



**Diseño e Implementación de un Sistema Analizador Dinámico de Motores (SADM) para adquisición de datos de las máquinas en las prácticas del Laboratorio de Controles Industriales Eléctricos usando equipos y software National Instruments**

Mirella León <sup>(1)</sup>, Carlos Páez (+) <sup>(2)</sup>, Msc. Otto Alvarado <sup>(3)</sup>

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación <sup>(1)(2)(3)</sup>

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) <sup>(1)(2)(3)</sup>

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador <sup>(1)(2)(3)</sup>

mrleon@espol.edu.ec <sup>(1)</sup>, cpaez@espol.edu.ec <sup>(2)</sup>, oalvara@espol.edu.ec <sup>(3)</sup>

## Resumen

*El proyecto que se describe busca realizar la adquisición de corriente, voltaje y velocidad de una máquina, luego de esto realizar el procesamiento de estas señales y por último mostrar los parámetros más importantes, todo esto es llevado a cabo mediante software y hardware de National Instruments.*

*La adquisición de datos se la realiza a través de transductores de corriente y velocidad y con la ayuda del siguiente hardware: Chassis NI SCXI 1000, módulo de adquisición de datos NI SCXI1600, módulo NI SCXI 1125 y bloque terminal NI SCXI 1313, los cuales están integrados en una unidad (SADM).*

*Una vez hecha la adquisición, el procesamiento de las señales es realizado por la lógica de un programa desarrollado en LabVIEW, este proceso está basado en conocimientos teóricos como son ecuaciones, relaciones matemáticas, modelos y asunciones.*

*Al final se presenta de forma ordenada los resultados obtenidos junto con las señales adquiridas de manera gráfica, teniendo esta una gran importancia, ya que nos permite verificar lo aprendido en los cursos teóricos llegando a una mejor comprensión.*

**Palabras claves:** *Motores de inducción de corriente alterna, arranque de motores de corriente alterna, análisis de estado estable, análisis dinámico, torque.*

## Abstract

*The project described execute the acquisition of current, voltage and speed of a machine, then make processing of these signals and finally show the most important parameters, all of these is done through software and hardware of National Instruments.*

*Data acquisition was performed by using current and speed transducers help of following hardware: NI SCXI Chassis 1000, data acquisition module NI SCXI1600, NI SCXI1125 and terminal block NI SCXI 1313, which are integrated into one unit called SADM.*

*Once realized data acquisition, signal processing is performed by the logic of a program developed in LabVIEW, this process is based on theoretical knowledge such as equations, math relations, models and assumptions.*

*Finally, obtained results are presented in an orderly manner together signals acquired graphically, having this great significance, since it allow us to verify the learned in theoretical courses and reaching a better understanding.*

### Introducción.

La utilización de las máquinas eléctricas ya sean de corriente alterna o directa, en el campo industrial, es muy frecuente. Sus aplicaciones son muy variadas como movimiento de cargas, transporte de cargas, trituración de material, abrir o cerrar compuertas, etc. Por tal motivo el buen entendimiento de su funcionamiento en todo su rango de operación es de vital importancia, y uno de sus puntos más cruciales es durante el arranque, ya que en este periodo toman del sistema eléctrico al cual están conectados, corrientes elevadas, pudiendo causar variaciones de voltaje en dicho sistema y consecuentemente afectar a sistemas adyacentes. También está el torque que se desarrolla durante el arranque, éste último juega un papel crucial ya que de esto depende la carga mecánica posible a conectarse; es decir, no cualquier motor puede mover cualquier carga. Esto ha llevado a utilizar métodos de arranque según sea la aplicación y el motor, dichos métodos son analizados en el laboratorio de Controles Industriales Eléctricos.

El propósito de este proyecto de graduación es proporcionar una herramienta para adquirir las señales eléctricas (V, I) y mecánicas (Velocidad) mediante software y hardware de National Instruments, procesarlas para hallar otros parámetros (fp, Torque) y finalmente visualizar todas las señales, tanto las adquiridas como las obtenidas durante el proceso de arranque.

## 1 CONCEPTOS BASICOS Y TIPOS DE ARRANQUE DE MAQUINA ELECTRICAS

### 1.1 Introducción

Una máquina eléctrica es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en otra energía, o bien, en energía eléctrica pero con una presentación distinta, pasando esta energía por una etapa de almacenamiento en un campo magnético. Se clasifican en tres grandes grupos:

- Generadores.
- Motores.
- Transformadores.

### 1.2 Generalidades de un motor AC

Los motores AC convierten la energía eléctrica en mecánica. Existen dos grandes grupos de máquinas AC y son la síncrona y la de inducción.

Una maquina AC está constituida básicamente de dos partes:

- ESTATOR
- ROTOR

### 1.3 Motores AC asíncronos o de inducción

De todas las máquinas eléctricas giratorias, la de inducción es la que más a menudo se utiliza. La característica que justifica su popularidad se debe en mayoría a razones económicas, el motor de inducción es sencillo desde el punto de vista mecánico y por lo tanto económico, es resistente y por lo tanto necesita poco mantenimiento. Su comportamiento se puede ajustar a un gran número de diferentes condiciones de operación por medio de cambios de diseño bastantes sencillos.

#### Concepto del deslizamiento

El voltaje inducido junto con las corrientes en el rotor de una maquina de inducción dependen de la velocidad relativa existente entre la velocidad del campo giratorio y la velocidad del rotor. Es así que se definen dos términos el primero es la velocidad de deslizamiento:

$$n_{desliz} = n_{sínc} - n_{rotor}$$
$$s = \frac{n_{sínc} - n_{rotor}}{n_{sínc}}$$

$$\text{Entonces: } n_{rotor} = (1-s) \cdot n_{sínc}$$

#### Frecuencia eléctrica en el rotor

La inducción que se hace al rotor en un motor de inducción es lo que lo ha llevado a compararlo con un transformador, el primario (estator) induce un voltaje en el secundario (rotor) pero la frecuencia en el primario no es la misma que la del secundario. Así al tener el rotor quieto la frecuencia del estator es la misma que la del rotor y cuando el rotor gira a velocidad sincrónica la frecuencia en el rotor es cero por lo tanto para cualquier otra velocidad del motor tenemos:

$$f_{rotor} = s f_{estator} = s f_e$$

#### Circuito equivalente del motor de inducción

Un motor de inducción depende de los voltajes inducidos en el rotor, al ser esto una acción transformadora, el circuito equivalente del motor de inducción debe de ser muy similar al circuito equivalente de un transformador. Es decir tendrá las correspondientes impedancias inductivas en el primario (estator) y secundario (rotor).

$$E_{rotor} = s E_{ro}$$

Donde:

$$E_{rotor} = \text{Voltaje inducido en el rotor}$$

$$E_{ro} = \text{Voltaje inducido con el rotor quieto}$$

Este voltaje es inducido al circuito del rotor el cual tiene resistencia y reactancia, la resistencia no se ve afectada por la variación de la frecuencia, pero la reactancia sí, de manera que

$$x_r = s x_{ro}$$

Donde:

$x_r$  = Reactancia en el rotor

$x_{ro}$  = Reactancia en el rotor con el rotor quieto

Con lo anterior obtenemos el circuito equivalente del estator (primario) junto con el del rotor (secundario).

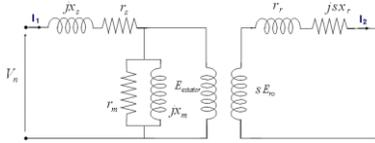


Figura 1. Circuito equivalente del estator y rotor

### Pérdidas y flujo de potencia

La potencia de entrada  $P_{entr}$  en un motor de inducción es en forma de voltajes y corrientes trifásicas. Las primeras pérdidas se presentan en el estator  $I_1^2 r_s$ . Luego se producen pérdidas por histéresis y corrientes parásitas del estator  $P_{núcleo}$  ( $P_{h+i}$ ). La potencia restante se transfiere al rotor por medio de inducción, a esta potencia se la conoce como potencia de campo giratorio  $P_{cgir}$ , parte de la potencia de campo giratorio se pierde en la resistencia de los devanados del rotor  $I_2^2 r_r$  y el resto se convierte de energía eléctrica a mecánica (potencia mecánica desarrollada) a esta última se le restan las pérdidas por fricción, rozamiento y misceláneas quedando solo la potencia en eje del motor.

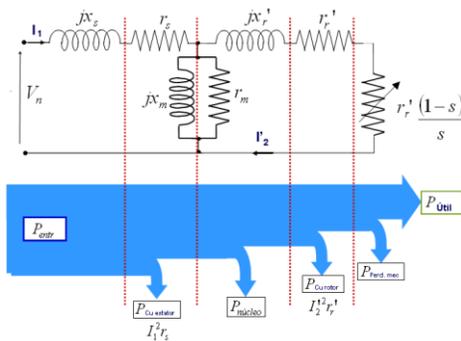


Figura 2. Diagrama de potencias en un motor de inducción

### Potencia y par en un motor de inducción

La corriente por fase que ingresa al motor es igual al voltaje aplicado para la impedancia equivalente del motor.

$$Z_{\phi} = (r_s + jx_s) + (r_m \parallel jx_m) \parallel (r_r / s + jx_r')$$

$$V_{\phi} = I_1 Z_{\phi}$$

Por lo tanto podemos encontrar las pérdidas en el estator y en el núcleo

$$P_{esta} = 3I_1^2 r_s$$

$$P_{núcleo} = 3E_1^2 / r_m$$

Entonces tenemos que la potencia de campo giratorio es

$$P_{cgir} = P_{entr} - P_{esta} - P_{núcleo}$$

La potencia de campo giratorio entra al rotor y solo puede ser consumida por la resistencia  $r_r / s$  por lo tanto la potencia de campo giratorio también debe ser

$$P_{cgir} = 3I_2^2 (r_r / s)$$

Pero las pérdidas reales en el rotor son

$$P_{rotor} = 3I_2^2 r_r'$$

Restando las pérdidas en el rotor a la potencia de campo giratorio obtenemos la potencia que se convierte de eléctrica a mecánica, a esta potencia se la conoce como potencia mecánica desarrollada.

$$P_{md} = 3I_2^2 (r_r / s) - 3I_2^2 r_r'$$

$$P_{md} = 3I_2^2 r_r' \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

El par inducido o desarrollado se lo define como el par generado por la potencia mecánica desarrollada

$$\tau_{ind} = \frac{P_{md}}{\omega_m}$$

Este par también se lo puede expresar de otra manera

$$\tau_{ind} = \frac{(1-s)P_{cgir}}{(1-s)\omega_{sínc}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{cgir}}{\omega_{sínc}}$$

Esta última ecuación es muy importante pues expresa el torque inducido en función de la potencia en el entre hierro del motor.

### 1.4 Métodos de arranque de motores AC de inducción Jaula de Ardilla.

Durante el arranque directo de un motor AC éste toma dependiendo del tipo de motor, de 4 a 7 veces la corriente nominal, esto puede causar una caída de tensión considerable en el sistema de alimentación y afectar a cargas adyacentes, más

aun cuando se tienen cargas sensibles a variaciones de voltaje.

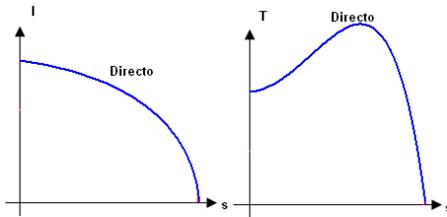


Figura 3. Curvas de corriente y torque en el arranque directo de un motor de inducción

### Arranque a tensión reducida mediante resistencias estáticas

En el arranque por resistencias estáticas se disminuye el voltaje aplicado en los terminales del estator intercalando resistencias en serie con el devanado del estator durante el período de arranque. Una vez que se da el período de arranque las resistencias se retiran del estator y el motor opera normalmente.

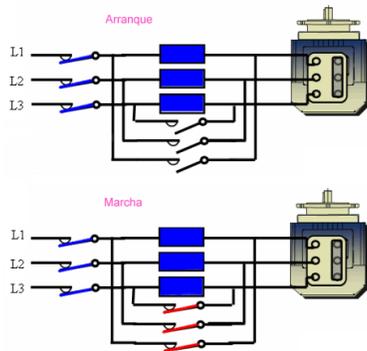


Figura 4. Arranque por resistencias estáticas

Las relaciones entre la corriente y torque de arranque directo con la corriente y torque a tensión reducida son:

$$I_{arrd} = \frac{V_n}{Z_\phi}$$

$$I_{atr} = \frac{V_m}{Z_\phi}$$

$$I_{atr} = \left( \frac{V_m}{V_n} \right) I_{arrd}$$

$$T_{arrd} \rightarrow V_n^2$$

$$T_{atr} \rightarrow V_m^2$$

$$T_{atr} = \left( \frac{V_m}{V_n} \right)^2 T_{arrd}$$

### Arranque a tensión reducida por medio de un autotransformador

Este método consiste en utilizar un autotransformador para obtener un voltaje reducido en las terminales del motor. Una vez que se da el período de arranque, el autotransformador se retira y el motor opera normalmente.

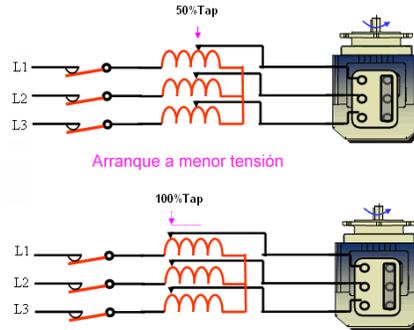


Figura 5. Arranque por autotransformador

Las relaciones entre la corriente y torque de arranque directo con la corriente y torque a tensión reducida son:

$$I_{arrd} = \frac{V_n}{Z_\phi}$$

$$I_{atr} = \frac{V_m}{Z_\phi}$$

$$I_{atr} = \frac{V_m}{V_n} I_{arrd}$$

$$V_n I_{al} = V_m I_{atr}$$

$$I_{al} = \frac{V_m}{V_n} I_{atr}$$

$$I_{al} = \left( \frac{V_m}{V_n} \right) \left( \frac{V_m}{V_n} \right) I_{arrd}$$

$$I_{al} = \left( \frac{V_m}{V_n} \right)^2 I_{arrd}$$

$$T_{arrd} \rightarrow V_n^2$$

$$T_{atr} \rightarrow V_m^2$$

$$T_{atr} = \left( \frac{V_m}{V_n} \right)^2 T_{arrd}$$

$$T_Y = \frac{T_{\Delta}}{3}$$

**Arranque Estrella - Triangulo**

Este método consiste en modificar las características de impedancia del motor cambiando las conexiones de los devanados del estator durante el arranque.

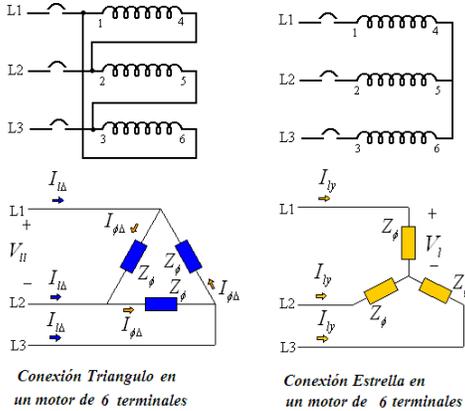


Figura 6. Conexiones triángulo y estrella en un motor de inducción

En la conexión delta tenemos

$$I_{\phi\Delta} = \frac{V_{ll}}{Z_{\phi}} ; I_{l\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta}$$

En la conexión estrella

$$I_{ly} = \frac{V_l}{Z_{\phi}}$$

Usando las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$I_{\phi\Delta} = \frac{\sqrt{3}V_l}{Z_{\phi}}$$

$$I_{l\Delta} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{3}V_l}{Z_{\phi}} = 3 \frac{V_l}{Z_{\phi}} = 3I_{ly}$$

$$I_{ly} = \frac{I_{l\Delta}}{3}$$

$$T_{\Delta} \rightarrow V_{ll}^2$$

$$T_Y \rightarrow V_l^2$$

$$T_Y = \left( \frac{V_l}{V_{ll}} \right)^2 T_{\Delta} = \left( \frac{V_l}{\sqrt{3}V_l} \right)^2 T_{\Delta}$$

**Arranque por devanados parciales**

Este método se lo realiza en motores con más de un devanado por fase y con acceso a los terminales a sus terminales. Además los devanados en operación normal deben estar conectados en paralelo.

El método consiste en arrancar el motor con solo un devanado por fase, con lo que el circuito equivalente aproximado del motor cambia de la siguiente manera

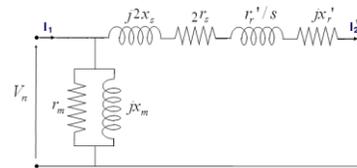


Figura 7. Circuito equivalente aproximado del motor en el arranque por devanados parciales.

Esto quiere decir que el circuito del estator arranca con una impedancia igual al doble que al estar con sus devanados completos pero la impedancia del rotor no cambia. Asumiendo que los parámetros en el estator y los referidos del rotor son iguales tenemos

$$Z_{\phi DP} = (2r_s + j2x_s) + (r_r' + jx_r')$$

$$Z_{\phi DP} = 2(r_s + jx_s) + (r_r' + jx_r')$$

$$Z_{\phi DP} = 2 \frac{Z_{\phi}}{2} + \frac{Z_{\phi}}{2}$$

$$Z_{\phi DP} = \frac{3}{2} Z_{\phi}$$

Relacionando la corriente de arranque con medio devanado con la corriente arranque con devanados completos

$$V_{\phi} = I_{arrd} Z_{\phi}$$

$$V_{\phi} = I_{arrDP} Z_{\phi DP}$$

$$\frac{I_{arrDP}}{I_{arrd}} = \frac{V_{\phi}}{Z_{\phi DP}} = \frac{2}{3} \frac{V_{\phi}}{Z_{\phi}}$$

$$I_{arrDP} = \frac{2}{3} I_{arrd}$$

## 2 INTERACTUANDO CON EL SOFTWARE LABVIEW 8.5

### 2.1 Introducción

LabVIEW es la abreviación de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench y es un lenguaje basado en programación gráfica (lenguaje G) y fue creado para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control, en él se pueden crear aplicaciones sencillas o complejas de forma rápida y fácil.

### 2.2 Partes principales de un VI

Todo programa realizado en LabVIEW es llamado VI (Instrumento Virtual), el cual consta de 3 partes principales:

- Panel Frontal.
- Diagrama de Bloques.
- Icono/Conector.

### 2.3 Paleta de controles y paleta de funciones

La paleta de controles (Controls) es utilizada para colocar los controles e indicadores en el panel frontal.

La paleta de funciones (Functions) es utilizada para encontrar las funciones que necesita y construir un diagrama de bloque.

### 2.4 Estructuras y funciones más usadas

- Lazo While.- estructura utilizada para realizar operaciones repetitivas hasta que una condición se cumpla.
- Lazo For.- estructura utilizada para realizar operaciones repetitivas una cantidad finita de veces. Donde la cantidad se define en N.
- Nodo Formula.- estructura utilizada para realizar operaciones en código. Las funciones utilizadas son muy semejantes a las de C++.
- Estructura Case.- esta estructura consiste de dos o más subdiagramas de los cuales solo se ejecuta uno y es según sea el valor o estado de la condición.
- Funciones de Arreglos.- Cuando se manejan entrada o salida de señales es poco práctico tratar de manejar estos datos valor por valor, por tal motivo lo recomendable es manejarlos como arreglos. Las funciones más comunes son: Index Array, Build Array, Array Subset, Max&Min.

### 2.5 Funciones de configuración de canales

- DAQmx Timing (Sample Clock)  
Configura el número de muestras para adquirir o generar y crea un buffer cuando sea necesario
- DAQmx Start Task  
Transición de la tarea para iniciar la medición o generación. El uso de este VI es necesario para algunas aplicaciones y es opcional para otras.
- DAQmx Read (Analog 1D Wfm NChan NSamp)  
Lee una o más formas de ondas desde una tarea (Task) que contiene uno o más canales de entrada analógicas.

### 2.6 Descripción del programa desarrollado para motores AC

#### Panel Frontal

El Panel frontal consta de un contenedor (Tab control) con tres pestañas las cuales tienen como nombre la acción o el proceso que realizan:

- Gráficas y parámetros en estado estable.
- Gráficas de arranque.
- Configuración y conexiones.

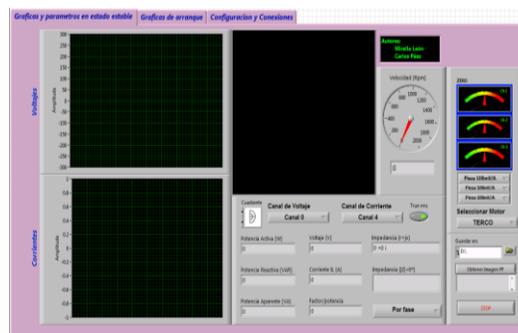


Figura 8. Vista del panel frontal.

#### Diagrama de Bloque

En el diagrama de bloques se tiene una programación para cada uno de las pestañas del contenedor ubicado en el panel frontal.

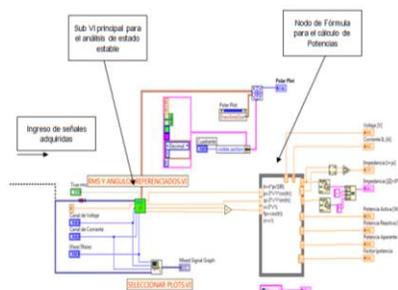


Figura 9. Vista del diagrama de bloques de la pestaña "Parámetros en estado estable".

### 3 ADQUISICION Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

#### 3.1 Introducción

La Adquisición de Datos, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para obtener datos que puedan ser manipulados por un ordenador (sistema digital); en otras palabras es tomar un conjunto de variables físicas, convertirlas en tensiones eléctricas para luego digitalizarlas de manera que se puedan procesar en un computador.

#### 3.2 Adquisición de señales

La adquisición de señal es el proceso de convertir el fenómeno físico en datos que el computador pueda usar. Una medición inicia con el uso de un transductor para convertir el fenómeno físico en una señal eléctrica. Los transductores pueden generar señales eléctricas para medir fenómenos como temperatura, fuerza, sonido o luz.

#### 3.3 Acondicionamiento de señales

El acondicionamiento de señal es el proceso de medir y manipular las señales para mejorar la exactitud, aislamiento, filtrado y demás. Muchos instrumentos autoejecutables y dispositivos DAQ poseen incluido el acondicionamiento de señal.

#### 3.4 Sistemas de medición

Los sistemas de medición se configuran en base al hardware que se posee y al tipo de medición que se toma. Los mismos pueden ser:

- Sistema de medición diferencial.
- Sistema de medición referenciado (RSE).
- Sistema de medición no referenciado (NRSE).

#### 3.5 Calidad de medición

Cuando se diseña un sistema de medición, se puede encontrar que la calidad de medición no reúne sus expectativas. Las siguientes razones afectan el logro de detección del cambio más pequeño en voltaje:

- La resolución y rango del ADC.
- La ganancia aplicada por el amplificador de instrumentación.
- La combinación de la resolución, rango y ganancia para calcular una propiedad denominada valor de ancho de código.

#### 3.6 Equipos de adquisición utilizados

Entre los equipos de adquisición utilizados tenemos:

- Chassis NI SCXI-1000.
- DAQ NI-SCXI 1600.
- Analog Input Module NI-SCXI 1125.
- Bloque Terminal NI-SCXI 1313.
- Pinzas amperimétricas.
- Encoder.

### 4 DESCRIPCION GENERAL DEL SADM Y PRUEBAS REALIZADAS

#### 4.1 Descripción física del SADM

Para el presente proyecto se implementó una unidad denominada SADM (Sistema Analizador Dinámico de Arranque de Motores).



Figura 10. Vista del equipo SADM

La unidad tiene una sección de borneras en las cuales se realizan las conexiones para poder realizar las respectivas mediciones. Adicionalmente el dispositivo está ensamblado en un módulo transportable, lo que nos brinda una fácil transportación. En la parte inferior se encuentra el chasis NI SCXI 1000 en el cual se encuentran incorporados un módulo NI SCXI 1125, un bloque terminal NI SCXI 1313, y una tarjeta de adquisición de datos tipo plug and play NI SCXI 1600; y en la parte interior del módulo se tiene un computador, al cual cargamos los datos adquiridos mediante el SCXI y procesamos mediante el programa diseñado en el software LabVIEW 8.5 para obtener los resultados deseados.

#### 4.2 Descripción de funcionamiento

El bloque terminal de la plataforma SCXI tiene un bloque terminal NI SCXI 1313, este bloque terminal cuenta con 8 canales enumerados de 0 al 7. Cada una de los canales cumple una función específica. Los canales 0, 1 y 2 están configurados para medir voltajes hasta 300Vrms y los canales 4, 5 y 6 están configurados para medir corrientes hasta 50A.

El canal 7 está configurado para medir la señal del transductor de velocidad, el cual debe estar acoplado correctamente al eje de la máquina.

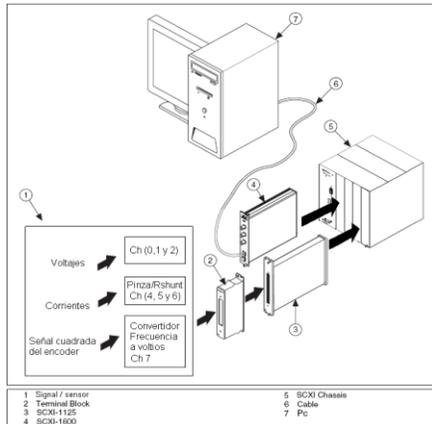


Figura 11. Sistema SCXI

### 4.3 Pruebas realizadas

Se verificó el funcionamiento del SCXI realizando la medición en los siguientes circuitos de arranque:

- Arranque directo.
- Arranque a tensión reducida mediante resistencias estatóricas.
- Arranque a tensión reducida mediante autotransformador.
- Arranque estrella-triángulo.
- Arranque por devanados parciales.

Para todos los casos, se debe medir el voltaje en cada devanado *del motor y la corriente total de línea de entrada con las pinzas amperimétricas*. Adicionalmente se elaboró una guía de usuario para facilitar el manejo del equipo a los estudiantes.

A continuación se muestran algunas gráficas tomadas con el SADM, en el arranque directo y mediante autotransformador aplicados al motor marca TERCO:



Figura 12. Torque en Arranque directo

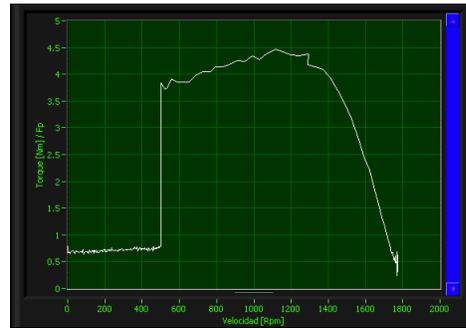


Figura 13. Torque en Arranque por autotransformador

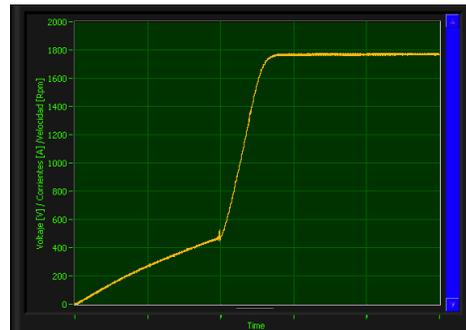


Figura 14. Velocidad en Arranque por autotransformador

## 5. Conclusiones

- Después de las pruebas realizadas, se puede concluir que el Sistema Analizador Dinámico de Motores (SADM) cumple satisfactoriamente los requerimientos y realiza correctamente las mediciones de voltaje, corriente, impedancia, potencia y torque en el arranque del Motor de Inducción Jaula de Ardilla marca Terco.
- En base a las pruebas realizadas se pudo verificar las características de arranque para los motores existentes en el Laboratorio de Controles Industriales Eléctricos, estableciendo un estrecho vínculo teórico-práctico.

## 6. Referencias

- [1]. "Máquinas Eléctricas", Stephen J. Chapman 4ta.Ed, Editorial-Mc Graw Hill
- [2]. "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Irving L. Kosow 2da.Ed, Editorial-Prentice Hall
- [3]. Manuales NI Instruments
- [4]. <http://www.tuveras.com>

Msc. Otto Alvarado  
Profesor Director de Proyecto