

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES (MCSA).

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

NÁTHALI ELIZABETH MORALES MARIÑO

DIRECTOR: Alberto Sánchez, Ph.D.

Quito, enero 2007.

DECLARACIÓN

Yo, Náthali Elizabeth Morales Mariño, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Náthali Elizabeth Morales Mariño

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Náthali Elizabeth Morales Mariño, bajo mi supervisión.

Alberto Sánchez, Ph.D.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, el agradecimiento más profundo es para mi Padre Celestial que con su luz me ha dado la fortaleza y la fe necesarias para poder alcanzar todos mis objetivos y metas planteadas, y le agradezco también por haber puesto en mi camino a las personas más importantes de mi vida: a mi madre, por el ejemplo de mujer luchadora que forjó en mí la decisión y la constancia, a mi hermano Rafael por todo el apoyo, cariño y dedicación invertidos en este proyecto, a Richard por la comprensión y la motivación en el momento más oportuno, a mi familia y en especial a Charito por el apoyo recibido.

Agradezco además, a los maestros que supieron guiarme y compartir sus conocimientos a lo largo de mi vida académica, en especial al Doctor Alberto Sánchez por su acertada dirección para el desarrollo del proyecto y al Ingeniero Carlos Chiluisa, quien siempre estuvo presto a colaborar con sus conocimientos.

Finalmente, agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por haber motivado en mí el amor y respeto hacia ella, así como a todas las personas y compañeros que han contribuido con su granito de arena para la elaboración de este trabajo.

DEDICATORIA

“Si yo hablase lenguas humanas y angélicas, y no tengo amor, vengo a ser como metal que resuena, o címbalo que retiñe.

Y si tuviese profecía, y entendiese todos los misterios y toda ciencia, y si tuviese toda la fe, de tal manera que trasladase los montes, y no tengo amor, nada soy.”

1 CORINTIOS 13:1-2

A los seres que me han brindado todo el amor necesario para vivir, llenando por completo cada uno de los espacios de mi corazón:

A mi Señor y Redentor por su infinito amor que me llena cada día.

A mi madre, por el amor abnegado y sublime que sólo una madre tiene la capacidad de brindar y que es la razón para hacer cualquier sacrificio por el bienestar de un hijo.

A Rafael, por brindarme el amor más puro, desinteresado y filial, por creer en mí, por luchar por nuestros sueños hasta hacerlos realidad y por lo orgullosa que me hace sentir poder llamarlo mi hermano.

A mi Richy, con quien hemos compartido seis años de nuestras vidas juntos en una relación en la que, nuevamente es aquel sentimiento eterno, el amor, que ha logrado vencer todo obstáculo y adversidad.

CONTENIDO

CAPITULO I. Fundamentos del Análisis Espectral de Corrientes en Motores de Inducción para Detección de Fallas.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Métodos de monitoreo	5
1.3 Análisis espectral de corriente del motor.....	8
1.4 MCSA para detección cortocircuitos.....	12
CAPÍTULO II. Análisis y Descripción de la Arquitectura del Sistema de Diagnóstico.....	22
2.1 Motor.....	24
2.2 Transductor.....	31
2.3 Adquisición de señales.....	35
2.4 Procesamiento digital de señales.....	44
2.5 Detección de falla usando MCSA.....	54
2.6 Almacenamiento de datos.....	56
2.7 Reportes.....	58
CAPÍTULO III. Diseño e Implementación de Hardware y Software para el Sistema de Diagnóstico.....	59
3.1 Requerimientos generales.....	59
3.2 Software a utilizar.....	59
3.3 Motor.....	60
3.4 Transductor.....	61
3.5 Adquisición de datos.....	63
3.6 Procesamiento digital de señales.....	73
3.7 Algoritmo de MCSA.....	76
3.8 Detección de la falla.....	78
3.9 Almacenamiento de datos.....	79
3.10 Generación de reportes.....	83

3.11 Visión general del sistema.....	86
CAPÍTULO IV. Pruebas y Resultados.....	94
4.1 Objetivos esperados.....	94
4.2 Configuración de las pruebas y resultados.....	96
4.3 Resumen de las pruebas y resultados.....	109
CAPITULO V. Conclusiones y Recomendaciones.....	110
5.1 Conclusiones.....	110
5.2 Recomendaciones.....	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y TÉRMINOS IMPORTANTES.....	116
ANEXO A. Reporte Generado por el Programa al Evaluar un Motor con Barras Rotas	118
ANEXO B. Reporte Generado por el Programa al Evaluar un Motor en Buen Estado	120
ANEXO C. Manual de usuario.....	122
ANEXO D. Lista de motores trifásicos de inducción comerciales	132
ANEXO E. Lista de motores monofásicos de inducción comerciales	134
ANEXO F. Especificaciones del cambiador de voltaje 70Is07.....	136
ANEXO G. Especificaciones de la Pinza Amperimétrica 80i-600A.....	140
ANEXO H. Mapa circuitales de placas eléctricas.....	142
ANEXO I. Esquema global del hardware.....	145

RESUMEN

El sistema implementado propone una alternativa para detectar barras rotas en motores de inducción a través de algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA). El sistema acondiciona señales de voltaje y corriente de alimentación de un motor, las filtra análogamente para eliminar cualquier tipo de ruido y de *aliasing*, las digitaliza y envía a un computador. Se las filtra digitalmente para evitar cualquier ruido remanente y la periodicidad del espectro de frecuencia para después hallar los contenidos espectrales de las señales. En ellos, se detecta picos en frecuencias específicas calculadas según los criterios de MCSA respectivos. Se analizan las amplitudes de dichos picos y según la diferencia entre ellas, se determina el estado del motor: excelente, bueno, pocas barras rotas, daño medio y daño severo; discriminando si la naturaleza de la falla es de carácter eléctrico o por barras rotas. El software es implementado en LabVIEW. Al terminar la prueba, se presenta el diagnóstico y una recomendación. Opcionalmente, el programa genera reportes automáticamente en un archivo en formato de documento portátil (*.pdf) en el que se muestra las señales de interés, el diagnóstico y la configuración del motor. El sistema fue evaluado en un banco de pruebas con motores monofásicos y trifásicos.

PRESENTACIÓN

En la actualidad muchas de las tareas que una industria moderna debe llevar a cabo son realizadas por motores de inducción, el mercado de estos motores ha crecido de manera tal, que tener un control y monitoreo continuo y eficiente de su comportamiento se ha vuelto indispensable.

Como consecuencia de esta necesidad, el sensado, control de procesos, automatización y procesamiento digital de señales ha tenido un gran avance en el campo de la investigación de técnicas, desarrollo de modelos y aplicaciones.

Un motor de inducción es un sistema electromecánico, por lo que las fallas que pueden suscitarse en éste, son de naturaleza eléctrica o mecánica, como por ejemplo, que el motor no arranque, causado usualmente por problemas en la línea como el funcionamiento con una sola fase en el arrancador; recalentamiento causado por sobrecarga, funcionamiento de una sola fase, ventilación inadecuada, voltaje desequilibrado y rozamiento del rotor con el estator, entre otras. Además, una de las fallas no tan frecuente pero de serias consecuencias, es la ruptura de las barras del rotor, causada por el desgaste de los materiales y esfuerzos térmicos y mecánicos exagerados. El sistema desarrollado se enfoca a esta falla específicamente.

La presente disertación hace un análisis y presenta una alternativa al problema de la detección de fallas por ruptura de barras de la jaula de ardilla de un motor de inducción, implementando un sistema que permite diagnosticar esta naturaleza de falla y la severidad de la misma.

Con el afán de que el sistema posea criterios de confiabilidad, disponibilidad, escalabilidad y de optimización de recursos se ha implementado con transductores que se pueden encontrar en el mercado y cuyo desempeño ha sido efectivo en otras aplicaciones y otros proyectos. Además, se ha utilizado una tarjeta de adquisición de datos con el afán de que se pueda integrar otro tipo de sensores y señales para detectar fallas específicas adicionales.

Para que el sistema sea amigable al usuario y pueda recopilar, almacenar y mostrar información confiable, además de entregar al operador o a los administradores del sistema, reportes y estadísticas generales, se escogió LabVIEW como la herramienta informática de la aplicación.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN PARA DETECCIÓN DE FALLAS.

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchas de las tareas que una industria moderna debe llevar a cabo, son realizadas por motores de inducción. En países industrializados un 40 a 50 % de toda la energía producida está destinada para el consumo de estas máquinas [1]. El mercado de estos motores ha crecido de manera tal, que tener un control y monitoreo continuo y eficiente de su comportamiento se ha vuelto indispensable y como consecuencia de esta necesidad, es común que la industria use métodos basados en mantenimientos dentro de sus programas de operación [2]; como por ejemplo:

“Mantenimiento Basado en la Condición” (*condition-based maintenance, CBM*): es un plan de mantenimiento práctico que busca optimizar la combinación de mantenimientos preventivo, predictivo, previsor y basado en fallas. Para esto se identifica un “equipo de trabajo de confiabilidad” que realice una valoración cualitativa de los procesos de planta, así como de la maquinaria, para determinar la importancia de las tareas que se deberán llevar a cabo. Se debe analizar el tipo de mantenimiento a realizarse para evitar hacer dos actividades en las que se obtenga un mismo resultado. Es importante tener una mejora ininterrumpida del equipo y el programa de mantenimiento se debería reevaluar con una periodicidad anual o semi-anual.

“Mantenimiento Basado en la Confiabilidad” (*reliability-based maintenance, RBM*): es un método muy similar a CBM, ya que RBM es una estrategia técnica de mantenimiento que busca identificar la metodología apropiada en base de los requisitos de mantenimiento adecuados para cada situación. La diferencia más importante entre RBM y CBM es que RBM usa una rigurosa evaluación cuantitativa de la criticidad del

equipo basada en conductas de falla identificadas y sus efectos. Una vez que se ha identificado las conductas de falla, los requisitos de mantenimiento son especificados para cada parte del equipo; con esto se desarrolla los procedimientos para ejecutar un mantenimiento preventivo de tal manera de conseguir una alto índice de confiabilidad.

Estos métodos, junto con esquemas convencionales de mantenimiento se aplican para monitorear el funcionamiento de la maquinaria de tipo eléctrico, entre ellos, los motores de inducción y tienen como objetivo reducir el número de fallas inesperadas y el tiempo improductivo, incrementando el tiempo entre paros planificados para mantenimientos programados, dando como resultado la reducción de los costos de operación y mantenimiento en general.

En la actualidad, la evolución de estrategias de medición, control de procesos, automatización y procesamiento de señales digitales, ha logrado un gran avance en el campo de la investigación de nuevas técnicas, desarrollo de modelos y aplicaciones, para evitar la operación de máquinas eléctricas en condiciones poco seguras y para evaluar el estado de las mismas “En-Línea” evitando que estas dejen de funcionar durante algún proceso de diagnóstico.

Un motor de inducción es un sistema electromecánico, por lo que pueden presentarse fallas de naturaleza eléctrica y mecánica. De acuerdo con estadísticas de fallas en motores de inducción tipo jaula de ardilla [3], se ha reportado que el porcentaje de fallas, de acuerdo al elemento constitutivo del motor en el que ocurre la falla, es el mostrado en la Figura 1.1.

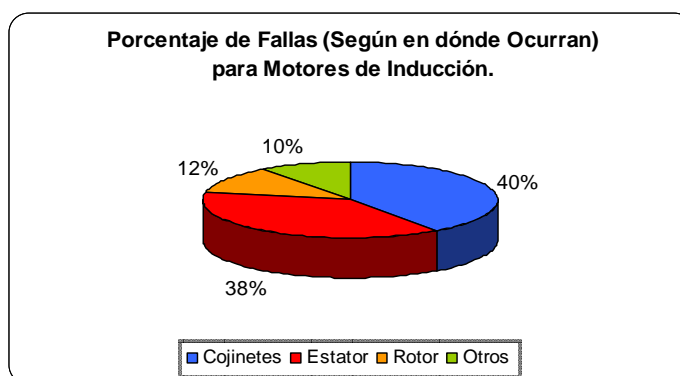


Figura 1.1. Porcentajes de fallas en motores de inducción de acuerdo al componente constitutivo en el que ocurren [3].

- ✓ Fallas en los Cojinetes o Rodamientos: **la mayoría de máquinas eléctricas usa cojinetes con elementos rotativos, tales como bolas o rodillos, que son una de las causas más comunes de falla. Una falla en el rodamiento ocasionaría componentes de frecuencia únicas en las mediciones de vibración mecánica y en las señales de otros sensores, estas frecuencias de falla, son función de la geometría del rodamiento y de la velocidad de rotación. Las fallas en los rodamientos, pueden causar también excentricidad del rotor.**

- ✓ Fallas en el Estator: **las fallas en los devanados del estator, son a menudo ocasionadas por fallas de aislamiento entre dos espiras adyacentes del devanado; a este tipo de falla se la denomina como falla “espira a espira” o “cortocircuito entre espiras”. Las corrientes inducidas resultantes producen sobrecalentamiento y causan un desbalance en el flujo magnético. Si esta falla no se detecta, el calentamiento causará más daño al aislamiento del estator hasta desembocar en una falla irreversible. El desbalance del flujo magnético puede resultar en una vibración excesiva que a su vez puede causar fallas prematuras en los cojinetes. Adicionalmente, se puede presentar fallas por conexiones incorrectas de los devanados estatóricos.**

- ✓ Fallas en el Rotor: **las fallas que ocurren en el rotor ocupan alrededor del 10 % del total de fallas en motores de inducción. La falla más común en el rotor es la ruptura o agrietamiento de las barras que forman la jaula de ardilla o del anillo de unión que las cortocircuita, esto puede ser atribuible al ciclo térmico o mecánico del rotor durante la operación. Este tipo de falla produce un efecto bastante estudiado en las componentes espectrales de corriente, en las que aparecen un par de bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental.**

- ✓ Otras: (12%), **como la excentricidad del eje que surge cuando el rotor no está perfectamente centrado con respecto del estator dando como resultado un entrehierro no uniforme entre ellos, provocando vibración mecánica anormal.**

Además que no se puede descartar la posibilidad de que los motores tengan errores de fabricación.

De estos datos, se puede concluir que los problemas en los rotores de motores de inducción tipo jaula de ardilla, son en general, menos frecuentes que las fallas en los devanados estáticos del motor, pero sin embargo, la posibilidad de que la falla ocurra existe y uno de los problemas más severos que le puede ocurrir a un motor es la ruptura de las barras de la jaula de ardilla del rotor.

En general, la falla de un motor de inducción, que es el núcleo mismo de los procesos industriales más comunes, se traduce en significativas pérdidas, desde un atraso leve en la elaboración de algún detalle, hasta un paro total del sistema de producción, con lo que se sobreentiende un daño a la economía de la empresa. De aquí que el monitoreo de los motores de inducción se vuelve esencial para cualquier tipo de mantenimiento implementado en una industria.

1.2 MÉTODOS DE MONITOREO.

El objetivo final y que tiene mayor dificultad en ser alcanzado en el monitoreo “En-Línea” es el de examinar las características y los parámetros que permitan determinar si existe o no una falla, y discriminar la naturaleza de la misma. Los métodos más comunes que se han estado utilizando son entre otros [4]:

- Análisis Circuital del Motor (*Motor Circuit Analysis MCA*)
- Análisis de Vibraciones
- Análisis Infrarrojo
- Análisis Espectral de Corrientes del Motor (*Motor Current Signature Analysis MCSA*)

1.2.1 ANÁLISIS CIRCUITAL DEL MOTOR.

Este método en bajo voltaje usa lecturas individuales de resistencia, impedancia, inductancia, ángulo de fase, corriente con su respectiva respuesta en frecuencia y pruebas de aislamiento a tierra para determinar, evaluar y resolver problemas de conexión, cables, estado del rotor y estator, entrehierro y aislamiento a tierra [5]. Es así que las lecturas de una resistencia son usadas para detectar desconexiones y conductores rotos, mientras que los valores de impedancia e inductancia son comparados para evaluar condiciones de aislamiento entre bobinados. Además, las pruebas de aislamiento a tierra son utilizadas para detectar fallas a tierra, mientras que los ángulos de fase y respuesta en frecuencia, evalúan posibles cortocircuitos entre espiras de los bobinados.

Un caso de estudio publicado por la corporación BJM [5] explica como un generador a bordo de un buque militar experimentaba fallas que causaban altas temperaturas. Se decidió utilizar MCA para su diagnóstico y se desmontó el generador. Más adelante, se hizo pruebas de comparación de impedancia-inductancia y con eso se detectó cortocircuitos entre los bobinados del estator.

1.2.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El análisis de vibraciones [4] requiere que un transductor lleve la señal vibratoria a un dispositivo capaz de analizar su respuesta en frecuencia. Dependiendo del tipo de

carga y del tipo de falla, este análisis provee indicadores de fallas mecánicas y su severidad, además de dar indicios para detectar fallas eléctricas. Para este proceso se requiere conocimiento del sistema a diagnosticar.

Un estudio de aplicación de IFM Efactor Inc. [6] ha desarrollado un sistema que mediante sensores inteligentes basado en análisis de vibraciones es capaz de determinar frecuencias críticas de vibración y almacenar amplitudes mínimas que logran determinar el normal funcionamiento de motores de inducción.

1.2.3 ANÁLISIS INFRARROJO

El principio del análisis infrarrojo [4] es proveer información acerca de la diferencia de temperatura entre objetos. Un análisis infrarrojo se puede aplicar para determinar de manera confiable fallas eléctricas como por ejemplo desconexiones y cortocircuitos. Además, puede prevenir daños mecánicos de una manera menos confiable. Las lecturas varían de acuerdo a la carga y se necesita conocimiento del sistema a ser evaluado.

La empresa ElectriSCAN [7], ha desarrollado, en base de termografía por infrarrojo, dispositivos específicos para hacer diagnósticos de equipo eléctrico. El aparato detecta excesos de temperatura en conductores cuyas causas pueden ser sobrecargas, circuitos desbalanceados e interruptores en mal estado. Con el criterio de que previo a una falla irreversible el elemento incrementa su temperatura, la termografía por infrarrojo detecta este exceso de calor y permite que los ingenieros de mantenimiento puedan actuar correctamente en el lugar adecuado.

1.2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES DEL MOTOR

El MCSA usa al motor como transductor y analiza cómo varía la corriente a través de él. Usualmente utiliza la representación en frecuencia de la señal. Este método sirve para detectar fallas eléctricas como el cortocircuito entre bobinas, o mecánicas como la ruptura de barras del rotor. Es sensitivo a variaciones de carga, requiere conocimiento de los datos de placa del motor y es usado principalmente para decidir si un motor continúa o no operando.

En la Universidad de Colombia se ha desarrollado un estudio [8] en el que en base de varios parámetros medidos y adquiridos a un PC, y teniendo comunicación con MS Access y un algoritmo basado en los principios de MCSA, se logra determinar frecuencias correspondientes a fallas en los rodamientos y barras rotas de la jaula de ardilla del rotor.

1.2.5 COMPARACIÓN DE MÉTODOS

En las Tablas 1.1 y 1.2 se hace un análisis comparativo entre los métodos analizados anteriormente.

Tabla 1.1. Comparación de los métodos de diagnóstico [4].

	Estator	Rotor	Entre-hierro	Roda-mientos	Aisla-miento	Vibra-ción	Aline-amiento	Carga
MCA	✓	✓	✓	-	✓	-	-	-
Vibración	P	P	P	✓	-	✓	✓	✓
Infrarrojo	P	-	-	P	-	-	P	P
MCSA	✓	✓	✓	P	-	✓	✓	✓

Donde:

- ✓ significa que el objetivo a diagnosticar es perfectamente compatible con el método.
- P significa que el objetivo a diagnosticar es poco compatible con el método.

Tabla 1.2. Consideraciones administrativas de la implementación de los métodos [4].

	Precio estimado (USD)	Invasivo	Experiencia de operador	Personal dedicado	Incluye software
MCA	1000-9000	Si	Algo	No	No siempre
Vibración	10000	No	Alta	Recomendado	Si
Infrarrojo	10000	No	Alta	Recomendado	Si
MCSA	1000-16000	No	Algo	Recomendado	Si

Debido a que MCSA es un método muy amplio que tiene facilidad de ser implementado en hardware y software, que no es costoso, además de ser un método no

invasivo, no necesita experiencia del operador y por último, que existe un número considerable de personas envueltas en la investigación de este método por sus excelentes resultados, se ha decidido implementar un sistema basado en MCSA.

1.3 ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTE DEL MOTOR.

1.3.1 ANTECEDENTES.

El análisis de corriente en motores de inducción tiene su origen en Gran Bretaña entre los años de 1970 y 1980. Como resultado de esta investigación se precisó que observando el contenido en frecuencia de la corriente de alimentación de un motor trifásico de inducción, es posible determinar el estado de ciertos componentes del rotor, como por ejemplo las barras de la jaula o los anillos de la misma, además de poder determinar el nivel de excentricidad del entrehierro, y cortocircuitos entre los devanados del estator [9]. El software asociado al MCSA, fue entonces desarrollado en base de estos estudios, como una combinación de leyes fundamentales de la física y el conocimiento empírico recogido del estudio de muchos centenares de motores industriales diferentes.

Posteriormente, en el año de 1989, *Oak Ridge National Laboratory (O.R.N.L)* [10,11], desarrolló una tecnología para monitoreo de máquinas eléctricas basada en MCSA, con el fin de supervisar a los dispositivos controlados por motores eléctricos en la Estación de Generación *Philadelphia Electric Company Eddystone* para determinar la degradación por envejecimiento del equipo de la planta. En una valoración del envejecimiento de válvulas operadas por un motor, MCSA mostró ser capaz de detectar, diferenciar y monitorear el progreso de las anomalías de éstas.

En la actualidad MCSA, se presenta como una excelente alternativa de monitoreo en línea y no invasivo, usada para diagnosticar ciertos problemas que se pueden presentar en motores de inducción, tales como barras rotas en el rotor, niveles anormales de excentricidad del entrehierro, cortocircuitos en los devanados estáticos en bajo voltaje, y ciertos problemas mecánicos.

En el sistema a ser diseñado, se enfocará únicamente la detección de fallas por barras rotas en la jaula de ardilla del rotor en motores de inducción.

1.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL MCSA.

Un sinnúmero de pruebas han confirmado que MCSA tiene fortalezas inherentes al método como tal, las más notables se describen a continuación [10, 11]:

- **Tiene la capacidad de hacer monitoreo no invasivo y en una posición remota, respecto del equipo al que se está evaluando.**
- **Proporciona información acerca del daño y el diagnóstico del equipo, comparable con la instrumentación convencional.**
- **Tiene la capacidad de diferenciar entre un tipo de falla y otra.**
- **El diagnóstico mediante MCSA, puede ser realizado rápidamente y tan frecuentemente como se desee y por personal relativamente inexperto, usando equipo portátil y económico.**
- **Es aplicable tanto para máquinas de alta potencia, como para máquinas de potencia fraccionaria, de corriente continua o alterna que pueden ser trifásicas o monofásicas.**
- **Para máquinas trifásicas, se requiere analizar únicamente la corriente de una de las tres fases.**
- **Usando MCSA se puede detectar y diferenciar fallas relacionadas con la carga y la alimentación al motor, analizando en forma conjunta las señales de voltaje y corriente de alimentación al motor.**

En general, MCSA es un método de monitoreo de maquinaria eléctrica de tipo industrial que se aplica principalmente en motores de inducción; tiene la ventaja de poder hacer el diagnóstico en forma no invasiva, es decir, mientras el motor esta

trabajando en condiciones normales de operación y proporcionando un alto grado de sensibilidad, selectividad y rentabilidad.

1.3.3 FUNDAMENTOS DE MCSA.

MCSA se fundamenta en que a un motor eléctrico convencional, se lo puede ver también como un transductor eficiente y permanentemente conectado, ya que a través de él se puede detectar variaciones en la carga o variaciones de naturaleza mecánica en su funcionamiento. Estas variaciones generadas dentro del sistema mecánico, son convertidas como señales distintivas o “marcas” en la corriente eléctrica de alimentación al motor, por lo que para obtener estas señales, es necesario tomar una muestra de dicha corriente, lo que se puede hacer de forma confiable y segura con métodos no invasivos. La muestra tomada debe ser procesada con el fin de suministrar indicativos de la condición del motor y para este análisis se puede usar el dominio del tiempo o el dominio de la frecuencia, siendo este último el método más usado actualmente.

MCSA [12], usa el criterio de que a través de una combinación de las componentes espectrales de señales de voltaje y corriente de alimentación al motor se puede detectar y diferenciar fallas relacionadas con la carga y la alimentación al motor. Se puede, entonces, clasificar a las fallas como de naturaleza eléctrica o mecánica con el siguiente principio:

- Si las componentes que se muestran en la señal de corriente, se reflejan también en la señal de voltaje, se concluye que la falla es de naturaleza eléctrica.**
- Si las componentes se muestran en la señal de corriente, pero no en la señal de voltaje, se concluye que el problema es de naturaleza mecánica.**

De acuerdo al fundamento de MCSA, se requiere de ciertos elementos para que éste método pueda ser implementado de forma exitosa, tal como se muestra en la Figura 1.2, y esto incluye [13]:

- Tener un conocimiento elemental respecto del diseño y operación de motores de inducción, que pueden ser trifásicos o monofásicos.
- Adquirir de manera adecuada las señales de corriente y voltaje de alimentación del motor para que puedan ser analizadas.
- Analizar las señales adquiridas en un “Instrumento de MCSA” que permita mostrar el rasgo distintivo en la corriente para poder hacer el diagnóstico del motor en análisis.
- Tener una base de conocimientos experta obtenida a través de la experiencia y la pericia de los operadores dentro de la organización y/o consultores externos, para definir los criterios de gravedad de la falla.
- Una vez hecho el diagnóstico, es el operador encargado del control de la maquinaria quien debe tomar la decisión definitiva, esto es, escoger entre retirar el motor inmediatamente para que sea reparado o dejarlo en funcionamiento y planear un paro programado para rectificar el problema.

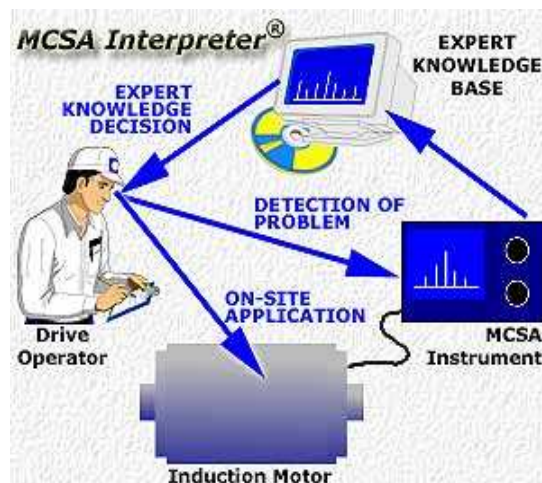


Figura 1.2. Esquema global para el uso de MCSA [13].

1.4 MCSA PARA DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS.

1.4.1 CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE BARRAS ROTAS.

Las causas para que se produzca la ruptura de las barras de la jaula de un motor de inducción o la ruptura de los anillos que unen dichas barras, son principalmente esfuerzos térmicos y mecánicos a los que un motor puede ser sometido. Estas causas se originan por: [13, 14]

- El arranque directo de motores que para cumplir su ciclo de trabajo deben arrancar varias veces periódicamente y cuyo rotor y jaula no están diseñados para soportar este modo de funcionamiento, lo que provoca altos esfuerzos térmicos y mecánicos.
- La presencia de cargas mecánicas intermitentes, como es el caso de los compresores y trituradoras, pueden someter a la jaula del rotor a altos esfuerzos mecánicos.
- Fallas en el proceso de fabricación del rotor, que podrían ocasionar esfuerzos adicionales a los necesarios.
- Esfuerzos magnéticos causados por fuerzas electromagnéticas desbalanceadas, ruido electromagnético y vibración.
- Degradación del material del rotor debido a químicos o humedad, presentes en el ambiente de trabajo del motor.
- Esfuerzo térmico debido a sobrecarga en el motor, carga desbalanceada, puntos calientes o pérdidas excesivas.
- Esfuerzos mecánicos debido a laminaciones flojas, partes gastadas y fallas en los rodamientos.

Las figuras que se muestran a continuación son un ejemplo de rotores con presencia de barras rotas. En el caso de la Figura 1.3 [13] se expone un rotor en donde se pueden identificar sus partes constitutivas, además de la ruptura y desprendimiento de dos de sus barras. La Figura 1.4 [13] corresponde a un rotor muy defectuoso ya que se

encontró que tenía aproximadamente veinte barras rotas, de un total de cuarenta y seis. Finalmente la Figura 1.5 [15] muestra el anillo de unión de un rotor en donde se puede visualizar cuatro barras rotas y orificios originados por la fundición del aluminio del anillo.

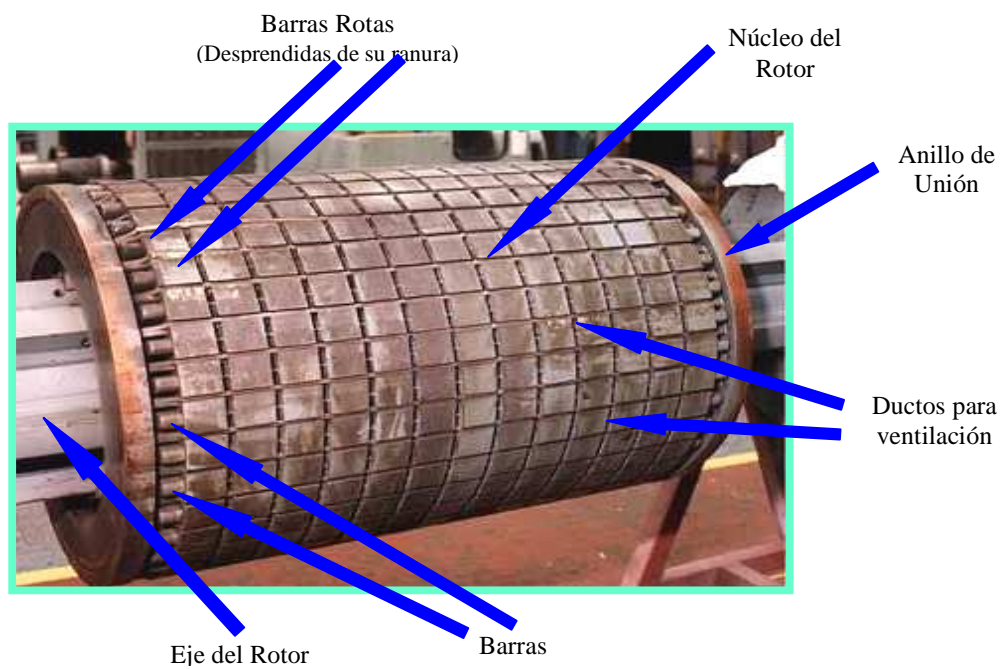


Figura 1.3. Ejemplo de un rotor con barras rotas. [13].

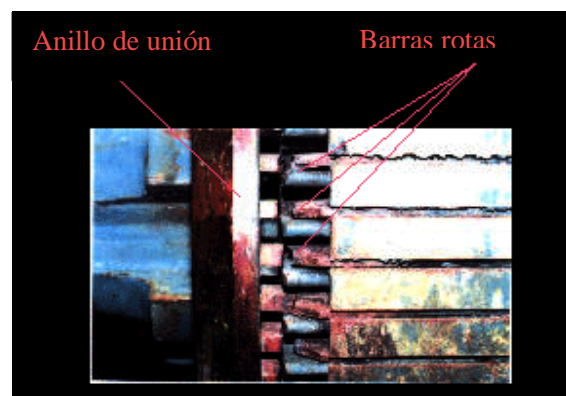


Figura 1.4. Rotor con múltiples barras rotas [13].

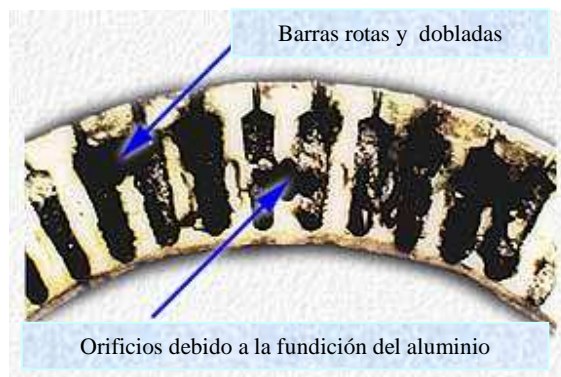
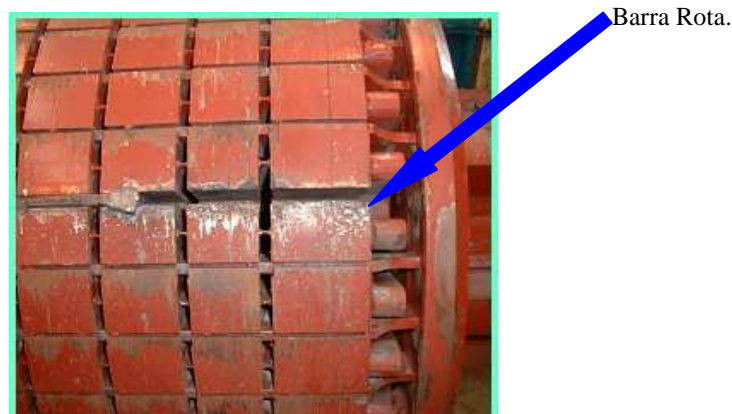


Figura 1.5. Anillo de unión con barras rotas [15].

[13] La presencia de barras rotas en la jaula de ardilla en un motor de inducción también tiene consecuencias ya que si bien no provoca la falla inminente del motor, puede ocasionar serios efectos secundarios, constituyéndose en un potencial problema. Al poner en funcionamiento el motor, las barras rotas tienden a desprenderse a gran velocidad pudiendo ocasionar daños en los devanados o en el núcleo del estator al golpearlos. Esto afecta el aislamiento, desembocando en una falla cuya consecuencia sería una costosa reparación y la pérdida de la producción por la paralización del proceso al cual el motor está asociado. En la Figura 1.6 se muestra al rotor de un motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla, 11 kV, 2900 kW (3887 hp), 179 A, 50 Hz, 2978 rpm, que presenta la ruptura y desprendimiento de una de sus barras. En la Figura 1.7 se muestra el daño resultante sobre los devanados estatóricos de alto voltaje.



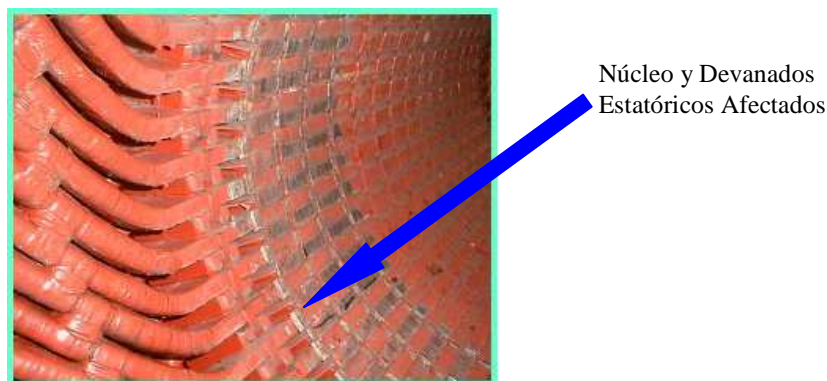


Figura 1.7. Daño mecánico en el devanado estatórico como consecuencia de la barra desprendida [13].

Además, en ciertas industrias con presencia de ambientes inflamables, las chispas que se pueden producir por el desprendimiento de las barras rotas al golpear con otros componentes del motor presentan un grave peligro, que puede atentar incluso con la seguridad del personal de la planta.

De todo lo expuesto anteriormente se puede concluir que realizar un monitoreo periódico en los motores de inducción dentro de una industria, con el fin de prevenir y evitar riesgos tanto en la maquinaria como en el personal, es fundamental, y MCSA es un método eficiente para lograrlo.

1.4.2 DESARROLLO CONCEPTUAL Y MATEMÁTICO.

En esta sección se presenta el desarrollo conceptual y matemático que permite fundamentar la aplicación de MCSA para la detección de barras rotas en motores de inducción.

El principio de operación de un motor de inducción consiste en que al ser alimentado con una fuente de corriente alterna trifásica y balanceada, existe circulación de corriente a través de los devanados de armadura, simétricamente dispuestos. Por efecto de inducción aparece una corriente alterna en el rotor. Como resultado de esto, se produce un campo magnético rotatorio de armadura que gira a velocidad sincrónica y que adelanta al campo en el rotor, dando como resultado que al colocar el rotor dentro de estos campos tienda a girar arrastrado por ellos, siempre a una velocidad menor que la sincrónica.

Con el fin de justificar el efecto que las barras rotas provocan en un motor de inducción, se analizará el comportamiento de un motor en perfecto estado y luego uno con barras rotas. El análisis [13] parte de la ecuación general que relaciona a la frecuencia del voltaje de alimentación al motor (f_1), con la velocidad sincrónica (N_s) del campo magnético giratorio, y el número de pares de polos de los devanados (p), y esta es:

$$f_1 = N_s * p \quad (1.1)$$

Para un motor sin barras rotas, únicamente se tiene la presencia de un campo magnético rotatorio en adelante que gira a velocidad sincrónica debido a que se tiene condiciones balanceadas o de perfecta simetría. Al poner el motor en funcionamiento, el rotor girará a una velocidad (N_r) menor que la velocidad sincrónica. A la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad de rotación del rotor se la denomina velocidad de deslizamiento ($N_s - N_r$), y expresada en “por unidad” respecto de la velocidad sincrónica se representa como:

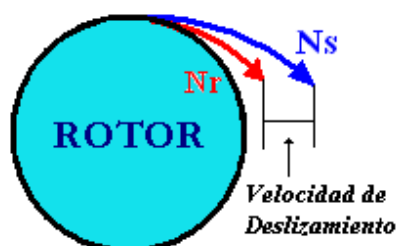
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (1.2)$$

En la Figura 1.8 se ilustra como el rotor gira a una velocidad menor que la velocidad sincrónica y se puede visualizar el concepto de velocidad de deslizamiento. La frecuencia asociada a la velocidad de deslizamiento (f_2), que corresponde a la frecuencia de la corriente y voltaje inducidos en el rotor, se define como:

$$f_2 = (N_s - N_r) * p$$

$$f_2 = s * N_s * p$$

$$f_2 = s * f_1 \quad (1.3)$$



Bajo un modo normal de operación, el campo magnético rotatorio producido por la corriente que circula a través de los devanados del rotor gira a una velocidad mayor que la velocidad del rotor para un instante dado, tal como se muestra en la Figura 1.9. Se puede demostrar que la velocidad del campo magnético rotatorio producida por la circulación de corriente en los devanados del rotor con respecto de los devanados del estator es la velocidad sincrónica, así:

$$N_r + N_2 = N_r + N_s - N_r = N_s \quad (1.4)$$

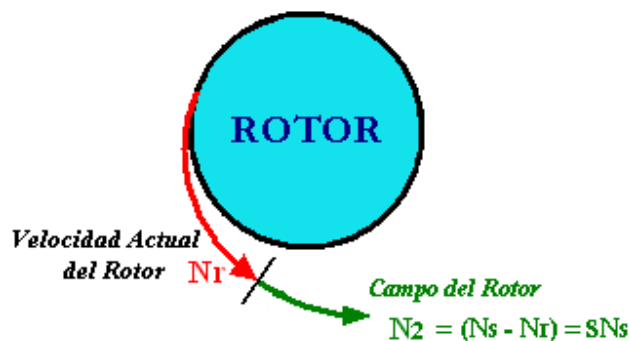


Figura 1.9. Campo del rotor girando a una velocidad mayor que la velocidad del rotor N_r [13].

Es así que con respecto de un observador estacionario en los devanados del estator, los campos magnéticos rotativos del estator y del rotor giran a velocidad sincrónica. El efecto de tener estos dos campos juntos es producir un torque permanente en la máquina.

Si el motor tiene barras rotas, crea condiciones no balanceadas o de asimetría que generan un campo magnético giratorio adicional en retraso, que gira a velocidad de deslizamiento, esto es a $-sN_s$ con respecto a la del rotor, tal como se muestra en la Figura 1.10. Con la presencia de este campo un observador estacionario en los devanados del estator observará un campo rotatorio a una velocidad denominada N_b que, análoga a la expresión 1.4, se define como:

$$N_b = N_r - sN_s \quad (1.5)$$



Figura 1.10. Campos rotatorios en atraso y en adelanto en un motor con barras rotas [13].

Despejando de la expresión 1.2 la velocidad del rotor N_r , se tiene que:

$$N_r = N_s - sN_s \quad (1.6)$$

Remplazando la velocidad del rotor formulada en 1.6 en la expresión 1.5, se puede dejar a N_b únicamente en función de la velocidad sincrónica N_s y el deslizamiento s , así:

$$\begin{aligned} N_b &= N_s - sN_s - sN_s \\ N_b &= N_s - 2sN_s \end{aligned} \quad (1.7)$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación 1.7 por el número de pares de polos p , y en base de la expresión 1.1, se puede formular a esta ecuación en términos de frecuencia, así:

$$N_b * p = N_s * p - 2sN_s * p$$

$$f_b = f_1 - 2sf_1$$

$$f_b = f_1(1 - 2s) \quad (1.8)$$

Como el campo magnético rotatorio de frecuencia f_b corta los bobinados del estator, se induce en ellos un voltaje y una corriente con la misma frecuencia del campo rotatorio, denominada f_{sb} , ya que corresponde a la frecuencia de la corriente que circula por los devanados estatóricos, así:

$$f_{sb} = f_1(1 - 2s) \quad (1.9)$$

La expresión 1.9 quiere decir que bajo condiciones de asimetría, consecuencia de las barras rotas en un motor de inducción, existe la presencia de una banda lateral en $2sf_1$ por debajo de la frecuencia fundamental f_1 .

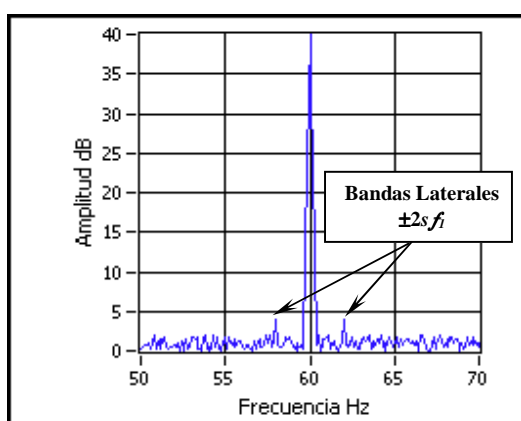
Por efecto de las barras rotas en el motor de inducción, se genera también una variación cíclica de la corriente, que da como resultado un torque y una velocidad oscilatorios al doble de la frecuencia de deslizamiento ($2sf_1$). Producto de esto, aparece una banda lateral a $2sf_1$ por sobre de la frecuencia de alimentación f_1 , descrita en 1.10. La banda lateral inferior por efecto de la velocidad de oscilación puede disminuir en su magnitud.

$$f_{sb} = f_1(1 + 2s) \quad (1.10)$$

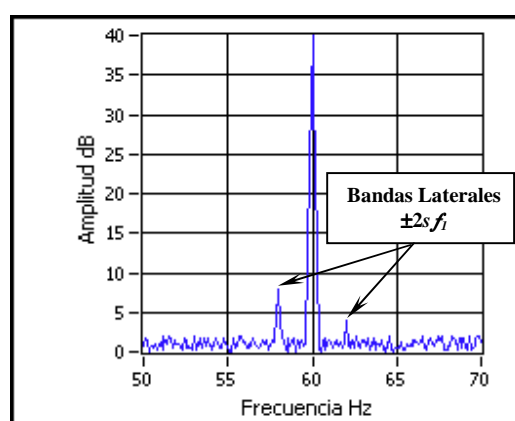
En conclusión, tener barras rotas en el motor, da como resultado componentes de corriente que son inducidas en las bobinas del estator y que, por lo tanto, se ven reflejadas en la corriente de alimentación al motor a frecuencias dadas por 1.11, de donde se puede afirmar que la presencia de barras rotas origina bandas laterales ubicadas a frecuencias del doble de la frecuencia de deslizamiento ($2sf_1$) alrededor de la frecuencia fundamental f_1 .

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (1.11)$$

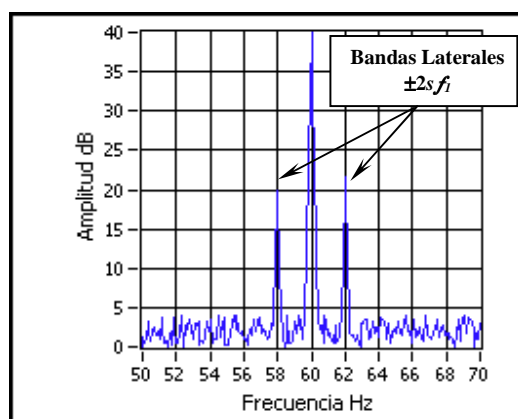
Ahora, cabe señalar que es normal que un motor de inducción que no tenga rotas sus barras, presente asimetrías debido, por ejemplo, a un desbalance en las impedancias de sus devanados, pero estas asimetrías son pequeñas comparables con las causadas por el efecto de barras rotas. Es por esto que la presencia de las bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental en un motor de inducción sin falla es normal, como se muestra en la Figura 1.11 b), pero la amplitud de estas bandas laterales se ve intensificada con la ruptura de barras en el motor como en la Figura 1.11 c).



a)



b)



c)

Figura 1.11. Componentes espectrales de un motor: a) ideal, b) con bandas laterales inherentes a asimetrías en los devanados del rotor, c) con bandas laterales debido a barras rotas.

1.4.3 CONSIDERACIONES DEL MÉTODO DE DIAGNÓSTICO.

De acuerdo a las variables que afectan a la frecuencia y magnitud de las bandas laterales, se debe considerar aspectos que pueden influir significativamente en el diagnóstico y de acuerdo a estos, llevar a cabo implementaciones diferentes, o incluso, llegar a cambiar de estrategia.

Debido a que las bandas laterales son caracterizadas por la ecuación 1.11, las consideraciones que deben tomarse son las siguientes [13]:

- Diferencias en los diseños de cada motor.
- Potencia del motor.
- Efectos debidos a la carga.
- Efectos de la presencia de un reductor mecánico de velocidad.

Diferencias en los diseños de cada motor.

El diseño de cada motor tiene influencia sobre la velocidad sincrónica ya que esta es función del número de polos específico para cada motor. Además, cabe señalar que los motores de inducción pueden tener dos tipos de rotores: devanados o jaula de ardilla. La estrategia en estudio es aplicable únicamente a éstos últimos.

Potencia del motor.

El sistema debe ser acorde a la potencia del motor sujeto de estudio, tomando en cuenta que en el mercado existe una variedad de motores cuyas potencias oscilan desde fracciones de HP hasta miles de HP.

Efectos debidos a la carga.

Existen dos efectos debidos a la carga. El primero se produce si el torque de la carga varía con la posición del rotor. En este caso la corriente contiene componentes

espectrales que pueden coincidir con los causados con la condición de falla [16]. Una situación en la que se evidencia este problema es cuando el motor es usado en compresores o trituradores en cuyo caso la carga no es constante en el tiempo. El segundo se produce cuando, aunque teniendo una carga constante, esta no hace que el deslizamiento sea lo suficientemente representativo para alejar las bandas laterales respecto de la fundamental que las “esconde”. De aquí que este método es conveniente para motores con carga constante y equivalente a por lo menos el 75% de su capacidad nominal.

Efectos de la presencia de un reductor mecánico de velocidad.

Cuando el motor está conectado a un reductor mecánico de velocidad puede producir componentes en el espectro de frecuencias de corriente que pueden estar cerca o en el mismo lugar que las bandas laterales [17].

El presente proyecto expone la implementación de un sistema basado en MCSA para la detección de fallas por ruptura de barras en la jaula de ardilla del rotor de motores de inducción.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

En este capítulo se hace una síntesis de la arquitectura del sistema, dando una explicación de las etapas necesarias en su implementación.

El sistema funciona en varias partes constitutivas que son:

- Motor.
- Transductor.
- Adquisición.
- Procesamiento digital de señales.
- Detección de la falla usando MCSA.
- Almacenamiento de datos.
- Reporte.

La visión general del sistema se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 2.1.

En síntesis, el proceso comienza con la puesta en marcha del motor a evaluar. Una vez que está funcionando en estado estable, señales de corriente de línea y voltaje de fase son sensadas y acondicionadas mediante un transductor adecuado para cada una, de manera que se acople a las necesidades del sistema de adquisición de datos, que es la siguiente etapa. En ésta, se digitaliza la señal y se almacena en una PC. Éstas se filtran digitalmente con el fin de dejarlas listas para que entren a una “máquina” digital de detección de fallas, que no es más que un algoritmo que analiza las características de las señales procesadas e implementa los criterios de MCSA para identificar la naturaleza y gravedad de la falla. Al mismo tiempo se envía los datos de las señales de corriente y voltaje en el dominio del tiempo y frecuencia sea a una hoja de cálculo, a una Base de Datos estandarizada o simplemente no se almacena a criterio del usuario. Finalmente, se genera un reporte que se guarda en la PC.

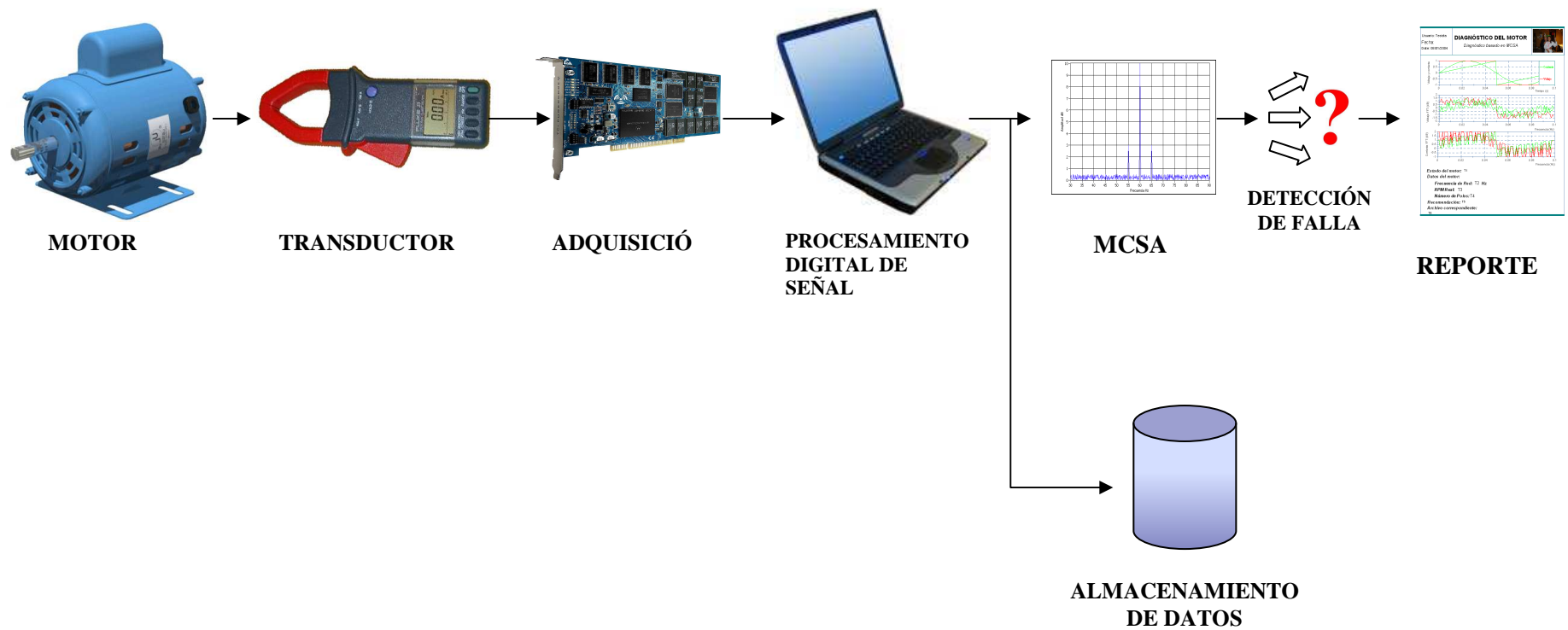


Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema.

2.1 MOTOR.

Dentro del campo de las máquinas eléctricas, el estudio de los motores de inducción ha tenido un gran desarrollo debido a la importancia y utilidad de este tipo de maquinaria en el sector industrial y productivo. Es así que se tiene modelos eléctricos y matemáticos de los motores de inducción y cada vez más se trata de optimizar su intervención y funcionamiento en sus diversas aplicaciones.

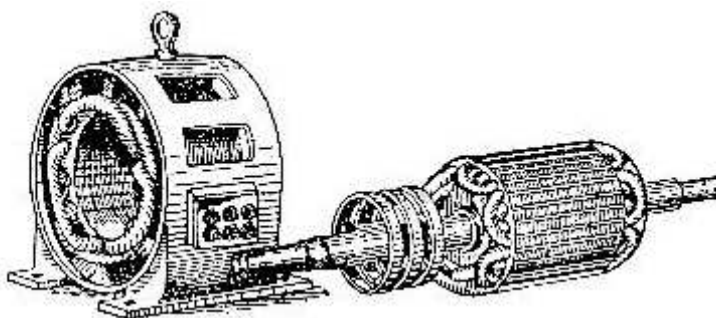
La presente sección no pretende hacer un análisis profundo del principio de funcionamiento de los motores de inducción, ya que el análisis matemático necesario para el proyecto está expuesto en la Sección 1.3.2, sino más bien presentar un panorama global de este tipo de maquinaria enfocado a la aplicación de MCSA para la detección de fallas, y más específicamente la detección de barras rotas en la jaula de ardilla de estos motores.

2.1.1 GENERALIDADES.

En un motor de inducción, el voltaje de alimentación aplicado en los devanados de armadura es un voltaje de magnitud y frecuencia constantes (esto es si no tiene asociado controladores) que puede ser trifásico o monofásico. En el rotor por efecto de inducción, aparece un voltaje de magnitud y frecuencia variables como consecuencia de la velocidad de giro del rotor, con respecto de la velocidad sincrónica.

Construcción [18]

El motor de inducción como se puede ver en la Figura 2.2 consta principalmente de un estator con sus respectivos devanados, y un rotor cuyos devanados son conductores de cobre o aluminio, denominados “barras del rotor”, embebidos o vaciados en ranuras o agujeros en un núcleo que no es más que un cilindro de acero laminado. Existen dos tipos de rotores: los rotores “jaula de ardilla” y los de tipo devanados. Los primeros, que tal como se muestra en la Figura 2.3 deben su nombre a que las barras se encuentran cortocircuitadas entre sí en ambos extremos por medio de anillos continuos formando una jaula. Estas barras no siempre son paralelas al eje del rotor, sino que suelen estar desviadas cierto ángulo respecto del eje para evitar saltos y disminuir el zumbido de origen magnético durante el funcionamiento del motor. Los rotores “devanados”, en cambio, están constituidos por conductores de cobre conectados generalmente en estrella y aislados del núcleo, y cuyos extremos se conectan a anillos rozantes aislados del eje del rotor.



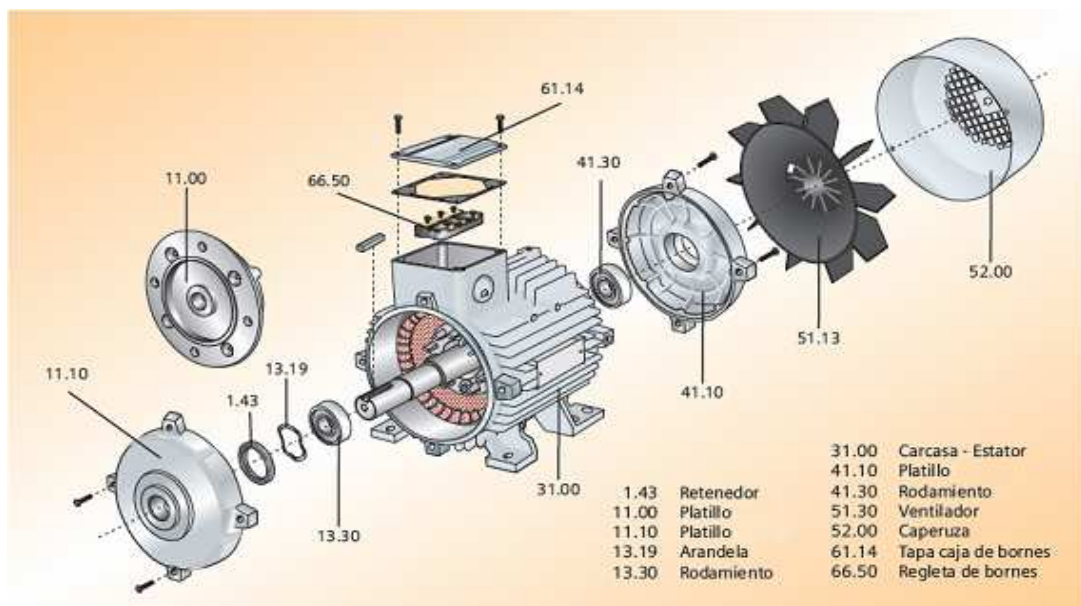
De estos dos tipos de rotores, los motores de inducción tipo jaula de ardilla son los de construcción más simple y económica además de presentar ventajas de funcionamiento tales como la operación en lugares aislados y con ambientes hostiles y abrasivos. Los motores de rotor devanado se usan cuando se necesite alto torque de

arranque o cuando se requiera variar la resistencia rotórica para, por ejemplo, control de velocidad.

En conclusión los motores de inducción de mayor aplicación son los de tipo jaula de ardilla.



Además del rotor y estator, los motores de inducción tienen otros elementos constitutivos, que se muestran en la Figura 2.4.



tipo jaula de ardilla, al no usarse vacío hasta un poco más allá que plena carga.

Cuando el motor opera sin carga o en vacío, tanto el deslizamiento como la frecuencia, reactancia y fuerza electromotriz del rotor, son muy pequeñas, es así que el deslizamiento puede ser una fracción de uno por ciento, dando como resultado una velocidad ligeramente menor a la velocidad sincrónica. Además de que en esta condición el factor de potencia en retraso es también extremadamente pequeño.

En el caso de que el motor opere a media carga, la velocidad disminuye causando un aumento en el deslizamiento y también en la frecuencia, reactancia y fuerza electromotriz del rotor. Además de que se aumenta el factor de potencia en retraso.

En condición de plena carga, el motor girará con un valor de deslizamiento que provee un equilibrio entre el par aplicado al eje y el par desarrollado por la fuerza magnetomotriz. Generalmente en esta condición de carga, el deslizamiento oscila entre el tres y diez por ciento. El factor de potencia aumenta tomando valores

entre 0.8 para motores pequeños (1 HP) y 0.95 para motores de mayor potencia (150 HP o mayores).

Si se hace operar al motor en condición más allá de plena carga, se tiene como consecuencia un aumento en el deslizamiento, perdiendo el equilibrio entre pares que ocurre a plena carga. Además, la frecuencia en el rotor aumenta, así como su reactancia, produciéndose una disminución en el factor de potencia en el rotor que se refleja al estator. Esto provoca que al llegar a esta condición de sobrecarga, el factor de potencia se aproxima al máximo, para luego disminuir rápidamente.

Se puede concluir entonces, que el comportamiento del motor sin carga presenta un deslizamiento, reactancia y frecuencia de rotor, y factor de potencia muy pequeños. A medida que la carga aumenta, estos parámetros también aumentan, hasta llegar a condiciones de plena carga, luego de las cuales, el factor de potencia en retraso disminuye. Todos estos parámetros están íntimamente relacionados y manteniendo fijo el deslizamiento con una carga constante adecuada para el algoritmo de MCSA, se puede fijar el resto.

2.1.2 MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS Y MONOFÁSICOS.

En el mercado se puede encontrar motores de inducción trifásicos y monofásicos. Para escoger efectivamente entre ellos, se debe tener en cuenta las exigencias de la instalación donde se los va a utilizar, el uso que se les va a dar y, sobre todo, se debe considerar los datos de placa que no deben ser excedidos.

Motores trifásicos

Los motores trifásicos usualmente se encuentran en la industria en donde se cuenta con el suministro trifásico en baja tensión necesario para su accionamiento. Las tensiones normalizadas para las redes de corriente trifásica, en baja tensión, son las descritas en la Tabla 2.1. La frecuencia industrial normalizada puede ser de 50 o 60 Hz.

Tabla 2.1. Voltajes nominales de redes trifásicas de bajo voltaje [19].

Tensión de línea (V)	Tensión de fase (V)	Denominación usual de la red (V)
208	120*	208/120
220	127	220/127
260	150	260/150
380	220	380/220
440	254	440/254

* Este nivel de voltaje monofásico, puede venir de una red monofásica de 240/120V.

Los motores trifásicos de inducción pueden ser tipo jaula de ardilla o rotor devanado, y su capacidad en potencia puede variar desde fracciones de HP hasta incluso unidades de miles de ellos. Cabe resaltar que al aumentar la potencia del motor, aumenta también la corriente nominal o de plena carga, variable que debe ser sensada para el análisis del motor mediante MCSA. El Anexo D, presenta una lista de motores trifásicos de inducción comerciales en donde, entre sus características operativas, se puede identificar la corriente nominal para cada capacidad de potencia.

Motores monofásicos.

Existen instalaciones, sean industriales o residenciales, en las que la empresa de distribución únicamente provee servicio de corriente alterna monofásica que puede ser fase – fase o fase neutro. Es ahí donde los motores monofásicos son la solución, claro, considerando las restricciones según sus características de placa. Además, estos motores son de mucha utilidad para aplicaciones que no requieren de potencias elevadas puesto que, por lo general, los motores monofásicos comerciales presentan potencias desde fracciones hasta decenas de HP, tal como se puede ver en el Anexo E. En consecuencia sus corrientes nominales serán también pequeñas en comparación con motores trifásicos de gran capacidad.

Características y Construcción [18].

Un motor monofásico de inducción no tiene de forma inherente el campo magnético giratorio que se presenta en un motor de alimentación trifásica, es decir, que no tiene arranque propio por lo que requiere de un medio auxiliar para empezar su operación induciendo el giro del rotor. Una vez que el rotor ha girado se desarrolla un campo magnético rotatorio permanente. Para esto, antes de que se inicie la rotación del rotor, el estator produce un campo pulsante.

Desde el punto de vista constructivo, el rotor de cualquier motor monofásico de inducción es intercambiable con uno tipo jaula de ardilla de un motor trifásico, es decir, que el rotor no tiene ninguna diferencia entre estos dos tipos de motores. La diferencia está en el estator ya que para producir el campo rotatorio y el par de arranque, se debe dividir al devanado estático en dos: un devanado principal de alta reactancia para disminuir pérdidas y un devanado auxiliar para el arranque. Estos dos devanados puestos en paralelo, están conectados a la red monofásica y el devanado auxiliar debe estar desfasado 90° con respecto del devanado principal. Dependiendo del tipo de diseño del motor, el devanado auxiliar se desconecta del circuito una vez que el motor ha arrancado o permanece conectado tanto en el arranque, como en el funcionamiento normal.

Tipos. [18].

Existen varios tipos de motores monofásicos de inducción y cada uno difiere de otro por su método de arranque, propiedades de funcionamiento, rango de potencias y aplicaciones para las que son más adecuados. A continuación se lista los diferentes tipos de estos motores, en los que MCSA puede aplicarse:

- Motores de fase partida.
 - Motor de arranque por resistencia.
 - Motor de arranque por capacitor.
 - Motor de fase partida y capacitor permanente.
 - Motor con capacitor de arranque y capacitor permanente.
- Motor de inducción de arranque por reluctancia.
- Motor de inducción de polos sombreados.

2.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR A ANALIZARSE CON MCSA.

En resumen y de acuerdo a las consideraciones del método de diagnóstico descritas en la Sección 1.3.3 y las mostradas en la presente sección, el motor a ser monitoreado con MCSA debe cumplir las siguientes características:

- **El motor de inducción puede ser trifásico o monofásico, con rotor tipo jaula de ardilla.**
- **Se debe tener acceso a la línea de alimentación al motor, aún cuando éste se encuentre ubicado en una zona inaccesible.**
- **El motor debe operar con al menos el 75% de su carga nominal.**
- **El motor debe manejar carga constante.**
- **El motor no debe tener ningún tipo de control de velocidad, es decir debe operar a velocidad constante.**
- **MCSA es un método aplicable en motores de cualquier potencia siempre y cuando el sensor de corriente sea el adecuado para sensar los niveles de corriente del motor.**

2.2 TRANSDUCTOR.

El transductor tiene por objeto sensar la variable a ser analizada y acondicionarla de acuerdo a los requerimientos del sistema implementado en base de esta variable. Para el caso de la detección de barras rotas en el rotor mediante MCSA se requiere sensar señales de corriente y voltaje de alimentación al motor.

La presente sección tiene por objeto analizar diferentes opciones de sensado para señales de corriente y voltaje, para escoger de entre ellas la más adecuada para la implementación de MCSA. Las señales que provean dichos sensores deben ser acondicionadas de acuerdo a los requerimientos necesarios para la adquisición de éstas.

2.2.1 SENSORES DE CORRIENTE.

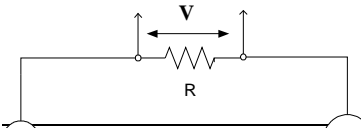
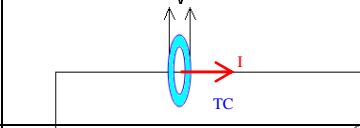
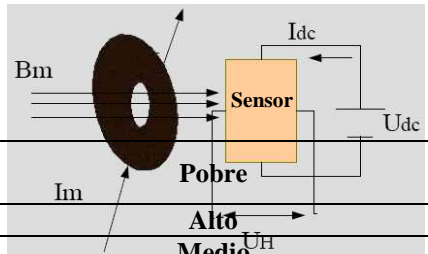
Existen varias alternativas para realizar sensado de corriente. Cada una de ellas tiene diferente principio de funcionamiento, lo que define características diferentes entre sí.

Como opciones a ser aplicadas para la medición de la corriente de alimentación al motor de inducción, se considera los siguientes métodos e instrumentos de sensado:

- **Sensor Resistivo.**
- **Transformador de Corriente (Pinza).**
- **Sensor de Efecto Hall.**

Las características de cada uno de ellos son descritas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Características de los sensores de corriente [20, 21].

Características	Sensor Resistivo	Transformador de Corriente (Pinza)	Sensor de Efecto Hall
Tipo de sensor.	Pasivo	Pasivo	Activo
Tipo de conexión.	Invasivo	No Invasivo	No invasivo
Esquema de implementación.			
Linealidad en el Rango de la Medición.	Muy buena	Buena	Pobre
Rango de Medición.	Bajo	Alto	Alto
Consumo de Potencia.	Alto, proporcional a i^2R.	Bajo	Medio
Saturación de Corriente DC.	No	Si	Si
Variación de la Salida con Respecto a la Temperatura.	Medio	Bajo	Alto
Problema de Saturación e Histéresis.	No	Si	Si
Ancho de Banda.	Pasabanda	50 kHz	50 MHz
Costo.	Muy bajo	Medio	Alto
Disponibilidad en el mercado.	Alta	Media	Baja

2.2.2 REQUERIMIENTOS DEL SENSOR DE CORRIENTE.

Para la implementación del sistema, el sensor de corriente debe cumplir con las siguientes características:

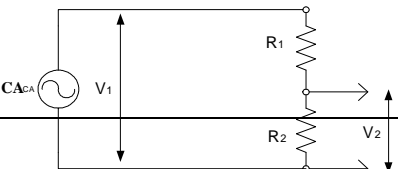
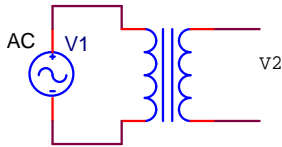
- Ser un método no invasivo.
- Debe poder medir un rango de corriente de al menos el valor nominal o de plena carga del motor a ser evaluado.
- La señal de salida deberá conservar todas las características de la corriente sensada, que para este caso es la corriente que circula por la línea de alimentación al motor.
- La señal de salida del sensor debe poder ser acondicionada al nivel requerido por el sistema de adquisición de datos.
- Debe tener un ancho de banda de 0-500 Hz. (Sección 2.3.2)

2.2.3 SENSORES DE VOLTAJE.

Para el sensado de la señal de voltaje se analiza dos métodos muy conocidos, de sencilla aplicación y bajo costo, pero que sin embargo, constituyen un modo eficiente para el sensado de tensión. Estos métodos son:

- Divisor de Voltaje.
- Transformador de Voltaje.

Las características de cada uno de ellos se describen en la Tabla 2.3.

Características	Divisor de Voltaje	Transformador de Voltaje
Tipo de sensor.	Pasivo	Pasivo
Tipo de conexión.	No Invasivo	No Invasivo
Esquema de implementación.		

Linealidad en el Rango de la Medición.	Muy buena	Buena
Capacidad de Medición en Alta Potencia.	No	Si
Consumo de Potencia.	Alto	Bajo
Saturación de Corriente DC	No	Si
Variación de la Salida con Respecto a la Temperatura.	Medio	Bajo
Problema de Saturación e Histéresis.	No	Si
Ancho de Banda.	Pasabanda	Alta frecuencia
Provee aislamiento Respecto de la Fuente de Tensión.	No	Si
Costo.	Muy bajo	Medio
Disponibilidad en el mercado.	Alta	Alta

Tabla 2.3. Características de los sensores de voltaje [21, 22].

2.2.4 REQUERIMIENTOS SENSOR DE VOLTAJE.

Para la implementación del sistema, el sensor de voltaje debe cumplir con las siguientes características:

- Ser un método no invasivo de sensado.
- Debe ser capaz de sensar el voltaje de alimentación al motor, que para una red en bajo voltaje puede ser 208/120 V.
- La señal de salida deberá conservar todas las características de la señal de voltaje sensada, que para este caso es el voltaje de alimentación al motor.
- La señal de salida del sensor debe poder ser acondicionada a un nivel de voltaje compatible con el sistema de adquisición de datos.
- Debe tener un ancho de banda de 0-500 Hz. (Sección 2.3.2)

2.3 ADQUISICIÓN DE SEÑALES.

La adquisición de datos tiene por objeto digitalizar la señal análoga del transductor y enviarla al computador.

Lamentablemente, esta tarea no es tan simple como pudiera parecer, ya que se debe tomar en cuenta los factores internos y externos que envuelven una medición, de manera que se obtengan datos exactos, confiables y libres de ruido. La forma de implementar el sistema de adquisición depende de la clase de señal a estudiar, de modo que se pueda elegir la mejor manera de trasladarla y de digitalizarla.

2.3.1 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

La mayor parte de sistemas de adquisición en la actualidad están basados en PC, o en algún tipo de microprocesador que se adapte a un conversor Analógico-Digital (A/D) y transfiera sus lecturas a una memoria externa.

Algunos instrumentos necesariamente requieren de una PC que sirva como *host*, mientras otros pueden funcionar independientemente y pueden tener

eventualmente una transferencia de datos a un computador a través de una comunicación específica.

Para el sistema se ha tenido en cuenta varias opciones de comunicación que se analizan en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4. Características de tipos de sistemas de adquisición de datos basados en PC [23].

Tipo	Medio	Características
Dispositivos Internos	Tarjetas <i>Plug-in</i>	Velocidad más rápida posible, no portátil, instalación relativamente complicada.
Dispositivos Externos	Puerto Paralelo	Velocidad rápida, portátil, fácil expansión de canales y conexión de señal.
	Puerto Serial	Velocidad lenta, portátil, fácil conexión de señal.
	Tarjetas PC (PCMCIA)	Velocidad media a rápida, muy portátil, canales y conexión de señal limitados.
	Puerto USB	Velocidad variable de acuerdo a versión, autoinstalable en momento de conexión, muy portátil, fácil conexión de señal.
Dispositivos Independientes	Registrador de datos	Baja velocidad, portátil, conexión de señal fácil, no se necesita PC en el sitio de prueba.
Interfaces	PC a IEEE 488	Velocidad de transferencia baja, capacidades dependen del instrumento específico.

En la actualidad se han vuelto muy populares los sistemas de adquisición basados en puertos USB que tiene varias versiones siendo la más actual y rápida la 2.0 que permite una alta velocidad de transmisión. En la versión 1.1, USB puede transmitir a 1,5 Mbits/s y a 12 Mbits/s elegible al usuario, pero en 2.0 la transmisión puede hacerse hasta a 480 Mbits/s que es útil inclusive para hacer aplicaciones sencillas en tiempo real. USB también puede energizar el instrumento desde el computador. Estas características hacen que este tipo de comunicación sea el más adecuado para su aplicación en el sistema.

En general un sistema de adquisición debe ser escalable, confiable y estandarizado de manera que se pueda reutilizar en varias aplicaciones de la misma naturaleza.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN.

Las consideraciones generales que se deben tomar en cuenta para la realización del sistema son las siguientes:

- Amplitud de la señal de entrada.
- Frecuencia máxima de señal.
- Ancho de Banda.
- Tipo de convertor Analógico-Digital (ADC).
- Rango y resolución del ADC.
- Relación señal a ruido de cuantización. (SQNR)

- Muestreo.
- Filtro *Anti-aliasing*.
- Configuración de la señal de entrada al ADC.
- Fuentes de Ruido.

Estas consideraciones se detallan a continuación.

Amplitud de la entrada.

Debido a las características de la señal, que es una onda de superposición de sinusoidales y que por las características de los filtros *anti-aliasing* (Sección 3.5.1) debe estar limitada entre ± 15 V, la entrada al sistema de adquisición debe estar lista a recibir este rango.

Frecuencia máxima de la señal.

Debido al algoritmo de MCSA para este caso (ecuación 1.11), la frecuencia de la banda lateral máxima teórica se encuentra cuando el deslizamiento es 1. De ahí que

$$f_{sm\acute{a}x} = 60 * (1 + 2s) \Big|_{s=1} = 180 \text{ Hz}$$

Ancho de banda.

El ancho de banda del sistema de adquisición no puede permitir que haya ganancia negativa en las frecuencias de interés ya que su amplitud determina el diagnóstico del motor. Es decir, que el sistema no puede permitir que haya una atenuación de -3dB en 180 Hz ya que esto puede generar un diagnóstico erróneo. De esta manera, es conveniente que la frecuencia de corte del sistema de adquisición esté entre los 400 y 500 Hz para asegurar que se evite cualquier tipo de pérdidas en las bandas inferiores. Se escogerá 500 Hz.

Convertor Analógico-Digital (ADC).

El ADC puede ser Flash, que tiene un buen rendimiento en cuanto a velocidad pero tiene alto costo, y puede ser también de aproximaciones sucesivas que toma un mayor tiempo en la digitalización.

En la implementación del sistema, puede utilizarse cualquiera de los dos tipos de ADC, ya que la alta velocidad de transformación no será imprescindible y la frecuencia de trabajo no se acercará a la frecuencia de corte del dispositivo ya que es en banda base (500 Hz).

Rango y Resolución del ADC.

El rango del dispositivo debe concordar con los requerimientos del sistema de adquisición. De aquí que la entrada al ADC debe ser de -15 a 15 V y el dispositivo debe tener un rango entre estas mismas proporciones.

La resolución del dispositivo es determinada por el número de bits de salida del ADC:

$$R = \frac{D}{2^N}$$

(2.1)

donde:

R: Resolución dada en Voltios.

D: Rango dinámico de la señal en Voltios.

N: Número de bits del conversor ADC.

Debido a que la amplitud de entrada al sistema de adquisición está entre -15 y 15 voltios, el rango dinámico es 30 V y será necesario un dispositivo con un mínimo de resolución de 12 bits, de manera que:

$$R = \frac{30V}{2^{12}} = 7,32mV \text{ máximo.}$$

Lo que quiere decir que el mínimo valor a ser leído es 7,32 mV y que se puede tener una relación señal a ruido de cuantización ($SQNR$), de acuerdo a la expresión:

$$SQNR = 20 \log \left(\frac{D_{señal}}{D_{ruido}} \right)$$

(2.2)

En donde el rango dinámico del ruido es equivalente al Rango, así:

$$SQNR = 20 \log \left(\frac{D_{señal}}{R} \right) = 20 \log \left(\frac{D_{señal}}{\frac{D_{señal}}{2^N}} \right)$$

$$SQNR = N 20 \log(2)$$

Llegando finalmente a la expresión:

$$SQNR = 6,02 * N \quad (2.3)$$

De la ecuación anterior se obtiene que el SQNR es de alrededor de 74 dB que sería a causa de la resolución del dispositivo.

Muestreo

La velocidad de muestreo depende de la frecuencia máxima que se quiera analizar. Para esta consideración se debe tomar en cuenta el teorema de Shannon-Nyquist de muestreo [24] para evitar el “*Aliasing*”. Es decir que “la frecuencia de muestreo mínima debe ser por lo menos el doble de la frecuencia de Nyquist”, que teóricamente es la máxima frecuencia de interés.

Entonces, ya que la máxima frecuencia a muestrear es de 500 Hz, la frecuencia mínima teórica de muestreo ideal debería ser 1 kHz o muestras por segundo (*Samples per second: S/s*), pero en la práctica, es recomendable que la frecuencia de muestreo sea mínimo de cinco a ocho veces la frecuencia mínima, esto es el rango entre 2,5 y 4 kS/s.

El método de muestreo puede variar y ser: “Simultáneo” cuando se tiene dos señales en las que su sincronización en el muestreo es crítico; “Por intervalo”, cuando la sincronización no es crítica y las señales son de muy baja frecuencia como las de presión y temperatura; “Continuo”, que toma muestras de cada canal a una tasa constante a través de un multiplexor analógico; “Aleatorio entrelazado”, utilizando digitalizadores de alta velocidad de manera que el sistema aparente tener una tasa de muestreo mayor a la real; “Multiplexación / conmutación” en donde un multiplexor selecciona un canal y dirige su información al ADC para la digitalización y después selecciona otro canal.[25].

Ya que existen dos canales, y que la simultaneidad de la medición no es crítica pero sí necesaria, el sistema puede utilizar el muestreo simultáneo, o por

multiplexación que pueden ser los más adecuados para adquirir señales de voltaje y corriente.

Para el análisis digital se obtendrán 6400 muestras por canal. La justificación de esto se encuentra detallada en la Sección 2.4.4.

Los datos obtenidos se almacenan dependiendo de la arquitectura del sistema, ya sea en una memoria interna o puede ser por Acceso Directo a Memoria (*Direct Memory Access, DMA*) a través de un multiplexor que envía los datos directamente a la memoria RAM del computador.

En este caso, por la arquitectura del sistema y por el algoritmo de detección, se necesita un dispositivo que tenga al menos dos canales de lectura o entrada analógica (AI) para señales de voltaje y corriente. Estos deben tomar datos en muestreo simultáneo o por multiplexación, determinando el número de muestras a leer. Debe haber dos bits de escritura digital: el uno para el encendido y apagado de un LED de indicación de sistema activo y el otro para la indicación de lectura de datos que además conecte el circuito de la señal de corriente al dispositivo de adquisición para evitar daños por la sobrecorriente de arranque. El sistema se expone de forma detallada en el Capítulo 3.

Filtro *Anti-Aliasing*.

Para evitar que cualquier tipo de señal análoga parásita, que tenga una frecuencia mayor a la frecuencia de Nyquist, aparezca en el espectro digital por el efecto de *Aliasing*, se debe poner a la entrada un filtro analógico tipo pasabajas de manera que se tenga una atenuación a nivel de ruido de cuantización en la frecuencia de Nyquist.

Las opciones para la topología de este filtro son en general: Butterworth, Chebyshev I, y Bessel. Las características de cada uno de estos son las mismas que en los filtros digitales que constan en la Sección 2.4.2.

Ya que es importante que la respuesta sea lo más lineal posible en la banda de paso, y que la banda de transición debe ser lo más angosta posible, la topología a ser usada debe ser Butterworth de mínimo cuarto orden. La frecuencia de corte del filtro puede coincidir con el ancho de banda del sistema de adquisición, esto es alrededor de 500 Hz. El filtro debe llegar a tener una atenuación a nivel de ruido de cuantización a $f_s/2$. Esto es -72 dB entre los valores de 1,25 - 2 kHz [26].

Configuración de señal de entrada al dispositivo

Existen varias opciones para el tipo de señal a adquirir por ejemplo: referida a tierra y diferencial o flotante. De esto dependerán las dificultades de implementación de hardware y las limitaciones en cuanto a rango y sensibilidad a los diferentes tipos de ruido que puedan presentarse [27].

Si se trabaja con *señales referidas a tierra*, existe la posibilidad de tener “lazos de tierra” que causen mediciones erróneas e inclusive el daño del equipo de adquisición. Además, la referencia de una señal referida a tierra debe ser conectada a la tierra del sistema común para no tener diferencia de voltaje entre la tierra analógica y la tierra del sistema de adquisición. De existir, esta pudiera no estar en nivel de DC, lo cual da como resultado una medición ruidosa afectando la exactitud

del sistema. Por otra parte, si se conecta una señal en modo no diferencial, se reduce el rango máximo de operación del dispositivo.

Si se trabaja con *señales flotantes* hay beneficio en la etapa de amplificación previa por el rechazo de ruido en modo común. Además, con una configuración correcta de hardware de entrada, se puede conseguir que no exista saturación en los niveles altos y bajos por diferencia de potencial entre la tierra analógica y la tierra digital sin necesidad de conectarlas directamente y evitando así, lazos de tierra.

Es por lo expuesto anteriormente que se implementa el sistema de adquisición en modo diferencial con las consideraciones para evitar que ingresen los diferentes tipos de ruido que se analizan a continuación.

Fuentes de ruido en el sistema de adquisición

Aunque un sistema de adquisición evite lazos de tierra y la saturación en modo diferencial, existen otros tipos de fuentes de ruido inherentes al ambiente. Esto es especialmente considerable cuando se trabaja con señales de bajo nivel (menor que 1V), pero se debe tomar en cuenta que las señales con las que se trabaja en el sistema de detección son de alto nivel (15V).

Se puede observar múltiples fuentes de ruido así:

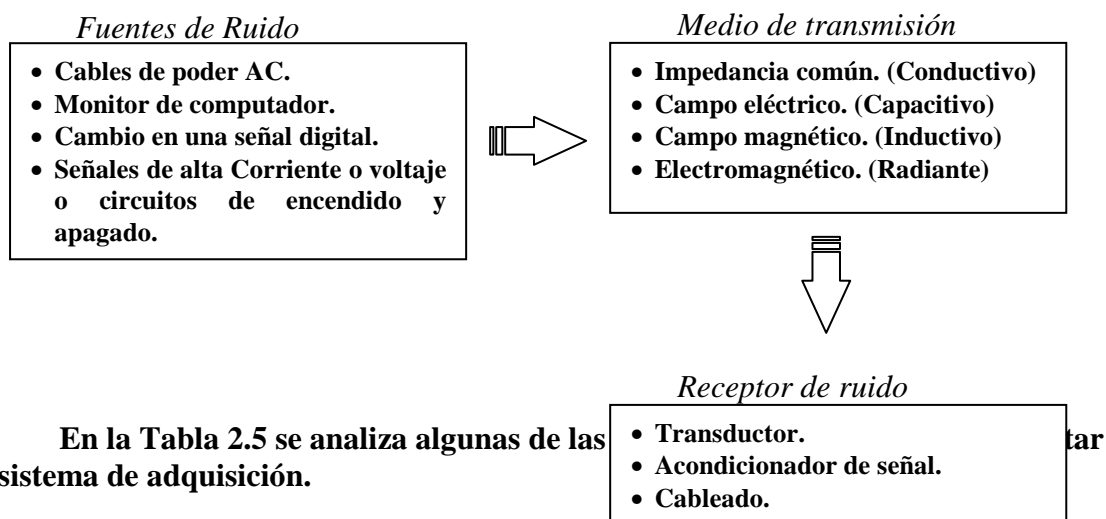
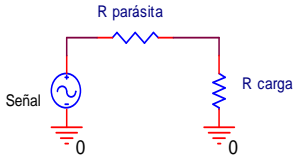
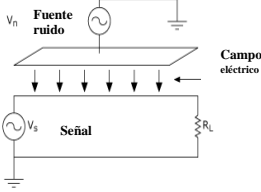
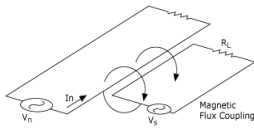

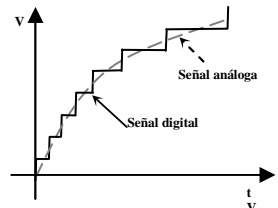


Figura 2.5. Fuentes, medios y transmisión de ruido.

Tabla 2.5. Tipos y características de fuentes de ruido [28].

Características	Ruido conductivo	Ruido capacitivo	Ruido Inductivo	Ruido Radiante	Ruido de cuantización
Naturaleza del ruido	Ley de Ohm	Fenómenos magnéticos originan campos eléctricos	Circulación de corriente genera campos magnéticos	Ondas electromagnéticas	Efecto de cuantización de la conversión A/D
Representación física					
Fuentes de ruido	Impedancia de cables distinta de cero	Lámparas fluorescentes, ionización del ambiente, clima lluvioso	Cables cercanos, máquinas eléctricas, ambiente industrial	Señales de televisión, radio y telefonía	Convertor A/D
Forma de atenuarlos	Usar cables pequeños y relativamente gruesos de acuerdo a la corriente que manejan	Forrar los cables y conectar el forro a tierra	Uso de pares trenzados	Filtros pasabajas y cables cortos	Aumentar número de bits del conversión A/D
Frecuencias a la que se presenta usualmente	Todas	Frecuencia industrial, alta frecuencia	60 Hz (principalmente), frecuencia de la circulación a través de los cables	Alta frecuencia	Todas las frecuencias

2.3.3 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN.

En resumen, las características elegidas para la implementación son:

- **Sistema de adquisición que utilice una interfaz USB.**
- **El sistema debe tener un rango de $\pm 15V$ y una resolución mínima de 12 bits.**
- **El ADC puede ser por aproximaciones sucesivas o flash.**
- **El sistema debe ser capaz de muestrear en el rango de 2,5 – 4 kS/s y enviar los datos a una PC, preferiblemente con DMA.**
- **Debe tener dos canales de entrada analógica con muestreo simultáneo o por multiplexación, y dos de E/S digitales.**
- **Debe ser capaz de recibir señales diferenciales con protección de sobresaturación en límites alto y bajo.**
- **Las conexiones deben tener aislamiento capacitivo conectado a tierra, ser en par trenzado y de ser necesario, deben ser implementados filtros pasabajas análogos.**

2.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

En este bloque, se requiere implementar tres tareas:

- **Eliminación de periodicidad en frecuencia por efecto de muestreo.**
- **Eliminación de ruido y componentes parásitas en la señal.**
- **Procesamiento del espectro de la señal.**

2.4.1 ELIMINACIÓN DE PERIODICIDAD EN FRECUENCIA.

Debido a que un muestreo de una señal analógica introduce en frecuencia una repetición del espectro centrado en n veces la frecuencia de muestreo ($n = 1, 2, 3\dots$), es indispensable utilizar un filtro digital pasabajas con una atenuación a nivel de ruido en por lo menos la frecuencia de muestreo sobre dos [24]. Con esto se logra anular frecuencias que aparecen en la representación digital de la señal pero que no existen en la realidad.

El diseño de este filtro puede coincidir con el de la eliminación digital de ruido y componentes parásitas.

2.4.2 ELIMINACIÓN DIGITAL DE RUIDO Y COMPONENTES PARÁSITAS.

A pesar de todas las consideraciones de hardware que se tomen para evitar los diferentes tipos de ruido, es recomendable, re-procesar digitalmente la señal para eliminar cualquier ruido remanente.

En general existen algunas ventajas en realizar un filtrado digital comparado con un filtrado análogo, a saber [29]:

- **Los filtros digitales son programables por software, siendo fáciles de construir y probar.**
- **Los filtros digitales solo necesitan de operaciones aritméticas de suma/resta y multiplicación.**
- **Los filtros digitales no son afectados por temperatura o humedad y no necesitan de componentes de precisión.**
- **Los filtros digitales tienen una relación beneficio-costo bastante alto.**
- **No son afectados por variaciones de manufactura o por tiempo de uso.**

El proceso de tratar a la señal digital se realiza en las siguientes etapas:

- **Elección de un filtro digital.**
- **Configuración del filtro según requerimientos.**
- **Implementación digital.**

El ruido usualmente se elimina con filtros tipos pasabajas, o pasaaltas, dependiendo de cual sea la frecuencia aproximada en las que se manifiesta.

Filtros digitales.

Los filtros digitales se clasifican de modo general en:

- Filtros de Respuesta Impulsiva Finita (FIR), también conocidos como de Promedio Desplazante o del inglés *Moving Average* (MA).
- Filtros de Respuesta Impulsiva Infinita (IIR), también conocidos como promedio desplazante autoregresivo (ARMA).

En la Tabla 2.6, se hace una comparación entre ambos tipos de filtros digitales.

Tabla 2.6. Comparación de características entre filtros FIR e IIR.

Filtros de respuesta impulsiva Finita	Filtros de respuesta impulsiva infinita
Respuesta impulsiva decae a cero en tiempo finito	Respuesta impulsiva decae a un valor cercano a cero en tiempo finito
Siempre son estables	No siempre son estables
Logran respuesta de fase lineal	No logran respuesta de fase lineal
Bandas de paso y supresión bastante planas	Pueden tener rizo en bandas de paso y supresión
Usan más coeficientes que los IIR para una misma atenuación	Usan menos coeficientes que los FIR para una misma atenuación
Respuesta no tan rápida en el computador	Respuesta más rápida en el computador
Se implementa con promedio desplazante	Se implementa con promedio desplazante autoregresivo

Orden y topologías de los filtros IIR.

El orden del filtro es proporcional a la longitud del conjunto de coeficientes.

Mientras el número de coeficientes aumenta, el orden aumenta. Si esto ocurre, el filtro se vuelve cada vez más inestable aunque la banda de transición se vuelve más fina o de ser el caso, los rizados en las bandas de paso y de rechazo se vuelven más grandes y aumentan en número.

Las topologías de los filtros IIR son:

- Tipo Butterworth.
- Tipo Chebyshev I.
- Tipo Chebyshev II o inverso.
- Eliptico o tipo Cauer.
- Tipo Bessel.

Filtro tipo Butterworth.

Figura 2.6 a. Sus características son:

- Respuesta suave, plana en todas las frecuencias.

- Decrecimiento monótono desde las frecuencias de corte especificadas.
- Es la más plana en las bandas de paso y de supresión con una amplitud de la unidad y cero respectivamente.
- La frecuencia de media potencia corresponde a la frecuencia de corte.
- A veces puede no tener un buen desempeño cuando la banda de transición es grande en filtros de orden bajo.

Filtro tipo Chebyshev I.

Figura 2.6 b. Sus características son:

- Minimización de error pico en la banda de paso.
- Existe rizado en la magnitud de la respuesta en la banda de paso.
- Decrecimiento monótono en la magnitud en la banda de rechazo.
- Banda de transición más fina que en filtros Butterworth.
- Puede ser ejecutado en un tiempo menor al Butterworth.

Filtro tipo Chebyshev II

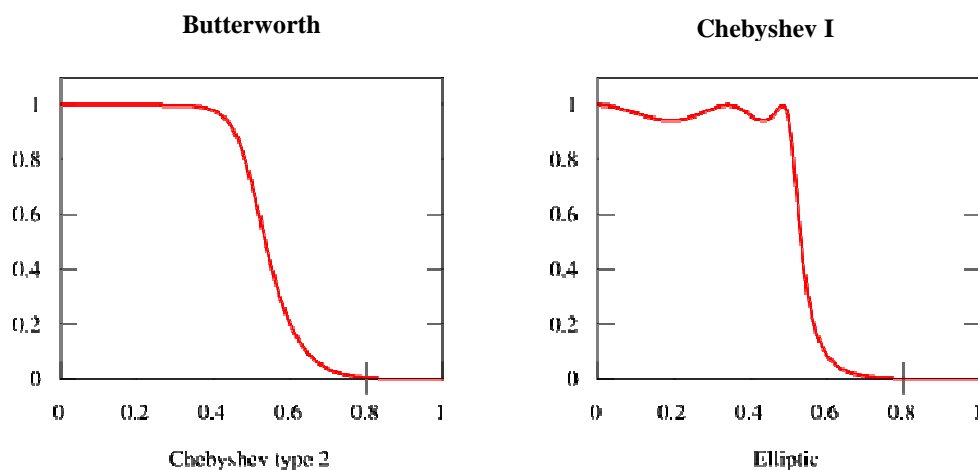
Figura 2.6 c. Tiene todas las características del Chebyshev I pero tiene otras adicionales:

- Minimiza el error pico en la banda de supresión en lugar de en la banda de paso.
- El rizo aparece en la banda de supresión en vez de en la banda de paso.
- Decrecimiento monótono en la magnitud en la banda de paso en lugar de en la banda de supresión.

Filtro tipo Elíptico.

Figura 2.6 d. Sus características son:

- Minimización de error pico en banda de paso y de supresión.
- Rizo tanto en banda de paso como de supresión.
- Produce una banda de transición más angosta que la de Chebyshev y Butterworth.



Chebyshev II

Elíptico

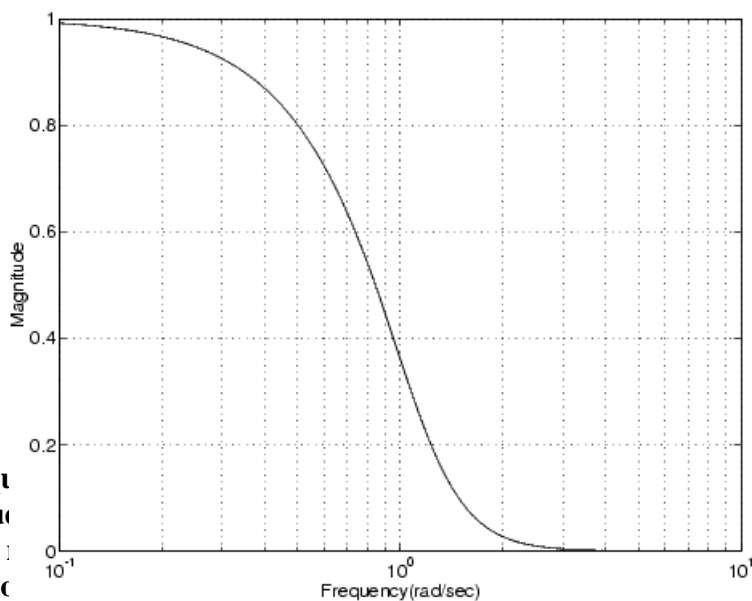
c.

d.

Filtro tipo Bessel

Sus características generales son:

- Respuesta plana máxima en magnitud y fase.
- Respuesta casi de fase lineal en la banda de paso.



Ya que es lo más posible y que necesita ser el caso, la mejor opción es el Butterworth. En altas frecuencias y además, se elimina la periodicidad en frecuencia introducida inherentemente al muestrear una señal.

Figura 2.7. Respuesta en frecuencia típicas de filtros tipo Bessel. [31]

in
il a la
nte de

2.4.3 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES [3].

Las técnicas del procesamiento de señales digitales son aplicadas a las que son entregadas por los sensores y han sido previamente acondicionadas y filtradas de manera que se pueda conseguir ciertos parámetros o comportamientos que permitan describir un fenómeno, en este caso, una falla del motor. Estas son, en general, las siguientes:

- Análisis por Raíz Cuadrática Media, RMS (*Root Mean Square*).
- Análisis en frecuencia.
- Otros métodos de análisis en frecuencia.
- Estadísticas de Orden Superior.

Las características de cada una de ellas se describen en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Características de las técnicas de procesamiento digital de señales [32, 33].

Método	Características	Aplicaciones
Análisis por RMS.	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo estadístico de la raíz cuadrática media. • Ambigüedad en detalles específicos. 	Identificación de la carga del motor, análisis vibracional.
Análisis en Frecuencia.	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de la transformada de Fourier. • Diagnóstico en línea. 	Detección de falla mecánicas o eléctricas, identificación de sistemas.
Estadísticas de Orden Superior.	<ul style="list-style-type: none"> • A través de la función de densidad de probabilidad (PDF) sintetiza el comportamiento de una señal en el tiempo. 	Identificación de máquinas con carga variable en el tiempo.
Otras Formas de Análisis.	<ul style="list-style-type: none"> • Wavelets • JTFA • Cepstrum 	Identificación de máquinas y fallas en máquinas con carga variable en el tiempo.

Analizando las características anteriores y ya que el algoritmo de MCSA necesita de análisis en frecuencia, se debe implementar la transformada de Fourier, que en este caso es la mejor opción, ya que no se necesita un análisis de frecuencia en el tiempo pues se supone que las señales a estudiar son estacionarias.

2.4.4 ANÁLISIS EN FRECUENCIA.

El hablar en el sistema de análisis en frecuencia de la señal adquirida y filtrada, se refiere implícitamente a trabajar con la transformada de Fourier.

Teóricamente, la transformada de Fourier transforma una señal continua en el dominio del tiempo en otra continua en el dominio de la frecuencia.

Prácticamente, en el análisis por computadora, hay que referirse al algoritmo equivalente en tiempo discreto: La Transformada Discreta de Fourier (DFT) que establece la relación entre una señal discreta en el dominio del tiempo y una señal discreta en el dominio de la frecuencia.

Ahora, implementar la DFT directamente en N muestras requiere aproximadamente N^2 operaciones complejas en un proceso que consume mucho tiempo. Para esto computacionalmente se aplica el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT), que toma aproximadamente $N \log_2(N)$ (si N es potencia de 2) operaciones que hace el cálculo de la DFT mucho más rápido.

Las características de la FFT que deben ser tomadas en cuenta son la frecuencia de muestreo, la resolución en frecuencia, el número de muestras, el tamaño de la FFT, la mejora de medición a través del promedio, la ponderación y las ventanas a usar.

Como se estableció en la Sección 2.3.2 la frecuencia de muestreo debe estar entre 2,5 y 4 kS/s. Debido a las posibilidades actuales y a la disponibilidad de equipo se puede escoger la frecuencia mayor, es decir 4 kS/s.

La resolución en frecuencia debe ser capaz de diferenciar un pico en la señal del espectro de corriente o voltaje. Debido a que las frecuencias de interés pueden moverse por las variaciones de deslizamiento en un rango muy pequeño, el espaciamiento en frecuencia debe ser pequeño también, esto es, menor a 1 Hz.

Para tener una representación en frecuencia lo más aproximada a la realidad es necesario muestrear numerosos períodos de señal, de manera que si se obtiene 100 periodos, se podrá obtener un espectro cercano al real. Si la frecuencia de interés tiene una componente fundamental de 60 Hz, se debe muestrear por 1,6 segundos aproximadamente.

Si la frecuencia de adquisición es 4 kS/s y se muestrea por 1,6 segundos, el número de muestras a adquirir es de 6400.

Se tiene, además, que:

$$\Delta f = df = \frac{f_s}{N} = \frac{4kS/s}{6400} = 0,625Hz \quad (2.4)$$

Esto quiere decir que el espaciamiento en frecuencia será de 0,625 Hz, que es menor que 1 como se requería anteriormente.

Por otra parte, los algoritmos de FFT necesitan una secuencia de entrada que sea potencia de dos, así: $N=2^m$. Si esto no es así, se debe implementar *Zero Padding* a la secuencia de entrada, que consiste en llenar de ceros la secuencia hasta el siguiente valor de 2^m . Esto no implica que se mejore la resolución en frecuencia o se afecte a las respuestas de magnitud y tiempo. La única forma de mejorar la resolución en frecuencia es aumentando el número de muestras efectivas en la adquisición.

Promediar mediciones sucesivas suele mejorar los resultados finales. Estos promedios pueden ser implementados entre varias mediciones o en espectros de frecuencia individuales, pero no directamente en la señal en tiempo. Los principales métodos son:

- Promedio RMS.
- Promedio Vectorial
- Pico Sostenido.

En la Tabla 2.8 se muestra la implementación matemática y las características de cada uno de éstos métodos.

Tabla 2.8. Implementación matemática y característica de métodos de promediación.

Tipo de promedio	Implementación matemática	Características
RMS	$\langle X \rangle = \sqrt{X * \bullet X}$	Reduce fluctuaciones de la señal pero no el nivel mínimo de ruido ya que promedia la potencia de la señal y mantiene la fase del resultado en cero.
Vectorial.	Computa el promedio de las cantidades complejas directamente	Elimina el ruido de señales sincrónicas.
Pico Sostenido	$MAX \sqrt{(X * \bullet X)}$	Retiene los niveles pico de las cantidades promediadas para cada línea separadamente entre una FFT y otra.

donde X es el valor complejo de la FFT de la señal de entrada x , $X *$ es el complejo conjugado de X y $\langle X \rangle$ el valor promedio.

Cuando se realiza un promedio RMS o vectorial, se puede ponderar cada medición usando ponderación lineal o exponencial. En la ponderación lineal se combina las n mediciones con igual peso, mientras que en la exponencial se pondera con más peso los datos espectrales más recientes que los anteriores en un proceso continuo.

Para el caso del sistema, la mejor opción es realizar el promedio RMS, ya que se tiene solo una adquisición por medición, razón por la que cualquiera de las ponderaciones es aplicable.

La FFT asume que las señales son periódicas en tiempo infinito desde el inicio de la señal hasta el final de ésta. En teoría, todos los cálculos para hallar la FFT asumen que las muestras son tomadas desde el inicio del periodo de la señal y termina al final del último periodo de la misma. En la implementación, la FFT asume que dicha señal se repite periódicamente una seguida de la otra.

Pero en la realidad, que una señal sea adquirida en exactamente el inicio de su ciclo es sumamente difícil, por lo que en la repetición periódica se tienen discontinuidades.

Este efecto hace que, dependiendo de la magnitud de la discontinuidad, la energía se manifieste en altas frecuencias o sea diseminada a lo largo de algunas otras. Es decir, se distorsiona la FFT real con la aparición de frecuencias no existentes en la señal real y con que no exista diferencia entre picos de frecuencia que estén cerca el uno del otro.

Para evitar este efecto se utiliza el proceso de pasar la señal por una “ventana” que minimice los efectos de la discontinuidad. Esto es, multiplicar en el dominio del tiempo una señal por otra conocida como “ventana”, cuya amplitud varía lentamente y decae gradualmente a cero en las discontinuidades. El resultado de esto es una señal con discontinuidades muy pequeñas o sin ellas.

Existen varias clases de ventanas para diferentes tipos de aplicaciones. La Tabla 2.9, describe las aplicaciones de los diferentes tipos de ventanas:

Tabla 2.9. Características y aplicaciones de ventanas para FFT [27].

VENTANA	CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES
Rectangular	Señales transitorias que tienen una duración más corta que la longitud de la ventana, trunca una ventana a un ancho de tiempo finito. Análisis espectral, separación de bandas en frecuencias muy juntas con amplitud similar.
Hanning	Señales transitorias que tienen una duración más larga que la longitud de la ventana. Aplicaciones de propósito general. Ondas sinusoidales simples o combinación de varias, contenido desconocido, ondas sinusoidales relativamente juntas. Análisis espectral.
Hamming	Señales transitorias que tienen una duración más larga que la longitud de la ventana. Es una implementación modificada de Hanning pero es discontinua en los bordes. Ondas sinusoidales relativamente juntas
Triangular	Ventana que tiene forma de triángulo y es para aplicaciones generales
Kaiser-Bessel	Separación de bandas en frecuencias muy juntas con amplitud bastante diferente.
Blackman	Similar a Hanning y Hamming pero con rizado reducido.
Techo Plano (Flat Top)	Tiene el mejor desenvolvimiento en amplitud pero limita la selectividad de frecuencia. Análisis con bastante exactitud, medidas de amplitud de tono simple.

Para el sistema, la ventana que se ajusta mejor puede ser la tipo Hanning, pero ya que nunca se tiene suficiente información previa de la señal muestreada, lo mejor será probar las otras ventanas y elegir la que tenga el mejor desempeño.

2.4.5 ESPECIFICACIONES DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES:

Filtro para ruido y componentes parásitas

- Filtro pasabajas IIR.
- Topología Butterworth
- Segundo o cuarto orden.
- Frecuencia de corte en 500 Hz.

Técnica de procesamiento de señales

- Análisis en frecuencia por transformada de Fourier.
- Implementación mediante FFT.
- FFT de mínimo 6400 muestras.
- La secuencia de entrada debe usar *zero padding*.
- Optimización de FFT mediante promedio RMS.
- Se hará ponderación de mediciones lineal o exponencial.
- Implementación con ventana tipo Hanning.

2.5 DETECCIÓN DE FALLA USANDO MCSA.

La forma de detectar la falla analizando el espectro de su corriente, es verificando la existencia de las bandas laterales explicadas en la Sección 1.3.2. Debido a que las bandas pueden existir, además, inherentemente por el desbalance de las impedancias de los devanados, se debe tener un criterio para saber cuando la falla realmente existe como tal y qué tan severa es.

De esta manera, el criterio de diagnóstico de MCSA se basa en la diferencia de amplitudes que existe entre las bandas laterales y la fundamental. Es así que mediante pruebas hechas por los laboratorios *Microlog CMVA55* [34] junto con datos recolectados experimentalmente y del conocimiento empírico del personal de mantenimiento, se ha logrado determinar la condición de un motor de inducción con referencia a la falla por barras rotas de acuerdo a la Tabla 2.10:

Tabla 2.10. Diagnóstico para motores de inducción respecto de la falla de barras rotas [34].

Diferencia entre amplitud fundamental y bandas laterales (dB).	Estado del motor.
54-60	Excelente
48-54	Bueno
42-48	Probablemente el motor tenga barras rotas
36-42	El motor tiene barras rotas en su interior
30-36	Motor con barras rotas y probablemente otra fuente de alta resistencia
<30	Motor tiene un daño severo

Cabe recordar que para que la detección sea correcta, las bandas laterales no deben existir en el espectro de voltaje, caso contrario, se puede decir que la falla es causada por un defecto eléctrico como se menciona en la Sección 1.2.3

En síntesis el algoritmo de MCSA para la detección de barras rotas en la jaula de ardilla en motores de inducción obedece al diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.8.

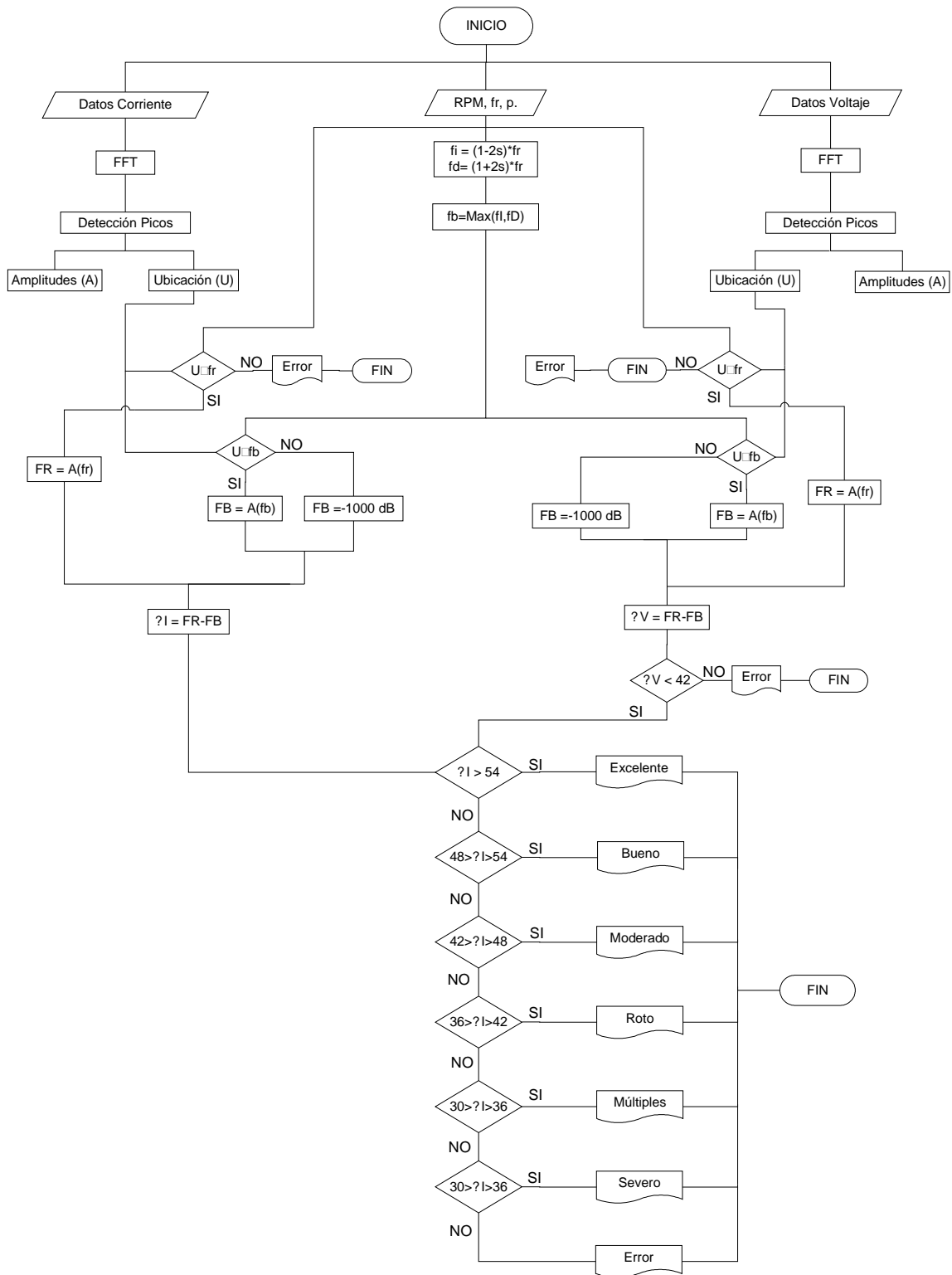


Figura 2.8. Diagrama de flujo.

2.6 ALMACENAMIENTO DE DATOS.

El análisis de datos se utiliza para obtener respuestas y patrones útiles para determinar una condición de algún proceso. El almacenamiento de éstos, sirve como un respaldo para cuando se requiera análisis posteriores de confirmación o para realizar análisis estadísticos particulares.

El almacenamiento de datos es necesario en cualquier proceso industrial [35], y estos pueden variar mucho entre sus naturalezas, es decir, se debe almacenar diferentes tipos de datos como temperatura, presión o velocidad, generando una mezcla de tipos de datos y registros.

Para que los datos sean elegibles de ser almacenados deben haber sido pre-procesados, limpios de ruido, con errores corregidos en lo posible, y deben ser útiles aplicando una reducción del volumen de datos.

En el caso de este sistema, la elección de las variables a almacenar es una tarea relativamente sencilla. Los datos deben ser útiles para la generación de reportes y el análisis de datos con herramientas externas que sean accesibles en la mayoría de los computadores dedicados a este fin.

2.6.1 VARIABLES A ALMACENAR

Por la importancia de cada variable, los datos a almacenar deben ser los siguientes:

- Variación de Tiempo.
- Señal de corriente en el dominio del tiempo.
- Señal de voltaje en el dominio del tiempo.
- Variación de Frecuencia.
- Señal de corriente en el dominio de la frecuencia.
- Señal de voltaje en el dominio de la frecuencia.

Los datos enviados no deben ser más que los suficientes, dependiendo del ancho de banda del análisis en frecuencia y del hecho de que son necesarios solo unos cuantos períodos para tener una idea clara de las señales en tiempo.

Debido a la tendencia de la industria a estandarizar el almacenamiento de datos [35], es necesario que el sistema soporte dos tipos de almacenamiento:

- En hoja de cálculo.
- En base de datos estandarizada.

El objetivo de estas dos opciones, es la de darle versatilidad a los datos adquiridos de manera que se puedan reutilizar en procesos que involucren análisis de datos por otros usuarios.

2.7 REPORTES

El reporte es un documento en donde se resume el proceso que se ha llevado a cabo. Este debe ser claro, conciso y debe tener la siguiente información:

- Formas de onda de tiempo para corriente y voltaje.
- Formas de onda de la corriente en frecuencia en el rango necesario.
- Formas de onda de voltaje en frecuencia en el rango necesario.
- Datos del motor analizado.
- Diagnóstico y recomendación.
- Lugar donde se enviaron los datos.
- Fecha y hora de la ejecución del proceso.
- Debe generarse en una aplicación estándar, es decir, un archivo *.doc, *.html ó *.pdf.

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO.

El siguiente capítulo detalla el funcionamiento e implementación del sistema de detección de fallas por ruptura de barras del rotor en motores de inducción.

3.1 REQUERIMIENTOS GENERALES

El sistema está dirigido a monitorear el estado de motores de inducción siguiendo los siguientes atributos [17].

- Debe ser confiable y no debe dar falsas indicaciones.
- Debe ser fácil y seguro de operar.
- Debe proveer una buena relación costo-beneficio.
- Debe ser no invasivo.
- Debe ser amigable al usuario.
- Debe ser capaz de adquirir, procesar, interpretar y almacenar varios conjuntos de datos.
- Debe poseer criterios de confiabilidad, escalabilidad y de optimización de recursos [36].
- Debe ser implementado con transductores que se puedan encontrar en el mercado y cuyo desempeño haya sido efectivo en otras aplicaciones.
- Debe mostrar el diagnóstico al tiempo de terminar la prueba.
- Debe ser capaz de generar reportes automáticamente.

3.2 SOFTWARE A UTILIZAR.

El sistema está desarrollado en LabVIEW: *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* que es una aplicación para desarrollo de programas parecido a

otros sistemas de desarrollo basados en C++ o BASIC. La diferencia más importante es que LabVIEW no es basado en líneas de código sino en programación gráfica: Lenguaje G [37]. La idea principal es que LabVIEW use diagramas de bloques por los cuales se genere y fluya la información. Además posee librerías específicas de análisis de señales, y adquisición de datos. La ejecución de los programas no los hace línea por línea sino basado en cómo fluyen los requerimientos de la información.

Esta herramienta tiene además la facilidad de hacer interfaces de usuario muy fácilmente en sus “Paneles Frontales” mientras que el código desarrollado queda transparente al usuario en su “Diagrama de Bloques”.

La estructura de programación es similar a la de un lenguaje basado en texto, así posee librerías, funciones, subrutinas, depuradores y compiladores.

La última versión para Windows XP, disponible hasta el comienzo de la implementación del sistema es la 8.0 que tiene la facilidad de levantar en los procesos de sistema un administrador de dispositivos que ayuda con la flexibilidad de los dispositivos periféricos como sistemas de adquisición de datos para que sean reconocidos y relacionados con sus controladores de manera ágil.

A continuación, está la explicación exhaustiva de cómo han sido implementados los diferentes bloques de la Figura 2.1.

3.3 MOTOR

El sistema está diseñado para analizar cualquier tipo de motor que cumpla con las características de la Sección 2.1.3. De aquí que se decidió utilizar un motor con las siguientes características:

- **Alimentación: Monofásica fase-fase.**
- **Rotor: Tipo jaula de ardilla.**
- **Voltaje Nominal: 220V.**
- **Frecuencia: 60 Hz.**
- **Corriente Nominal:16A**
- **Potencia: 3 CV.**
- **Numero de Polos: 2.**

- **Velocidad Nominal: 3480 RPM.**
- **Clase de Aislamiento: B**
- **Presencia de Barras Rotas en el Rotor.**

3.4 TRANSDUCTOR

3.4.1 TRANSDUCTOR DE CORRIENTE.

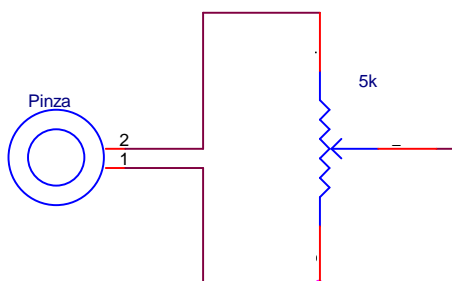
Una vez que se ha analizado las opciones de sensado de corriente de la Sección 2.2.1 y comparándolas con los requerimientos del sistema descritos en la Sección 2.2.2, se puede concluir que la mejor opción que además cumple con cada uno de ellos es la pinza amperimétrica Fluke 80i-600A.

De esta manera, en la Tabla 3.1, se puede comparar las características de la pinza amperimétrica con los requerimientos del sistema.

Tabla 3.1. Comparación de requerimientos de sistema y pinza.

Requerimientos del Sistema.	Característica de pinza amperimétrica 80i-600A
Método no invasivo	Método no invasivo.
Rango de medición de corriente al menos del valor nominal o de plena carga del motor a ser evaluado (16 A).	Rango de medición de 1 a 600 A.
La señal de salida debe conservar todas las características de la corriente sensada.	Tiene una precisión de 3%.
La salida del sensor debe poder ser acondicionada a un nivel de voltaje de hasta $\pm 15V$ pico.	La salida en Voltios es proporcional a la corriente en Amperios, por lo que puede acondicionarse.
Ancho de Banda de 0-500 Hz mínimo	Ancho de banda de 0-50kHz.

El voltaje de salida en la pinza, que para los 16 A de corriente nominal corresponde a 22,6 V pico, debe ser acondicionado. Hay que tener en cuenta que la corriente puede incrementarse por efecto de la falla, por lo cual se debe implementar un divisor de voltaje cuya caída en una de sus resistencias sea aproximadamente $\pm 15V$ pico. Esto se consigue con un potenciómetro de 5 k Ω . El diagrama eléctrico se muestra en la Figura 3.1.



3.4.2 TRANSDUCTOR DE VOLTAJE.

Una vez que se han analizado las opciones de sensado de voltaje de la Sección 2.2.3 y comparándolas con los requerimientos del sistema descritos en la Sección 2.2.4, se puede concluir que la mejor opción que además cumple con cada uno de ellos es el transformador de voltaje.

De esta manera, en la Tabla 3.2, se puede comparar las características del transformador de voltaje con los requerimientos del sistema.

Tabla 3.2. Comparación de requerimientos de sistema y transformador de voltaje.

Requerimientos del Sistema.	Característica del transformador de voltaje.
Método no invasivo.	Método no invasivo.
Debe ser capaz de sensar el voltaje de alimentación al motor, que para una red en bajo voltaje puede ser 208/120 V.	Transformador con relación de 220V/9-18V con tap central.
La señal de salida debe conservar todas las características de la corriente sensada.	Tiene alta precisión, es decir, se puede diferenciar variaciones de magnitudes muy pequeñas.
La salida del sensor debe poder ser acondicionada a un nivel de voltaje de hasta $\pm 15V$ pico.	La salida en Voltios es proporcional y reducida y puede acondicionarse.
Ancho de Banda de 0-500 Hz mínimo	Ancho de banda mayor que 500 Hz.

A la salida del transformador hay que poner una resistencia que limite la corriente en el secundario. El valor de esta resistencia es de $1k\Omega$ para que a través de ella circulen 9 mA, que es una corriente lo suficientemente pequeña para ser manejada por el equipo de adquisición y tan grande como para que no sea comparable con el ruido.

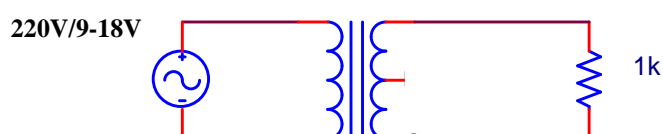


Figura 3.2. Acondicionamiento de la señal de voltaje.

3.5 ADQUISICIÓN DE DATOS.

3.5.1 FILTRO ANTI-ALIASING.

La banda de paso del filtro debe ser lo más plana posible y la banda de transición lo más angosta posible. Por esto el filtro es de tipo Butterworth, de séptimo orden diseñado utilizando el programa *Filterlab* distribuido en línea por *Microchip* y simulado en ORCAD PSpice. El esquemático se muestra en la Figura 3.4.

La Figura 3.3, muestra la salida del filtro implementado para la simulación.

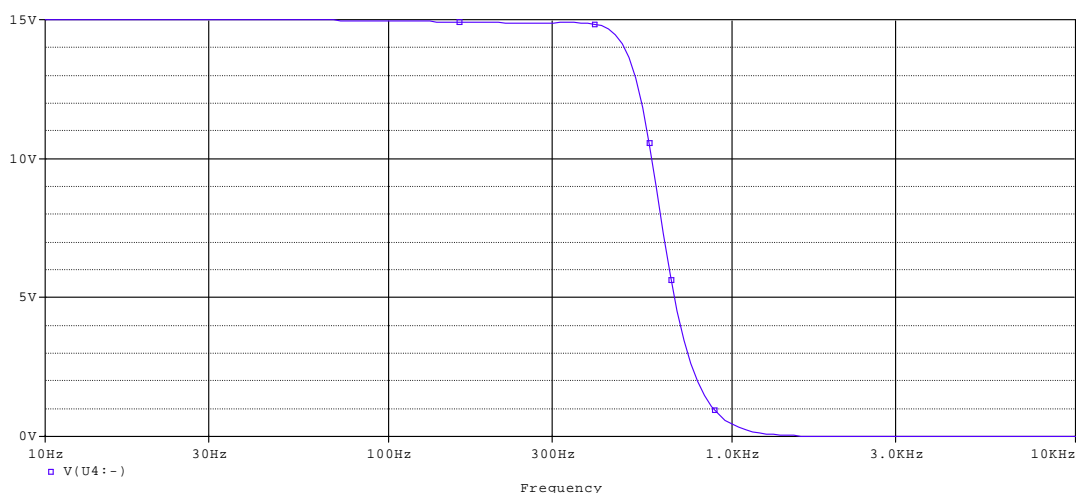


Figura 3.3. Respuesta en frecuencia del filtro *Anti-Aliasing*.

Como se observa, la magnitud de salida a una señal de entrada de 15 V en 2 kHz es de 4,2 mV, lo que corresponde a una atenuación aproximadamente de -71 dB que está en un nivel bastante aceptable para estas frecuencias.

Debido a que los Amplificadores Operacionales están polarizados con $\pm 15V$ su salida no puede exceder estos valores dando una protección adicional a la entrada de la DAQ. Se implementaron dos filtros idénticos, uno para la señal de corriente y otro para la señal de voltaje.

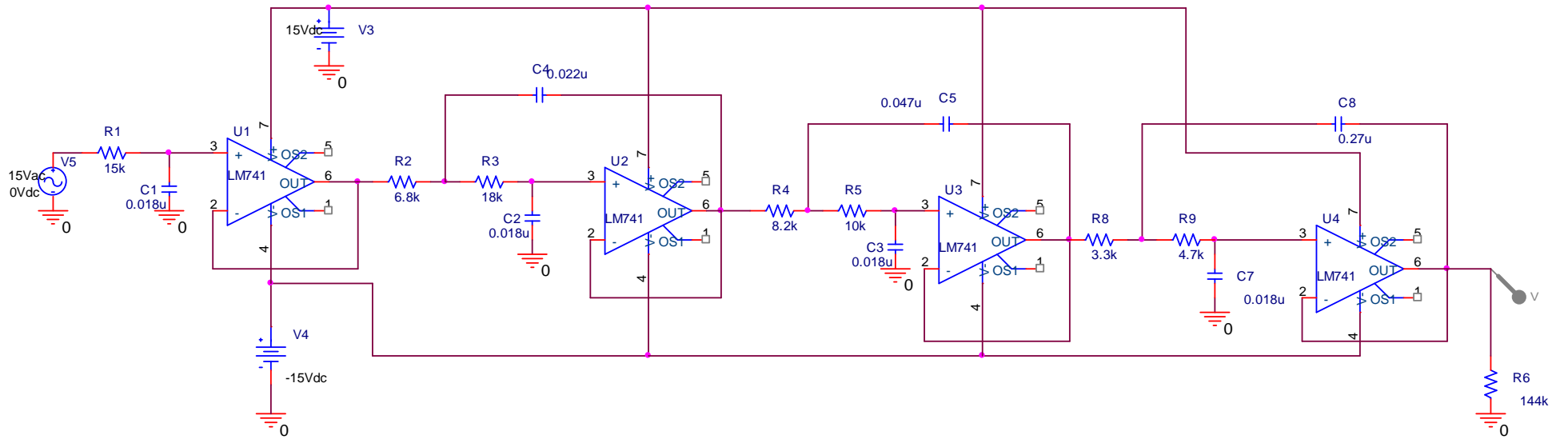


Figura 3.4. Esquemático del filtro *Anti-Aliasing*

El circuito es implementado en cuatro etapas con topología Sallen-Key en cascada.

La primera etapa es de primer orden, su esquemático y su función de transferencia son:

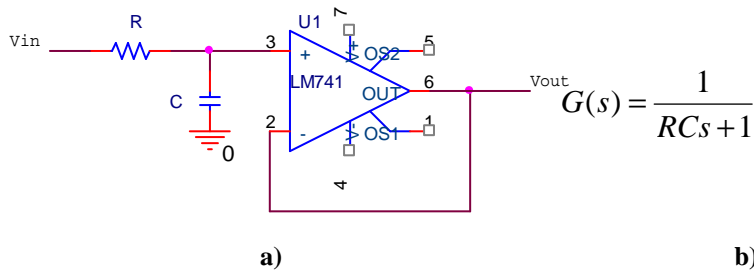


Figura 3.5. Primera etapa filtro *anti-aliasing*, a) Esquema, b) Función de transferencia

Donde:

$$R=15 \text{ k}\Omega$$

$$C=0.018 \text{ uF}$$

de esto que la función de transferencia para esta etapa es:

$$G(s) = \frac{1}{0,00027s + 1} \text{ y un punto de media potencia de } 587 \text{ Hz.}$$

Las siguientes tres etapas son de segundo orden, y cada una tiene el siguiente esquemático, función de transferencia y frecuencia natural:

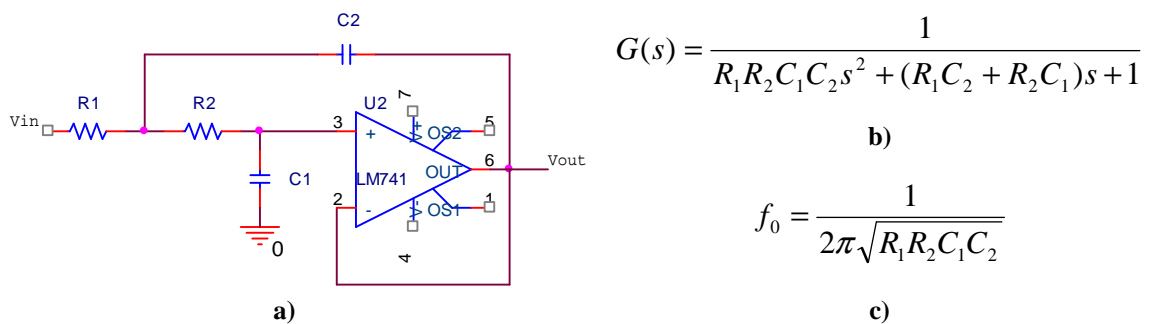


Figura 3.6. Etapas 2 a 4 de filtro *anti-aliasing*, a) Esquema, b) Función de transferencia, c) Frecuencia de corte rad/s

Para cada etapa se tiene los siguientes parámetros:

Tabla 3.3. Parámetros de las etapas del filtro.

Etapa	Valores de elementos	Función de transferencia	Frecuencia de corte (Hz)
Segunda	$R_1= 6,8 \text{ k}\Omega$ $R_2= 18 \text{ k}\Omega$ $C_1= 0,018 \text{ uF}$ $C_2= 0.022 \text{ uF}$	$G(s) = \frac{1}{4,85E - 8s^2 + 5,18E - 4s + 1}$	722
Tercera	$R_1= 8,2 \text{ k}\Omega$ $R_2= 10 \text{ k}\Omega$ $C_1= 0,018 \text{ uF}$ $C_2= 0.047 \text{ uF}$	$G(s) = \frac{1}{6,94E - 8s^2 + 3,28E - 4s + 1}$	637
Cuarta	$R_1= 3.3 \text{ k}\Omega$ * $R_2= 4,7 \text{ k}\Omega$ $C_1= 0,018 \text{ uF}$ $C_2= 0.27 \text{ uF}$	$G(s) = \frac{1}{7,53E - 8s^2 + 1.44E - 4s + 1}$	580

* Este valor es un potenciómetro de precisión para regular la salida.

Las respuestas en frecuencia de cada una de estas funciones están en la Figura

3.7.

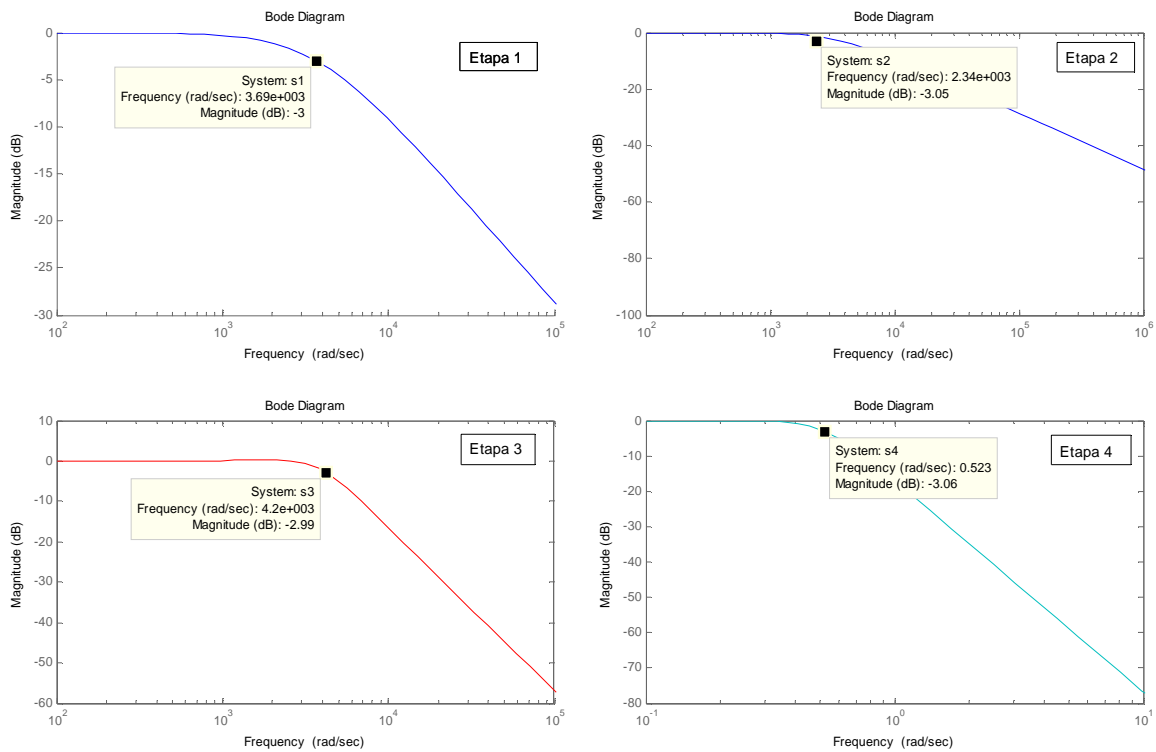


Figura 3.7. Respuesta en frecuencia de cada etapa del filtro *anti-aliasing*

De los datos anteriores llegamos a la función de transferencia total:

$$G(s) = \frac{1}{6,843E-26s^7 + 1,439E-21s^6 + 1,317E-17s^5 + 7,49E-14s^4 + 2,879E-10s^3 + 7,522E-7s^2 + 1,26E-3s + 1}$$

y la respuesta en frecuencia es la siguiente:

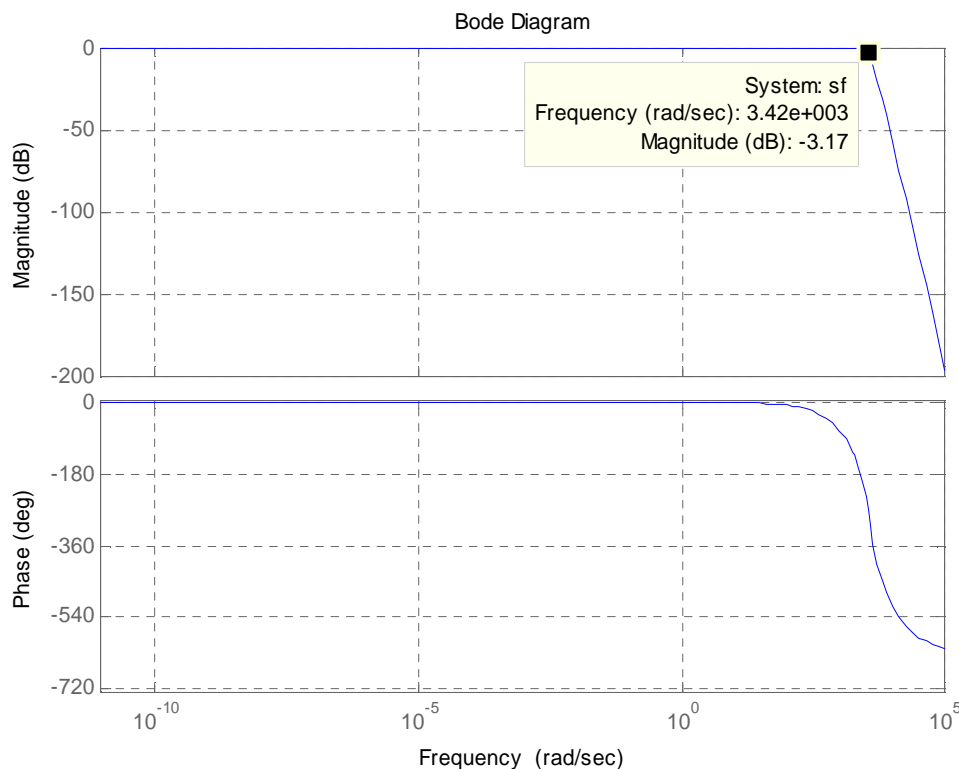


Figura 3.8. Respuesta en frecuencia del filtro *anti-aliasing*.

El circuito se ha implementado con amplificadores operacionales LM741, ya que su ancho de banda está entre 0,437 y 1,5 MHz. Éste es un rango muy superior a la frecuencia que trabaja el filtro, por lo que no habrá atenuación debido a las características de construcción del amplificador operacional.

Existen dos filtros idénticos, uno para la señal de corriente y uno para la señal de voltaje.

3.5.2 EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El equipo con el cual se realiza la implementación del sistema debe cumplir con las especificaciones del sistema de adquisición de datos de la Sección 2.3.3. En vista de estos requerimientos, la mejor solución que cumple con todas las características es hacer la implementación con una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

En el mercado existen algunas opciones de DAQs que responden correctamente a las necesidades del sistema implementado, de esta manera es que se ha elegido la DAQ USB-6009, fabricada por la *National Instruments (NI)* y totalmente compatible con LabVIEW.

La apariencia física de la DAQ USB-6009 es la siguiente:



Figura 3.9. DAQ USB-6009 fotografía www.ni.com

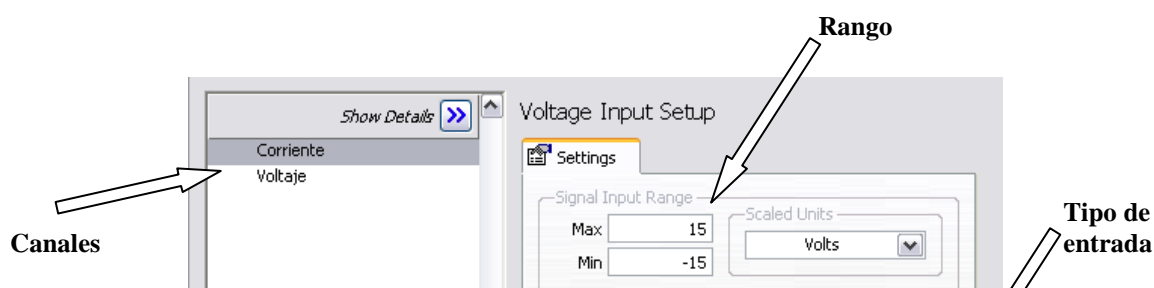
En la Tabla 3.4 se realiza una comparación entre los requerimientos del sistema y las características del equipo con el que se va a implementar.

Tabla 3.4. Comparación entre requerimientos de sistema y características del equipo a utilizar.

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO
Sistema de adquisición que utilice una interfaz USB.	Comunicación USB 2.0 <i>Full speed</i>
El sistema debe tener un rango de $\pm 15V$.	Rango máximo de $\pm 20V$ (diferencial)
El ADC puede ser por aproximaciones sucesivas o flash.	ADC por aproximaciones sucesivas.
El ADC debe tener una resolución mínima de 12 bits	Resolución de 14 bits
El SQNR debe ser de al menos 72 dB	SQNR = 82 dB
El sistema debe ser capaz de muestrear en el rango de 2,5 – 4 kS/s y enviar los datos a una PC, preferiblemente con DMA	Velocidad de muestreo máximo de 48 kS/s. Envío de datos mediante búfer directo a memoria RAM.
Debe tener dos canales de entrada analógica con muestreo simultáneo o por multiplexación, y dos de E/S digitales.	8 canales de entrada analógica referidas a tierra o 4 diferenciales. Muestreo por multiplexación. 10 E/S digitales.

Las características completas de la DAQ USB-6009 se encuentran en la página web de *National Instruments*.

La velocidad de muestreo, es configurada por software a través del *Measurement and Automation Studio*, que es compatible con LabVIEW, de la siguiente manera en la Figura 3.10



En el programa deberá haber dos tareas: una llamada Corriente y otra llamada Voltaje.

Tarea “Corriente”

Es la encargada de adquirir la señal de corriente desde el transductor. Los límites de esta deben estar entre ± 15 V

Tarea “Voltaje”

Es la encargada de adquirir la señal de voltaje desde el transductor. Los límites de ésta deben estar entre ± 15 V.

La velocidad elegida en la práctica es de 4 kS/s común para ambas tareas.

Tipo de entrada al dispositivo

El tipo de entrada al dispositivo es diferencial, así que las entradas deben ir conectadas como se muestra en las Figuras 3.11 y 3.12 (del reporte generado por *Measurement and Automation Explorer*).

Task Name: MedicionAnalogica

Channel Name	Physical Channel	Device Type	Measurement Type
Corriente	Dev1/ai0	USB-6009	Voltage
Voltaje	Dev1/ai1	USB-6009	Voltage

Corriente	
Point 1	Point 2
Voltage/CH+	16PinCombicon/2
Voltage/CH-	16PinCombicon/3

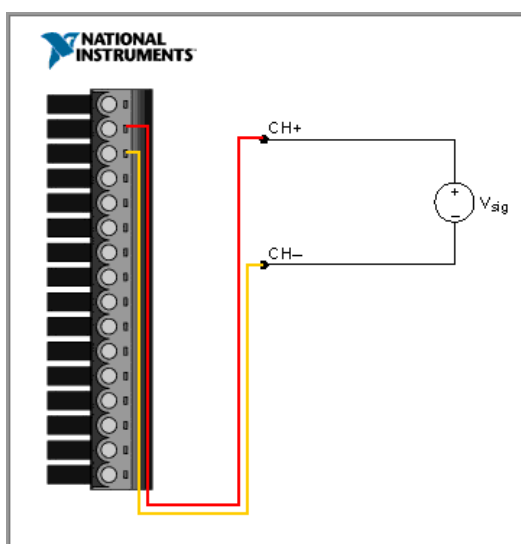


Figura 3.11. Configuración de tareas y conexión de la tarea “Corriente”

Voltaje	
Point 1	Point 2
Voltage/CH+	16PinCombicon/5
Voltage/CH-	16PinCombicon/6

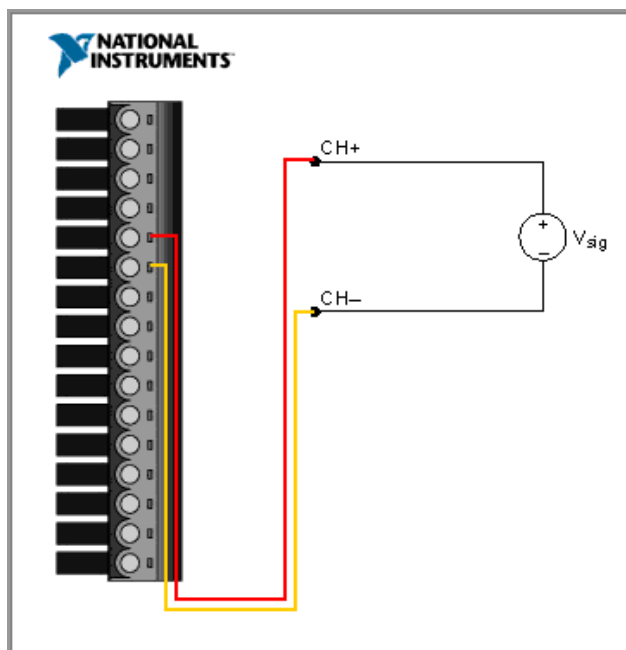


Figura 3.12. Conexión de entradas en la DAQ en la tarea “Voltaje”

De esta manera se consiguen las ventajas discutidas en la Sección 2.3.2.

La implementación de la lectura en el programa se realiza a través de la librería DAQmx de LabVIEW, con el siguiente código:



Figura 3.13. Implementación de adquisición de datos.

En el primer bloque, se elige la tarea con la que se va a trabajar, después, se inicia la comunicación con la DAQ, se leen las muestras con un formato de arreglo unidimensional para forma de onda, se verifica que la tarea se haya realizado y se escribe una notificación, se cierra comunicación con la DAQ en esta tarea, y por último, se completa con un manejador de errores que envía un mensaje relacionado si existiera.

3.5.3 AISLAMIENTO A DIFERENTES FUENTES DE RUIDO

El aislamiento a distintas fuentes externas de ruido se la realiza principalmente utilizando par trenzado para la conexión entre la DAQ, el filtro *Anti-Aliasing* y las señales de los transductores.

3.6 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

3.6.1 ELIMINACIÓN DE LA PERIODICIDAD EN FRECUENCIA DEBIDO AL MUESTREO, DE RUIDO Y COMPONENTES PARÁSITAS.

Como se discutió en la Sección 2.4.2, se ha decidido implementar un filtro IIR tipo pasabajas de topología Butterworth de cuarto orden en el que la frecuencia de corte es de 500 Hz.

Entre el software de *National Instruments* que viene integrado con LabVIEW está el denominado *Express* que permite hacer implementaciones con aplicaciones precompiladas y configurables en tiempo de programación. Es así que para el sistema se tiene la siguiente configuración del filtro digital:

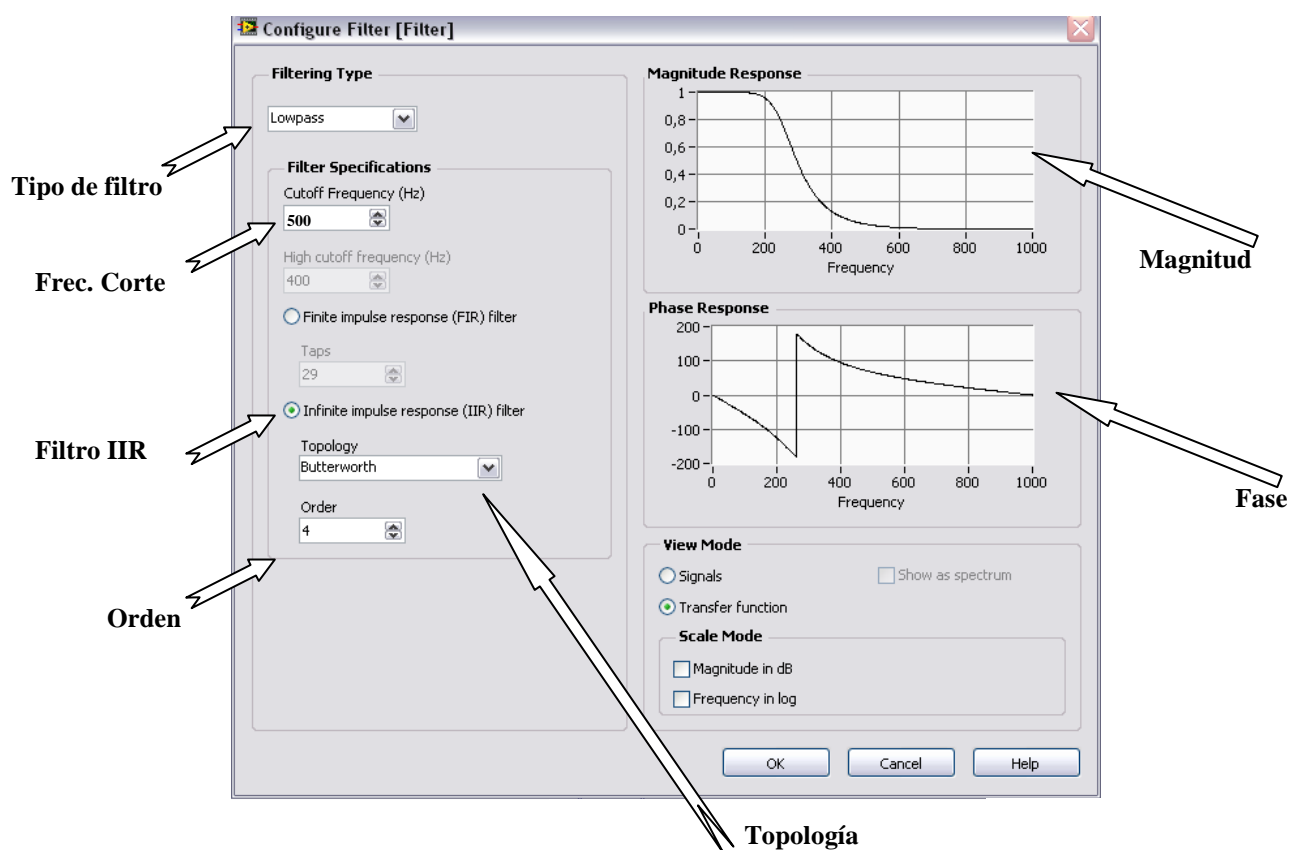


Figura 3.14. Configuración del filtro digital.

Estas configuraciones se guardan en memoria y se las utiliza en el programa principal mediante un ícono específico, tal como se muestra en la Figura 3.15.

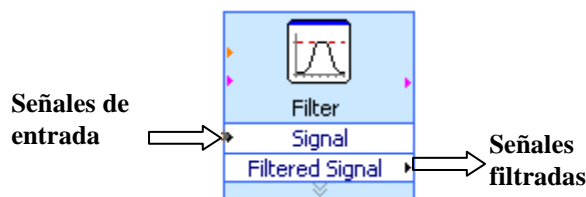


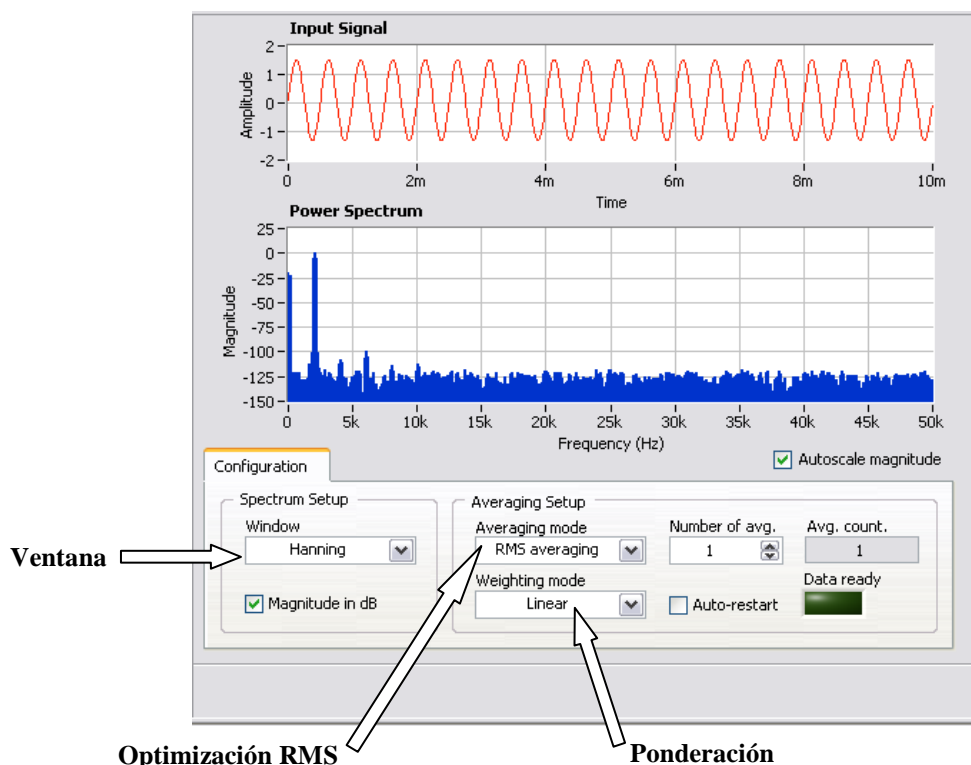
Figura 3.15. Implementación del filtro digital en LabVIEW

3.6.2 ANÁLISIS EN FRECUENCIA

Según la discusión de la Sección 2.4.4, las características del análisis en frecuencia son:

- Análisis en frecuencia por transformada de Fourier.
- Implementación mediante FFT.
- La secuencia de entrada debe usar *zero padding*.
- Optimización de FFT mediante promedio RMS.
- Se hará una ponderación de mediciones de tipo lineal.
- Implementación con ventana tipo Hanning.

Para la implementación del algoritmo FFT, tanto para corriente como para voltaje, se decidió utilizar la herramienta *Power Spectrum* de *Signal Express* de LabVIEW. Esta herramienta es implementada con *zero padding* [29]. Se la ha configurado de la siguiente manera:



Las funciones que se utilizan para la programación general son las siguientes:
Figura 3.16. Configuración de análisis espectral.

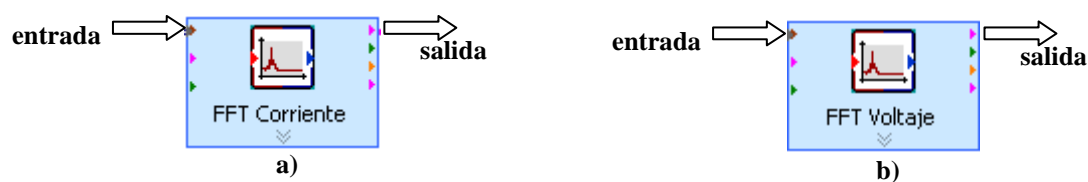


Figura 3.17. Implementación de FFT de: a) Corriente y b) Voltaje.

En el programa se implementa de la siguiente manera:

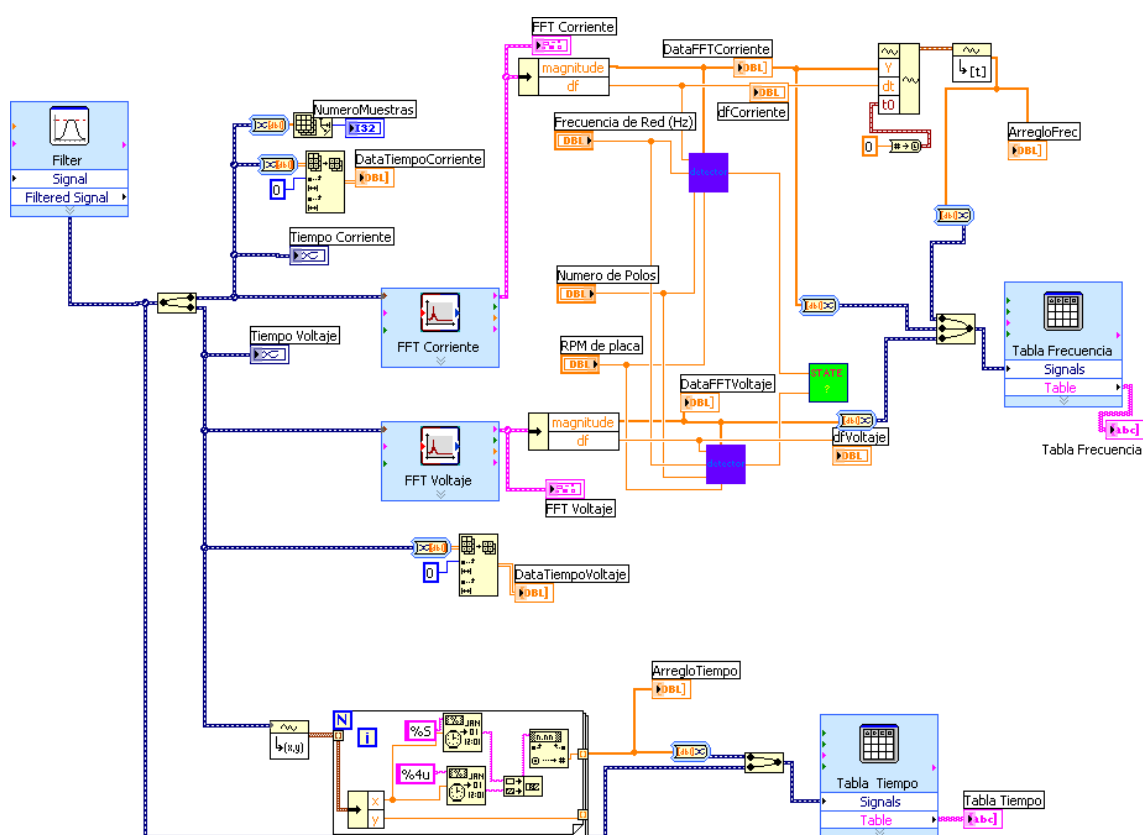


Figura 3.18. Procesamiento digital de señales y MCSA.

Las señales adquiridas entran al filtro, y luego para cada una se halla su espectro en frecuencia. De esta manera se implementa el algoritmo de MCSA en el bloque *detector* que hace la detección de la falla. Al mismo tiempo, se escriben en las tablas que serán accesibles al usuario en tiempo de ejecución.

3.7 ALGORITMO DE MCSA

El algoritmo de MCSA es implementado en la función *detector* que recibe como datos:

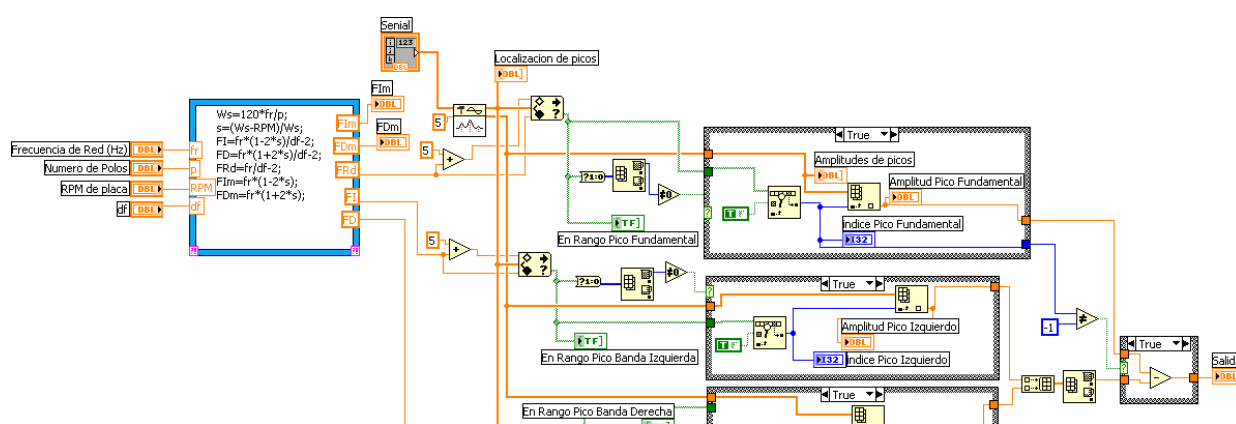
- Un arreglo de los valores de magnitud de corriente o voltaje en frecuencia.
- Espaciamiento en frecuencia.
- Frecuencia de red.
- Número de polos.
- Velocidad real del motor.

Con estos datos se calculan las frecuencias de las bandas central y laterales esperadas, y se halla su índice correspondiente en el espectro.

A su vez, se detecta los picos de los espectros con la función “*Peak Detector*”. Con la función “*In Range?*” se evalúa si existe un pico entre los límites de cada índice anteriormente calculado menos dos muestras y el mismo índice más dos muestras. De existir, se halla el valor de la magnitud del pico.

De la magnitud de los picos correspondientes a las bandas laterales se toma la de mayor valor y es restada de la amplitud del pico en la frecuencia fundamental. Este valor corresponde a la salida de la función, como se muestra en la Figura 3.19a.

De acuerdo a la implementación mostrada en la Figura 3.19 b, si es que algún pico de las bandas laterales no existiere se envía un valor de amplitud pico de -1000 dB que restado de la amplitud de la fundamental, de existir, equivaldría al criterio que el motor está en buen estado según la Sección 3.8. Si el pico de la banda fundamental no existe, se envía un valor de “índice Pico Fundamental” igual a -1. Esto equivale a decir que existe un error en el proceso de detección y se asigna un -1 a la salida de la función.



3.8 DETECCIÓN DE LA FALLA

Como se trató anteriormente, la Sección 2.5 da el criterio de detección de la falla. De aquí que en la implementación de estos criterios, que se hace en la función STATE, se toma en cuenta como entradas las diferencias entre las bandas central y laterales del espectro de corriente y voltaje para luego ejecutar el criterio de detección según la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Criterio de selección del estado del motor.

Δ Voltaje(dB)	Δ Corriente (dB)	Salida (en cadena de caracteres)
-1	Cualquier valor.	“electrico”
Cualquier valor	-1	“electrico”
Mayor a 42 dB.	Mayor o igual a 54 dB.	“excelente”
	Entre 48 y 54 dB.	“bueno”
	Entre 42 y 48 dB.	“moderado”
	Entre 36 y 42 dB.	“roto”
	Entre 30 y 36 dB.	“multiples”
Menor a 42 dB.	Todos los valores	“electrico”

Esto es implementado en LabVIEW de la siguiente manera:

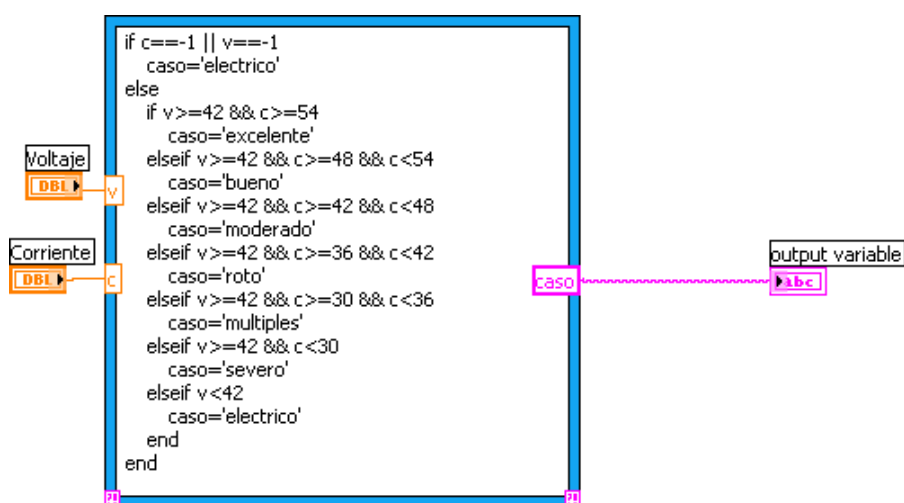


Figura 3.20. Implementación de detección de falla.

Aquí se consideran todas las posibilidades que puedan existir, y además se asegura que haya una discriminación entre un proceso correcto, con datos coherentes y uno con datos erróneos o problemas eléctricos.

Este dato entra a una función que se encarga de generar los parámetros del reporte (Sección 2.7) si éste se ha elegido para crearse, o si no, a una subrutina más simple de escritura. En ambos casos, el programa escribe el diagnóstico y una recomendación en el panel frontal de acuerdo a la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Diagnósticos y recomendaciones que muestra el equipo.

Salida	Diagnóstico a mostrar	Recomendación a mostrar
“excelente”	El motor está en excelentes condiciones.	No se necesita tomar ninguna acción.
“bueno”	El motor está en buenas condiciones.	No se necesita tomar ninguna acción.
“moderado”	Es probable que existan barras rotas en el motor..	Tener precaución y mantener en observación al motor. El motor puede seguir funcionando.
“roto”	El motor tiene barras rotas en su interior.	El motor puede seguir trabajando, pero hay que enviarlo a mantenimiento.
“múltiples”	El motor tiene barras rotas y posiblemente otra fuente de alta resistencia.	Sacar de funcionamiento el motor y enviar al mantenimiento.
“severo”	El motor tiene un daño severo.	Sacar el motor inmediatamente de funcionamiento. Enviar a revisión técnica.
“eléctrico”	El motor tiene un daño eléctrico o existe un error en el proceso de detección.	Revisar el estado de la red eléctrica y las configuraciones de software.

3.9 ALMACENAMIENTO DE DATOS

Cumpliendo con los criterios de la Sección 2.6.1, se debe almacenar las siguientes variables:

- Variación de Tiempo.
- Señal de corriente en el dominio del tiempo.
- Señal de voltaje en el dominio del tiempo.
- Variación de Frecuencia.
- Señal de corriente en el dominio de la frecuencia.

- Señal de voltaje en el dominio de la frecuencia.

en las siguientes aplicaciones:

- En hoja de cálculo.
- En base de datos estandarizada.

En lo que concierne a hojas de cálculo, la aplicación será MS EXCEL, ya que es la más común entre los sistemas bajo Windows, mientras que en base de datos se ha elegido MS Access.

El usuario debe elegir en qué aplicación almacenar los datos, o simplemente obviar este proceso.

3.9.1 ALMACENAMIENTO EN MS EXCEL

LabVIEW tiene una librería que permite la comunicación y el almacenamiento de los datos adquiridos en una hoja de cálculo, y especificando su nombre junto con la extensión *.xls se completa el proceso de creación de un documento en MS Excel.

El código está implementado como se muestra en la Figura 3.21.

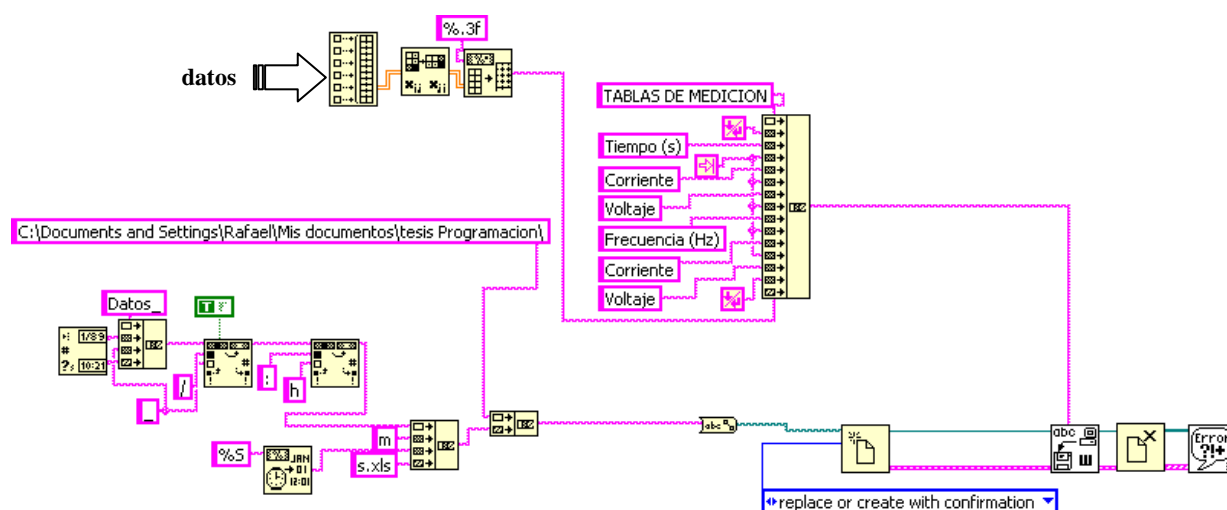


Figura 3.21. Implementación de almacenamiento en Excel.

Se crean los títulos de las columnas, se llenan las filas y las columnas, se establece una dirección dinámica que crea archivos asegurándose que siempre tenga un nombre distinto para evitar conflicto, y por último, se cierra el archivo.

El formato del nombre del archivo es:

Datos_dd_mm_aa_HHhMMmSSs.xls donde *dd*, *mm* y *aa* son el día, mes y año seguido de los enteros respectivos de hora, minutos y segundos al tiempo de ejecución.

Debido a la rapidez del proceso, se puede enviar los datos adquiridos en su totalidad.

3.9.2 ALMACENAMIENTO EN BASE DE DATOS MS ACCESS.

LabVIEW tiene una librería que permite la comunicación directa con cualquier base de datos estandarizada, dependiendo del Nombre de Origen de Datos (*Data Source Name DSN*) instalado en el Administrador de Orígenes de Datos ODBC.

La configuración está descrita en la Figura 3.22, en donde aparece creada el DSN *DatosNumericosAccess*, entre otros, que comunica a cualquier aplicación con la Base de Datos llamada de la misma forma.

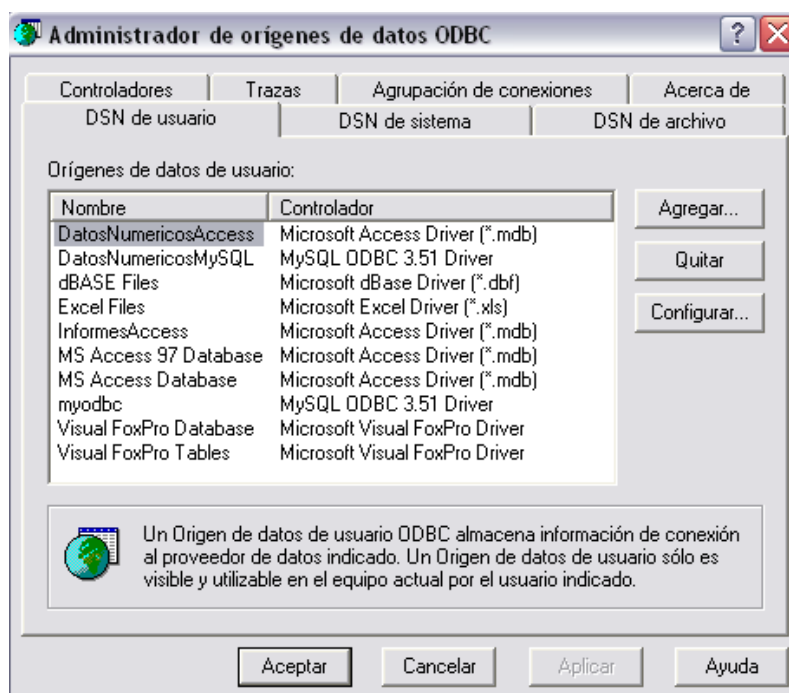


Figura 3.22. Administrador de orígenes de datos configurado para el sistema. La implementación en LabVIEW se hace según la Figura 3.23, a través de una secuencia en donde se especifica el DSN al inicio de la subrutina, eso quiere decir que se trabaja en la Base de Datos llamada *DatosNumericosAccess*. Dentro de ésta, se crea una tabla con nombre dinámico, de manera similar como se nombró las tablas en MS Excel. Una vez creada la tabla, se especifica los nombres de las columnas y se empieza

a almacenar los datos a través de un lazo. Debido a que los datos a recopilar son numerosos, la comunicación desde una aplicación a través de ODBC es relativamente lenta y no hay la necesidad de almacenar todos los datos, se envía el número de muestras correspondientes al intervalo de 0-500 Hz (el número de datos depende del espaciamiento en frecuencia).

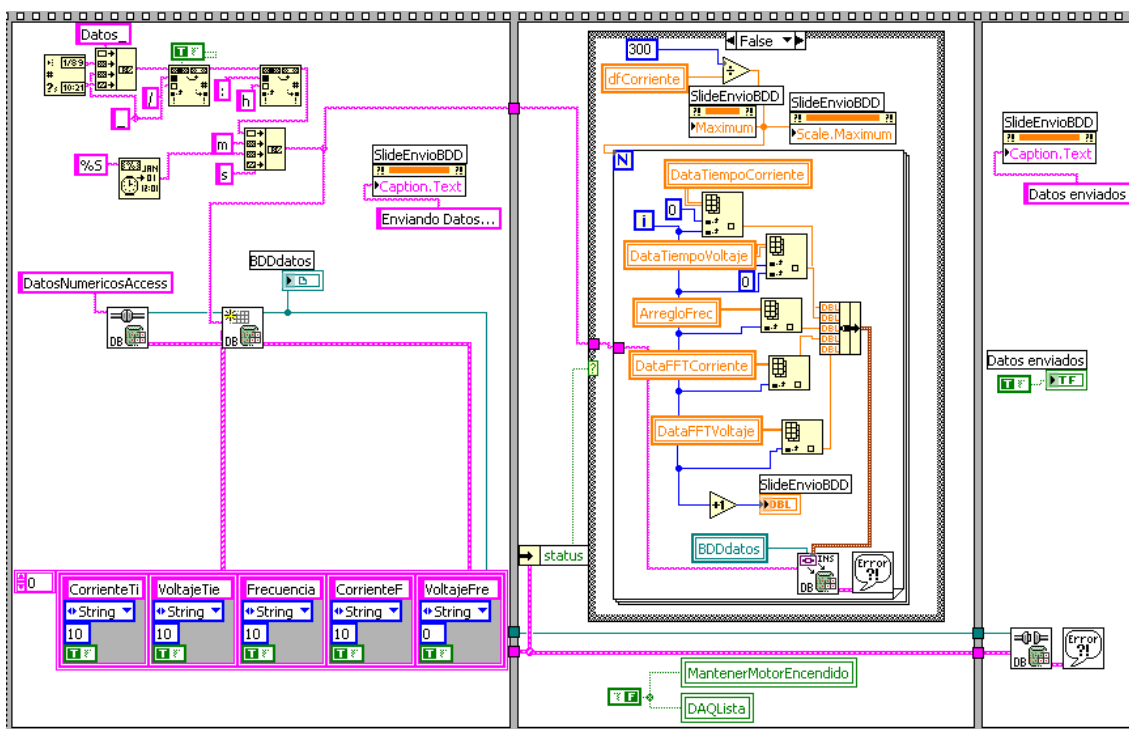


Figura 3.23. Implementación de almacenamiento de datos en MS Access.

3.10 GENERACIÓN DE REPORTE

3.10.1 IMPLEMENTACIÓN

La mejor manera de implementar la generación de reportes es a través de DIAdem 9.0 que es un software especializado en esta tarea y está totalmente integrado con LabVIEW.

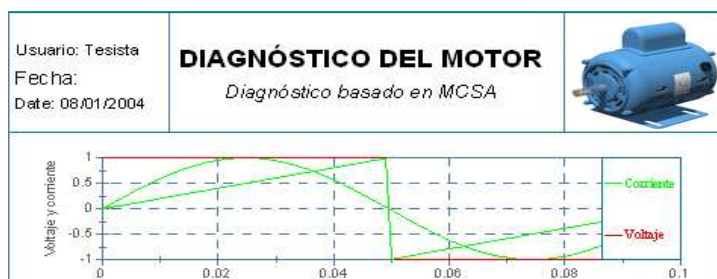
En primer lugar se ha diseñado una plantilla con la interfaz gráfica de DIAdem, en la que se incluye:

- Gráfica general para las formas de onda en dominio del tiempo para corriente y voltaje.
- Gráfica general para la forma de onda de corriente en frecuencia.
- Gráfica general para la forma de onda de voltaje en frecuencia.
- Diagnóstico.
- Entrada de texto para incluir los siguientes datos del motor analizado.
 - Frecuencia de Red.
 - RPM Real.
 - Número de Polos.
- Recomendación.
- Lugar adonde se enviaron los datos.
- Fecha y hora de la ejecución del proceso.

El archivo es generado en un documento de tipo *.pdf asignado siempre con un nombre dinámico generado como se explicó en la Sección 3.9.2 de almacenamiento de datos y cuyo formato es el siguiente:

Reporte_dd_mm_aa_HHhMMmSSs.pdf donde *dd*, *mm* y *aa* son el día, mes y año seguido de los enteros respectivos de hora, minutos y segundos al tiempo de ejecución.

La plantilla es el archivo *plantillareporte.tdr* y se muestra en la Figura 3.24.



Esta implementación se realiza a través de la Función *Diadem Report* precompilada en LabVIEW:



Figura 3.25. Implementación de generación de reportes

En las entradas *signals 1-3* van las formas de señal entre 0 y 150 Hz, en *Text values* entra una matriz que reemplaza en la plantilla los valores T1 a T6 durante la ejecución por sus respectivos correspondientes numéricos.

Para que esto se haga dinámicamente se implementa una función llamada *Reporte* que se muestra en la Figura 3.26.

LastModDate	Date: 08/01/2004
Logo	C:\Documents and Settings\Rafael\
Subtitle	Diagnóstico basado en MCSA
Text1	Estado del motor:
Text10	T6
Text11	Frecuencia de Red: Hz
Text12	RPM Real :
Text13	Número de Polos:
Text14	Fecha:
Text2	T1
Text3	Archivo correspondiente:
Text4	T2
Text5	Datos del motor:
Text6	T3

Las entradas de esta función son: la variable de salida de la función STATE, frecuencia de red, RPM real, número de polos y dirección de almacenamiento de datos. Reemplazando los valores de la celda de una matriz, que contiene los parámetros de la plantilla predefinida con los actuales, se obtiene una manera dinámica de asignarlos. Además, se asignan también los rangos de las señales en frecuencia que se enviarán al reporte.

Las salidas serán: la matriz de texto con datos actuales, las señales requeridas ya acotadas, la dirección de referencia de la plantilla, el diagnóstico y la recomendación a mostrarse en el panel de control.

3.11 VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El sistema tiene una interfaz basada en cuatro paletas:

- Configuración.
- Procesamiento y señales de tiempo.
- Señales de frecuencia y diagnóstico.
- Tablas.

Cada una de ellas tiene una función especial y está diseñada para que sea confortable al usuario y fácil de manejar.

3.11.1 INTERFAZ GRÁFICA

Paleta “Configuración”.

La paleta “Configuración” es la pantalla principal de la aplicación y su apariencia se encuentra en la Figura 3.27.



Figura 3.27. Pantalla “Configuración”.

Aquí se encuentra una interfaz en la que el usuario ingresa los datos particulares del motor a diagnosticar. Estos son:

- Frecuencia de red. Predeterminado en 60 Hz.
- Número de polos. Predeterminado en 2.
- Tiempo a esperar para inicio de adquisición. Predeterminado en 0.
- RPM real del motor. Predeterminado en 3500 RPM.

- Destino de envío de Datos. Con las opciones: Datos a Hoja de Cálculo (Predeterminado), Datos a Access y No enviar.
- Opción para hacer o no Reporte.

Además, tiene dos botones principales, uno verde que inicia las pruebas, y uno azul que reinicializa todo el programa a los valores predeterminados.

Paleta “Procesamiento y señales de tiempo”.

En esta paleta se muestra, en un principio, el avance en el proceso de la detección a través de tres barras de estado intermitentes o que se llenan según la tarea que se esté ejecutando en algún momento. Estas son:

- Estado Lectura de Datos. (Intermitente)
- Estado Envío de Datos. (Llenado)
- Estado Creación de Reporte. (Intermitente)

Durante y una vez terminadas estas etapas, se escriben mensajes al usuario describiendo el estado de la tarea.

Además, en la parte inferior se encuentran dos visualizadores para mostrar las formas de onda de voltaje y corriente en el dominio del tiempo una vez que se ha terminado de adquirir las señales.

La paleta se muestra en la Figura 3.28.

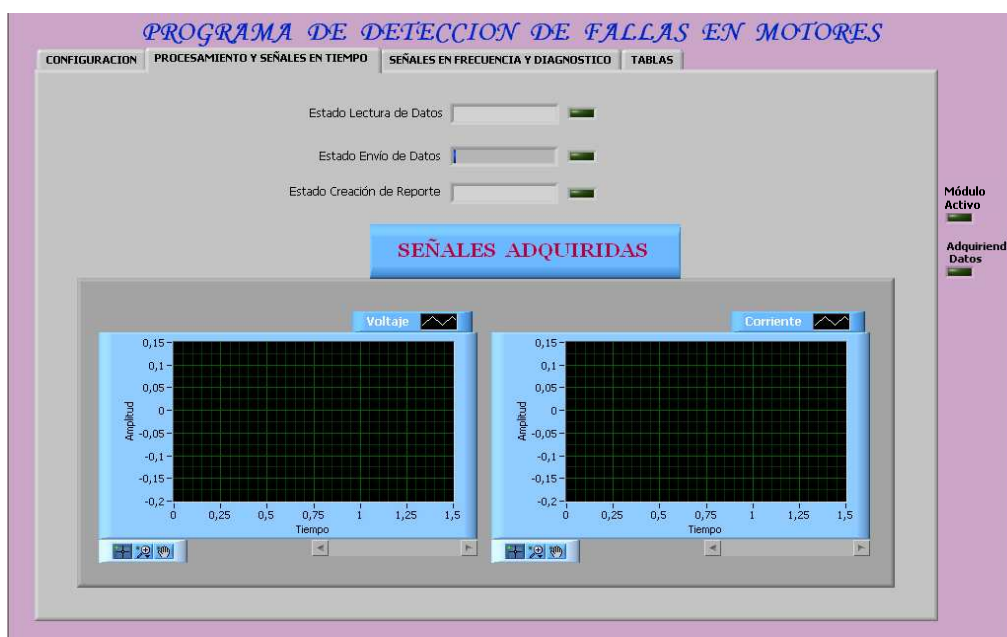


Figura 3.28. Pantalla “Procesamiento y Señales en Tiempo”.

Paleta “Señales de frecuencia y diagnóstico”.

Esta es la paleta que proporciona el resultado mismo del diagnóstico. Aquí se muestran las formas de onda de corriente y voltaje en el dominio de la frecuencia en un rango óptimo para la visualización de las frecuencias de interés (0-150Hz en donde con seguridad se ubicarán los picos de interés), con la opción de revisar el resto del espectro con una barra de desplazamiento en cada visualizador.

Por otra parte, se muestra el diagnóstico y la recomendación de acuerdo a la Tabla 3.6.

La paleta se muestra en la Figura 3.29.

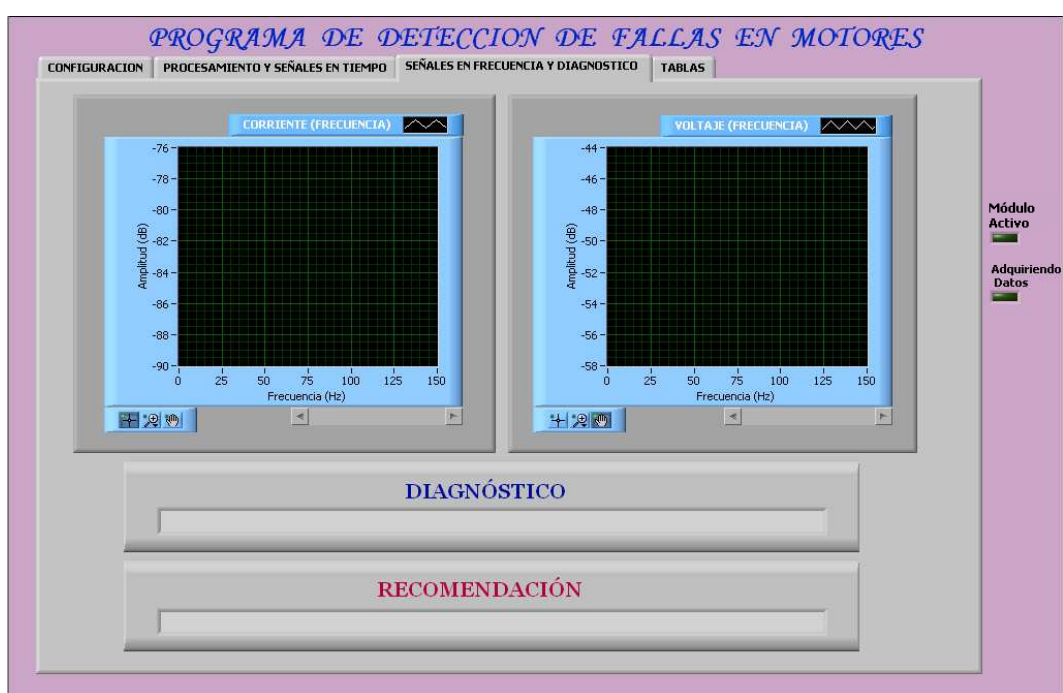


Figura 3.29. Pantalla “Señales en Frecuencia y Diagnóstico”.

Paleta “Tablas”.

Por último, hay una paleta en las que se encuentran las tablas con todos los datos del arreglo de tiempo con sus respectivos valores de voltaje y corriente y lo propio para el dominio de la frecuencia.

El objetivo de esta paleta, es brindar al usuario una manera ágil y rápida de encontrar los valores exactos correspondientes para cierto tiempo o frecuencia de manera que puedan ser utilizados para un eventual cálculo de revisión para constatar que el programa esté haciendo lo correcto.

La paleta “Tablas” se muestra en la Figura 3.30.



Figura 3.30. Pantalla “Tablas”.

Paro de Emergencia.

Como en todo proceso, se necesita una protección de seguridad que suspenda cualquier tarea. El “Paro de Emergencia” es ejecutado a través de la función PARO que aparece y es accesible únicamente mientras se está ejecutando la detección y a la vez, bloquea cualquier acceso al resto de las pantallas. Al instante de presionar este botón, se detiene la DAQ, y se detiene cualquier tarea ejecutada por LabVIEW.

Este botón, que cuando aparece lo hace en la parte superior derecha de la pantalla, se ve de la siguiente manera:



Figura 3.31. Función Paro de Emergencia.

3.11.2 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SOFTWARE

El software se comporta de la siguiente manera:

- Se inicia en la paleta “configuración”. El software solo recibe datos de configuración y se mantiene en estado de espera hasta que llegue una orden de arranque de proceso.
- Cuando se presiona el botón “Iniciar” empieza el proceso.
- Se bloquea la pantalla, aparece al mismo tiempo el paro de emergencia.
- Se resetean la DAQ, pantallas, visualizadores, tablas y variables internas.
- Se activa el relevador de protección de filtros y DAQ.
- Se lee los datos.
- Se hace la evaluación de parámetros obtenidos, tareas digitales, detección e identificación de falla.
- Se muestra resultados en pantalla.
- Se almacena los datos.
- Se crea el reporte.
- Se desactiva el paro de emergencia.
- Se queda en estado de espera nuevamente.

3.11.3 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE HARDWARE

El hardware es implementado bajo el esquema de la Figura 3.32. El esquemático completo del hardware, se encuentra en el Anexo I.

La alimentación se realiza a través de un enchufe a la red de 110 o 220 V. La energía va a dos transformadores con tap central cuyos secundarios dan 12 – 0 - 12 Vrms. A continuación, se realiza la rectificación mediante dos puentes de diodos y un filtro de dos capacitores de 470 uF en serie, para el uno, y un capacitor de 1000 uF para el otro. Adicionalmente, se regula el voltaje a 15, -15, 5 y 12 V. Los dos primeros sirven para la polarización de los amplificadores operacionales de los filtros *anti-aliasing*, mientras que el tercero sirve para la polarización del circuito integrado cambiador de nivel. El último es para el funcionamiento de los relevadores (A, B) cuyos contactos se encuentran en serie a las líneas de las señales de voltaje y corriente, protegiendo así a la DAQ ante un sobrevoltaje o sobrecorriente que se pueda producir durante un arranque del motor posterior a la conexión del módulo.

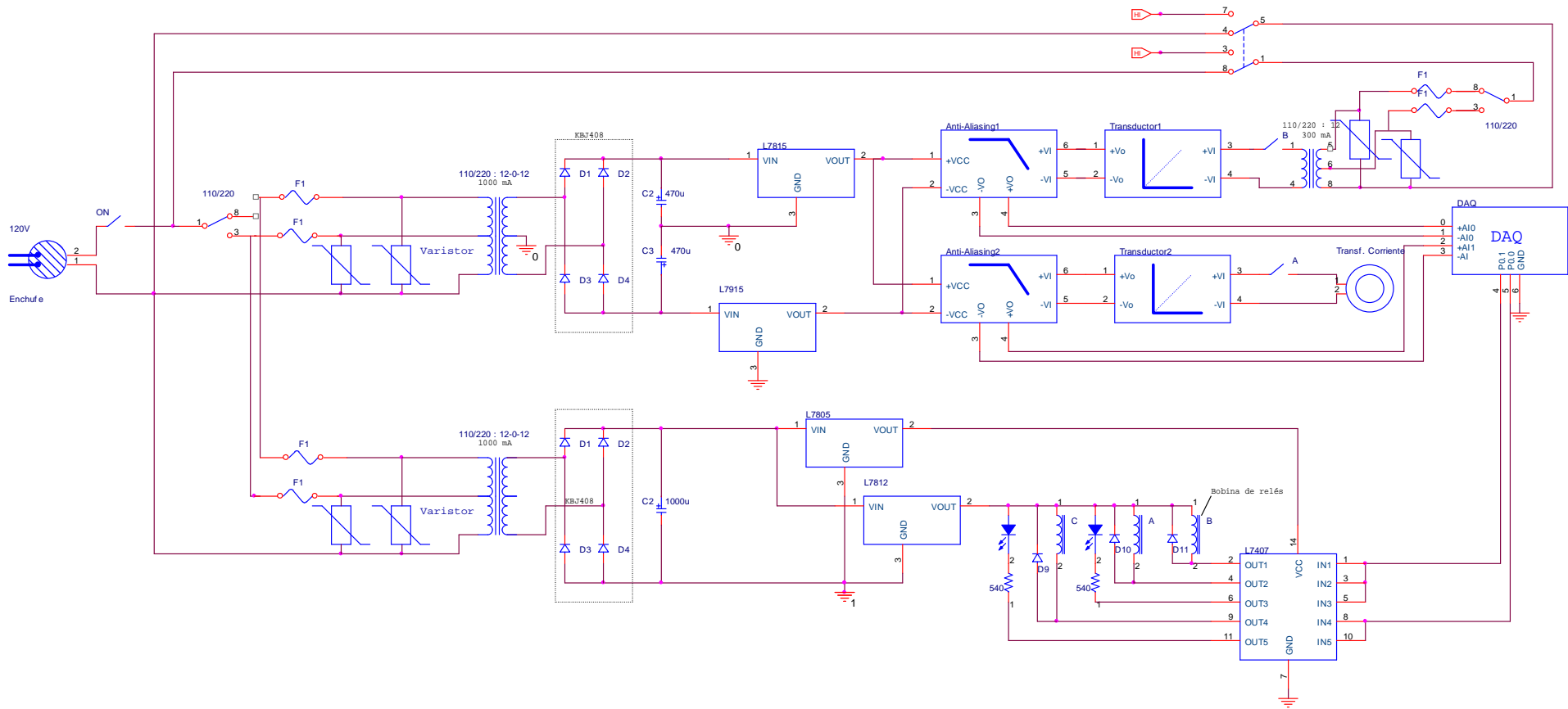


Figura 3.32. Esquema general del hardware.

El relevador C está para que, siguiendo con la filosofía de escalamiento y control en el diseño del sistema, el hardware como tal envíe una señal eléctrica, además de la visual, avisando que se encuentra activo, de manera que otro sistema de control superior pueda usar esta información según necesite.

Protecciones de Hardware.

Los dispositivos principales a proteger son la DAQ, que es el elemento más delicado del sistema, y los filtros.

En el arranque, el motor tiene una corriente mayor que la nominal, por lo que un sobrevoltaje en la señal de corriente puede estar presente al inicio de la prueba. Si el arranque del motor se sincroniza con la lectura de datos, un sobrevoltaje en los sensores puede ser aislado evitando así que otras etapas se dañen.

A través de dos señales digitales entregadas por la DAQ se coordina por software que se active primero el relevador C y su correspondiente LED. Se espera un tiempo ingresado por el usuario (predeterminado en cero) para activar los relevadores A y B, conectados en paralelo que cierran el circuito de conexión entre los sensores y los filtros, esto considerando el caso en que las pruebas se inicien durante el arranque del motor. Si esto no es así y el usuario ingresa un tiempo de espera, el sistema simplemente se demorará ese tiempo adicional en hacer la detección. Cuando A y B se activan, también lo hace una señal visual a través de otro LED.

Cuando la prueba ha concluido, se desconecta primero los relevadores A y B, y después el C.

En vista de que la DAQ no maneja una corriente suficiente como para encender un relevador, se ha utilizado un cambiador de nivel TTL que funciona como búfer. Los relevadores toman su corriente desde los reguladores de voltaje de 12 V.

En el sistema también existen protecciones de sobrevoltaje y sobrecorriente con fusibles y un varistor a la entrada de energía.

Los elementos usados son los descritos en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Elementos utilizados en la implementación.

Función	Elemento	Características principales
Varistor	GNR20D241k	Diseñado para actuar en picos de 300 V
Fusibles		250 mA
Puente de diodos	KBJ408	
Regulador 15V	7815	Corriente máxima: 1A
Regulador -15V	7915	Corriente máxima: 1A
Regulador 12V	7812	Corriente máxima: 1A
Regulador 5V	7805	Corriente máxima: 1A
Relevador	4123-(T71)	Bobina 12V, contacto 120/240V maneja 10/6A
Búfer	7407	Maneja salida de colector abierto hasta de 40 mA.

El aspecto físico del módulo de detección es el mostrado en la Figura 3.33.

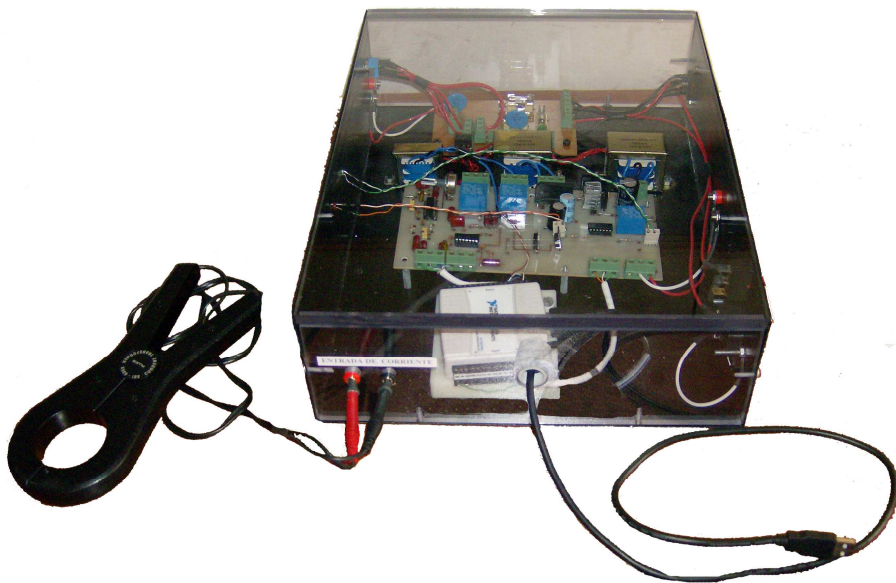


Figura 3.33. Módulo de Detección.

CAPÍTULO IV

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

El presente capítulo detalla las pruebas realizadas para el sistema de detección de fallas y los resultados de las mismas que han sido hechas en los bancos de pruebas detallados en la Sección 4.2.2. Además, se ha obtenido resultados de pruebas en motores cuyo buen estado es conocido de antemano.

4.1 OBJETIVOS ESPERADOS.

Las pruebas se realizan individualmente para los transductores, filtros *anti-aliasing* y el software de los cuales se espera:

- Al probar los transductores individualmente, se debe revisar en un osciloscopio que las señales de corriente y de voltaje estén en los rangos deseados.
- Al probar individualmente el filtro *anti-aliasing*, éste debe dar una respuesta en frecuencia similar a la de la Figura 3.8.
- Al probar el software individualmente se debe tomar en cuenta los siguientes detalles:
 - Certeza de funcionamiento, es decir que el software no devuelva errores de programación durante su ejecución.
 - Las señales visuales deben ser acordes a la configuración de usuario inicial de acuerdo a la Sección 3.11.
 - Se debe mostrar las señales adquiridas de corriente y voltaje en tiempo y frecuencia.
 - Se debe mostrar los espectros de frecuencia en el rango necesario (0-150 Hz).
 - El software debe entregar un diagnóstico de error de configuración o un error en la red eléctrica ya que está siendo probado en vacío.

- **Después de cada una de las pruebas individuales, se debe hacer pruebas en conjunto o globales en las que se dé énfasis a los siguientes detalles:**
 - **Se debe mostrar las señales adquiridas de corriente y voltaje en tiempo y frecuencia.**
 - **Se debe mostrar los espectros de frecuencia en el rango necesario (0-150 Hz).**
 - **Se debe mostrar los picos de corriente en las frecuencias correspondientes a la fundamental y a las bandas laterales, calculadas según la ecuación 1.11.**
 - **El software debe entregar un resultado confiable y similar en varias ejecuciones si el banco de pruebas es el mismo.**
 - **El software debe dar un diagnóstico certero si se realizan las pruebas en bancos distintos.**
 - **Se debe verificar que no existan resultados absurdos en ningún caso.**
 - **Verificar datos en tablas y bases de datos.**
 - **Verificar reportes.**

4.2 CONFIGURACIÓN DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS.

4.2.1 PRUEBAS INDIVIDUALES

Para probar los transductores, se utiliza un osciloscopio para visualizar las señales de corriente y voltaje.

Prueba del transductor de corriente.

La prueba del transductor de corriente se realiza colocando la pinza alrededor de uno de los cables de alimentación al motor, obteniendo la señal de corriente. La Figura 4.1 muestra la forma de onda de corriente.

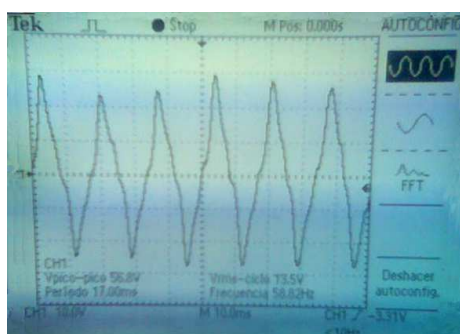


Figura 4.1. Forma de onda de transductor de corriente.

Prueba del transductor de voltaje.

La prueba del transductor de voltaje se realiza conectando la entrada del transformador a una toma en paralelo a la de alimentación del motor para obtener en el secundario la forma de onda de éste voltaje. Esta forma de onda se visualiza en la Figura 4.2.

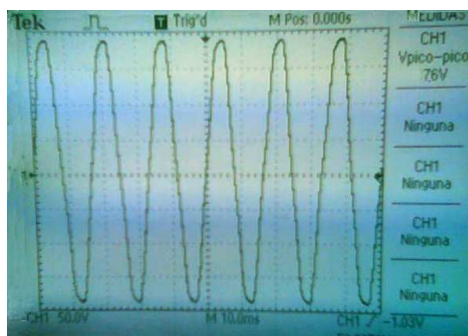


Figura 4.2. Forma de onda de transductor de voltaje.

Prueba del filtro *anti-aliasing*.

La prueba del filtro *anti-aliasing* se realiza conectando un generador de funciones como entrada a cada filtro. Modificando su frecuencia se verifica que el punto de media potencia está alrededor de 560 Hz y que a 1100 Hz, la atenuación es alrededor de 45 dB. A través de una curva se obtiene la siguiente respuesta en frecuencia:

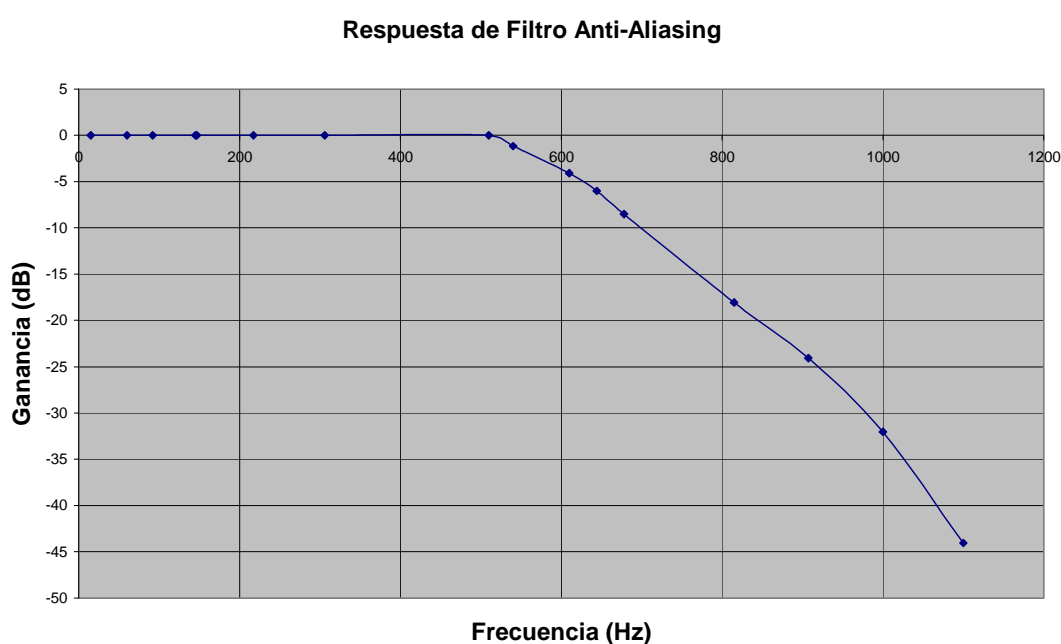


Figura 4.3. Respuesta en frecuencia práctica del filtro *Anti-Aliasing*.

Pruebas de software.

Las pruebas de software se realizan corriendo el programa y verificando las características anteriormente mencionadas. De aquí que capturando una imagen mientras se ejecuta el software conectado únicamente el computador a la DAQ, no se obtiene ningún error de programación y las señales visuales generadas han sido satisfactoriamente cumplidas como se muestra en la Figura 4.4.

En la Figura 4.4 a, se muestra que en la configuración inicial se envía a escribir datos y reportes; mientras que en la Figura 4.4 b, se puede apreciar que cuando el programa lee los datos, el LED “Estado Lectura de Datos” parpadea, y funciona de la

misma manera cuando se crea un reporte. Además, en la Figura 4.4 c, se observa que la barra de estado “Estado Envío de Datos” se llena según se va escribiendo datos mientras que en la Figura 4.4 d, se encuentra el diagnóstico de falla de configuración o daño eléctrico.

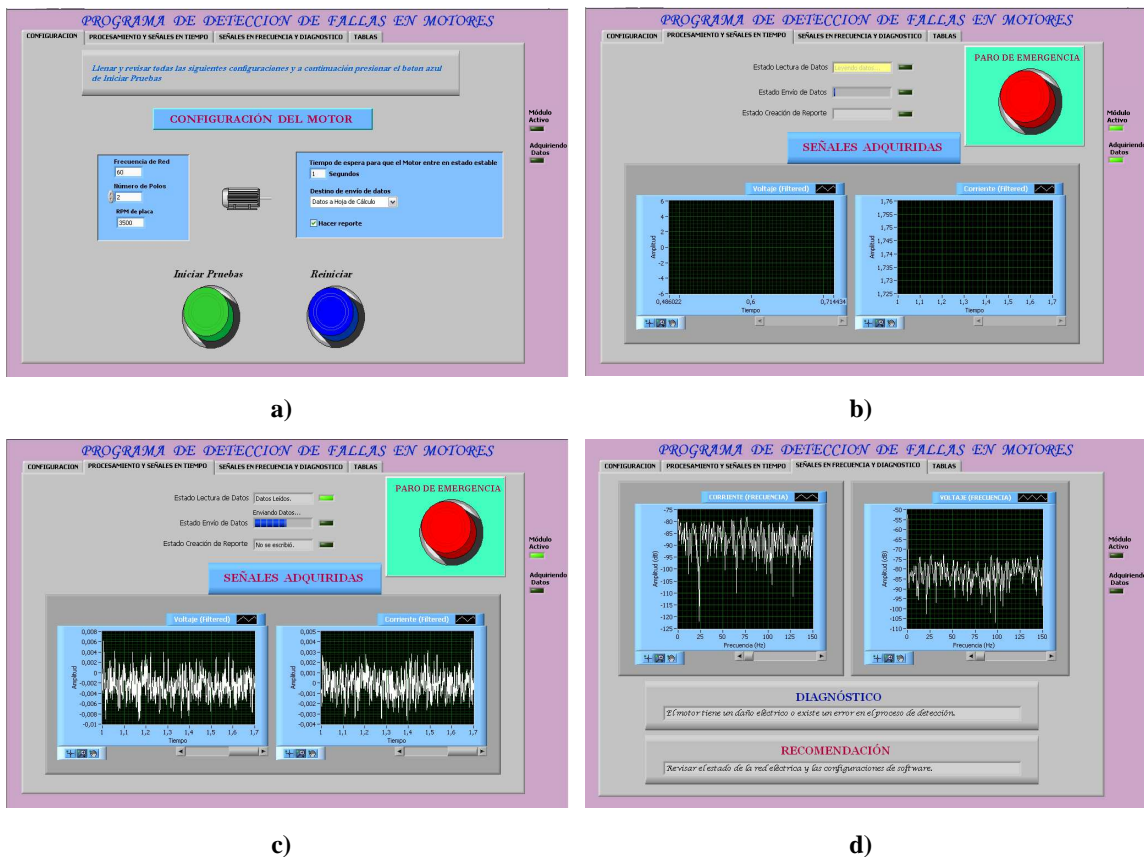


Figura 4.4. a) Pantalla inicial de configuración, b) Segunda pantalla con “Lectura de Datos” parpadeando, c) Segunda pantalla enviando datos a BDD, d) Diagnóstico

4.2.2 PRUEBAS GLOBALES.

Una vez armado el sistema, se hace las pruebas en primer lugar con el banco de pruebas descrito a continuación y después con otro motor cuyo estado se conoce bueno.

Banco de pruebas

El banco de pruebas consiste en el motor (con presencia de barras rotas) a ser diagnosticado adaptado a un generador sincrónico conectado a un banco de resistencias. El generador con carga eléctrica constituye la carga para el motor.

Las características del motor a usar en las pruebas son:

- **Alimentación: Monofásica fase-fase.**
- **Rotor: Tipo jaula de ardilla (con presencia de barras rotas).**
- **Voltaje Nominal: 220V.**
- **Frecuencia: 60 Hz.**
- **Corriente Nominal:16A**
- **Potencia: 3 CV.**
- **Numero de polos: 2.**
- **Velocidad nominal: 3480 RPM.**
- **Velocidad real en tiempo de prueba: 3500 RPM.**

Las características del generador sincrónico a usar en las pruebas son:

- **Frecuencia: 60 Hz.**
- **Potencia: 3 HP.**
- **Numero de polos 2.**
- **Velocidad nominal: 3600 RPM.**
- **Voltaje de Excitación (DC): 12V**
- **Voltaje Generado(AC): 115 V**

La carga eléctrica conectada al generador es un banco de resistencias de 110 V y 18.2 VA.

Tanto el motor como el generador están acoplados a través de poleas del mismo diámetro y una banda. El esquema de este sistema se muestra en la Figura 4.5.

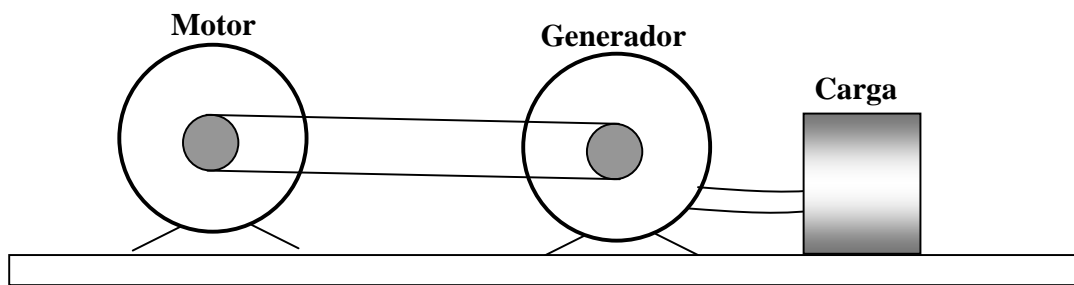


Figura 4.5. Esquema de conexión motor-generador
 Es recomendable que la pinza se coloque alrededor de uno de los dos cables de alimentación una vez que el motor haya arrancado, es decir cuando esté operando en estado estable, pese a que el sistema tiene ya incorporada la protección con tiempo de espera, mediante los relevadores A y B.

Se inicia el proceso de diagnóstico y los resultados son los siguientes:

Señales adquiridas de corriente y voltaje en tiempo.

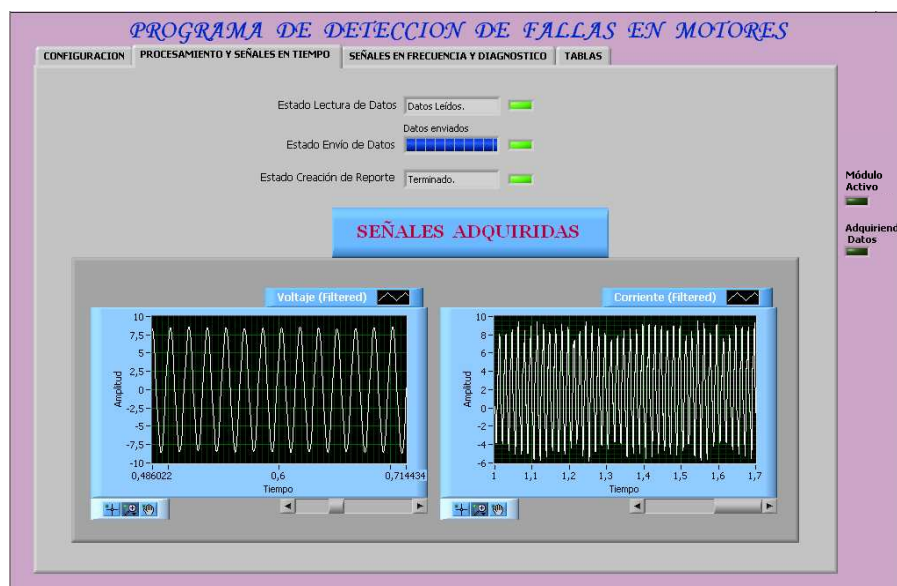
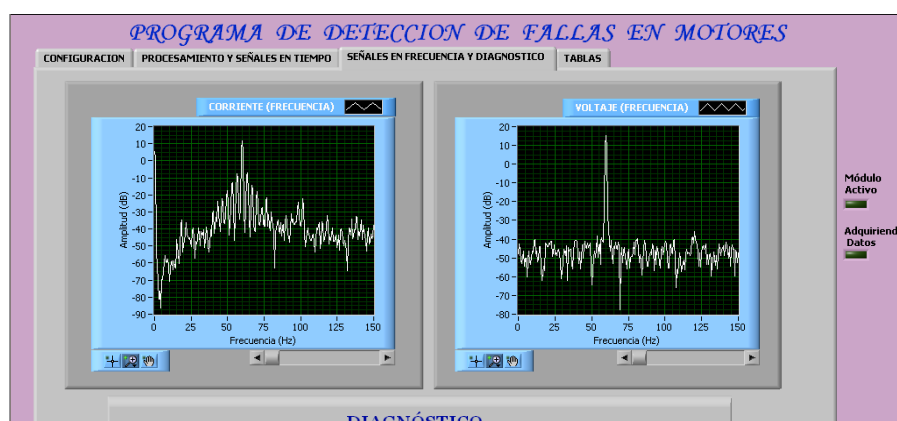


Figura 4.6. Señales adquiridas en tiempo.

Espectros de frecuencia en el rango necesario. (0-150 Hz).



Para el proceso de detección, se ha ejecutado el programa varias veces en las que se ha obtenido las formas de onda mostradas en la Figura 4.8.

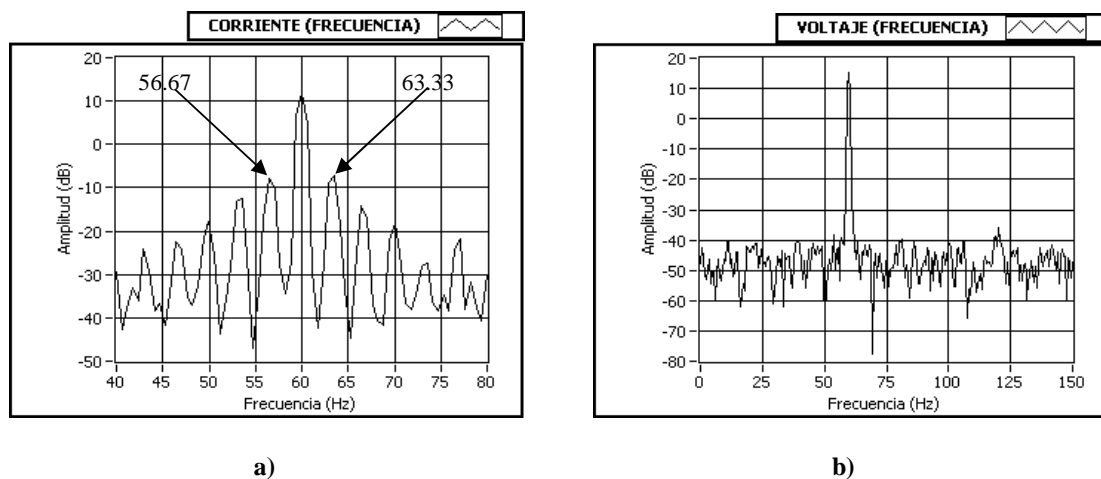


Figura 4.8. Espectro de frecuencias. a) Corriente, b) Voltaje.

En el caso de la Figura 4.8 a, se nota los picos de corriente en 60, 56.67 y 63.33 Hz, que corresponden a las frecuencias fundamental y de las bandas laterales que son calculadas de acuerdo a la ecuación 1.11, así:

$$f_{\text{fundamental}} = 60\text{Hz}.$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{3600 - 3500}{3600} = 0.0277$$

$$f_{\text{lateral izquierda}} = 60 * (1 - 2s) = 60 * (1 - 2 * 0.0277) = 56.67 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{lateral derecha}} = 60 * (1 + 2s) = 60 * (1 + 2 * 0.0277) = 63.33 \text{ Hz}$$

En la Figura 4.8 b, claramente se nota que en la señal de voltaje no existen picos en las frecuencias anteriormente calculadas, lo que implica que la naturaleza de la falla es, efectivamente, barras rotas en la jaula de ardilla del motor.

La magnitud de la FFT en estas frecuencias se la puede hallar usando las tablas generadas en el diagnóstico, tal como se muestra en la Figura 4.9.

TIEMPO			FRECUENCIA		
TIEMPO (s)	CORRIENTE	VOLTAJE	FRECUENCIA (Hz)	CORRIENTE (dB)	VOLTAJE (dB)
25,595700	-0,005731	0,009107	55,882353	-17,781324	-46,443383
25,595900	-0,045147	0,071807	56,470588	-7,911265	-45,741694
25,596200	-0,174329	0,278659	57,058824	-10,969830	-39,936369
25,596400	-0,450447	0,727270	57,647059	-32,630481	-35,018094
25,596700	-0,894912	1,467332	58,235294	-30,405094	-28,389369
25,596900	-1,479739	2,476845	58,823529	-19,779274	-17,263646
25,597200	-2,137917	3,671115	59,411765	7,112102	10,887248
25,597400	-2,784637	4,928458	60,000000	11,608998	15,378371
25,597700	-3,339424	6,118540	60,588235	3,971227	7,711353
25,597900	-3,742671	7,122663	61,176471	-27,196932	-20,221143
25,598200	-3,963542	7,845848	61,764706	-30,608768	-32,369144
25,598400	-3,999417	8,225811	62,352941	-21,527295	-35,764432
25,598700	-3,869369	8,238601	62,941176	-7,651366	-46,154981
25,598900	-3,605056	7,897251	63,529412	-7,614760	-38,189881
25,599200	-3,241842	7,244295	64,117647	-20,222563	-51,848755
25,599400	-2,812016	6,342917	64,705882	-39,502489	-44,126266
25,599700	-2,341053	5,268569	65,294118	-47,775749	-40,607012

Figura 4.9. Paleta de tablas.

De aquí que $I_{f_{\text{lateral izquierda}}} = -7.91 \text{ dB}$ y $I_{f_{\text{lateral derecha}}} = -7.61 \text{ dB}$. La diferencia entre el mayor de estos valores y la banda fundamental es de 19.22 dB. Este mismo cálculo se hace con la señal de voltaje teniendo que $V_{f_{\text{lateral izquierda}}} = -45.74 \text{ dB}$ y

$V_{f_{\text{lateral derecha}}} = -38.19 \text{ dB}$, con una diferencia de 53.56 dB, respecto de la fundamental. De lo

que se observa en la Tabla 3.6, el diagnóstico debe ser “El motor tiene un daño severo” como se observa en la Figura 4.10.

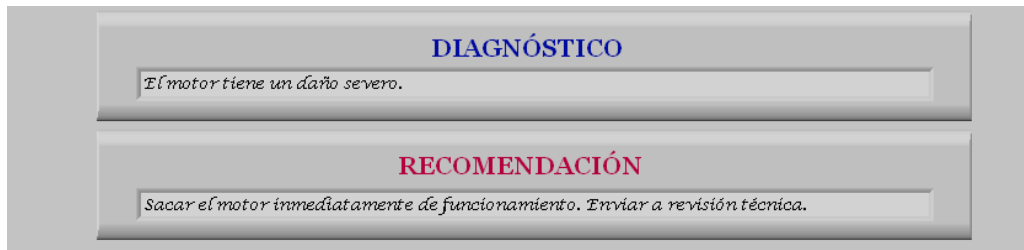


Figura 4.10. Paleta de diagnóstico y recomendación.

Esta prueba se realizó varias veces en el mismo banco de pruebas y siempre se obtuvo el mismo resultado.

Para la prueba en otro motor cuyo estado se sabe bueno de antemano, se tiene las siguientes características:

Las características del motor sin barras rotas a usar en las pruebas son:

- Alimentación: Trifásica.
- Rotor: Tipo jaula de ardilla (en buen estado).
- Voltaje Nominal: 220/380 V.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Corriente Nominal: 11/6.5 A
- Potencia: 4 CV.
- Numero de polos: 2.
- Velocidad real en tiempo de prueba: 3457 RPM.

Las características del generador a usar en las pruebas son:

- Máquina de Corriente Continua (como generador).
- Voltaje: 110 V
- Corriente: 18.2 A

- **Potencia: 2000 W.**
- **Excitación: 110 V.**

La carga eléctrica conectada al generador es un banco de resistencias de 110 V y 18.2 VA.

Tanto el motor como el generador están acoplados a través de un “matrimonio”. El esquema de este sistema se muestra en la Figura 4.11.

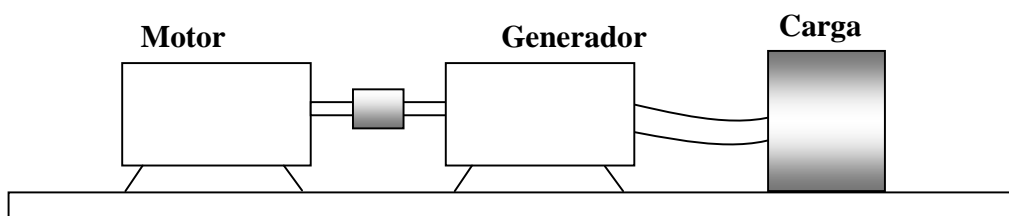


Figura 4.11. Esquema de conexión motor (bueno) -generador

Una vez que el sistema está en funcionamiento, se hace el diagnóstico colocando directamente la pinza alrededor de uno de los cables de alimentación al motor.

Se inicia el proceso de diagnóstico y los resultados son los siguientes:

Señales adquiridas de corriente y voltaje en tiempo.

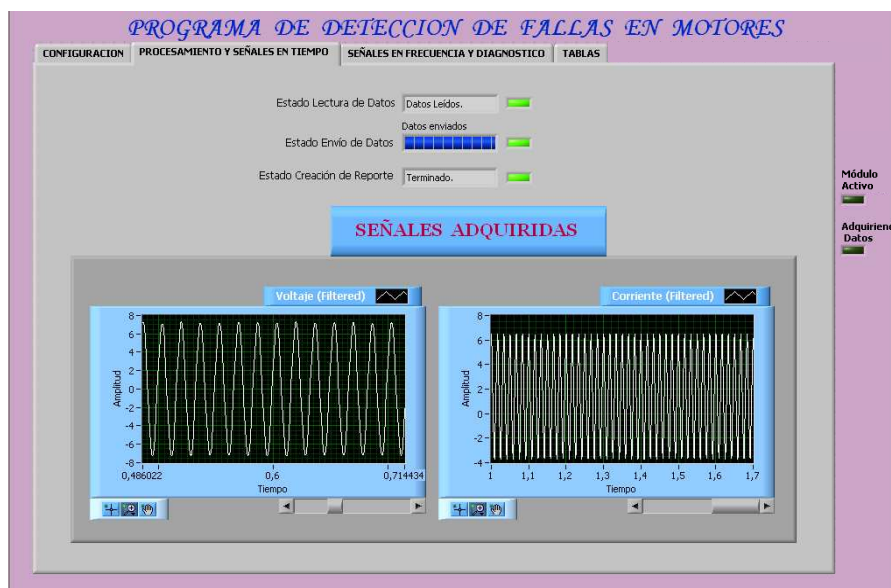


Figura 4.12. Señales adquiridas en tiempo.

Espectros de frecuencia en el rango necesario. (0-150 Hz).

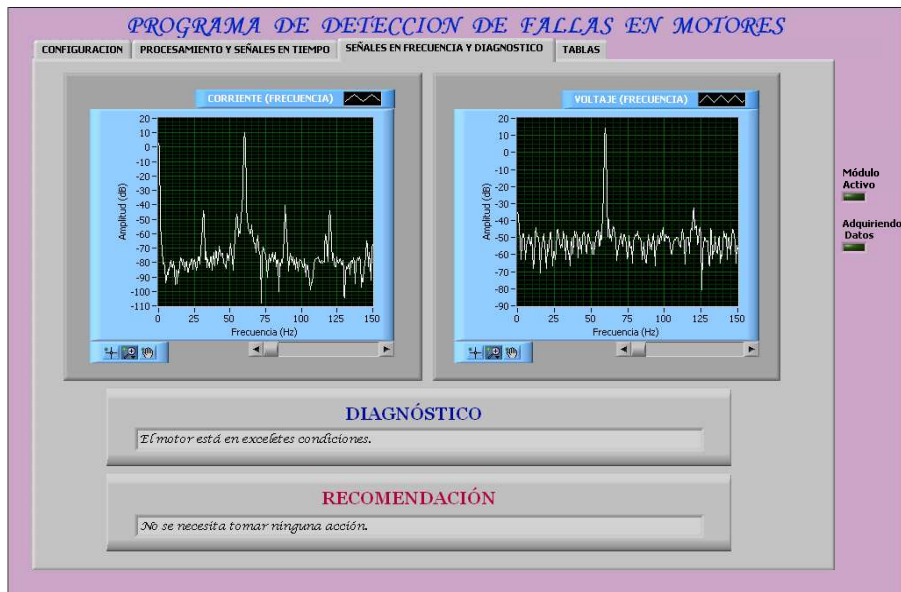


Figura 4.13. Espectros de frecuencia, diagnóstico y recomendación mostradas por el programa.

Para el proceso de detección, se ha ejecutado el programa varias veces en las que se ha obtenido las formas de onda mostradas en la Figura 4.14.

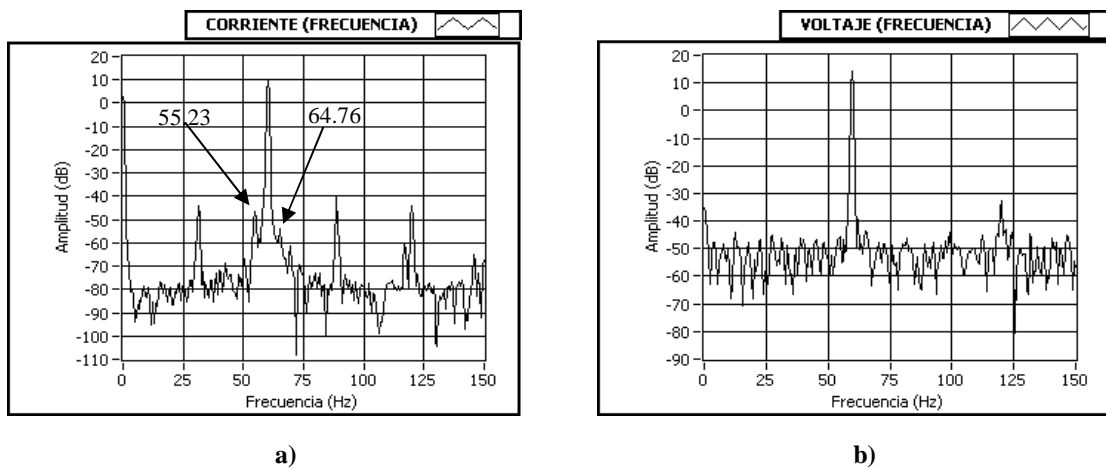


Figura 4.14. Espectro de frecuencias. a) Corriente, b) Voltaje.

En el caso de la Figura 4.14 a, se observa que ya no aparecen picos significativos en las frecuencias calculadas de acuerdo a la ecuación 1.11, así:

$$f_{\text{fundamental}} = 60\text{Hz}.$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{3600 - 3457}{3600} = 0.0397$$

$$f_{\text{lateral izquierda}} = 60 * (1 - 2s) = 60 * (1 - 2 * 0.0397) = 55.23\text{Hz}$$

$$f_{\text{lateral derecha}} = 60 * (1 + 2s) = 60 * (1 + 2 * 0.0397) = 64.76\text{Hz}$$

En la Figura 4.14 b, claramente se nota que en la señal de voltaje no existe picos en las frecuencias anteriormente calculadas, lo que junto con el análisis de la Figura 4.14 a, asegura que no existe falla por barras rotas en el motor.

De los datos correspondientes a los espectros de corriente y voltaje mostrados en la Figura 4.14, se tiene que $I_{f_{\text{lateral izquierda}}}^f = -47.56\text{dB}$ y $I_{f_{\text{lateral derecha}}}^f = -61.23\text{dB}$. La diferencia entre el mayor de estos valores y la banda fundamental es de 57.56 dB. Este mismo cálculo se hace con la señal de voltaje teniendo que $V_{f_{\text{lateral izquierda}}}^f = -47.31\text{dB}$ y $V_{f_{\text{lateral derecha}}}^f = -44.28\text{dB}$ con una diferencia de 58.25 dB, respecto de la fundamental. De lo que se observa en la Tabla 3.6, el diagnóstico debe ser “El motor está en excelentes condiciones“ como se observa en la Figura 4.15.

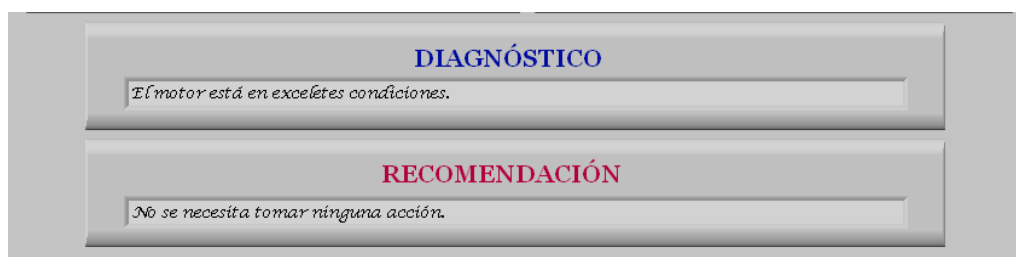


Figura 4.15. Paleta de diagnóstico y recomendación.

Esta prueba se realizó varias veces en el mismo sistema motor-generator y siempre se obtuvo el mismo resultado.

Se verificó que en ninguna ocasión el programa respondió con un diagnóstico no previsto anteriormente.

Verificación de datos en tablas y bases de datos.

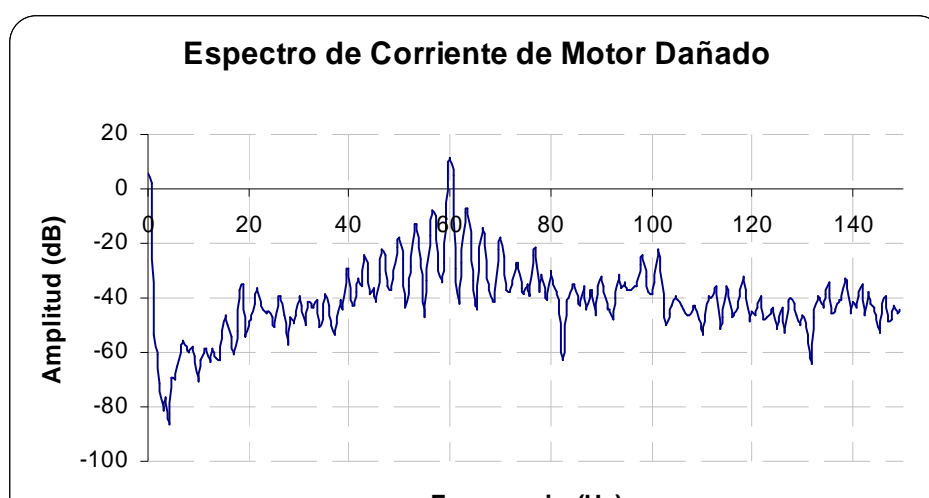
En cada prueba en la que se ha configurado que se almacenen los datos se ha generado un archivo de tipo *.xls si es en Excel o se crea una tabla en la base de datos deseada.

Cuando los datos son almacenados en Excel se tiene una tabla cómo la siguiente (del archivo Datos_04_01_2007_18h16m42s.xls).

Tabla 4.1. Tablas generadas en Excel.

TABLAS DE MEDICION					
Tiempo (s)	Corriente	Voltaje	Frecuencia (Hz)	Corriente	Voltaje
40,838	-0,003	0,009	0	5,502	-47,664
40,838	-0,02	0,072	0,588	2,492	-42,353
40,838	-0,076	0,281	1,176	-53,549	-46,03
40,838	-0,196	0,734	1,765	-60,891	-51,731
40,839	-0,39	1,478	2,353	-71,413	-52,952
40,839	-0,651	2,488	2,941	-81,326	-49,737
40,839	-0,961	3,681	3,529	-76,483	-46,571
40,839	-1,306	4,938	4,118	-86,456	-54,616
40,84	-1,678	6,136	4,706	-69,455	-50,238
40,84	-2,082	7,164	5,294	-69,863	-50,03
40,84	-2,528	7,94	5,882	-65,032	-59,964
40,84	-3,024	8,413	6,471	-59,926	-50,915
40,841	-3,564	8,566	7,059	-55,687	-46,151
40,841	-4,116	8,407	7,647	-58,864	-52,231

Se puede generar diferentes gráficas para revisión. Para el caso del diagnóstico con el banco de pruebas, usando los datos almacenados en Excel, se ha creado la gráfica del espectro de frecuencias de la corriente, mostrada en la Figura 4.16, donde también se notan los picos de corriente que se explicó anteriormente.



Si los datos han sido almacenados en una base de datos de MS Access, se tiene lo siguiente:

CorrienteTiempo	VoltajeTiempo	Frecuencia	CorrienteFrecuencia	VoltajeFrecuencia
-4,6167052	-8,9019401	0	2,75465447	-38,2772477558763
-3,7087860	-7,0209377	0,58823529	-0,2549416	-38,4260121807382
-0,1467672	-0,2708997	1,17647058	-53,080718	-51,5140825474706
-0,3904596	-0,6982103	1,76470588	-63,072053	-56,0364454191327
-0,8013564	-1,3813545	2,35294117	-72,688303	-46,9266994658188
-1,3704952	-2,2703566	2,94117647	-77,353589	-45,8781427038205
-2,0452904	-3,2526805	3,52941176	-82,226393	-54,9429007997564
-2,7398286	-4,1859227	4,11764705	-70,394665	-44,329327912475
-3,3524066	-4,9302629	4,70588235	-73,964059	-41,4997783351374
-3,7856174	-5,3747580	5,29411764	-75,229605	-40,2517305910596
-3,9643616	-5,4568930	5,88235294	-74,465346	-39,3888060793903
-3,8483274	-5,1696812	6,47058823	-73,047490	-48,8557803704438
-3,4372269	-4,5535352	7,05882352	-70,856073	-43,5533484923526
-2,7686711	-3,6810361	7,64705882	-72,110409	-44,3601585701013
-1,9098991	-2,6429153	8,23529411	-60,457661	-52,2252124823209
-0,9455822	-1,5348618	8,82352941	-59,299728	-49,764835327882
3,56109602	-0,4429793	9,41176470	-61,044031	-54,3593384690116
0,95326695	0,56792518	10	-59,363620	-46,4829922412263
1,74466284	1,45876006	10,5882352	-60,473750	-51,5497222586262
2,37059919	2,21607074	11,1764705	-65,939093	-65,772532414705
2,81752577	2,85058041	11,7647058	-67,901543	-51,9950121454378
3,0673859	3,39218830	12,3529411	-67,269618	-51,31719555661190

Figura 4.17. Datos almacenados en MS Access.

Si el diagnóstico genera un reporte, lo hace en *.pdf. En el caso del motor con falla, se genera el reporte del Anexo A, mientras que en el caso del motor sin falla, se genera el reporte del Anexo B.

Los aspectos del hardware de diagnóstico y del banco de pruebas se muestran en la Figura 4.18.

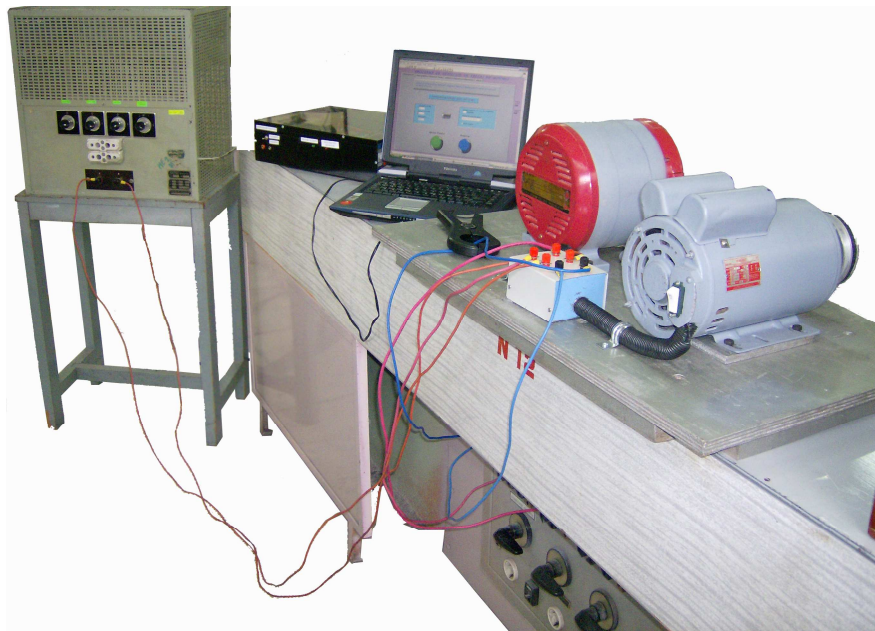


Figura 4.18. Banco de pruebas y hardware de diagnóstico.

4.3 RESUMEN DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 4.2. Resumen de pruebas y resultados.

PRUEBA	RESULTADO	COMENTARIOS
<i>Pruebas individuales</i>		
Transductor de corriente.	✓	Las formas de corriente fueron las esperadas.
Transductor de voltaje.	✓	Las formas de voltaje fueron las esperadas.
Filtro <i>anti-aliasing</i> .	✓	Frecuencia de corte 560 Hz, atenuación de -45 dB a 1100 Hz.
Errores de programación.	✓	No existen errores de programación.
Señales visuales acordes a la configuración.	✓	Todas las señales visuales actúan según lo previsto.
Muestra de señales adquiridas de corriente y voltaje en tiempo y frecuencia.	✓	Todas las señales son adquiridas y mostradas según lo previsto.
Espectros de frecuencia en el rango necesario (0-150 Hz).	✓	Al mostrar los espectros se acota para mejor observación.
Diagnóstico de error de configuración o eléctrico por prueba en vacío.	✓	El software se comporta según lo esperado.
<i>Pruebas Globales</i>		
Muestra de señales adquiridas de corriente y voltaje en tiempo y frecuencia.	✓	Todas las señales son adquiridas y mostradas según lo previsto.
Espectros de frecuencia en el rango necesario (0-150 Hz).	✓	Al mostrar los espectros se acota para mejor observación.
Picos de corriente en frecuencia fundamental y laterales.	✓	Se notaron los picos de corriente predichos en la teoría.
Resultado confiable.	✓	El software dio el mismo resultado para el mismo banco de pruebas en varias ocasiones.
Diagnóstico certero.	✓	El sistema diagnóstico correctamente en pruebas a distintos motores.
No existencia de resultados absurdos.	✓	No se registraron resultados absurdos en ningún caso.
Datos en tablas y bases de datos.	✓	Los datos se almacenaron correctamente en cada caso.
Reportes.	✓	Se generaron reportes según las especificaciones requeridas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

- La falla más común en el rotor de un motor de inducción es la ruptura de las barras en la jaula de ardilla debido a esfuerzos térmicos o mecánicos a los que el motor pueda someterse.
- Existen varios métodos para el monitoreo y detección de fallas en motores de inducción, pero debido a características inherentes al método en sí, tales como: monitoreo en línea no invasivo, facultad de discriminar entre un tipo de falla y otro, rapidez y facilidad para realizar el diagnóstico, ser aplicable en motores trifásicos o monofásicos, de corriente continua o alterna con tan sólo tener acceso a una de las líneas de alimentación y por la factibilidad de implementación, se decidió usar algoritmos de MCSA para la detección de barras rotas en motores de inducción.
- MCSA aplicado para la detección de barras rotas, es usado principalmente para decidir si un motor continúa o no operado, pues es capaz de valorar la severidad de la falla.
- Tener barras rotas en el motor origina dos bandas laterales en el espectro de frecuencia de la corriente de alimentación, ubicadas a frecuencias del doble de la frecuencia de deslizamiento ($2sf_1$) alrededor de la frecuencia fundamental f_1 , así:

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

- MCSA para detección de barras rotas es aplicable en motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos o monofásicos, con carga constante y de alrededor del 75 % de su valor nominal y que no tengan asociados variadores de velocidad.

- Para implementar MCSA se requiere sensar las señales de voltaje y corriente de alimentación al motor.
- La pinza amperimétrica, como sensor de corriente, cumple con todos los requerimientos del método de diagnóstico y permite, por su rango de medida, sensar motores de una amplia gama de potencias como los que se puede encontrar en aplicaciones reales.
- El transformador, como transductor de voltaje, tiene la ventaja de satisfacer los requerimientos del método de diagnóstico además de ser de bajo costo, pero tiene como limitante que no tiene un alto rango de voltajes primarios, por lo que no es aplicable en motores con altos voltajes de alimentación.
- En el proceso de adquisición de datos se ha construido filtros *anti-aliasing* para evitar que cualquier tipo de señal analógica que tenga una componente con frecuencia mayor a la de Nyquist, aparezca en el espectro digital por el efecto de *Aliasing*.
- Los filtros *anti-aliasing* son necesariamente analógicos y pasabajas y además permiten cumplir con el teorema de muestreo de Shannon-Nyquist.
- Debido a que el muestreo de una señal analógica introduce en frecuencia una repetición del espectro centrado en n veces la frecuencia de muestreo, es indispensable utilizar un filtro digital pasabajas con una atenuación a nivel de ruido en por lo menos la frecuencia de muestreo sobre dos, para anular frecuencias que aparecen en la representación digital de la señal pero que en la realidad no existen.
- Debido a que MCSA requiere hacer análisis en frecuencia, y ya que se tiene las señales digitalizadas y filtradas, se debe calcular una Transformada Discreta de Fourier (DFT), pero a fin de optimizar el procesamiento computacional se usa el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) que es un algoritmo que permite calcular la DFT mucho más rápidamente.

- Las características de la FFT que se tomaron en cuenta para la implementación del sistema son: la frecuencia de muestreo, la resolución en frecuencia, el número de muestras, el tamaño de la FFT, la mejora de medición a través del promedio, la ponderación y las ventanas a usar.
- La ventana tipo Hanning, generalmente, es la que mejor se ajusta en sistemas de análisis en frecuencia, como el implementado en el proyecto, por sus características de linealidad y supresión de discontinuidades.
- Ya que el algoritmo de FFT implementado requiere que la secuencia de entrada sea potencia de dos, se debe implementar *zero padding*.
- El criterio de detección de barras rotas y el diagnóstico de la severidad de la falla, se basan en calcular la diferencia existente entre el pico de la frecuencia fundamental y la mayor de las bandas laterales.
- LabVIEW como lenguaje de programación, permite implementar con facilidad varias de las etapas del sistema, ya que cuenta con algoritmos precompilados y librerías dedicadas para este fin. Además, permite crear una interfaz de usuario amigable y de fácil operación.
- El sistema cumple con criterios de confiabilidad, seguridad y escalabilidad requeridos en cualquier proyecto de investigación de alto nivel.
- Al realizar las pruebas del sistema de detección, se puede notar que el tiempo que toma realizar el diagnóstico difiere según la configuración de la pantalla principal, es así que el sistema se tomará más tiempo si se pide generar reportes o almacenar los datos del diagnóstico.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Antes de iniciar un diagnóstico, se puede considerar la opción de configurar al sistema solo con los requerimientos necesarios para optimizar en el tiempo consumido por el proceso de detección.

- **Al ser un monitoreo en línea se asume que el motor a ser diagnosticado está funcionando en condiciones estables durante el monitoreo, pero sin embargo, se ha considerado la posibilidad de que el diagnóstico se haga al arrancar la máquina, por lo que se recomienda conectar la pinza una vez que el motor esté en estado estable, aún cuando el módulo tiene protecciones en hardware.**
- **A pesar de que la ventana Hanning tiene un gran espectro de aplicaciones, es siempre necesario probar otras ventanas para discernir, de entre ellas, cuál es la que mejor se ajusta.**
- **Es importante que el sistema tenga un aislamiento contra elementos corrosivos que puedan presentarse en un ambiente industrial y dañar el equipo.**

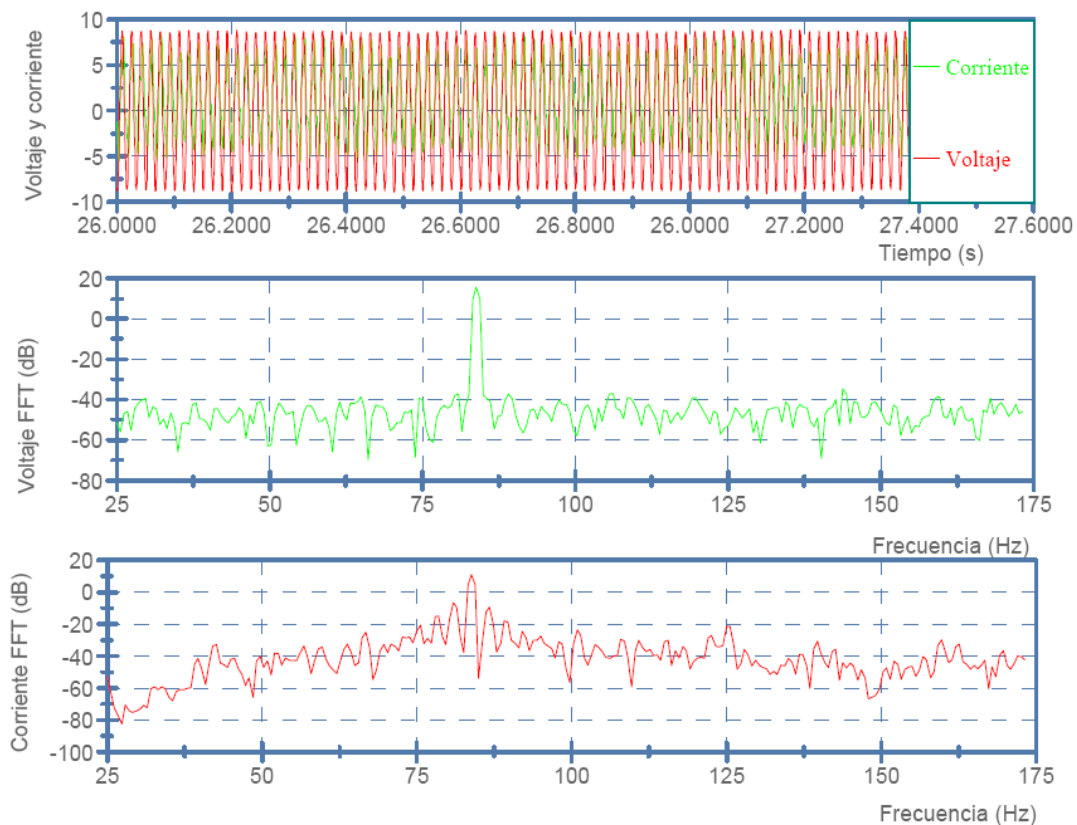
ANEXO A

“Reporte Generado por el Programa al Evaluar un
Motor con Barras Rotas”

Usuario: Tesista
 Fecha:
 04/01/2007 18:47

DIAGNÓSTICO DEL MOTOR

Diagnóstico basado en MCSA



Estado del motor: El motor tiene un daño severo.

Datos del motor:

Frecuencia de Red: 60 Hz

RPM Real: 3500

Número de Polos: 2

Recomendación: Sacar el motor inmediatamente de funcionamiento. Enviar a revisión técnica.

Archivo correspondiente:

BDD en MS Access: DatosNumericosAccess. Tabla: Datos_04_01_2007_18h47m21s

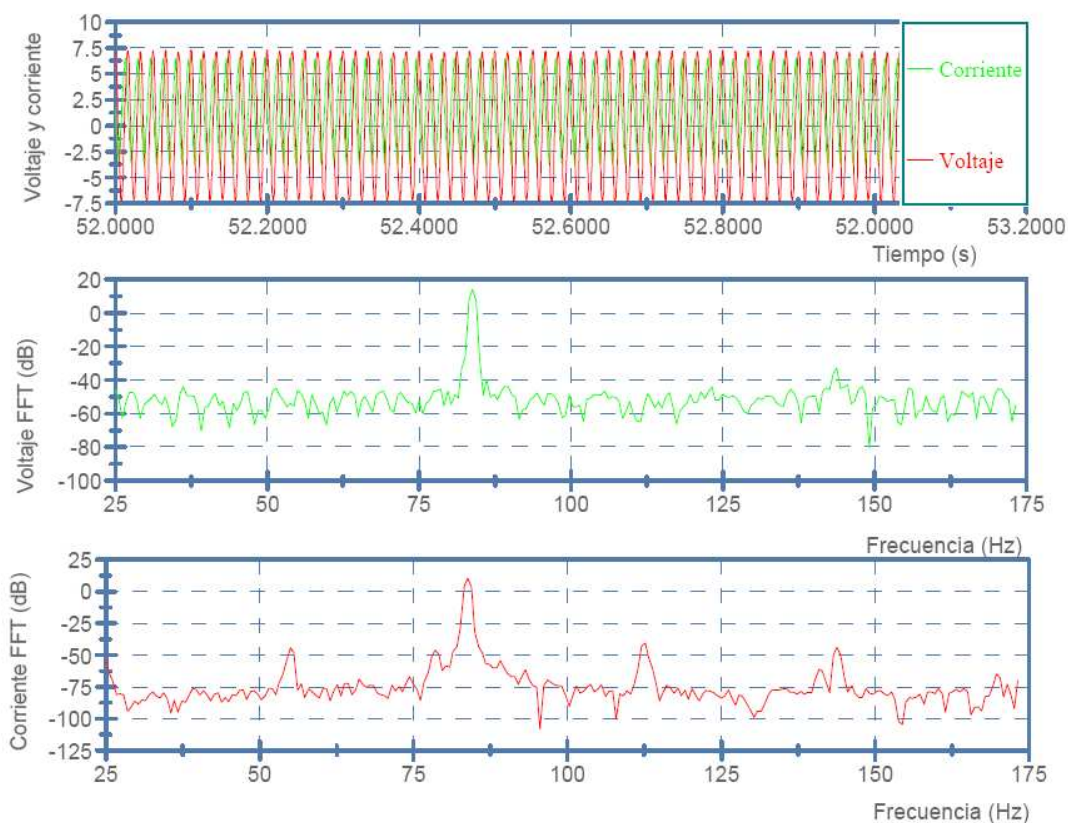
ANEXO B

“Reporte Generado por el Programa al Evaluar un Motor en
Buen Estado”

Usuario: Tesista
 Fecha:
 04/01/2007 17:24

DIAGNÓSTICO DEL MOTOR

Diagnóstico basado en MCSA



Estado del motor: El motor está en excelentes condiciones.

Datos del motor:

Frecuencia de Red: 60 Hz

RPM Real: 3457

Número de Polos: 2

Recomendación: No se necesita tomar ninguna acción.

Archivo correspondiente:

C:\Documents and Settings\Rafael\Mis documentos\tesis Programacion\Datos_04_01_2007_17h24m38s.xls

ANEXO C

“Manual de Usuario”

C. MANUAL DE USUARIO

El sistema de detección de barras rotas en motores de inducción está integrado de dos partes: Hardware y Software. Cada una de ellas debe estar correctamente instalada y configurada, para que el sistema de detección funcione correctamente, proporcionando resultados reales y confiables.

C.1 DESCRIPCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE HARDWARE.

El hardware del sistema está constituido por:

- Módulo de acondicionamiento y control.
- Pinza Amperimétrica.
- Computador Personal.

C1.1 MÓDULO DE ACONDICIONAMIENTO Y CONTROL.

En este módulo se acondiciona las señales en forma analógica, se hace la conversión A/D mediante la tarjeta de adquisición y se envía estos datos al computador.

En el módulo se puede encontrar los siguientes bornes e interruptores:

Energización.

El módulo puede ser energizado a 120 ó 220 V, elegibles por el usuario de acuerdo a la disponibilidad de voltaje en el lugar dónde se va a realizar el diagnóstico.

Se tiene un botón de *ON – OFF* que prende o apaga a todo el módulo.

Selector Interno/Externo.

Sirve para escoger el cómo se va a tomar la señal de voltaje para la detección de la falla, así:

Interno. Si el selector se encuentra en ésta posición la señal de voltaje para la detección de la falla se toma de la alimentación al módulo que debe estar

conectado en la misma red en la que se encuentre conectado el motor. En este caso es suficiente con energizar el módulo para adquirir la señal de voltaje.

Externo. En este caso se debe conectar, mediante puntas de prueba, la señal de voltaje de alimentación al motor a los terminales “Entrada de Voltaje”.

Entradas.

El módulo tiene dos terminales de entrada que son:

Entrada de Corriente. Corresponde a los terminales dónde directamente se debe conectar la pinza amperimétrica.

Entrada de Voltaje. Corresponde a los terminales dónde se puede conectar las puntas de prueba de la señal de voltaje de alimentación al motor, en el caso de que se haya seleccionado la opción “Externo”.

Salidas.

Se tiene dos salidas:

Conector USB. Es el de la tarjeta de adquisición para enviar las señales de voltaje y corriente digitalizadas al computador.

Módulo Activo. Es la salida que sirve para enviar una señal eléctrica avisando que el módulo de detección se encuentra activo, de manera que otro sistema de control superior pueda usar esta información según lo requiera.

Indicadores.

Sirven para visualizar la evolución de los siguientes procesos:

Adquisición de datos. El LED permanece encendido durante la adquisición de datos al computador, y se apaga una vez que este proceso haya terminado.

Módulo activo. Este indicador es un reflejo de la señal que se envía a la salida del mismo nombre, y que corresponde al tiempo que el módulo permanece activo para realizar el diagnóstico.

A continuación se describe el aspecto físico del módulo y la ubicación de cada uno de los elementos descritos anteriormente:

En la Figura C.1 se muestra el panel frontal donde están ubicados los indicadores y la “Entrada de Voltaje” con el selector que permite escoger entre interno y externo.

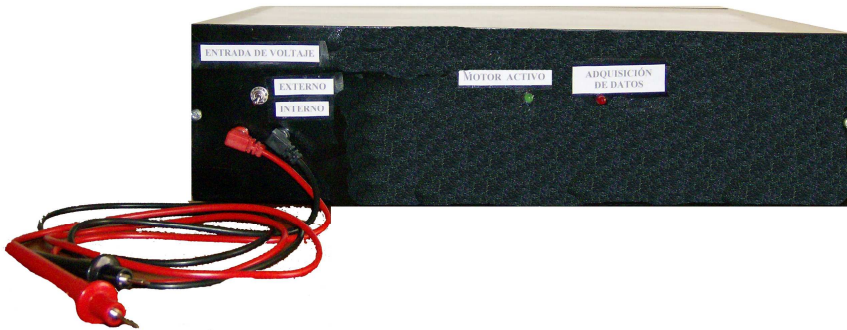


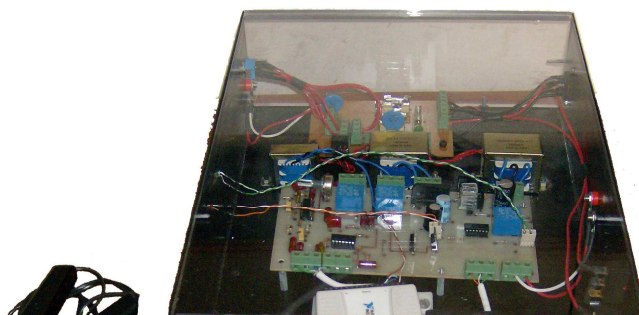
Figura C1. Panel frontal del módulo de acondicionamiento y control.

En el panel posterior se encuentra la conexión para la alimentación, el botón de *ON-OFF*, el selector para elegir entre 120 o 220 V y la salida “Módulo Activo”, tal como se observa en la Figura C.2.



Figura C.2. Panel posterior del módulo de acondicionamiento y control.

En el panel lateral derecho se encuentra la entrada de la señal de corriente que es donde se debe conectar la pinza amperimétrica, y se tiene también la salida del cable USB para la conexión al computador. La apariencia de este panel se muestra en la Figura C.3.



Para el correcto funcionamiento del módulo, éste debe estar energizado, encendido y con los selectores en posiciones compatibles entre sí de acuerdo a las configuraciones de energización y señal de voltaje según lo anteriormete descrito.

C.1.2 PINZA AMPERIMÉTRICA.

La pinza amperimétrica se debe conectar directamente al módulo de acondicionamiento y control en los terminales correspondientes a “Entrada de Corriente”, tal como se aprecia en la Figura C.3.

Es recomendable que la pinza se coloque alrededor de uno de los dos cables de alimentación una vez que el motor haya arrancado, es decir cuando esté operando en estado estable, para evitar que algún transitorio pueda introducirse al sistema de diagnóstico pese a que éste tiene ya incorporada una protección.

C.1.3 COMPUTADOR PERSONAL.

El computador personal para la prueba debe soportar LabVIEW 8.0, y debe disponer de un puerto USB para la conexión de la DAQ.

C.2 CONFIGURACIÓN Y MANEJO DE SOFTWARE.

El sistema posee una interfaz gráfica amigable al usuario y de fácil manejo que se compone de las siguientes paletas:

- Configuración.
- Procesamiento y señales de tiempo.
- Señales de frecuencia y diagnóstico.
- Tablas.

C.2.1 PALETA “CONFIGURACIÓN”.

La paleta “Configuración” es la pantalla principal de la aplicación desde la que se puede iniciar el proceso de diagnóstico. En esta paleta es donde se debe ingresar toda la información que el sistema requiere para el diagnóstico y además, se puede escoger opciones para el almacenamiento de datos y la generación o no de reportes. En la Figura C.4 se puede observar la paleta “Configuración”.



Figura C.4. Pantalla “Configuración”

Opciones de la Paleta Configuración.

Para el ingreso de datos, se tiene una pantalla para ingresar los parámetros específicos del motor a ser diagnosticado. Estos son:

- Frecuencia de red. Predeterminado en 60 Hz.
- Número de polos. Predeterminado en 2.
- Tiempo a esperar para inicio de adquisición. Predeterminado en 0.
- RPM real del motor. Predeterminado en 3500.

Cabe notar que el parámetro “RPM real del motor” es la velocidad real del motor en tiempo de prueba que deberá ser medido antes de iniciar el diagnóstico.

Se tiene la facultad de escoger las siguientes opciones para el destino de envío de datos y la generación de reportes:

- Destino de envío de Datos:
 - Datos a Hoja de Cálculo (Predeterminado),
 - Datos a Access,
 - No enviar.
- Opción para hacer o no Reporte. Si el usuario selecciona esta opción, el sistema generará un reporte en formato de archivo portátil (*.pdf).

Además, tiene dos botones principales:

- Botón Verde, inicia las pruebas.
- Botón Azul, reinicializa todo el programa a los valores predeterminados.

C.2.2 PALETA “PROCESAMIENTO Y SEÑALES DE TIEMPO”.

En esta paleta el usuario puede observar, en un principio, el avance en el proceso de la detección a través de tres barras de estado intermitentes o que se llenan según la tarea que se esté ejecutando en algún momento. Estas son:

- Estado Lectura de Datos. (Intermitente)
- Estado Envío de Datos. (Llenado)
- Estado Creación de Reporte. (Intermitente)

Durante y una vez terminadas estas etapas, se escribe mensajes al usuario describiendo el estado de la tarea.

Una vez que se ha terminado de adquirir las señales, en la parte inferior se muestra las formas de onda de voltaje y corriente en el dominio del tiempo.

La paleta se muestra en la Figura C.5.

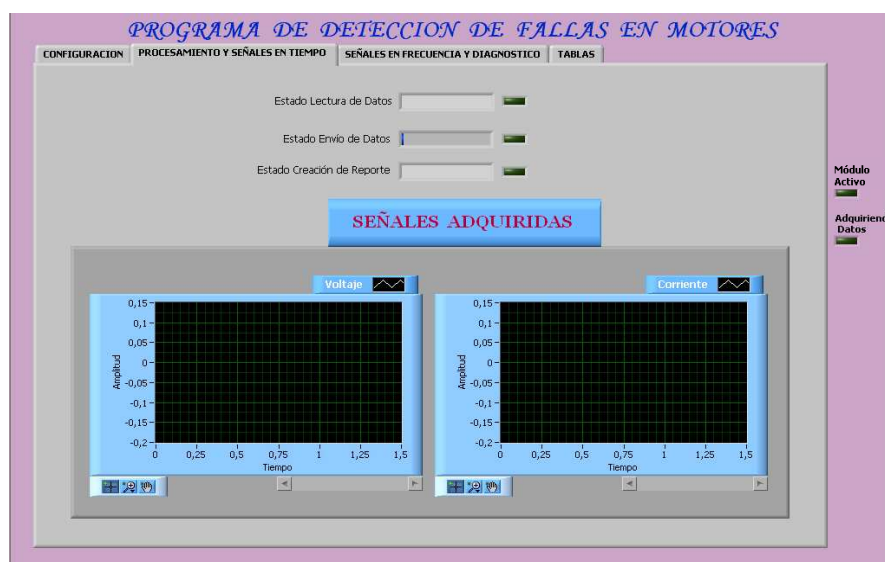


Figura C.5. Pantalla “Procesamiento y Señales en Tiempo”.

C.2.3 PALETA “SEÑALES DE FRECUENCIA Y DIAGNÓSTICO”.

Aquí se muestran las formas de onda de corriente y voltaje en el dominio de la frecuencia en un rango óptimo para la visualización de las frecuencias de interés (0-150Hz en donde con seguridad se ubicarán los picos de interés), pero se tiene también la opción de revisar el espectro en frecuencias superiores a los 150 Hz a través de una barra de desplazamiento en cada visualizador.

En la parte inferior de ésta paleta se muestra el diagnóstico y la recomendación para el motor evaluado.

La paleta se muestra en la Figura C.6.



C.2.4 PALETA “TABLAS”.

Aquí se encuentran las tablas con todos los datos del arreglo de tiempo con sus respectivos valores de voltaje y corriente y lo propio para el dominio de la frecuencia.

Ésta paleta permite al usuario de una manera ágil y rápida encontrar los valores exactos de amplitud correspondientes para cierto tiempo o frecuencia, de manera que puedan ser utilizados para un eventual cálculo de revisión para constatar que el programa está haciendo lo correcto.

La paleta “Tablas” se muestra en la Figura C.7.



Figura C.7. Pantalla “Tablas”.

C.2.5 PARO DE EMERGENCIA.

El “Paro de Emergencia” aparece y es accesible únicamente cuando se está ejecutando la detección y a la vez, bloquea cualquier acceso al resto de las pantallas. Al instante de presionar este botón, se detiene la DAQ, y se detiene cualquier tarea ejecutada por LabVIEW.

Este botón, que cuando aparece lo hace en la parte superior derecha de la pantalla, se muestra en la Figura C.8.



Figura C.8. Función paro de emergencia.

Finalmente, fuera de las paletas en el extremo superior derecho, se tiene dos indicadores del proceso que son un reflejo de los indicadores del módulo de acondicionamiento y control.

C.3. EJECUCIÓN

El procedimiento para ejecutar un diagnóstico correctamente es el siguiente:

- Configurar el módulo de acondicionamiento y control, de acuerdo a lo descrito en la Sección C1.1.
- Configurar todos los parámetros de la paleta “Configuración”
- Una vez que todo el sistema se encuentre configurado para la prueba, basta abrazar con la pinza a una de las líneas de alimentación al motor a ser evaluado para proceder a hacer el diagnóstico.
- Hacer clic sobre el botón “Iniciar”.

- **Revisar el diagnóstico, datos almacenados o informes generados automáticamente.**

ANEXO D

“Lista de Motores Trifásicos de Inducción Comerciales” [19]

Velocidad 1800 rpm (4 polos)															
Código Actual	Código Antiguo	Tipo	Frame IEC	HP	KW	F.S.	In a		rpm	Eficiencia η %	Torque nominal Nm	Momento de inercia Kg m ²	Torque de arranque de Tn	Intensidad como fac. de In	Peso aprox. kg
							220 V Amp.	440 V Amp.							
01108	836440	1LA7 070-4YC60	71	0.40	0.29	1.05	1.6	0.80	1640	66.0	1.74	0.0006	1.8	2.8	4.7
01109	836472	1LA7 070-4YA60	71	0.50	0.37	1.15	1.9	0.95	1590	66.0	2.20	0.0006	1.3	2.7	5.5
01110	836460	1LA7 071-4YA60	71	0.60	0.45	1.05	2.2	1.10	1645	69.0	2.60	0.0008	1.8	3.4	6.0
01111	836473	1LA7 073-4YA60	71	0.75	0.56	1.15	2.9	1.45	1650	65.0	3.30	0.0008	1.9	3.7	6.0
01112	836490	1LA7 080-4YC60	80	0.90	0.67	1.05	3.1	1.55	1675	68.0	3.83	0.0015	2.3	4.4	8.1
01113	836474	1LA7 080-4YA60	80	1.00	0.75	1.15	3.5	1.75	1660	69.2	4.29	0.0015	1.9	3.7	8.1
01114	836401	1LA7 081-4YA60	80	1.20	0.90	1.05	4.0	2.00	1675	70.0	5.10	0.0018	2.2	3.7	9.3
01115	836476	1LA7 083-4YA60	80	1.50	1.12	1.15	5.0	2.5	1650	72.0	6.48	0.0018	1.8	3.0	9.3
01116	836402	1LA7 090-4YC60	90	1.80	1.34	1.05	6.4	3.2	1700	77.0	7.54	0.0028	2.4	5.2	11.9
01117	836478	1LA7 090-4YA60	90	2.00	1.50	1.15	7.0	3.5	1700	77.0	8.38	0.0028	2.2	4.4	12.1
01118	836403	1LA7 094-4YA60	90	2.40	1.79	1.05	7.4	3.7	1690	77.0	10.12	0.0035	2.0	4.5	14.9
01119	836479	1LA7 096-4YA60	90	3.00	2.20	1.15	9.6	4.8	1708	79.0	12.51	0.0035	1.8	3.6	14.9
01120	836404	1LA7 111-4YA60	112	4.00	3.00	1.15	13.0	6.5	1750	76.3	16.28	0.0048	2.2	5.6	27.1
01121	836406	1LA7 112-4YA60	112	5.00	3.73	1.15	15.8	7.9	1750	80.5	20.36	0.0058	2.3	6.5	28.7
01122	836407	1LA7 113-4YA60	112	6.60	4.92	1.05	19.6	9.8	1745	78.0	26.95	0.011	2.0	6.0	31.0
01123	836483	1LA7 114-4YA60	112	7.50	5.60	1.15	23.2	11.6	1740	80.0	30.71	0.011	2.2	5.6	32.7
01124	836484	1LA7 131-4YA70	132S/M	10.00	7.50	1.15	28.8	14.4	1750	81.0	41.50	0.018	2.3	6.0	46.5
01125	836412	1LA7 133-4YA70	132S/M	12.00	9.00	1.05	34.0	17.0	1750	81.2	49.50	0.024	2.5	6.6	49.0
01126	836485	1LA7 134-4YA70	132S/M	15.00	11.2	1.15	43.0	21.5	1750	82.5	62.00	0.024	1.8	5.0	62.0
01127	836486	1LA5 164-4YB70	160 M/L	20.00	14.9	1.15	53.0	26.5	1760	85.0	80.96	0.040	1.8	6.3	77.5
01128	836487	1LA5 167-4YC70	160 M/L	25.00	18.7	1.15	64.0	32.0	1755	89.0	101.5	0.052	1.8	5.4	85.5
Motores de alta eficiencia (Eficiencias superiores a E- P Act.)															
01129	856431	1LA4 183-4YA80	180M	30	22.4	1.05	78	39.0	1755	90.7	121.8	0.13	2.0	4.9	170
01130	856436	1LA4 186-4YA80	180L	36	26.8	1.05	93	46.5	1760	91.3	146.7	0.15	2.8	6.8	190
01131	856440	1LA4 187-4YA80	180L	40	29.8	1.05	104	52.0	1750	91.3	162.8	0.15	2.0	5.6	190
01132	856448	1LA4 207-4YC80	200L	50	37.3	1.15	126	63.0	1760	91.3	202.4	0.24	2.7	6.8	250
01133	856450	1LA6 220-4YA80	225S	60	44.5	1.15	148	74.0	1765	96.2	242.2	0.44	2.7	6.6	314
01134	856475	1LA6 224-4YC80	225M	75	56.0	1.15	188	94.0	1780	92.7	300.2	0.52	2.0	5.1	321
26697	843475	1LA6 258-4BA90-Z	250M	100	75.0	1.20	240	120.0	1780	94.0	402	0.79	2.7	7.1	495
26698	843410	1LA6 280-4BA90-Z	280S	125	93.0	1.05	290	145.0	1785	94.7	482	1.4	2.3	6.2	610
26699	843412	1LA6 283-4BA90-Z	280M	150	112.0	1.00	355	177.5	1785	94.9	589	1.6	2.7	7.4	660
26700	843418	1LA6 310-4AA60	315S	185	138.0	1.00	-	222.2	1783	94.8	707	2.2	2.5	6.7	830
26701	843420	1LA6 313-4AA60	315M	225	168.0	1.00	-	265.2	1783	95.5	848	2.7	2.7	7.2	910
26702	843425	1LA6 316-4AA90-Z	315L	275	205.0	1.10	-	323.1	1783	95.6	1030	3.2	2.6	7.0	1060
26703	843430	1LA6 317-4AA90-Z	315L	350	261.0	1.10	-	409.5	1785	96.2	1280	4.2	2.7	7.0	1200

ANEXO E

“Lista de Motores Monofásicos de Inducción Comerciales”

[18]

HP	I a 115V (A)	I a 230V (A)
1/6	4.4	2.2
1/4	5.8	2.9
1/3	7.2	3.6
1/2	9.8	4.9
3/4	13.8	6.9
1	16	8
1 1/2	20	10
2	24	12
3	34	17
5	56	28
7 1/2	80	40
10	100	50

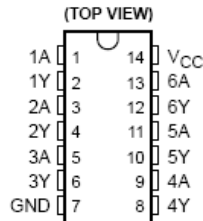
ANEXO F

“Especificaciones del Cambiador de Voltaje 70ls07”

SN5407, SN5417, SN7407, SN7417
HEX BUFFERS/DRIVERS
WITH OPEN-COLLECTOR HIGH-VOLTAGE OUTPUTS
SDLS032D – DECEMBER 1983 – REVISED AUGUST 2001

- Convert TTL Voltage Levels to MOS Levels
- High Sink-Current Capability
- Input Clamping Diodes Simplify System Design
- Open-Collector Driver for Indicator Lamps and Relays
- Inputs Fully Compatible With Most TTL Circuits

SN5407, SN5417 . . . J OR W PACKAGE
 SN7407 . . . D, N, OR NS PACKAGE
 SN7417 . . . D OR N PACKAGE



description

These TTL hex buffers/drivers feature high-voltage open-collector outputs for interfacing with high-level circuits (such as MOS) or for driving high-current loads (such as lamps or relays), and also are characterized for use as buffers for driving TTL inputs. The SN5407 and SN7407 have minimum breakdown voltages of 30 V, and the SN5417 and SN7417 have minimum breakdown voltages of 15 V. The maximum sink current is 30 mA for the SN5407 and SN5417 and 40 mA for the SN7407 and SN7417.

These devices perform Boolean function $Y = A$ in positive logic.

These circuits are completely compatible with most TTL families. Inputs are diode clamped to minimize transmission-line effects, which simplifies design. Typical power dissipation is 145 mW, and average propagation delay time is 14 ns.

ORDERING INFORMATION

TA	PACKAGE†	ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING	
0°C to 70°C	SOIC – D	Tube	SN7407D	
		Tape and reel	SN7407DR	
		Tube	SN7417D	
		Tape and reel	SN7417DR	
	PDIP – N	Tube	SN7407N	SN7407N
			SN7417N	SN7417N
SOP – NS	Tape and reel	SN7407NSR	SN7407	
–55°C to 125°C	CDIP – J	Tube	SNJ5407J	SNJ5407J
			SNJ5417J	SNJ5417J
	CFP – W	Tube	SNJ5407W	SNJ5407W
			SNJ5417W	SNJ5417W

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.

logic diagram, each buffer/driver (positive logic)



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

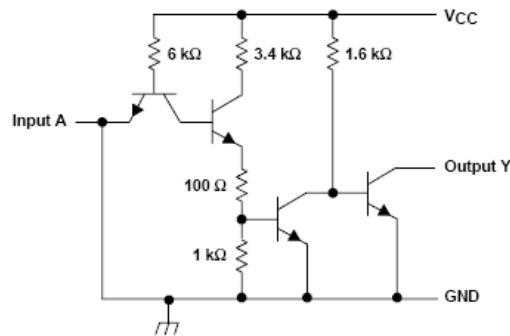


POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2001, Texas Instruments Incorporated
 On products compliant to ML-PRF-3853, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

SN5407, SN5417, SN7407, SN7417
HEX BUFFERS/DRIVERS
WITH OPEN-COLLECTOR HIGH-VOLTAGE OUTPUTS
SDLS032D – DECEMBER 1983 – REVISED AUGUST 2001

schematic



Resistor values shown are nominal.

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Supply voltage range, V_{CC}	0.5 V to 7 V
Input voltage range, V_I (see Note 1)	0.5 V to 5.5 V
Output voltage, V_O (see Notes 1 and 2): SN5407, SN7407	30 V
SN5417, SN7417	15 V
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Note 3): D package	86°C/W
N package	80°C/W
NS package	76°C/W
Storage temperature range, T_{stg}	-65°C to 150°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES: 1. All voltage values are with respect to GND.
 2. This is the maximum voltage that should be applied to any output when it is in the off state.
 3. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

recommended operating conditions

		MIN	NOM	MAX	UNIT		
V_{CC}	Supply voltage	SN5407, SN5417	4.5	5	5.5	V	
		SN7407, SN7417	4.75	5	5.25		
V_{IH}	High-level input voltage	2			V		
V_{IL}	Low-level input voltage				0.8	V	
V_{OH}	High-level output voltage	SN5407, SN7407			30	V	
		SN5417, SN7417			15		
I_{OL}	Low-level output current	SN5407, SN5417			30	mA	
		SN7407, SN7417			40		
T_A	Operating free-air temperature	SN5407, SN5417	-55			125	°C
		SN7407, SN7417	0			70	

SN5407, SN5417, SN7407, SN7417
HEX BUFFERS/DRIVERS
WITH OPEN-COLLECTOR HIGH-VOLTAGE OUTPUTS
SDLS032D – DECEMBER 1983 – REVISED AUGUST 2001

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†			MIN	TYP‡	MAX	UNIT
V_{IK}	$V_{CC} = \text{MIN}$,	$I_I = -12 \text{ mA}$				-1.5	V
I_{OH}	$V_{CC} = \text{MIN}$,	$V_{IH} = 2 \text{ V}$	$V_{OH} = 30 \text{ V}$ (SN5407, SN7407)			0.25	mA
			$V_{OH} = 15 \text{ V}$ (SN5417, SN7417)			0.25	
V_{OL}	$V_{CC} = \text{MIN}$,	$V_{IL} = 0.8 \text{ V}$	$I_{OL} = 16 \text{ mA}$			0.4	V
			$I_{OL} = 30 \text{ mA}$ (SN5407, SN5417)			0.7	
			$I_{OL} = 40 \text{ mA}$ (SN7407, SN7417)			0.7	
I_I	$V_{CC} = \text{MAX}$,	$V_I = 5.5 \text{ V}$				1	mA
I_{IH}	$V_{CC} = \text{MAX}$,	$V_{IH} = 2.4 \text{ V}$				40	μA
I_{IL}	$V_{CC} = \text{MAX}$,	$V_{IL} = 0.4 \text{ V}$				-1.6	mA
I_{CCH}	$V_{CC} = \text{MAX}$				29	41	mA
I_{CCL}	$V_{CC} = \text{MAX}$				21	30	mA

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values are at $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$.

switching characteristics, $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (see Figure 1)

PARAMETER	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_{PLH}	A	Y	$R_L = 110 \Omega$, $C_L = 15 \text{ pF}$		6	10	ns
t_{PHL}					20	30	
t_{PLH}	A	Y	$R_L = 150 \Omega$, $C_L = 50 \text{ pF}$			15	ns
t_{PHL}						26	

ANEXO G

**“Especificaciones de la Pinza Amperimétrica
80i-600A”**

INTRODUCTION

The Model 80i-600A is a clamp-on ac current probe designed to extend the current measuring capability of an ac current meter to 600 amperes. A clamp-on, 1000-turn coil designed into the probe allows measurements to be made without breaking the circuit under test. The coil serves as the secondary of a current transformer. The current carrying conductor being measured serves as the primary. Because of a high efficiency, quadrature type of winding used, wire size and the position of the wire within the probe jaws does not effect accuracy.

SPECIFICATIONS

Input Current Range: 1A to 600A

Output: 1 milliamp per ampere of input current (1mA/A)

Accuracy: $\pm 2\%$ of reading, 50 Hz to 1 kHz $\pm 3\%$ of reading (typical), 30 Hz to 50 Hz or 1 kHz to 10 kHz.

Working Voltage: 750V ac rms maximum

Maximum Conductor Size: 50.8 mm (2 inch.)

Shunt (load) Resistance: less than 12 Ω at multimeter input to maintain specified accuracy

Typical Bandwidth: -10% at 10 Hz and 50 kHz (1A, 400 Hz reference, excludes multimeter response)

Usable Current Range: 0.1A to 2000A, 5 seconds maximum above 600A

Safety: Protection Class Class II as defined in IEC 348 and ANSI C39.5

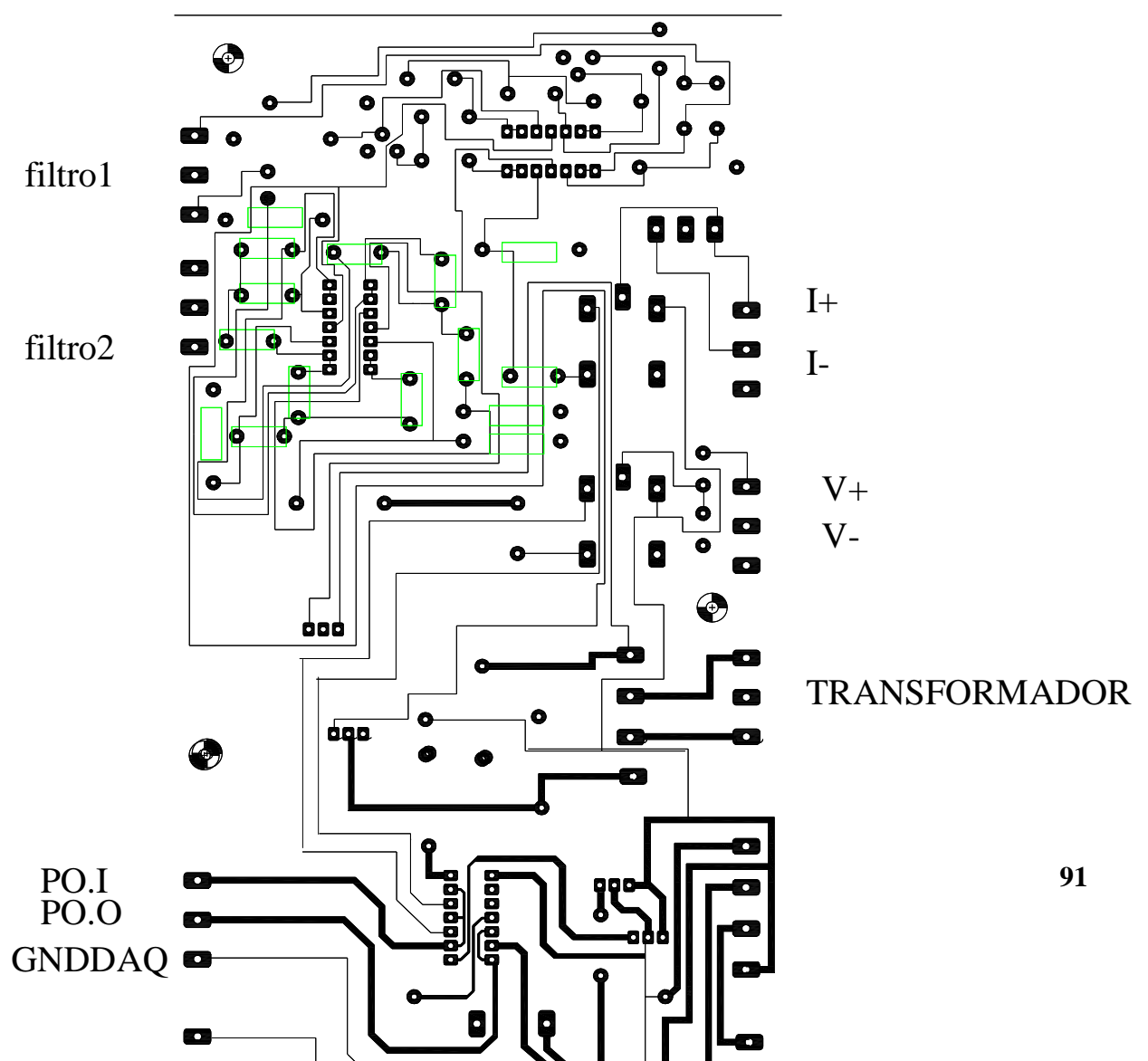
MULTIMETER COMPATIBILITY

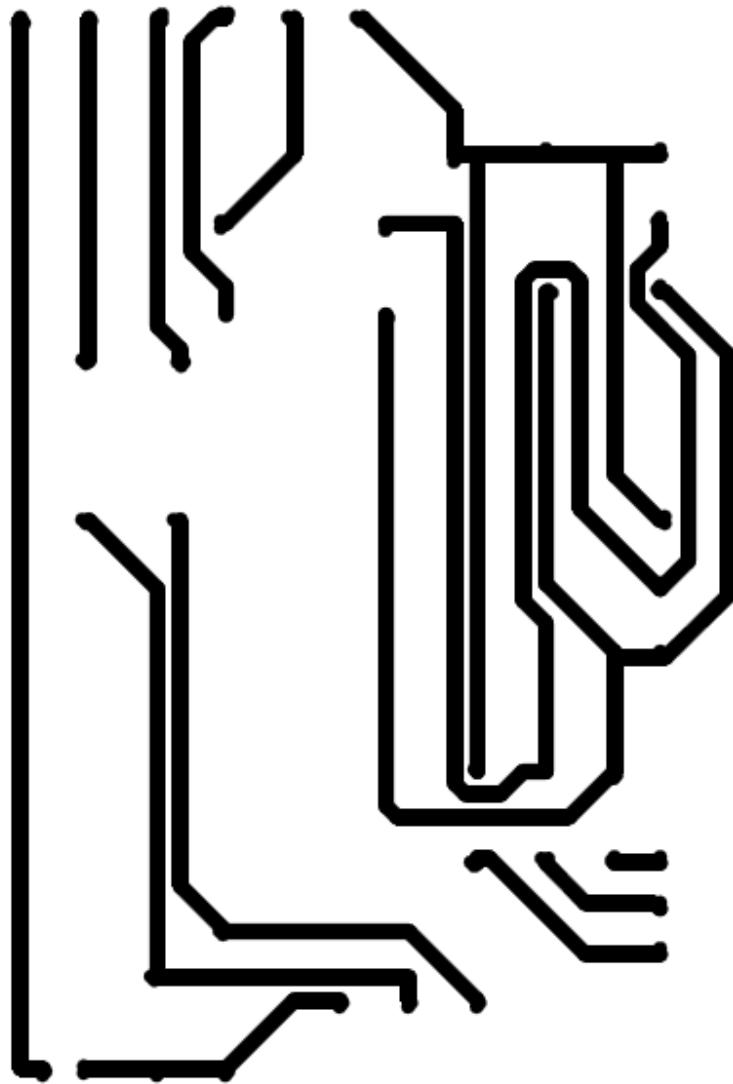
The 80i-600A is compatible with any multimeter capable of reading ac current equal to 1/1000 of the current to be measured. To take full advantage of the probe's accuracy, a multimeter ac current accuracy of $\pm 0.75\%$ or better is recommended. A voltmeter fitted with an external shunt will qualify as a suitable current meter. However, to ensure the probe's accuracy, the shunt (or multimeter input resistance in ac current) should be less than 12 Ω . This requirement is met on Fluke DMM's when using a current range of 20 mA or greater.

When making a measurement, the current-carrying conductor is not broken, and remains electrically isolated from the current meter input terminals. As a result, the current meter's INPUT LO or COM terminal may be either floated (isolated) or grounded.

ANEXO H

“Mapas Circuitales de Placas Eléctricas”





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] THOMSON, William; FENGER, Mark, **Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults**. IEEE Industry Applications Magazine, julio, 2001.
- [2] SHERVE, Dennis, **Integrated Condition Monitoring Technologies**. IRD Balancing LLC, 2003.
- [3] SIN, M.L.; SOONG, W.L.; ERTRUGUL N., **Induction Machine On-Line Condition Monitoring and Falut Diagnosis, a Survey**. Universidad de Adelaide, 2003.
- [4] PENROSE, Howard, **The multitechnology Approach to Motor Diagnosis**. BJM Corp, 2004.
- [5] PENROSE Howard, **Electronic Motor Diagnosis**. InfraMation Proceedings, 2004.
- [6] MANWILLER M., **Intelligent Accelerometers Enable Companies to Start a Predictive Maintenance Program Without Expert Vibration Knowledge**. IFM Efector inc, 2004.
- [7] **ElectriSCAN, Visual & Infrared Images of Electrical Switchgear**, 2004
- [8] CABALLERO, Hugo; HUERTAS José, **Diagnóstico de Motores Eléctricos Mediante Análisis Espectral de Corrientes**. National Instruments. Obtenido en línea el 14 de noviembre de 2005. Disponible en:
<http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/2A956D9E0014381886256B5F007AB6C2>
- [9] XU, Ming.; ALFORD Tom, **Motor Current Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis**. ENTEK IRD International Corporation. 1998.
- [10] HAYNES, H.D.; EISSENBERG, D.M., **Motor current signature analysis method for diagnosing motor operated devices**. Estados Unidos, Oct 23, 1990.
- [11] GRADIN, L.P.; CARTWRIGHT, W.B.; BURSTEIN N.M., **Test method improves motor bearing wear assessment at Calvert Cliffs**. Power Engineering, June 1994, pp 32-33.
- [12] PENROSE, Howard, **Applications for Motor Current Signature Analysis**, BJM Corp, Old Saybrook, 2004.
- [13] THOMSON, William; GILMOR, Ronald, **Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives - Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories**. Proceeding of the thirty-second turbomachinery symposium, 2003.

- [14] NANDI, Subhasis, TOLIYAT, Hamid, **Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines- a Review**. Texas A&M University, 1999.
- [15] THOMSON, William; FENGER, Mark, **Case Histories of Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives**, marzo 2003.
- [16] EL HACHEMI, Mohamed, **A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Fault Detection**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 47, No 5, Octubre, 2000.
- [17] FENGER, Mark; LLOYD, Blake, **Case Histories of Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives**. Iris Power Engineering Inc. Canadá, 2002.
- [18] KOSOW, Irving, **Máquinas eléctricas y transformadores**. Prentice Hall, segunda edición, México, 1993.
- [19] BOBINADOS ELECTROTECNISOL, **Motores Trifásicos de Inducción, Generalidades**. Venezuela, julio 2005.
- [20] KOON, William, **Nuevos Desarrollos en Sensores de Corriente en Medidores de Estado Solido**, Departamento Técnico, Tecnologías Unidas, Tecun, Ltda. 2002.
- [21] PENAYO, Carlos, **Sensores y Actuadores. Capitulo 3**. México, 2004.
- [22] TAPIA, Luis, **Operación de Subestaciones**. Carrera de Ingeniería eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2005.
- [23] SCHRAFF, Fred, **Data Acquisition Systems**. IOTech Inc. 2005.
- [24] OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R.; BUCK, J., **Discrete-Time Signal Processing**. Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [25] PEREZ, Mauricio, **Diseño en Implementación de un Sistema para el Análisis Vibracional de una Bomba Centrífuga Corcoran en la planta de Cloro- Soda Cáustica de la empresa ProqQuimsa S.A. ESPE**. Sangolquí, noviembre 2003.
- [26] BAKER, Bonnie, **Anti-Aliasing Analog Filters for Data Acquisition Systems**, Microchip Technology Inc. 1999.
- [27] NATIONAL INSTRUMENTS, **LabVIEW Measurements Manual**. Abril, 2003.
- [28] NATIONAL INSTRUMENTS. **Field wiring and noise considerations for analog signals**. Imágenes obtenidas en línea el 11 de noviembre de 2005. Disponible en:

- <http://zone.ni.com/devzone.nsf/webcategories/99368070225FE073862567E6006C8DD7>
- [29] NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW Analysis concepts. 2004.
- [30] WIKIPEDIA. Electronic Linear Filters. Imagen obtenida en línea el 7 de septiembre de 2005. Disponible en:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5c/Electronic_linear_filters.svg/750px-Electronic_linear_filters.svg.png
- [31] MATHWORKS, Bessel Filters. Imagen Obtenida en línea el 7 de septiembre de 2005. Disponible en:
http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/signal/bessel_p.gif
- [32] KIM, K., PARLOS, G, Methods of motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing. IEE/ASME Trans. On Mechatronics, vol 7, no 02 jun.2002.
- [33] NATIONAL INSTRUMENTS. “Joint Time-Frequency Analysis (JTFA) Overview”. Obtenido en línea el 17 de noviembre de 2005. Disponible en:
<http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/0A3D35A85FC7D2EA862568D2004A966F>
- [34] EQUIPMENTHEALTH “Motor Current Signature Analysis” Obtenido en línea el 25 de abril de 2006. Disponible en:
<http://equipmenthealth.com/mcsa.htm>
- [35] GILLBLAD, Daniel; KREUGER, Per; LEVIN, Björn; RUDSTRÖM, Asa, Preparation and Analysis of multiple source industrial precess data. SISC Technical Report. Septiembre, 2005.
- [36] HERRERA, Nelson, Diseño e Implementación de un Sistema Prototipo SCADA de Monitoreo y Control de un Proceso Industrial a Través de una Red de Computadores TCP/IP, Apoyados en LabVIEW y PID, Supervisory Control ModuleToolkits de LabVIEW. Escuela Politécnica Nacional. Quito, junio, 2006.
- [37] PILLAY, P.; XU, Z., “Motor Current Signature Analysis”. IDM Controls, Georgia. 1996.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y TÉRMINOS IMPORTANTES.

- **A/D. Conversión o variables Analógico / Digitales.**
- **ADC. Conversor Analógico Digital.**
- ***Aliasing.* Solapamiento de espectros de frecuencia. Aparece cuando se muestrea una onda a una frecuencia mayor que la mitad de la propia.**
- **ARMA. *Autoregressive moving-average.* Promedio desplazante recursivo.**
- **BCD. *Binary Coded Decimal.* Representación de un número mediante codificación binaria.**
- **CBM. *Condition-based maintenance.* Mantenimiento Basado en la Condición.**
- **DAQ. *Data Acquisition Card.* Tarjeta de adquisición de datos.**
- **DCS. *Distributed Control System.* Sistemas de control distribuido.**
- **DFT. *Discrete Fourier Transform.* Versión discreta de la transformada de Fourier.**
- **DIAdem. Software para manejar, analizar y generar reportes de datos recolectados durante una adquisición de datos o alguna simulación.**
- **DMA. *Direct memory access.* Acceso directo a memoria.**
- **DSN. *Data Source Name.* Nombre de Fuente de Datos utilizado para acceder a bases de datos a través del ODBC.**
- **DSP. *Digital Signal Processing.* Procesamiento de Señales Digitales.**
- **E/S Entrada/Salida.**
- **FFT *Fast Fourier Transform.* Transformada rápida de Fourier. Algoritmo numérico para la implementación de la DFT.**
- ***Filterlab.* Software de *Microchip* para el diseño de filtros analógicos.**
- **FIR. Filtro de respuesta impulsiva finita.**
- ***Firewire.* Estándar multiplataforma que sirve para la entrada y salida de datos en serie a alta velocidad. También llamado IEEE 1394.**
- **IC. *Integrated circuit.* Circuito Integrado.**
- **IIR. Filtro de respuesta impulsiva infinita.**

- IEEE. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos que se dedica a la estandarización.
- ISA. *Industry Standard Architecture*. Arquitectura Estándar Industrial.
- LabVIEW. *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*. Software de programación en lenguaje G en la que se ha desarrollado el proyecto.
- Mapa de E/S provee direcciones de locación que el procesador usa para obtener acceso directo a un dispositivo según la necesidad de un programa.
- MCSA. *Motor Current Signature Analysis*. Análisis Espectral de corrientes de motor.
- NI. *National Instruments*.
- ODBC. *Open DataBase Connectivity*. Acceso estándar a bases de datos.
- ORCAD Pspice. Software para dibujo y simulación de circuitos electricos.
- PC. *Power Computer*. Computador Personal.
- PCI. *Peripheral Component Interconnect*. Interconexión de Componentes Periféricos.
- PCMCIA. *Peripheral Component Microchannel Interconnect Architecture*. Arquitectura de interconexión por microcanales de componente perifericos.
- PDA. *Personal Digital Assistant*, Ayudante personal digital.
- PDF. *Probability density function*. Función de densidad de probabilidad.
- pdf. Extensión de archivos con formato de documento portátil.
- *Plug-and-Play*. Dispositivo que se conecta a un Puerto, se instala automáticamente y está listo para utilizar.
- *Plug-in*. Conectar un dispositivo.
- RBM. *Reliability-based maintenance*. Mantenimiento basado en fiabilidad.
- RMS. *Root Mean Square*. Raiz Cuadrática media.
- SCADA. *Supervisory Control and Data Acquisition*. Control Supervisado y adquisición de datos.
- *Slot*. Ranura en donde se insertan las tarjetas PCI.
- SNR. *Signal to noise Ratio*. Relación señal a ruido.
- SQNR. *Signal to Quantization Noise Ratio*. Relación Señal a Ruido de Cuantización.
- USB. *Universal Serial Bus*. Bus Serial Universal.
- USB-6009 Modelo de la Tarjeta de adquisición usada para la implementación del proyecto.