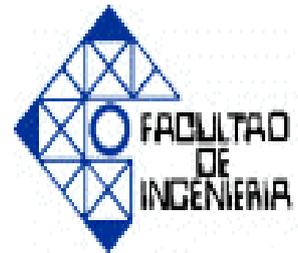




UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



**PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LAS MÁQUINAS DEL  
LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO A PARTIR DEL  
ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES ELÉCTRICAS**

CENTENO ANDREA

MARTÍNEZ MARCELO

VALENCIA, NOVIEMBRE DE 2010.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



**PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LAS MÁQUINAS DEL  
LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO A PARTIR DEL  
ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES ELÉCTRICAS.**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIEROS  
ELECTRICISTAS

CENTENO ANDREA

MARTÍNEZ MARCELO



VALENCIA, NOVIEMBRE DE 2010.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



### **CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado: “**PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LAS MÁQUINAS DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES ELÉCTRICAS**”, realizado por los bachilleres: Centeno Andrea C.I: 18.266.889 y Martínez Marcelo C.I: 18.504.756, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

**Prof. Ledy Guerra**

**TUTOR**

---

**Prof. Irahis Rodríguez**

**JURADO**

---

**Prof. Verner Hornebo**

**JURADO**

Valencia, Diciembre de 2010.

## DEDICATORIA

A mis padres **Elba Sánchez** y **Luis Centeno**, por todo su amor y apoyo durante mi carrera universitaria, es a ellos a quien debo toda mi educación y por eso les dedico este trabajo.

A mis hermanos **Limbelly Sánchez** y **Alfredo Centeno** por su apoyo moral y ayuda incondicional durante mi carrera universitaria.

A mis hermanos **Saraith Centeno** y **Jorge Centeno** y demás familiares por estar a mi lado apoyando mi trayecto universitario.

A **Hecdiel Hernández**, mi gran motivador, por estar siempre pendiente de mí y por el apoyo incalculable que me brindo durante mis estudios universitarios, a él también le dedico este trabajo.

Al **Ing. Marcelo Martínez**, por ser mi compañero de trabajo especial de grado, por todo su esfuerzo, dedicación y constancia para lograr los objetivos que nos planteamos.

**Andrea Centeno.**

A mi madre, **Gilda Guerra**, por su apoyo incondicional y permanente durante toda mi vida, porque gracias a ella soy lo que soy, este logro es tan suyo como mío.

A mis hermanos, **Javier Martínez** y **Marcia Martínez**, porque son lo mejor que me han dado mis padres, por su apoyo y ayuda incondicional.

A **Ledy Guerra** y **Rubén Terán**, por ser mis guías en esta bonita carrera, por todo lo que me enseñaron, porque son mi modelo a seguir.

A **Rosana Camacho**, por ser mi inspiración, mi musa, por su apoyo constante y toda la ayuda que me ha brindado.

A la **Ing. Andrea Centeno**, por ser mi compañera en el trabajo especial de grado, porque juntos logramos llegar a la meta con dedicación, paciencia y mucho esfuerzo y por ser la gran persona que es.

**Marcelo Martínez.**



---

## AGRADECIMIENTOS

Le agradecemos principalmente a Dios, por darnos la fuerza, la motivación y la salud para culminar con éxito este trabajo de investigación.

A nuestros padres y familiares por estar siempre con nosotros, brindándonos todo su apoyo, cariño, comprensión y colaboración, necesario para lograr el cumplimiento de ésta importante meta.

A nuestra tutora Ing. Ledy Guerra, por habernos brindado en todo momento su colaboración, dedicación y estímulo necesario para lograr realizar este trabajo especial de grado.

Al Ing. Rubén Terán, por sus muestras de apoyo y sugerencias, las cuales, para nosotros han tenido un valor incalculable.

De igual forma queremos agradecerle a la Universidad de Carabobo, por brindarnos la oportunidad de realizar nuestros estudios formándonos como profesionales.

A todas aquellas personas que prestaron su colaboración para la realización de este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b> .....	IV
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	V
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	VII
<b>RESUMEN</b> .....	XI
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I. EL PROBLEMA</b>	
Resumen.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos de la investigación.....	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación de la investigación.....	5
1.4. Alcance.....	7
1.5. Recursos.....	7
<b>CAPITULO II. MARCO TEORICO</b>	
Resumen.....	8
2.1. Antecedentes de la investigación.....	8
2.2. Bases teóricas.....	11
2.2.1. Máquinas Eléctricas Rotativas.....	11
2.2.1.1. Máquinas Asíncronas o de Inducción.....	12
❖ Aspectos Constructivos de las Máquinas Asíncronas.....	12
❖ Principio de funcionamiento de las Máquinas Asíncronas.....	14
2.2.1.2. Máquinas Síncronas.....	17
❖ Aspectos Constructivos de las Máquinas Síncronas.....	17
❖ Principio de funcionamiento de las Máquinas Síncronas.....	18
2.2.1.3. Máquinas de Corriente Continua.....	20

❖ Aspectos Constructivos de las Máquinas de Corriente Continua.....	20
❖ Principio de funcionamiento de las Máquinas de Corriente Continua.....	23
2.2.2. Transformadores.....	25
❖ Aspectos constructivos de los Transformadores.....	25
❖ Funcionamiento de los Transformadores.....	27
2.2.3. Mantenimiento.....	28
2.2.4. Análisis en el Dominio de la Frecuencia.....	31
2.2.4.1. Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	32
2.2.4.2. Analizadores de la Transformada Rápida de Fourier.....	32
2.2.4.3. Estructura de los Analizadores de la FFT.....	33
2.2.5. Fallas más comunes en las Máquinas Eléctricas.....	35
2.2.5.1. Fallas en las Máquinas de Corriente Continua.....	35
❖ Falla en los rodamientos.....	35
❖ Criterio de detección de fallas en los rodamientos.....	38
2.2.5.2. Fallas en las Máquinas Asíncronas.....	39
❖ Falla en los cojinetes.....	40
❖ Criterio de detección de Falla en los Cojinetes.....	40
❖ Falla en barras y anillos del rotor.....	42
❖ Criterio de detección de falla en barras y anillos del rotor.....	43
❖ Falla por excentricidad.....	45
❖ Criterio de detección de falla por excentricidad.....	45
2.2.5.3. Falla en Máquinas Sincrónicas.....	47
2.2.5.4. Fallas en los Transformadores.....	50
❖ Fallas en devanados del Transformador.....	50
❖ Criterio de detección de fallas en devanados del transformador.....	51
2.2.6. LABVIEW.....	57
2.2.6.1. Instrumentos virtuales.....	58
2.2.6.2 Funciones TAD e I/O.....	59

2.7. Definición de términos.....	63
----------------------------------	----

### **CAPITULO III. MARCO METODOLOGICO**

Resumen.....	66
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	66
3.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	66
3.2.1. Características de la tarjeta de adquisición de datos.....	67
3.3. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	69
3.4. Desarrollo de las fases metodológicas.....	70
3.4.1. FASE I: Describir las ecuaciones que rigen el comportamiento de las máquinas eléctricas con el fin de conocer su funcionamiento.....	70
3.4.2 FASE II: Analizar las fallas que se presentan en las máquinas eléctricas con el propósito de determinar las formas de detectarlas.....	70
3.4.3 FASE III: Estudiar las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo basadas en el análisis espectral de señales eléctricas para seleccionar aquellas que sean más convenientes de aplicar según el tipo de máquina y las fallas que se presentan.....	71
3.4.4. FASE IV: Modificar las prácticas establecidas por la Cátedra del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que resulten apropiados para efectuar la adquisición de señales eléctricas necesarias para el mantenimiento predictivo..	71
3.4.4.1 Selección de los instrumentos y técnicas de medida para la adquisición de datos correspondientes a las señales de interés.....	72
3.4.4.2 Modulo de la fuente de alimentación DC.....	80
3.4.4.3. Construcción del software de adquisición y procesamiento de datos.....	82
3.4.4.4. Instrumento virtual de visualización y adquisición de datos (interfaz gráfica).....	91

3.4.4.4.1. Panel de Control.....	91	
3.4.4.4.2. Panel de tensiones.....	92	
3.4.4.4.3. Panel de corrientes.....	93	
3.4.4.4.4. Panel de Ensayo en Vacío.....	93	
3.4.4.4.5. Panel de Ensayo Característica Par-Velocidad.....	94	
3.4.4.4.6. Panel de Mediciones.....	94	
 <b>CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS</b>		
4.1. Práctica inductiva a labview 7.1 y la adquisición de datos.....	95	
4.2. Motor de Inducción de Jaula de Ardilla.....	111	
4.3. Motor de Inducción de Rotor Devanado.....	126	
 <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		
Conclusiones.....	136	
Recomendaciones.....	137	
 <b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>		138
APENDICE A Datos de placa motores analizados.....	140	
APENDICE B Datos de equipos eléctricos empleados.....	142	

## INTRODUCCIÓN

Las Máquinas Eléctricas tienen múltiples aplicaciones en la industria, y en algunas de ellas es vital garantizar su correcto funcionamiento. Los motores y generadores eléctricos están sujetos a una amplia variedad de fallas y operaciones anormales. Predecir cuándo una máquina eléctrica requiere mantenimiento permite a los usuarios realizar las acciones necesarias a su conveniencia y no durante paradas costosas no programadas. El objetivo de métodos de diagnóstico y monitoreo moderno es garantizar la utilización óptima y segura de motores y generadores con respecto a la potencia de salida y su tiempo de vida.

El Departamento de potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica perteneciente a la Universidad de Carabobo ha venido desarrollando actividades de investigación y desarrollo en el área de mantenimiento de maquinaria tendientes a adaptar tecnología para proveer a la industria local con herramientas de mantenimiento predictivo que permitan conocer en forma oportuna la condición de funcionamiento de equipos industriales, tales como motores eléctricos de inducción. Siguiendo este patrón, el desarrollo en el área de Mantenimiento Predictivo se extiende en esta oportunidad, a las máquinas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo ya antes mencionada.

A tales efectos, se realizó una investigación de tipo descriptivo y con un diseño de campo con apoyo documental, donde la planificación quedó estructurada a través de cuatro capítulos que se mencionan a continuación:

En primer lugar, se muestra el **Capítulo I**, denominado el problema, donde se expone el motivo de la investigación, a través de una descripción general acerca del mantenimiento predictivo a máquinas eléctricas. De igual forma, se formula el objeto de estudio, delimitando el cuerpo de objetivos, y la justificación que orienta la investigación.

Seguidamente, se desarrolla el **Capítulo II**, referido al Marco Teórico, donde se presentan los antecedentes de la investigación, relacionados con la temática que se aborda y las bases teóricas que comprende la teoría preexistente.

Por otra parte, en el **Capítulo III**, relacionado con el Marco Metodológico, se establece la estructura metodológica seleccionada mediante el tipo de estudio, el método de investigación, los instrumentos de recolección de datos, las técnicas de análisis de la información a ser empleadas y el desarrollo de cada una de las fases metodológicas.

Posteriormente, en el **Capítulo IV** se muestran los resultados obtenidos mediante la representación de figuras, graficas y tablas, base fundamental para establecer las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Por último, se establecen las referencias bibliográficas consultadas y utilizadas para elaborar los distintos capítulos, y los respectivos anexos.

En lo subsiguiente se presenta de manera concisa el desarrollo de la investigación la cual se espera sea de gran utilidad para los lectores interesados en esta temática, y al mismo tiempo sirva de referencia para estudios posteriores.



---

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE POTENCIA  
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Autores: Centeno, Andrea  
Martínez, Marcelo  
Tutor: Ledy Laura Guerra  
Diciembre 2010

**RESUMEN**

Entre los componentes más importantes a nivel industrial se tienen, las máquinas eléctricas, es por esto que resulta evidente la necesidad de prestar atención al mantenimiento para aprovechar al máximo las funciones que estas máquinas pueden ofrecer. En la actualidad, el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo cuenta con diferentes tipos de máquinas (Máquinas Asíncronas, Máquinas Síncronas, Máquinas de corriente continua y transformadores), las cuales carecen de un plan de mantenimiento, por lo que es importante realizar un Plan de Mantenimiento Predictivo para estas máquinas a partir del análisis espectral de señales eléctricas. El presente trabajo especial de grado fue una investigación de campo de diseño analítico-descriptivo. Para el cumplimiento de los objetivos planteados se desarrollaron tres fases en las cuales se describen las ecuaciones que rigen el comportamiento de las máquinas eléctricas, se analizan las fallas que se presentan en las máquinas, se estudian las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo basadas en el análisis espectral de señales eléctricas y se modifican las prácticas establecidas por la Cátedra del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que resulten apropiadas para efectuar la adquisición de señales eléctricas necesarias para el mantenimiento predictivo. Una vez desarrollados los objetivos específicos de la presente investigación se proporciona a la línea de investigación de Mantenimiento Predictivo de Equipos y Sistemas de la Facultad de Ingeniería una base de datos que permitirá diagnosticar el progreso de las fallas en el tiempo de las mismas.

**Palabras claves:** Mantenimiento Predictivo, fallas, Técnicas, Análisis espectral, Señales eléctricas, adquisición, diagnosticar.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

El presente capítulo se denomina el problema, donde se expone el motivo de la investigación a través de una descripción general acerca del mantenimiento predictivo a máquinas eléctricas. De igual forma, se formula el objeto de estudio, delimitando el cuerpo de objetivos y la justificación que orienta la investigación.

#### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Entre los componentes más importantes a nivel industrial se tienen, las máquinas eléctricas, es por esto que resulta evidente la necesidad de prestar atención al mantenimiento para aprovechar al máximo las funciones que estas máquinas pueden ofrecer. En éste sentido, se comprende que los planes de mantenimiento han ido evolucionando para garantizar la confiabilidad y eficiencia de las máquinas.

En este orden de ideas, es importante estudiar las técnicas para la detección precoz de averías en máquinas eléctricas o mejor conocido como Mantenimiento Predictivo. Cabe señalar que existen otros sistemas de mantenimiento que es necesario mencionar antes de estudiar el mantenimiento predictivo, como lo son el Mantenimiento Correctivo y el Mantenimiento Preventivo. El primero se basa en la intervención en el caso de avería, manifestada como el colapso de un equipo o instalación, es decir, la interrupción súbita de la producción, a diferencia de este, el mantenimiento preventivo se basa en la sustitución de las piezas o partes del sistema que pudieran causar averías, dicha sustitución se realiza con una cierta periodicidad, determinada mediante criterios estadísticos, así el reemplazo de un determinado elemento puede realizarse después de cierto tiempo programado. [1]

Mientras que, el mantenimiento predictivo se basa en el seguimiento organizado con medición periódica o continua de variables de estado del sistema y la comparación con unos patrones

preestablecidos, para la determinación del instante en que se debe producir la intervención de mantenimiento. Por tanto, consiste en corregir la falla cuando ésta aún se encuentra en estado incipiente. [1]

Cabe destacar que aunque una máquina debe ser diseñada para soportar perturbaciones eléctricas, mecánicas y ambientales durante su vida útil, un sistema de mantenimiento predictivo puede detectar los efectos adversos de dichas perturbaciones y permite conocer el estado de la máquina para así diagnosticar las necesidades actuales de mantenimiento y planificar la intervención oportuna, evitándose todas las reparaciones innecesarias, disminuyendo así los costos.

En la actualidad, el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo cuenta con diferentes tipos de máquinas (Máquinas Asíncronas, Máquinas Síncronas, Máquinas de corriente continua y transformadores), utilizadas principalmente por estudiantes para la realización de prácticas de las cátedras de Máquinas Eléctricas y Electrotecnia y por profesores y tesisistas para pruebas de investigaciones realizadas por los mismos. Dichas máquinas carecen de un plan de mantenimiento; esto trae como consecuencia, el deterioro continuo de las máquinas, aumentando el riesgo de fallas de las mismas, teniendo que reemplazarlas posteriormente aún sabiendo que estas son de difícil adquisición para la Universidad.

Por lo anterior expuesto se propone realizar un Plan de Mantenimiento Predictivo, sin embargo existen diferentes tipos de análisis de acuerdo a las fallas que se presenten en la máquina, entre estos están: análisis espectral de la vibración para fallas mecánicas, termografía infrarroja para fallas del paquete magnético, diferentes técnicas para el diagnóstico de anomalías en los sistemas aislantes de las máquinas y el Análisis Espectral de Señales Eléctricas que será el estudio aplicado en este proyecto, de esta manera se puede diagnosticar el estado de la máquina y se realiza la intervención para el mantenimiento de la misma en el momento oportuno, asegurando, de este modo el buen funcionamiento de las máquinas eléctricas.

## **1.2 OBJETIVOS:**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un Plan de Mantenimiento Predictivo para las máquinas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo a partir del análisis espectral de señales eléctricas.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir las ecuaciones que rigen el comportamiento de las máquinas eléctricas con el fin de conocer su funcionamiento.
- Analizar las fallas que se presentan en las máquinas eléctricas con el propósito de determinar las formas de detectarlas.
- Estudiar las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo basadas en el análisis espectral de señales eléctricas para seleccionar aquellas que sean más convenientes de aplicar según el tipo de máquina y las fallas que se presentan.
- Modificar las prácticas establecidas por la Cátedra del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que resulten apropiados para efectuar la adquisición de señales eléctricas necesarias para el mantenimiento predictivo.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN:**

A medida que pasan los años se hace evidente la necesidad de mejorar las técnicas de mantenimiento existentes, con el fin de obtener una disminución considerable de los costos de manutención, mayor rendimiento y la maximización del tiempo de vida de los componentes del sistema. Por lo cual el presente proyecto representa un aporte para contribuir con el avance de estas técnicas realizando un plan de mantenimiento predictivo para diagnosticar el estado de las máquinas y de esta manera predecir las fallas de las mismas.

Actualmente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo existe una línea de Investigación de Mantenimiento Predictivo de Equipos y Sistemas, que se encarga de estudiar diversas técnicas para el diagnóstico de fallas en diferentes tipos de máquinas y de los elementos que las conforman. Ahora bien, el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería no dispone de ningún plan de mantenimiento. En atención a la problemática expuesta este proyecto traerá como beneficio que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas cuente con un plan de mantenimiento, además dejará implementado un sistema de recolección de datos lo que permitirá a su vez establecer una base de datos para diagnosticar el progreso de las fallas de las máquinas en el tiempo, lo cual, representa un punto de referencia para que estudios futuros puedan predecir el momento de realizar la intervención para el mantenimiento.

En el mantenimiento predictivo de máquinas eléctricas las fallas deben ser detectadas cuando todavía no representen una variación significativa de los parámetros de funcionamiento de la máquina, ya que de no ser así, la avería habría alcanzado dimensiones catastróficas en el momento de su localización, retrocediendo, por tanto, al modelo de mantenimiento correctivo. Por este motivo, el estudio de las variables en el dominio del tiempo no suele ser útil, siendo las técnicas de estudio de análisis espectral de señales eléctricas y de las vibraciones de la máquina, las más empleadas en el diagnóstico para máquinas y circuitos eléctricos.

Es importante mencionar que la medición de las variables de estado se hará a través de la realización de diferentes prácticas, las cuales serán implementadas en el laboratorio con el fin de enseñar al estudiante la medición de las variables eléctricas de interés y de esta manera se tendrá el beneficio de obtener los datos para la aplicación del plan de mantenimiento predictivo propuesto.

Ahora bien, existe otro aporte a futuro del proyecto en estudio, el cual establece que dado el buen funcionamiento del plan de mantenimiento predictivo para las máquinas del laboratorio antes mencionado, este se podrá implementar a nivel de las industrias que lo requieran.

#### **1.4 ALCANCE**

El proyecto está destinado a realizar un Plan de Mantenimiento Predictivo para las máquinas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo a partir del análisis espectral de señales eléctricas. Este estudio se realizará haciendo uso de una tarjeta de adquisición de datos que junto con el software LAB VIEW se podrán tomar mediciones de las variables de estado de la máquina (espectros de voltaje, espectros de corriente, potencia, torque), para de esta manera realizar una base de datos que permitirá diagnosticar el progreso de las fallas en el tiempo de las mismas.

#### **1.5 RECURSOS**

1. Tarjeta de adquisición de datos marca: Measurement Computing USB-1208FS, disponible en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo de la Universidad de Carabobo.
2. Software Measurement Computing Data Acquisition Software conjuntamente con el software National Instruments LabView 7.1 para la adquisición y almacenamiento de la data obtenida.
3. Equipos de medición pertenecientes a los distintos laboratorios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Universidad de Carabobo, tales como los Laboratorios de Mantenimiento Predictivo y el de Máquinas Eléctricas.
4. Transductores tales como transformadores de corriente y tensión y sensores de velocidad.
5. Computadora portátil perteneciente al Laboratorio de Mantenimiento Predictivo de la Universidad de Carabobo.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

Este capítulo está referido al Marco Teórico, donde se presentan los antecedentes de la investigación relacionados con la temática que se aborda, las bases teóricas referentes a la Máquina de Corriente Continua, la Máquina Síncrona, la Máquina Asíncrona y los Transformadores, así como también las partes constructivas de dichas máquinas, las fallas más comunes, sus respectivas frecuencias características de falla y los diversos transductores que se utilizan para la adquisición de las señales eléctricas y mecánicas. Adicionalmente, se estudiarán los fundamentos de los sistemas de adquisición de datos y conversión analógica digital.

#### 2.1 ANTECEDENTES

Los antecedentes de la investigación se refieren a la síntesis conceptual de las investigaciones o trabajos realizados sobre el objeto de estudio.

Para llevar a cabo el presente estudio se revisaron varias investigaciones en el área de mantenimiento de máquinas eléctricas, que fueron utilizadas como referencia inicial y guías metodológicas. Entre las investigaciones más relevantes se puede mencionar:

La investigación realizada por González J., R. D. y Muñoz O., J. L. (2009), titulada **Detección de fallas en los cojinetes del motor de inducción a través del análisis espectral de corriente aplicando máquinas de vectores soporte** presenta, el aplicar la Máquina de Vectores Soporte como técnica de clasificación para la detección de fallas en la máquina de inducción, lo que nos permite realizar de una mejor forma el procesamiento de los datos asociados a la medición de variables eléctricas de los motores de inducción, cuando se aplique la técnica de diagnóstico de fallas.

El trabajo de investigación realizado por Gketsis, Z., Zervakis, M. y Stavrakakis G. (2009), titulado **Detection and classification of winding faults in windmill generators using Wavelet Transform and ANN**, estudia un método para detectar fallas en una máquina síncrona, dicho método utiliza la transformada de Wavelet y las redes neuronales. Lo que proporciona un importante avance en la investigación de este proyecto.

El trabajo especial de grado elaborado por Ramírez, R. y Camacho, M. (2009), titulado **Construcción de un prototipo electrónico para la adquisición, acondicionamiento y digitalización de las señales de tensión, corriente, flujo axial de dispersión y velocidad asociadas a motores trifásicos de inducción jaula de ardilla**, proporciona un importante avance en la investigación y creación del prototipo electrónico a utilizar para el desarrollo de este proyecto.

El trabajo de investigación realizado por Peraza, V. y Matos, J. (2008), titulado **Aplicación de criterios de Mantenimiento Predictivo a una data de señales eléctricas de Motores de Inducción (34Hp – 64Hp) en el área de Trefila Gruesa de la Empresa Vicson S.A.** crea una base de datos de las señales de las variables eléctricas de tensión, corriente y velocidad de un motor de inducción, con el fin de aplicar los criterios establecidos en trabajos experimentales de la línea de Investigación de Mantenimiento Predictivo de Equipos y Sistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, pero esta vez aplicados a motores de potencia media (34Hp – 64Hp) presentes en procesos industriales. Lo que permite revisar y adquirir información sobre el análisis de espectro, la Transformada Rápida de Fourier y criterios de detección de fallas en motores de inducción.

El trabajo de Investigación realizado por Rodríguez P., M. A. (2008), titulado **Máquinas Asíncronas**, proporciona un estudio avanzado de todo lo relacionado a Máquinas de inducción, una de las principales máquinas en esta investigación.

Ordoñez, J. y González, J. (2007). **Evaluación del espectro de frecuencias de la corriente de armadura del motor de corriente continua, para la detección de fallas en rodamiento.** Tesis de pre-grado en Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia, Universidad de Carabobo.

El trabajo especial de grado realizado por Ordoñez, J. y González, J. (2007), titulado **Evaluación del espectro de frecuencias de la corriente de armadura del motor de corriente continua, para la detección de fallas en rodamiento**, se enfocó en la evaluación del espectro de frecuencias de la corriente de armadura del motor de corriente continua, como una técnica que puede ser usada para detectar fallas en los componentes críticos del motor, específicamente para la detección de fallas en rodamientos. Por lo que permite, revisar y adquirir información sobre las técnicas aplicadas al diagnóstico de fallas y mantenimiento predictivo de motores DC.

La investigación elaborada por Secue, J. R. y Mombello, E. (2007), titulada **Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers**, desarrolla una técnica de análisis para detectar deformaciones y desplazamientos en los devanados (entre otras fallas mecánicas y eléctricas) en transformadores de potencia y distribución, para ello utiliza el análisis de respuesta de barrido de frecuencia (SFRA por sus siglas en inglés). Lo que proporciona un importante avance en la investigación de este proyecto.

El trabajo especial de grado realizado por Gómez G., M. E. y Piña G., A. J. (2005), titulado **Análisis del flujo axial de dispersión como medio diagnóstico de fallas en barras y anillos del rotor del motor de inducción jaula de ardilla**, proporciona información en el área del análisis de una de las variables importantes como lo es el flujo axial, por medio de una bobina captadora, información importante para la realización del marco teórico. Otra referencia importante fue la utilización del programa gráfico LabView, que será utilizado en el presente trabajo.

La trabajo de investigación elaborado por Piñol, A., Ortega, J. A. y Romeral, J. L. (2002), titulado **Mantenimiento predictivo de Motores de Inducción**, proporciona la información sobre los diferentes tipos de mantenimiento para motores de inducción y dos métodos para el diagnóstico de la máquina; como lo son el análisis de vibraciones y el análisis espectral de las corrientes de estator, cuyos temas son tratados tomando como base las transacciones de electrónica industrial de la IEEE, vol. 47, No. 5 entre otras, de aquí se tomaron figuras que muestran la comparación entre un espectro de corriente de un motor sano y un espectro de corriente de un motor averiado.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

Las bases teóricas contienen información relevante para la comprensión del trabajo de investigación. Siendo las cosas así, es necesario delimitar los parámetros conceptuales que sustentan, complementan y sirven de apoyo a los elementos implicados en la búsqueda investigativa, dentro de este marco se realizaron los siguientes análisis: el primero, referido al conocimiento teórico del funcionamiento de las máquinas eléctricas y de las variables involucradas, así como una descripción de sus partes; el segundo referido a la definición y conceptualización de las operaciones de mantenimiento, sus tipos y especificaciones; el tercero relativo al estudio de las fallas más comunes en las máquinas eléctricas y el cuarto relativo a las técnicas aplicadas al diagnóstico de fallas y mantenimiento predictivo de las máquinas en estudio. Finalmente se detalló el software LabView que se utilizó para crear instrumentos virtuales que permitieron la experimentación requerida para este trabajo.

### **2.2.1. MÁQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS.**

Las máquinas eléctricas rotativas son aquellas que permiten la conversión entre distintos tipos de energía, gracias a la combinación de los efectos de campo magnético y corrientes eléctricas [1].

Dentro de la familia de las máquinas eléctricas rotativas se pueden distinguir diversos tipos. Los de más interesante aplicación, y que conciernen a la práctica totalidad de las aplicaciones industriales, se pueden agrupar en tres categorías bien diferenciadas:

- Máquinas de inducción o asíncronas.
- Máquinas síncronas.
- Máquinas de corriente continua.

### 2.2.1.1. MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN.

Las máquinas asíncronas o de inducción son las utilizadas más frecuentemente en las instalaciones industriales. Su principio de funcionamiento se basa en el concepto de campo magnético giratorio. Este tipo de campo es el más característico de las máquinas eléctricas rotativas, ya que puede obtenerse por dos procedimientos distintos:

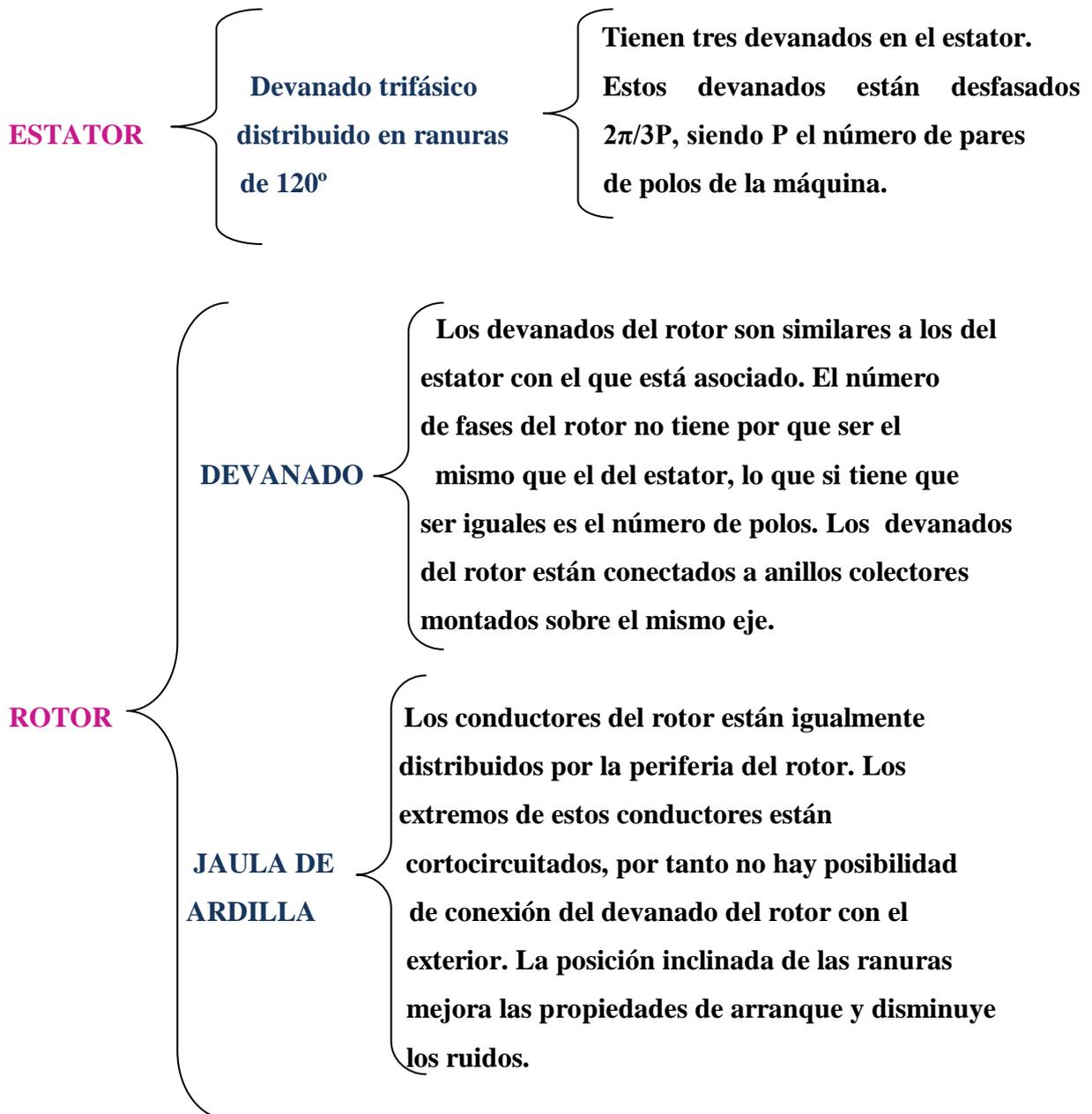
*Creación mediante un inductor móvil:* en este caso se crea un campo fijo y se hace girar mediante una máquina externa. [1]

*Creación del campo por medios fijos:* el campo se genera mediante  $m$  campos alternativos creado por un sistema  $m$  fásico de corrientes. [1]

La diferencia de la máquina asíncrona con los demás tipos de máquinas se debe a que no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos. La corriente que circula por uno de los devanados (generalmente el situado en el rotor) se debe a la f.e.m. inducida por la acción del flujo del otro, y por esta razón se denominan máquinas de inducción. También reciben el nombre de máquinas asíncronas debido a que la velocidad de giro del rotor no es la de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red. [2]

#### ❖ ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS

La máquina asíncrona o de inducción al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromecánica de la energía de tipo rotativo, está formada por un estator y un rotor. En el estator se coloca normalmente el inductor, alimentado por una red monofásica o trifásica. El desarrollo de este proyecto se dedicará a la máquina trifásica. El rotor es el inducido, y las corrientes que circulan por él aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estator. Dependiendo del tipo de rotor, estas máquinas se clasifican en: rotor de jaula de ardilla o en cortocircuito y el rotor devanado o con anillos. [2]



La máquina asíncrona además de disponer de un estator y un rotor, está dotada de otros elementos mecánicos necesarios para su funcionamiento: tapas o cubos, rodamientos, carcasa, etc. En los motores de mediana y gran potencia existe un ventilador en el eje, cuya misión es producir una refrigeración forzada de la máquina. A veces la carcasa tiene forma ondulada

para mejorar la evacuación del calor que se produce como consecuencia de las pérdidas que aparecen en el motor. [2]

### ❖ PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS.

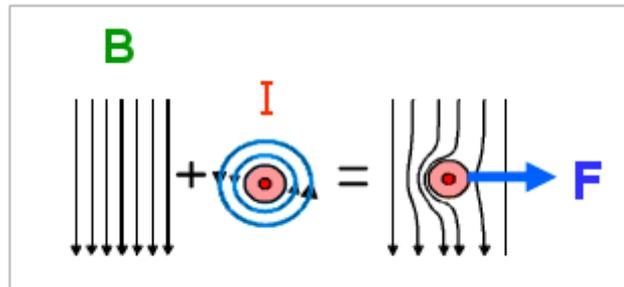
Las máquinas asíncronas o de inducción generalmente suelen funcionar como motor, y de esta manera nos referimos en lo sucesivo. El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados  $120^\circ$  en el espacio y de dos pares de polos; al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia  $f$ , se produce una onda rotativa de fuerza magnetomotriz (f.m.m.) distribuida senoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un campo magnético giratorio cuya velocidad que recibe el nombre de *velocidad de sincronismo* viene expresada por, la ecuación 2.1, [2]:

$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ (r.p.m)} \quad (2.1)$$

Este campo magnético giratorio inducirá fuerzas electromotrices (f.e.m.s.) en los conductores del rotor, y si está un circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el campo magnético del estator. En la figura 2.1 se muestra en un determinado instante el sentido de la inducción  $B$  en el entrehierro producida por el devanado del estator, cuya distribución es senoidal, lo que se representa por medio de una diferencia en la concentración de líneas de  $B$ . De acuerdo con la Ley de Faraday, la f.e.m. inducida en un conductor de longitud  $l$  que se mueve a una velocidad  $v$  dentro de un campo  $B$  tiene un valor, dado por la ecuación 2.2 [2]:

$$e = \int (v \times B) dl = (v \times B) \cdot dl \quad (2.2)$$

Para determinar el sentido debe considerarse que el rotor gira en sentido contrario al campo para tener en cuenta el movimiento relativo mutuo entre ambos sistemas. [2]



**Figura 2.1** Sentido de la fuerza que se produce en un conductor del rotor.

**Fuente:** <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono1.htm>.

Al circular corriente por los conductores del rotor, aparecerá en los mismos una fuerza cuyo sentido se obtiene aplicando la conocida ley vectorial (Ley de Laplace), que se muestra en la ecuación 2.3:

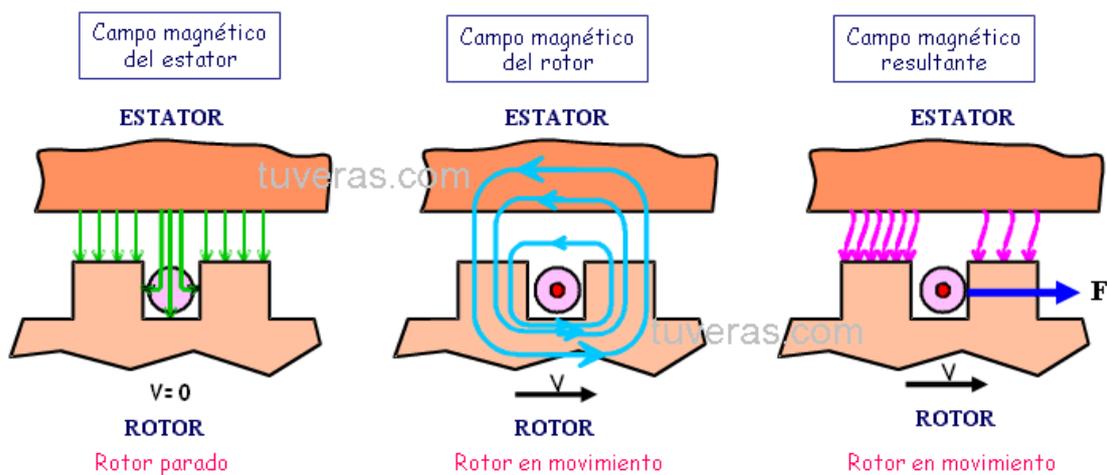
$$F = i(L \times B) \tag{2.3}$$

En la figura 2.1 se muestra también el sentido de la fuerza obtenida mediante la aplicación de la ecuación 2.3. Obsérvese que físicamente la fuerza se produce como consecuencia de una deformación del campo inductor debido a la corriente que circula por el conductor del rotor. [2]

El razonamiento anterior, aunque da los resultados correctos, no es del todo cierto, debido a que en la realidad, y como se muestra en la figura 2.2, los conductores del rotor están situados dentro de unas ranuras, de tal forma que el campo B no atraviesa al conductor y en consecuencia, de acuerdo a la expresión (2.3) la fuerza resultante es nula. La explicación de esta paradoja debe buscarse en la deformación de las líneas de B al circular corriente por los conductores. [2]

En el primer dibujo de la figura 2.2 se muestra el reparto de la inducción en la ranura y el diente cuando la intensidad del conductor es cero; se observa que debido a la menor

reluctancia de los dientes, las líneas de  $B$  tienden a concentrarse en ellos sin atravesar apenas al conductor. En el segundo dibujo de la figura 2.2 se muestra las formas de las líneas de inducción producidas únicamente por el conductor llevando corriente. Y en el último dibujo de esta misma figura se representa la resultante de ambos campos; se observa que la deformación en las líneas de inducción es similar a la que se obtenía para el caso de un conductor aislado (figura 2.1), apareciendo una fuerza resultante en el sentido indicado, pero con la diferencia fundamental de que esta fuerza actúa realmente en los dientes y no en los conductores (lo que constituye un hecho afortunado, ya que si la fuerza actuara sobre los conductores comprimiría los aislamientos de éstos sobre los dientes, lo que sería perjudicial para la vida de los aislantes [2]).



**Figura 2.2** Determinación del sentido de la fuerza en un conductor situado dentro de una ranura

**Fuente:** <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono1.htm>

El momento total de estas fuerzas origina el par de rotación de las máquinas, que obliga a girar al rotor siguiendo el movimiento de campo magnético giratorio, de tal forma que cuanto más se aproxima a la velocidad  $n_s$  del campo, tanto menor resulta la f.e.m. inducida en los conductores del rotor y, en consecuencia, resultan también reducidas las corrientes en el mismo, provocando esto una disminución del par interno o par electromagnético del motor. Si como caso límite, el rotor girase a la velocidad de sincronismo  $n_s$  no habría entonces movimiento del campo giratorio respecto del rotor, desapareciendo con ello la f.e.m. inducida y como consecuencia de esto se anularía la corriente y el par. De este modo la velocidad de

sincronismo  $n_s$  constituye el límite teórico al que puede girar el rotor. El rotor debe girar a una velocidad inferior a la de sincronismo ( $n < n_s$ ), es decir, su velocidad de régimen es asíncrona. [2]

De aquí la importancia del deslizamiento, cuya expresión se encuentra en la ecuación 2.4, este parámetro normalmente se expresa en forma de porcentaje, así pues un deslizamiento del 4%, por ejemplo, correspondería a una velocidad de giro que fuese el 96% de la de sincronismo. [1]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.4)$$

#### 2.2.1.2. MÁQUINAS SÍNCRONAS.

La máquina síncrona, es un particular tipo de máquina eléctrica rotativa que tiene velocidad de rotación rígidamente relacionada a la frecuencia de la red de corriente alterna con la cual trabaja.

Por otra parte, la máquina síncrona está sometida al principio de reciprocidad electromagnética pudiendo funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor. [2]

##### ❖ ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

En lo referente a su construcción, salvo en raras excepciones el devanado inducido de las máquinas síncronas, está ubicado en el estator mientras que el inductor lo está en el rotor. El devanado inductor se excita con corriente continua que llega hasta él a través de contactos o escobillas de carbón apoyadas sobre anillos rozantes. Esta disposición de los dos devanados viene impuesta generalmente por razones prácticas de construcción: es preferible que el devanado inductor, de menor potencia, esté situado en el rotor. [5]

Otro aspecto a considerar dentro de estas máquinas es la diferencia constructiva del rotor en sus dos formas básicas mostradas en la figura 2.3. A este respecto se puede decir que la elección entre ambos tipos viene impuesta por la velocidad de rotación de la máquina, la cual

depende del sistema mecánico de accionamiento, pues, en las máquinas lentas o de múltiples pares de polos se utiliza la disposición de rotor de polos salientes. En cambio, en las máquinas que giran a gran velocidad, y que están en consecuencia sometidas a fuertes fuerzas centrífugas, la presión que ejercen los devanados inductores sobre las cabezas de los polos, puede llegar a ser intolerable, razón por la cual, en las máquinas sometidas a grandes sollicitaciones se utilizan rotores “lisos”, en los que el campo inductor se consigue disponiendo un devanado en ranuras insertadas en la periferia del rotor.

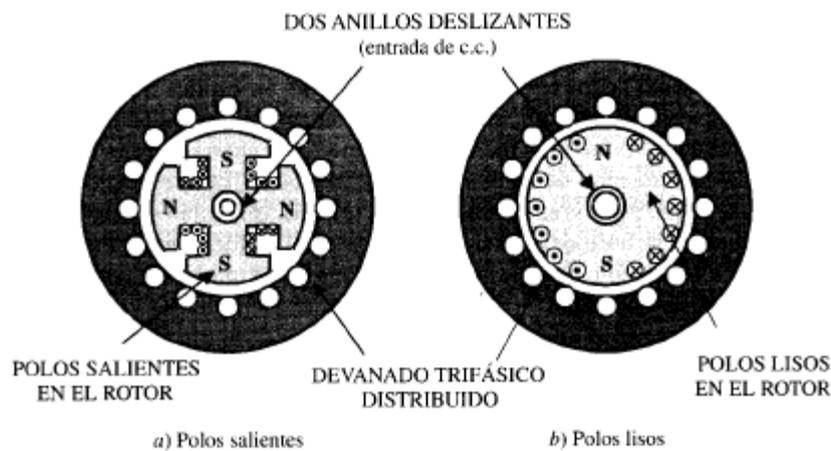


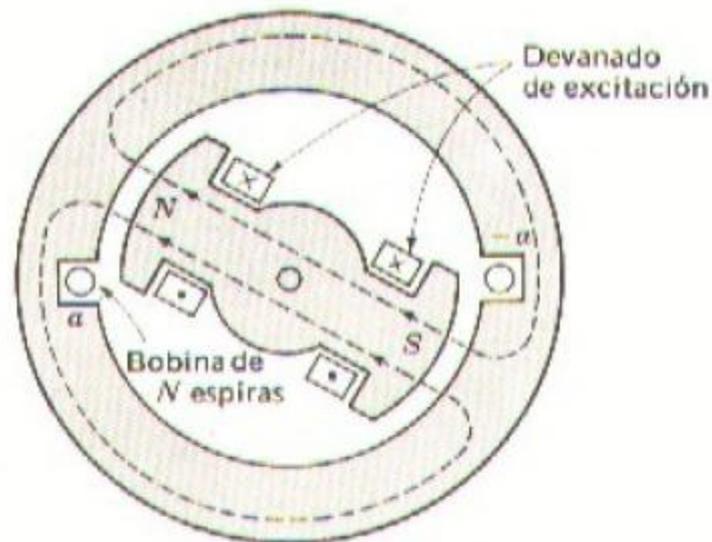
Figura 2.3 tipos constructivos de máquinas síncronas.

Fuente: FRAILE, J. (2003).

## ❖ PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

Básicamente, se trata de conseguir un acoplamiento magnético entre los campos del rotor y el estator, para ello, se hace girar el rotor con movimiento uniforme en virtud de una potencia mecánica aplicada a su eje. Al girar el rotor, la onda de flujo, como se muestra en la figura 2.4, barre los laterales a y  $-a$  de la bobina induciéndose en ella una tensión que es función del tiempo y que tiene la misma forma que la distribución espacial de B. La tensión inducida pasa por un ciclo completo de valores por cada revolución de la máquina de una máquina de dos polos, su frecuencia en ciclos por segundos (herz) es igual a la velocidad del rotor en

revoluciones por segundo, es decir, que la frecuencia eléctrica está sincronizada con la velocidad mecánica, razón por la cual estas máquinas se denominan síncronas. [5]



*Figura 2.4 Máquina síncrona elemental.*

*Fuente: Fitzgerald, A. (1975).*

Dicho sea de paso, si estando funcionando en vacío, con una determinada corriente de excitación, se cierra el circuito del inducido, conectando una impedancia de carga a sus terminales, se obtiene una variación de tensión en terminales respecto de la existía en vacío. Dicha variación en la tensión en terminales es debida a la aparición de una corriente en el inducido que provoca una caída de tensión en este circuito a la par que produce una f.e.m. que reacciona con el inductor modificando el flujo en el entrehierro de la máquina. La caída de tensión en el circuito del inducido se debe a la impedancia que presentan los arrollamientos de este devanado. Por una parte, existe la resistencia  $R$  del bobinado, que provoca una caída de tensión muy pequeña, por lo que en la mayoría de los casos se puede despreciar. Por otra parte, se debe considerar también la reactancia del inducido, que se debe al flujo de dispersión del estator que no interacciona con el flujo del rotor, en esta reactancia tiene lugar la caída de tensión inductiva de la máquina síncrona. [2]

En función a lo anteriormente expuesto, es necesario analizar el efecto que provoca la f.m.m. del inducido sobre la f.m.m. del inductor, modificando el flujo del entrehierro de la máquina. Este fenómeno se conoce con el nombre de reacción del inducido y sobre él tiene influencia tanto la magnitud como la fase de la corriente del estator.

### 2.2.1.3. MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.

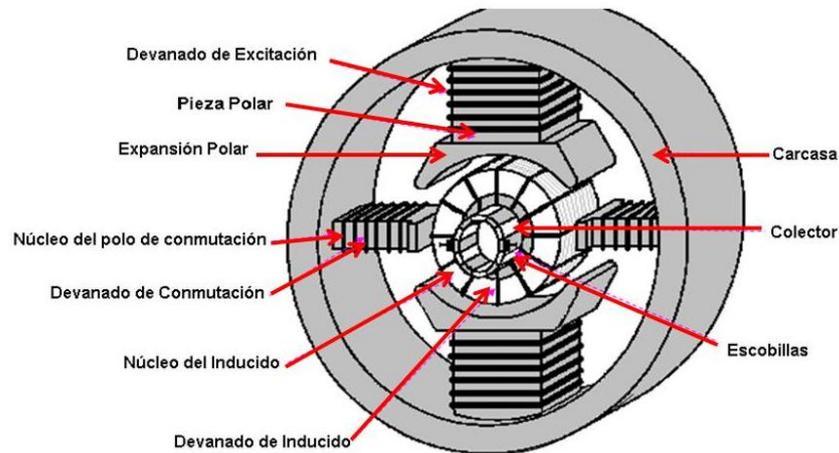
Durante muchos años, las máquinas de corriente continua, en particular los motores, fueron utilizadas en un gran número de instalaciones industriales debido a la simplicidad con la que se podía controlar su velocidad. Sin embargo, este tipo de motor presenta el inconveniente de su complejidad constructiva y su mayor fragilidad, ocasionadas ambas por la presencia del colector y las escobillas. Por este motivo, conforme la electrónica de potencia ha ido avanzando y el control de los motores asíncronos se ha facilitado, este tipo de máquina ha ido cayendo en desuso. [1]

#### ❖ ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.

La máquina de corriente continua consta básicamente de las partes siguientes:

- a. **Inductor:** Es la parte de la máquina destinada a producir un campo magnético, necesario para que se produzcan las tensiones inducidas, que se desarrollan en el inducido. Este consta de las partes siguientes:
  - **Pieza polar:** Es la parte del circuito magnético situada entre la carcasa y el entrehierro, incluyendo el núcleo y la expansión polar.
    - *Núcleo:* Es la parte del circuito magnético rodeada por el devanado inductor.
    - *Devanado inductor:* es el conjunto de espiras destinado a producir el flujo magnético, al ser recorrido por la corriente eléctrica.

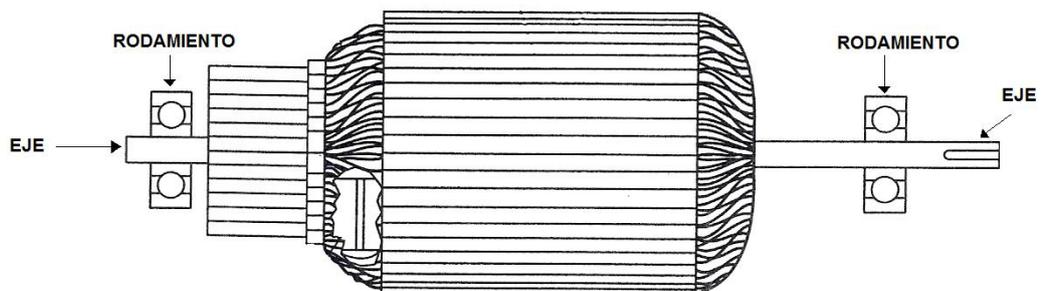
- *Expansión polar:* es la parte de la pieza polar próxima al inducido y que bordea al entrehierro.
  - **Polo auxiliar o de conmutación:** Es un polo magnético suplementario, provisto o no, de devanados y destinado a mejorar la conmutación. Suelen emplearse en las máquinas de mediana y gran potencia.
  - **Carcasa:** Es una pieza de material ferromagnético, no rodeada por devanados, y destinada a unir los polos de la máquina.
- b. **Inducido:** Es la parte giratoria de la máquina, también llamado rotor y consta de las siguientes partes:
- **Devanado inducido:** es el devanado conectado al circuito exterior de la máquina y en el que tiene lugar la conversión principal de la energía
  - **Colector:** es el conjunto de láminas conductoras (delgas), aisladas unas de otras, pero conectadas a las secciones de corriente continua del devanado y sobre las cuales frotan las escobillas.
  - **Núcleo del inducido:** Es una pieza cilíndrica montada sobre el cuerpo fijado al eje, formada por núcleo de chapas magnéticas. Las chapas disponen de unas ranuras para alojar el devanado inducido.
- c. **Escobillas:** Son piezas conductoras destinadas a asegurar, por contacto deslizante, la conexión eléctrica de un órgano móvil con un órgano fijo.
- d. **Entrehierro:** Es el espacio comprendido entre las expansiones polares y el inducido; suele ser normalmente de 1 a 3 mm, lo imprescindible para evitar el rozamiento entre la parte fija y la móvil.



*Figura 2.5 Partes del motor DC.*

*Fuente:* <http://informeselectricos.blogspot.com/2008/12/informe-motores-cc-y-ca.html>.

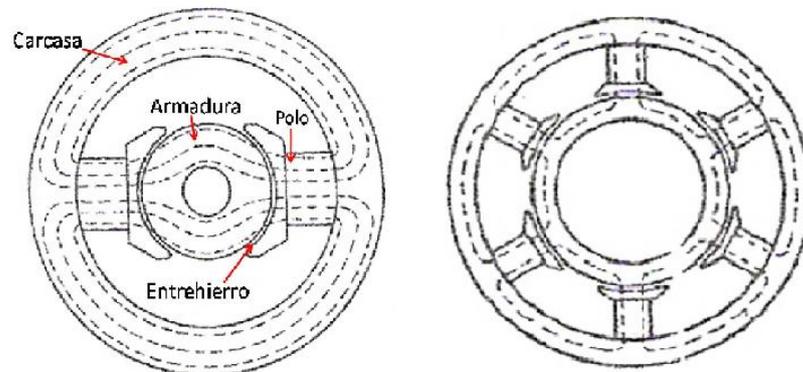
- e. **Rodamientos:** Son las piezas que sirven de apoyo y fijación del eje del inducido. Siendo estos los elementos que permiten el libre movimiento giratorio del eje del motor durante su funcionamiento. En la figura 2.6 se muestra el apoyo del eje en el rodamiento.



*Figura 2.6 Apoyo del eje en el rodamiento.*

*Fuente:* <http://www.rodamientos.com.co/pgs/productos9.html>.

Según Nelson Laya (2004), en las máquinas de corriente de continua, el flujo de excitación se cierra a través de los siguientes elementos: carcasa, polos, entrehierros y núcleo del rotor. En la figura 2.7 se muestra el circuito magnético de una máquina DC.



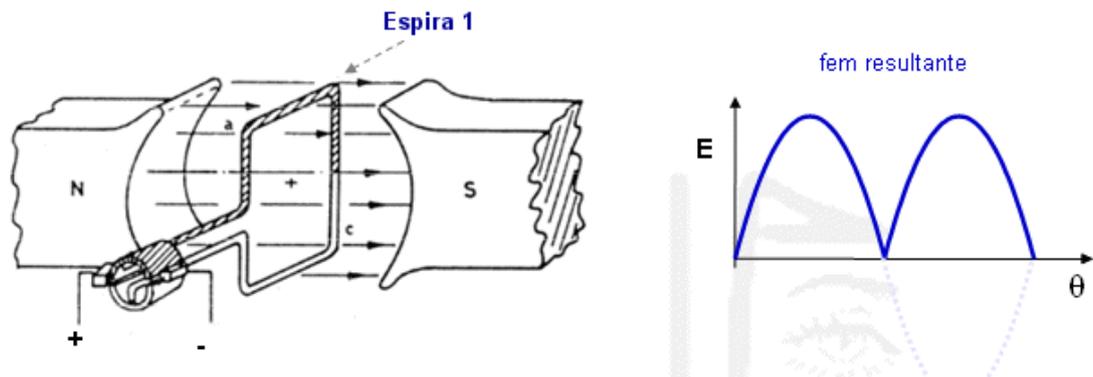
**Figura 2.7** Circuito magnético de una máquina de corriente continua.

*Fuente:* <http://endrino.pntic.mec.es/rpel0016/Bobinados.htm>

### ❖ PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.

Las máquinas de corriente continua, como las demás máquinas eléctricas rotativas, basan su funcionamiento en las leyes fundamentales del electromagnetismo. Sin embargo, puesto que la máquina de continua suministra tensiones constantes cuando trabaja como generador y es alimentada con valores continuos de tensión cuando funciona como motor, presentará ciertas peculiaridades que se pueden comprender fácilmente a partir de un modelo elemental de máquina. [1]

En la figura 2.8 se representa una máquina de continua elemental que consta de una espira sumergida en un campo magnético constante, generado mediante imanes permanentes. Para poder extraer datos sobre lo que se sucede en un cuerpo giratorio como es la espira, se utilizarán un par de anillos rozantes en combinación con un juego de escobillas. [1]



**Figura 2.8** Máquina de Corriente Continua Elemental.

**Fuente:** <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/dinamo.htm>

Si una fuerza mecánica externa hace que la espira gire dentro del campo, aparecerá una tensión en sus terminales que podrá ser registrada por un aparato de medida. Esta tensión será senoidal, siempre y cuando la velocidad de giro se mantenga constante. Este es el principio de funcionamiento de la máquina de corriente continua como generador. [1]

Si por el contrario, se consigue que una corriente variable recorra la espira, sobre ella aparecerá una fuerza que dará lugar a un par de giro. Para que este par sea constante, y de lugar a una velocidad de giro constante, es necesario que la corriente introducida sea de carácter senoidal. Este es el principio de funcionamiento de la máquina de corriente continua como motor. [1]

Para el modo de funcionamiento como generador, la tensión alterna pasará a corriente continua en los bornes externos; y en el de funcionamiento como motor, la tensión continua de alimentación pasará a ser alterna en el interior de la máquina. En ambos casos, la función anterior la desempeña un elemento que se denomina colector. Este dispositivo, es la parte mas característica de las máquinas de continua, y también la que genera el mayor número de problemas para su mantenimiento, ya que se trata de un conjunto de delgas sobre las que se deslizan un par de escobillas de grafito. [1]

### 2.2.2. TRANSFORMADORES.

Se denomina transformador a una máquina eléctrica que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal, esto es, sin pérdidas, es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de hierro dulce o hierro silicio. Las bobinas o devanados se denominan *primarios* y *secundarios* según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente. También existen transformadores con más devanados; en este caso, puede existir un devanado "terciario", de menor tensión que el secundario.

#### ❖ PRINCIPALES ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS TRANSFORMADORES.

El transformador consta de las siguientes partes principales:

##### a) Núcleo

Se denomina núcleo del transformador al sistema que forma su circuito magnético, que está constituido por chapas de acero al silicio, modernamente laminadas en frío (grano orientado), que han sido sometidas a un tratamiento químico especial denominado comercialmente *Carlite*, que las recubre de una capa aislante muy delgada (0.01mm), lo que reduce considerablemente las pérdidas en el hierro. [2]

El circuito magnético está compuesto por las **columnas**, que son las partes donde se montan los devanados, y las **culatas**, que son las partes que realizan la unión entre las columnas. Los espacios entre las columnas y las culatas, por los cuales pasan los devanados, se llaman ventanas del núcleo, según sea la posición relativa entre el núcleo y los devanados, los transformadores se clasifican en ACORAZADOS, en los que los devanados están en su

mayor parte abrazados o acorazados por el núcleo magnético, y de COLUMNAS, en los que son los devanados los que rodean casi por completo el núcleo magnético. [2]

### b) Devanados

Constituyen el circuito eléctrico del transformador; se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos (para diámetros inferiores a 4mm) o de sección rectangular (pletinas de cobre) cuando se requieren secciones mayores. Los conductores están recubiertos por una capa aislante, que suele ser de barniz en los pequeños transformadores y que en el caso de pletinas está formada por una o varias capas de fibra de algodón o cinta de papel. Según sea la disposición relativa entre los arrollamientos de A.T. y B.T., los devanados pueden ser **concéntricos** o **alternados**. En los devanados concéntricos los devanados tienen forma de cilindro coaxiales, generalmente se coloca más cerca de la columna el arrollamiento de B.T., ya que es el más fácil de aislar que el devanado de A.T., y entre ambos bobinados se intercala un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado. En los devanados alternados los arrollamientos se subdividen en secciones o galletas de tal forma que la parte de los devanados de A.T. y B.T. se suceden alternativamente a lo largo de la columna. Para disminuir el flujo de dispersión, es frecuente que en cada extremo se coloque media bobina, que por razones obvias de aislamiento pertenecen al arrollamiento de B.T. [2]

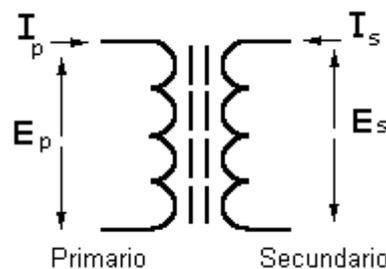
### c) Sistemas de refrigeración

En un transformador, como en cualquier otro tipo de máquina eléctrica, existen una serie de pérdidas que se transforman en calor y que contribuyen al calentamiento de la máquina. Para evitar que se consigan altas temperaturas que puedan afectar la vida de los aislamientos de los devanados es preciso dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado. Para potencias pequeñas, la superficie externa de la máquina es suficiente para lograr la evacuación de calor necesaria, lo que da lugar a los llamados transformadores en seco. Para potencias elevadas se emplea como medio refrigerante el aceite, resultando los transformadores en baño de aceite. El aceite tiene una doble misión de refrigerante y aislante, ya que posee una

capacidad térmica y una rigidez dieléctrica superior a la del aire. En estos transformadores la parte activa se introduce en una cuba de aceite mineral, cuyo aspecto externo puede tener forma plana, ondulada, con tubos o con radiadores adosados, realizándose la eliminación del calor por radiación y convección natural. El aceite mineral procede de un subproducto de la destilación fraccionada del petróleo y con el tiempo puede experimentar un proceso de envejecimiento, lo que indica que se oxida y polimeriza formando lodos, proceso que es activado por la temperatura, la humedad y el contacto con el oxígeno del aire; con ello, el aceite presenta una disminución de sus propiedades refrigerantes y aislantes. Para atenuar este efecto suelen añadirse al aceite productos químicos inhibidores, y también se dota a la cuba de un depósito de expansión o conservador colocado en la parte alta del transformador. [2]

#### ❖ FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES.

Si se aplica una fuerza electromotriz alterna en el devanado primario, las variaciones de intensidad y sentido de la corriente alterna crearán un campo magnético variable dependiendo de la frecuencia de la corriente. Este campo magnético variable originará, por inducción electromagnética, la aparición de una fuerza electromotriz en los extremos del devanado secundario. La relación entre la fuerza electromotriz *inductora* ( $E_p$ ), la aplicada al devanado primario y la fuerza electromotriz *inducida* ( $E_s$ ), la obtenida en el secundario, es directamente proporcional al número de espiras de los devanados primario ( $N_p$ ) y secundario ( $N_s$ ), tal como se indica en la ecuación 2.5 . [4]



**Figura 2.9** Representación esquemática del transformador.

**Fuente:** <http://patentados.com/invento/transformador-con-dispositivo-de-proteccion.html>

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.5)$$

La **razón de transformación (m)** del voltaje entre el bobinado primario y el secundario depende de los números de vueltas que tenga cada uno. Si el número de vueltas del secundario es el triple del primario, en el secundario habrá el triple de tensión [4]. Esta relación se muestra en la ecuación 2.6.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = m \quad (2.6)$$

Esta particularidad se utiliza en la red de transporte de energía eléctrica: al poder efectuar el transporte a altas tensiones y pequeñas intensidades, se disminuyen las pérdidas por el efecto Joule y se minimiza el costo de los conductores. [4]

Así, si el número de espiras (vueltas) del secundario es 100 veces mayor que el del primario, al aplicar una tensión alterna de 230 voltios en el primario, se obtienen 23.000 voltios en el secundario (una relación 100 veces superior, como lo es la relación de espiras). A la relación entre el número de vueltas o espiras del primario y las del secundario se le llama *relación de vueltas* del transformador o *relación de transformación*. Ahora bien, como la potencia aplicada en el primario, en caso de un transformador ideal, debe ser igual a la obtenida en el secundario, el producto de la fuerza electromotriz por la intensidad (potencia) debe ser constante, con lo que en el caso del ejemplo, si la intensidad circulante por el primario es de 10 amperios, la del secundario será de solo 0,1 amperios (una centésima parte). [4]

### 2.2.3. MANTENIMIENTO

Las operaciones de mantenimiento tienen lugar frente a la constante amenaza que implica la ocurrencia de una falla o error en un sistema, maquinaria, o equipo. Las máquinas eléctricas rotativas, y en particular los motores de inducción, son elementos primordiales en los

procesos productivos industriales y en este caso en el laboratorio de máquinas eléctricas de la facultad de ingeniería. El buen funcionamiento de los mismos es indispensable para poder asegurar una producción continua de calidad y que garantice la seguridad de los trabajadores en la industria. El aumento de competitividad a nivel internacional, y las exigencias de calidad, han motivado que las empresas destinen cada vez mayores recursos, tanto humanos como de material a sus planes de mantenimiento de equipos e instalaciones, donde los motores de inducción son pieza clave. [3]

Las estrategias a seguir a la hora de implementar un plan de mantenimiento se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- **Mantenimiento correctivo**

El mantenimiento correctivo se basa en la intervención en el caso de avería, manifestada como el colapso de un equipo o instalación, es decir, la interrupción súbita de la producción. [1]

Este mantenimiento trae consigo las siguientes consecuencias:

- Paradas no previstas en el proceso productivo, disminuyendo las horas operativas.
- Afecta las cadenas productivas, es decir, que los ciclos productivos posteriores se verán parados a la espera de la corrección de la etapa anterior.
- Presenta costos por reparación y repuestos no presupuestados, por lo que se dará el caso que por falta de recursos económicos no se podrán comprar los repuestos en el momento deseado
- La planificación del tiempo que estará el sistema fuera de operación no es predecible.

- **Mantenimiento preventivo**

En este caso la sustitución de las piezas o partes del sistema que pudieran causar averías se realiza con una cierta periodicidad, determinada mediante criterios estadísticos. Así la

sustitución de un determinado elemento puede realizarse después de un cierto tiempo preprogramado, o al producirse una avería, si esta ocurre antes. [1]

Presenta las siguientes características:

- Se realiza en un momento en que no se está produciendo, por lo que se aprovecha las horas ociosas de la planta.
- Se lleva a cabo un programa previamente elaborado donde se detalla el procedimiento a seguir, y las actividades a realizar, a fin de tener las herramientas y repuestos necesarios "a la mano".
- Cuenta con una fecha programada, además de un tiempo de inicio y de terminación preestablecido y aprobado por la directiva de la empresa o institución.
- Está destinado a un área en particular y a ciertos equipos específicamente. Aunque también se puede llevar a cabo un mantenimiento generalizado de todos los componentes de la planta o institución.

- **Mantenimiento predictivo**

Se puede definir como el seguimiento organizado con medición periódica o continua de variables de estado del sistema y su comparación con unos patrones preestablecidos, para la determinación del instante en que se debe producir la intervención de mantenimiento. Por tanto, consiste en subsanar el fallo cuando éste aún se encuentre en estado incipiente [1]. El sustento tecnológico de este mantenimiento consiste en la aplicaciones de algoritmos matemáticos agregados a las operaciones de diagnóstico, que juntos pueden brindar información referente a las condiciones del equipo. [7]

Esta última estrategia, es la de más difícil implementación ya que es necesaria una fuerte inversión inicial en equipos de medida, y formación de técnicos. No obstante es la que proporciona mejores resultados a la industria, puesto que se maximiza el tiempo de vida de los equipos, garantizando la máxima calidad y seguridad del proceso productivo. Como ventaja adicional, del análisis de las medidas realizadas se puede inferir cual fue la causa de la

avería. Esto permite no solo sustituir la pieza defectuosa, sino, que dentro de lo posible, se pueden modificar las condiciones de trabajo de la máquina para evitar la aparición de nuevas averías. [7]

#### **2.2.4. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA**

La forma tradicional de observar una señal es en el dominio del tiempo, en el cual se observan registros de las variaciones de algún parámetro en función del tiempo. A mediados del siglo XIX Jean Baptiste Fourier demostró que cualquier forma de onda periódica se puede generar mediante la suma de infinitas ondas senoidales de diferentes frecuencias. Este procedimiento permite hacer una representación alternativa a la del dominio del tiempo: el dominio de la frecuencia [14].

El hecho de utilizar una forma de representación o la otra depende de los fines que se persigan en el análisis; si se pretende detectar variaciones en la señal de muy pequeña amplitud, es decir, pequeños cambios que puedan aparecer superpuestos a la señal de comportamiento normal, es muy posible que el dominio del tiempo no permita diferenciarlos. Por el contrario un análisis de la señal en el dominio de la frecuencia permite separar las nuevas componentes de la pequeña amplitud que tendrán una frecuencia característica de aquellas de gran amplitud siempre presentes en la señal. Por este motivo, el análisis espectral o análisis en el dominio de la frecuencia es una de las técnicas más empleadas en el diagnóstico de máquinas, circuitos eléctricos, etc., cuando se pretende obtener una buena resolución para la identificación de anomalías que alteren de forma considerable las variables disponibles en el dominio del tiempo [14].

En el caso del mantenimiento predictivo de máquinas eléctricas rotativas, las fallas deben ser detectadas cuando todavía no representen una variación significativa de los parámetros de funcionamiento de la máquina, ya que de no ser así, la falla habría alcanzado dimensiones catastróficas en el momento de su localización, retrocediendo, por tanto, al modelo de mantenimiento correctivo. Por este motivo, el estudio de las variaciones en el dominio del

tiempo no suele servir, siendo las técnicas de estudio más habituales los análisis espectrales de las corrientes de alimentación y de las vibraciones de la máquina [14].

#### **2.2.4.1. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)**

Una Transformada Rápida de Fourier es una operación matemática que extrae la información de la señal en el dominio del tiempo y la transforma en el dominio de la frecuencia. La señal en el dominio de la frecuencia es un gráfico de la amplitud de la señal a una frecuencia dada. En el dominio de la frecuencia, la altura del pico de la señal representa la amplitud de la señal [11].

Antes del desarrollo de la FFT el tiempo necesario para el cálculo de la transformada discreta de Fourier era muy grande, especialmente en el caso de necesitar una elevada resolución, o lo que es lo mismo un elevado número de muestras. Por este motivo se diseñó la FFT, la cual empleando como suposición que el número de muestras  $N$  es múltiplo de 2, permite aplicar ciertas propiedades de simetría que reducen considerablemente el número de operaciones matemáticas a realizar [14].

Efectuar una descripción matemática exhaustiva del algoritmo de la FFT es algo que por su complejidad queda totalmente al margen de los objetivos de este trabajo de grado, motivo por el cual sólo se describirán algunos de los fenómenos más característicos que vienen asociados al cálculo e interpretación [14].

#### **2.2.4.2. ANALIZADORES DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.**

Un analizador de la Transformada Rápida de Fourier, primero digitaliza la señal de entrada, además ejecuta todas las operaciones subsecuentes digitalmente en números. Esto introduce algunos errores, pero realiza el gráfico en el dominio de la frecuencia más rápido [11].

Un analizador de la transformada rápida de Fourier actúa junto a un analizador filtro paralelo con cientos de filtros. Hay por lo menos tres razones para observar en el dominio de la frecuencia. La primera, muestra determinados defectos como picos específicos, esta correlación de picos es crucial para un análisis completo y no es realizado fácilmente en el

dominio del tiempo. Segundo, las mediciones de monitoreo son realizadas de mejor manera en el dominio de la frecuencia, diversas mediciones pueden ser asignadas para un análisis a través de un computador donde se puede almacenar mucha información, haciendo de este uno de los instrumentos predilectos para el personal de mantenimiento. Tercero, se encuentran señales de pequeña amplitud en el dominio de las frecuencias. Resulta una dificultad ver una onda senoidal de pequeña amplitud superpuesta con una onda senoidal de gran amplitud a través de la pantalla de un osciloscopio, por lo cual, en el dominio de la frecuencia esto es mostrado como pequeños picos definidos, lo que trae como ventaja que defectos mecánicos puedan ser rastreados y cuando estos aun son pequeños y en proceso de crecimiento. De esta manera se pueden encontrar defectos de desbalance en motores y ruidos en los rodamientos [11].

Los analizadores de la Transformada de Fourier tienen la capacidad de digitalizar los datos censados. Existen importantes razones del por qué digitalizar los datos, las cuales se nombran a continuación:

- Pueden ser realizadas mediciones más exactas.
- Pueden ser capturados los eventos transitorios.
- Los datos en forma digital, se pueden almacenar para posteriormente manipularlos y analizarlos.

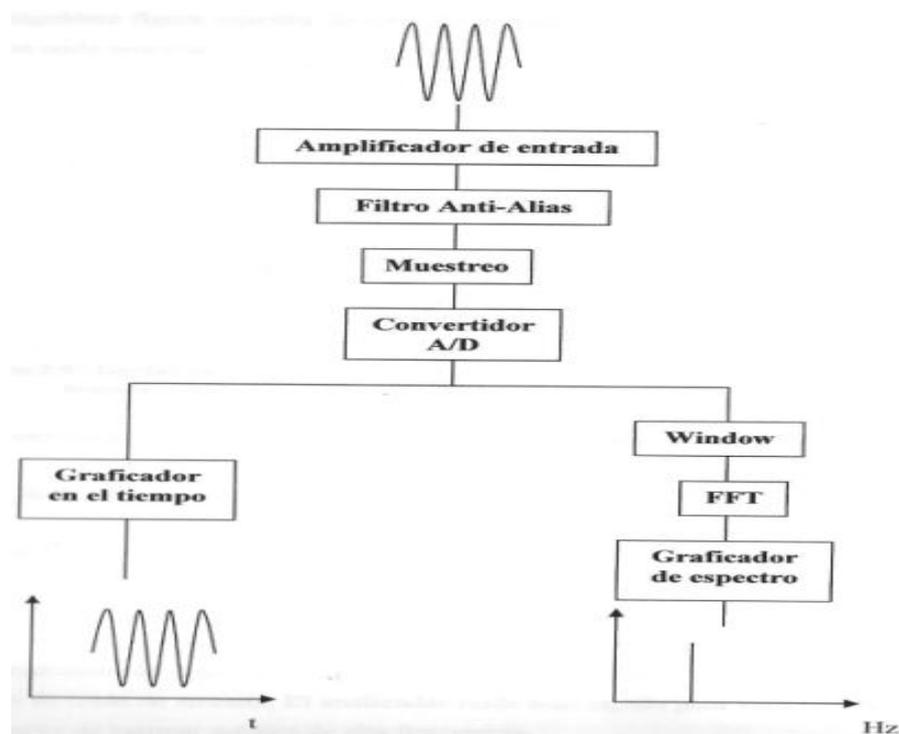
#### **2.2.4.3. ESTRUCTURA DE LOS ANALIZADORES DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER**

En la figura 2.10, se muestra un diagrama de bloques simplificado de un analizador de espectro FFT que indica como una onda de entrada (senoidal en este caso) es amplificada cuando pasa a través de un filtro anti-alias. La respuesta de éste será instantánea. Un bloque temporal es capturado y mantenido mediante un proceso de muestreo. Un convertidor analógico-digital (A/D) digitaliza los datos. En forma digital, los datos pueden ser mostrados como una forma de onda en el tiempo o procesados en un espectro frecuencial. Para completar el proceso una función llamada Window es aplicada para remover errores. Una vez

realizados todos estos pasos, la transformada FFT está completa y los datos resultantes pueden ser desplegados en el dominio de la frecuencia [11].

Los analizadores de espectro no pueden ejecutar la transformación de Fourier de forma continua. Esto es realizado por un computador interno de alta velocidad que ejecuta los cálculos de la transformada por secciones temporales o bloques temporales. Este es el propósito de la sección de muestreo del analizador de espectro. La sección de muestreo mantiene la forma de onda amplificada y filtrada en una memoria temporal mientras las lecturas de voltajes son tomadas, las cuales son convertidas de una forma de onda a una tabla de números [11].

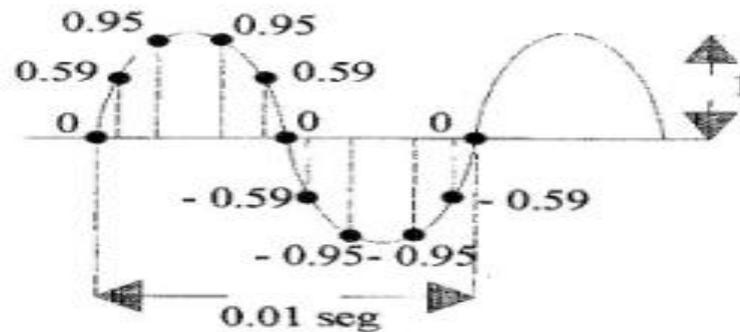
Cuando se completa la digitalización de una forma de onda en un bloque temporal, se almacena en la memoria de un computador en una tabla de números que contiene información tanto de la amplitud como de fase. Esto es necesario porque la transformada de Fourier es un proceso matemático digital que opera con números.



**Figura 2.10.** Diagrama de bloques simplificado de un analizador de espectro.

**Fuente:** Peraza V. y Matos J [11].

La figura 2.11 muestra un ejemplo del proceso de muestreo y digitalización para una onda senoidal.



*Figura 2.11. Digitalización de una onda senoidal de 100 Hz. Una lectura de voltaje es tomada cada milésima de segundo o cada 10 mediciones por ciclo.*

*Fuente: Peraza V. y Matos J [11].*

## 2.2.5. FALLAS MÁS COMUNES EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

### 2.2.5.1. FALLAS EN LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.

#### ❖ Falla en los rodamientos

El rodamiento es un órgano de base que asegura un enlace móvil entre dos elementos de un mecanismo, uno en rotación con respecto al otro. Los rodamientos tienen como función la fijación del eje a la parte fija del motor. Es necesario que esta fijación sea lo más precisa posible ya que así se evita daños o percances en el entrehierro.

Las principales causas de fallas en los rodamientos son las que se mencionan a continuación:

#### a) Carga Excesiva

Este tipo de falla se presenta cuando el rodamiento tiene que soportar una carga en exceso. Normalmente los fabricantes dan valores de carga permisibles que pueden soportar los rodamientos. [3]

b) Desgaste por lubricación deficiente o excesiva

En condiciones normales de instalación no debería haber desgaste. Sin embargo el desgaste puede hacer su aparición, si partículas extrañas ingresan dentro del rodamiento, o cuando la lubricación es inadecuada. [3]

b.1) Desgaste ocasionado por partículas abrasivas

Ocurre cuando pequeñas partículas abrasivas, tal como sedimentaciones, o grava entran al rodamiento y causan el desgaste de las pistas de rodaduras, de los elementos rodantes y de la jaula de retención. La cantidad de partículas abrasivas gradualmente se incrementa a medida que el material se desgasta especialmente hasta que hace al rodamiento inservible. Las partículas pudieron haber entrado al rodamiento a causa de un deficiente sellado de recinto. [3]

b.2) Desgaste ocasionado por lubricación inadecuada

Si no existe suficiente lubricación, o si el lubricante ha perdido sus propiedades de lubricación, es imposible que se forme la delgada película de aceite. El contacto metálico entre superficies tiene lugar entre los elementos rodantes y las pistas de rodadura. Si el lubricante está completamente agotado, la temperatura se incrementa rápidamente, y las superficies tomarán matices azulados y marrones. Por lo que se debe revisar que el lubricante sea suficiente para el tipo de rodamiento. [3]

c) Exposición a vibración mientras el rodamiento no se encuentra rodando

Este tipo de deformaciones aparece en la literatura técnica inglesa con el nombre de endurecimiento en frío que consiste en una deformación permanente de las superficies sustentadoras de carga donde los elementos del rodamiento entran en contacto con la pista de rodadura. Puede ser originado por utilizar un martillo al instalar el rodamiento, dejarlo caer, ejercer presión sobre un eje al aplicar una fuerza excesiva a la parte fija del rodamiento (Anillo exterior). [3]

El endurecimiento en frío también ocurre cuando el rodamiento no está operando especialmente durante largos periodos de inactividad, de manera que no se puede formar la

capa delgada de aceite que separa a los caminos de rodaduras con los elementos rodantes. De esta manera ocurre un contacto metálico entre estas superficies, y ocurre un movimiento relativo entre los elementos rodantes y los anillos del rodamiento. Como resultado de estos movimientos, pequeñas partículas se desprenden de las superficies y originan marcas en el camino de rodaduras en cada sitio donde se encuentra una bola o un rodillo. [3]

d) Contaminación externa

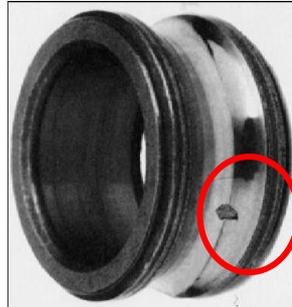
Es una de las principales causas de fallas prematuras en los rodamientos. Los síntomas más comunes de contaminación son abolladuras, o ralladuras en el camino de rodadura, resultando una vibración indebida en el rodamiento y desgaste. La principal fuente de suciedad proviene de herramientas sucias, áreas muy sucias, manos sucias y materiales extraños en lubricantes y soluciones limpiadoras. Otra fuente de contaminación externa es el agua o agentes corrosivos que alcanzan el interior del rodamiento, en tales cantidades que el mismo no puede proveer protección a las superficies de acero. [3]

e) Instalación incorrecta

Cuando se instala un rodamiento incorrectamente con un martillo, este golpea directamente los anillos, causando delgadas grietas, provocando un debilitamiento en los materiales, y llegando a romperse cuando el rodamiento entra en servicio. Sucede lo mismo cuando los rodamientos están calientes y luego son montados en ejes manufacturados a las tolerancias inadecuadas. [3]

f) Fatiga

Los materiales se “fatigan” con el uso. El tiempo que transcurre hasta la aparición de los primeros síntomas de fatiga, dependerá del número de revoluciones, la magnitud de la carga, la lubricación y la limpieza del lubricante. El conjunto de las presiones cíclicas provoca un deterioro del metal por fatiga que se inicia, en general, en un punto del interior del material pero próximo a la superficie (lugar donde los esfuerzos de cortadura son máximos) bajo la forma de una fisura que se propaga hacia la superficie. [3] Un ejemplo de una fisura en la pista de rodamiento se muestra en la figura 2.12.



*Figura 2.12 Fisura en pista de rodamiento.*

*Fuente: Ordoñez J., Gonzales J. (2007).*

A medida que las bolas o rodillos van pasando por las fisuras, se va desprendiendo material y originan lo que se conoce como exfoliación. El lubricante va arrastrando esas partículas, apareciendo nuevos daños en otros sectores. Podemos notar estos síntomas por el aumento del ruido y las vibraciones. Este es el momento justo para cambiar el rodamiento, antes que se produzca la falla total, con riesgo de rotura de otros elementos. [3]

#### ❖ **Criterio de detección de Falla en los rodamientos**

El análisis espectral de las corrientes permite la detección de fallas que pueden ocasionar excentricidades en el motor (como las fallas en los rodamientos), ya que cuando estas ocurren, se producen variaciones en la longitud del entrehierro, que se reflejan en cambios de reluctancia en el circuito magnético, estos cambios de reluctancia afectan inmediatamente la densidad de campo magnético en el entrehierro, por tanto, en las tensiones inducidas en los conductores aparecen armónicos que igualmente se reflejarán en las corrientes. [3]

Básicamente el método requiere obtener la corriente mediante un transductor y luego obtener su espectro en frecuencias, que podría ser mediante la transformada rápida de Fourier. La obtención de las frecuencias ocasionadas por las fallas, donde se reflejarán las variaciones en la magnitud de los armónicos requiere de un análisis minucioso y la conformación de criterios mediante pruebas y ensayos.

El movimiento radial del eje del motor debido a las excentricidades ocasionadas por las fallas en los rodamientos resulta en frecuencias adicionales en la corriente del estator, estas frecuencias son:

$$\text{Falla en pista exterior:} \quad f_{FPE} = n_f \pm k f_e \quad (2.7)$$

$$\text{Falla en pista interior:} \quad f_{FPI} = n_f \pm f_r \pm k f_i \quad (2.8)$$

$$\text{Falla en bola:} \quad f_{FB} = n_f \pm f_j \pm k f_b \quad (2.9)$$

$n_f$  : Frecuencia de los armónicos provenientes de la interacción entre las corrientes de excitación y armadura.

$k$  : 1, 2, 3, ...etc.

$f_e$ : Frecuencia de paso de la bola por la pista exterior (Hz).

$f_j$ : Frecuencia fundamental de la jaula (Hz).

$f_i$ : Frecuencia de paso de la bola por la pista interior (Hz).

$f_b$ : Frecuencia de bolas (Hz).

$f_r$ : Frecuencia fundamental del eje (Hz).

### 2.2.5.2. FALLAS EN LAS MÁQUINAS ASINCRONAS

Las máquinas asíncronas debido a sus características son las más robustas y, por tanto, las que menor mantenimiento precisan de todas las máquinas rotativas. Sin embargo debido a su uso generalizado en todo tipo de plantas industriales, su aplicación en procesos críticos para la producción, y el hecho de que algunas de las averías que pueden padecer son destructivas para el conjunto de la máquina, el conocimiento de su estado interno se ha convertido en una necesidad si se desea alargar su vida útil y evitar paradas intempestivas. [1]

Puesto que el uso de la máquina asíncrona como generador, salvo en casos excepcionales, suele corresponder aplicaciones muy específicas donde la potencia requerida no es muy elevada, se hará referencia únicamente al diagnóstico de fallas en motores de inducción. A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que todos los procedimientos de diagnóstico relacionados con el sistema aislante de la máquina son comunes a motores y generadores. [1]

En un motor asíncrono las averías más frecuentes son:

❖ **Falla en los cojinetes.**

Los cojinetes son uno de los componentes más importantes y críticos de las máquinas eléctricas, sobre los cuales recae la responsabilidad de gran parte del funcionamiento correcto del motor. Los cojinetes en general tienen como finalidad servir de apoyo a los ejes que giran en el espacio, para que estos puedan rotar libremente y soportar las cargas que actúan sobre el eje.

A continuación se nombran algunas de las fallas más comunes:

- ✓ Falla por fatiga.
- ✓ Falla por la rotura de los elementos rodantes o pistas
- ✓ Falla por desgaste de los elementos rodantes o pistas
- ✓ Falla por agentes contaminantes

❖ **Criterio de detección de falla en los cojinetes.**

Las variaciones en el entrehierro de la máquina son causadas por el movimiento entre el rotor y el estator como por ejemplo, daño en cojinetes [11]. En este caso se produce variaciones en la permeancia del entrehierro que ocasionan componentes espectrales en las corrientes del estator a frecuencias descritas por la ecuación 2.34.

$$f_{bng} = f_e \pm k \cdot f_v \quad (2.10)$$

Donde:

$k = 1, 2, 3 \dots$  (Número de armónicos de las componentes de frecuencias características).

$f_v$ : Para cada tipo de defecto: daños en pista externa, pista interna y bolas.

La frecuencia de giro de la bola está determinada por la rotación de cada bola sobre su propio centro. Dado un defecto sobre una bola hará contacto tanto con la pista externa como con la pista interna durante cada revolución, la frecuencia característica del defecto en una bola será el doble de la frecuencia de giro. Las frecuencias características de defecto en pista interna y pista externa son determinadas por el paso de cada bola sobre el defecto. Esto ocurre “n” veces durante cada vuelta sobre la pista [11].

Para el cálculo de las frecuencias características de los componentes de los rodamientos en el motor se emplean las ecuaciones: 2.11, 2.12, 2.13 y 2.14 que describen el movimiento del cojinete.

$$f_j = \frac{1}{D_j} \cdot \left( f_r \cdot \left( \frac{D_j - D_b \cdot \cos \theta}{2} \right) \right) \quad (2.11)$$

$$f_e = \frac{N_b}{2} \cdot \left( f_r \cdot \left( 1 - \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_j} \right) \right) \quad (2.12)$$

$$f_i = \frac{N_b}{2} \cdot \left( f_r \cdot \left( 1 + \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_j} \right) \right) \quad (2.13)$$

$$f_b = \frac{D_j}{2D_b} \cdot \left( f_r \cdot \left( 1 - \left( \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_j} \right)^2 \right) \right) \quad (2.14)$$

Donde:

$f_j$  : Frecuencia de la jaula de rodamiento.

$f_e$  : Frecuencia de paso de la bola por la pista externa.

$f_b$  : Frecuencia de bola.

$f_r$  : Frecuencia del rotor.

$D_j$  : Diámetro de la jaula del rodamiento.

$D_b$  : Diámetro de la bola.

$N_b$  : Numero de bolas.

❖ **Falla en barras y anillos del rotor.**

Las fallas en las barras y anillos del rotor están representadas por las barras rotas, cuarteadas o corroídas [12]. Estas fallas son causadas por la combinación de una serie de factores tales como:

*Electromagnéticos*: causada por las fuerzas electromagnéticas y los esfuerzos magnéticos entre las barras. [12]

*Térmicos*: causados por las altas temperaturas debido al paso de la corriente. [12]

*Dinámicos*: causados por la fuerza centrífuga en los regímenes transitorios. [12]

*Residuales*: causados por la impureza de los materiales utilizados. [12]

*Mecánicos*: causados por el desgaste de piezas. [12]

Las causas por las cuales las barras y anillos de las jaulas de los rotores se agrietan o se desquebrajan se explican a continuación:

La asimetría en la jaula rotórica de un motor de inducción suele estar relacionada con las altas temperaturas alcanzadas en el rotor y con las elevadas fuerzas centrífugas que soportan tanto barras como anillos, especialmente durante los regímenes de funcionamiento transitorio. [12]

La fractura suele iniciarse en los puntos de la barra que no están soportados por el cuerpo del rotor, es decir en las proximidades de la unión con el anillo de cortocircuito o en éste mismo ya que, además, en dicha zona es donde suelen acumularse las mayores tensiones mecánicas de la estructura. [12]

La falla por fatiga térmica, es la más común en motores de inducción, especialmente en aquellos que trabajen con arranques y paradas frecuentes bajo carga; debido, a que la corriente en el momento del arranque es mucho más alta que la corriente nominal de funcionamiento y

pone una tensión en las barras del rotor, lo que hace que se calienten más. Aquellas barras que presentan mayor resistencia se calientan más provocando una distribución de temperatura desigual alrededor del rotor y una expansión diferencial de las barras, lo que lleva a la rotura y agrietamiento en el lugar donde se unen con los anillos de cortocircuito. [12]

La falla por fatiga térmica también se debe a la aplicación de una sobrecarga en el eje del motor, ya que, al igual que en el arranque el motor requerirá de un mayor consumo de corriente. [12]

#### ❖ Criterio de detección de falla en barras y anillos del rotor.

Mediante el análisis de las corrientes se pueden diagnosticar averías mecánicas y eléctricas, pero se aplica fundamentalmente en la detección de la rotura de barras de la jaula del rotor. La presencia de barras rotas en el rotor, no es motivo de parada inminente, pero provoca una degradación del funcionamiento del motor, y la posible aparición de serios efectos secundarios. Las partes rotas de las barras pueden causar serios daños mecánicos al aislamiento y a los devanados, provocando costosas reparaciones. Es conocido que la presencia de barras rotas en el rotor de un motor de inducción trifásico provoca la aparición de armónicos adicionales en las corrientes de fase del estator [7]. En concreto, entre otras frecuencias, los armónicos aparecen en la ecuación 2.15:

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s)Hz \quad (2.15)$$

Donde  $f_1$  es la frecuencia de alimentación del motor, y  $s$  el deslizamiento. Aunque el motor esté en perfecto estado, estos armónicos están siempre presentes en la corriente de la máquina, debido a las asimetrías del rotor inherentes al proceso de fabricación y ensamblado. Por lo tanto el método consiste más que en detectar la presencia de los armónicos, en monitorizar su amplitud y comparar que no exceda de un cierto umbral en referencia a la componente de la frecuencia de alimentación. El umbral que marca la frontera entre el motor sano y el motor con barras rotas se suele fijar alrededor de los 40 dB's. En las figuras 2.13 y 2.14 se puede observar el espectro frecuencial de las corrientes de una fase del estator de un motor considerado sano (figura 2.13) y del mismo motor con un número considerable de barras rotas (figura 2.14) [IEEE Industry Applications Magazine, July/August 2001] [7].

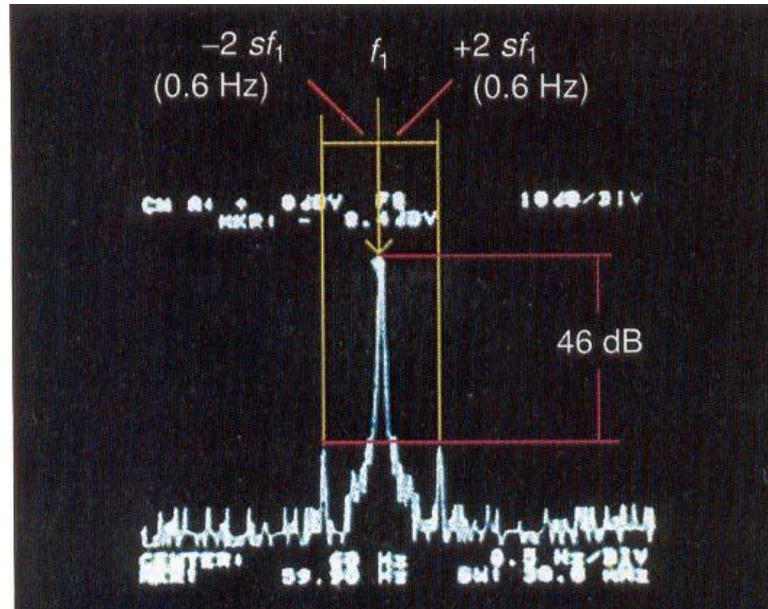


Figura 2.13 Espectro de la corriente de un motor sano.

Fuente: <http://www.jcee.upc.es/JCEE2002/PINYOL.pdf>

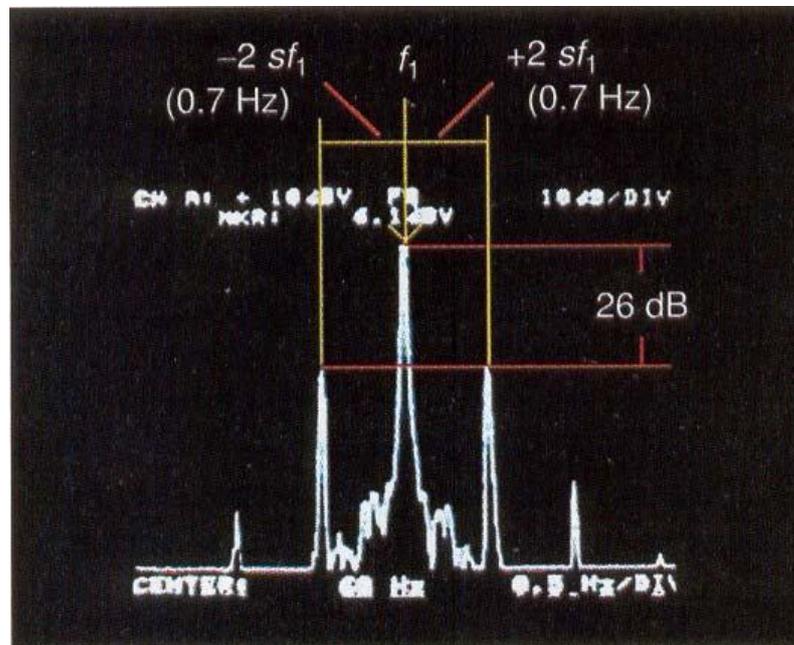


Figura 2.14. Espectro de la corriente de un motor averiado

Fuente: <http://www.jcee.upc.es/JCEE2002/PINYOL.pdf>

Este análisis se emplea con éxito en los casos en los que el par de carga es constante. Sin embargo, en máquinas donde tal par no es constante con el ángulo de rotación surgen dificultades. Tal es el caso en molinos, rotopalas, elevadores de cargas y compresores. En estas situaciones el par de carga es casi periódico con el ángulo de rotación de la carga. Además es habitual conectar el eje del rotor al de la carga mediante un mecanismo reductor. Esto provoca la aparición de nuevos armónicos relacionados con el par no constante y el mecanismo reductor. Tales armónicos suelen solaparse con los armónicos debidos a la presencia de barras rotas, circunstancia que dificulta enormemente el diagnóstico. [7]

❖ **Falla por excentricidad.**

Puesto que los motores de inducción presentan valores extremadamente pequeños para el entrehierro, el hecho de que este pueda presentar excentricidades, puede ocasionar importantes alteraciones, tanto desde el punto de vista eléctrico como el mecánico. [1]

La excentricidad en el entrehierros de las máquinas eléctricas que pueden ocurrir, son la excentricidad estática y la excentricidad dinámica. La excentricidad estática se define como el mínimo entrehierro que posee la máquina en estado estacionario, este puede ser causado por la ovalidad del núcleo del estator o por el incorrecto posicionamiento del rotor o del estator al principio del funcionamiento de la máquina, en donde en la posición del mínimo entrehierro existirá un campo magnético de atracción el cual desviara la posición original del rotor, provocando un aumento de excentricidad en el entrehierro. la excentricidad dinámica está definida como el mínimo entrehierro que se produce durante el proceso de rotación, este puede ser causado por el curvamiento del eje, resonancias mecánicas de velocidades críticas, etc. [13]

❖ **Criterio de detección de falla por excentricidad.**

Las excentricidades producen incrementos en los niveles de vibración tanto en la dirección axial como en la radial. En cuanto al campo, su efecto es también importante, ya que un entrehierro variable presentará valores de reluctancia también variable que ocasionarán la aparición de nuevos armónicos. Estos nuevos armónicos de campo inducirán fuerzas electromotrices en el estator que a su vez producirán nuevos armónicos en el espectro de

corriente. Por tanto, el análisis de las corrientes podrá ser también empleado como método de diagnóstico de esta anomalía. De hecho, existen bastantes publicaciones en las que se hace referencia al modo de detectar la excentricidad en el entrehierro del motor mediante el seguimiento de ciertas frecuencias en el espectro de corriente [13]. En dichos trabajos se demuestra que en motores expuestos a excentricidad estática o dinámica es posible encontrar frecuencias características en las corrientes de alimentación que responden a la expresión 2.40:

$$f_{ex} = \left[ \frac{(nR + n')(1 - s)}{p} \pm n_i \right] f_1 \quad (2.16)$$

$f_{ex}$ : Frecuencia de fallas.

$f_1$ : Frecuencia de alimentación

$n$ : Es un número entero cualquiera.

$n_i$ : Es un número impar, que representa el orden de los armónicos de la fuerza magnetomotriz o de las corrientes en el estator.

$n'$ : Es un número entero que indica el orden de excentricidad.

$n' = 0$ , para excentricidad estática.

$n' = -1$  y  $1$ , para excentricidad dinámica.

$s$ : Deslizamiento del motor.

$p$ : Es el número de pares de polos de la máquina.

$R$ : Número de barras del rotor.

La detección de la excentricidad se basará, por lo tanto, en encontrar en el espectro de corriente de la máquina las frecuencias de la ecuación (2.16). El nivel de excentricidad que presente el motor se determinará en función de la amplitud de los citados armónicos [13].

Una vez obtenido los picos de excentricidad dinámica y estática ( $m_{ex}$ ) y las amplitudes se realiza la diferencia de las magnitudes de excentricidad dinámica y estática como se muestra en la ecuación 2.17:

$$d_{mex} = |m_{exes} - m_{exd}| \quad (2.17)$$

$d_{mex}$ : Diferencia de magnitud de excentricidad.

$m_{exes}$ : Magnitud de excentricidad estática.

$m_{exd}$ : Magnitud de excentricidad dinámica.

Y luego se aplica el siguiente establecido en la tabla 2.1 criterio:

**Tabla 2.1.** Criterio de diagnóstico de excentricidad en el motor de inducción.

CRITERIOS	RANGO (dB)
EXCELENTE	27 - 30
BUENO	24 - 27
MODERADO	20 - 24
EXCENTRICIDAD ACEPTABLE	17 - 20
DAÑO MENOR DE EXCENTRICIDAD	13 - 17
DAÑO SEVERO, EXCENTRICIDAD INACEPTABLE	< 13

Fuente: Peraza V. y Matos J [8]

Que es el criterio para el diagnóstico de excentricidad en el motor de inducción tomando como referencia el rango en dB en la magnitud de la señal total.

### 2.2.5.3. FALLAS EN LAS MÁQUINAS SINCRONAS.

Estudios de protección y diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas se remontan a la época en que los fabricantes y usuarios de máquinas eléctricas inicialmente se basaban en regímenes de protección simple, como sobrecorriente y los dispositivos de sobretensión para garantizar una operación confiable y segura. Los motores y generadores eléctricos están sujetos a una amplia variedad de fallas y operaciones anormales. Predecir cuándo una máquina eléctrica

requiere mantenimiento permite a los usuarios realizar las acciones necesarias a su conveniencia y no durante paradas costosas no programadas. El objetivo de métodos de diagnóstico y monitoreo moderno es garantizar la utilización óptima y segura de motores y generadores con respecto a la potencia de salida y su tiempo de vida. [9]

Varios métodos de diagnóstico han sido empleados, cada uno aplicado para un tipo específico de problema. La modelización de las fallas internas de máquinas eléctricas permite un estudio de efectos de las fallas en el rendimiento del motor. Las mediciones de las altas frecuencias y numerosas simulaciones se están introduciendo cada vez más y con más frecuencia para el diagnóstico de devanados de máquinas eléctricas. Normalmente depende de la admitancia del devanado o de la función de transferencia basada en el análisis de respuesta en frecuencia (FRA). La estructura de la admitancia y la función de transferencia contienen un número de picos que ocurren en la frecuencia de oscilación natural resultando de la resonancia serie y paralelo entre capacitancias y devanados de inductancias de fuga. Mediante el análisis de estas frecuencias, la FRA permite la detección de fallas que no se pudieron detectar midiendo sólo la inductancia del devanado. Tales fallas usualmente resultan de la influencia de fuerzas electrodinámicas generadas durante el flujo de largas corrientes de cortocircuitos. También estas fuerzas ocurren cuando los transformadores o generadores son transportados. Es de especial importancia la detección temprana de fallas en devanados, porque este tipo de defectos pueden producir daños en el devanado debido al sobrecalentamiento, el desbalance, etc. [9]

A pesar de los avances recientes, existen algunas limitaciones en la sensibilidad e interpretación usando métodos de FRA para la detección de fallas vuelta a vuelta del devanado. Esta clase de falla es la más crítica y con frecuencia se producen fallas durante la fabricación y el funcionamiento del motor. [9]

### **Modelo numérico de los devanados de las máquinas eléctricas**

- Métodos de medidas de la función de transferencia del devanado

El comportamiento en alta frecuencia de los devanados se caracteriza por su resonancia (máxima función de transferencia). Así las medidas de alta frecuencia permiten analizar una máquina en el dominio de la frecuencia. Los Cambios en los circuitos magnéticos y eléctricos

de la máquina permiten observar cambios en la medida de la respuesta de frecuencia. Realizar dicha investigación en los devanados del estator y/o rotor de máquinas eléctricas en una onda o rango de frecuencia seleccionado puede proporcionar información adicional que no es revelada mediante métodos de prueba convencionales. [9]

En general, la función de transferencia (TF) puede ser tratada como una marca de la máquina. La función de transferencia de los devanados está definida como frecuencias dependientes de las proporciones de voltajes o corrientes respectivas a la fuente de voltaje del devanado. En el caso donde la corriente  $I$  y el voltaje  $V$  son referidos al mismo devanado, la función de transferencia representa la admitancia en el devanado, tal como se indica en la ecuación 2.18:

$$Y(f) = \frac{I(f)}{V(f)} \quad (2.18)$$

La admitancia puede ser determinada utilizando 2 métodos. En el primer método la evaluación de la función de transferencia está calculada por el registro de la forma de onda de la corriente o el voltaje en el devanado, mientras éste suministra un impulso de voltaje en un período muy corto de tiempo. El análisis se realiza haciendo la descomposición de la señal de entrada en sus componentes armónicos usando el algoritmo de la transformada rápida Fourier. [9]

El segundo método para evaluar la función de transferencia está basado en la medición de voltajes y corrientes cuando se alimentan de una fuente de voltaje sinusoidal con una frecuencia que cambia a pasos dentro de un rango de frecuencia específica. Un voltaje sinusoidal de excitación que energiza al devanado escanea los lapsos de frecuencia. La señal de respuesta tomada por medio de un transformador de corriente o shunt es registrada por cada línea. Basado en una gran cantidad de simulaciones efectuadas en el rango de frecuencia 0.1-6000 kHz, el modelo expresa lo siguiente, se trata al devanado y al estator como un sistema complejo resistencia-inductancia-capacitancia que toma en cuenta no solo el devanado en sí mismo y las inductancias mutuas, sino también capacitancias entre espiras, capacitancias a tierra, etc., las cuales podrían ser identificadas únicamente realizando medidas de alta frecuencia. Cada fase del devanado consiste en un número de grupos de bobinas; cada grupo de bobina consiste en un número de bobinas individuales y cada bobina consiste en un

número de espiras. Las espiras están acopladas a espiras vecinas mediante inductancia y capacitancia mutua. [9]

#### 2.2.5.4. FALLAS EN LOS TRANSFORMADORES.

Existen diversas causas de fallas en los transformadores, tales como:

1. Fallas en cualquier equipo general que es parte del transformador.
2. Fallas en los devanados del transformador.
  - **Fallas en el equipo auxiliar.** El descubrimiento de falla en el equipo auxiliar es necesario para evitar las que conducen a una falla definitiva de los devanados principales del transformador. Como equipo auxiliar se comprenden entre otros:
    1. Aceite del transformador (a su nivel adecuado)
    2. Ventiladores.
    3. Termómetros.
  - **Fallas en el devanado principal del transformador.** El problema más difícil de todos es el descubrimiento de fallas en el devanado, las cuales pueden dividirse en tres clases.
    1. Contactos flojos
    2. Fallas entre espiras adyacentes o parte de las bobinas.
    3. Fallas a tierra o a través de los devanados completos.

Estas fallas pueden ser descubiertas de dos modos:

- a) Medición del gas formado por un arco, o severo calentamiento local.
- b) Medición del desequilibrio de la corriente (entrada contra salida) por relevadores diferenciales.
- c) Medición de las resistencias de los devanados.

Conexiones flojas. La conexión floja o falso contacto es un tipo de falla sumamente difícil de descubrir en sus primeras etapas, porque únicamente producen calentamiento local. Esta falla tiene dos efectos:

1. Produce depósitos de carbón en la conexión.
2. Ocasiona formación de gas.

Falla de espira a espira. Un corto circuito entre espiras puede comenzar con el contacto mecánico resultante de fuerzas mecánicas en el transformador o por un severo deterioro del aislamiento, resultante de sobrecarga excesiva. Estas fallas pueden también originarse de la ruptura eléctrica del aislamiento del transformador por un voltaje de impulsión. Una combinación de lo anterior puede producir fallas de espira a espira.

❖ **Criterio de detección para fallas en devanados del transformador.**

El análisis de respuesta de barrido de frecuencia (SFRA por sus siglas en inglés), es una técnica de análisis para detectar deformaciones y desplazamientos en los devanados (entre otras fallas mecánicas y eléctricas) en transformadores de potencia y distribución. Hoy en día hay un creciente interés en el método SFRA debido a su sensibilidad detectando fallas mecánicas sin destapar el transformador. [10]

Una detección segura de fallas mecánicas en el transformador debido a deformaciones y desplazamientos en los devanados requiere la implementación de una técnica sensible para la detección de este tipo de daño. Algunas de las técnicas de diagnóstico usadas para este propósito son:

- Medida de la impedancia de cortocircuito (reactancia).
- Método vibro-acústico.
- Análisis de respuesta en frecuencia (FRA), obtenido por dos métodos:
  - Impulso de bajo voltaje (LVI por sus siglas en inglés)
  - SFRA
- Medida de la respuesta en frecuencia de pérdidas parásitas (FRSL por sus siglas en inglés).

La técnica FRA es ampliamente usada debido a su gran sensibilidad y por el hecho de que está basada en el concepto de que cambios en el devanado debido a deformación y desplazamiento en los devanados causan un cambio en la impedancia del transformador y por consiguiente una modificación en su respuesta en frecuencia. [10]

El análisis de respuesta en frecuencia (FRA) incluye SFRA y LVI. La mayoría de las literaturas acerca de este tópico definen el término FRA según fue introducido por Dick y Erven: “el método FRA usa un generador de barrido para aplicar voltaje sinusoidal a diferentes frecuencias a un terminal del devanado del transformador. La amplitud y la fase de las señales obtenidas son graficadas directamente en una función de la frecuencia ”. Esta definición coincide con la actual definición del método SFA y es la que se usa en este documento. [10]

Algunas ventajas del método SFRA sobre LVI son: mayor relación señal-ruido, mayor repetitividad y reproducibilidad y menos equipos de medición. [10]

### **Metodología SFRA**

#### Medidas de SFRA

Existen dos posibilidades de medidas al aplicar el método SFRA: función de transferencia ( $V_{sal}/V_{ent}$ ), donde  $V_{sal}$  es Voltaje de Salida y  $V_{ent}$  es Voltaje de entrada, y la impedancia ( $V_{ent}/I_{sal}$ ), donde  $V_{ent}$  es Voltaje de entrada e  $I_{sal}$  es Corriente de Salida . La principal característica de las medidas de SFRA son: rango de frecuencia y número de frecuencias, las cuales no han sido definidas. [10]

#### Conjunto de frecuencias a ser usadas durante la prueba

El tiempo necesario para realizar una prueba SFRA (normalmente varios minutos) está relacionado con el ancho de banda y el número de espacios de frecuencia, el cual no está definido universalmente. El número de espacios de frecuencia usado o recomendado por diferentes autores es diferente. Por ejemplo, algunos utilizan 1000 espacios de frecuencia, otros 2000 y 3000. [10]

De acuerdo con aquellos autores que utilizan 2000, el espacio relativo entre espacios de frecuencia adyacentes debe ser siempre menor de 2%. [10]

### Procedimiento de medición de SFRA

Hay involucrados 3 aspectos importantes en el procedimiento de medición: conexión de terminales de prueba y de no-prueba, tipos de medición (transferencia y no transferencia) y el conjunto de mediciones que se van a realizar.

#### ➤ conexión de terminales

a) Los terminales de No-prueba se aterran a través de una resistencia de amortiguamiento de  $1k\Omega$ . Una resistencia de amortiguamiento es conectada desde cada terminal de no prueba del transformador hacia el aterramiento del tanque. Esas resistencias ayudan a amortiguar oscilaciones secundarias en los devanados sin excitación y a minimizar capacitancias parásitas en los bushing. [10]

b) Todos los terminales de no prueba se dejan abiertos. [10]

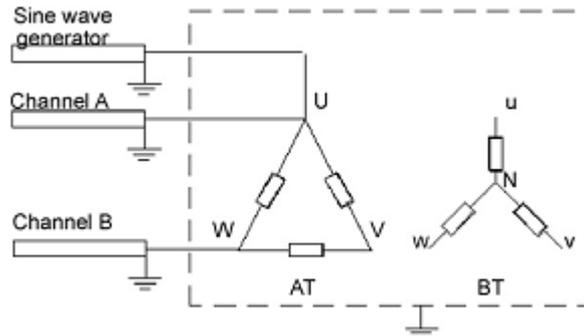
c) Mediciones usando los terminales de no prueba cortocircuitados. Cortocircuitar los devanados de no prueba ayuda a remover el efecto núcleo en frecuencias más bajas de 200kHz. Este efecto es identificado como la causa de la variación de la respuesta en frecuencia en el rango de 2kHz, el cual se convierte más notable cuando los terminales de no prueba están flotando. [10]

#### ➤ tipos de mediciones

a) mediciones de no transferencia: los terminales usados en la prueba pertenecen al mismo nivel de voltaje. [10]

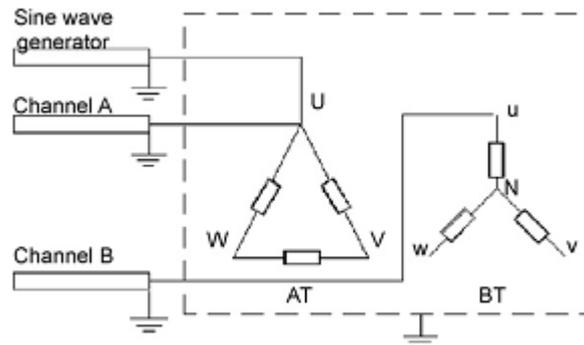
b) mediciones de transferencia: los terminales usados en la prueba pertenecen a niveles de tensión diferentes. [10]

Estos tipos de mediciones pueden ser realizados tanto para el caso de función de transferencia así como también para la medición de impedancia. Por ejemplo, se mide el voltaje de entrada y la corriente de entrada del devanado de baja tensión para estimar la impedancia de entrada; es una medición de no transferencia para la impedancia (como se indica en la figura 2.15). Por otro lado, se mide el voltaje de salida del devanado de alta tensión para estimar la función de transferencia; esta sería una medición de transferencia (como se indica en la figura 2.16). [10]



**Figura 2.15** Medición de no transferencia para una función de transferencia

*Fuente:* Secue J., Mombello E. (2008).



**Figura 2.16** Medición de transferencia para una función de transferencia

*Fuente:* Secue J., Mombello E. (2008).

- cantidad de mediciones (pruebas)

El número de mediciones a ser realizadas depende de los siguientes factores:

- a) Conjunto de terminales de prueba y su forma de conexión. [10]
- b) Conjunto de terminales de no prueba y su forma de conexión. [10]
- c) Tipo de medición a ser considerada. [10]

Se sugieren 15 pruebas (esta cantidad no incluye pruebas adicionales para diferentes posiciones del TAP), tanto para terminales de no prueba flotando como para terminales de no prueba aterrados:

a) Mediciones de no transferencia:

- Se realizan mediciones teniendo cada terminal de los devanados de alta tensión como entradas y el respectivo terminal neutro como salida. Similarmente, también los terminales de baja tensión se usan como entradas y el terminal neutro como salida. Todas las mediciones se realizan usando abiertos los terminales de no prueba (de alta tensión y baja tensión). [10]
- Se realizan mediciones teniendo cada terminal de los devanados de alta tensión como entradas y el respectivo terminal neutro como salida, manteniendo los terminales de no prueba del lado de alta tensión abiertos y cortocircuitando los terminales de baja tensión. Similarmente, también se mide en los terminales del devanado de baja tensión. Estas medidas dan la característica AT/BT y la impedancia de fuga entre el devanado primario y secundario. [10]

b) Mediciones de transferencia:

- Mediciones usando los terminales de cada fase del devanado de alta tensión y el terminal correspondiente en el devanado de baja tensión, estando los terminales de no prueba (tanto de AT como de BT) abiertos y el terminal de neutro aterrado. Esta medición describe la impedancia de fuga entre el devanado primario y secundario. [10]

### **Diagnóstico de fallas usando SFRA**

La sensibilidad de SFRA ha sido probada extensivamente por medio de simulación de fallas en laboratorio y median el estudio de caso reales en transformadores en servicio. Varios tipos de fallas pueden ser detectadas por SFRA, así como movimiento en los devanados, deformación de los devanados, tornillos sin sujeción al final del devanado (pérdida de la presión de sujeción), fallas entre espiras, pérdida de la conexión de los devanados de AT y BT hacia los bushing, aterramiento pobre del tanque, aterramiento múltiple del núcleo, entre otros.

Hay un acuerdo lingüístico entre algunos expertos, que las fallas mayores (causadas por grandes movimientos del núcleo o devanados) son identificadas en rangos de frecuencia bajos, mientras que las fallas menores (fallas entre espiras y pequeños desplazamientos) son identificados en rangos de frecuencia altos. [10]

Un inconveniente de SFRA como herramienta de diagnóstico es que todavía no hay un procedimiento estándar para analizar e interpretar las mediciones registradas. Las tareas de diagnóstico las realizan expertos a través de inspección visual de los resultados o con ayuda de algunos parámetros estadísticos y matemáticos. El análisis depende de factores como el tipo de registros usados para la comparación, las características extraídas de la respuesta en frecuencia, etc. [10]

#### Tipo de registros

El método SFRA se basa en el análisis de los registros de la respuesta en frecuencia tomados durante el tiempo de vida del transformador. Hay dos posibilidades:

- a) Análisis de registros tomados en un devanado teniendo como referencia otros registros. Asumiendo que hay disponible un conjunto de registros históricos que representen un estado sano del transformador. [10]
- b) Análisis sin registros de referencia. Si no hay registros históricos del transformador, hay dos posibilidades:
  - Análisis usando registros los cuales pertenecen a diferentes fases del mismo transformador. Debido a las asimetrías inherentes en el diseño del transformador, hay diferencias entre las fases que deben ser consideradas. Esta diferencia normal entre fases no es comparable con la diferencia presente en caso de desplazamientos o deformaciones significativas de los devanados. Este análisis tiene la ventaja de que la medición se hace bajo las mismas condiciones. [10]
  - Análisis usando registros de transformadores gemelos. La comparación se hace en base a los registros de un transformador gemelo, un transformador nuevo con las mismas características o uno viejo en buenas condiciones. Esta es la alternativa más complicada, debido a que no es fácil encontrar transformadores con las mismas

características constructivas, cuyas condiciones de operación hayan sido similares.  
[10]

## 2.2.6. LABVIEW

El LabView es un lenguaje de programación de alto nivel, de tipo gráfico, y enfocado al uso en instrumentación. Pero como lenguaje de programación, debido a que cuenta con todas las estructuras, puede ser usado para elaborar cualquier algoritmo que se desee.

Cada programa realizado en LabView será llamado Instrumento Virtual (VI), el cual como cualquier otro ocupa espacio en la memoria del computador.

### 2.2.6.1. Instrumentos virtuales

Un programa creado en LabVIEW es llamado como Instrumento Virtual y consta de tres partes a crear.

- El Panel frontal, donde estarán ubicados todos los indicadores y controles que el usuario podrá ver cuando el programa este en funcionamiento. Por ejemplo botones, perillas, gráficas, etc , como se muestra en la figura 2.17.

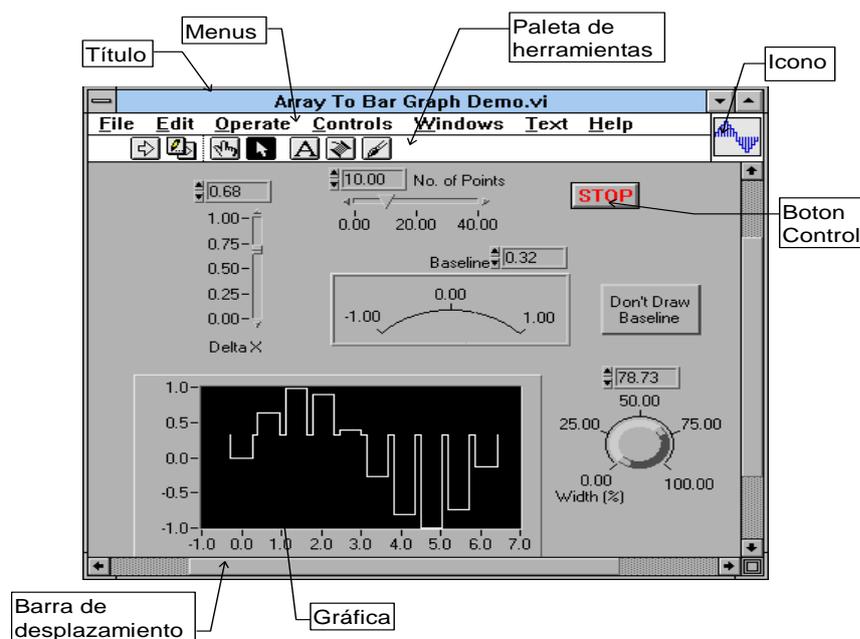


Figura 2.17 Panel frontal de una aplicación.

- El diagrama de bloques, que se observa en la figura 2.18 muestra el programa en código gráfico G. Es utilizado en este diagrama, estructuras de programación, y flujo de datos entre las diferentes entradas y salidas, a través de líneas.

Todos los indicadores y controles ubicados en el panel frontal están respaldados por un terminal de conexión en el diagrama de bloques tal como si se tuviera un tablero de control de una máquina, donde por el frente se ven los indicadores y por el lado posterior se aprecian todos los cables y terminales de conexión.

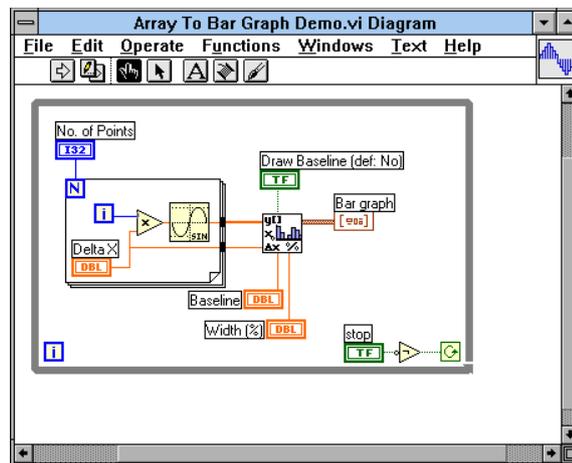


Figura 2.18 Diagrama de bloques de una aplicación.

- El ícono de conexión. Es usado por el programa creado como subrutina en otro programa. La idea es crear un sistema de programación modular, donde cada rutina creada llame otras rutinas, y estas a su vez otras de menor nivel, en una cadena jerárquica con cualquier límite deseado. Así cuando se use un módulo, no se requiere saber cómo funciona interiormente, simplemente solo basta conocer sus entradas y salidas para ser así usado.

### 2.2.6.2. Funciones TAD e I/O.

LabView cuenta además de las funciones normales de programación, con otras en forma de IV para ser usadas como subrutinas en aplicaciones de grado más complejo, como son las herramientas usadas para comunicaciones.

Estas funciones cuentan con los programas Driver, para manejar dispositivos que se conectan al computador, como balanzas, osciloscopios, y muchos más, lo que no hace necesario conocer a fondo el método de programación de estos equipos, solo basta usar las rutinas que los manejan.

Un programa Driver consta de los siguientes elementos:

- **Iniciador o Configurador:** Entrega el modo de empleo, y cómo será la comunicación al instrumento o tarjeta.
- **Iniciador de medición y presentador de estado:** Ordena a la tarjeta o dispositivo que tome datos, o tome su propio estado.
- **Trasladar datos:** Llevar o traer los datos del dispositivo al computador, para ser usados como sea necesario.
- **Útiles:** Para leer errores, resetear el periférico, o pedir auto chequeo y auto calibración.
- **Cerrar:** Cerrar la comunicación con el dispositivo, para que se mantenga en un estado esperado.

En comunicaciones existen numerosos métodos de trabajo, como son:

#### ✓ **Comunicación con tarjetas TAD**

Las tarjetas TAD son tarjetas insertables que permiten la entrada y salida de datos del computador a otros aparatos, donde se conectan sensores, y actuadores, para interactuar con el mundo real. Los datos que entran y salen pueden ser señales digitales o análogas, o simplemente conteos de ocurrencias digitales, tanto de entrada, como de salida.

Las tarjetas se comportan como si fueran un puerto más en el computador, y poseen todo un protocolo y sistema de manejo, por lo que entender cada tarjeta, como su funcionamiento, al igual que cualquier instrumento, requiere de tiempo y cuidado.

✓ **Sistemas de adquisición de datos**

El sistema de adquisición de datos está constituido por los siguientes elementos:

○ **Tarjeta de adquisición de datos**

Son las que proporcionan al ordenador personal (computador) la capacidad de adquirir y generar señales, ya sean analógicas o digitales.

**Acondicionamiento de señales para un sistema de adquisición de datos y control**

Para un sistema de adquisición de datos y control es de suma importancia adecuar las señales analógicas y las señales digitales, tanto para prevenir los errores en las señales que se quieren medir, como para proteger la integridad del sistema de adquisición de datos y a la computadora personal (PC) contra eventos no deseados como lo constituyen los sobre voltajes, cortocircuitos, etc. Las funciones de acondicionamiento que se usan generalmente para cualquier tipo de señal son amplificación, filtrado y aislamiento

**Acondicionamiento de señales analógicas**

La señal eléctrica generada por un transductor generalmente presenta ciertas deformaciones y características que en la mayoría de los casos no son apropiadas para el proceso de adquisición, siendo necesario un acondicionamiento previo para adaptarla a las exigencias de la Tarjeta de Adquisición de Datos. Los dispositivos empleados en este proceso pueden amplificar las señales de bajo nivel, aislarlas y filtrarlas, lo que permite una medida más precisa.

Las entradas analógicas en los sistemas de Tarjeta de Adquisición de Datos están diseñadas en su mayoría para aceptar voltajes de entrada en el rango de 1mV a 10V. Otros rangos y tipos de señales requieren generalmente un pre-procesamiento que las haga compatibles.

### **Niveles de las señales analógicas**

La mayoría de los convertidores analógico-digital están diseñados para operar con señales de entrada de un nivel bajo. Los rangos más comunes incluyen 0 a 10V,  $\pm 5V$  y  $\pm 10V$ . Cuando la máxima señal de entrada es menor que 1V, la precisión se reduce. Bajo estas circunstancias es apropiado amplificar la señal antes de la conversión analógica-digital.

### **Características generales sobre la tarjeta de adquisición de datos (TAD)**

A continuación se detallan cuáles son las consideraciones que determinan las características hardware de las tarjetas de adquisición de datos, para tener un criterio de valoración de la efectividad de la TAD y comparación entre diferentes marcas.

#### **a) Entradas Analógicas**

Las prestaciones y precisión que nos proporciona una tarjeta en cuanto a entradas se refiere, son básicamente el número de canales de que dispone, la frecuencia de muestreo, la resolución y los niveles de entrada. Generalmente, muchos de estos parámetros se pueden configurar por software. El número de canales analógicas se ha de especificar tanto para entradas referenciadas a tierra como para las diferenciales.

#### **b) Múltiplex**

Es un simple arreglo de contactos que permite que muchos canales de entrada sean servidos por un mismo amplificador y por un mismo convertidor analógico digital. El software o el auxiliar del hardware pueden controlar este arreglo de contactos para seleccionar algún canal y procesarlo en un tiempo dado. Ya que el amplificador y el convertidor están compartidos, los canales son leídos en forma secuencial ocasionando que la rapidez general del sistema se reduzca. El convertidor toma una muestra de un canal, el múltiplex lo cambia al próximo canal, toma otra muestra y así sucesivamente.

La velocidad efectiva de cada canal es por lo tanto inversamente proporcional al número de canales que son objeto de muestreo, como por ejemplo; en una Tarjeta de Adquisición de

Datos que haga un muestreo a 100kM/s sobre 10 canales posee efectivamente para cada canal una tasa de muestreo de:

$$\frac{100kM/s}{10canales} = 10kM/s * canal \quad (2.25)$$

**c) Convertidor analógico-digital (CAD)**

Existen muchos tipos de CAD. Cada convertidor tiene su propio conjunto de características únicas que lo hacen el más idóneo para una aplicación. Esos atributos incluyen velocidad, resolución, precisión, e inmunidad al ruido. Las tareas de adquisición de datos en la industria y en el laboratorio generalmente requieren una resolución de 12 o 16 bits.

**d) Frecuencia de Muestreo**

Determina la velocidad a la que se producen las conversiones CAD. Una frecuencia de muestreo elevada proporciona señales con mayor calidad de definición en tiempo; al mismo tiempo aumenta el flujo de datos hacia el procesador. Por tanto, se habrá de buscar un valor de compromiso que haga óptimo el funcionamiento del sistema. Es fundamental en toda adquisición respetar el teorema de NYQUIST para el muestreo.

El teorema de NYQUIST requiere que para la tasa de muestreo se aplique la regla del “2 veces” la más alta frecuencia que va a ser analizada. Por esta razón, el margen entre la frecuencia de interés más alta y la tasa de muestreo debe ajustarse.

**e) Resolución**

Indica el número de bits que utiliza el conversor CAD para cuantificar los niveles de señal analógica. Cuanto mayor sea el número de bits del CAD, mayor será el número de niveles de señal que se puede representar.

**f) Niveles de entrada**

Son los límites de entrada de tensión de la TAD. Es muy común diferenciar entre señales unipolares y bipolares. Las señales unipolares admiten únicamente niveles de tensión positivos mientras que las bipolares permiten las dos polaridades.

#### **g) Salidas Analógicas**

Muchas TAD incorporan salidas analógicas. Básicamente, las características técnicas de las salidas analógicas son las mismas comentadas para las entradas.

### **Computador personal**

El computador representa una de las partes más importantes del sistema de adquisición de datos ya que esta es la encargada de procesar los datos suministrados por la tarjeta de adquisición al mismo tiempo que almacena y realiza los análisis de todas las señales que se han transformado al formato digital.

### **Software**

Un sistema de adquisición de datos y control sin software es inservible, ya que es este el que provee las instrucciones y los drivers necesarios para ejercer el manejo y control del hardware a través de la computadora y constituye la interfaz entre el sistema y el usuario.

Revisadas y analizadas las proposiciones teóricas planteadas para la sustentación y comprensión de las variables involucradas, su definición y contextos teóricos asociados, se procede a continuación a exponer las estrategias metodológicas que permitieron obtener la data necesaria para alcanzar los objetivos planteados.

## **2.7. DEFINICIÓN DE TERMINOS**

- **Armónico:** Es un componente sinusoidal de la señal. Su frecuencia es múltiplo de la fundamental.
- **Corriente de armadura:** Corriente que circula por la armadura de una máquina motriz.

- **Decibelio:** El decibelio es una unidad logarítmica de medida utilizada en diferentes disciplinas de la ciencia. En todos los casos se usa para comparar una cantidad con otra llamada de referencia.
- **Diagnóstico:** Proceso por medio del cual se juzga el estado de una máquina.
- **Diagnóstico de falla:** Se refiere a la detección de fallas en elementos de un equipo
- **Entrehierro:** Espacio de aire comprendido entre el estator y el rotor de la máquina eléctrica.
- **Espectro:** Gráfico que muestra la descomposición de una señal ondulatoria en el dominio de las frecuencias.
- **Espectro de corriente:** Gráfico que muestra la descomposición de una señal ondulatoria de corriente en el dominio de las frecuencias.
- **Instrumento virtual:** Programa que permite el uso de una PC como un instrumento de medición convencional, apoyándose en un sistema de adquisición de datos.
- **Mantenimiento:** Acciones necesarias para que un equipo sea conservado o restaurado de manera que pueda permanecer de acuerdo con una condición especificada.
- **Monitoreo de condición:** Es el proceso donde se mantiene en constante observación las variables de un equipo que puedan arrojar información del estado del mismo.
- **Método:** Sucesión lógica de pasos o etapas que conducen a lograr un determinado objetivo.
- **Modelo:** Representación en pequeño de alguna cosa. Representación de las características que definen un conjunto de datos.
- **Motor Eléctrico:** Máquina eléctrica que permite la transformación de energía eléctrica en energía mecánica.
- **Optimizar:** Buscar la mejor manera de realizar una actividad.
- **Parada General:** Situación de un conjunto de equipos a los que se les efectúa revisiones periódicas y reparaciones programadas en un determinado periodo de tiempo.
- **Patrón:** Modelo que sirve de muestra para sacar otra cosa igual.
- **Plan:** Conjunto de programas y estrategias relacionadas entre sí para lograr un resultado concreto.

- **Predecir:** Anunciar por revelación, ciencia o conjetura algo que ha de suceder.
- **Prueba:** Ensayo o experimento que se hace de algo, para saber cómo resultara en su forma definitiva.
- **Software:** Conjunto de programas informáticos ubicados en los ordenadores para desarrollar un conjunto de tareas.
- **Sistema de adquisición de datos:** Conjunto de equipos que permiten la obtención de señales analógicas o digitales, para su posterior manipulación.
- **Transductor:** Dispositivo que permite la transformación de variables físicas en variables eléctricas o de unas variables eléctricas en otras.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGIA**

A continuación se detallan los métodos, técnicas y procedimientos aplicados a la investigación, se muestra el tipo de investigación, las fases metodológicas, la unidad de estudio y análisis, las técnicas de recolección de información y el análisis de los datos, entre otros, todos necesarios para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

#### **3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.**

De acuerdo a Maritza Barrios Yaselli, 2006 (Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales), el tipo de investigación es de campo ya que se realiza un análisis sistemático de técnicas para el diagnóstico de fallas eléctricas en las máquinas con el propósito de aplicar algunas de estas para realizar un plan de mantenimiento predictivo en dichas máquinas. El diseño a utilizar es de tipo Analítico- descriptivo, esto es, una vez aplicada la técnica para la detección de averías en las máquinas eléctricas midiendo así las variables de estado (espectro de corriente, espectro de tensión, potencia, torque), se analizan los resultados obtenidos para luego proceder a describir un plan estratégico de como implementar las técnicas analizadas.

#### **3.2.- TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

La técnica que se utilizó para la recolección de datos está constituida por la medición de la corriente estatística de los motores de inducción, esta máquina se encuentra en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, tales señales de corriente fueron condicionadas por medio de transformadores de corriente, de tensión y arreglos de resistencia, para luego ser recolectadas a través de una tarjeta de adquisición de datos.

Los recursos utilizados para realizar las mediciones y posterior recolección de datos son:

- Bibliografía, Paper, Trabajos especiales de grados, etc.
- Transformadores monofásicos reductores de tensión.
- Transformadores de corriente.
- Medidores de velocidad.
- Resistencias, capacitores, amplificadores operacionales, diodos. Etc.
- Tarjeta de adquisición de datos USB 1208FS
- Computador tipo Laptop.

### **3.2.1.- CARACTERÍSTICAS DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

La tarjeta de adquisición es el dispositivo que permite obtener información de manera automatizada desde dispositivos que actúan como sensores; los datos o variables que se han de captar tienen un carácter analógico, mientras que su tratamiento, almacenamiento y análisis se realiza de forma digital. Las variables que se desean captar van a representar las entradas analógicas (tensiones y corrientes), que serán almacenadas en forma digital en el computador para su posterior utilización en algún software de aplicación.

En la presente investigación se utilizó el Hardware de adquisición modelo USB – 1208FS, desarrollado por la empresa Americana National Instruments, expandida en el 2006 por la adquisición de Measurement Computing; compañía que desarrolla tarjetas de adquisición de datos de bajo costo para interfaces ISA, PCI y USB para computadoras personales. Mediante la tarjeta de adquisición se puede obtener señales a través de 8 canales máximo, dependiendo de la forma en la cual se configura (modo común o modo diferencial).

La tasa máxima de muestreo es de 50KS/s. La figura 3.1 muestra los componentes externos de la tarjeta de adquisición, a saber:

- Conector USB.
- LED.
- Dos columnas de terminales de tornillo.



*Figura 3.1 Hardware de adquisición modelo USB – 1208FS*

El conector USB está ubicado en la parte derecha de la tarjeta, proporciona una alimentación de +5V y establece comunicación entre la tarjeta y el computador. El LED está ubicado en la parte frontal de la tarjeta de adquisición e indica el estado de la comunicación. Los terminales ubicados en el borde superior (pines 1-20) proporcionan las siguientes conexiones:

- 8 conexiones a entradas analógicas.
- 2 conexiones a salidas analógicas.
- Un terminal para disparo externo.
- Un terminal para sincronización externa.
- Un terminal de calibración.
- 5 conexiones analógicas a tierra.
- Una conexión a tierra.
- Una conexión a un contador externo.

Los terminales ubicados en el borde inferior de la tarjeta de adquisición (pines 21-40) proporcionan las siguientes conexiones:

- 16 conexiones de entrada/salida digitales.
- Una conexión de energía a PC +5V.

- 3 conexiones a tierra.

Como se menciona la tarjeta puede ser configurada en dos modos: común y diferencial. En la configuración modo común se pueden conectar hasta 8 entradas analógicas y se obtiene una resolución de 11 bits, mientras que en la configuración modo diferencial solo son disponibles 4 entradas analógicas con una resolución de 12bits.

El esquema pinout de conexión de la tarjeta USB-1208FS se muestra en la figuras 3.2 [14].

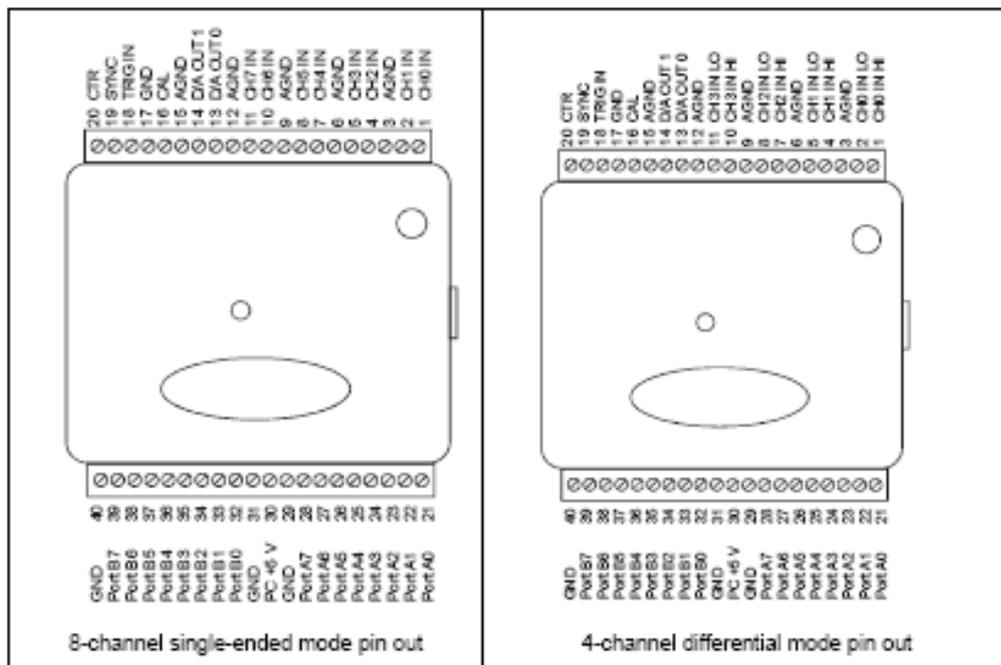


Figura 3.2 USB-1208FS PINOUT

### 3.3.- TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

El software seleccionado para llevar a cabo el proceso de adquisición de datos es LabVIEW 7.1, debido a que es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Es de fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos. Para el

desarrollo del proceso de adquisición de datos con el LabVIEW y utilizando el hardware USB – 1208FS, fue necesario instalar las siguientes utilidades:

- InstaCal 5.7

- Drivers UL for LabVIEW 7.11 a InstaCal es un pequeño software de la empresa Measurement Computer Corporation(MCC) que maneja completamente el hardware de una DAQ, es decir, cuando se instala un dispositivo USB, PCI o PCMCIA, InstaCal detecta el hardware y asigna los recursos automáticamente. Mientras que UlforLabView7.11a, es un paquete que contiene distintos drivers para la simulación de algunos dispositivos de adquisición de datos en LabVIEW.

Una vez que los datos son adquiridos, las señales se convierten al dominio de la frecuencia y se almacenan en archivos de datos, tanto las señales en el tiempo como las señales en el dominio de la frecuencia, para su posterior utilización en el análisis de fallas de las máquinas.

### **3.4.- DESARROLLO DE LAS FASES METODOLÓGICAS**

En la presente investigación, se realizó un seguimiento para el cumplimiento de los objetivos planteados caracterizado por los pasos que se mencionan a continuación:

#### **3.4.1. FASE I: Describir las ecuaciones que rigen el comportamiento de las máquinas eléctricas con el fin de conocer su funcionamiento.**

La herramienta para cumplir con dicha fase consistió en la revisión documental de la teoría, estudios y proyectos relacionados con las Máquinas Eléctricas, para ello se realizaron consultas en la Biblioteca Central y Rental de la Facultad de Ingeniería, La biblioteca Marcel Roche del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, páginas WEB y libros.

#### **3.4.2. FASE II: Analizar las fallas que se presentan en las máquinas eléctricas con el propósito de determinar las formas de detectarlas.**

La herramienta para cumplir con dicha fase consistió al igual que en la fase anterior en:

La revisión documental de la teoría, estudios y proyectos relacionados con las Máquinas Eléctricas, y Técnicas para el Mantenimiento Predictivo de estas, para ello se realizaron consultas en la biblioteca central y rental de la Facultad de Ingeniería, La biblioteca Marcel Roche del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, páginas WEB y libros.

**3.4.3. FASE III: Estudiar las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo basadas en el análisis espectral de señales eléctricas para seleccionar aquellas que sean más convenientes de aplicar según el tipo de máquina y las fallas que se presentan.**

Luego del análisis realizado a las técnicas de mantenimiento predictivo aplicadas al Transformador y a las Máquinas Síncronas, se llegó a la conclusión de que se necesita evaluar la función de transferencia basándose en la medición de voltajes y corrientes cuando se alimenta con una fuente de voltaje sinusoidal con una frecuencia que cambia a pasos dentro de un rango de frecuencia específica y en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Carabobo no se cuenta actualmente con las herramientas necesarias, por otra parte, solo se conoce el criterio de detección de falla para un reducido tipo de fallas. Por otra parte, el motor de inducción ha sido el más utilizado en estudios anteriores y, por lo tanto, se cuenta con más información, esto es, por cada tipo de falla presente en la máquina existe el criterio de detección de falla. Adicionalmente para aplicar las técnicas de mantenimiento predictivo a los Motores de Inducción sólo se necesita medir, tensión, corriente y velocidad a la frecuencia de operación y en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Carabobo se cuenta con los instrumentos para adquirir dichas variables. De modo que para el cumplimiento de esta fase se utilizó el estudio basado en la Máquina Asíncrona o Motor de Inducción.

**3.4.4. FASE IV: Modificar las prácticas establecidas por la Cátedra del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que resulten apropiados para efectuar la adquisición de señales eléctricas necesarias para el mantenimiento predictivo.**

Teniendo en cuenta que se desea aplicar la técnica de mantenimiento predictivo a la máquina asíncrona perteneciente al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería, es

necesario modificar las practicas n° 7, Motor de Inducción de Jaula de Ardilla, y n° 8, Motor de Inducción de Rotor Devanado, del Laboratorio de Máquinas Eléctricas II.

Para la modificación de este ensayo es necesario seleccionar los elementos para el manejo y acondicionamiento de las señales a medir.

#### 3.4.4.1 Selección de los instrumentos y técnicas de medida para la adquisición de datos correspondientes a las señales de interés.

##### Sistemas de adquisición de las señales eléctricas de: tensiones trifásicas, corrientes trifásicas y velocidad:

Este sistema de adquisición consiste en tres etapas, como se muestra en la figura 3.3.

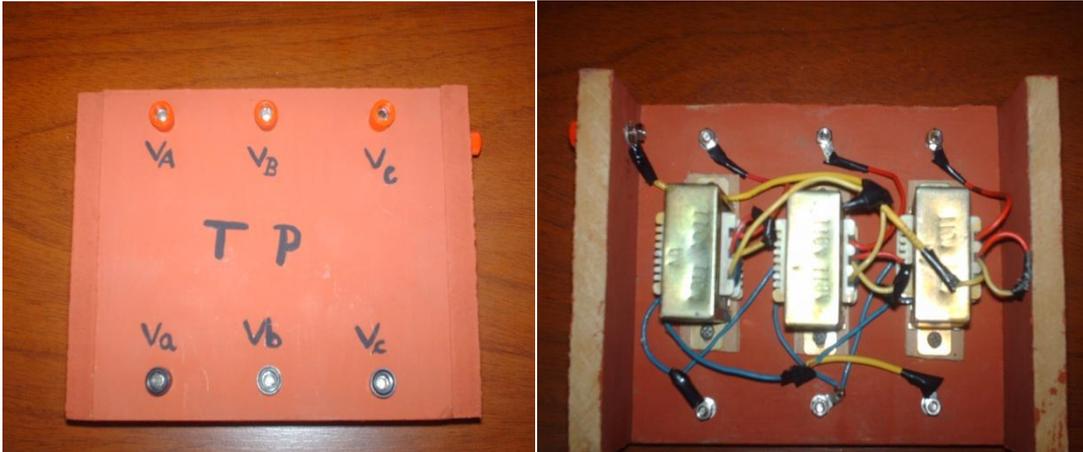


*Figura 3.3. Sistema de adquisición de las señales eléctricas de tensiones y corrientes de alimentación correspondientes a motores trifásicos de inducción.*

##### ❖ Etapa de adquisición de las tensiones eléctricas

La primera etapa corresponde con la adquisición de las señales eléctricas de tensión, para ello se implementó un banco de transformadores monofásico AC/AC conexión estrella en el primario y estrella en el secundario, para reducir los niveles de tensión de línea que alimentan al estator de los motores trifásicos a los niveles de tensión máximos permitidos por el fabricante de los distintos componentes electrónicos que conforman las etapas sub siguientes.

Cada uno de estos transformadores posee una relación de transformación 220/8 V y una corriente máxima de 1A (de acuerdo con el fabricante). La figura 3.4 muestra el banco de transformadores monofásicos antes mencionados.



*Figura 3.4. Banco de Transformadores monofásicos.*

*Fuente: Propia*

❖ Etapa de sensado de las señales de corrientes trifásicas

La captura de las señales de corrientes eléctricas se realiza en la primera etapa, para adquirir las señales de las corrientes estáticas se utiliza tres transformadores de corriente, uno para cada fase, estos transformadores poseen múltiples tomas de entradas de corrientes, por lo que se escogió la relación de transformación de 75/5 A, ya que la corriente nominal del motor es 7A, el cual es aproximadamente 1/10 de la corriente del primario del transformador de corriente, por lo que, cuando circule la corriente nominal por el primario, por el secundario circulará aproximadamente 1/10 de 5A, es decir, 0,5A. Siendo este un valor manejable a la hora de colocar una resistencia de muestreo de  $10\Omega$ , el cual permita obtener una señal e voltaje proporcional a la corriente de fase. La figura 3.5 muestra uno de los tres transformadores de corriente.

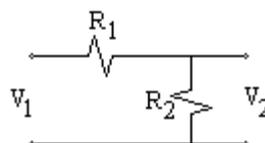


**Figura 3.5** Transformadores de corriente.

*Fuente: Propia*

❖ Etapa de adquisición de la velocidad.

Para la medición de la velocidad se cuenta con un generador DC de imán permanente, el cual genera una señal de tensión cuyo valor es equivalente a la velocidad con la que gira el eje del motor. Con el fin de asegurar que el nivel de tensión que se genera, no supere los valores máximos permitidos por el fabricante de la tarjeta, se realizó un divisor de tensión. El divisor de tensión queda estructurado como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6** Divisor de tensión.

*Fuente: Propia*

Donde:

$$R_1 = 10k \Omega$$

$$R_2 = 1k \Omega$$

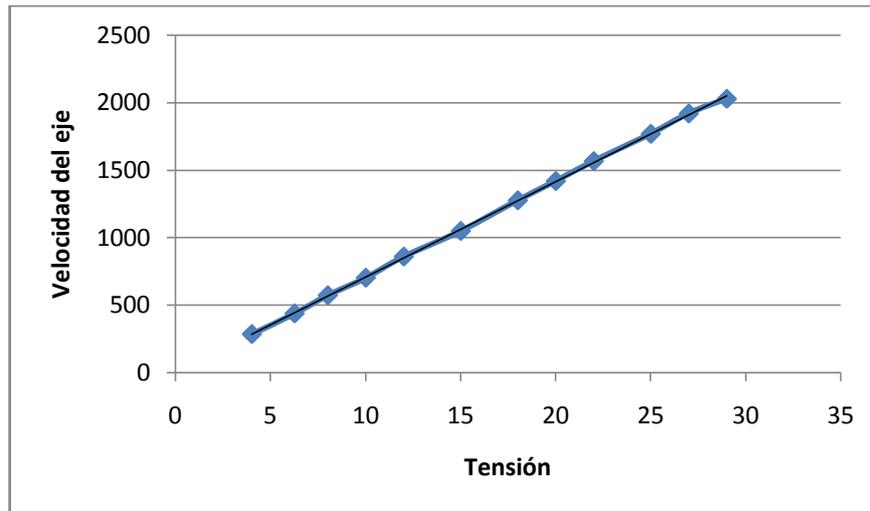
$$V_2 = V_1 \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = \frac{1}{11} V_1 \quad (3.1)$$

En el Laboratorio de Máquinas Eléctricas existen tres Mesones los cuales poseen un generador de imán permanente, con el fin de obtener la relación entre la tensión DC y la velocidad de giro del eje para cada generador, se adquirió la velocidad con una Tacómetro Digital y la tensión con un multímetro digital; los datos fueron tabulados como se muestra en la tabla 3.1 para el mesón uno y para el mesón dos y la tabla 3.2 para el mesón tres. Luego se realizaron las curvas para conocer el comportamiento de la velocidad en función de la tensión como que se muestran en la figuras 3.7 y 3.8.

#### Para Mesón 1- Mesón 2.

*Tabla 3.1. Tensión Vs. Velocidad.*

Tensión	Velocidad del eje
4	285
6.25	438
8	573
10	703
12	860
15	1050
18	1277
20	1420
22	1568
25	1770
27	1921
29	2030



**Figura 3.7.** Velocidad en función de la Tensión.

Luego de obtener la curva mostrada en la figura 3.7, se obtuvo la relación que muestra la Velocidad en función de la tensión, como se indica en la ecuación 3.2.

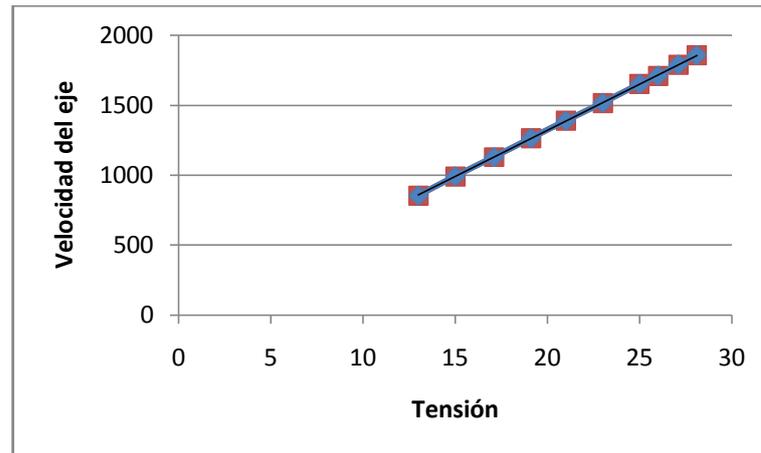
$$\omega_{1,2} = 71 * V \quad (3.2)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad en RPM y  $V_2$  es la tensión en Voltios.

### Para Mesón 3

**Tabla 3.2** Tensión Vs. Velocidad.

Tensión	Velocidad del eje
13	853
15	991
17	1129
19	1263
21	1389
23	1517
25	1652
26	1711
27	1791
28	1858



*Figura 3.8. Velocidad en función de la Tensión.*

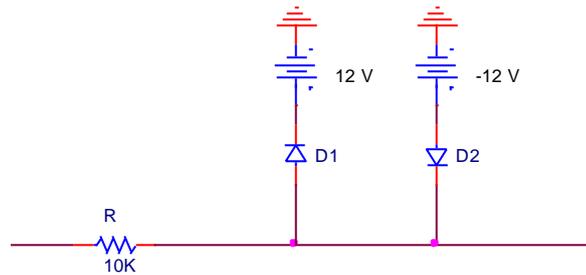
Luego de obtener la curva mostrada en la figura 3.8, se obtuvo la relación que muestra la Velocidad en función de la tensión, como se indica en la ecuación 3.3.

$$\omega_3 = 66.1 * V \quad (3.3)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad en RPM y  $V_2$  es la tensión en Voltios.

#### ❖ Etapa de protección

La segunda etapa consiste en un sistema de protección contra tensiones superiores a 12 V (valor máximo permitido por el fabricante de la tarjeta de adquisición de datos). En esta etapa se implementa una configuración de una resistencia de 10k $\Omega$  y dos diodos del tipo 1N4148, conectados al canal de la tarjeta que se desea proteger. Estos diodos son alimentados cada uno con tensiones de +12V corriente directa ('DC', direct current por sus siglas en ingles) y -12Vdc tal como se muestra en la figura 3.9.

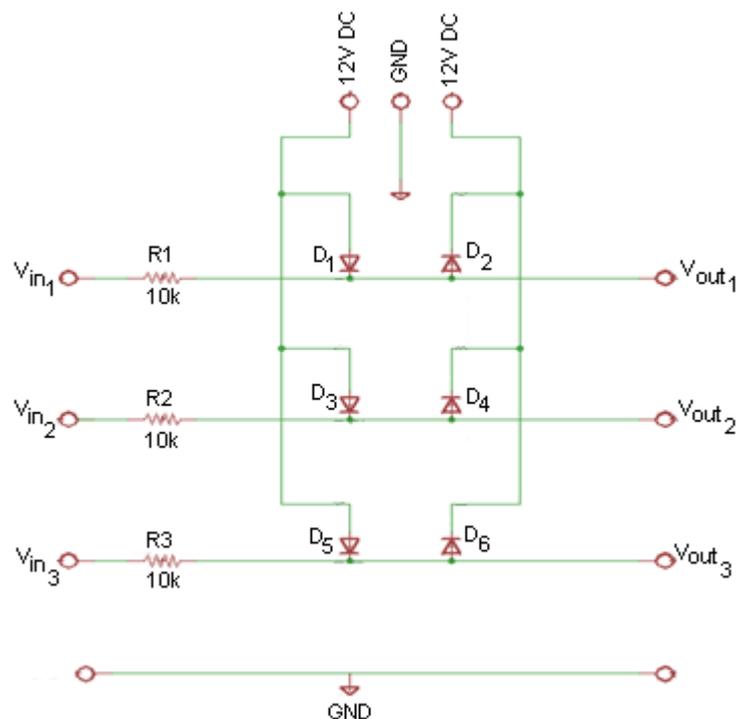


**Figura 3.9:** sistema de protección contra tensiones superiores a 12 V.

**Fuente:** Propia.

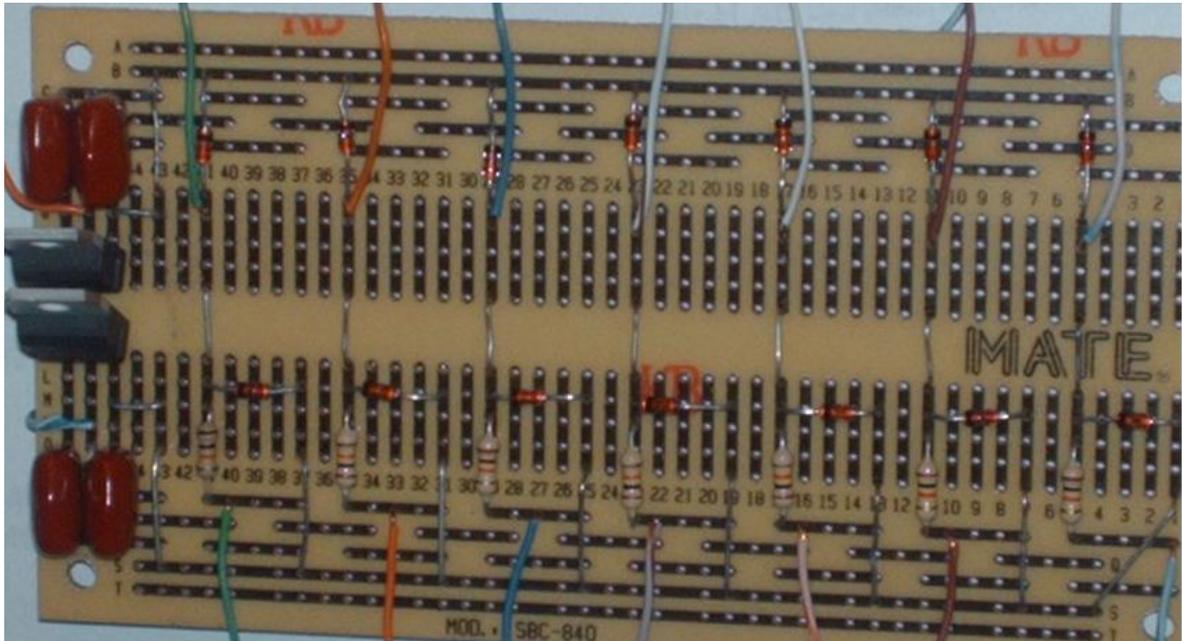
Cuando la tensión de la línea donde están conectados los diodos, supera su voltaje umbral de alimentación DC, los diodos se polarizan en directo y conducen, estableciendo una tensión máxima de 12 Vdc a la entrada de la tarjeta de adquisición de datos.

La figura 3.10, representa el diagrama esquemático completo de la tarjeta utilizada para la protección de la tarjeta de adquisición de datos contra tensiones iguales o superiores a 12 V. En ella pueden observarse todos los esquemas de los circuitos empleados y la forma en que se interconecta.



**Figura 3.10.** Diagrama esquemático de la tarjeta de protección para los canales de tensión. **Fuente:** Propia

Todos los canales de medición (tensiones, corrientes, velocidad) poseen este tipo de protección. La figura 3.11 muestra la tarjeta de protección contra sobretensiones, la misma fue construida sobre una baquelita de cobre.



*Figura 3.11. Tarjeta de protección contra sobre tensiones.*

*Fuente: Propia*

❖ Etapa de conversión analógico/digital

La tercera etapa consiste en un sistema de conversión analógico/digital formado por una tarjeta de adquisición de datos MEASUREMENT COMPUTING USB-1208FS, la cual se encarga de procesar la información de las señales eléctricas medidas para enviarlas a una computadora personal y almacenar los datos adquiridos.

Todos los canales de medición (tensiones, corrientes, velocidad) cuentan con esta etapa de conversión.

### 3.4.4.2 Modulo de la fuente de alimentación DC

Una de las aplicaciones más importante de los diodos es el diseño de circuitos rectificadores. Un diodo representa un bloque de construcción esencial de las fuentes de alimentación DC requeridas para el equipo electrónico. [14]

Un diagrama de bloque de este tipo de fuente de alimentación se muestra en la figura 3.10. Como se indica, la fuente se alimenta de una línea de corriente alterna (AC, altern current por sus siglas en ingles) de 120 V (rms) y 60 Hz, y entrega un voltaje de corriente directa (DC, direct current, por sus siglas en ingles),  $V_o$  (normalmente en el intervalo de 5 a 20 V), a un circuito electrónico representado por el bloque de carga. Es necesario que el voltaje DC sea lo más constante posible, a pesar de las variaciones en el voltaje de la línea AC y de la corriente tomada de la carga. [14]

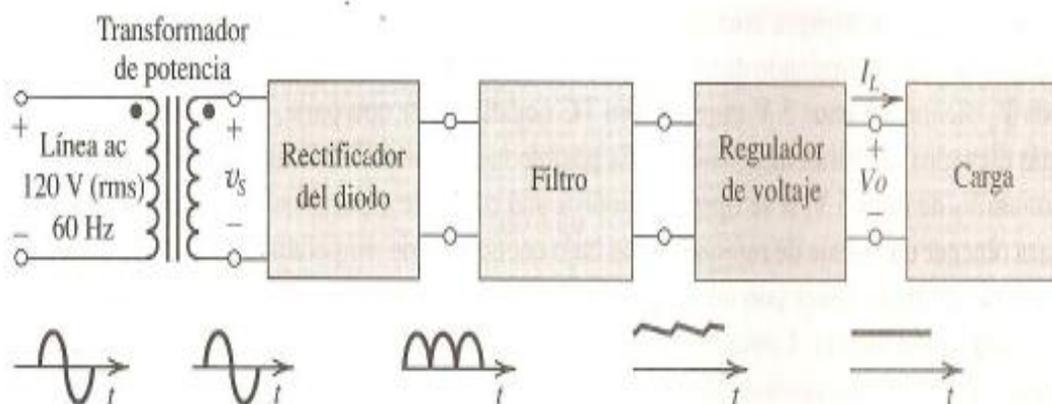


Figura 3.12. Diagrama de bloque de una fuente de alimentación de dc.

Fuente: SEDRA, Adel y Kenneth Smith (2006) Circuitos microelectrónicos.

El primer bloque de una fuente de alimentación DC es el transformador de potencia. Está formado por dos bobinas separadas y devanadas alrededor de un núcleo de hierro que acopla magnéticamente los dos devanados. El devanado primario, que tiene  $N_1$  vueltas, se conecta a la fuente de alimentación de 120 V AC; el devanado secundario, con  $N_2$  vueltas, se conecta al circuito de la fuente de alimentación DC. Por tanto, se desarrolla un voltaje de  $120(N_2/N_1)$

volts (rms) entre los dos terminales del devanado secundario. Al seleccionar una relación apropiada entre las vueltas ( $N_1/N_2$ ) del transformador, el diseñador reduce el voltaje de línea al valor apropiado para una determinada salida de voltaje DC de la fuente. [14]

Además de entregar la amplitud senoidal apropiada para la fuente de alimentación DC, el transformador crea aislamiento eléctrico entre el equipo electrónico y el circuito de la línea de alimentación AC. Dicho aislamiento minimiza el riesgo de una descarga eléctrica para el usuario del equipo. [14]

El rectificador de diodos convierte la senoide de entrada, en una salida unipolar que puede tener la forma pulsante indicada en la figura 3.12. Aunque esta onda tiene un promedio diferente de cero o una componente DC, su naturaleza de pulsos la vuelve inadecuada como fuente DC para circuitos electrónicos, de allí la necesidad de contar con un filtro. El bloque de filtro de la figura 3.12, reduce en gran medida las variaciones en la magnitud de la salida del rectificador. Una manera simple de reducir las variaciones de voltaje de salida es colocar un condensador como filtro. [14]

Aunque la salida del filtro rectificador es mucho más constante, todavía contiene una componente que depende del tiempo, conocido como rizo. Para reducirlo y estabilizar la magnitud del voltaje de salida DC de la fuente contra variaciones debidas a cambios en la corriente de carga, se emplea un regulador de voltaje. Este regulador se instrumenta mediante un circuito integrado.

#### ❖ Diseño de las fuentes de alimentación lineales

El módulo de fuente de alimentación, es la etapa que se encarga de suministrar la energía a todos los dispositivos del circuito electrónico. Lo primero que se necesita para la construcción de la fuente de alimentación es un transformador de potencia monofásico que en nuestro caso se seleccionó uno de 120Vrms en el primario y salidas de  $\pm 12$ Vrms con toma central. [14]

Las salidas de  $\pm 12V_{rms}$ , se utilizarán para la obtención de las fuentes de tensión fijas de  $\pm 12V_{DC}$ . Para estas fuentes, se hará uso de un rectificador de onda completa y reguladores de voltaje de tres terminales de la serie LM78XXCV y LM79XXCV. [14]

Los reguladores de voltaje usados para el diseño de las fuentes de alimentación de DC son:

- El LM7812, para obtener una tensión de salida de  $+12V_{DC}$ .
- El LM7912, para obtener una tensión de salida de  $-12V_{DC}$ .

Tanto a la entrada como a la salida de cada regulador se colocó un condensador de cerámica de  $0.1\mu F$ , con el objetivo de evitar cualquier señal de alta frecuencia que pretenda afectar el circuito electrónico y así como lograr una mayor estabilidad en las tensiones de entrada y salida del regulador. La figura 3.13, muestra el esquema de la fuente de alimentación diseñada con los componentes antes mencionados.

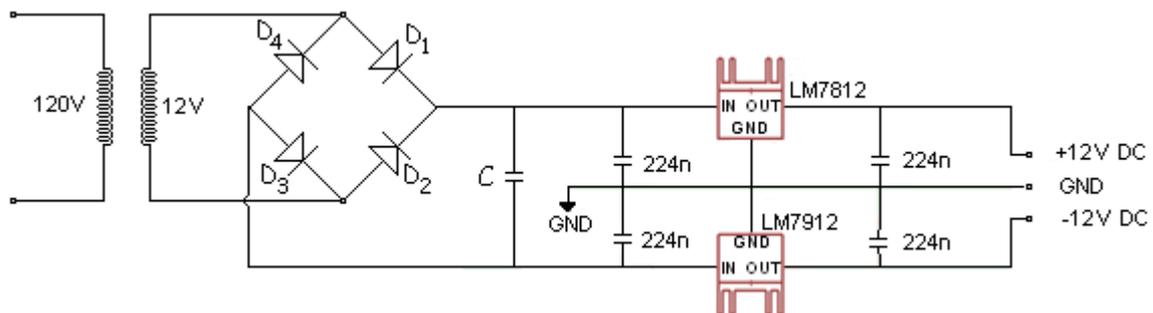


Figura 3.13 Circuito eléctrico de la fuente de alimentación.

Fuente: Propia

### 3.4.4.3 Construcción del software de adquisición y procesamiento de datos.

#### ❖ Etapa de adquisición de datos

La etapa de adquisición de datos se desarrolló utilizando los instrumentos virtuales, contenidos en la librería universal para LabVIEW de MEASUREMENT COMPUTING (UL for LabVIEW).

El diagrama de bloques implementado en la adquisición de datos tiene 8 canales analógicos de los cuales 7 están conformados por: tres canales de tensión, tres canales de corriente y un canal para la obtención de la velocidad de giro del rotor como se muestra en la figura 3.14.

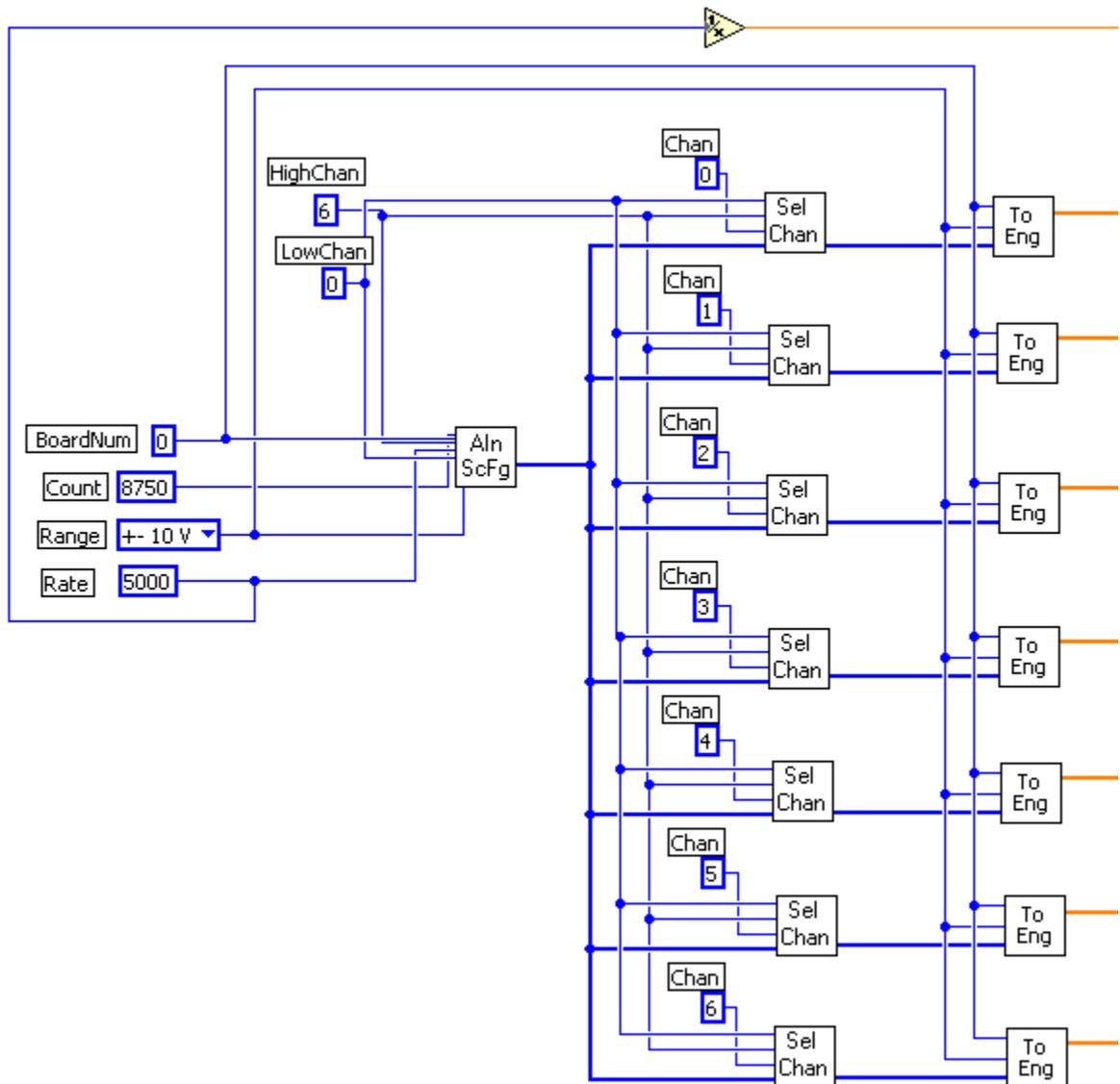
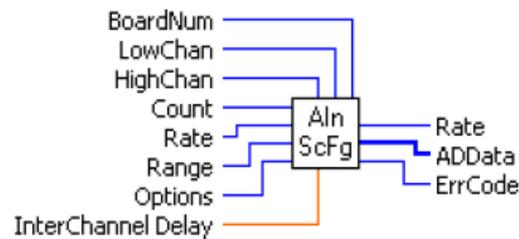


Figura 3.14. Diagrama de bloques desarrollado para la etapa de adquisición de datos.

Fuente: Propia

Se implementó el instrumento AInScFg.VI (Analog input scan as a foreground process), el cual escanea canales analógicos, almacenando las muestras en arreglos vectoriales. El diagrama de conexiones de dicho instrumento se muestra en la figura 3.15



*Figura 3.15. Diagrama de conexiones para el AInScFg.Vi.*

*Fuente: Propia.*

Los datos de entrada y salida necesarios por el instrumento se especifican de la siguiente forma:

Entradas:

- BoardNum: Es el número asignado a la tarjeta de adquisición de datos luego de ser instalada con el software INSTACAL.
- LowChan: Primer canal analógico a escanear.
- HighChan: Ultimo canal analógico a escanear.
- Count: Número de muestras a colectar.
- Rate: Frecuencia de muestreo en muestras por segundo.
- Range: Código de rango.

Salidas:

- ADData: Arreglo vectorial que almacena los datos muestreados.
- Rate: Frecuencia de muestreo actual.

La frecuencia de muestreo se especificó en 5000 muestras/segundo, por lo que cada uno de los 7 canales presenta un proceso de escaneo de datos a esta frecuencia. La tarjeta de adquisición USB 1208-FS por ende opera a una frecuencia de muestreo de 35 kmuestras/segundo.

La cantidad de muestras a coleccionar se especificó en 8750 muestras lo cual representa una cantidad de 1250 muestras para cada canal. El tiempo total de recolección de datos es de 1.75 segundos. Luego de adquirido los datos de cada uno de los canales a muestrear, el instrumento virtual SelChan.VI, selecciona las muestras de un canal específico almacenada en el arreglo vectorial para su posterior procesamiento de forma individual.

La etapa de adquisición es finalizada con el acondicionamiento de la señal almacenada en el arreglo vectorial mediante el instrumento ToEng.VI, el cual tiene como finalidad convertir los valores A/D almacenados en valores equivalentes de tensión (numéricos).

### ❖ Etapa de procesamiento de las señales de tensión

El procesamiento para las señales de tensión consiste principalmente en la etapa de calibración de las señales, la cual incluye un coeficiente de proporcionalidad para cada fase, esto debido a que entre transformadores la relación de transformación varía en un pequeño rango, lo que quiere decir que los coeficientes de proporcionalidad serán distintos para cada modulo de TP. Posteriormente se aplica la transformada rápida de Fourier mediante el instrumento Spectral Measurements.VI, por lo cual cada fase será observada tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, y finalmente almacenada en archivos de texto. El diagrama de bloques implementado exclusivamente para los canales de tensión se observa en la figura 3.16.

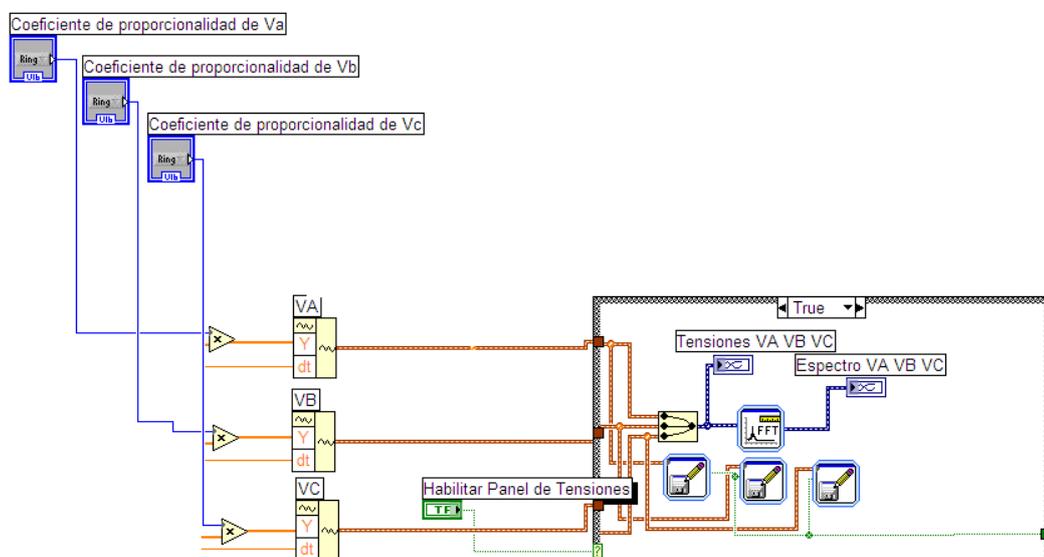


Figura 3.16. Diagrama de bloques simplificado para el procesamiento de las señales de tensión.

❖ **Etapa de procesamiento de las señales de corriente**

El procesamiento para las señales de corriente consiste en la etapa de calibración de las señales, las cuales incluye los factores de proporcionalidad para cada fase, de acuerdo a la relación de transformación. Posteriormente se aplica la transformada rápida de Fourier mediante el instrumento Spectral Measurements.VI, por lo cual cada fase será observada tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, y finalmente almacenada en archivos de texto. El diagrama de bloques implementado exclusivamente para los canales de corriente se observa en la figura 3.17

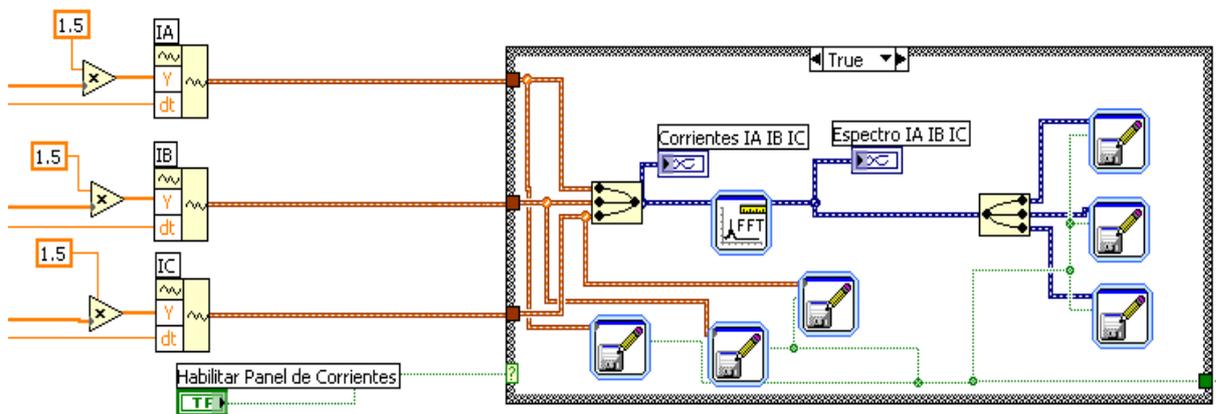


Figura 3.17 Diagrama de bloques simplificado para el procesamiento de las señales de corriente.

Fuente: Propia

❖ **Etapa de procesamiento de la señal de potencia instantánea**

La señal de potencia instantánea es obtenida mediante la multiplicación punto a punto de las señales de tensión y corriente correspondiente a cada una de las fases. La potencia instantánea en la fase a ( $P_a$ ), mediante la multiplicación de las señales  $V_a$  e  $I_a$ ;  $P_b$  y  $P_c$  se logran visualizar de igual forma con las señales  $V_b$ ,  $I_b$ ,  $V_c$  e  $I_c$  respectivamente.

Para lograr obtener estas señales correctamente es necesario poseer las corrientes y tensiones de fase del motor. El diagrama de bloques simplificado muestra la etapa de procesamiento para las señales de potencia, donde además de obtener la señal de potencia, se obtiene la

sumatoria de las mismas y el valor medio para cada una de estas. Este diagrama de bloques se muestra en la figura 3.18.

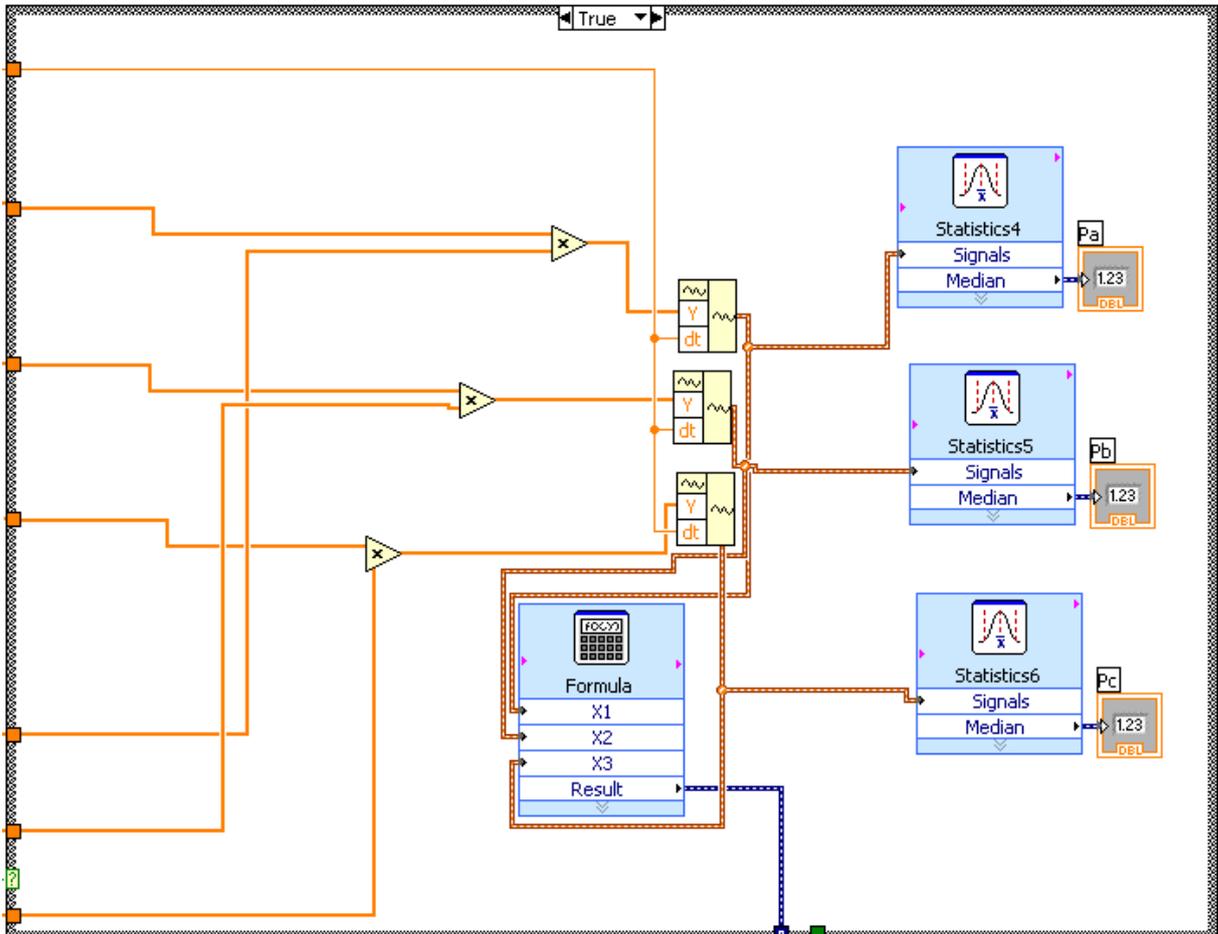


Figura 3.18. Diagrama de bloques simplificado para el procesamiento de las señales de potencia instantánea. Fuente: Propia

### ❖ Procesamiento para señal de velocidad

La velocidad de giro del motor es obtenida mediante el procesamiento de la señal de tensión arrojada por el generador de imán permanente. Para obtener el factor que relaciona dichas señales es necesario tomar en cuenta el divisor de tensión mostrado en la ecuación 3.1 y las relaciones de velocidad en función de la tensión mostradas en las ecuaciones 3.2 para los mesones uno y dos, y 3.3 para el mesón tres, obteniendo así las expresiones mostradas en las ecuaciones 3.4 y 3.5.

$$\omega_{1,2} = 71 * V_1 = 71(11V_2) = 781V_2 \quad (3.4)$$

$$\omega_3 = 727.1V_2 \quad (3.5)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad en RPM y  $V_2$  es la tensión en Voltios vista a la salida del divisor de tensión.

Una vez obtenido estos factores se hace uso de un instrumento virtual que permitirá seleccionar el mesón a utilizar.

Debido a la naturaleza de la señal de tensión, se hace uso de Statistics.VI, configurado para arrojar el valor medio de la señal, con el fin de calcular el valor medio de la porción de señal adquirida y así obtener el valor de velocidad, El diagrama de bloques simplificado para esta señal se muestra en la figura 3.19.

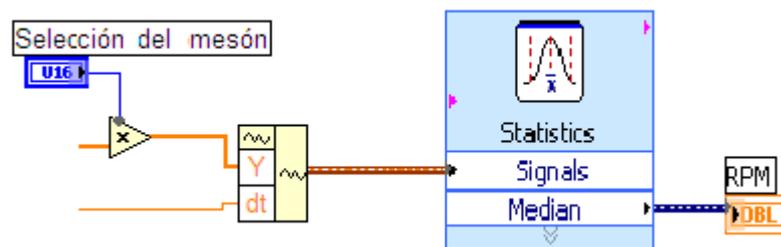
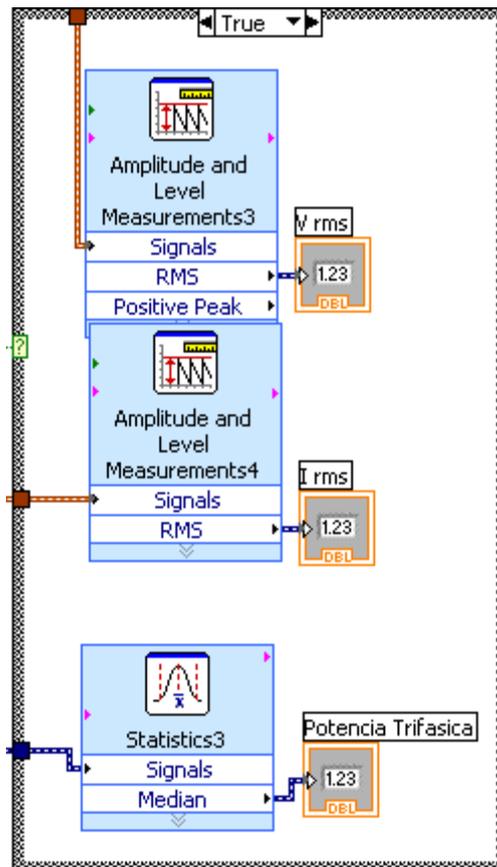


Figura 3.19. Diagrama de bloques simplificado para el procesamiento de la señal de velocidad.

Fuente: Propia

### ❖ Etapa de procesamiento de las variables necesarias para el desarrollo de las prácticas seleccionadas

Para desarrollar las prácticas se necesitan lecturas de instrumentos como lo son, Voltímetro, Amperímetro y Watímetro, por esta razón fue necesario implementar el instrumento Amplitude and Level Measurement.VI para obtener el valor eficaz de la señal de voltaje y corriente, así como también el valor medio de la potencia instantánea, con el fin de obtener la potencia media. Luego estos valores son mostrados por medio del uso de un indicador numérico. La figura 3.20 muestra el diagrama de bloques simplificado para el procesamiento de las señales de voltaje, corriente y potencia media necesarias para el desarrollo de la práctica.



*Figura 3.20. Diagrama de bloques simplificado para el procesamiento de las señales de voltaje, corriente y potencia media necesarias para el desarrollo de la práctica.*

*Fuente: Propia*

Por otra parte, en el ensayo en vacío es preciso realizar la gráfica Tensión – Potencia media, para ello se hizo uso del instrumento Amplitude and Level Measurements configurado para arrojar el valor eficaz de la señal de tensión. Adicionalmente se hizo uso de una función multiplicadora para obtener la potencia trifásica y luego mediante Amplitude and Level Measurement configurado para arrojar el valor medio de la potencia instantánea. Luego estos datos son tabulados mediante Build Table.VI para su posterior graficación. La figura 3.21 muestra el diagrama de bloques simplificado para tabular tensión – potencia media

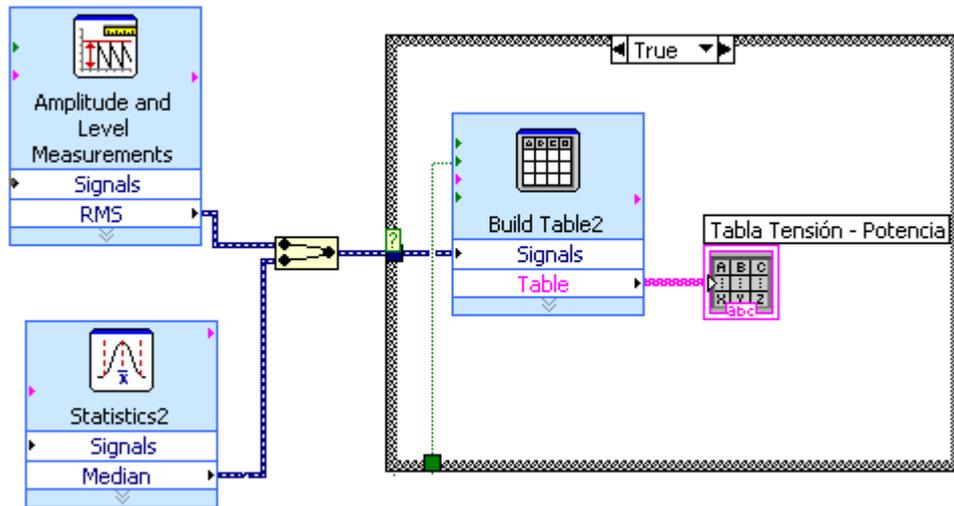
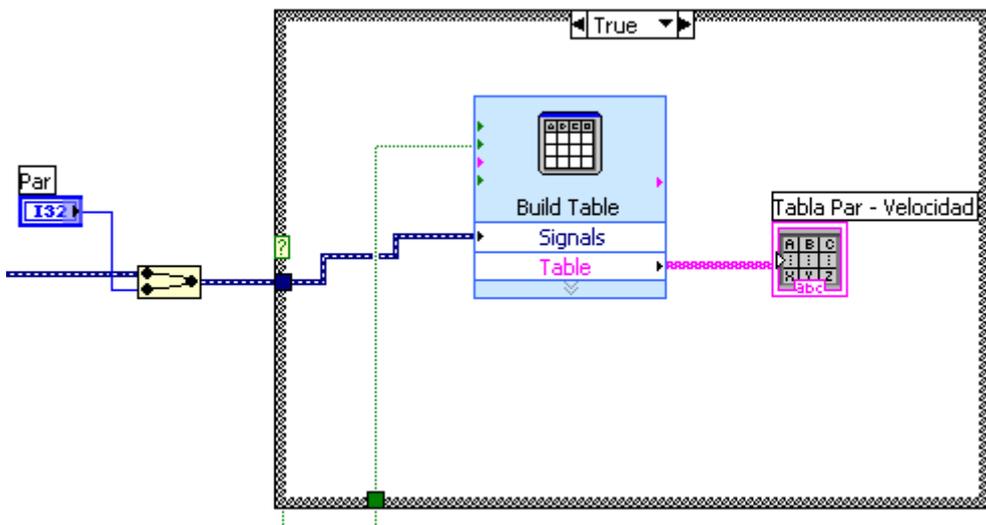


Figura 3.21. Diagrama de bloques simplificado para tabular tensión – potencia media

Fuente: Propia

Por último, con el fin de obtener la gráfica Par – Velocidad se construyó un diagrama de bloques que, mediante el uso de Buil Waveform.VI tabula el valor de par introducio por el usuario y el valor de velocidad del eje adquirido en la etapa de adquisición de la señal. La figura 3.22 muestra el digrama de bloques simplificado para tabular Par – Velocidad.



La figura 3.22. muestra el digrama de bloques simplificado para tabular Par – Velocidad.

Fuente: Propia

#### 3.4.4.4. Instrumento virtual de visualización y adquisición de datos (interfaz gráfica)

A continuación se describen las partes constitutivas del panel frontal del instrumento virtual desarrollado para la visualización y adquisición de los datos de cada uno de los 7 canales desarrollados, dicho panel ha sido subdividido en secciones para su observación individual; la sección del panel de control se muestra en la figura 3.23.

##### 3.4.4.4.1. Panel de Control

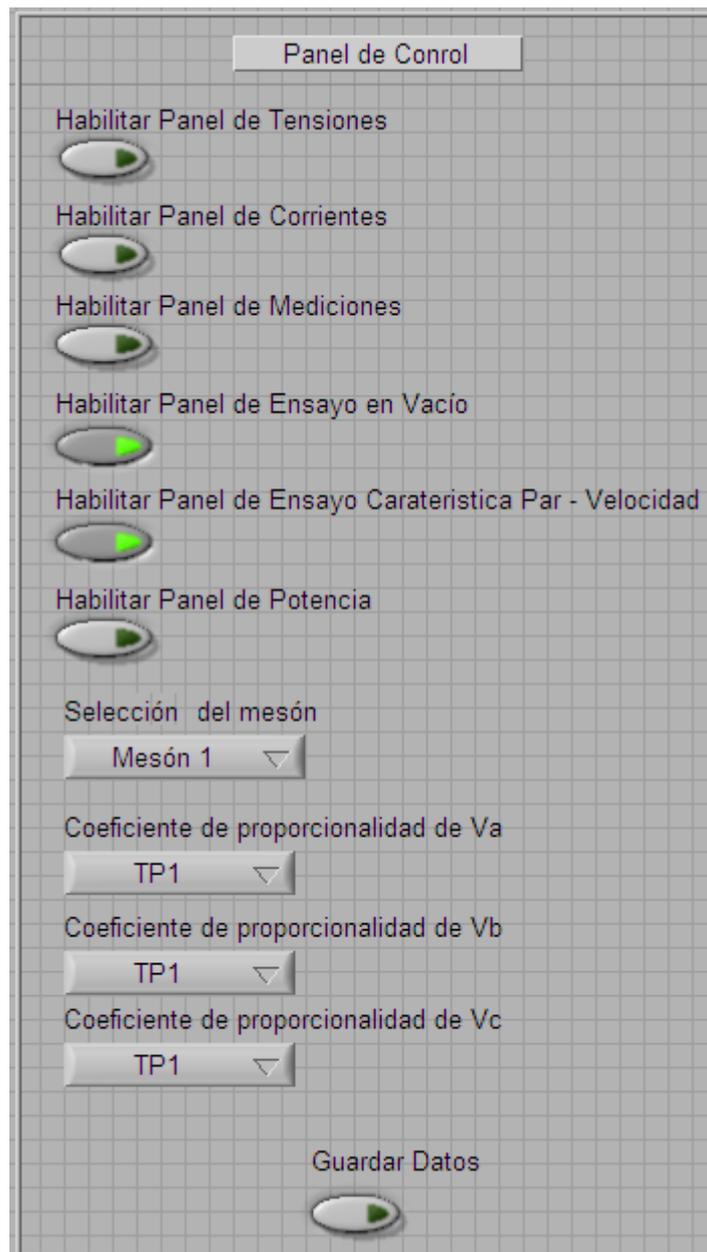


Figura 3.23. Panel de control del instrumento virtual desarrollado.

#### 3.4.4.4.2. Panel de tensiones

El panel mediante el cual pueden ser visualizadas las señales de tensión tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, es mostrado en la figura 3.24.

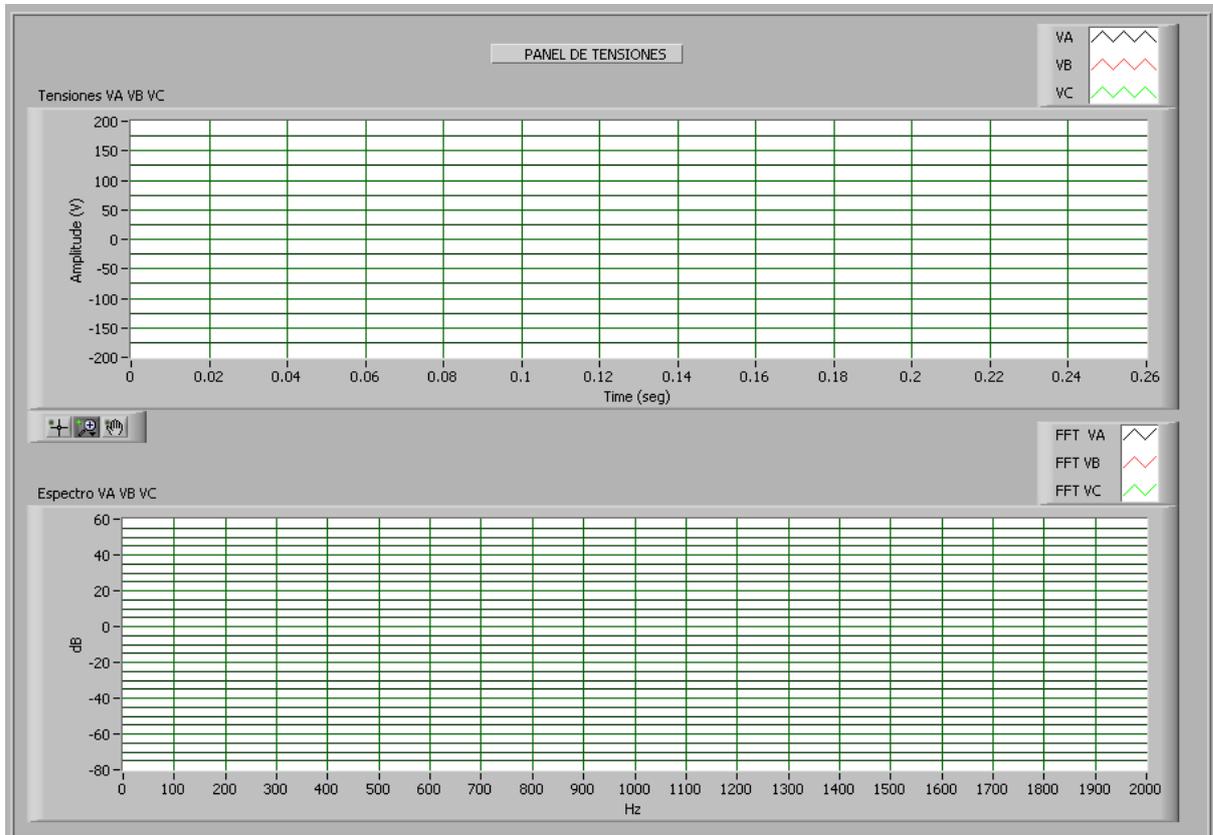


Figura 3.24. Panel de tensiones del instrumento virtual desarrollado.

#### 3.4.4.4.3. Panel de corrientes

El panel mediante el cual pueden ser visualizadas las señales de corriente tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, es mostrado en la figura 3.25.

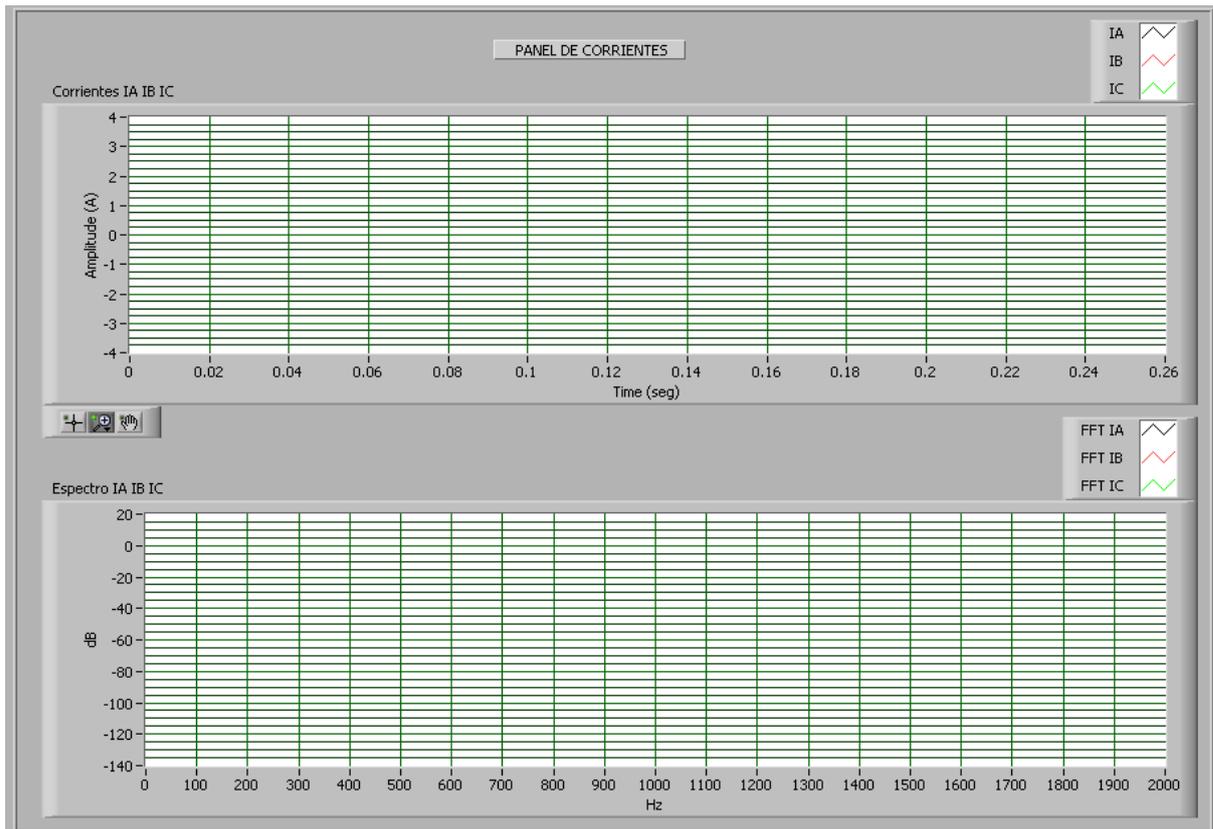


Figura 3.25. Panel de corrientes del instrumento virtual desarrollado.

#### 3.4.4.4.4. Panel de Ensayo en vacío.

El panel mediante el cual puede ser visualizado los valores para la realizar la tabla Tension-Potencia, es mostrado en la figura 3.26.



Figura 3.26. Panel de Ensayo en Vacío.

#### 3.4.4.4.5. Panel de Ensayo Característica Par-Velocidad.

El panel mediante el cual puede ser visualizado los valores para la realizar la tabla Par-Velocidad, es mostrado en la figura 3.27.



Figura 4.27. Panel de Ensayo Característica Par-Velocidad.

#### 3.4.4.4.6. Panel de Mediciones.

El panel mediante el cual puede ser visualizado la lectura de los instrumentos, es mostrado en la figura 4.28.



Figura 4.28. Panel de Mediciones.

Sobre la base de lo anteriormente expuesto se puede concluir que el propósito de este capítulo es detallar brevemente los pasos a seguir en este trabajo de investigación y el cumplimiento de cada una de las fases establecidas conducirá al logro de los objetivos planteados.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo, tomando en cuenta que se desea aplicar el Plan de Mantenimiento Predictivo a la Máquina Asíncrona o Motor de Inducción perteneciente al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería, se modifica la práctica número siete titulada “Motor de Inducción de Jaula de Ardilla” y la práctica número ocho titulada “Motor de Inducción de Rotor Devanado”, para introducir el Sistema de Adquisición de Datos especificado en el capítulo tres de la presente investigación, que nos ayudará a recopilar la data necesaria para aplicar las técnicas de mantenimiento predictivo a dicha máquina.

Adicionalmente, para todo aquel que desee aprender acerca del software LabVIEW 7.1 y la Adquisición de datos, se diseñó una práctica inductiva a dichos temas.

#### **4.1. PRÁCTICA INDUCTIVA A LABVIEW 7.1 Y LA ADQUISICIÓN DE DATOS**

##### **4.1.1. Objetivos**

Aprender el manejo básico de LabVIEW 7.1.

Adquirir datos por medio de la tarjeta de adquisición de datos DAQ 1208FS.

##### **4.1.2. Preparación previa.**

Leer acerca de LabVIEW, haciendo especial énfasis en los siguientes términos:

- Instrumento Virtual.
- Panel frontal.
- Diagrama de bloques.
- Controles e Indicadores.

Debe tener instalado Instacal, LabVIEW 7.1 y adicionalmente la librería “universal library for LabVIEW”, esta última se consigue en el cd de National Instrument.

### 4.1.3. Parte I: Construyendo un Instrumento Virtual.

1.1 Abra LabVIEW 7.1.

1.2 En el cuadro dialogo de LabVIEW, mostrado en la figura 4.1, haga click en el botón **New**, para abrir el cuadro de diálogo de **New** y seleccione **Blank VI**.

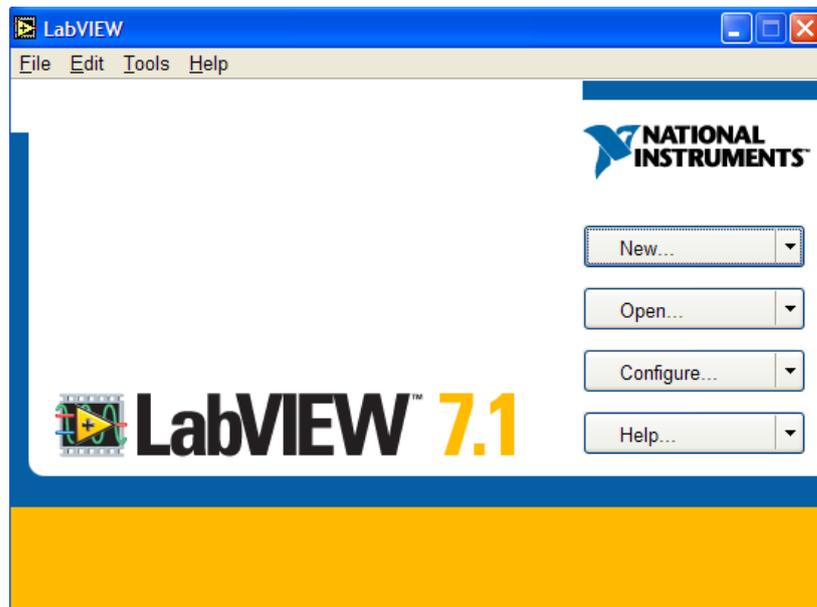


Figura 4.1. Cuadro de diálogo de LabVIEW.

1.3 En el diagrama de bloques, haga click derecho sobre cualquier parte para que aparezca la pestaña de funciones, luego sitúe el cursor sobre la opción **User Libraries>>MCC Data Acquisition >> Analog Input >> AInScFg** como se muestra en la figura 4.2. Este instrumento, escanea canales analógicos, almacenando las muestras en arreglos vectoriales. Sitúe dicho instrumento en el diagrama de bloques.

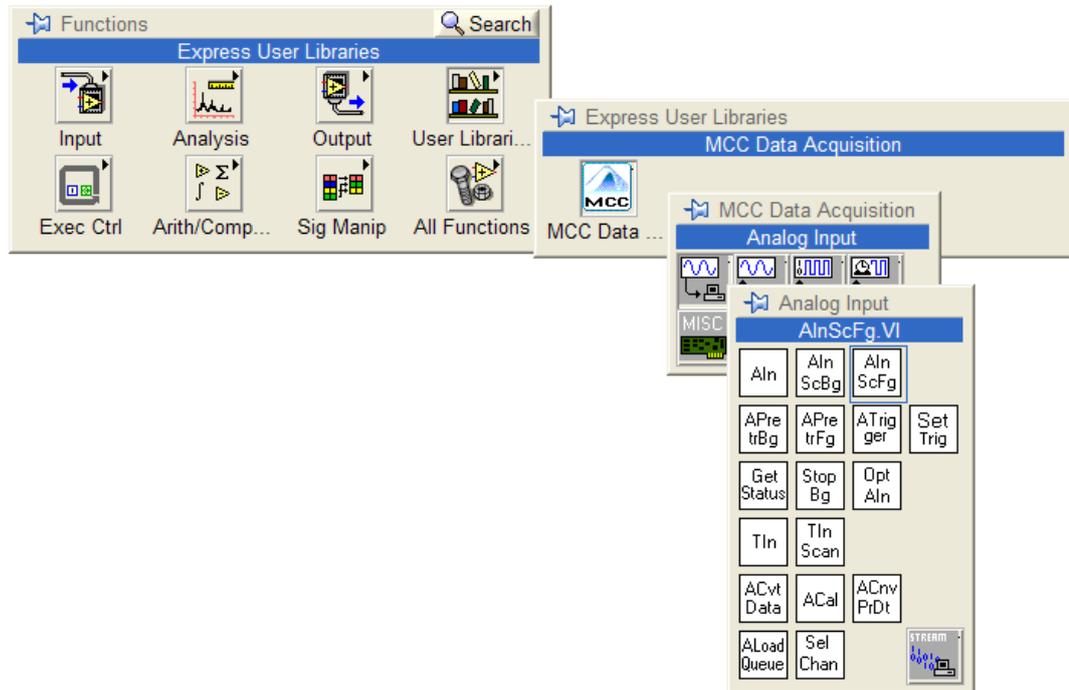


Figura 4.2. Selección del instrumento AInScFg.

- 1.4 El instrumento AInScFg, precisa de entradas como lo son BoardNum, LowChan, HighChan, Count, Rate, Range. Para ello se pueden usar controles ó constantes. Si se usan controles se podrán cambiar estos datos desde el panel de control, si se usan constantes solo se podrán cambiar los datos desde el diagrama de bloques antes de correr el programa. En este caso se usarán controles, para adicionar controles se debe situar el cursor sobre la entrada a la que se le quiere adicionar un control, note que el cursor cambia su forma a una carreta de cable y aparece el nombre del terminal. hacer click derecho y luego seleccionar **create >> control** como se muestra en la figura 4.3. Proceda a adicionar controles a los terminales de entrada mencionados anteriormente.

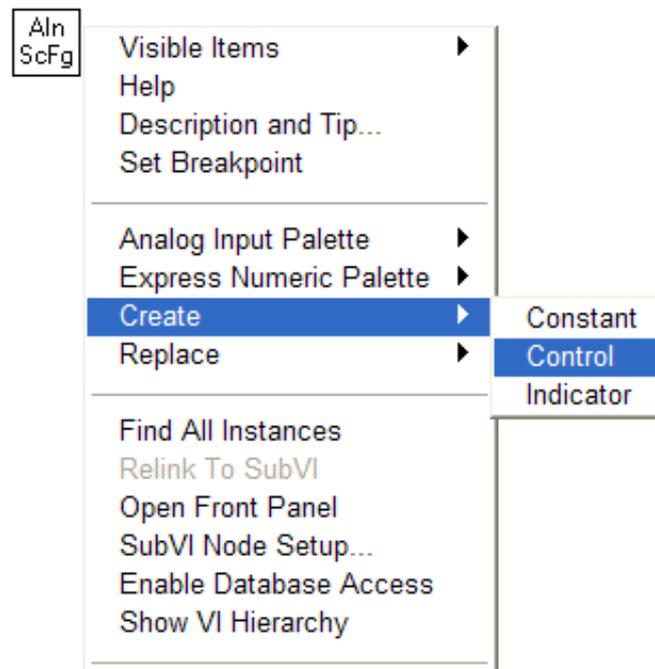


Figura 4.3. Adicionar un control a la entrada de un instrumento.

- 1.5 Ahora proceda a cablear la salida ADDData del instrumento AInScFg, que como ya se dijo dicha salida es un arreglo vectorial que almacena los datos muestreados, por lo que se necesita de un instrumento que seleccione las muestras de un canal específico almacenada en el arreglo vectorial para su posterior procesamiento de forma individual. Tal instrumento se llama Se llama SelChan.VI y para colocarlo en la salida, al igual que al crear los controles se sitúa el cursor sobre el terminal ADDData, haga click derecho y luego sitúese sobre la opción **Analog Input Palette** >> **SelChan.VI** como se muestra n la figura 4.4. Luego proceda a cablear las entradas LowChan, HighChan y Data con LowChan, HighChan y ADDData de AInScFg, respectivamente. Y por ultimo en el terminal CHAN colóquele una constante como se muestra en la figura 4.5.

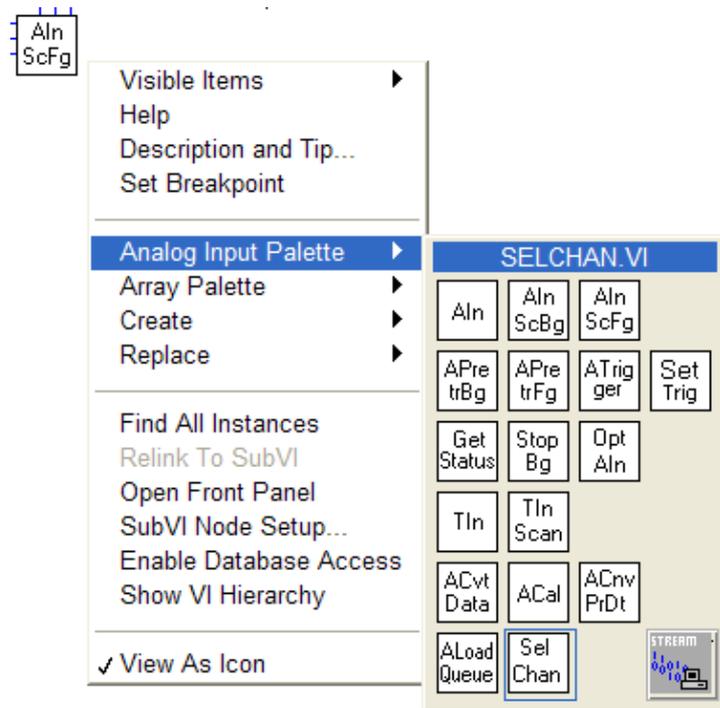


Figura 4.4. Selección del instrumento SelChan.VI.

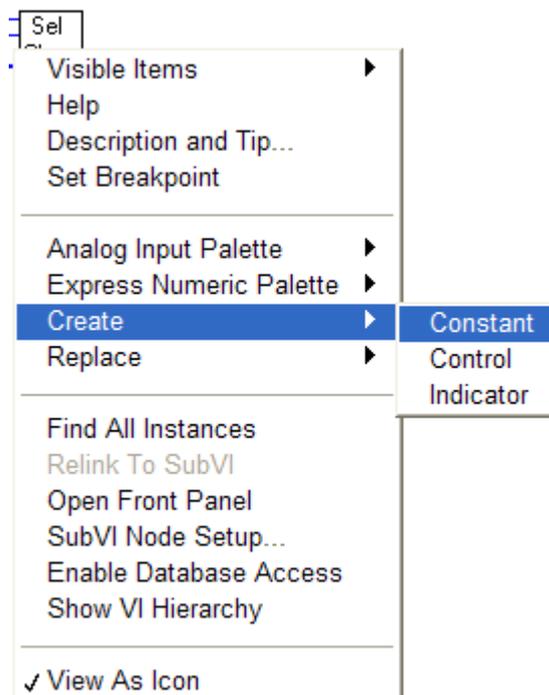


Figura 4.5. Crear una constante para el terminal CHAN.

- 1.6 Ahora proceda a cablear la salida Data del instrumento SelChan, en esta ocasión se usará el instrumento ToEng.VI, el cual tiene como finalidad convertir los valores A/D almacenados en valores equivalentes de tensión (numéricos). Para seleccionar el instrumento ToEng, haga click derecho sobre cualquier parte del diagrama de bloques para que aparezca la pestaña de funciones, luego sitúe el cursor sobre la opción **User Libraries>>MCC Data Acquisition >> Signal Conditioning >> ToEng** como se muestra en la figura 4.6. Luego proceda a cablear las entradas BoardNum, Range y Data.

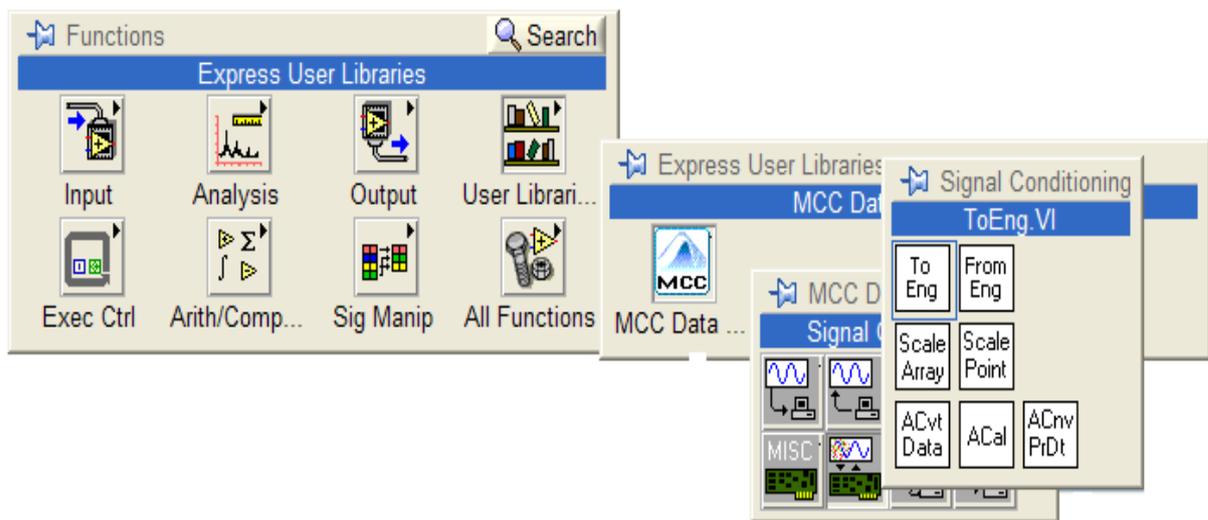


Figura 4.6. Selección del instrumento ToEng.

- 1.7 Inserte un instrumento Build Waveform, para ello abra el menú de funciones luego seleccione **All Functions >> Waveform >> Build Waveform**, como lo indica la figura 4.7 y coloque el instrumento cerca de la salida de ToEng. Este instrumento tiene la función de escalar el eje de tiempo, debido a la variación de la frecuencia analógica original producida por la frecuencia de muestreo.

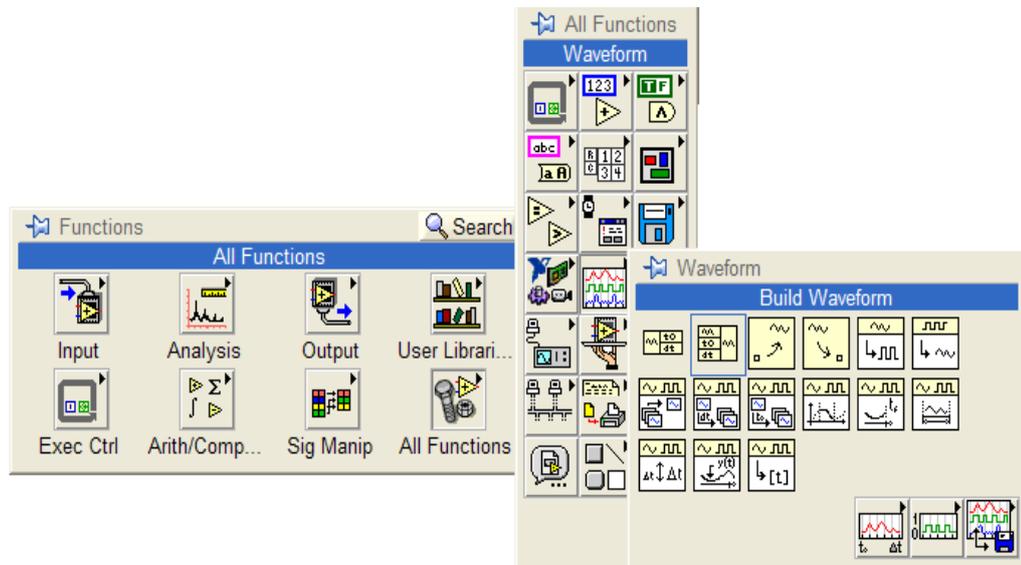


Figura 4.7. Selección del instrumento Build Waveform.

- 1.8 Haga click sobre el instrumento Build Waveform y cambie la entrada T0 por Y, como se muestra en la figura 4.8.

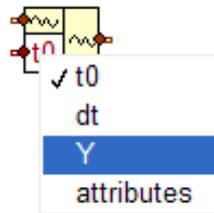


Figura 4.8. Cambiar la entrada a Y en el instrumento BuildWaveform.

- 1.9 Haga click derecho sobre el instrumento Build Waveform y selecciones Add Element como se muestra en la figura 4.9 y cambie este nuevo elemento agregado a dt de la misma forma que lo hizo en el paso anterior.

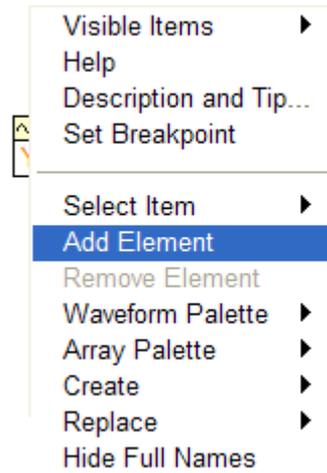


Figura 4.9. Adicionar un elemento en Build Waveform.

1.10 Inserte una función Recíproca, para ello abra el menú de funciones luego seleccione **Arithmetic & Comparison >> Numeric >> Reciprocal**, tal y como lo indica la figura 4.10 y coloque el instrumento en el diagrama de bloques y haga una conexión desde Rate hasta la entrada de la función recíproca, adicionalmente conecte la función recíproca con la entrada dt del instrumento Build Waveform; por otra parte conecte la salida EngUnits del instrumento ToEng con la entrada Y del instrumento Build Waveform. Su diagrama de bloques debe ser parecido al de la figura 4.11.

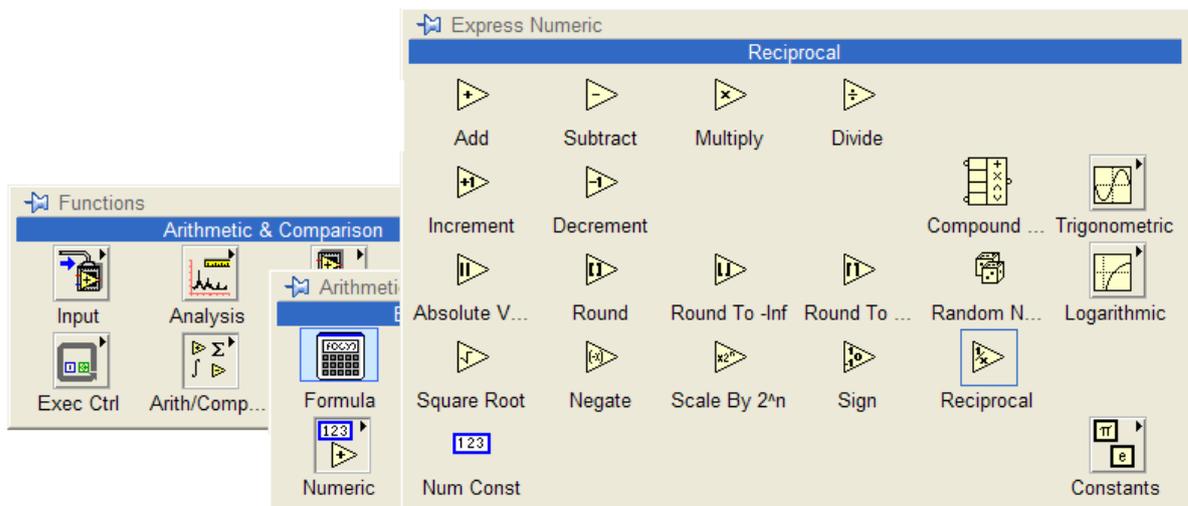


Figura 4.10. Selección de función recíproca.

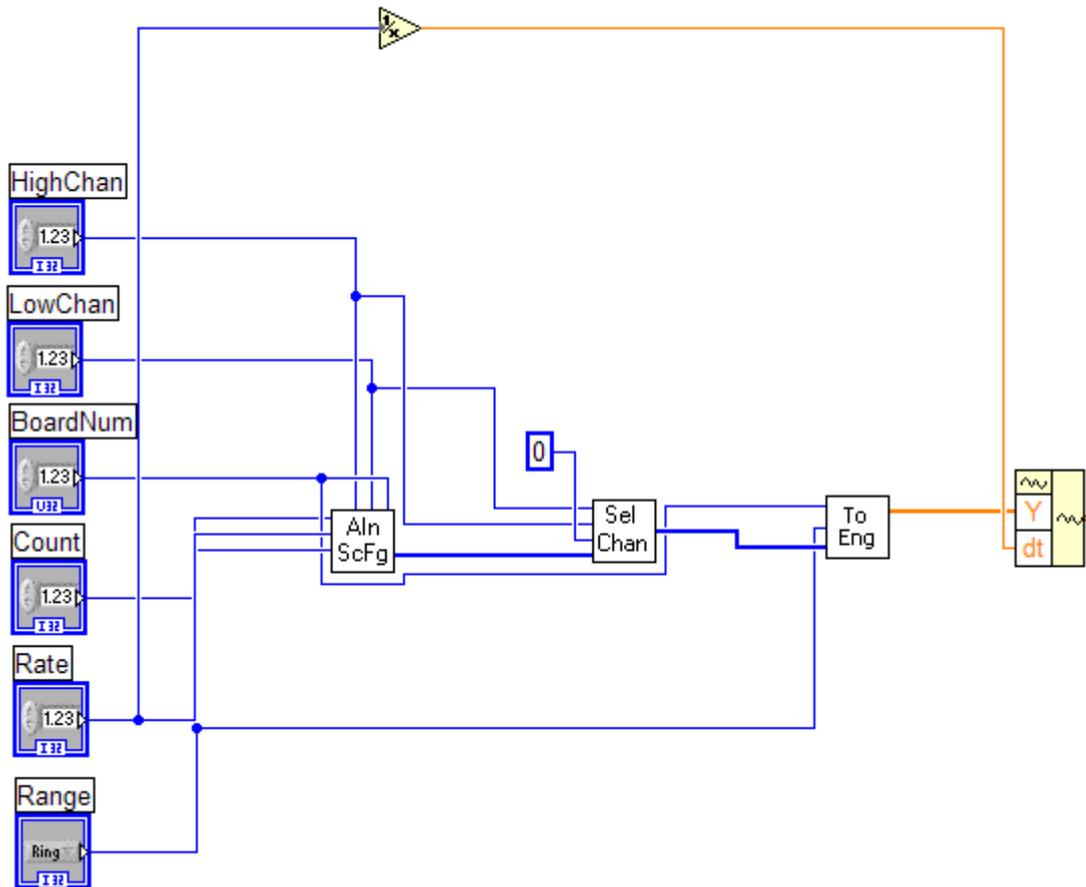


Figura 4.11. Diagrama de bloques.

- 1.11 Haga click derecho en cualquier parte del panel frontal, luego situé el cursor sobre la opción **Graph Indicators** y una vez allí seleccione la opción **Waveform Graph** como lo indica la figura 4.12 y colóquelo en el lugar que desee sobre el panel frontal. Note una figura parecida a un osciloscopio apareció en el diagrama de bloques, con la etiqueta **Waveform Graph**. Conecte el terminal Output waveform del instrumento Build WaveForm con el único terminal de entrada del waveform graph.

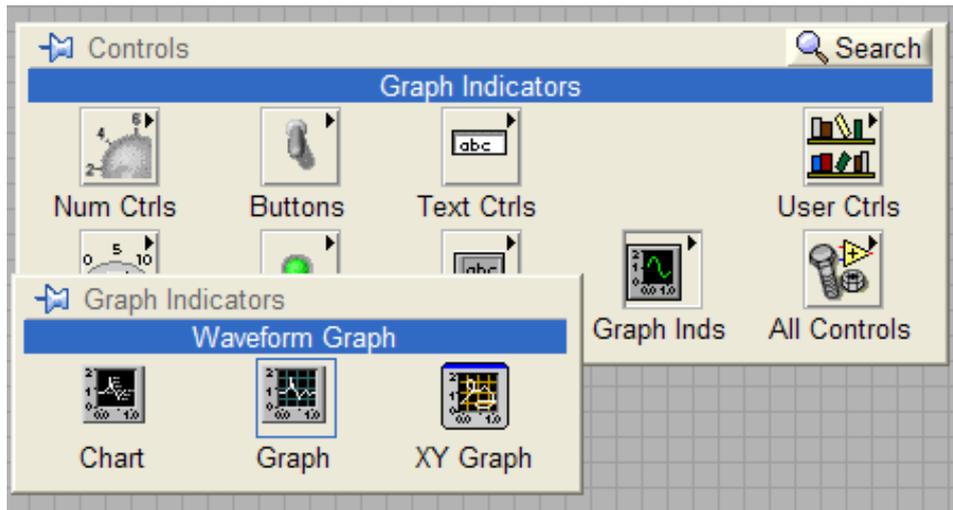


Figura 4.12. Selección de una grafica de forma de onda.

- 1.12 Abra el menú de funciones luego seleccione la opción **Analysis >> Spectral**, como lo indica la figura 4.13 y sitúelo sobre el diagrama de bloques, luego haga una conexión entre el terminal Signals del instrumento Spectral Measurement y el cable que une la salida de Buid Waveform con la gráfica de forma de onda, como lo indica la figura 4.14.

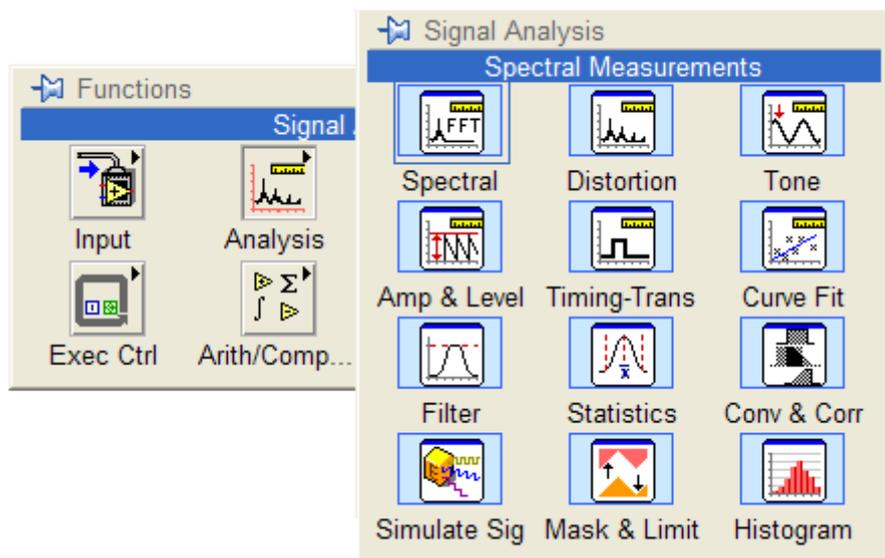
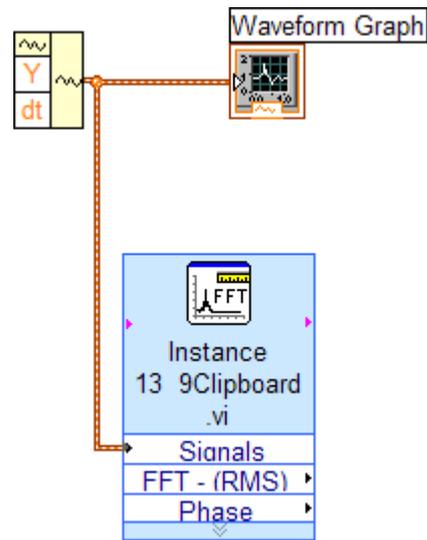


Figura 4.13. Selección del instrumento Spectral Measurements.

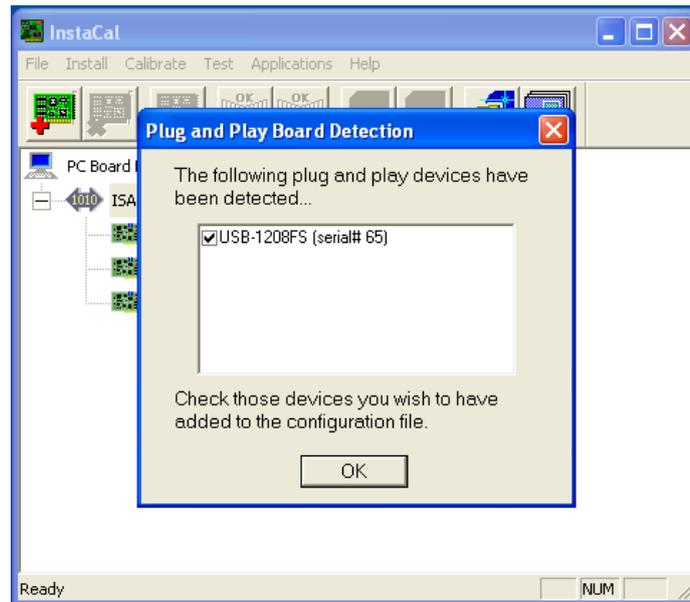


*Figura 4.14. Conexión del instrumento Spectral Measurements.*

- 1.13 Coloque otra grafica de forma de onda, esta vez conéctela al terminal FFT del instrumento Spectral Measurements.
- 1.14 Guarde el Instrumento Virtual realizado.

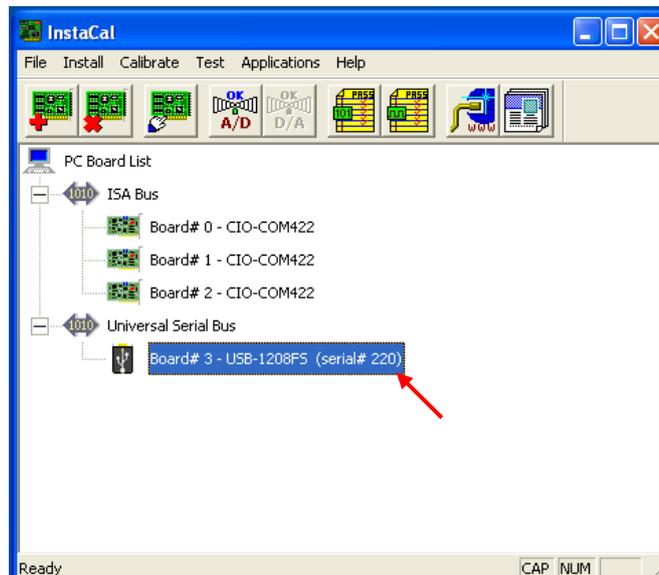
#### 4.1.4. Parte II: Adquiriendo un señal.

- 2.1. Conecte la máquina de acuerdo al diagrama del circuito mostrado en la figura 4.22. No supere ningún valor nominal durante las pruebas
- 2.2. Abra el software INSTACAL, aparecerá una ventana que indica que la tarjeta ha sido detectada "Plug and Play Board Detection. Presionar OK. La figura 4.15 muestra la ventana mencionada.



*Figura 4.15. Ventana que indica que la tarjeta ha sido detectada por el software InstaCal.*

2.3. Haga doble click sobre la tarjeta reconocida por el software (en el caso de que hayan varias tarjetas instaladas previamente, seleccione una de la lista) y configure la tarjeta en modo común “8 Single Ended”. Esto con el fin de tener acceso a 8 canales. Las figuras 4.16 y 4.17 muestran estas ventanas.



*Figura 4.16. Ventana que muestra la tarjeta detectada por el software InstaCal.*

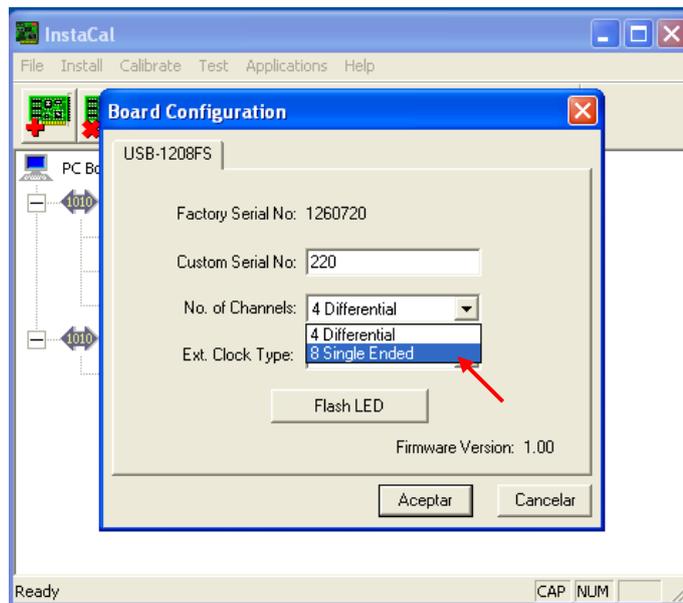


Figura 4.17. Ventana que muestra la configuración de la tarjeta en Modo Común.

2.4. Haga click sobre la opción “flash led” como se indica en la figura 4.18 y visualice en el orificio “LED” del dispositivo de adquisición de datos que efectivamente la luz se torne intermitente. Si esto sucede entonces ha escogido la tarjeta correcta, sino verifique la conexión USB o pruebe con otra tarjeta de la lista.

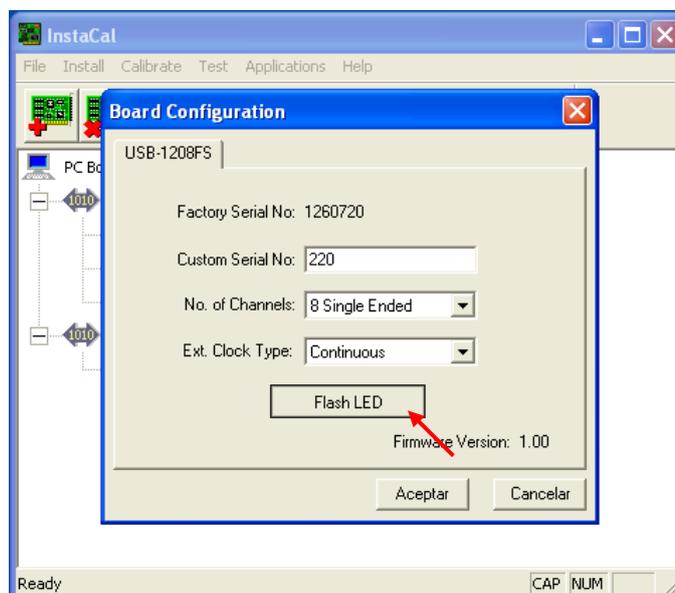


Figura 4.18. Ventana que muestra la opción “flash led”.

2.5. Una vez reconocida la tarjeta de adquisición de datos, tomar nota del número de la tarjeta (Board Number), tal y como se muestra en la figura 4.19.

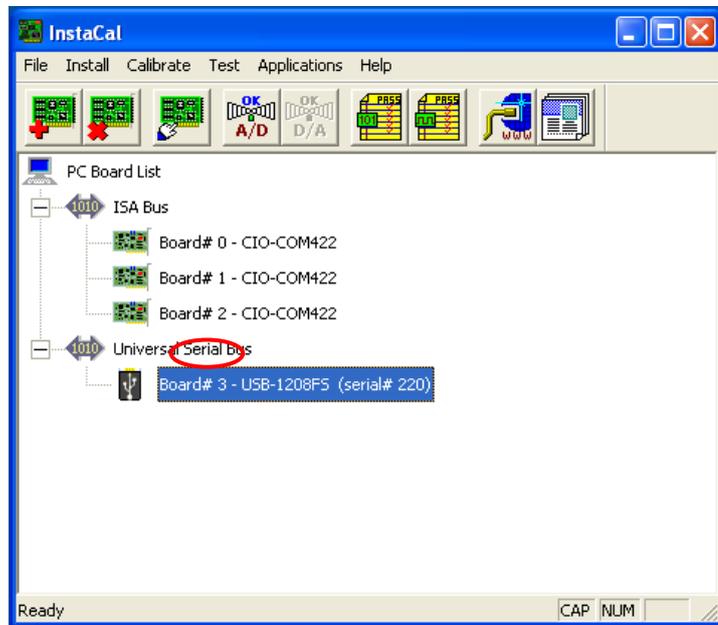


Figura 4.19. Número de la tarjeta.

2.6. Abra el software LabVIEW 7.1, haga click en file/open, tal y como lo indica la figura 4.20 y seleccione el archivo que usted hizo en la parte I.

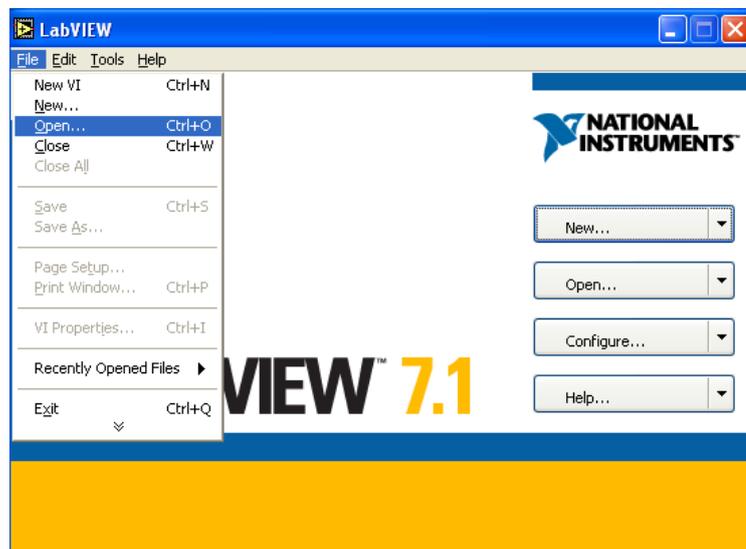


Figura 4.20. Muestra de la ventana al abrir el software Labview.

2.7. En el panel frontal, proceda a configurar los valores de entrada necesarios para el escaneo analógico.

- BoardNum: Reescriba el número de la tarjeta.
- LowChan y HighChan: coloque 0 y 7 respectivamente para indicar que se usarán los 8 canales.
- Count: Especifique la cantidad total de muestras a coleccionar, tenga en cuenta que la cantidad de muestras por canal será el número que introduzca entre 8.
- Rate: Indique la frecuencia de muestreo en muestras por segundo. Debe tener en cuenta que el Rate total de adquisición para todos los canales, no debe exceder las 50k muestras por segundo. Esto es, usted puede adquirir desde un solo canal @ 50.000 muestras/segundo, con dos canales @ 25.000 muestras/segundo, por lo que, para ocho canales usted puede establecer máximo un Rate de 6250 muestras/segundo.
- Range: El rango de entrada para el modo común es único, y su valor es  $\pm 10V$ .

2.8. Presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición. La figura 4.21 muestra este cuadro.

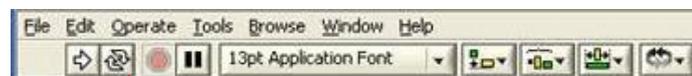


Figura 4.21. Botón RUN.

2.9. Usted está viendo la forma de onda de la tensión conectada al canal 0 con su respectivo espectro de frecuencia. Para observar las tensiones conectadas a los canales 1 y 2 detenga el programa, cambie el número del instrumento SelChan por 1 y 2 respectivamente y luego pulse el botón RUN de nuevo para observarla.

### Problemas y Tarea.

- Comentar sobre las formas de onda de la tensión observada tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

- Realice un instrumento virtual en el que pueda observar las tres tensiones simultáneamente en la misma gráfica de forma de onda, así como también el espectro de frecuencia.
- Concluya sobre los resultados de la práctica.

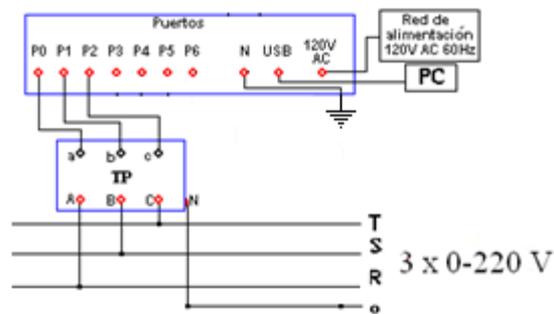


Figura 4.22. Diagrama de conexiones.

## **4.2. MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA.**

### **4.2.1. Objetivos**

1. Determinar el circuito equivalente de un motor de inducción de jaula de ardilla (MIJA).
2. Medir la eficiencia a diferentes cargas de un MIJA.
3. Graficar la característica torque-deslizamiento a dos tensiones de alimentación diferentes.
4. Estudiar los efectos que sobre la máquina tiene la pérdida de una de las fases de alimentación.

### **4.2.2. Preparación Previa**

1. Dibuje el circuito equivalente por fase de un motor de inducción, referido al estator. Interprete el significado de cada uno de los elementos que contiene el modelo.
2. ¿Cuál es la utilidad del modelo circuital del motor de inducción?
3. Defina: Eficiencia (n) y Deslizamiento (s).
4. Clasifique las pérdidas asociadas al funcionamiento de un motor de inducción.
5. Dibuje una característica típica Torque vs. Deslizamiento para un motor de inducción. Estudie los efectos de la variación de tensión en bornes sobre esta característica.
6. Suponga que un motor de inducción trifásico está acoplado a una carga mecánica que demanda potencia constante. ¿Qué efecto tendría sobre la máquina la pérdida de una de las fases de alimentación? Razona.
7. Mencione algunas ventajas del motor de inducción de jaula de ardilla frente al motor sincrónico.
8. Investigue sobre el uso del software LabVIEW.

### 4.2.3. Procedimiento

#### Determinación del circuito equivalente.

4.2.3.1. Tome nota de los datos de placa de la máquina a ensayar. Mida la resistencia de una de las fases del motor usando un método conveniente. Conecte luego la máquina de acuerdo al diagrama del circuito que se muestra en la figura 4.38. No supere ningún valor nominal durante las pruebas. (En el Apéndice A y en el Apéndice B puede visualizar el motor y los equipos eléctricos pertenecientes al Laboratorio de Máquinas Eléctricas, los cuales son utilizados para la realización de esta práctica).

4.2.3.2. Abra el software INSTACAL, aparecerá una ventana que indica que la tarjeta ha sido detectada “Plug and Play Board Detection. Presionar OK. La figura 4.23 muestra la ventana mencionada.

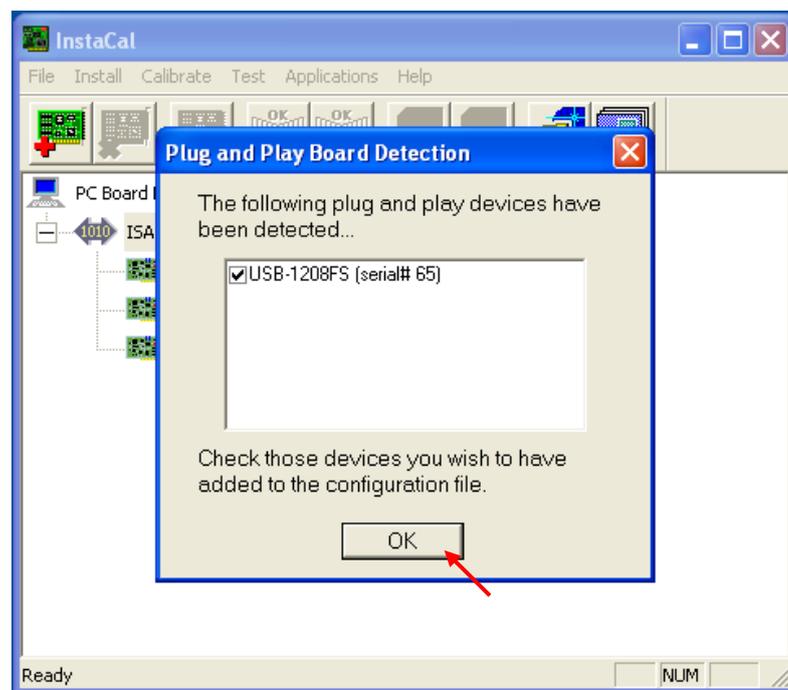


Figura 4.23. Ventana que indica que la tarjeta ha sido detectada por el software InstaCal.

4.2.3.3. Haga doble click sobre la tarjeta reconocida por el software (en el caso de que hayan varias tarjetas instaladas previamente, seleccione una de la lista) y configure la tarjeta en modo común “8 Single Ended”. Las figuras 4.24 y 4.25 muestran estas ventanas.

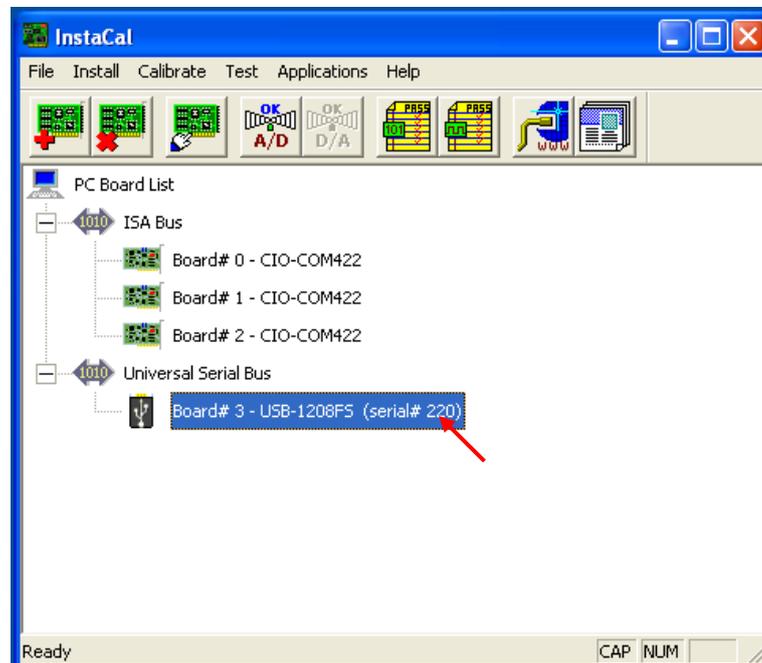


Figura 4.24. Ventana que muestra la tarjeta detectada por el software InstaCal.

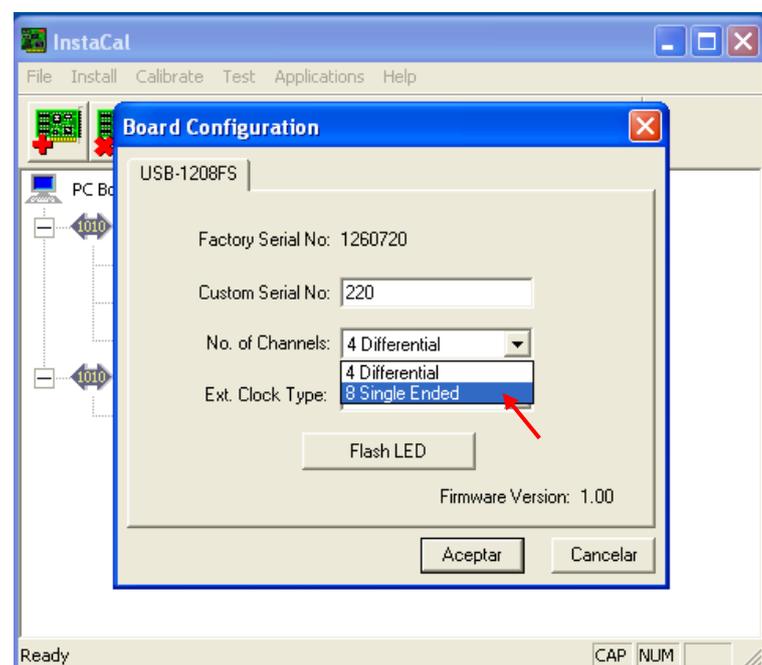


Figura 4.25. Ventana que muestra la configuración de la tarjeta en Modo Común.

4.2.3.4. Haga click sobre la opción “flash led” como se indica en la figura 4.26 y visualice en el orificio “LED” del dispositivo de adquisición de datos que efectivamente la luz se torne intermitente. Si esto sucede entonces ha escogido la tarjeta correcta, sino verifique la conexión USB o pruebe con otra tarjeta de la lista.

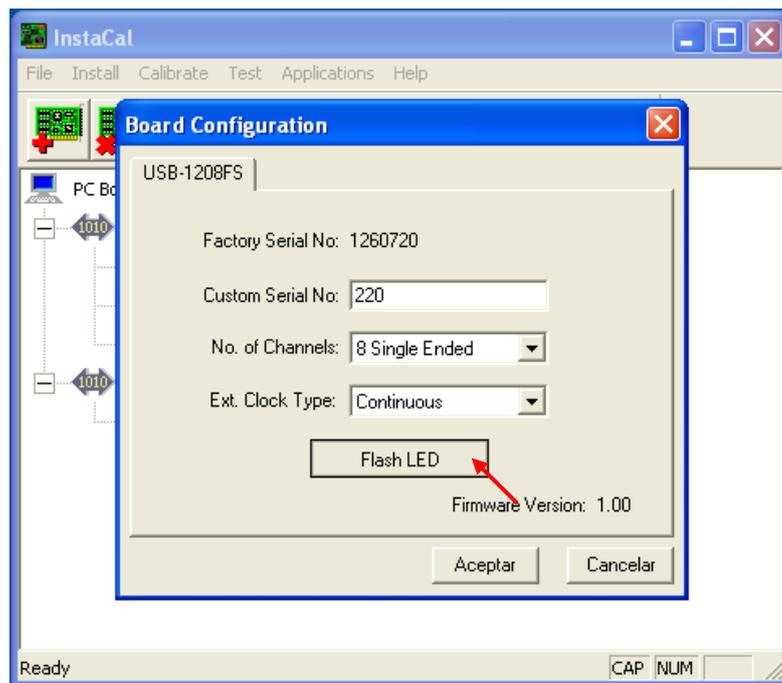


Figura 4.26. Ventana que muestra la opción “flash led”.

4.2.3.5. Una vez reconocida la tarjeta de adquisición de datos, tomar nota del número de la tarjeta (Board Number), tal y como se muestra en la figura 4.27.

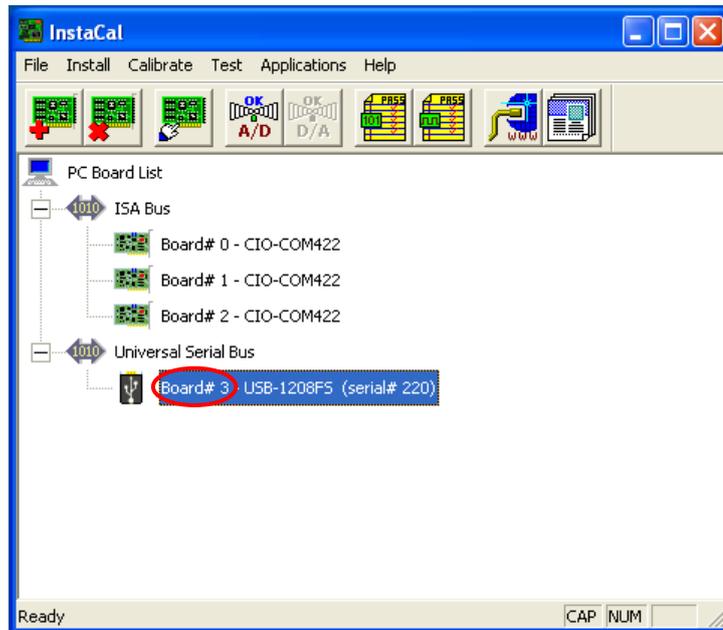


Figura 4.27. Número de la tarjeta.

4.2.3.6. Abra el software LabVIEW 7.1, haga click en file/open, tal y como lo indica la figura 4.28 y seleccione el archivo “Adquisición\_de\_Datos” en la siguiente dirección: Mis documentos /IV\_Práctica\_MOTOR\_JAULA\_DE\_ARDILLA.

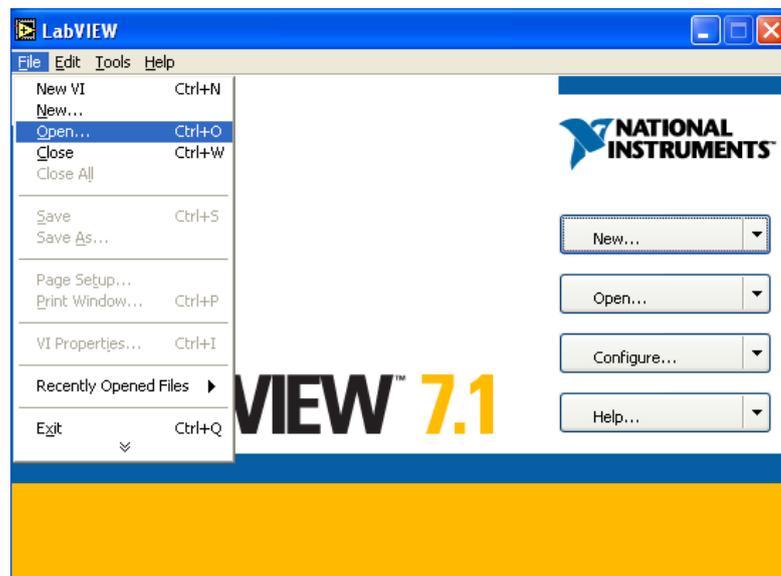
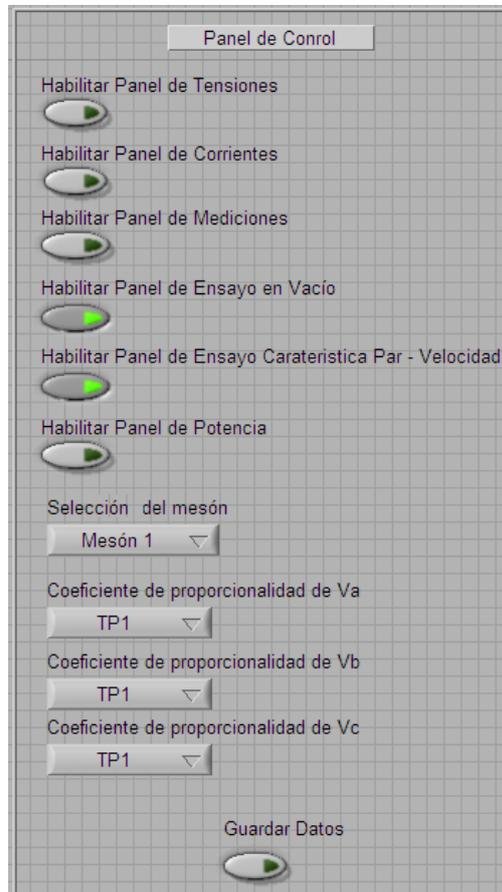


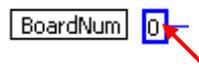
Figura 4.28. Muestra de la ventana al abrir el software Labview.

4.2.3.7. Configure el Panel de Control de acuerdo al Mesón en el cual este realizando el montaje y de acuerdo al TP que esté utilizando, tal y como se muestra en la figura 4.29 para el mesón 1 y el TP1.



**Figura 4.29** Configuración del Panel de Control

4.2.3.8. Reescriba el número de la tarjeta en el cuadro BoardNum del Instrumento Virtual. La figura 4.30 muestra este cuadro.



**Figura 4.30.** Cuadro BoardNum.

4.2.3.9. Arranque a tensión reducida sin carga mecánica acoplada al eje del motor, con el fin de dar inicio al ensayo de vacío.

4.2.3.10. Incremente la magnitud de la tensión de alimentación hasta llegar a la tensión nominal. Presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición como se muestra en la figura 4.31. Observe el Panel de Mediciones que se encuentra en el Panel Frontal del programa en ejecución (ver figura 4.32) y tome nota de  $I_{RMS}$ ,  $V_{RMS}$ , Potencia media y la velocidad. Compare la velocidad del motor con la velocidad sincrónica. En el Panel de Ensayo en Vacío se puede observar los datos para realizar la tabla Tensión Vs Potencia que posteriormente utilizarán para graficar. Dicho panel se muestra en la figura 4.33.

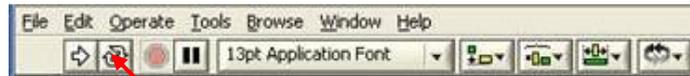


Figura 4.31. Botón RUN.

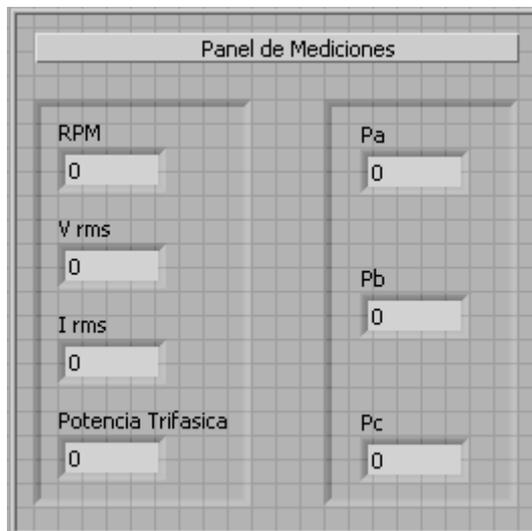


Figura 4.32. Panel de Mediciones.

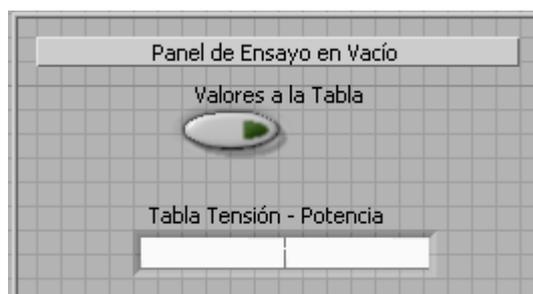
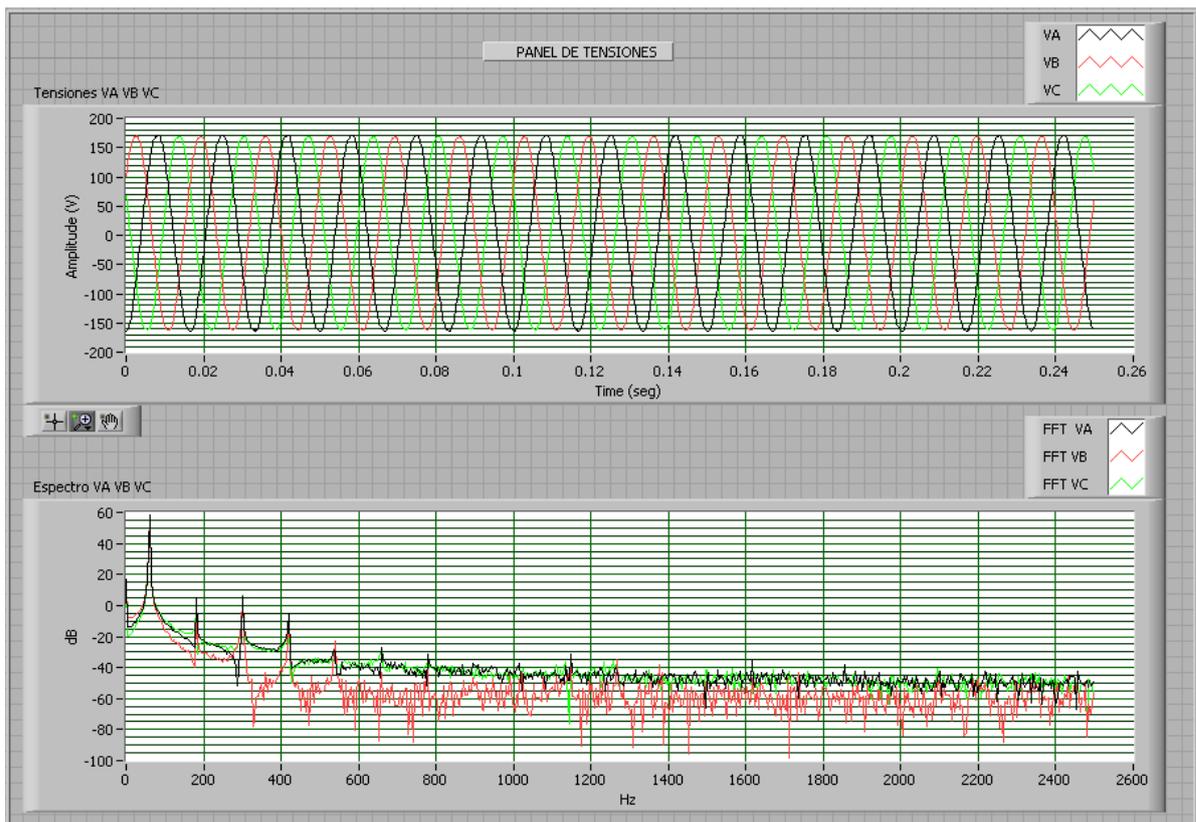


Figura 4.33. Panel de Ensayo en Vacío.

4.2.3.11. Disminuya la tensión de alimentación en pasos de 10 V y tome nota al igual que en el paso 4.2.3.9.

4.2.3.12. Visualice las señales de Tensiones y Corrientes Trifásicas en el panel frontal del programa de adquisición de datos. Las figuras 4.34 y 4.35 muestran las señales de tensión y corriente que deben ser vistas durante el desarrollo de la práctica.



*Figura 4.34. Señales de Tensión adquiridas durante el desarrollo de la práctica.*

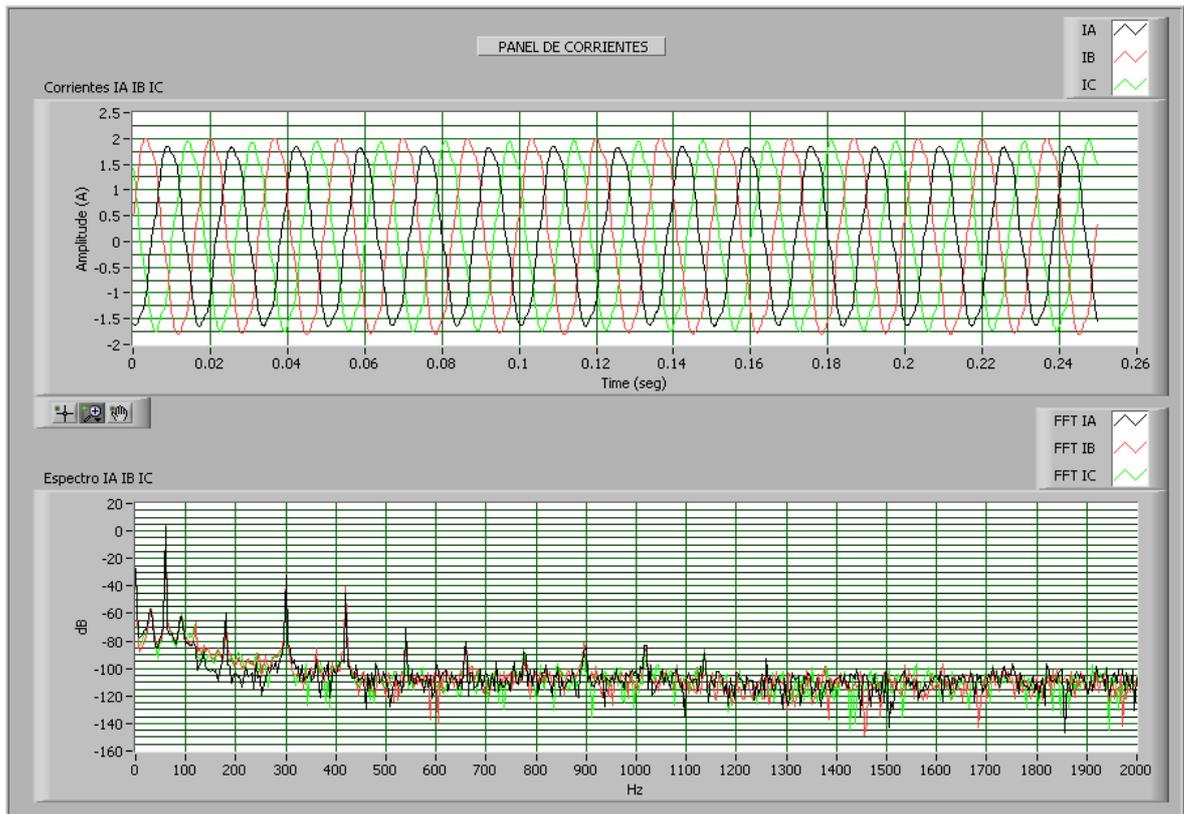


Figura 4.35. Señales de Corriente adquiridas durante el desarrollo de la práctica.

4.2.3.13.Reduzca la tensión de alimentación a cero. Presione el botón STOP del panel frontal como lo indica la figura 4.36. Impida el giro del motor bloqueando su eje de alguna forma. Se procederá ahora a iniciar el ensayo a rotor bloqueado.

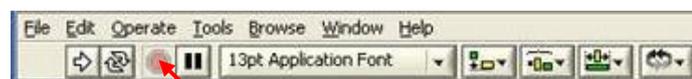


Figura 4.36. Botón STOP.

4.2.3.14.Con el rotor bloqueado, presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición, aumente gradualmente la tensión en tantos pasos como usted desee, hasta alcanzar la corriente nominal. En cada paso observe el Panel de Mediciones y tome nota de  $I_{RMS}$ ,  $V_{RMS}$ , Potencia media y la velocidad.

4.2.3.15.Presione el botón STOP del panel frontal.

#### 4.2.4. Medición de la curva de Eficiencia y la Característica de Torque.

4.2.4.1. Acople el eje del motor de inducción al torquímetro, el cual funcionará como generador.

4.2.4.2. Lleve la tensión de alimentación del motor hasta 220 V (entre líneas).

4.2.4.3. Realice los ajustes necesarios en el torquímetro para cargar al motor de inducción con 1N-m. Presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición, observe el Panel de Mediciones y tome nota de  $I_{RMS}$ ,  $V_{RMS}$ , Potencia media y la velocidad. En el Panel de Ensayo Característica Par-Velocidad puede observar los datos para realizar una tabla que posteriormente utilizará para graficar. Dicho panel se muestra en la figura 4.37.



*Figura 4.37. Panel de Ensayo Característica Par-Velocidad.*

4.2.4.4. Repita el punto 4.3 incrementando el torque en pasos de 1 N-m, hasta que la corriente absorbida por el motor de inducción sea la nominal.

4.2.4.5. Presione el botón Guardar datos del Panel de Control. Como se muestra en la figura 4.38.

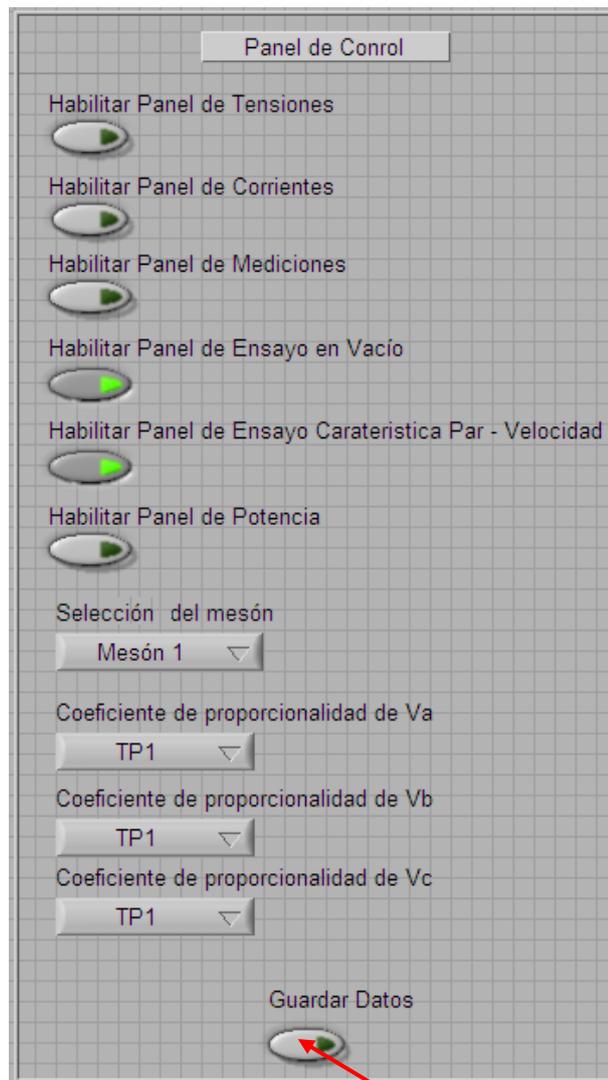


Figura 4.38. Panel de Control.

4.2.4.6. Presione el botón STOP del panel frontal.

4.2.4.7. Lleve el torque de carga a un mínimo. Luego, desconecte la alimentación del motor de inducción y lleve el selector del arrancador a la posición "0".

#### 4.2.5. Efecto de la tensión en bornes.

4.2.5.1. Manteniendo el selector del arrancador en "0", lleve la tensión de alimentación del motor de inducción a 176 voltios (80% de 220 V).

4.2.5.2. Repita el ensayo de carga a tensión reducida (176 V).

#### 4.2.6. Operaciones Anormales

- 4.2.6.1. Arranque el motor de inducción con 220 V.
- 4.2.6.2. Realice ajustes en el torquímetro hasta lograr que el motor de inducción absorba su corriente nominal.
- 4.2.6.3. Reduzca la tensión de alimentación del motor de inducción en un 15%, presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición y, rápidamente, tome nota de las lecturas de los instrumentos de medición (tensión, corriente, potencia, torque y velocidad). Tan pronto como haya tomado las lecturas, restituya la tensión de alimentación a su valor nominal. Presione el botón STOP del panel frontal.
- 4.2.6.4. Disminuya el torque hasta que el motor absorba el 50% de la corriente nominal.
- 4.2.6.5. Desconecte una de las fases de alimentación del motor, presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición y, rápidamente, observe las lecturas de los instrumentos. Reponga la fase removida tan pronto como sea posible. Presione el botón STOP del panel frontal.
- 4.2.6.6. Reduzca el torque a un valor mínimo.
- 4.2.6.7. Reduzca gradualmente la tensión aplicada al motor hasta llegar a cero. Presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición y observe el comportamiento de la máquina y las lecturas de los instrumentos. Presione el botón STOP del panel frontal.

#### Problemas y Tareas

1. Trace la curva Tensión Aplicada vs. Velocidad para el ensayo de vacío practicado en I.
2. Determine el circuito equivalente por fase del motor de inducción ensayado.
3. Utilizando los datos del ensayo de vacío, determine el factor de potencia del motor de inducción a tensión nominal.
4. Utilizando los datos del ensayo a rotor bloqueado, determine el factor de potencia del motor de inducción a corriente nominal.

5. En base al circuito equivalente, determine la corriente y el factor de potencia durante un arranque directo a plena tensión.
6. ¿Qué pérdidas pueden determinarse con los ensayos de vacío y rotor bloqueado?
7. Determine la eficiencia y el deslizamiento para cada uno de los torques de carga correspondientes a las pruebas II y III.
8. Dibuje las graficas de Eficiencia vs. Potencia de Salida ( $n$  vs.  $P_{sal}$ ) empleando las mediciones realizadas en las pruebas II y III. Trace ambas curvas sobre un mismo sistema coordenado y analice los resultados.
9. Idem. A 8. Para las graficas Torque vs. Deslizamiento ( $T$  vs.  $S$ ). Mediante extrapolación, determine cuánto vale el deslizamiento para torque=0. Compare con el valor teórico esperado.
10. Determine el porcentaje de la corriente de vacío (a tensión nominal) con respecto a la corriente nominal del motor. ¿Por qué la corriente de vacío de un motor de inducción de "X" KVA es porcentualmente superior a la de un transformador de "X" KVA?
11. Idem a 8 para Corriente Absorbida VS. Deslizamiento ( $I$  vs.  $S$ ).
12. A Partir de los datos obtenidos en la prueba II, calcule el factor de potencia a plena carga y tensión nominal. Compare con el suministrado por la placa.
13. Dibuje el diagrama circuital del interruptor Y-D y describa su funcionamiento.
14. Calcule teóricamente el porcentaje de sobrecarga que experimentan las fases "sanas" del motor en la experiencia 4.5.
15. ¿Cómo haría el torque suministrado por un motor de inducción cuando su tensión de alimentación se reduce en un porcentaje X%? ¿Sugiere este comportamiento algún método de control de velocidad?
16. Consulte un catálogo de motores de inducción de una compañía Americana. Seleccione aleatoriamente uno de ellos y transcriba sus características al informe de esta práctica.
17. Idem. A 16 para una compañía Europea.
18. En base a sus consultas en catálogos, enumere algunas diferencias entre las especificaciones dadas por los fabricantes Europeos y los Americanos.

19. Investigue cómo se comporta un motor de inducción cuando las tensiones de alimentación no están perfectamente equilibradas.
20. Defina brevemente cada una de las características que se especifican en la placa de un motor de inducción Americano.
21. Defina brevemente cada una de las características que se especifican en la placa de un motor de inducción Europeo.

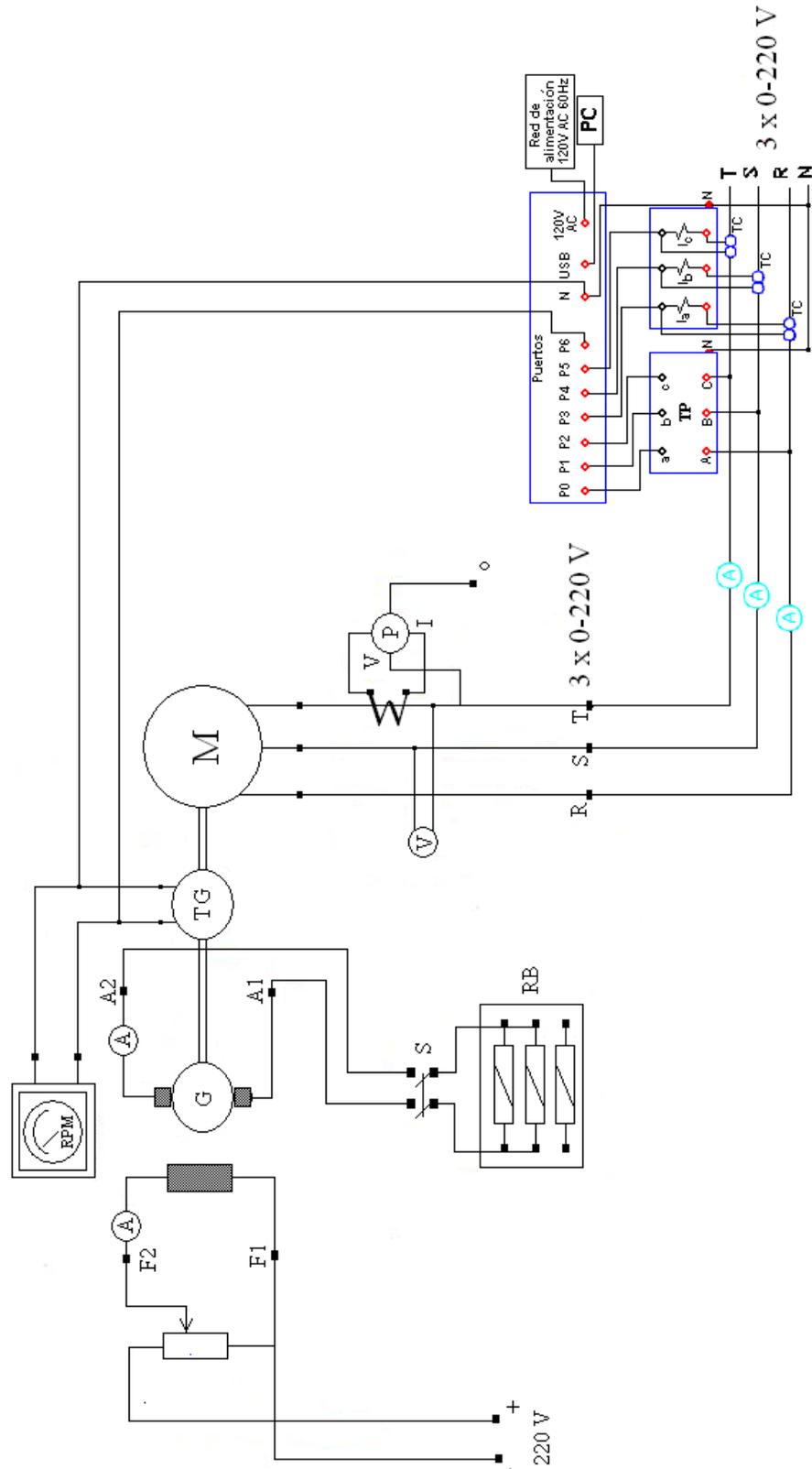


Figura 4.39: Diagrama de conexiones. Fuente: Propia

### **4.3. MOTOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO.**

#### **4.3.1. Objetivos**

1. Medir la eficiencia a diferentes cargas, así como el torque entregado como función del deslizamiento.
2. Estudiar la influencia de la impedancia rotórica sobre el torque de deslizamiento de la máquina.
3. Estudiar el control de velocidad por variación de la tensión de alimentación y por variación de la impedancia rotórica.

#### **4.3.2. Preparación previa**

1. ¿Cuál es el efecto de la variación de la resistencia rotórica sobre la curva torque-deslizamiento de un motor de inducción de rotor devanado?
2. ¿Cómo varía la frecuencia de las corrientes rotóricas con la velocidad de la máquina?
3. Compare el motor de inducción de jaula de ardilla con de rotor devanado, en cuanto a: utilidad de cada uno, aplicabilidad en la industria, costo de compra, partes constituyentes, robustez, y costo de mantenimiento.

#### **4.3.3. Procedimiento**

##### **1.0 Conexión y Configuración**

- 1.1 Realice las conexiones del diagrama del circuito que se muestra en la figura 4.52. Conectando el torquímetro como generador y el motor de inducción como motor. El suiche “S” debe estar en posición “apagado” y el interruptor Y-D en posición “0”. (En el Apéndice A y en el Apéndice B puede visualizar el motor y los equipos eléctricos pertenecientes al Laboratorio de Máquinas Eléctricas, los cuales son utilizados para la realización de las está práctica).
- 1.2 Tome nota de los datos de placa del motor de inducción.
- 1.3 El personal técnico chequeará las conexiones.
- 1.4 Abra el software INSTACAL, aparecerá una ventana que indica que la tarjeta ha sido detectada “Plug and Play Board Detection. Presionar OK. La figura 4.40 muestra la ventana mencionada.

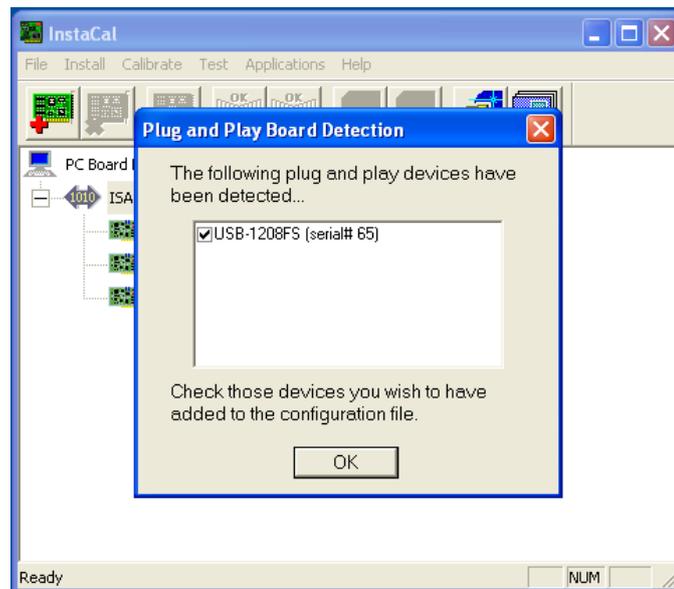


Figura 4.40. Ventana que indica que la tarjeta ha sido detectada por el software InstaCal.

1.5 Haga doble click sobre la tarjeta reconocida por el software (en el caso de que hayan varias tarjetas instaladas previamente, seleccione una de la lista) y configure la tarjeta en modo común “8 Single Ended”. Las figuras 4.41 y 4.42 muestran estas ventanas.

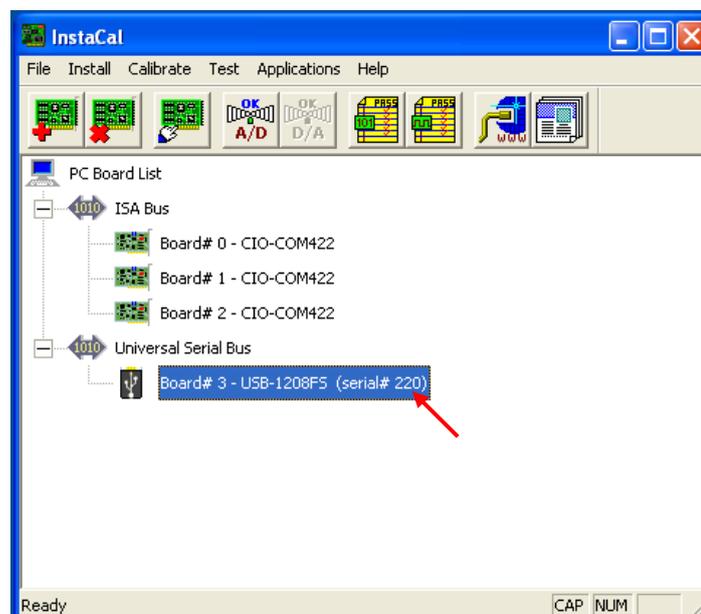
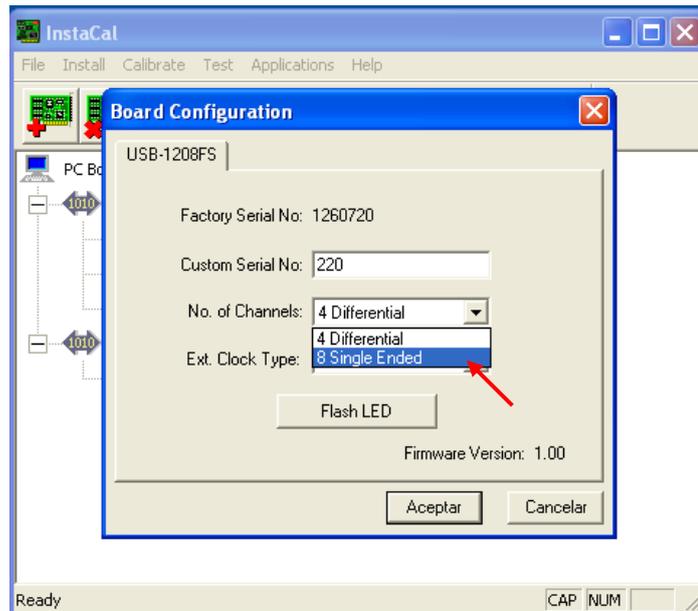
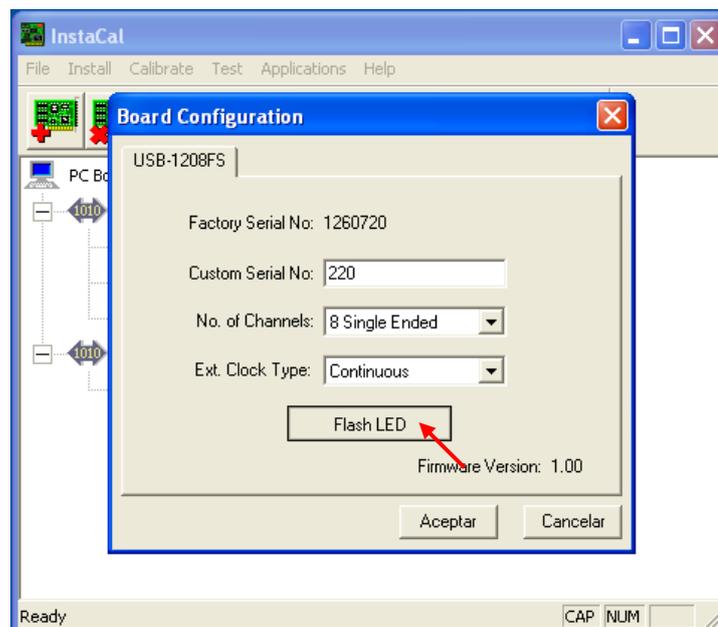


Figura 4.41. Ventana que muestra la tarjeta detectada por el software InstaCal.



*Figura 4.42. Ventana que muestra la configuración de la tarjeta en Modo Común.*

1.6 Haga click sobre la opción “flash led” como se indica en la figura 4.43 y visualice en el orificio “LED” del dispositivo de adquisición de datos que efectivamente la luz se torne intermitente. Si esto sucede entonces ha escogido la tarjeta correcta, sino verifique la conexión USB o pruebe con otra tarjeta de la lista.



*Figura 4.43. Ventana que muestra la opción “flash led”.*

1.7 Una vez reconocida la tarjeta de adquisición de datos, tomar nota del número de la tarjeta (Board Number), tal y como se muestra en la figura 4.44.

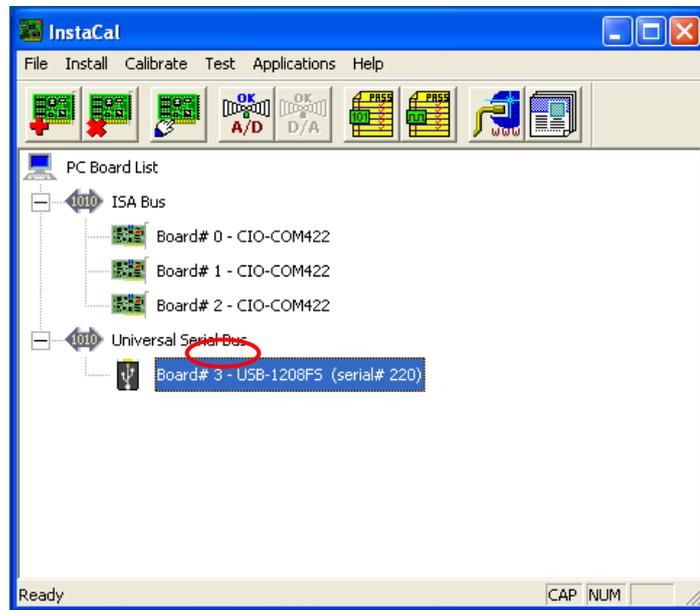


Figura 4.44. Número de la tarjeta.

1.8 Abra el software LabVIEW 7.1, haga click en file/open, tal y como lo indica la figura 4.45 y seleccione el archivo “Adquisición\_de\_Datos” en la siguiente dirección: Mis documentos /IV\_Práctica\_MOTOR\_ROTOR\_DEVANADO.

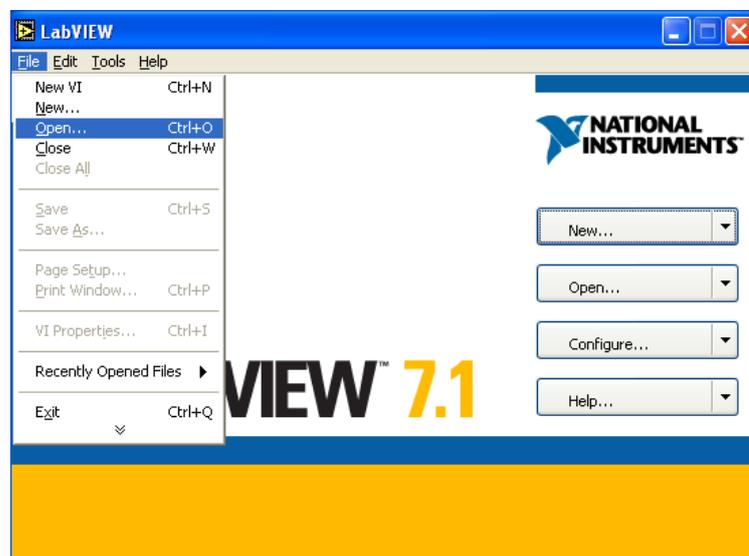
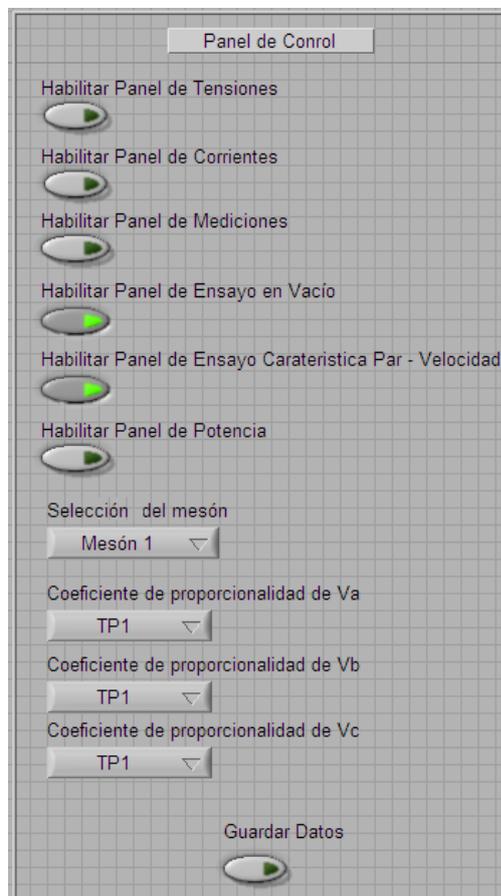


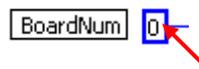
Figura 4.45. Muestra de la ventana al abrir el software Labview. Fuente: Propia.

1.9. Configure el Panel de Control de acuerdo al Mesón en el cual este realizando el montaje y de acuerdo al TP que esté utilizando, tal y como se muestra en la figura 4.46 para el mesón 1 y el TP1.



**Figura 4.46** Configuración del Panel de Control

1.10. Reescriba el número de la tarjeta en el cuadro BoardNum del Instrumento Virtual. La figura 4.47 muestra este cuadro.



**Figura 4.47.** Cuadro BoardNum. **Fuente:** Propia.

## 2.0. Medidas de las características de Eficiencia y Torque.

- 2.1. Ajuste el voltaje AC variable a 220V. Pase luego el suiche Y-D a la posición “Y”. Una vez logrado el arranque de la máquina, pase el suiche a la posición “D”. Verifique que la resistencia rotórica esté ajustada en su valor mínimo.
- 2.2. Haga funcionar al torquímetro como generador. Verifique que en el momento de cerrar el suiche “S”, la carga “RB” esté ajustada a máxima resistencia (mínima corriente).
- 2.3. Jugando con el reóstato “shunt” del torquímetro y la resistencia de carga “RB”, cargue al motor de inducción con un torque de 1N-m Presione el botón RUN para dar inicio a la adquisición como se muestra en la figura 4.48. Observe el Panel de Mediciones que se encuentra en el Panel Frontal del programa en ejecución (ver figura 4.49) y tome nota de  $I_{RMS}$ ,  $V_{RMS}$ , Potencia media y la velocidad. En el Panel de Ensayo Característica Par-Velocidad se puede observar los datos para realizar una tabla que posteriormente utilizaran para graficar. Dicho panel se muestra en la figura 4.50.

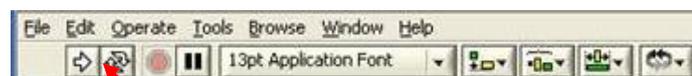


Figura 4.48. Botón RUN. Fuente: Propia.

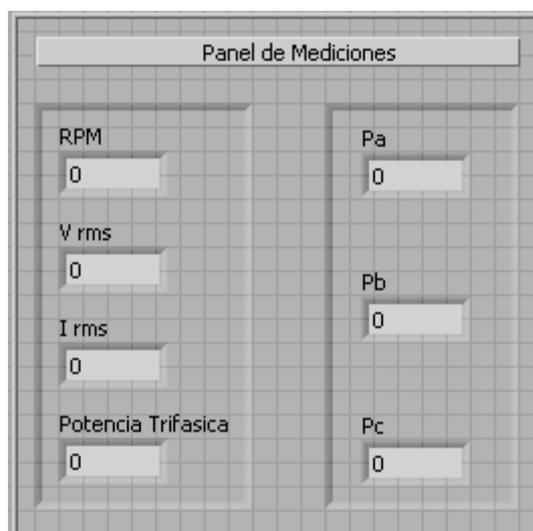


Figura 4.49. Panel de Mediciones.



Figura 4.50. Panel de Ensayo Característica Par-Velocidad.

2.4. Repita el punto 2.3. incrementando el torque en pasos de 1 N-m, hasta que la corriente absorbida por el motor de inducción sea la nominal.

2.5. Presione el botón Guardar datos del Panel de Control. Como se muestra en la figura 4.51.

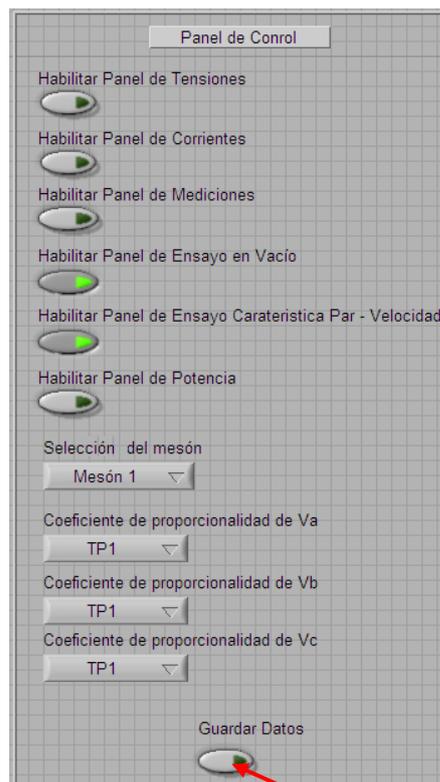


Figura 4.51. Panel de Control.

2.6. Presione el botón STOP del panel frontal.

2.7. Ajuste la resistencia “RB” a su valor de mínima corriente. Abra luego el suiche “S” para descargar al motor en estudio.

### **3.0. Control de velocidad por tensión de armadura.**

3.1. Repita 2.1.

3.2. Reduzca el voltaje de alimentación del motor a 176V (80% de 220V).

3.3. Repita los pasos 2.2 a 2.6.

### **4.0. Influencia de la impedancia rotórica en el Torque de arranque.**

4.1. Coloque el reóstato rotórico en mínima resistencia. Sostenga el rotor con la mano y sensibilícese con el mismo (observe cuán fácil o difícil es moverlo).

4.2. Coloque el arrancador Y-D en posición “D”.

4.3. Aplique gradualmente tensión AC (con el rotor bloqueado) hasta alcanzar 5 A. observe y tome nota del “grado de dificultad o facilidad” para mantener al rotor en reposo. Una vez hecho esto, reduzca a cero la tensión de alimentación.

4.4. Incremente la resistencia rotórica colocando el reóstato en la posición 4. Incremente la tensión hasta alcanzar nuevamente 5 A. Tome nota de la sensibilidad.

4.5. Repita 4.4 para las posiciones 3, 2 y 1 del reóstato rotórico.

4.6. Sustituya al reóstato rotórico por una impedancia inductiva conectada en “Y”. Varíe la inductancia desde un valor mínimo al máximo. En cada paso tome nota de la sensibilidad.

4.7. Repita 4.6 para una impedancia capacitiva conectada en “Y”.

### 5.0. Influencia de la impedancia rotórica sobre la curva Torque-deslizamiento.

5.1. Conecte nuevamente el reóstato rotórico en el rotor del motor de inducción. Colóquelo en una posición tal que el torque de arranque sea máximo. Manténgalo allí para el resto de esta experiencia.

5.2. Repita los pasos 2.2 a 2.6.

5.3. Ajuste el reóstato rotórico aproximadamente a la mitad. Manténgalo allí para el resto de la siguiente experiencia.

5.4. Repita 5.2.

#### Problemas y tarea

1. Dibuje los gráficos de  $\eta = f(P_{out})$  para las experiencias 2.0 y 3.0 en el mismo diagrama.
2. Dibuje los gráficos de  $T = f(s)$  para las experiencias 2.0, 3.0 y 5.0 en el mismo diagrama. Extrapole los gráficos hasta  $T = 0$  N-m. ¿Cuánto vale el deslizamiento para ese torque?
3. Calcule el porcentaje de la corriente de vacío con respecto a la corriente nominal, para tres valores de resistencia rotórica.
4. Calcule el factor de potencia a plena carga, para tres valores de impedancia rotórica. Compare estos valores para los correspondientes factores de potencia en vacío.
5. Concluya en relación a los resultados gráficos.

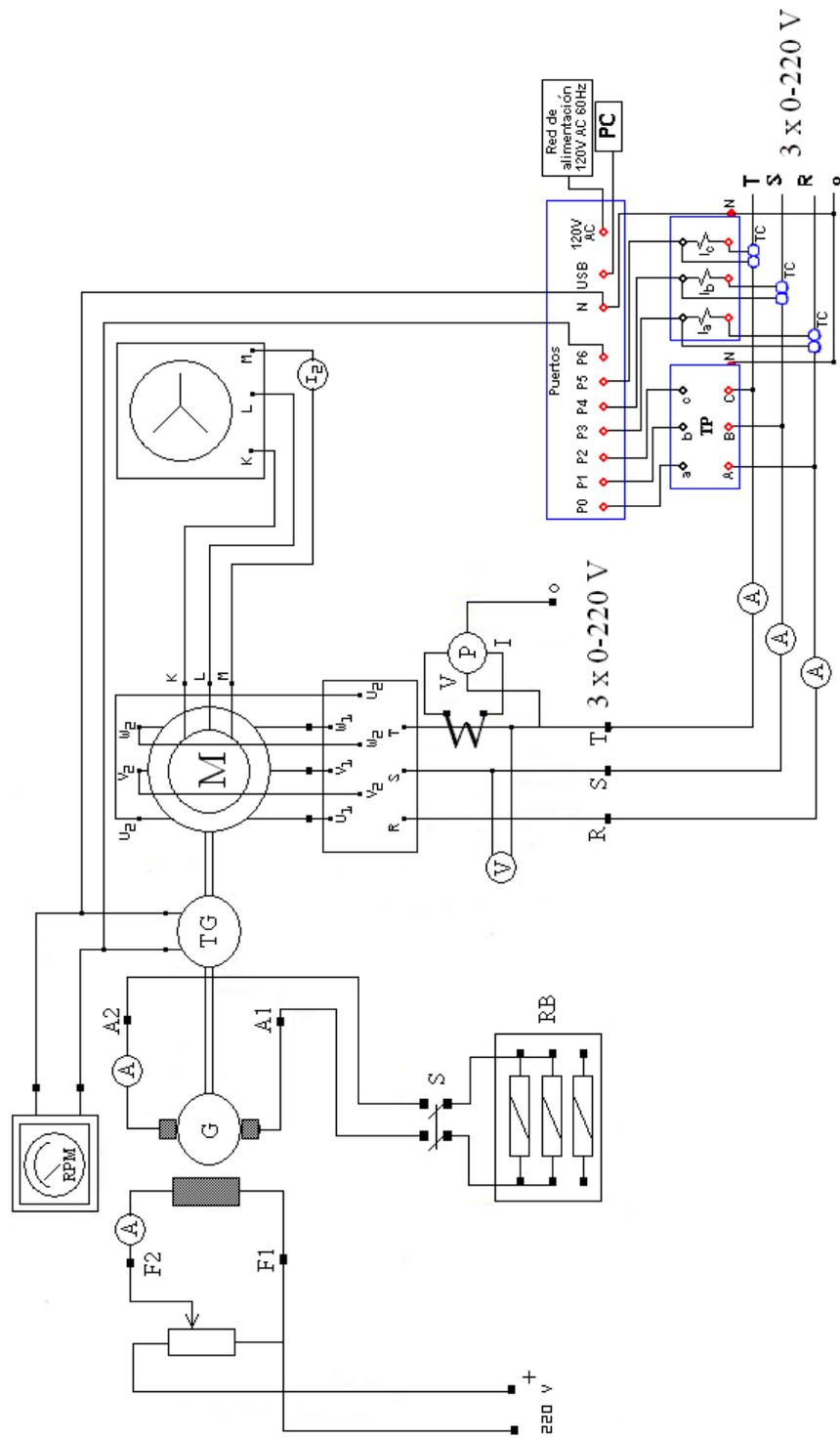


Figura 4.52: Diagrama de conexiones.

## CONCLUSIONES

Una vez estudiadas las fallas más comunes para cada tipo de máquina, se puede establecer que las fallas afectan los espectros de frecuencia de las señales eléctricas de la máquina, por lo que es posible diagnosticar las fallas adquiriendo las señales eléctricas de interés como lo son el voltaje, la corriente y la velocidad.

En este orden de ideas, luego de estudiar las diferentes fallas, la forma de detectarlas y las técnicas existentes se pudo observar que si bien para detectar las fallas en los Transformadores y en las Máquinas Sincrónicas se necesitan adquirir la señal de tensión y corriente para calcular la función de transferencia, también es necesario contar con una fuente de voltaje con frecuencia variable, por esta razón no se pudo aplicar las técnicas estudiadas para este tipo de máquinas. Por otra parte, debido a que para aplicar las técnicas de mantenimiento predictivo para los Motores de Inducción sólo se necesita medir, tensión, corriente y velocidad a la frecuencia de operación y adicionalmente ha sido el más utilizado en estudios anteriores y, por lo tanto, se cuenta con más información, es decir, se tiene un criterio de detección de falla para cada tipo de falla. De modo que se utilizó el estudio basado en la Máquina Asíncrona o Motor de Inducción.

A partir de un análisis a las prácticas que se realizan en el laboratorio de máquinas se determinó que existe una práctica referente al motor de inducción de jaula de ardilla y una al motor de inducción de rotor devanado, las cuales admiten una adaptación para adquirir las señales eléctricas necesarias para aplicar las técnicas de mantenimiento predictivo sin modificar los objetivos originales de dichas prácticas. Para ello se diseñaron dos módulos de adquisición de datos constituidos por una etapa de acondicionamiento de las señales mediante, una etapa de protección y una etapa de conversión analógica/digital. Adicionalmente fue necesario diseñar instrumentos virtuales para el procesamiento de las señales adquiridas tanto para aplicar las técnicas de mantenimiento predictivo como para cumplir los objetivos de la práctica.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda profundizar la investigación realizada en este proyecto acerca de las técnicas de mantenimiento predictivo aplicadas a la Máquina Síncrona y al Transformador con el fin de realizar un plan de mantenimiento predictivo para este tipo de máquinas, ya que, si bien el motor de inducción es el más usado a nivel industrial, la máquina síncrona y el transformador son de suma importancia para el área de generación y transmisión de la energía eléctrica y por lo tanto, no deben ser excluidos de la línea de investigación de mantenimiento predictivo basado en el análisis espectral de señales eléctricas.

Considerando que partir de este trabajo quedará una base de datos a través del tiempo, se recomienda para trabajos futuros, analizar el progreso de las fallas a lo largo de grandes periodos de tiempo con el fin de que se puedan aplicar criterios estadísticos para predecir fallas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Fernández, M. (1998) *Técnicas para el manteniendo y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Marcombo Boixareu Editores.
2. Fraile Mora, J. (1995) *Máquinas eléctricas*. Servicio de Publicaciones Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
3. Ordoñez, J. y González, J. (2007). *Evaluación del espectro de frecuencias de la corriente de armadura del motor de corriente continua, para la detección de fallas en rodamiento*. Universidad de Carabobo.
4. STMEU. [Documento en línea] Disponible en:  
<http://generacionelectricastmeu.blogspot.com>. (Consultado en Abril-2010)
5. Fitzgerald, A. (1992) *Máquinas eléctricas*, Umans. Editorial McGraw-Hill. México.
6. González J., R. D. y Muñoz O., J. L. (2009). *Detección de fallas en los cojinetes del motor de inducción a través del análisis espectral de corriente aplicando máquinas de vectores soporte*. Tesis de pre-grado en Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia, Universidad de Carabobo.
7. Piñol, A., Ortega, J. A. y Romeral, J. L. *Mantenimiento predictivo de motores de inducción*.
8. Gutiérrez E., J. (2006). *Fallas en transformadores*. Bogotá D. C. Colombia.
9. Gketsis, Z., Zervakis, M. y Stavrakakis G. (2009). *Detection and classification of winding faults in windmill generators using Wavelet Transform and ANN*. Tecnológico Universitario de Grecia.
10. Secue, J. R. y Mombello, E. (2007). *Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers*. Instituto de Energía Eléctrica (IEE), Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
11. Peraza, V. y Matos, J. (2008). *Aplicación de criterios de Mantenimiento Predictivo a una data de señales eléctricas de Motores de Inducción (34Hp – 64Hp) en el área de Trefila Gruesa de la Empresa Vicson S.A.* Universidad de Carabobo.
12. Gómez G., M. E. y Piña G., A. J. (2005). *Análisis del flujo axial de dispersión como medio diagnostico de fallas en barras y anillos del rotor del motor de inducción jaula de ardilla*. Universidad de Carabobo.

13. Blanco, J. y Reprizew P. (2010). *Diseño de un sistema para detección de fallas en motores de inducción utilizando las técnicas de redes neuronales artificiales y maquinas de vectores de soporte*. Universidad de Carabobo.
14. Ramírez, R. y Camacho, M. (2009). *Construcción de un prototipo electrónico para la adquisición, acondicionamiento y digitalización de las señales de tensión, corriente, flujo axial de dispersión y velocidad asociadas a motores trifásicos de inducción jaula de ardilla*. Universidad de Carabobo.

## APENDICE A

Datos de placas del motor trifásico de inducción jaula de ardilla utilizado para realizar la práctica n° 7.

### DATOS DE PLACA DEL MOTOR (A.1)

<b>POTENCIA NOMINAL</b>	<b>1.5 kW</b>
<b>FRECUENCIA</b>	<b>60 Hz</b>
<b>TENSIÓN</b>	<b>220 V (<math>\Delta</math>)- 380 V (Y)</b>
<b>CORRIENTE NOMINAL</b>	<b>6.6 A – 3.8 A</b>
<b>VELOCIDAD</b>	<b>1700 rpm</b>
<b>FACTOR DE POTENCIA</b>	<b>0.79</b>

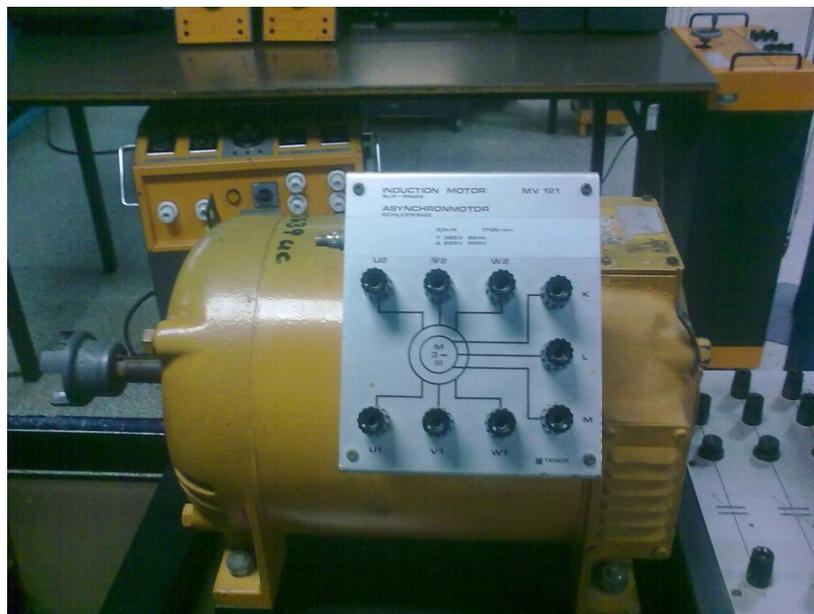


*Figura A.1. Motor trifásico de inducción jaula de ardilla.*

### DATOS DE PLACA DEL MOTOR (A.2)

Datos de placas del Motor Trifásico de Inducción Rotor Devanado utilizado para realizar la práctica 8.

<b>POTENCIA NOMINAL</b>	<b>0.9 kW</b>
<b>FRECUENCIA</b>	<b>60 Hz</b>
<b>TENSIÓN</b>	<b>220 V (<math>\Delta</math>)- 380 V (Y)</b>
<b>CORRIENTE NOMINAL</b>	<b>6.6 A – 3.8 A</b>
<b>VELOCIDAD</b>	<b>1700 rpm</b>
<b>FACTOR DE POTENCIA</b>	<b>0.80</b>



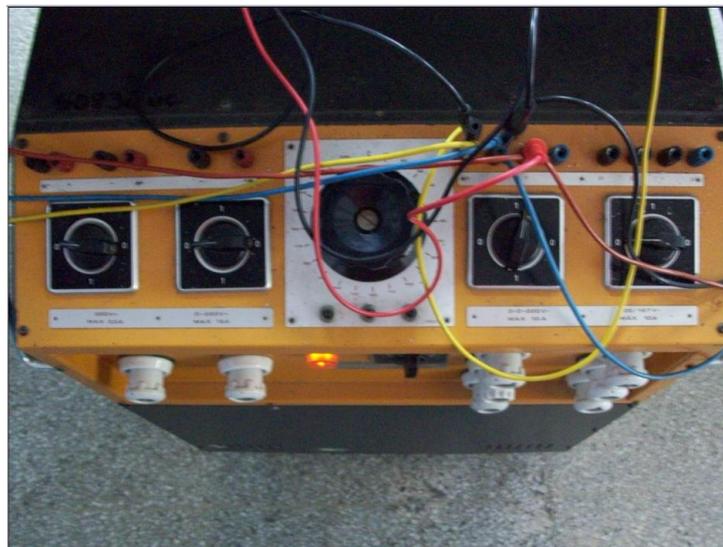
*Figura A.2. Motor trifásico de inducción Rotor Devanado.*

## APENDICE B

Equipos eléctricos pertenecientes al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Los cuales son utilizados para la realización de las prácticas.

### Fuente de voltaje marca Terco

DISPOSICIÓN	TENSIÓN (V)	CORRIENTE MÁXIMA (A)
DC (fijo)	220	3,5
DC (variable)	0-220	16
AC (fijo)	220	10
AC (variable)	0-220	10



*Figura B.1. Fuente de voltaje*

### Banco de Resistores marca Terco de 3,3 kW

CONEXIÓN	TENSIÓN (V)	CORRIENTE (A)
Estrella	3x220	0,5-5
Delta	3x220	1,3-8,7
Paralelo	220	2,3-1,5



*Figura B.2. Banco de resistores.*

**Motor DC marca Elmatek**

TYPE	112-12
POTENCIA	2,0 kW
VOLTAJE	220 V
CORRIENTE	12 A
VELOCIDAD	1700 rpm



*Figura B.3. Motor DC*

Medidor de velocidad- Tacómetro digital RPM



*Figura B.4. Tacómetro digital RPM. Fuente propia.*



*Figura B.5. Montaje para la realización de la práctica.*