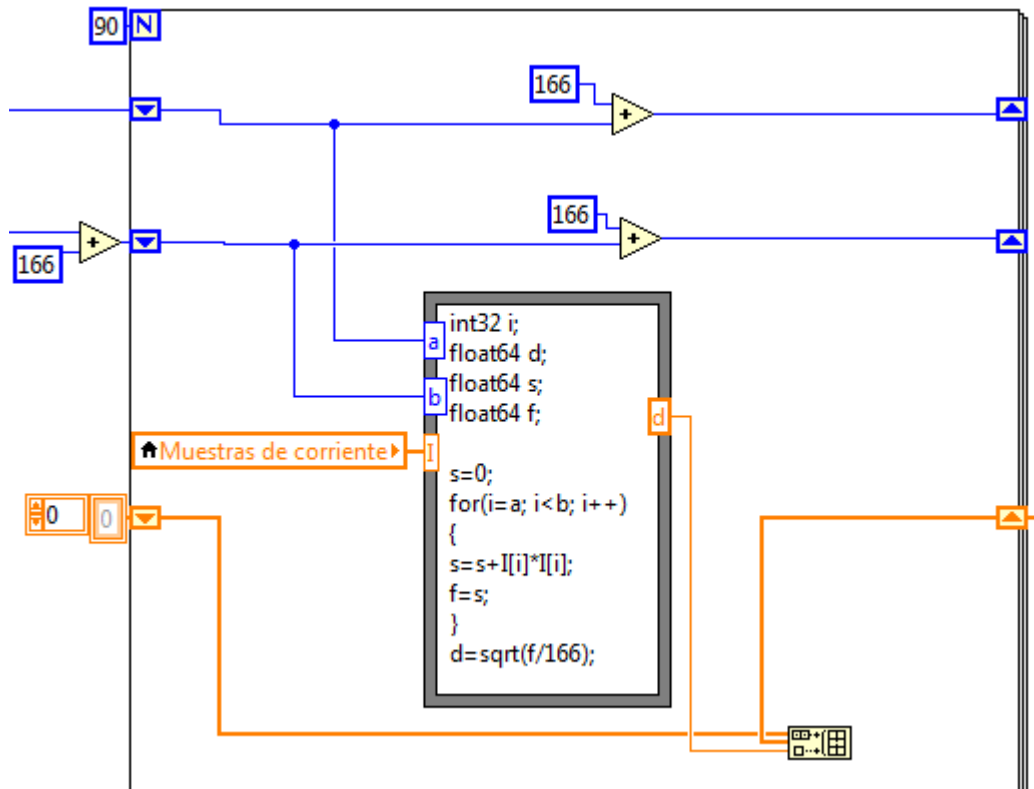
$$N_{sup} = N_c * i + n_0 \quad i = 1,2,3 \dots 120$$

Fuente: Los autores.

Donde  $i$  es el ciclo  $i$ -ésimo que va desde 1 a 120, (El número de ciclos de la señal de corriente almacenados durante 2 segundos) y  $n_0$  es la posición dentro del vector de muestras de corriente del primer cruce por cero de la señal.

**4.2.3.4 Cálculo del valor eficaz de la corriente a partir del cruce por cero** En la Figura 29 se presenta la sección del programa implementada para calcular el valor eficaz de la corriente a partir de conocer la posición del primer cruce por cero.

**Figura 29: Diagrama de bloques utilizado para el cálculo del valor eficaz de la corriente a partir de tener la posición del primer cruce por cero.**

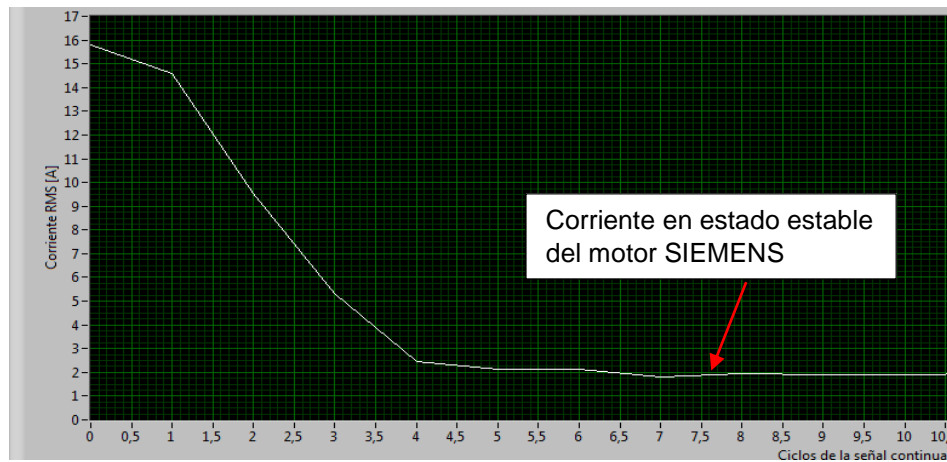


Fuente: Los autores.

La estructura “Formula Node” se utilizó para evaluar la Ecuación 9 en un ciclo  $i$ -ésimo de la señal dentro del vector de muestras, la estructura “For Loop” se usó para ir moviendo el  $i$ -ésimo ciclo dentro del vector de muestras y junto con la función “Build Array” crear un vector con los valores eficaces de la corriente para cada ciclo de la señal.

La presentación del cálculo de la corriente eficaz durante el arranque se hizo por medio de una gráfica, como se muestra en la Figura 30.

**Figura 30: Gráfica del valor RMS durante el arranque directo del motor SIEMENS.**

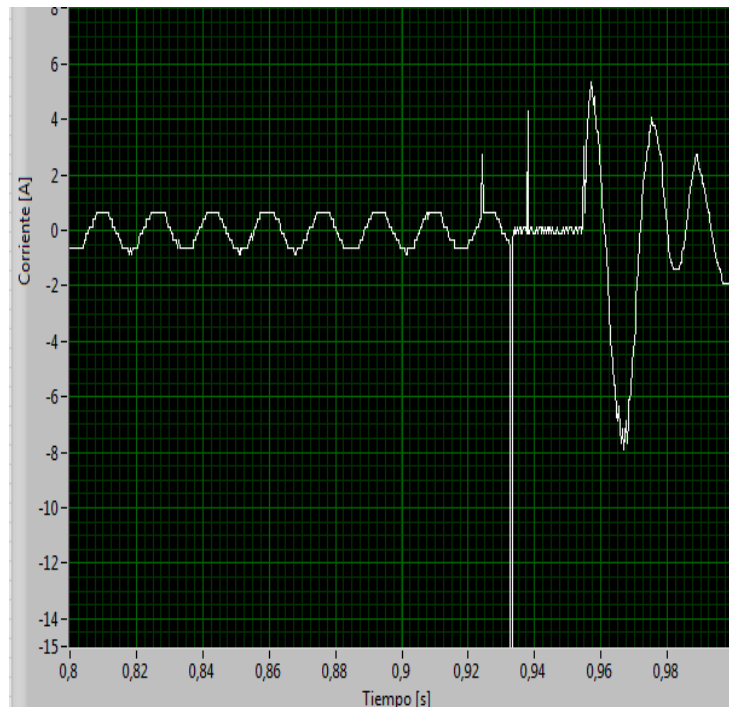


Fuente: Los autores.

El valor calculado de la corriente eficaz para el motor SIEMENS en estado estable fue de 2 amperes, el cual se aproxima al valor medido mediante la pinza amperimétrica AMPROBE AMP-320 que fue de 1,95 amperes RMS.

**4.2.4 Registro de la corriente en arranque estrella-triángulo** El registro de la corriente durante el arranque estrella-triángulo en una sola fase del motor se realizó de la misma forma que para el arranque directo. La única diferencia fue que se incluyó en el programa una sección para eliminar los datos correspondientes al lapso en que ocurre la conmutación de los contactores.

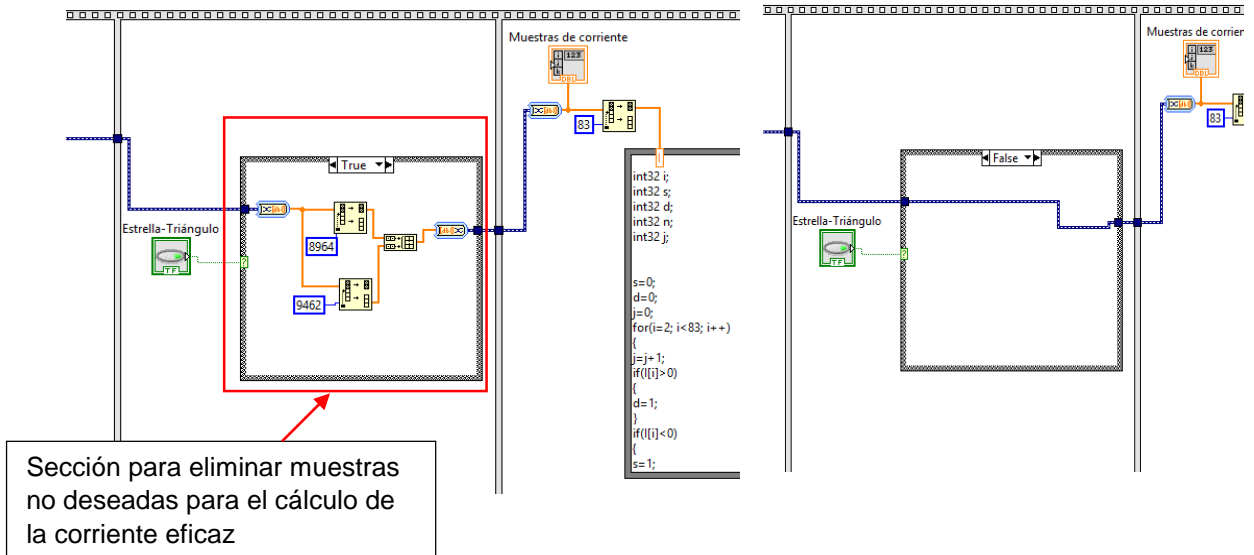
**Figura 31: Gráfica de la corriente durante el arranque estrella-triángulo para el motor SIEMENS.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 31 se muestra el segmento de la forma de onda de la corriente en que ocurre la conmutación de los contactores durante el arranque estrella-triángulo. Se observa que en 0,92 segundos sucede una anomalía en el comportamiento de la señal de corriente, la cual se mantiene hasta el tiempo 0,96 segundos, instante en el cual el motor pasa de conexión estrella a conexión triángulo. Para eliminar el efecto de la corriente cero (tiempo que tarda la conmutación de los contactores para pasar de estrella a triángulo) en el cálculo del valor eficaz de la corriente se introdujo en el programa la sección que se observa en la Figura 32, donde se emplean dos funciones “Split 1D Array” para dividir el vector de muestras y la función “Build Array” para rearmar un nuevo vector sin las muestras no deseadas.

**Figura 32: Diagrama de bloques el cual se utiliza para reconstruir el vector de muestras.**



Fuente: Los autores.

Las muestras eliminadas van desde la posición 8964 hasta 9462 del vector de muestras almacenado. La función “CASE” se incluye para garantizar la creación del nuevo vector cuando se ejecuta el arranque estrella-triángulo.

#### 4.2.5 Registro de la corriente en arranque por variador de velocidad

**4.2.5.1 Configuración del variador SINAMICS V20 SIEMENS** Se realizó la configuración del variador, puesto que en la revisión se encontró que los valores de algunos parámetros (Tabla 2) no correspondían a los necesarios para ejecutar este arranque al motor SIEMENS disponible en el gabinete de arrancadores. Los valores de la configuración de los parámetros del variador se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16: Configuración del variador SINAMICS V20 SIEMENS.**

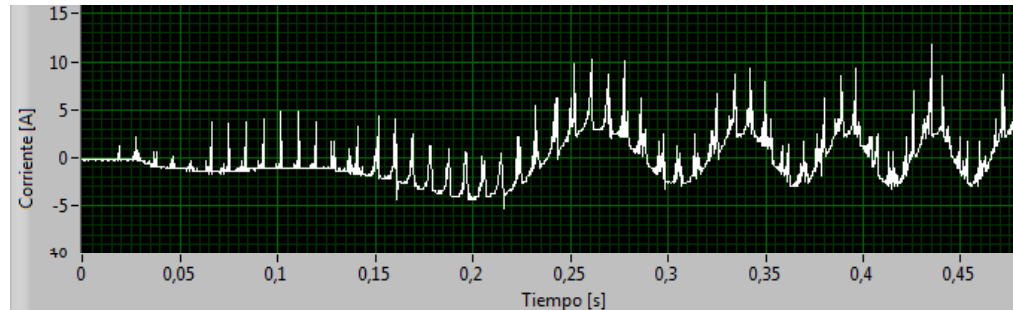
<b>Parámetro</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor</b>
P0003	Nivel de acceso de usuario	2
P0004	Filtro de parámetros	0
P0010	Parámetro de puesta en marcha	0
P0100	Modo de operación Europea/ USA	1
P0304	Tensión nominal del motor [V]	220
P0305	Corriente nominal del motor [A]	3,15
P0307	Potencia nominal del motor [hp]	1
P0308	Factor de potencia nominal del motor	0,81
P0309	Eficiencia nominal del motor [%]	77
P0310	Frecuencia nominal del motor [Hz]	60
P0311	Velocidad nominal del motor [RPM]	1710
P0700	Selección de fuentes de señales de mando	2
P0701	Función de la entrada digital 1	0
P0702	Función de la entrada digital 2	1
P0757	Valor x1 del escalado de la entrada analógica	0
P0758	Valor y1 del escalado de la entrada analógica [%]	0
P0759	Valor x2 del escalado de la entrada analógica	10
P0760	Valor y2 del escalado de la entrada analógica [%]	100
P1000	Selección de consigna de frecuencia	2
P1080	Frecuencia mínima [Hz]	0
P1082	Frecuencia máxima [Hz]	60
P1120	Tiempo de aceleración [s]	0,5
P1121	Tiempo de desaceleración [s]	0,5

Fuente: Los autores.

El tiempo de aceleración se configuró menor a un segundo por facilidad para mostrar las formas de onda de la corriente durante el arranque, por esto en la utilización del programa se recomienda no superar el tiempo de aceleración de 0,8 segundos.

**4.2.5.2 Filtrado de la señal** El variador de velocidad SINAMICS V20 opera bajo el principio de la modulación PWM, por lo tanto, su funcionamiento hace que aparezca distorsión armónica y nivel de continua en la corriente del motor.

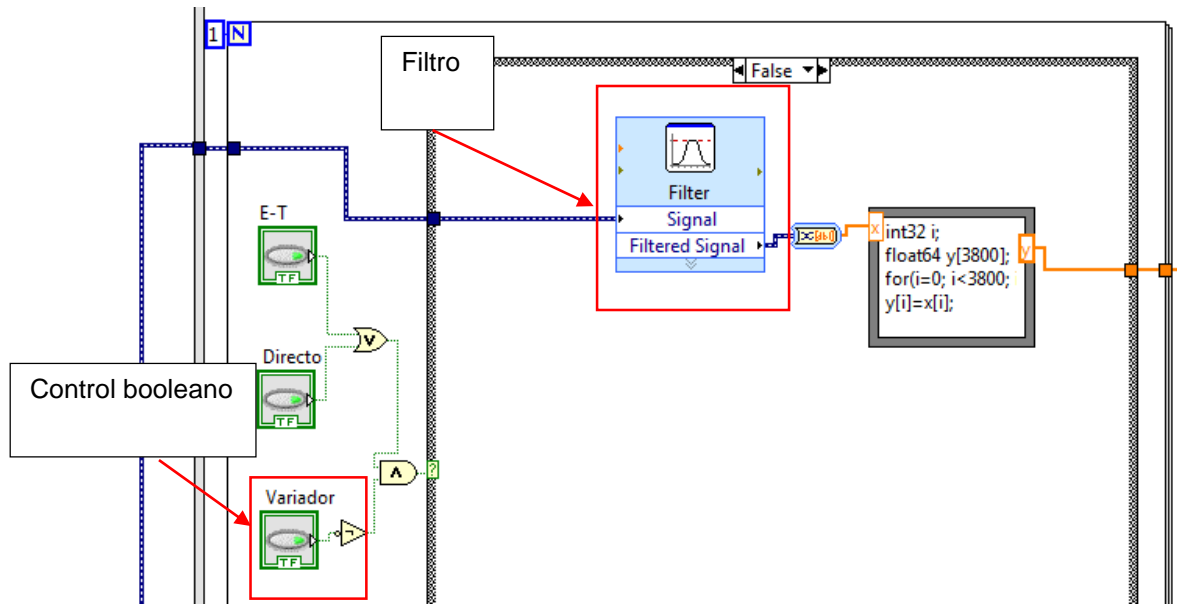
**Figura 33: Gráfica de la corriente durante el arranque por variador de velocidad para el motor SIEMENS.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 33 se observa la forma de onda de la corriente en una de las fases del motor durante el arranque con variador de velocidad, se aprecia la distorsión y el offset. En el programa se aplicó un filtro que limita dichos efectos.

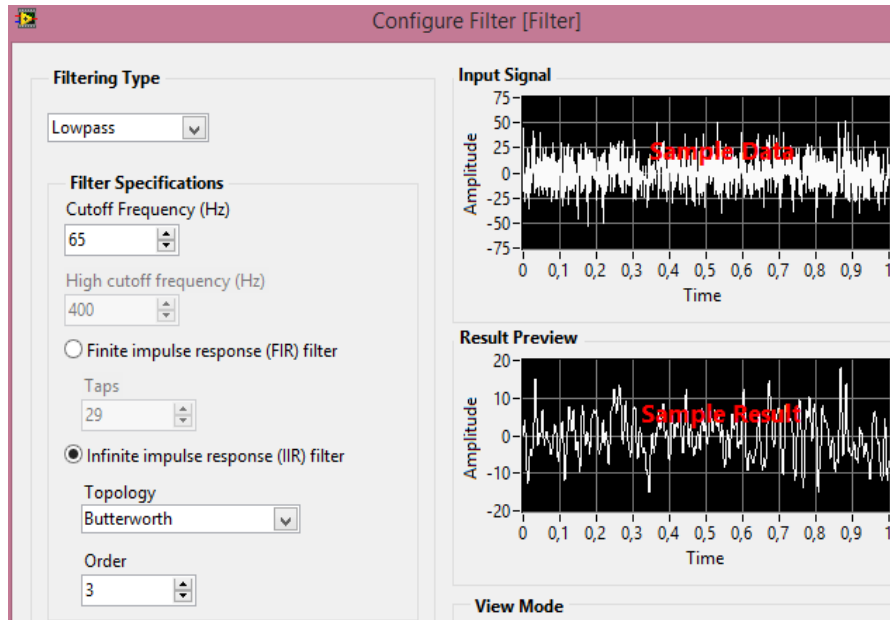
**Figura 34: Sección del diagrama de bloques donde se presenta el filtro utilizado para el variador de velocidad.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 34 se muestra la sección del diagrama de bloques en el programa, donde se incluye el filtro para disminuir el efecto de los armónicos producidos por el variador de velocidad en el cálculo de la corriente eficaz. Se insertó el control booleano “Variador” junto con una estructura “Case” para que las muestras de corriente solo se filtren cuando se ejecute el arranque por variador de velocidad.

**Figura 35: Configuración del filtro**



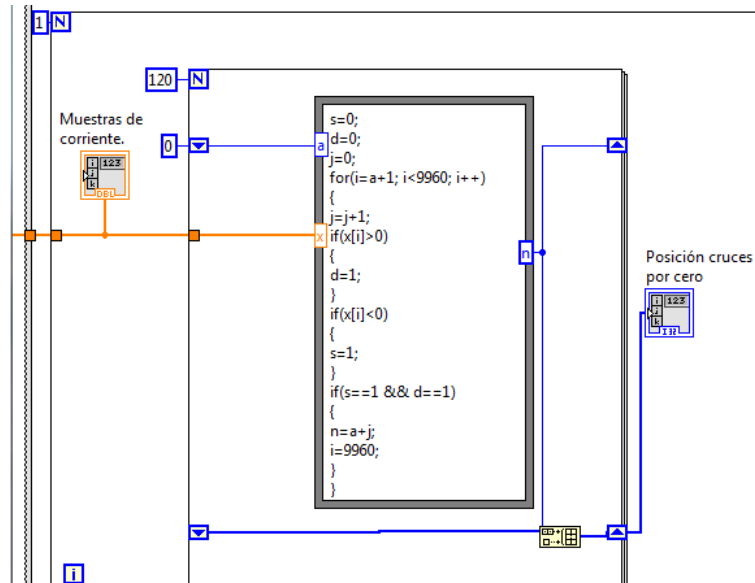
Fuente: Los autores.

El filtro se configuró como pasabajas, una topología Butterworth, con una frecuencia de corte de 65 Hz y de tercer orden, con el propósito de calcular el valor eficaz de la corriente fundamental del arranque con variador de velocidad y aumentar la pendiente de la respuesta en frecuencia y así, el comportamiento del filtro tienda a ser ideal. En la Figura 35 se observa la configuración del filtro. Se estipuló 65 Hz como frecuencia de corte.

**4.2.5.3 Cálculo del valor eficaz de la corriente durante el arranque con variador de velocidad** El variador de velocidad se programó con una rampa de velocidad definida, este varía la frecuencia y la tensión en terminales del motor para realizar la maniobra de puesta en marcha de forma controlada, hasta llevar la máquina a las condiciones normales de operación. Debido a la variación de la frecuencia se agregó una etapa al programa para calcular la corriente eficaz durante el arranque con variador de velocidad.

La nueva etapa del programa está compuesta por una sección para determinar todos los cruces por cero de la señal (Figura 36) y otra para calcular la corriente eficaz con las posiciones de los cruces por cero de la señal (Figura 37).

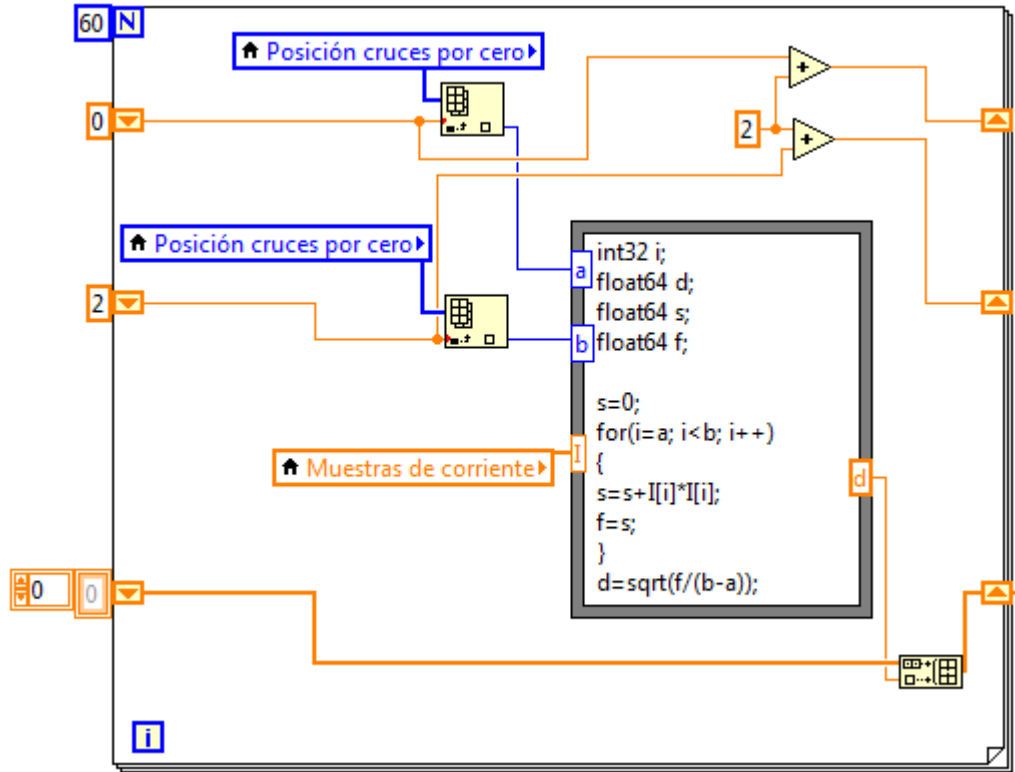
**Figura 36: Sección del diagrama de bloques para determinar todos los cruces por cero de la señal de corriente.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 36 se muestra la sección del programa elaborada para encontrar los cruces por cero dentro del vector de muestras. El vector de muestras entra a la estructura "Formula Node", donde es recorrido por un ciclo "FOR" hasta que se detecta un cruce por cero, momento en el cual el ciclo "FOR" se detiene y entrega a la salida de la estructura "Formula Node" la posición. La salida se acumula en un vector y por medio de un "Shift Register" se retorna como entrada a la estructura "Formula Node" para volver a recorrer el vector de muestras, esta vez iniciando en la última posición de cruce por cero.

**Figura 37: Diagrama de bloques de la sección implementada para estimar la variación del valor RMS considerando el cambio de la frecuencia durante la puesta en marcha por el variador de velocidad.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 37 se muestra la sección del programa elaborada para calcular la corriente eficaz con las posiciones de los cruces por cero de la señal. La estructura "Formula Node" se utilizó para evaluar la Ecuación 9 en un ciclo  $i$ -ésimo de la señal dentro del vector de muestras, la estructura "For Loop" se usó para ir moviendo el  $i$ -ésimo ciclo dentro del vector de muestras y junto con la función "Build Array" crear un vector con los valores eficaces de la corriente para cada ciclo de la señal.

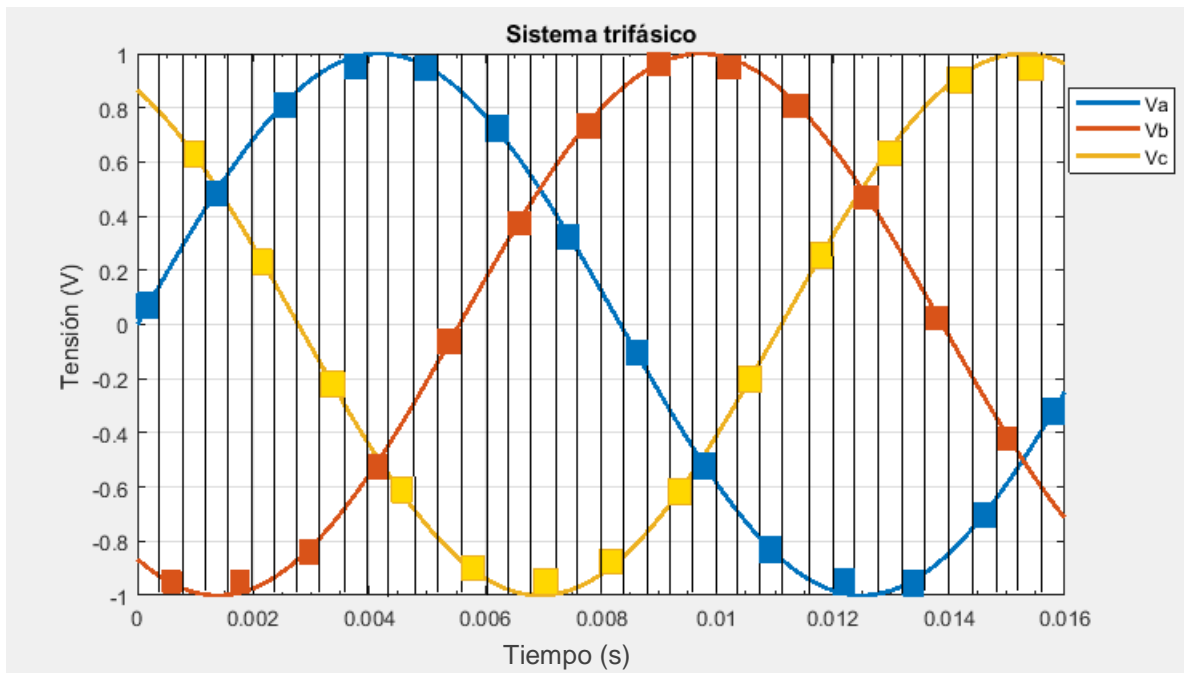
### **4.3 REGISTRO DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE PARA LAS TRES FASES**

Se desarrolló un programa en LabVIEW para registrar la forma de onda de la corriente y graficar la corriente eficaz durante el arranque del motor por fase. Se incluyó el cálculo de la corriente eficaz máxima durante el arranque, la relación entre la corriente eficaz máxima y la corriente nominal del motor, la velocidad durante el arranque y el ángulo en grados por fase del motor.

**4.3.1 Adquisición de la señal** El funcionamiento general del arreglo realizado para las tres fases del motor en esencia tiene la misma estructura del elaborado para una sola fase, pero debido a la complejidad de manejar la información correspondiente a tres canales se realizaron algunos cambios de forma. Una de las principales diferencias está relacionada con la configuración de la tarjeta de adquisición NI 6008, puesto que se requiere hacer el registro de las tres señales de forma “simultánea”.

**4.3.1.1 Muestreo por los tres canales** La tarjeta de adquisición NI 6008 dentro de sus características [4]; no permite la posibilidad de muestrear información simultáneamente por sus canales. Para adquirir señales por varios canales la tarjeta DAQ toma muestras de forma escalonada y cíclica en cada uno de estos (multiplexado de canales).

**Figura 38: Gráfica de la forma en que muestrea la tarjeta de adquisición.**



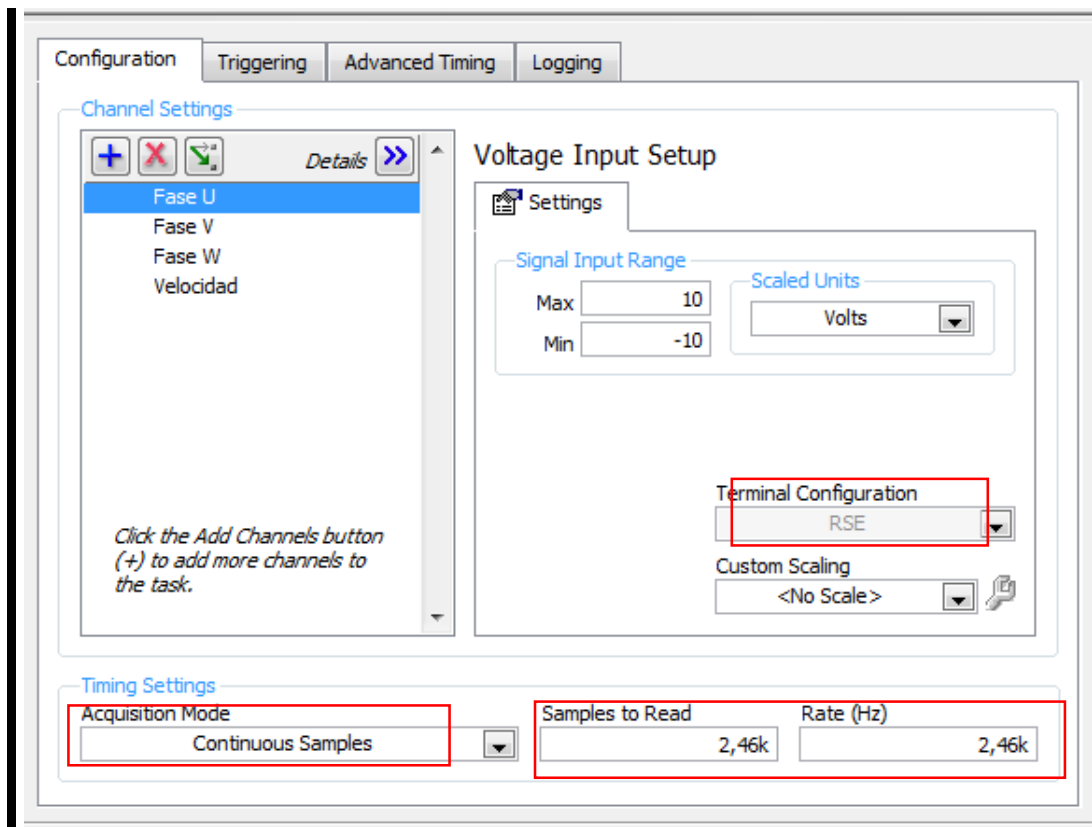
Fuente: Los autores.

En la Figura 38 se ilustra un ejemplo de la forma como la tarjeta NI 6008 lleva a cabo la adquisición de muestras de señales de tensión a través de tres de sus canales. En el primer instante de tiempo se activa el canal AI0 (Va) para registrar una muestra, en un segundo instante, internamente el elemento de adquisición conmuta al canal AI1 (Vb) para tomar una muestra, en un tercer instante la tarjeta vuelve a conmutar tomando el canal AI2 (Vc) y regresa nuevamente al canal AI0. Este proceso se repite cíclicamente, hasta terminar el muestreo, al terminar se tienen las muestras para poder reconstruir las tres señales.

**4.3.1.2 Frecuencia de muestreo** La tarjeta de adquisición NI 6008 permite una frecuencia de muestreo máxima para un solo canal analógico de 10 kS/s, por sus características de adquisición dicha frecuencia se reparte para los N canales con los que se adquiere datos, tal como se ilustró en el numeral anterior.

En este caso particular se trabajó con cuatro canales analógicos, puesto que se registró información de la señal de corriente de las tres fases y la velocidad. Para la elección de la frecuencia de muestreo se consideró el uso de los cuatro canales y se asumió constante el periodo fundamental de la señal en 1/60 s, por lo tanto, se eligió 2,46 kS/s que además cumple con la condición de ser un múltiplo entero de la frecuencia de la red y satisface el criterio de Nyquist.

**Figura 39: Configuración del DAQ Assistant para tres canales.**

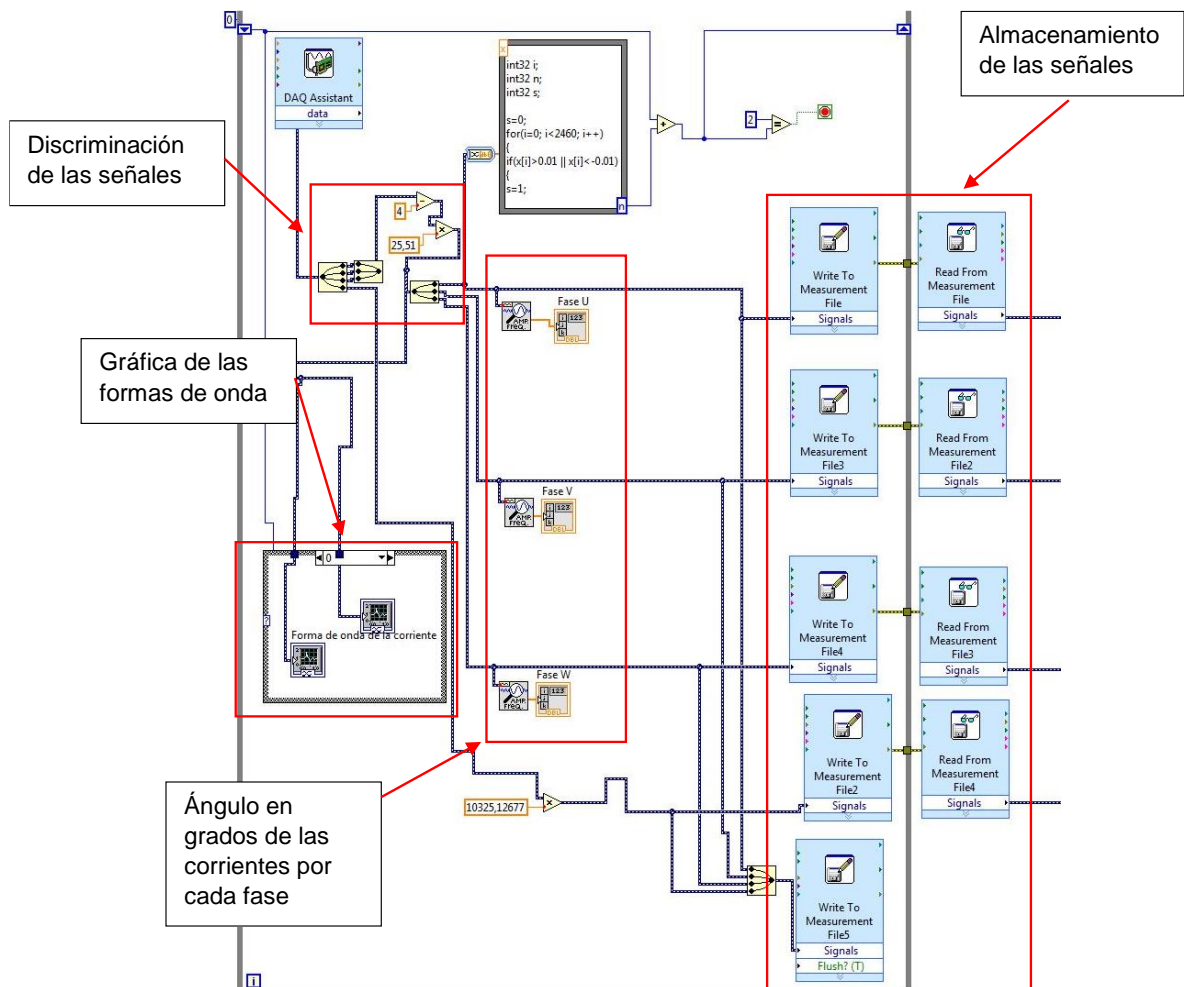


Fuente: Los autores.

En la Figura 39 se muestra la ventana del DAQ Assistant donde se configuró la frecuencia de muestreo, el número de muestras para leer y el modo de operación de la tarjeta de adquisición.

**4.3.1.3 Adquisición y almacenamiento de las señales de corriente** El almacenamiento y muestreo de las tres señales de corriente se llevó a cabo de forma similar al caso de una sola fase. En la Figura 40, se muestra el diagrama de bloques en LabVIEW implementado para el muestreo y almacenamiento, donde se aprecian las variaciones respecto del programa elaborado para el registro de la corriente en una sola fase del motor.

**Figura 40: Etapa de adquisición y almacenamiento para tres canales.**



Fuente: Los autores.

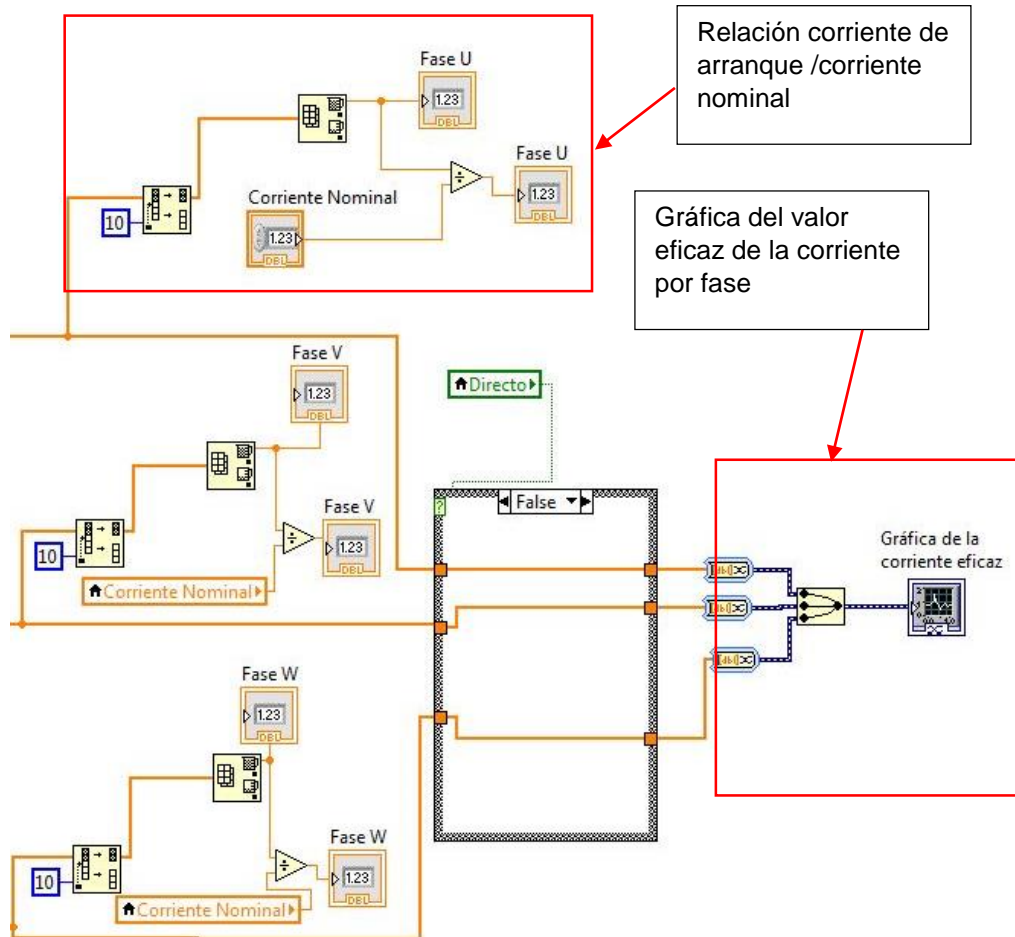
Para discriminar cada uno de los canales se usó la función “Split”, a la cual entra un vector con las muestras de los tres canales y salen tres vectores con muestras de las señales de corriente, uno por canal. Las muestras separadas por canal se procesan para calcular el ángulo de fase en grados por fase del motor.

En el almacenamiento de las señales se utilizó una función “Write To Measurement File” y una función “Read From Measurement File” por canal, cada conjunto de funciones tiene un archivo TDMS asociado. La función “Case” se usó para graficar la forma de onda de la corriente durante el primer segundo, cuando ocurre el arranque.

**4.3.2 Cálculo del valor eficaz de la corriente para las tres fases durante el arranque** El cálculo del valor eficaz de la corriente para las tres fases se llevó a cabo usando los mismos bloques de funciones en LabVIEW utilizados en el caso de una sola fase. Se implementó el filtro para las tres fases en el arranque con variador de velocidad y se eliminó el error en el vector de muestras por canal para el arranque estrella-triángulo.

**4.3.3 Corriente máxima y relación de la corriente de arranque** Se incluyó en el programa una etapa para obtener la corriente máxima eficaz durante el arranque, así como la relación entre esta y la corriente nominal del motor.

**Figura 41: Sección del diagrama de bloques para obtener la corriente máxima RMS y la relación entre esta y la corriente nominal del motor.**



Fuente: Los autores.

Se utilizó la función “Array Max & Min” para encontrar el valor máximo de la corriente eficaz durante el arranque del motor por fase, con la función “Divide” se dividió este valor entre la corriente nominal para calcular la relación de la corriente de arranque-corriente nominal. En la presentación de la gráfica del valor eficaz por fase se usó un “Split” para multiplexar las tres señales y mostrarlas en una sola gráfica.

#### 4.4 REGISTRO DE LA VELOCIDAD DURANTE EL ARRANQUE

En el programa desarrollado “Visualización de la corriente de arranque” se agregó el registro de la velocidad del motor durante el arranque.

**4.4.1 Registro de la señal de velocidad** La señal de la velocidad se registró por medio del sensor QRD1114 de DYNAMIC ELECTRONICS, disponible en el gabinete de arrancadores. Las características generales del sensor se presentan en la Tabla 17.

**Tabla 17: Especificaciones del sensor de velocidad QRD1114 de DYNAMIC ELECTRONICS.**

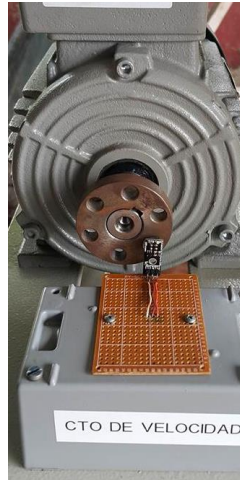
<b>Especificaciones</b>	<b>QRD1114 (Módulo)</b>
Fabricante	Dynamic Electronics
Distancia de detección	1.27 mm
Máx. voltaje VCEO colector-emisor	30 V
Corriente máxima de colector	1 mA
Vf - Tensión directa	1.7 V
Vr - Tensión inversa	5 V
Temperatura de trabajo máxima	+85 °C
Temperatura de trabajo mínima	-40 °C
Tiempo de caída	50 us
Altura	4.65 mm
If - Corriente directa	20 mA
Longitud	6.1 mm
Tipo de salida	Fototransistor
Dp - Disipación de potencia	100 mW
Tiempo de subida	10 us
Método de detección	Reflectivo

Fuente: Los autores.

El sensor está montado junto al motor SIEMENS, como se muestra en la Figura 42. Este detecta los agujeros en el disco produciendo un pulso cuadrado a la salida,

que debido al giro del eje del motor se convierte en una señal de pulsos cuadrados, cuya frecuencia varía con la velocidad de giro.

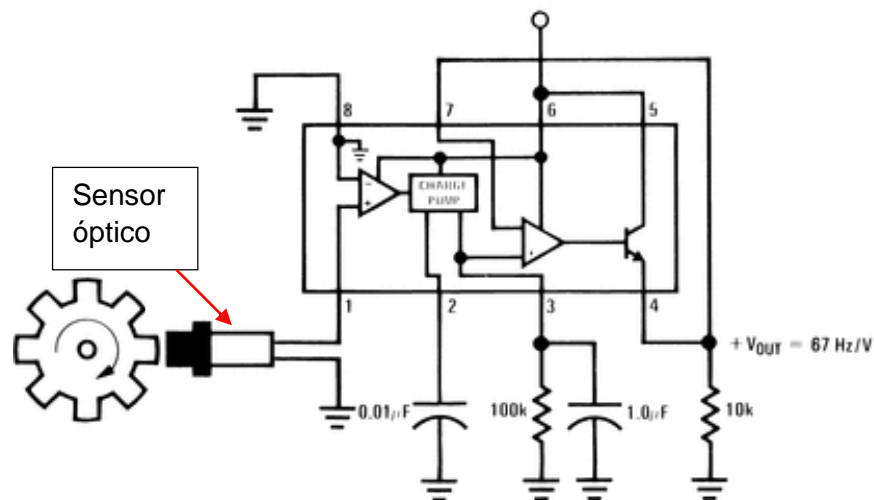
**Figura 42: Montaje del sensor de velocidad.**



Fuente: Los autores.

La señal a la salida del sensor se convirtió de frecuencia a tensión empleando el circuito integrado LM2907 que se muestra en la Figura 43.

**Figura 43: Circuito integrado LM2907 (Convertidor de frecuencia a tensión).**

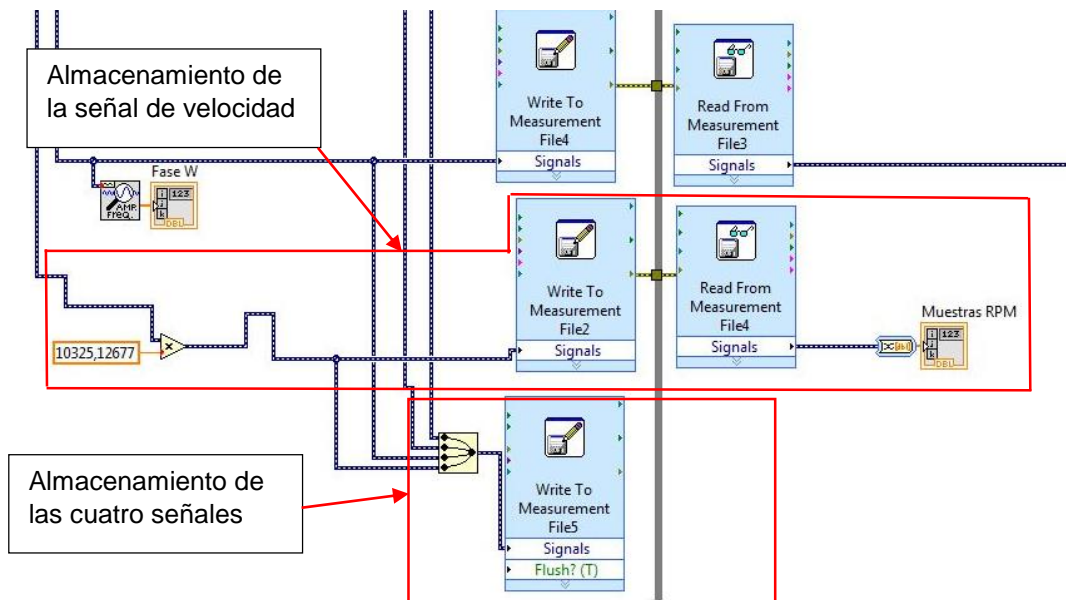


Fuente: [http://www.ti.com/diagrams/custom\\_diagram\\_1\\_LM2907-N.gif](http://www.ti.com/diagrams/custom_diagram_1_LM2907-N.gif)

En la adquisición de la señal de velocidad se usó la entrada analógica AI3 de la tarjeta DAQ NI 6008 configurada en modo referencial.

**4.4.2 Almacenamiento y gráfica de la velocidad** En la Figura 44 se muestra la sección del programa implementada para almacenar la señal de velocidad, además se presenta una sección implementada para almacenar las tres señales de corriente y la velocidad en el archivo EXCEL “Señales de corriente y velocidad”.

**Figura 44: Diagrama en el que se observa donde se almacenan las diferentes señales.**



Fuente: Los autores.

Se llevó a cabo una prueba en la cual se midió la velocidad del motor en estado estable y la tensión a la salida del circuito convertidor de la Figura 43. Para una velocidad de 1800 RPM se midió una tensión equivalente de 0,235542 volts, a partir de estos datos e implementando la Ecuación 12 se calculó el vector de “Muestras RPM”.

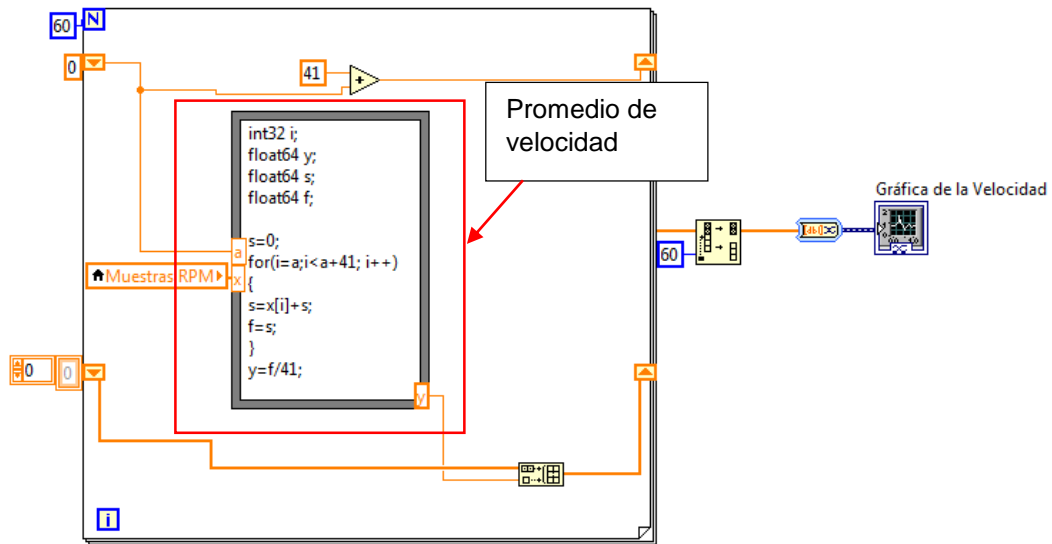
### Ecuación 12: Vector de muestras de velocidad.

$$V_{RPM}[n] = \frac{1800 * V_{Vdc}[n]}{0,235542}$$

Fuente: Los autores.

Donde  $V_{Vdc}[n]$  es el vector de muestras de tensión a la salida el circuito convertidor en volts y  $V_{RPM}[n]$  es el vector de muestras de velocidad en RPM.

Figura 45: Diagrama implementado para realizar la gráfica de la velocidad.



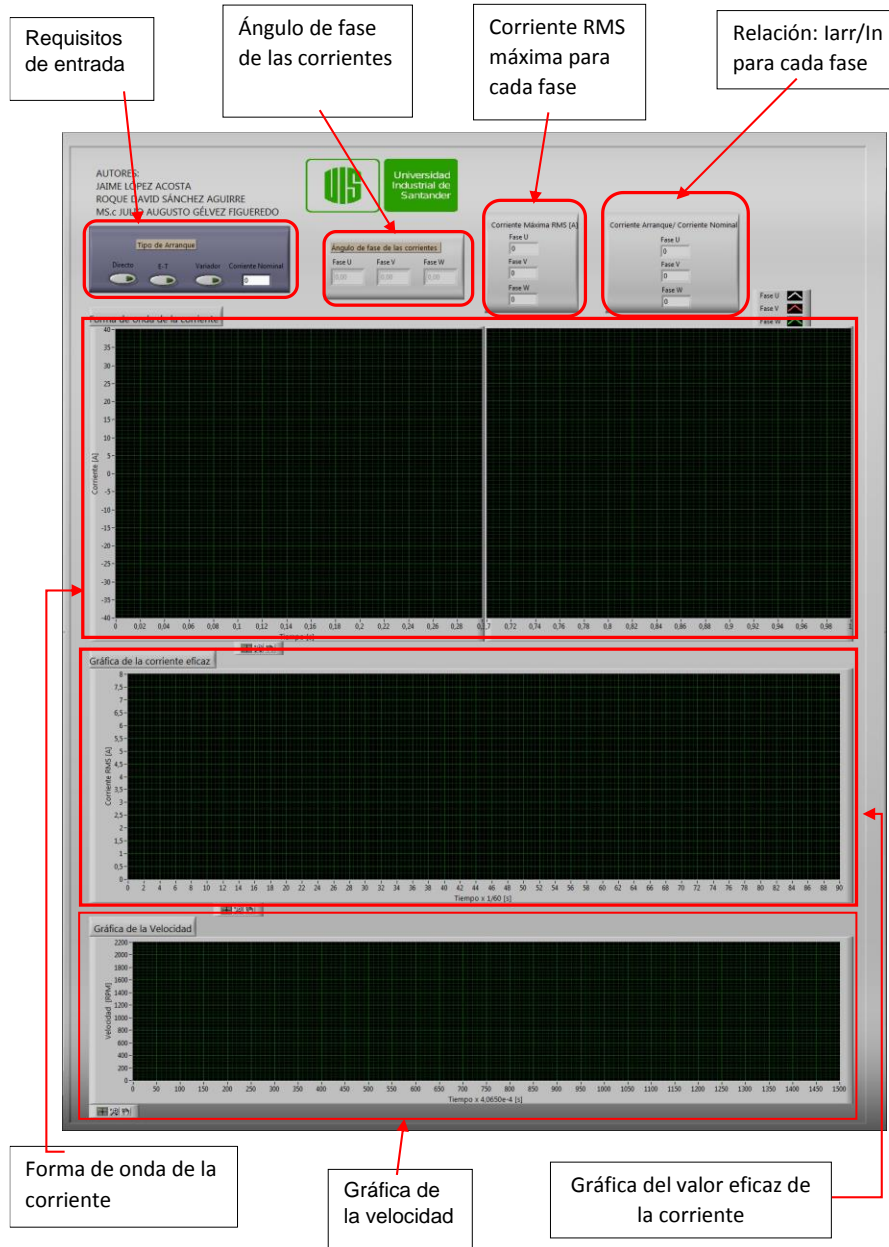
Fuente: Los autores.

En la figura 45 se presenta el diagrama de bloques en LabVIEW implementado para realizar la gráfica de la velocidad a partir de las muestras almacenadas. El vector de muestras ingresa a la estructura "Formula Node", es recorrido por un ciclo "For" para realizar el promedio de la velocidad cada 41 muestras. Los promedios se acumulan en un vector que posteriormente se gráfica.

## 4.5 PANEL FRONTAL

Se organizaron las entradas y salidas del programa en el panel frontal que se muestra en la Figura 46.

**Figura 46: Panel frontal del programa elaborado en LabVIEW.**



Fuente: Los autores.

En el panel frontal se muestran las entradas al programa; tipo de arranque y corriente nominal. También se muestran las salidas del programa; el ángulo de fase de las corrientes, la corriente RMS máxima por fase, la relación corriente de arranque-corriente nominal por fase, la forma de onda de la corriente durante el arranque del motor, la gráfica del valor eficaz de la corriente por fase y la velocidad durante el arranque del motor.

## 5. ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS OBTENIDAS

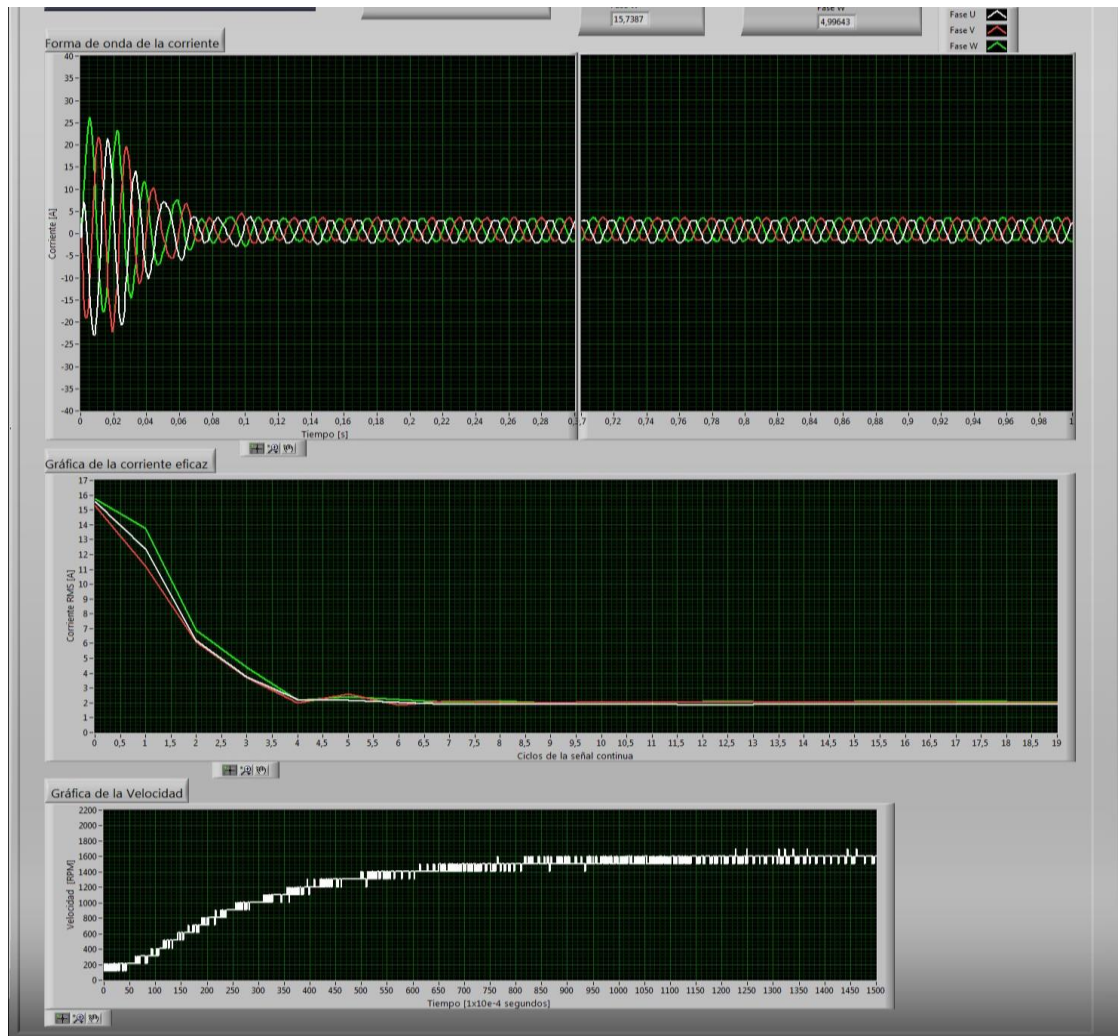
### 5.1 ARRANQUE DEL MOTOR SIEMENS

Se utilizó el programa desarrollado para graficar la corriente de arranque por fase con el motor de inducción SIEMENS disponible en el gabinete de arrancadores, sus principales características se muestran en la Tabla 4. Se ejecutaron los arranques: estrella-triángulo, por variador de velocidad y arranque directo.

**5.1.1 Arranque directo** Se realizó el arranque directo del motor SIEMENS disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas, los datos registrados durante la prueba se almacenaron en los archivos de EXCEL “Señales de corriente y velocidad” y “RMS por canal”. En la Tabla 18 se registran los valores medidos de corriente máxima y la relación corriente de arranque sobre corriente nominal del motor.

### 5.1.1.1 Análisis de la forma de onda, gráfica de corriente eficaz y velocidad obtenida

Figura 47: Panel frontal del programa “Visualización de la corriente de arranque” en la ejecución de un arranque directo.



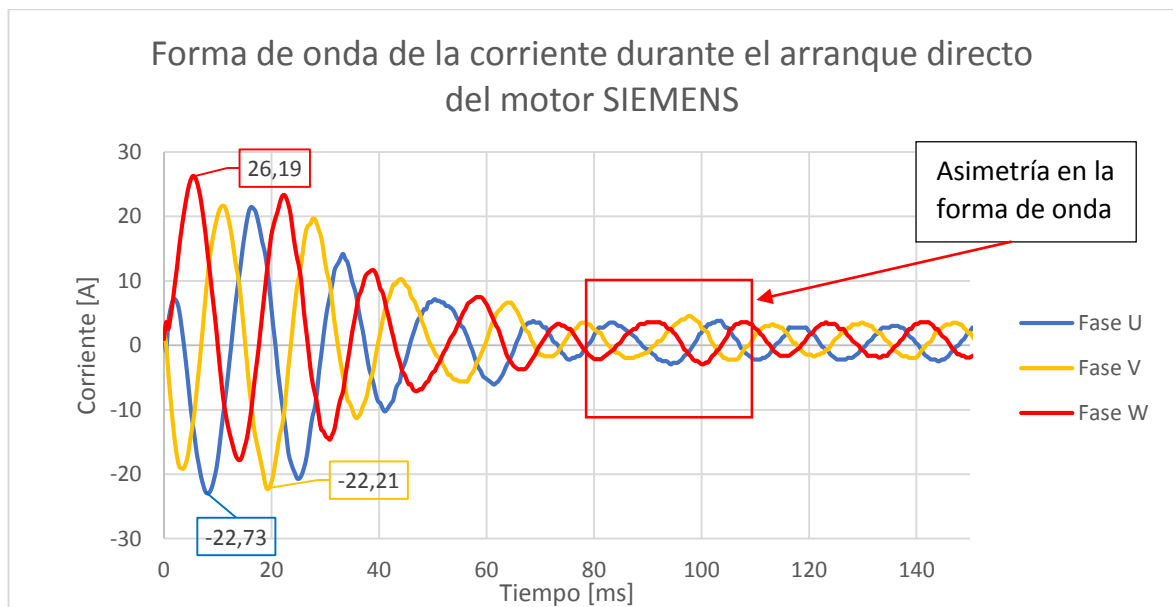
Fuente: Los autores.

En la Figura 47 se muestra el panel frontal en LabVIEW tras la ejecución de un arranque directo, donde se aprecia la forma de onda de la corriente por fase del motor, la gráfica del valor eficaz de la corriente por fase del motor, la corriente de

arranque, la velocidad durante el arranque, así como la relación entre la corriente de arranque y la corriente nominal del motor.

La información registrada de la forma de onda de la corriente, la gráfica del valor eficaz de la corriente por fase y la velocidad durante el arranque se almacenó en los archivos de EXCEL “Señales de corriente y velocidad” y “RMS por canal”. Esta información se usó para analizar el comportamiento de las diferentes magnitudes calculadas en el programa y graficar en forma independiente un determinado número de valores.

**Figura 48: Forma de onda de la corriente en las tres fases del motor de inducción SIEMENS para un arranque directo.**

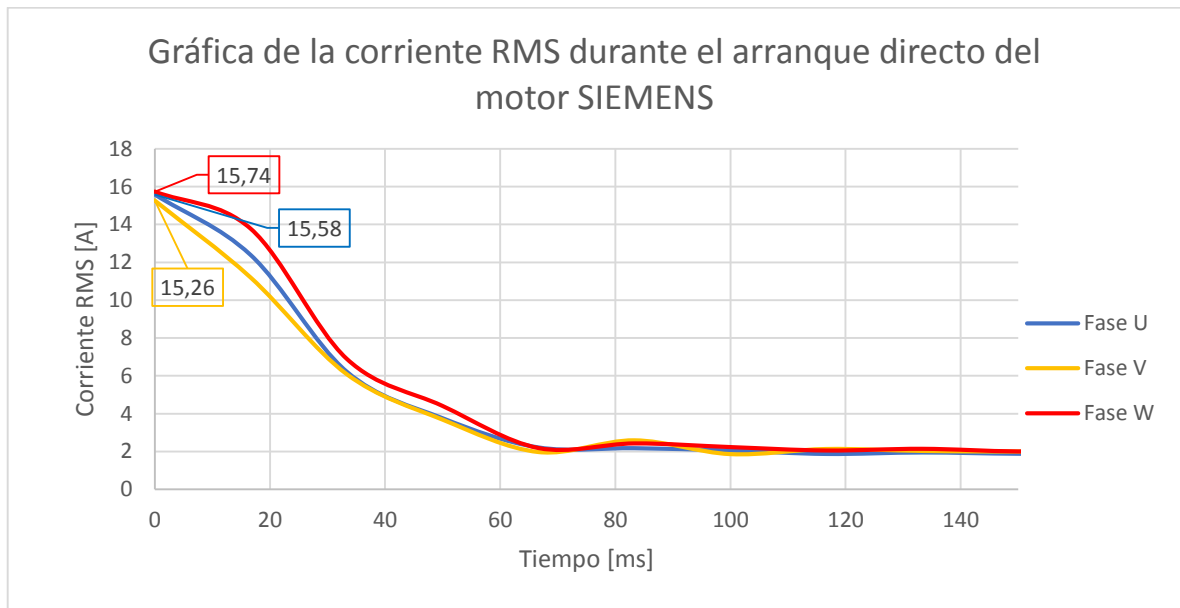


Fuente: Los autores.

En la Figura 48 se presenta la forma de onda de la corriente por fase durante un arranque directo del motor de inducción SIEMENS (gráficas en EXCEL). Los picos máximos de corriente durante este fueron: -22,73 amperes, -22,21 amperes y 26,19 amperes, para las fases U, V y W respectivamente. Las tres señales de corriente aparentemente se estabilizan en 80 milisegundos (la velocidad demora

450 milisegundos en estabilizarse), momento en el cual se aprecia una asimetría de las señales que posteriormente se atenúa.

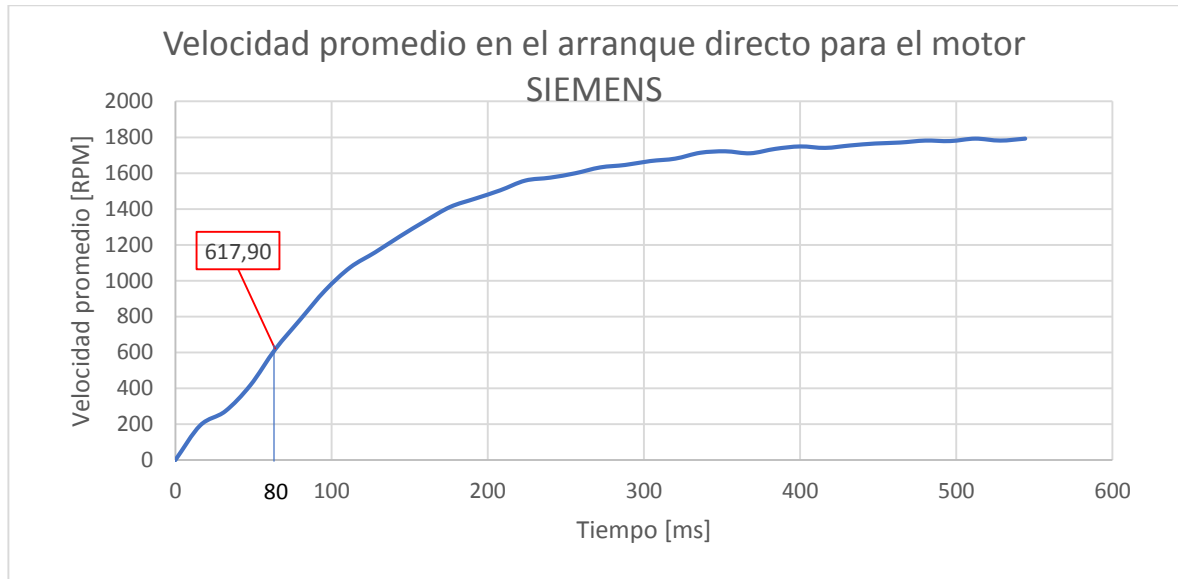
**Figura 49: Gráfica de la corriente eficaz por fase durante el arranque directo del motor SIEMENS.**



Fuente: Los autores.

Las gráficas de valor eficaz calculadas en esta prueba que se presentan en la Figura 49, reflejan la existencia de un desbalance de la corriente en las tres fases durante el arranque. El valor eficaz máximo calculado fue de 15,74 amperes RMS en la fase W, el mínimo fue 15,26 amperes RMS en la fase V y 15,58 amperes RMS en la fase U.

**Figura 50: Gráfica de la velocidad durante el arranque directo del motor SIEMENS promediada cada 1/60 segundos.**



Fuente: Los autores.

La información de la velocidad registrada en el archivo de Excel “Señales de corriente y velocidad”, se graficó y se obtuvo la gráfica de la Figura 50, en esta se observa que el motor tiene una velocidad promedio de 617,90 RPM en 80 milisegundos. La velocidad tarda 450 milisegundos en estabilizarse.

**5.1.1.2 Cálculo de la corriente aproximada de arranque directo del motor SIEMENS** Se calculó el valor aproximado de la corriente de arranque directo para el motor SIEMENS usando la Ecuación 13.

**Ecuación 13: Corriente de arranque para un motor de inducción.**

$$I_{Arr} = \frac{V_f}{\sqrt{R_e^2 + X_e^2}}$$

Fuente: Los autores.

Donde  $V_f$  es la tensión de fase en volts en los terminales del motor,  $R_e$  es la resistencia equivalente aproximada del motor en ohmios,  $X_e$  es la reactancia equivalente del motor en ohm y  $I_{Arr}$  es la corriente de arranque del motor en amperes RMS. La resistencia equivalente y la reactancia equivalente se calcularon en el trabajo de grado [1] mediante la prueba de rotor bloqueado considerando el modelo aproximado del motor de inducción.

Los valores de la resistencia equivalente aproximada del motor y reactancia equivalente se obtuvieron del trabajo de grado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”. La tensión de fase en los terminales del motor es de 220 volts.

$$I_{Arr} = \frac{220}{\sqrt{6,38^2 + 9,16^2}}$$

La corriente de arranque aproximada calculada para el motor de inducción SIEMENS fue:

$$I_{Arr} = 19,71 [A_{RMS}]$$

**5.1.1.3 Comparación de la magnitud de la corriente obtenida durante el arranque directo con los valores de referencia** En la Tabla 18 se presentan las medidas registradas durante el ensayo para la corriente eficaz máxima de arranque por fase y relación corriente de arranque respecto a la corriente nominal del motor por fase (3,15 amperes, Tabla 4).

**Tabla 18: Valores calculados por el programa “Visualización de la corriente de arranque” para la corriente máxima RMS y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, para el arranque directo.**

Arranque directo					
I <sub>max</sub> RMS (A)			I <sub>arr</sub> /I <sub>n</sub>		
U	V	W	U	V	W
15,58	15,26	15,74	4,95	4,85	5,00
16,29	14,20	16,52	5,17	4,51	5,25
15,24	15,46	16,68	4,84	4,91	5,29
15,44	15,44	16,50	4,90	4,90	5,24
15,14	15,22	16,44	4,81	4,83	5,22
15,22	15,40	16,51	4,83	4,89	5,24
15,30	15,78	15,34	4,86	5,01	4,87
15,54	15,62	16,89	4,93	4,96	5,36
14,74	14,98	15,40	4,68	4,76	4,89
15,12	14,65	15,37	4,80	4,65	4,88

Fuente: Los autores.

Con los datos de la Tabla 18, se calculó el valor promedio por fase para las dos magnitudes registradas. Utilizando la Ecuación 5 se determinó el error relativo porcentual; se usó la corriente aproximada calculada y la relación suministrada en la placa del motor (Tabla 4) como valores de referencia. Los datos mencionados se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19: Valores promedio y errores relativos porcentuales de la corriente máxima y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, en el arranque directo.**

	Fase	U	V	W
I <sub>max</sub> RMS	Promedio [A]	15,36	15,20	16,14
	ER%	22,08	22,88	18,13
I <sub>arr</sub> /I <sub>n</sub>	Promedio	4,88	4,83	5,12
	ER%	18,72	19,57	14,61

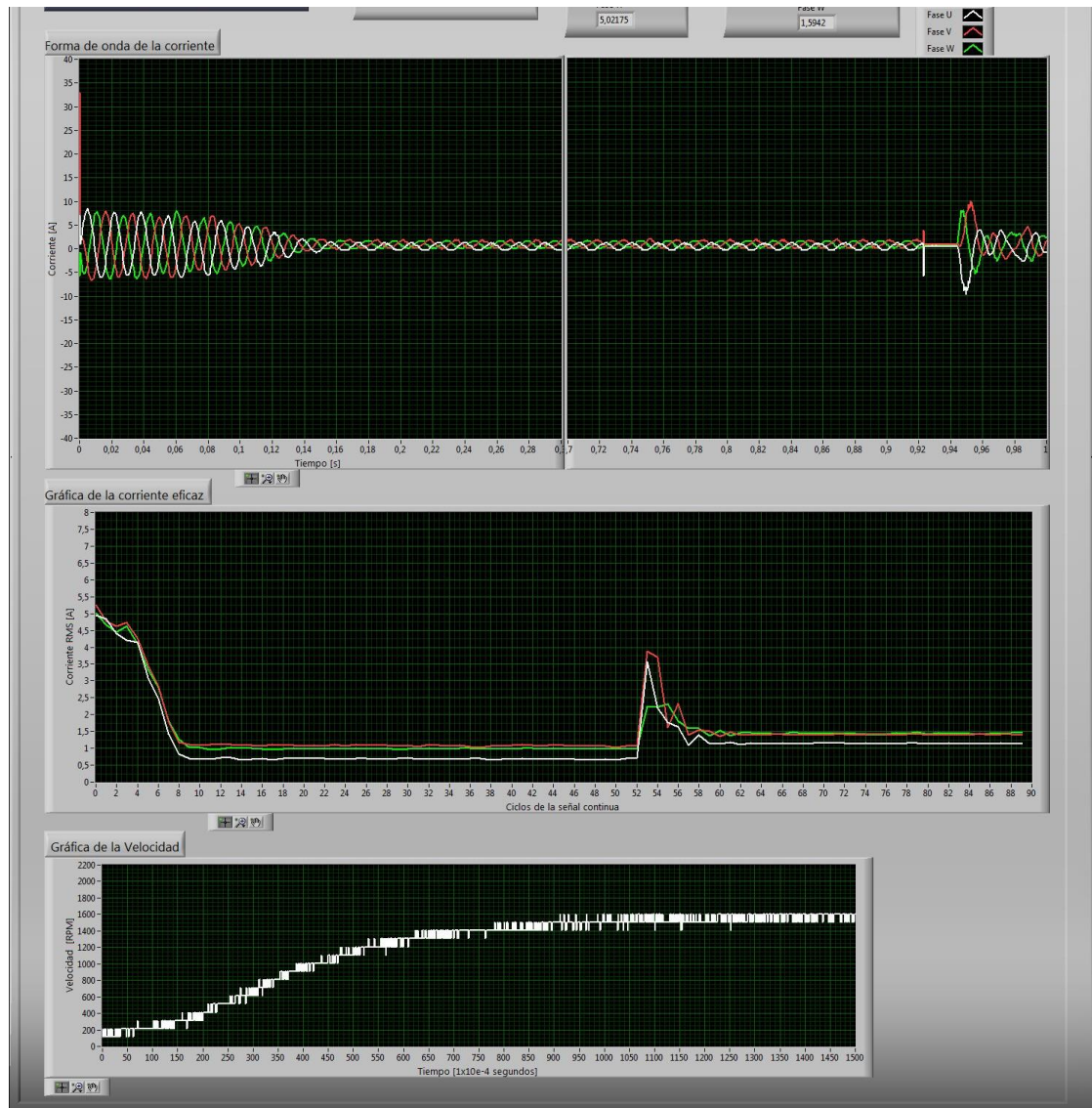
Fuente: Los autores.

En la Tabla 19 se muestra que los valores más cercanos a los datos de referencia para el motor de inducción se obtuvieron en la fase W. Además, contrastando las Figuras 49 y 50 se concluye que el motor no se estabiliza en 80 milisegundos, sino en 450 milisegundos, momento en el cual alcanza su velocidad de estado estable en vacío.

**5.1.2 Arranque estrella-triángulo** Se realizó el arranque estrella-triángulo del motor SIEMENS disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas, se registraron diez tomas de datos.

**5.1.2.1 Análisis de la forma de onda, gráfica de corriente eficaz y velocidad obtenida** En la Figura 51 se muestra el panel frontal en LabVIEW tras la ejecución de un arranque estrella-triángulo, donde se aprecian las diferentes salidas gráficas del programa.

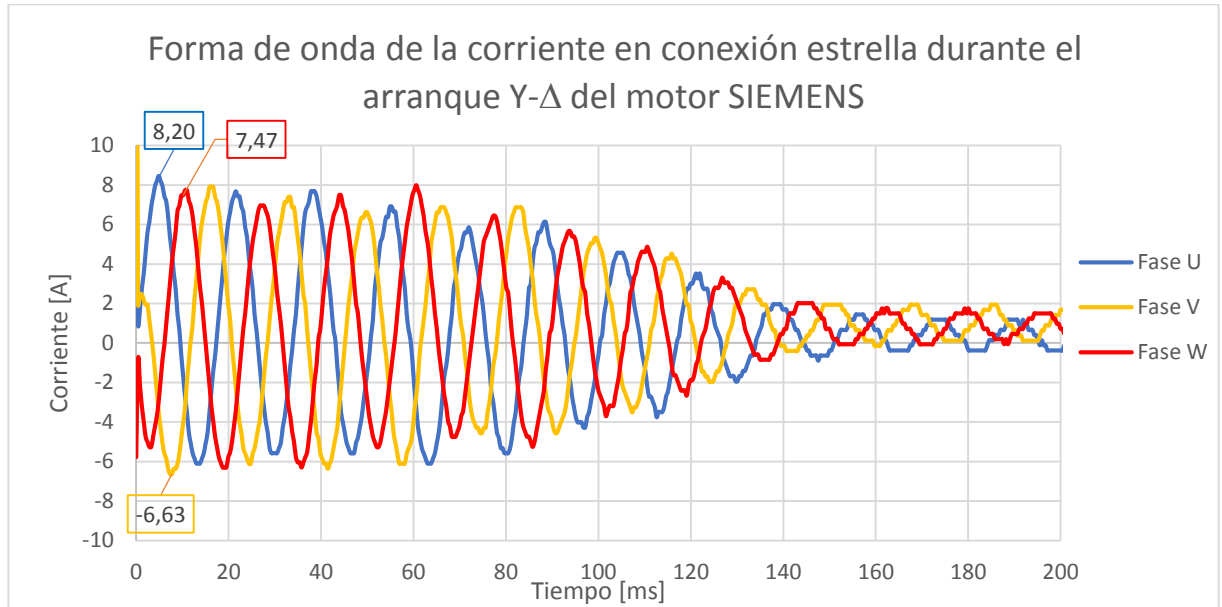
**Figura 51: Panel frontal del programa “Visualización de la corriente de arranque” en la ejecución de un arranque estrella-triángulo.**



Fuente: Los autores.

De forma similar al caso anterior, las señales registradas en este arranque se almacenaron en los archivos de EXCEL “Señales de corriente y velocidad” y “RMS por canal”. Esta información se usó para analizar y graficar en forma independiente un determinado número de valores.

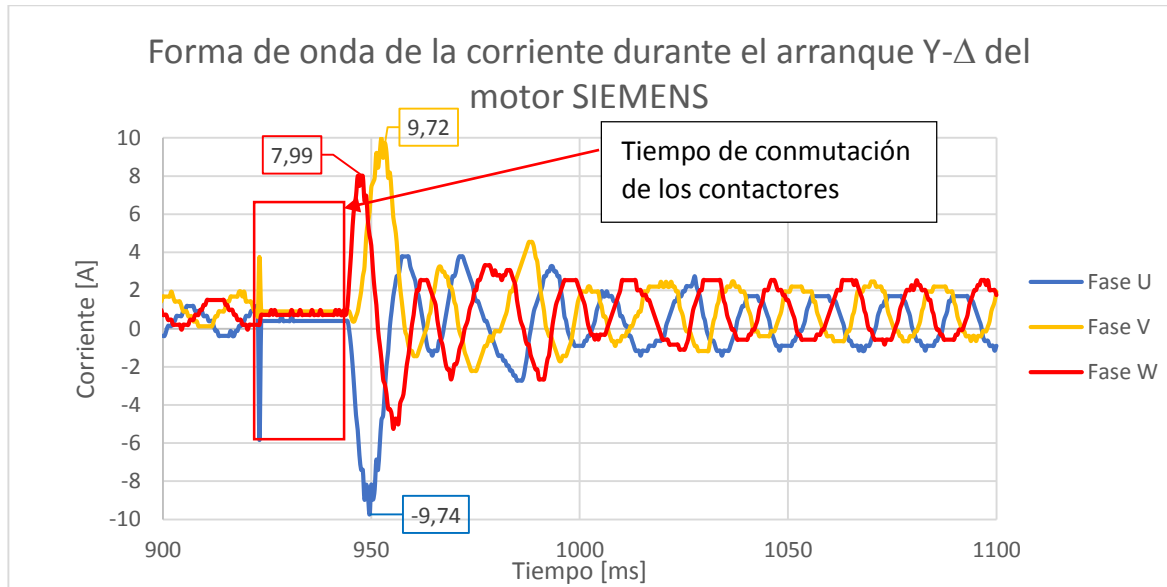
**Figura 52: Forma de onda de la corriente en las tres fases del motor de inducción SIEMENS en conexión estrella durante un arranque estrella-triángulo.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 52 se presenta la gráfica en EXCEL de la forma de onda de la corriente por fase durante la conexión estrella del motor de inducción SIEMENS. Los picos máximos de corriente durante este fueron: 8,20 amperes, -6,63 amperes y 7,47 amperes, para las fases U, V y W respectivamente.

**Figura 53: Forma de onda de la corriente en las tres fases del motor de inducción SIEMENS en la conmutación de estrella a triángulo.**

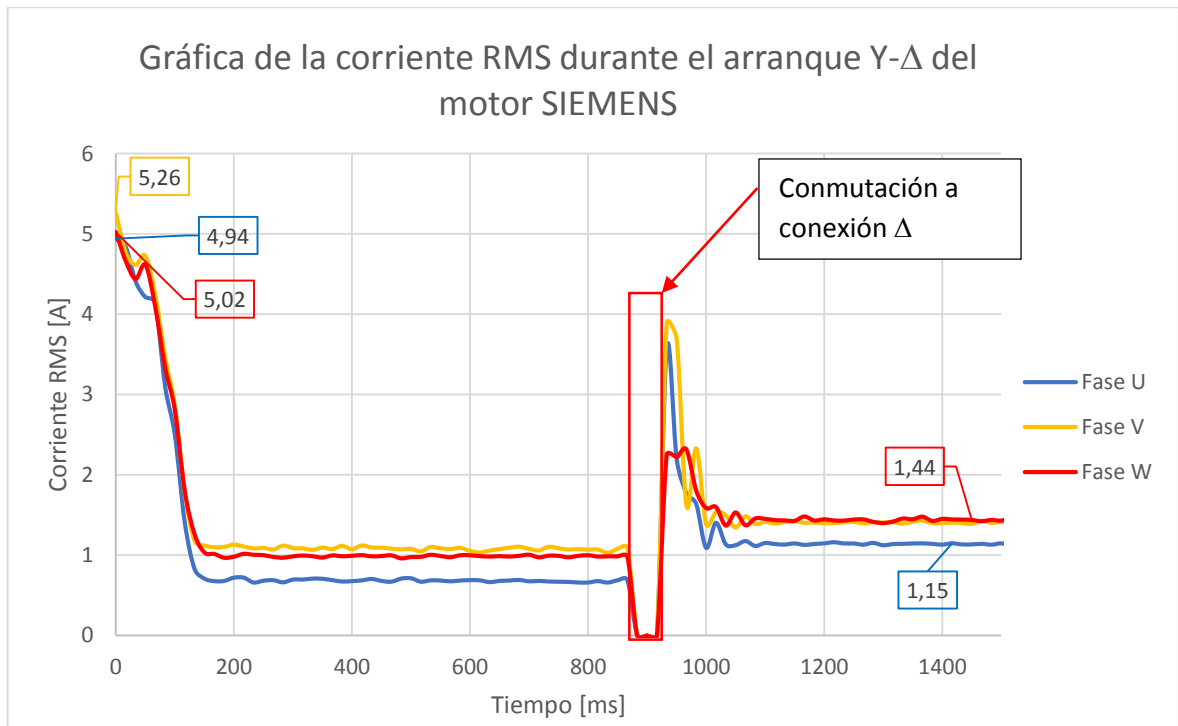


Fuente: Los autores.

El arranque estrella-triángulo tiene como característica que se presenta un tiempo de corriente cero (Tiempo de conmutación de los contactores de estrella a triángulo). En la Figura 53 se observa la forma de onda de la corriente durante la conmutación de estrella a triángulo, el lapso va desde 0,920 segundos a 0,946 segundos aproximadamente (Estando desenergizado durante 0,026 segundos). Tras la conmutación la corriente alcanza un valor pico de -9,74 amperes, 9,72 amperes y 7,99 amperes, para las fases U, V y W respectivamente.

Al comparar el comportamiento de las formas de onda presentadas en las Figuras 52 y 53 se puede observar que los picos de corriente en esta última son mayores, sin embargo, el tiempo que duran en estabilizarse las corrientes es de 50 milisegundos, un tiempo menor comparado con los 150 milisegundos de la Figura 52.

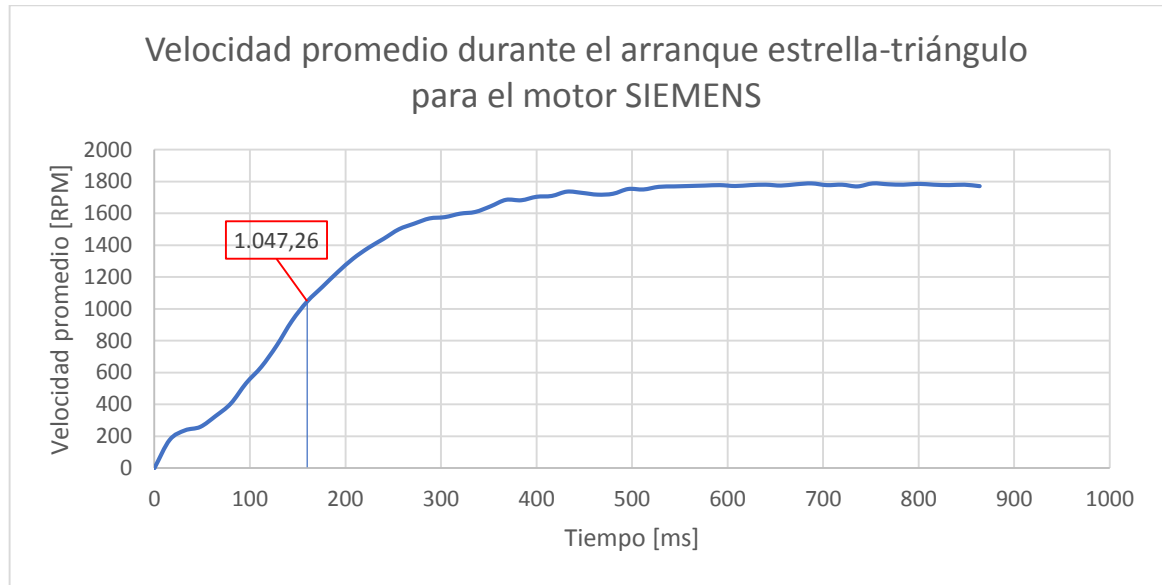
**Figura 54: Gráfica de la corriente eficaz por fase durante el arranque estrella-triángulo del motor SIEMENS.**



Fuente: Los autores.

La gráfica del valor eficaz de la corriente durante el arranque estrella-triángulo se presenta en la Figura 54, en esta se aprecian dos secciones; la conexión estrella y la conexión triángulo. Los picos máximos calculados para la corriente eficaz fueron: 4,94 amperes en la fase U, 5,26 amperes en la fase V y 5,02 amperes en la fase W. En el comportamiento del valor eficaz en estado estable se observa un desbalance en la fase U, puesto que las otras dos fases presentan un valor de 1,44 amperes, mientras que esta presenta el valor de 1,15 amperes (Funcionamiento del motor en conexión triángulo).

**Figura 55: Gráfica de la velocidad durante el arranque estrella-triángulo del motor SIEMENS promediada cada 1/60 segundos.**



Fuente: Los autores.

En la Figura 55 se muestra la gráfica de la velocidad durante el arranque estrella-triángulo del motor SIEMENS, en este caso en el instante que la corriente aparentemente se estabiliza (150 milisegundos) el motor tiene una velocidad de 1047,26 RPM. El motor alcanza la velocidad máxima en vacío transcurridos 600 milisegundos aproximadamente.

**5.1.2.2 Cálculo de la corriente aproximada de arranque estrella-triángulo del motor SIEMENS** Se calculó el valor aproximado de la corriente de arranque estrella-triángulo para el motor SIEMENS, para esto se utilizó la Ecuación 13. En este caso la máquina se pone en marcha en conexión estrella, por lo tanto, la tensión de fase es igual a la tensión de línea dividida entre raíz de tres ( $220/\sqrt{3}$ ).

Los demás valores de la resistencia equivalente aproximada del motor y reactancia equivalente se obtuvieron del trabajo de grado "Banco de pruebas dinámico para

arranadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW”.

**Ecuación 14: Corriente de arranque para un motor de inducción en conexión estrella.**

$$I_{Arr} = \frac{\frac{220}{\sqrt{3}}}{\sqrt{6,38^2 + 9,16^2}}$$

Fuente: Los autores.

Al sustituir los valores se obtuvo la corriente de estrella-triángulo aproximada calculada para el motor de inducción SIEMENS:

$$I_{Arr} = 11,38[A_{RMS}]$$

**5.1.2.3 Comparación de la magnitud de la corriente obtenida durante el arranque estrella-triángulo con los valores de referencia** Se ejecutaron diez arranques estrella-triángulo al motor SIEMENS, en la Tabla 20 se muestran las medidas registradas de la corriente eficaz máxima de arranque por fase y relación corriente de arranque respecto a la corriente nominal del motor por fase (3,15 amperes, Tabla 4).

**Tabla 20: Valores calculados por el programa “Visualización de la corriente de arranque” para la corriente máxima RMS y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, para el arranque estrella-triángulo.**

Arranque Y-D					
Imax RMS (A)			Iarr/In		
U	V	W	U	V	W
4,94	5,26	5,02	1,57	1,67	1,59
4,98	5,11	5,61	1,58	1,62	1,78
5,39	8,68	8,26	1,71	2,76	2,62

Arranque Y-D					
I <sub>max</sub> RMS (A)			I <sub>arr</sub> /I <sub>n</sub>		
U	V	W	U	V	W
5,14	4,82	5,70	1,63	1,53	1,81
6,63	5,05	6,99	2,10	1,60	2,22
5,71	5,33	5,21	1,81	1,69	1,65
5,71	5,33	5,21	1,81	1,69	1,65
5,07	5,21	5,50	1,61	1,65	1,74
5,06	8,42	5,35	1,61	2,67	1,70
5,05	5,17	5,53	1,60	1,64	1,75

Se calculó el promedio para la corriente eficaz por fase y para la relación entre corriente de arranque respecto a la corriente nominal. Se realizó una comparación usando el criterio de error relativo porcentual mediante la Ecuación 5. Los valores de referencia tomados fueron el valor de la corriente aproximada durante el arranque estrella-triángulo (11,38 amperes) y el valor 1,5 [6] como relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal.

**Tabla 21: Valores promedio y errores relativos porcentuales de la corriente máxima y la relación de corriente de arranque respecto de la corriente nominal, en el arranque estrella-triángulo.**

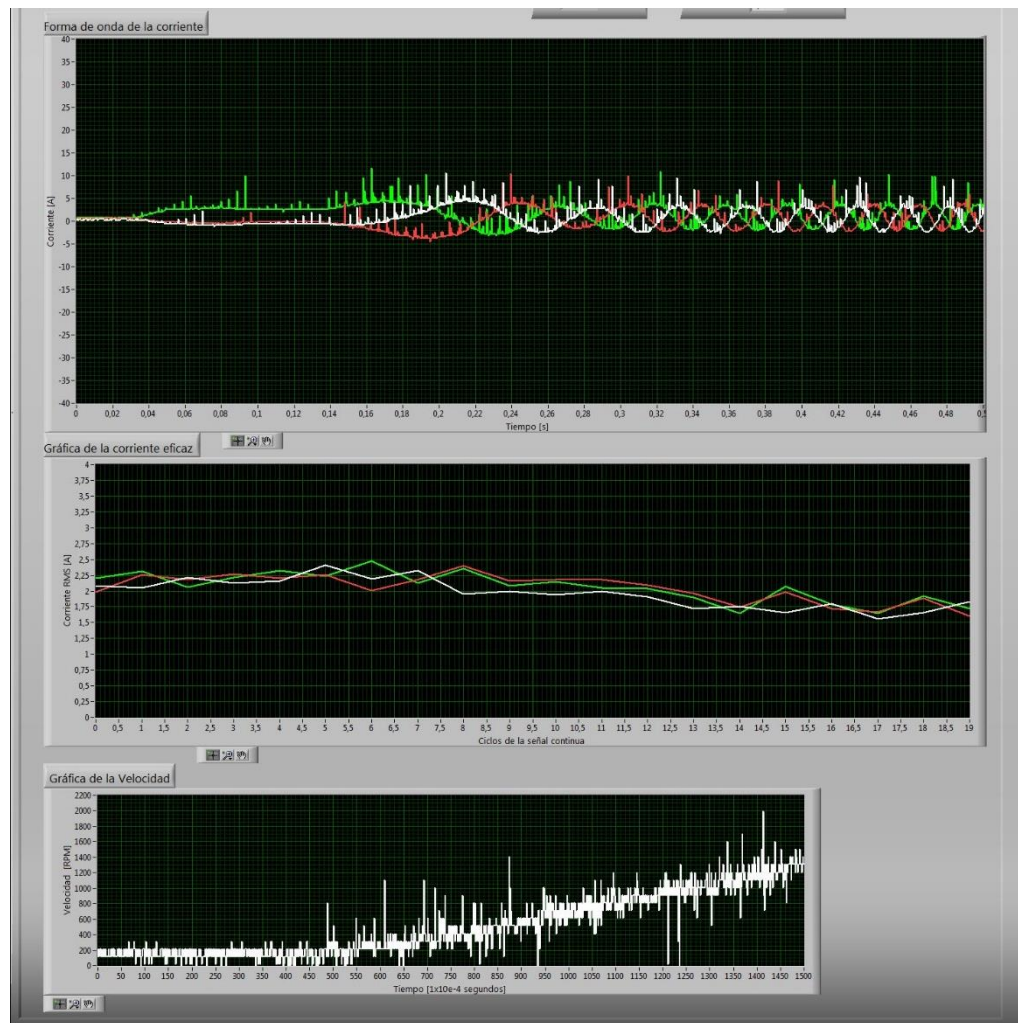
	Fase	U	V	W
I <sub>max</sub> RMS	Promedio [A]	5,37	5,84	5,84
	ER%	52,84	48,71	48,72
I <sub>arr</sub> /I <sub>n</sub>	Promedio	1,70	1,85	1,85
	ER%	13,61	23,56	23,52

En la Tabla 21 se presentan los resultados de la comparación, se aprecia que la fase U presenta una menor diferencia (13,61 %) respecto del valor de referencia en la relación de corriente de arranque sobre corriente nominal. En la corriente máxima durante el arranque se evidencia el desbalance que presenta la corriente de la fase U con un 52,84 % de diferencia respecto del valor de referencia.

**5.1.3 Arranque por variador de velocidad** Se realizó el arranque con variador de velocidad del motor SIEMENS disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas, se registraron diez arranques, los datos calculados mediante el programa se almacenaron y analizaron.

### 5.1.3.1 Análisis de la forma de onda, gráfica de corriente eficaz y velocidad obtenida

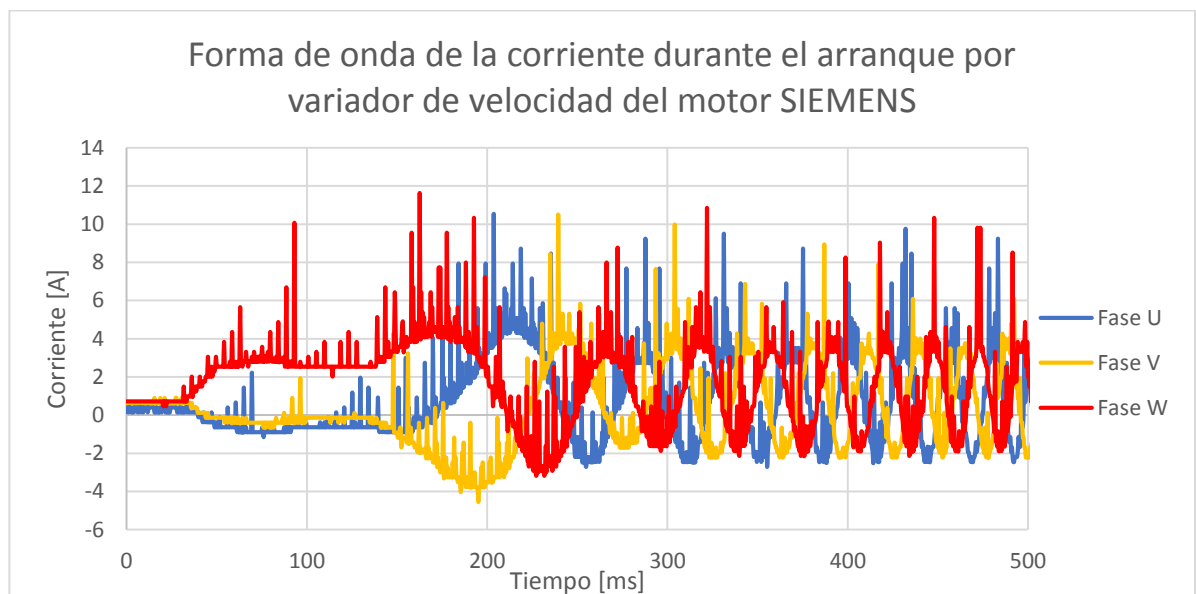
**Figura 56: Panel frontal del programa “Visualización de la corriente de arranque” en la ejecución de un arranque por variador de velocidad.**



Fuente: Los autores.

La Figura 56 presenta el panel frontal del programa desarrollado en LabVIEW “Visualización de la corriente de arranque”; en este se muestra: la gráfica de forma de onda de la corriente durante el arranque por fase, la gráfica del valor eficaz de la corriente por fase y la gráfica de la velocidad, durante la ejecución de un arranque con el variador de velocidad SINAMICS V20 configurado con los valores listados en la Tabla 16.

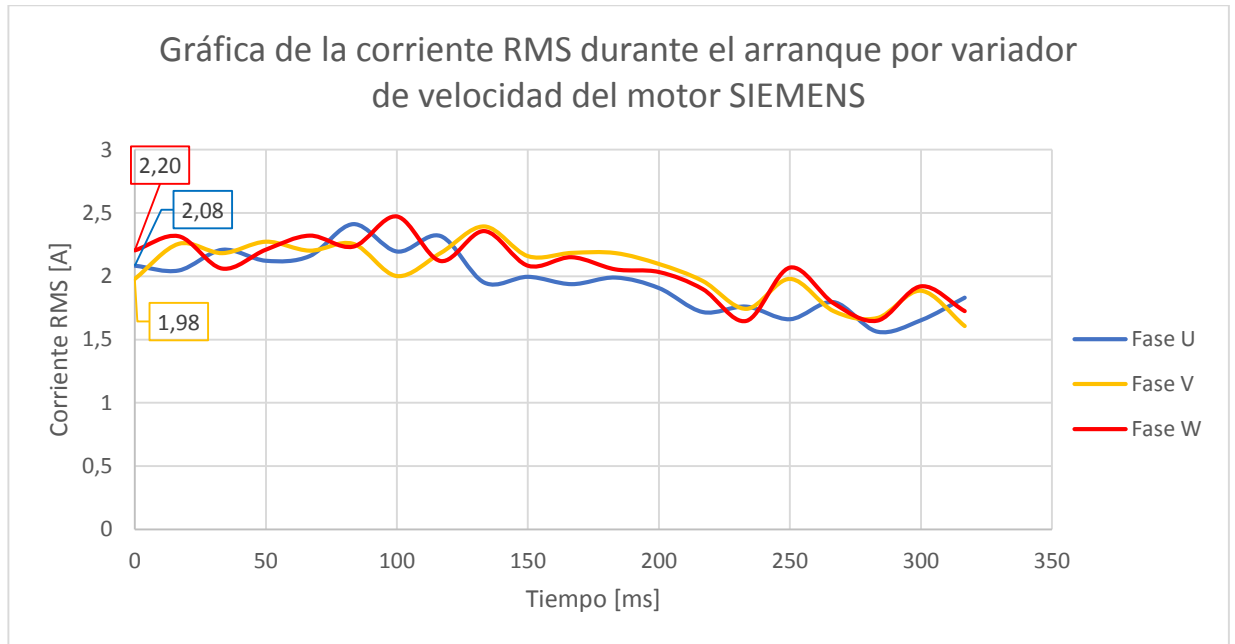
**Figura 57: Forma de onda de la corriente en las tres fases del motor de inducción SIEMENS para un arranque por variador de velocidad.**



Fuente: Los autores.

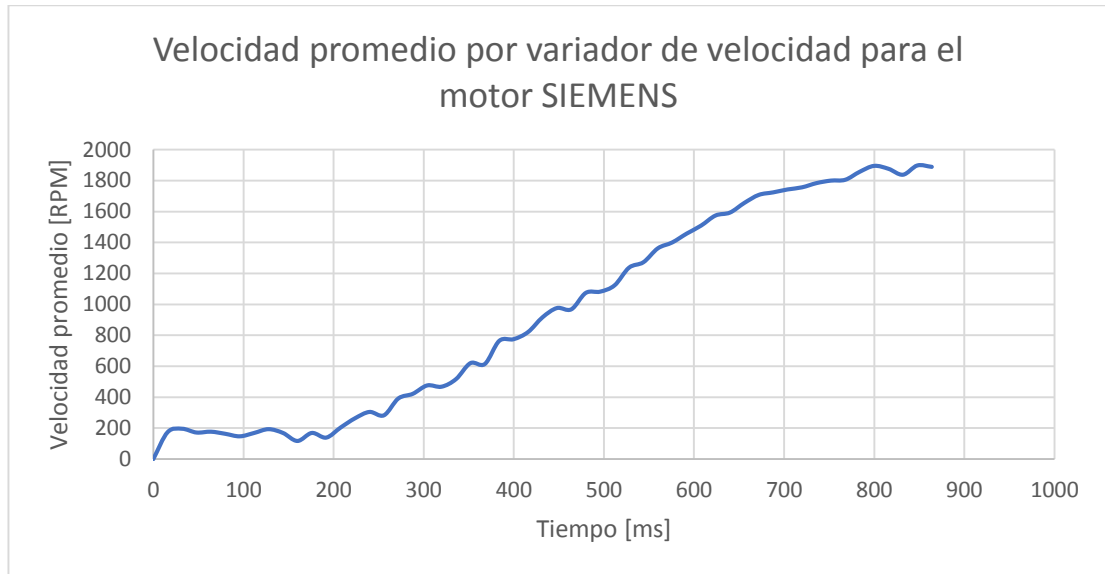
Las señales de corriente almacenadas en el archivo de EXCEL “Señales de corriente y velocidad” se graficaron en la Figura 57. Se observa la forma de onda de la corriente durante el arranque del motor SIEMENS con variador de velocidad, las ondas de corriente presentan distorsiones armónicas producto de la modulación PWM del variador. Se aprecia la forma como la corriente aumenta su valor pico y la frecuencia aumenta de forma controlada, desde los valores iniciales hasta los valores de funcionamiento estable en vacío del motor.

**Figura 58: Gráfica de la corriente eficaz por fase durante el arranque por variador de velocidad del motor SIEMENS.**



En la Figura 58 se observa la gráfica elaborada mediante EXCEL con los valores almacenados en el archivo de EXCEL “RMS por canal” para el registro de un arranque mediante el variador de velocidad. El cálculo del valor eficaz en este caso se realizó para la componente fundamental de la corriente de cada fase (60 Hz), para esto se empleó el filtro pasabajos . En el instante del arranque se registraron los valores de corriente eficaz de 2,08 amperes en la fase U, 1,98 amperes en la fase V y 2,2 amperes en la fase W.

**Figura 59: Gráfica de la velocidad durante el arranque por variador de velocidad del motor SIEMENS promediada cada 1/60 segundos.**



Fuente: Los autores.

Se graficó la velocidad mediante EXCEL, como se muestra en la Figura 59. La velocidad del motor durante el arranque con variador de velocidad presenta un comportamiento aproximadamente lineal. El motor inicia su puesta en marcha de forma controlada hasta llegar al valor de operación en vacío en 700 milisegundos. Se observa un retraso de 200 milisegundos, puesto que la rampa programada fue de 500 milisegundos (Tabla 16).

**5.1.3.2 Comparación de la magnitud de la corriente obtenida durante el arranque por variador de velocidad con los valores de referencia** Los valores medidos durante las diez puestas en marcha del motor mediante el variador de velocidad de corriente eficaz máxima se muestran en la Tabla 22.

**Tabla 22: Valores calculados por el programa “Visualización de la corriente de arranque” para la corriente máxima RMS, para el arranque por variador de velocidad.**

<b>I<sub>max</sub> RMS (A)</b>		
<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
2,41	2,39	2,47
2,68	2,25	2,57
2,58	2,23	2,47
2,71	2,34	2,50
2,69	2,05	2,66
2,70	2,08	2,63
2,82	2,09	2,74
2,71	1,99	2,69
2,84	2,27	2,49
2,71	2,28	2,46

Fuente: Los autores.

Para cada fase se calculó el promedio de corriente eficaz y el error relativo porcentual (Ecuación 5). El valor de referencia para este caso fue 2,18 amperes RMS en la fase U, 2,38 amperes RMS en la fase V y 1,90 amperes RMS en la fase W, estos valores se midieron con la pinza AMPROBE AMP-320.

**Tabla 23: Valores promedio y errores relativos porcentuales de la corriente máxima, en el arranque por variador de velocidad.**

	<b>Fase</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
<b>I<sub>max</sub> RMS</b>	Promedio (A)	2,69	2,20	2,57
	ER%	0,23	0,08	0,35

Fuente: Los autores.

Los errores porcentuales calculados para el arranque con variador de velocidad tomando como referencia los valores medidos por la pinza, fueron los más pequeños de todos los arranques registrados. Se tomo como referencia la corriente

medida por esta pinza debido a que la corriente de arranque mediante un variador depende de un gran número de factores, tales como la rampa de aceleración.

## **6. MANUAL DE USO DEL BANCO DE PRUEBAS DINÁMICO CON EL PROGRAMA VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

Este manual de usuario describe información de cómo utilizar el programa “Visualización de la corriente de arranque” elaborado en LabVIEW y el manejo del banco de arrancadores.

El programa fue creado con el fin de que los estudiantes puedan apreciar el comportamiento de la forma de onda de la corriente inmediatamente después de la puesta en marcha de un motor de inducción empleando tres tipos de arranque: arranque directo, arranque estrella-triángulo y por variador de velocidad.

Con el propósito de facilitar la comprensión del manual se incluyen gráficos aclaratorios.

### **6.2 OBJETIVO**

El objetivo principal de este manual es guiar al usuario para la utilización del gabinete de arranque y del programa “visualización de la corriente de arranque” realizado en LabVIEW, empleando el banco de pruebas dinámico en modo local.

### **6.3 DIRIGIDO A**

El manual está dirigido a los estudiantes de máquinas eléctricas y accionamientos eléctricos.

## 6.4 REQUISITOS DEL PROGRAMA

Para el correcto funcionamiento del programa es necesario cumplir con una serie de requisitos:

- a. Computadora con al menos un puerto USB y un sistema operativo:
  - Windows Vista (32-bit ó 64-bit).
  - Windows XP (32-bit ó 64-bit).
  - Windows 2000 (32-bit ó 64-bit).
- b. Tarjeta de adquisición DAQ USB 6008.
- c. Tener instalado LabVIEW 2009.
- d. Tener instalado el Driver NI-DAQmx compatible con LabVIEW 2009.
- e. Poseer un conocimiento básico de LabVIEW.
- f. Trabajar el banco de pruebas en modo local.

## 6.5 TABLA DE COMPATIBILIDAD ENTRE LABVIEW Y NI-DAQMX

Dependiendo de la versión de LabVIEW instalado, se necesita de un driver NI-DAQmx compatible. En la Tabla 24 se muestra la compatibilidad entre las diferentes versiones de LabVIEW y los respectivos drivers NI-DAQmx.

**Tabla 24: Compatibilidad entre la versión de LabVIEW y el driver correspondiente.**

NI-DAQmx Version	LabVIEW / LabVIEW Real-Time Version										
	8.5	8.6	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
9.1.5											
9.2											
9.2.1											

NI-DAQmx Version	LabVIEW / LabVIEW Real-Time Version										
	8.5	8.6	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
9.2.2	■	■	■	■							
9.2.3	■	■	■	■							
9.3	■	■	■	■							
9.3.5		■	■	■	■						
9.4		■	■	■	■						
9.5		■	■	■	■						
9.5.1		■	■	■	■						
9.5.5			■	■	■	■					
9.6			■	■	■	■					
9.6.1			■	■	■	■					
9.6.2			■	■	■	■					
9.7			■	■	■	■					
9.7.5				■	■	■	■				
9.8				■	■	■	■				
9.9				■	■	■	■				
14.0					■	■	■	■			
14.1					■	■	■	■			
14.2					■	■	■	■			
14.5					■	■	■	■			
14.5.1					■	■	■	■			
15.0						■	■	■	■		
15.0.1						■	■	■	■		
15.1						■	■	■	■		
15.1.1						■	■	■	■		
15.5						■	■	■	■		
15.5.1						■	■	■	■		

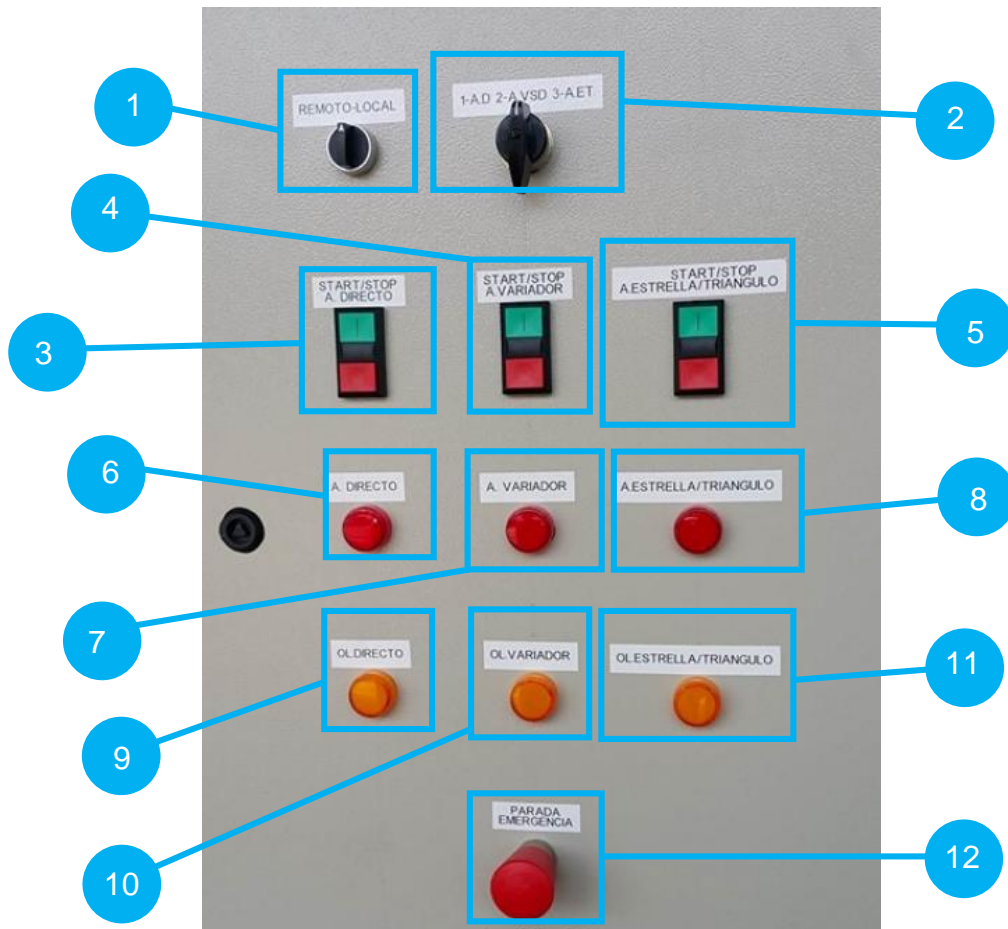
NI-DAQmx Version	LabVIEW / LabVIEW Real-Time Version										
	8.5	8.6	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
16.0							■	■	■	■	
16.0.1							■	■	■	■	
16.1							■	■	■	■	
17.0								■	■	■	■
17.1								■	■	■	■

Fuente: <http://www.ni.com/product-documentation/53326/en/>.

## 6.6 ELEMENTOS DE MANDO Y CONEXIONADO DISPONIBLES EN EL GABINETE

El panel frontal del banco de pruebas cuenta con los siguientes elementos de mando y señalización:

Figura 60: Elementos que constituyen el panel frontal del banco de arrancadores.



Fuente: Los autores.

### 1 REMOTO\_LOCAL

Muletilla de 3 posiciones (SEL\_3) que se utiliza para seleccionar el modo de operación del motor el cual puede ser remoto, local y no opera (No está conectado).

2

## 1-A.D 2-A.VSD 3-A.ET

Muletilla de 4 posiciones (SEL\_4) y se encarga de elegir el tipo de arranque.

1-A.D: Arranque directo.

2-A.VSD: Arranque por variador de velocidad.

3-A.ET: Arranque estrella-triángulo.

4-No opera (Esta desconectado).

3

## START/STOP

### A. DIRECTO

Estación arranque-parada para el arranque directo.

Pulsador de arranque: NO.

Pulsador de parada: NC.

4

## START/STOP

### A. VARIADOR

Estación arranque-parada para el arranque por variador de velocidad.

Pulsador de arranque: NO.

Pulsador de parada: NC.

5

## START/STOP

### A. ESTRELLA/TRIÁNGULO

Estación arranque-parada para el arranque estrella-triángulo.

Pulsador de arranque: NO.

Pulsador de parada: NC.

6

#### A. DIRECTO

Indicador piloto rojo que señala el arranque directo.

7

#### A. VARIADOR

Indicador piloto rojo que señala el arranque por variador de velocidad.

8

#### A. ESTRELLA/TRIÁNGULO

Indicador piloto rojo que señala el arranque estrella-triángulo.

9

#### OL. DIRECTO

Indicador piloto amarillo que denota una sobrecarga durante el arranque directo.

10

#### OL. VARIADOR

Indicador piloto amarillo que denota una sobrecarga durante el arranque por variador de velocidad.

11

## OL. ESTRELLA/TRIÁNGULO

Indicador piloto amarillo que denota una sobrecarga durante el arranque estrella-triángulo.

12

## PARADA EMERGENCIA

Para salir súbitamente ante cualquier suceso u ocurrencia desafortunada.

En la parte lateral derecha del banco se disponen de los plugs de conexión, donde se realizan las conexiones según se explica en párrafos posteriores (Figura 5).

### 6.7 FUNCIONAMIENTO DEL MODO LOCAL

En este modo se trabaja con todos los elementos anteriormente mencionados que conforman el panel frontal del banco de arrancadores.

#### 6.7.1 Descripción del modo local

- En SEL\_3 los contactos 1-2 y 5-6 normalmente abiertos son accionados y modifican su normalidad. Estos contactos permanecen así hasta que la muletilla cambie nuevamente.
- En SEL\_4 los contactos normalmente abiertos referentes a cada tipo de arranque: 1-2 arranque directo, 3-4 arranque por variador de velocidad y 5-6 arranque estrella-triángulo conmutan su normalidad dependiendo de cuál se elija.

- Finalmente se activa el contacto del pulsador de arranque que se escoja y su normalidad pasa de abierta a cerrada. Este contacto que se localiza en cada estación de arranque se indica con 3-4.

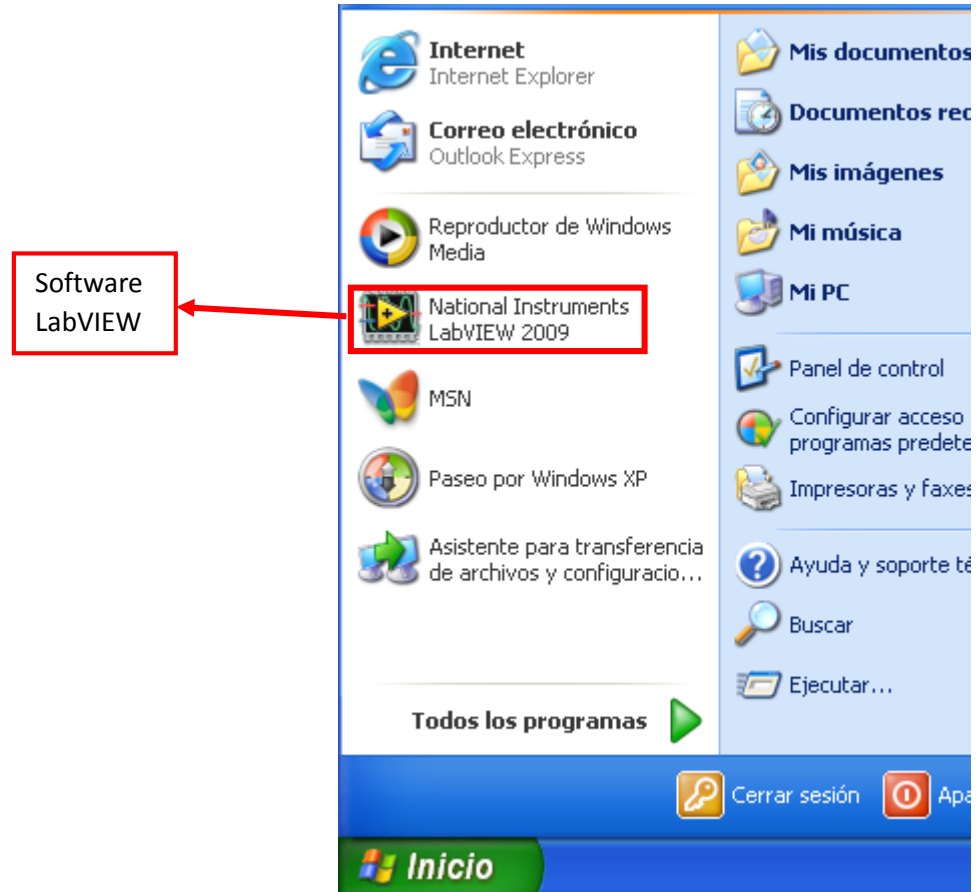
## **6.8 USO DEL PROGRAMA PARA EL MOTOR SIEMENS DISPONIBLE EN EL BANCO DINÁMICO**

Para explicar el uso del programa se organizó cada tipo de arranque en una sección aparte y cada una se encuentra constituida por los pasos consecuentes que se deben realizar.

**6.8.1 Pasos generales** Antes de poner en marcha el motor en los diferentes tipos de arranque se deben realizar los siguientes pasos.

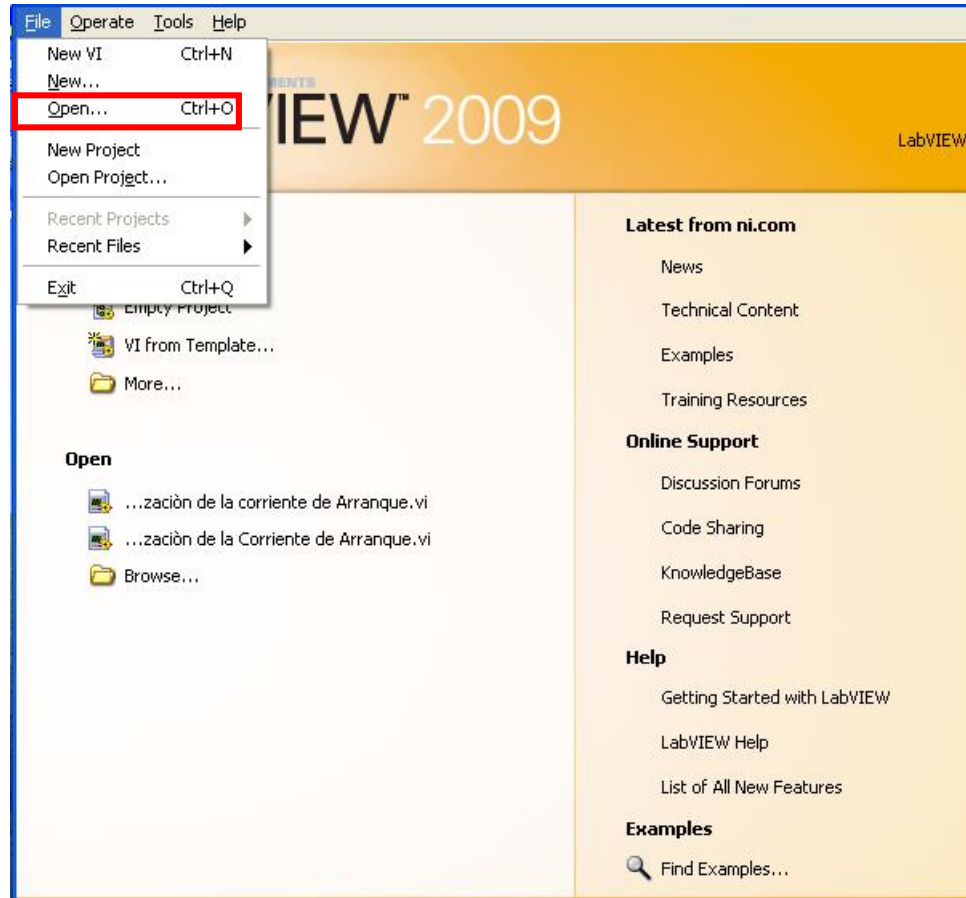
**Paso 1:** Buscar en el escritorio el software LabVIEW y dar click para abrirlo.

**Figura 61: Software LabVIEW.**



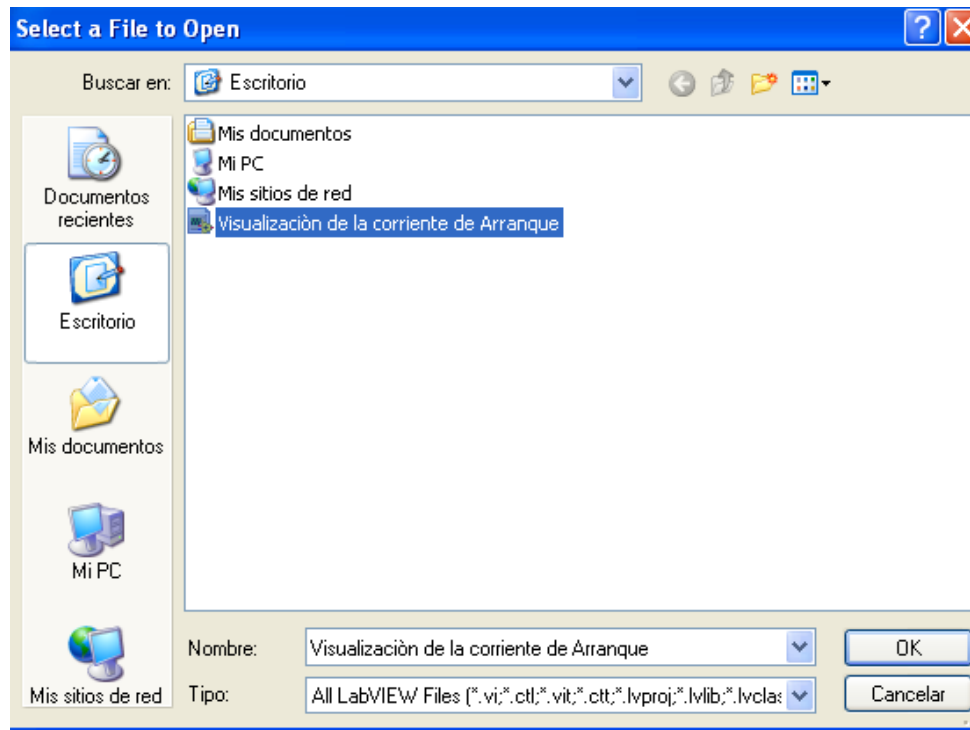
**Paso 2:** Entrar a file y dar click en open.

**Figura 62:** Ventana de LabVIEW, para abrir un archivo.



**Paso 3:** Buscar en el escritorio el software LabVIEW y dar click para abrirlo.

**Figura 63:** Ventana de documentos para seleccionar el archivo “Visualización de la corriente de arranque”.



**Paso 4:** Conectar el puerto USB de la tarjeta de adquisición al computador.

**Figura 64:** Conexión del puerto USB de la tarjeta NI 6008 al computador.



**Paso 5:** Colocar la muletilla (SEL\_3) en modo local.

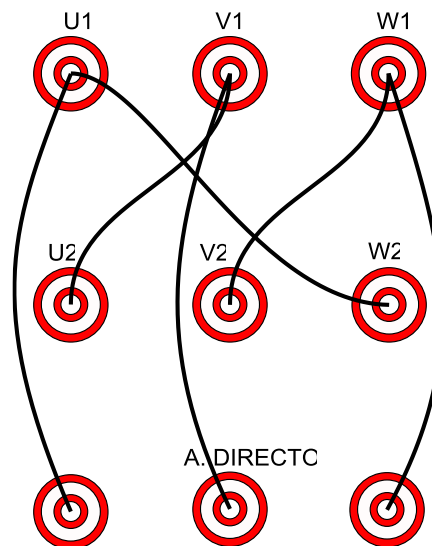


Una vez abierto el programa se debe realizar un procedimiento particular para cada tipo de arranque.

### 6.8.2 Arranque directo

**Paso 1:** Realizar la conexión de los terminales en la parte lateral derecha del banco de arrancadores.

**Figura 65:** Conexión para realizar el arranque directo.



**Paso 2:** Ubicar la muletilla (SEL\_4) en modo de arranque directo (A. D).

**Figura 66: SEL\_4 en la posición de arranque directo.**



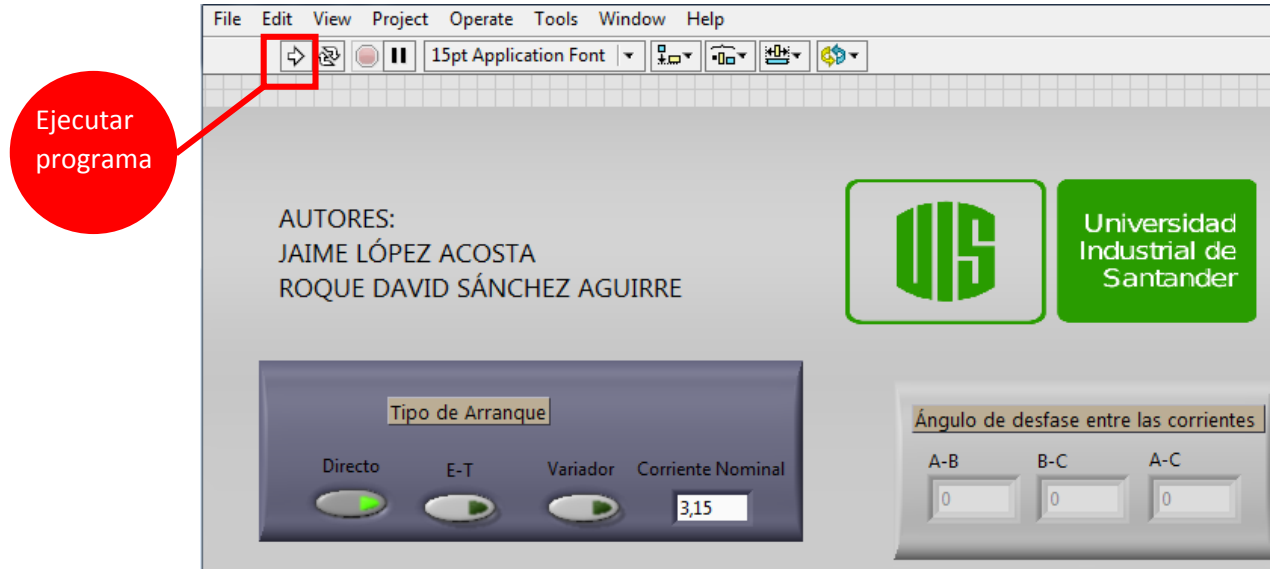
**Paso 3:** Ingresar el valor de la corriente nominal del motor de inducción y dar click en el botón de arranque directo, el cual se ilumina en verde.

**Figura 67: Cuadro para ingresar el arranque directo y la corriente nominal del motor de inducción utilizado.**



**Paso 4:** Dar click en ejecutar el programa y esperar la finalización de este.

**Figura 68:** Esquema que indica el botón de correr el programa.

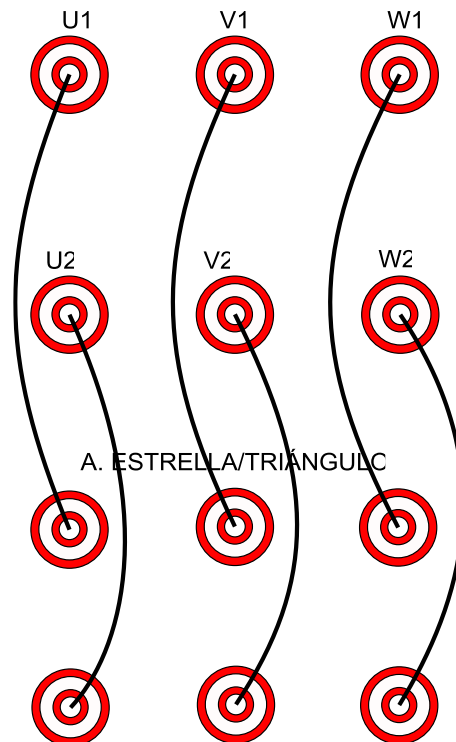


El programa se empieza a ejecutar, permanece a la espera de registrar el arranque del motor. Una vez detectado el arranque, el programa se ejecuta durante 2 segundos, se detiene y entrega de forma automática las gráficas y los valores de salida del panel frontal. Este funcionamiento del programa se aplica a los tres tipos de arranque.

### 6.8.3 Arranque estrella-triángulo

**Paso 1:** Realizar la conexión de los terminales en la parte lateral derecha del banco de arrancadores.

**Figura 69: Conexión para realizar el arranque estrella-triángulo.**



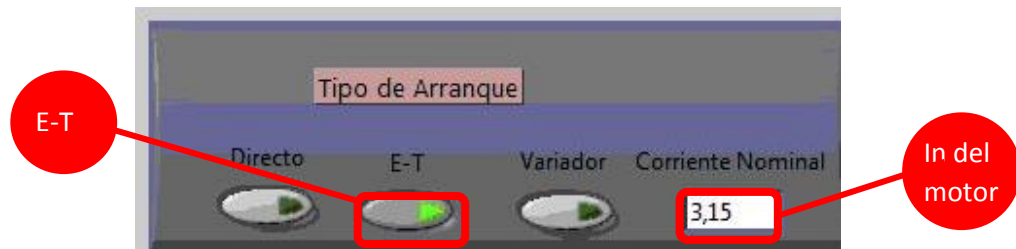
**Paso 2:** Ubicar la muletilla (SEL\_4) en modo de arranque estrella-triángulo (A. ET).

**Figura 70: SEL\_4 en la posición de arranque estrella-triángulo.**



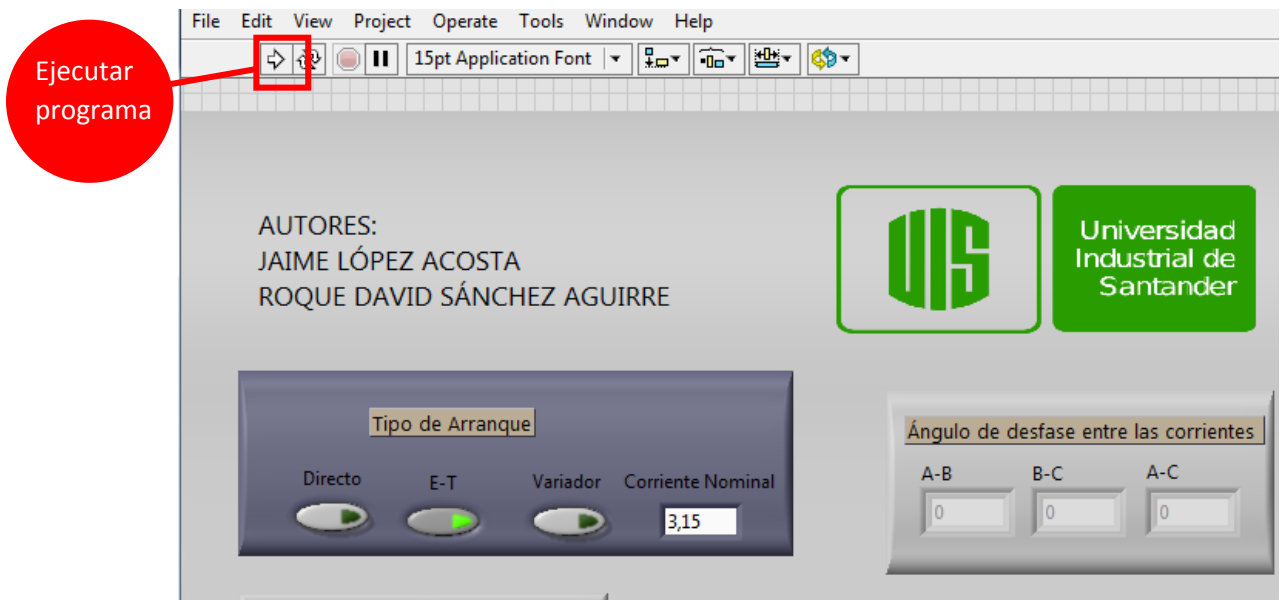
**Paso 3:** Ingresar el valor de la corriente nominal del motor de inducción y dar click en el botón de arranque estrella-triángulo (E-T), el cual se ilumina en verde.

**Figura 71:** Cuadro para ingresar el arranque estrella-triángulo y la corriente nominal del motor de inducción utilizado.



**Paso 4:** Dar click en ejecutar el programa y esperar la finalización de este.

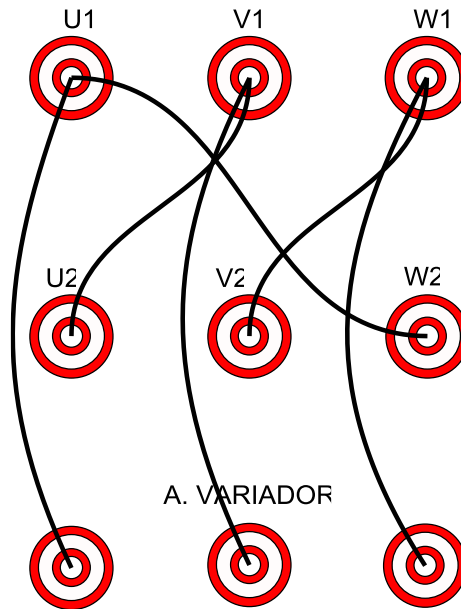
**Figura 72:** Esquema que indica el botón de correr el programa.



#### 6.8.4 Arranque por variador

**Paso 1:** Realizar la conexión de los terminales en la parte lateral derecha del banco de arrancadores.

**Figura 73: Conexión para realizar el arranque por variador de velocidad.**



**Paso 2:** Ubicar la muletilla (SEL\_4) en modo de arranque por variador (A. VSD).

**Figura 74: SEL\_4 en la posición de arranque por variador de velocidad.**



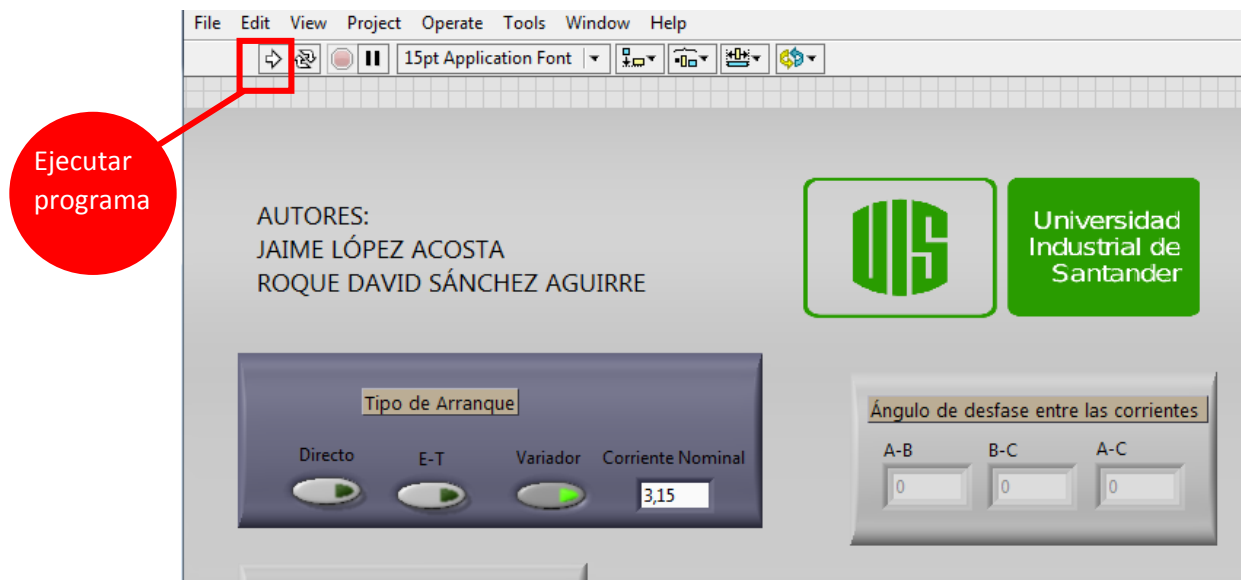
**Paso 3:** Ingresar el valor de la corriente nominal del motor de inducción y dar click en el botón de arranque del variador, el cual se ilumina en verde.

**Figura 75:** Cuadro para ingresar el arranque por variador de velocidad y la corriente nominal del motor de inducción utilizado.



**Paso 4:** Dar click en ejecutar el programa y esperar la finalización de este.

**Figura 76:** Esquema que indica el botón de correr el programa.



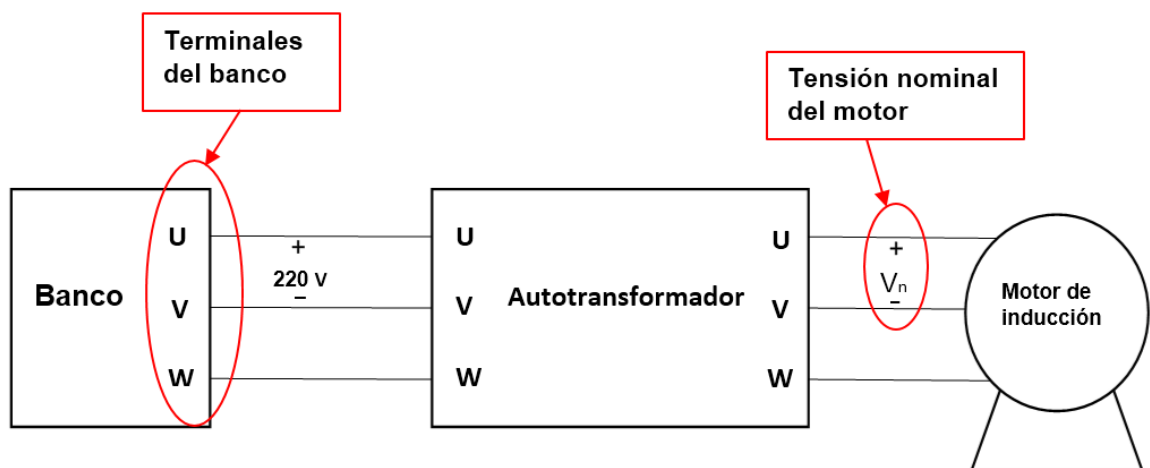
## 6.9 OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DINÁMICO CON EL PROGRAMA VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE PARA OTRO MOTOR DE INDUCCIÓN

El programa se desarrolló para ofrecer la opción de graficar la forma de onda de la corriente de arranque a diferentes motores disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas.

**6.9.1 Consideraciones para conectar un motor** Para conectar un motor de inducción disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas al banco de pruebas dinámico y utilizar el programa “Visualización de la corriente de arranque”, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) En el arranque directo y con variador de velocidad, la tensión nominal del motor debe ser igual o menor a 220 volts; si es menor, el motor se debe conectar por medio del autotransformador, como se ilustra en la figura 77.

**Figura 77: Esquema que se debe utilizar si la tensión nominal del motor es menor de 220 volts.**



Fuente: Los autores.

El arranque se puede realizar en conexión estrella o en conexión delta, siempre que la tensión nominal sea igual o menor a 220 volts.

- b) La corriente nominal del motor debe ser menor a 6 amperes, puesto que este es el valor máximo permisible por el variador de velocidad (1,5 hp de potencia).
- c) En el arranque estrella-triángulo la tensión nominal del motor en conexión delta debe ser igual a 220 volts, de ser mayor, no es posible ejecutar el arranque. Esto se debe a la configuración de los bornes del gabinete de arrancadores dispuestos para este arranque.
- d) La velocidad del motor no se puede graficar debido a la disposición del sensor implementado en el gabinete de arrancadores.

## 7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Por medio de este trabajo de grado, se desarrolló el programa en LabVIEW “Visualización de la corriente de arranque” que facilita a los estudiantes de máquinas eléctricas y accionamientos eléctricos afianzar conceptos teóricos sobre motores de inducción mediante la comparación con situaciones reales.
- Se elaboró un manual básico de uso para el gabinete de arrancadores implementando el programa en LabVIEW “Visualización de la corriente de arranque”, que guía al usuario en el conexionado y operación del banco.
- El desarrollo del programa en LabVIEW “Visualización de la corriente de arranque” ofrece la posibilidad de analizar el transitorio ocurrido en las formas de onda de la corriente por fase durante el arranque del motor de inducción.
- El montaje elaborado para la ejecución del programa en LabVIEW “Visualización de la corriente de arranque” mediante el gabinete de arrancadores se puede aplicar a diferentes motores, siempre que se sigan las recomendaciones mencionadas en el manual realizado en este trabajo de grado.
- Del análisis de las gráficas obtenidas en el arranque del motor SIEMENS de la forma de onda de la corriente por fase, la corriente eficaz por fase del motor y velocidad; se observa que en los tres tipos de arranque el motor presenta un desbalance de corriente en sus fases, especialmente durante el arranque estrella-triángulo, donde la fase U tiene una corriente eficaz 0,29 amperes menor a las otras dos fases.

- En la gráfica de la forma de onda de la corriente por fase del motor SIEMENS se aprecia como el motor aparentemente se estabiliza luego de 80 milisegundos, al analizar la gráfica de velocidad se puede observar que la máquina realmente se estabiliza en 450 milisegundos, momento en el cual alcanza su velocidad de operación en vacío.
- Se recomienda desarrollar programas en LabVIEW aprovechando la instrumentación elaborada en este trabajo de grado para analizar los armónicos generados por el funcionamiento del variador de velocidad.
- En el trabajo de grado revisado “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW” no se encontró el plano de conexiones de los elementos eléctricos que constituyen el gabinete, por lo tanto, se recomienda en futuros trabajos de grado la elaboración de dicho plano.
- Se recomienda la reconfiguración de los elementos dispuestos en el gabinete de arrancadores para realizar los arranques; estrella-triángulo, por variador de velocidad y arranque directo, de forma automática, sin necesidad de cambiar las conexiones del motor.
- La corriente pico máxima durante el arranque del motor SIEMENS en conexión delta fue de 26,19 amperes, mientras que la corriente pico máxima durante el arranque en estrella fue de 8,2 amperes. Con esto se corrobora que la corriente durante el arranque en conexión estrella es aproximadamente la tercera parte de la corriente durante el arranque en conexión delta para el motor de inducción.
- En la elaboración del presente trabajo de grado fue necesario sincronizar el muestreo de la tarjeta NI 6008 con el arranque del motor, para esto se configuró la entrada digital PFI 0 como trigger con flanco descendente; el flanco se obtuvo

mediante bloques aditivos de contactos auxiliares normalmente cerrados en arranque directo y arranque estrella-triángulo. En el arranque por variador de velocidad el flanco se tomó de un contacto normalmente cerrado del relé de control del variador.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Rincón, C. Esparragoza, and A. Torres, Trabajo de grado, “BANCO DE PRUEBAS DINÁMICO PARA ARRANCADORES DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO MEDIANTE EL SOFTWARE LABVIEW,” Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [2] Allegro MicroSystems Inc., “ACS712.” p. 12, 2006, Disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.
- [3] Honeywell, “CSLA2CF.” p. 4, 2006, Disponible en: <http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/CSLA2CF.pdf>.
- [4] Instruments National, “Datasheet tarjeta de adquisición.” p. 7, 2014, Disponible en: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>.
- [5] J. Lajara and J. Sebastián, *LabVIEW Entorno gráfico de programación*. 2007.
- [6] Schneider Electric, “Manual electrotécnico Telesquemario Telemecanique.” p. 281, 1999, Disponible en: <http://www.um.es/docencia/mmc/pdf/telesquemario.pdf>.

## BIBLIOGRAFÍA

ALLEGRO MICROSYSTEMS INC., “ACS712.” p. 12, 2006, [en línea] disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.

HONEYWELL, “CSLA2CF.” p. 4, 2006, [en línea] disponible en: <http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/CSLA2CF.pdf>.

INSTRUMENTS NATIONAL, “Datasheet tarjeta de adquisición.” p. 7, 2014, Disponible en: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>.







LAJARA J. and SEBASTIÁ J., LabVIEW Entorno gráfico de programación. 2007.





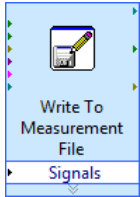
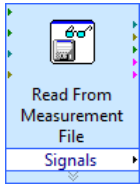

RINCÓN E., ESPARRAGOZA C., and TORRES A., Trabajo de grado, “Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LABVIEW,” Universidad Industrial de Santander, 2016.




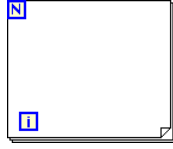




SCHNEIDER ELECTRIC, “Manual electrotécnico Telesquemario Telemecanique.” p. 281, 1999, [en línea] disponible en: <http://www.um.es/docencia/mmc/pdf/telesquemario.pdf>.


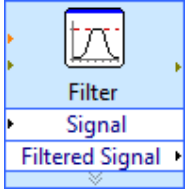
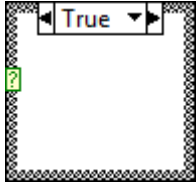
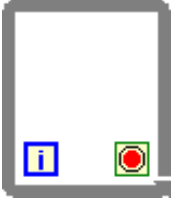


## ANEXO


### Anexo A: Tabla de símbolos utilizados en LabVIEW.

<b>Funciones y herramientas</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Ícono</b>	<b>Descripción</b>
DAQ Assistant		El DAQ Assistant, incluido con NI-DAQmx, es una guía gráfica e interactiva para configurar, probar y adquirir datos de medición. Con un solo clic, incluso genera códigos basados en su configuración, facilitando y acelerando el desarrollo de operaciones complejas. Debido a que DAQ Assistant está completamente orientado a menús, hará menos errores de programación y reducirá drásticamente el tiempo desde la configuración de su sistema DAQ hasta la primera medición.
Subtract		Calcula la diferencia de las entradas.
Multiply		Devuelve el producto de las entradas.
Waveform Graphs		El gráfico de forma de onda muestra una o más gráficas de mediciones de muestreo uniforme. El gráfico de forma de onda traza sólo funciones de un solo valor, como en $y = f(x)$ , con puntos uniformemente distribuidos a lo largo del eje x, tales como formas de onda adquiridas que varían en el tiempo.
Split Signals		Divide dos o más señales en señales componentes. Cambia el tamaño de la función para agregar salidas.
Convert from Dynamic Data		Convierte el tipo de datos dinámico en tipos de datos numéricos, booleanos, de forma de onda y de matriz para su uso con otros VIs y funciones.

Funciones y herramientas		
Nombre	Ícono	Descripción
Equal?		Devuelve TRUE si x es igual a y. De lo contrario, esta función devuelve FALSE. Puede cambiar el modo de comparación de esta función.
Formula Node		Evalúa fórmulas matemáticas y expresiones similares a C en el diagrama de bloques. Las siguientes funciones incorporadas se permiten en las fórmulas: abs, acos, acosh, asin, atan, atan2, atanh, ceil, cos, cosh, csc, exp, expm1, floor, getexp, getman, int, intrz, ln, lnp1, log, log2, max, min, mod, pow, rand, rem, sec, signo, pecado, sinc, sinh, sizeofDim, sqrt, tan, tanh.
Extract Multiple Tone Information VI		Devuelve la frecuencia, amplitud y fase de cada tono de señal cuya amplitud excede un umbral especificado. Conecta los datos a la señal de tiempo en la entrada para determinar la instancia polimórfica para usar o seleccionar manualmente la instancia.
Indicator		Indica la matriz en el panel frontal.
Write To Measurement File		Graba datos en archivos de medida basados en texto (.lvm), en archivos de medida binarios (.tdm o .tdms) o en archivos de Microsoft Excel (.xlsx).
Read From Measurement File		Lee los datos de un archivo de medida basado en texto (.lvm) o de un archivo de medida binario (.tdm o .tdms).
		

Funciones y herramientas		
Nombre	Ícono	Descripción
Split 1D Array		Divide la matriz en el índice y devuelve las dos porciones con el elemento de índice al principio de la segunda subarray.
Add		Calcula la suma de las entradas.
Build Array		Concatena múltiples matrices o añade elementos a una matriz n-dimensional.
Convert to Dynamic Data		Convierte los tipos de datos numéricos, booleanos, de forma de onda y de matriz en el tipo de datos dinámico para su uso con VIs Express.
For Loop		Ejecuta su subdiagrama n veces, donde n es el valor conectado al terminal de conteo (N). El terminal de iteración (i) proporciona el recuento de iteración de bucle actual, que varía de 0 a n-1.
Divide		Calcula el cociente de las entradas.
Boolean Controls		Utiliza controles e indicadores booleanos para introducir y mostrar valores booleanos (TRUE / FALSE).
Or		Calcula el OR lógico de las entradas, ambas entradas deben ser valores booleanos, valores numéricos o clústeres de errores. Si ambas entradas son FALSE, la función devuelve FALSE, de lo contrario devuelve TRUE.
Not		Calcula la negación lógica de la entrada Si x es FALSE, la función devuelve TRUE Si x es TRUE, la función devuelve FALSE.
And		

Funciones y herramientas		
Nombre	Ícono	Descripción
		Calcula la lógica AND de las entradas. Ambas entradas deben ser valores booleanos, valores numéricos o clústeres de errores. Si ambas entradas son TRUE, la función devuelve TRUE. De lo contrario, devuelve FALSE.
Filter		Procesa señales a través de filtros y ventanas.
Case		Contiene uno o más sub-diagramas, o casos, exactamente uno de los cuales se ejecuta cuando se ejecuta la estructura. El valor conectado al terminal selector determina qué caso ejecutar.
While Loop		Repite el código dentro de su subdiagrama hasta que se produce una condición específica. Un While Loop siempre se ejecuta al menos una vez.
Index Array		Devuelve el elemento o submatriz de la matriz de dimensión n en el índice.
Array Max & Min		Devuelve los valores máximo y mínimo encontrados en el array, junto con los índices de cada valor.

<b>Funciones y herramientas</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Ícono</b>	<b>Descripción</b>
Shift Registers		<p>El terminal en el lado derecho del bucle contiene una flecha hacia arriba y almacena datos en la finalización de una iteración. LabVIEW transfiere los datos almacenados en el terminal correcto del registro de desplazamiento al terminal izquierdo. El bucle utiliza los datos del terminal izquierdo como los valores iniciales para la siguiente iteración. Este proceso continúa hasta que todas las iteraciones del bucle se ejecutan. Después de que el bucle se ejecuta, el terminal en el lado derecho del bucle devuelve el último valor almacenado en el registro de desplazamiento.</p>