

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN DISEÑO
PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

DANNY ALEXANDER SOTOMAYOR CARDENAS
dasotomayor@espe.edu.ec

SANTIAGO DAVID CASTELLANOS VILLA
sdcastellanos@espe.edu.ec

DIRECTOR: MSc. OSCAR IVAN ZAMBRANO OREJUELA
ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, Marzo-2016

DECLARACIÓN

Yo Danny Alexander Sotomayor Cárdenas, declaro 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.

Yo Santiago David Castellanos Villa, declaro 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.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**Danny Alexander Sotomayor
Cárdenas**

Santiago David Castellanos Villa

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Danny Alexander Sotomayor Cárdenas y Santiago David Castellanos Villa, bajo mi supervisión.

MSc. Iván Zambrano Orejuela

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo nos encontramos agradecidos con todos aquellos que colaboraron con su conocimiento y tiempo para el desarrollo de esta tesis, especialmente a la Escuela Politécnica Nacional por la apertura a la realización de esta tesis, a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por el apoyo económico, al grupo de investigación Wicom Energy y al Master Sr. Diego Gustavo Arcos Avilés, por permitirnos ser parte de este proyecto.

DEDICATORIA

Los autores de esta tesis dedicamos el presente trabajo a nuestras familias, a todos quienes nos apoyaron en la realización de este proyecto, y en especial a la universidad ecuatoriana que apuesta en la ciencia y la educación para el desarrollo de nuestra sociedad.

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”

Albert Einstein

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO	VI
LISTADO DE FIGURAS	IX
LISTADO DE TABLAS	XI
RESUMEN.....	XIII
PRESENTACIÓN	XIV
CAPITULO 1.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1 <i>Motores de inducción</i>	1
1.1.1 Estator.....	3
1.1.2 Rotor	5
1.1.3 Escudos.....	8
1.2 <i>Circuito equivalente de un motor de inducción</i>	8
1.3 <i>Banco de pruebas para obtención de datos experimentales</i>	13
1.4 <i>Tipos de fallas en motores de inducción</i>	15
1.4.1 Fallas eléctricas.....	16
1.4.2 Fallas mecánicas.....	18
1.4.3 Fallas en dispositivos externos.....	20
1.5 <i>Técnicas de detección de fallas</i>	22
1.5.1 Análisis de la corriente de alimentación.....	24
1.5.2 Análisis de la variación de la velocidad angular instantánea.....	31
1.5.3 Análisis de las vibraciones.....	34
1.5.4 Análisis de señal por Transformada de Fourier.....	35
CAPITULO 2.....	38
2. ANÁLISIS, ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	38
2.1 <i>Introducción</i>	38
2.2 <i>Requerimientos técnicos</i>	40
2.2.1 Casa de la calidad.....	42
2.2.2 Voz del usuario.....	42
2.2.3 Voz del ingeniero.....	42
2.2.4 Especificaciones técnicas.....	43

2.3	<i>Diseño conceptual</i>	45
2.3.1	Análisis funcional.....	45
2.3.2	Definición de módulos funcionales.....	48
2.3.3	Soluciones para cada módulo.....	48
2.4	<i>Matriz morfológica</i>	54
2.5	<i>Método de Selección</i>	56
2.5.1	Matriz de criterios ponderados.....	56
CAPITULO 3	60
3.	DISEÑO	60
3.1	<i>Diseño y selección del circuito de mando y potencia.</i>	61
3.1.1	Cálculo de los conductores.....	62
3.1.2	Cálculo del contactor.	63
3.1.3	Cálculo del guardamotor.....	64
3.1.4	Cálculo del generador.....	66
3.1.5	Cálculo del variador de velocidad.	68
3.2	<i>Diseño y selección del sistema de adquisición de datos.</i>	70
3.3	<i>Diseño de la Interface Hombre-Máquina.</i>	74
3.3.1	Funciones de la HMI.....	74
3.3.2	Criterios para el diseño de la HMI.....	75
3.3.3	Estrategias para el diseño de las interfaces.....	76
3.3.4	Implementación de la interfaz	76
3.4	<i>Diseño del módulo de componentes mecánicos</i>	78
3.4.1	Diseño de acople motor-generator.....	79
3.4.2	Diseño de la estructura soporte	83
CAPITULO 4	91
4.	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS	91
4.1	<i>Simulación de fallas por barras rotas</i>	91
4.1.1	Modelamiento matemático del motor de inducción.	91
4.1.2	Función para el cálculo de la matriz de inductancias	95
4.1.3	Función para el cálculo de las corrientes de estator y rotor.	96
4.1.4	Función para el cálculo del torque del motor de inducción.....	97
4.1.5	Función para el cálculo de la velocidad del motor de inducción.	99
4.1.6	Función para el cálculo del deslizamiento.....	100
4.1.7	Diagnóstico de falla por barras rotas en Simulink.	100
4.2	<i>Análisis por Método de Elementos Finitos de la estructura soporte.</i> ..	104
4.2.1	Creación de la geometría	104
4.2.2	Propiedades del material	104
4.2.3	Mallado.....	105
4.2.4	Condiciones de contorno	106
4.2.5	Procedimiento de análisis	108
4.2.6	Análisis de resultados.....	110

CAPITULO 5.....	112
5. PROTOCOLO DE PRUEBAS	112
5.1 <i>Formato de pruebas</i>	112
5.2 <i>Procedimiento Experimental</i>	116
5.2.1 Generación de la falla.....	117
5.2.2 Procedimiento de Montaje	118
5.3 <i>Análisis de Resultados</i>	121
CAPITULO 6.....	126
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
6.1 <i>Conclusiones</i>	126
6.2 <i>Recomendaciones</i>	129
CAPITULO 7.....	130
7. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS.....	130
7.1 <i>BIBLIOGRAFIA</i>	130
7.2 <i>ANEXOS</i>	133

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Motor trifásico tipo jaula de ardilla de última generación	1
Figura 1.2 Partes de un motor de inducción trifásico	2
Figura 1.3 Estator de motor de inducción trifásico	3
Figura 1.4 Conexiones del motor: a) Estrella b) Delta.	4
Figura 1.5 Distribución de bobinas para formar polos	5
Figura 1.6 Sentido de las corrientes en un motor de cuatro polos	5
Figura 1.7 Rotor de motor en corte	6
Figura 1.8 Campos magnéticos en barras de rotor	6
Figura 1.9 Corona y conductores de rotor	7
Figura 1.10 Esquema eléctrico equivalente de un rotor	7
Figura 1.11 Circuito equivalente de una fase del estator	9
Figura 1.12 Circuito equivalente para una fase del rotor	11
Figura 1.13 Circuito equivalente de una fase del motor trifásico de inducción.....	12
Figura 1.14 Bancos de pruebas para motores de inducción.....	14
Figura 1.15 Esquema de conexiones de un banco de pruebas para motores de inducción.....	15
Figura 1.16 Clasificación de daños en motores de inducción	16
Figura 1.17 Espectro de corriente de un motor de inducción a 50 Hz:	27
Figura 1.18 Diagrama eléctrico de un rotor: a) Sano b) Falla por barra rota	28
Figura 1.19 Señal estacionaria y espectro de frecuencia.	36
Figura 1.20 Explicación grafica de la transformada rápida de Fourier.	37
Figura 2.1 Diagrama de flujo para un sistema de detección de fallas.....	39
Figura 2.2 Esquema de general del banco de pruebas para detección de fallas en MI.....	40
Figura 2.3 Análisis funcional banco de prueba – Nivel 0.	45
Figura 2.4 Análisis funcional banco de prueba - Nivel 1.	46
Figura 2.5 Análisis funcional banco de prueba - Nivel 2.	47
Figura 2.6 Variador de frecuencia Schneider-Altivar 312.	49
Figura 2.7 Motor sincrónico de imanes permanentes.	50
Figura 2.8 Generador de DC – DEGEM 43.	51
Figura 2.9 Tarjetas de adquisición de datos.	52
Figura 2.10 Módulo de entradas analógicas NI.	52
Figura 2.11 PC de escritorio como controlador central.	53
Figura 2.12 Controlador en tiempo real – COMPAC RIO NI.....	54
Figura 3.1 Banco de pruebas para detección de fallas propuesto	60
Figura 3.2 Curva de carga de motores de inducción por número de polos.....	66
Figura 3.3 Diagrama esquemático del circuito.....	69
Figura 3.4 Diagrama P&ID del banco de pruebas.	70
Figura 3.5 Pantalla - Parámetros de prueba.....	77
Figura 3.6 Pantalla de análisis de falla - CORRIENTES Y TENSIONES.....	78
Figura 3.7 Pantalla de análisis de falla – ESPECTRO DE FALLA.....	78

Figura 4.1 Modelo propuesto para el motor de inducción trifásico	92
Figura 4.2 Función desarrollada para el cálculo de la matriz de inductancias.	96
Figura 4.3 Bloques para calcular las corrientes de estator y rotor.	97
Figura 4.4 Bloques para el cálculo del torque del motor de inducción.	98
Figura 4.5 Bloques de la función para el cálculo de la velocidad del motor.	99
Figura 4.6 Bloques para el cálculo del deslizamiento.	100
Figura 4.7 Análisis de corriente del estator simulada con par de carga y velocidad nominal.....	102
Figura 4.8 Simulación del espectro de la corriente del estator con par de carga y velocidad nominal.....	103
Figura 4.9 Características del mallado en estructura soporte	106
Figura 4.10 Fijaciones de la estructura soporte.....	107
Figura 4.11 Emplazamiento de cargas en estructura soporte.....	107
Figura 4.12 Esquema modular del análisis MEF en la plataforma Workbench del software ANSYS.	108
Figura 4.13 Deformación máxima de la estructura soporte.	109
Figura 4.14 Curva de la deformación máxima de la estructura en un rango de 0 a 150 Hz.....	110
Figura 5.1 Codificación de las matrices de datos.	116
Figura 5.2 Daños producidos en el rotor del motor:.....	117
Figura 5.3 Respuesta del controlador a variaciones de velocidad en tiempo real en modo automático.	120
Figura 5.4 Espectro de corriente en tiempo real para un motor sin fallas.	121
Figura 5.5 Espectro de corriente en tiempo real para un motor con fallas por barras rotas.	121
Figura 5.6 Análisis de la corriente del estator con par de carga y velocidad nominal para motor M09.....	122
Figura 5.7 Espectro de la corriente del estator con par de carga y velocidad nominal, para motor con fallas por barras rotas.....	123
Figura 5.8 Densidad espectral de potencia para el motor M09 con fallas por barras.	124
Figura 5.9 Caracterización de fallas por barras rotas:	125

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de fallas y tipos de señal para detectar fallas.....	23
Tabla 2.1 Especificaciones para el banco de pruebas.....	44
Tabla 2.2 Matriz morfológica.....	55
Tabla 2.3 Evaluación criterios.....	56
Tabla 2.4 Evaluación soluciones respecto a costo accesible.....	56
Tabla 2.5 Evaluación soluciones respecto a complejidad de circuitos de variación de carga.....	57
Tabla 2.6 Evaluación soluciones respecto a disponibilidad.....	57
Tabla 2.7 Conclusiones.....	57
Tabla 2.8 Evaluación criterios.....	58
Tabla 2.9 Evaluación soluciones respecto a inmunidad al ruido.....	58
Tabla 2.10 Evaluación soluciones respecto a velocidad de procesamiento.....	58
Tabla 2.11 Evaluación soluciones respecto a buena robustez.....	58
Tabla 2.12 Evaluación soluciones respecto a capacidad de memoria.....	58
Tabla 2.13 Conclusiones.....	59
Tabla 3.1 Datos técnicos para motores trifásicos del tipo jaula de ardilla.....	61
Tabla 3.2 Parámetros del motor considerados para el diseño del banco de pruebas.....	61
Tabla 3.3 Parámetros - Conductores, pulsadores y lámparas indicadoras.....	62
Tabla 3.4 Categorías de servicio para contactor.....	63
Tabla 3.5 Factor de potencia en base a la categoría de servicio.....	63
Tabla 3.6 Parámetros - contactor.....	64
Tabla 3.7 Curvas y tiempos de disparo de los relés térmicos.....	65
Tabla 3.8 Características técnicas - Guardamotor.....	66
Tabla 3.9 Características técnicas – Generador de DC.....	68
Tabla 3.10 Características técnicas – Variador de velocidad.....	69
Tabla 3.11 Identificación de los instrumentos del banco de pruebas.....	71
Tabla 3.12 Características de las señales del diagrama P&ID.....	71
Tabla 3.13 Características técnicas – Módulo de entradas analógicas.....	72
Tabla 3.14 Características técnicas – Módulo de entradas analógicas trifásicas.....	72
Tabla 3.15 Características técnicas – Módulo de salidas analógicas.....	73
Tabla 3.16 Características técnicas Modulo 3 – Punta amperimétrica.....	73
Tabla 3.17 Características técnicas – Estación de procesamiento central.....	73
Tabla 3.18. Elementos y cargas presentes en estructura Soporte de equipo.....	85
Tabla 3.19. Elementos y cargas presentes en estructura Soporte de equipo.....	85
Tabla 3.20. Propiedades y sección de perfil para rieles superiores.....	87
Tabla 3.21. Propiedades Mecánicas del Electrodo E6011.....	89
Tabla 4.1 Parámetros eléctricos de la máquina de inducción de 1 Hp, 220 V YY/ 440V YΔ.....	101
Tabla 4.2 Propiedades del Material.....	105
Tabla 4.3 Modos y frecuencias naturales de la estructura soporte.....	109

Tabla 4.4 Frecuencias naturales y amplitudes de la estructura soporte.	110
Tabla 5.1 Especificaciones del motor.....	112
Tabla 5.2 Modelo y serie de los motores de inducción.	113
Tabla 5.3 Tipos de falla.	113
Tabla 5.4 Número de barras por motor generadas.....	114
Tabla 5.5 Parámetros de prueba.....	114
Tabla 5.6 Niveles de carga.....	115
Tabla 5.7 Velocidades de funcionamiento establecidas para pruebas de carga.	115
Tabla 5.8 Parámetros de adquisición de datos MCSA.	120

RESUMEN

En este proyecto se aborda el estudio teórico, el diseño, la construcción, y el funcionamiento de un banco de pruebas para motores de inducción trifásicos. El banco utiliza la técnica del análisis de la corriente (MCSA), para detectar fallas por cortocircuito del estator, barras rotas del rotor, excentricidad y rodamientos. Los armónicos de falla que aparecen en la corriente del estator, son medidos a través de sensores de efecto hall y conversores análogo-digitales de 24 bits con una frecuencia de muestreo de 25 KHz en cada una de las fases.

El banco puede someter motores de inducción de 1 Hp a diferentes regímenes de funcionamiento pudiendo variar la velocidad y la carga aplicada al motor, para lo cual consta de: un generador de DC de 1.6 Kw con alimentación independiente, dos cargas resistivas, un variador de frecuencia y un sistema de adquisición de datos que permite el almacenamiento, procesamiento y monitoreo en tiempo real, de los patrones de falla.

Para validar el funcionamiento se realiza la simulación matemática de fallas por barras rotas en base a la matriz de resistencias del motor, y luego se contrasta con los resultados experimentales de tres motores a los cuáles se les ha producido un daño de una, dos y tres barras rotas. El monitoreo se realiza en tiempo real a través de la Interfaz Hombre-Máquina desarrollada en LabView bajo criterios de diseño de la guía GEDIS, obteniendo matrices de datos de hasta 600000 muestras con diferentes parámetros de funcionamiento, que luego servirán para aplicar algoritmos de detección y clasificación de señales.

PRESENTACIÓN

La utilización de los motores de inducción en la industria es muy común, debido a que este tipo de motores presentan un gran desempeño, buena resistencia y relativamente un costo moderado en comparación a otras máquinas eléctricas. Por esta razón se hace importante supervisar, diagnosticar y controlar su funcionamiento desarrollando aplicaciones que permitan detectar anomalías antes de que estas produzcan daños a los equipos o al sistema, y peor aún accidentes laborales. Para el análisis de estas fallas por métodos no intrusivos, el grupo de investigación Wicom Energy de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en su afán por lograr un IMPACTO CIENTÍFICO Y SOCIAL por medio de publicaciones internacionales, plantea los requerimientos y especificaciones básicas en las cuales se ha sustentado los objetivos para el diseño e implementación del banco de pruebas para motores de inducción trifásicos. El trabajo se estructura en cinco capítulos los cuales se detallan a continuación:

En el capítulo 1 se describen los conceptos generales de los motores de inducción trifásica, características de los bancos de prueba comerciales, los tipos de fallas que se pueden presentar y finalmente las técnicas de detección de fallas que se utilizan más frecuentemente.

En el capítulo 2 se presentan las especificaciones técnicas con la ayuda de la casa de la calidad, para luego realizar un análisis de alternativas, seleccionando la mejor opción entre varias mediante el método ordinal de residuos ponderados.

En el capítulo 3 se realiza el dimensionamiento del circuito de mando y potencia, la selección del sistema de adquisición de datos, el diseño de la interface Hombre-Máquina y de los componentes mecánicos.

En el capítulo 4 se presenta la simulación de fallas por barras rotas y el análisis de la estructura mecánica por el método de elementos finitos.

En el capítulo 5 se concluye con el diseño del protocolo de pruebas y la evaluación de los resultados experimentales obtenidos en motores con fallas por barras rotas del rotor.

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Motores de inducción

Un motor eléctrico de inducción es una máquina que transforma la energía eléctrica con la que se alimenta, en energía mecánica de forma rotativa. Estos motores usan corriente alterna y también son conocidos como motores asíncronos, con alimentación monofásica y trifásica (Chapman, 2000).

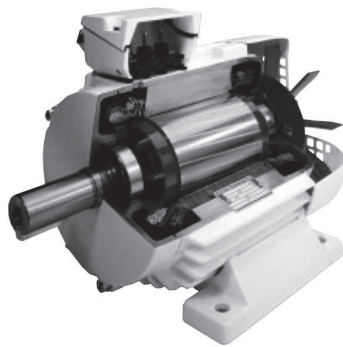


Figura 1.1 Motor trifásico tipo jaula de ardilla de última generación (Rockwell Automation, 1996).

En la Figura 1.1, se tiene un motor trifásico tipo jaula de ardilla de última generación, que está siendo ampliamente utilizado en la industria debido a que es fácil de usar, no necesita un mantenimiento excesivo, su fabricación es simple y su costo es relativamente bajo.

Son aptos para aquellos requerimientos en los cuáles no se necesita mantener una velocidad constante, ya que este tipo de motores disminuye ligeramente su velocidad con el aumento de la carga en su eje.

En la Figura 1.2 se tiene las partes constitutivas de un motor trifásico tipo jaula de ardilla, donde se puede observar tres componentes principales como lo son:

- Estator.
- Rotor.
- Escudos (tapas).

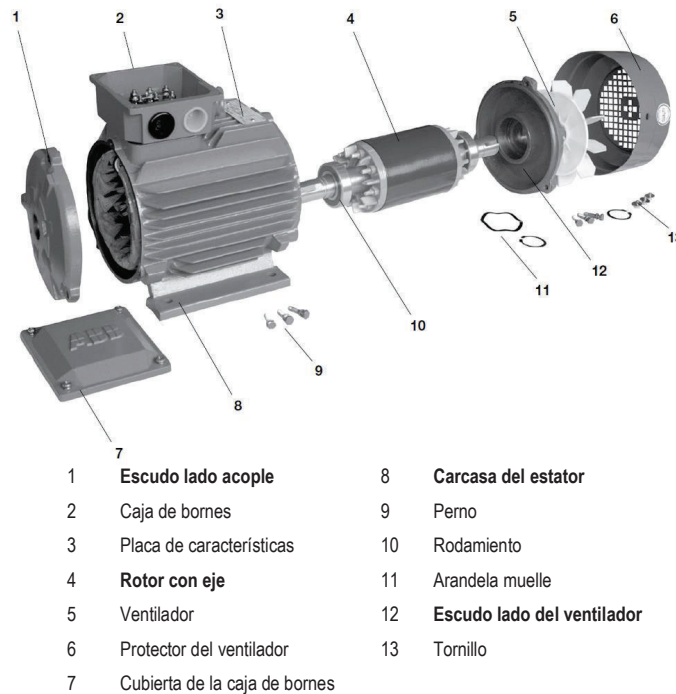


Figura 1.2 Partes de un motor de inducción trifásico
(ABB LV Motors, 2008)

Este motor toma el nombre de asíncrono ya que la parte móvil gira a una velocidad distinta a la de sincronismo (Guzmán Rodríguez, Serrano Salazar, & Bustos Román, 2002). Esta velocidad de sincronismo viene dada por la ecuación (1.1).

$$N = \frac{60 \times f}{p} \quad (1.1)$$

Dónde:

N = Número de revoluciones de giro por minuto.

f = Frecuencia de la red eléctrica

p = Número de pares de polos magnéticos

Las bobinas alojadas en las ranuras estatóricas están conectadas para formar tres arrollamientos independientes, estando distribuidos y unidos entre sí de tal manera que, al aplicar a sus terminales una tensión de alimentación trifásica, se genera un campo magnético en el interior del estator que actúa con las corrientes inducidas en el circuito del rotor, obligándolo a girar a determinada velocidad.

Dentro del estator, el rotor únicamente tiene la posibilidad de girar en forma rotacional, y considerando que se tiene un campo electromagnético de módulo fijo girando a su alrededor, se produce un flujo magnético que varía en función del tiempo, lo cual da origen a una fuerza electromotriz inducida, constituyendo su principio de funcionamiento (Chapman, 2000).

Las características básicas que se debe tomar en cuenta en un motor de inducción, son los datos nominales que vienen expresados en su placa, que corresponden a datos constructivos y técnicos (Guzmán Rodríguez, Serrano Salazar, & Bustos Román, 2002) (Baisón Santiago, 2010). Los datos constructivos son los datos de control y de identificación del motor, mientras que los datos técnicos indican los parámetros de funcionamiento a plena carga como: potencia, tensión, frecuencia de la red de alimentación, intensidad de corriente que absorbe, factor de potencia y en ocasiones el rendimiento.

1.1.1 Estator

El estator de un motor trifásico de inducción consiste en una carcasa de fundición, un núcleo por láminas magnéticas y un arrollamiento constituido por bobinas individuales alojadas en ranuras del núcleo (Guzmán Rodríguez, Serrano Salazar, & Bustos Román, 2002).

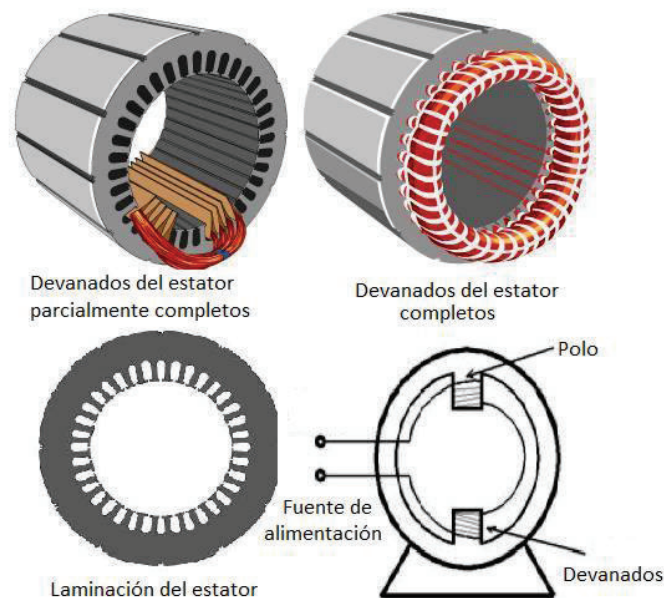


Figura 1.3 Estator de motor de inducción trifásico (Electrical Knowhow, 2013 Electrical Knowhow).

El circuito eléctrico está compuesto por tres bobinas, alimentadas por un sistema trifásico de corrientes, dando origen a un campo magnético giratorio de módulo constante que gira a la velocidad de sincronismo (Meaton, 1991), formado por láminas de chapas magnéticas apiladas y aisladas entre sí como se observa en la Figura 1.3. La mayoría de motores trifásicos están provistos de un arrollamiento estático de doble capa, con igual número de bobinas que de ranuras. Las bobinas se distribuyen y forman a tres arrollamientos independientes llamados fases, con el mismo número de bobinas por fase, cuya designación generalmente utiliza las letras A, B y C. Por lo tanto para determinar el número de bobinas por fase, se divide el total de bobinas estáticas entre el número de fases del motor.

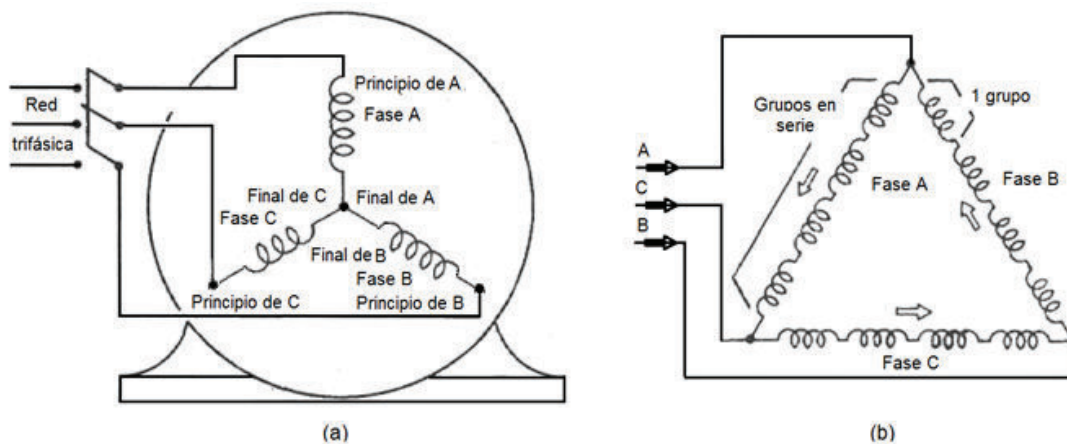


Figura 1.4 Conexiones del motor: a) Estrella b) Delta.
(Guzmán Rodríguez, Serrano Salazar, & Bustos Román, 2002).

El devanado del estator trifásico puede estar conectado en delta o estrella, estando sus tres fases separadas 120° (Guzmán Rodríguez, Serrano Salazar, & Bustos Román, 2002). En la conexión en estrella, los bornes finales de las fases están unidos a un punto común, mientras que los bornes del inicio de fase se conectan a una de las líneas de tensión trifásica como se muestra en la Figura 1.4a.

Para una conexión en delta o triángulo, el borne final de cada fase está unido al borne inicial de la siguiente, como se muestra en la Figura 1.4b. El final de la fase A, se une al inicio de la fase B, el final de la fase B al inicio de la fase C y el final de la fase C al inicio de la fase A, teniendo una conexión hacia la red, desde cada punto de unión o vértice.

En el estator, las bobinas pueden estar conectadas para formar un determinado número de polos del motor, como se muestra en la Figura 1.5.

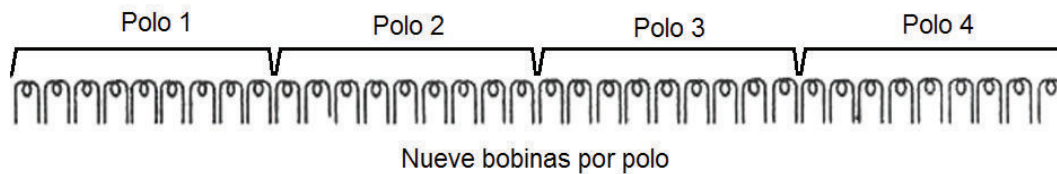


Figura 1.5 Distribución de bobinas para formar polos
(Guzmán Rodríguez, Serrano Salazar, & Bustos Román, 2002).

Si se toma un estator, de forma tal que cada fase esté conformada por dos bobinas en serie, las cuales tienen su eje magnético en la misma dirección y ocupan dos ranuras cada una, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.6, se obtiene un campo magnético rotante de cuatro polos, en donde por cada ciclo que cumplen las corrientes, el campo gira media vuelta, obteniéndose corrientes entrantes positivas I_R , I_S e I_T en cada una de las fases.

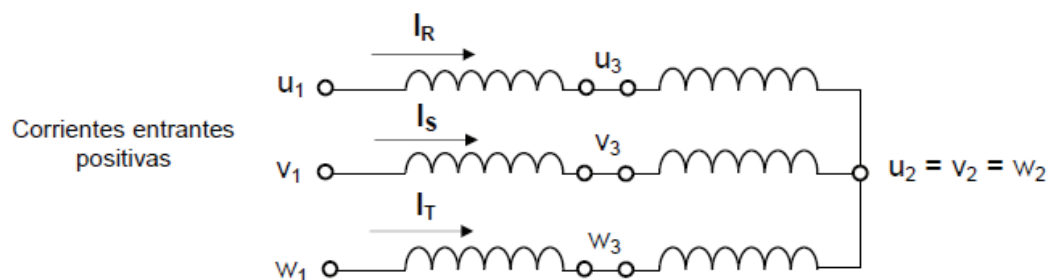


Figura 1.6 Sentido de las corrientes en un motor de cuatro polos
(Pimienta Dueñas, 2007).

1.1.2 Rotor

El rotor está compuesto por láminas de chapas magnéticas apiladas en forma de cilindro y aisladas entre sí, para eliminar el magnetismo remanente, como se muestra en la Figura 1.7 (Guzmán Rodríguez, Serrano Salazar, & Bustos Román, 2002) (Guerrero Pérez, 2011).

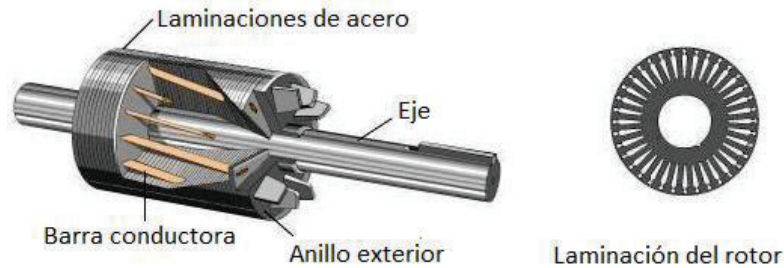


Figura 1.7 Rotor de motor en corte
(Electrical Knowhow, 2013 Electrical Knowhow)

El eje se encuentra apoyado en rodamientos. Este se extiende longitudinalmente hacia un extremo para acoplarse a la carga y transmitir el movimiento giratorio, mientras que hacia el otro extremo se acopla con un ventilador que sirve para forzar la circulación de aire a través del estator.

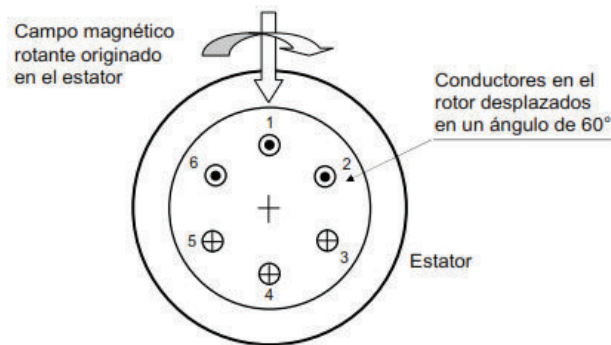


Figura 1.8 Campos magnéticos en barras de rotor
(Chapman, 2000)

El rotor del motor puede contar con ranuras superficiales que sirven para colocar el bobinado inducido en el caso de motores de rotor bobinado o incorporar conductores soldados a anillos en los extremos del cilindro, conocido también como jaula de ardilla.

El rotor tiene barras paralelas al eje principal que tienen fuerzas electromotrices inducidas, cuyo valor depende de la magnitud de la inducción magnética, de la longitud de los conductores y de la velocidad con que el campo magnético pasa frente al conductor analizado. La Figura 1.8 representa un rotor con seis conductores, en donde las fuerzas electromotrices inducidas en los mismos son de igual módulo pero desfasadas entre sí 60° (Chapman, 2000).

De acuerdo a la posición del campo magnético en ese instante, las fuerzas electromotrices son salientes en los conductores superiores y entrantes en los inferiores, con los extremos anteriores y posteriores de los conductores unidos mediante una corona, tal como se muestra en la Figura 1.9. Aquí circula una corriente que depende de la impedancia que presente dicho conductor.

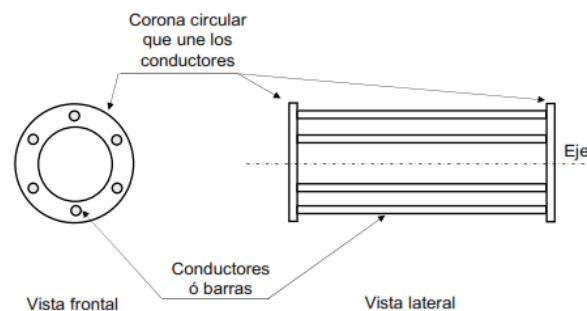


Figura 1.9 Corona y conductores de rotor
(Chapman, 2000)

Las corrientes circulan por los conductores y concurren a un nodo que físicamente son los aros que unen las barras, siendo la suma de las mismas igual a cero. En la Figura 1.10 se plantea el esquema eléctrico equivalente.

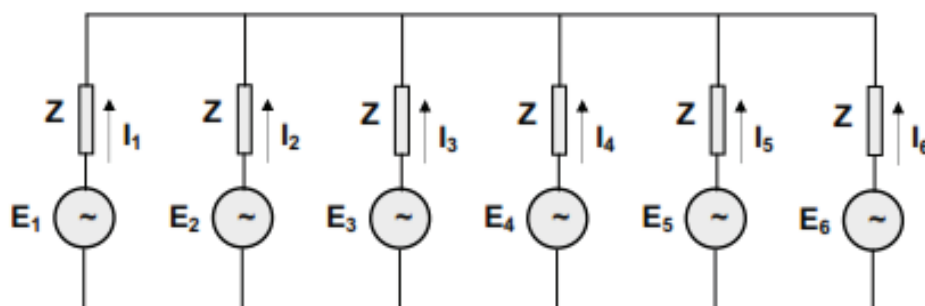


Figura 1.10 Esquema eléctrico equivalente de un rotor
(Chapman, 2000)

Las corrientes I_1 e I_4 , tienen el mismo valor instantáneo pero con sentido de circulación opuesto, debido a la posición que ocupan los conductores en el instante analizado. Por tal motivo tienen la misma magnitud con un ángulo de desfase de 180° , ocurriendo lo mismo con las corrientes I_2 e I_5 y con I_3 e I_6 .

El rotor tipo jaula de ardilla es simple de construir puesto que sobre el conjunto de chapas magnéticas, se tiene ranuras donde se funden las barras conductoras junto con las coronas, produciendo una gran rigidez a la jaula frente a esfuerzos debidos a la fuerza centrífuga o bien a esfuerzos por corrientes de cortocircuito (Pimienta Dueñas, 2007).

La velocidad de giro del rotor en los motores de inducción, siempre será inferior a la velocidad de sincronismo del estator. Para que se genere una fuerza electromotriz en los conductores del rotor debe existir un movimiento relativo entre los conductores y el flujo giratorio (Baisón Santiago, 2010). Esta diferencia entre la velocidad del flujo giratorio y la velocidad que gira el rotor toma el nombre de deslizamiento, que se expresa en relación a la velocidad síncrona según la ecuación (1.2).

$$S = \frac{N - N_i}{N} \quad (1.2)$$

Donde:

S : Deslizamiento.

N : Velocidad del campo magnético [rpm].

N_i : Velocidad de rotación del inducido [rpm].

1.1.3 Escudos

Sirven de sostén para los rodamientos de bolas y/o de deslizamiento, sobre los cuáles se apoya y gira el eje del rotor, afianzándose firmemente uno a cada lado de la carcasa por medio de tornillos.

1.2 Circuito equivalente de un motor de inducción.

El circuito equivalente del motor trifásico de inducción es semejante al de un transformador, puesto que el estator tiene tres bobinas que originan un campo magnético rotativo y presenta una resistencia óhmica distribuida a lo largo de los conductores que lo conforman.

Se debe considerar que el núcleo magnético al estar dividido en dos, una parte fija que es el estator y otra parte móvil que es el rotor, implica una separación de

aire entre ambas lo que genera que parte de las líneas de campo magnético se cierren a través del aire conformando el flujo disperso. Este efecto se los representa por una resistencia concentrada y una reactancia de dispersión (Chapman, 2000).

Por esta razón se requiere una corriente de magnetización mayor que en el caso de un transformador debido a la cavidad de aire, además se tiene las pérdidas en el núcleo.

Estos efectos se los representa en forma análoga, mediante una resistencia y una reactancia en paralelo. Las pérdidas en el cilindro de chapa del rotor son muy pequeñas cuando gira a la velocidad de régimen, ya que las frecuencias de las corrientes son pequeñas.

El circuito equivalente de una fase del estator del motor de inducción, se muestra en la Figura 1.11, en donde se considera que las tres fases del motor son iguales y por tanto el comportamiento de una fase basta para analizar el comportamiento de las otras dos (Meaton, 1991).

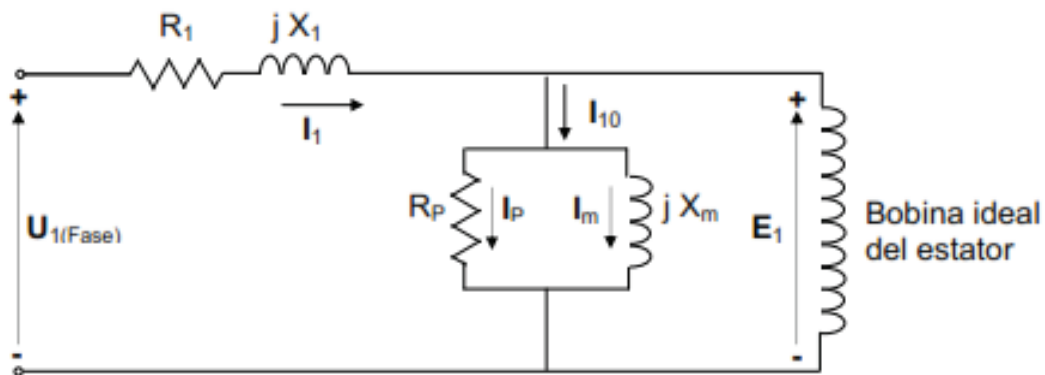


Figura 1.11 Circuito equivalente de una fase del estator (Chapman, 2000)

Dónde:

- R_1 : Resistencia de la bobina del estator [Ω].
- X_1 : Reactancia de dispersión de la bobina estatórica de una fase [Ω].
- R_p : Resistencia que representa las pérdidas en el entre hierro [Ω].
- X_m : Reactancia de magnetización [Ω].
- U_1 : Tensión de fase de alimentación al motor [V].

- E_1 : Fuerza electromotriz inducida de fase en la bobina del estator [V].
 I_1 : Corriente del estator con carga [A].
 I_{10} : Corriente del estator del motor en vacío [A].
 S : Deslizamiento.

El efecto combinado de la carga en el eje y la resistencia del rotor aparece como una resistencia reflejada R_r/S , que es función del deslizamiento y por lo tanto de la carga mecánica. Una simplificación se puede obtener al considerar que generalmente R_p es mucho mayor que X_m y por tanto en la rama de magnetización quede únicamente X_m . Los valores del circuito equivalente que sirven para determinar la eficiencia de un motor se puede obtener a partir de los resultados de una prueba sin carga, una prueba con rotor bloqueado, y mediciones de las resistencias de corriente directa de los devanados del estator. Es importante mencionar que los valores de las reactancias varían con la frecuencia y que para realizar un control de velocidad del motor de inducción, éste se hace variando la frecuencia de alimentación del estator, por tanto los valores de reactancia del circuito equivalente varían cuando se realiza un control de velocidad (Chapman, 2000).

En el rotor, la fuerza electromotriz inducida depende de la velocidad del eje y del número de espiras del mismo. Los conductores presentan resistencia óhmica y hay flujo disperso, el cual se representa con una reactancia de dispersión cuyo valor está dado por la ecuación (1.3):

$$X_{2S} = 2 \times \pi \times f_R \times L_2 \quad (1.3)$$

Siendo el valor de la auto inductancia constante, la reactancia cambia su valor con la velocidad de la máquina. Según la ecuación (1.5), en el caso de un motor con el rotor detenido o bloqueado la reactancia tiene un valor de:

$$X_2 = 2 \times \pi \times f \times L_2 \quad (1.4)$$

Por lo tanto:

$$X_{2S} = S \times X_2 \quad (1.5)$$

Normalmente los conductores del rotor están en cortocircuito como se muestra en la Figura 1.12. En este circuito equivalente del rotor, el parámetro variable con la velocidad es la resistencia, desde el punto de vista matemático.

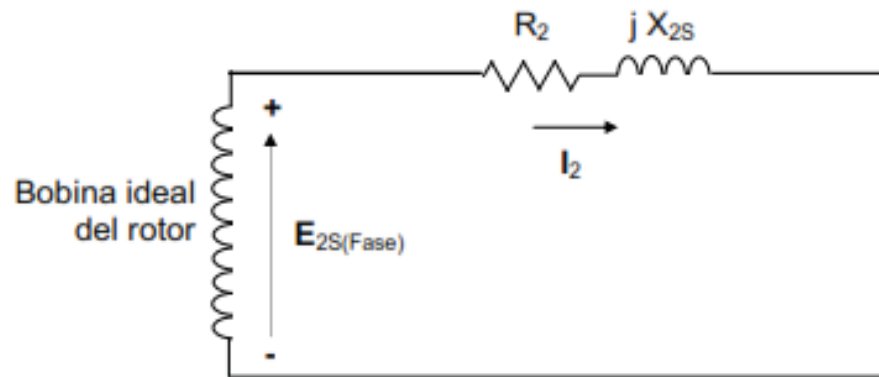


Figura 1.12 Circuito equivalente para una fase del rotor (Chapman, 2000).

Donde:

R_2 : Resistencia de la bobina del rotor [Ω].

X_{2S} : Reactancia de dispersión de la bobina del rotor [Ω].

I_{21} : Corriente del rotor [A].

E_{2S} : Fuerza electromotriz inducida de fase en la bobina del rotor [V].

El valor de la corriente en el rotor viene dada por la ecuación (1.7).

$$E_{2S} = I_{21}(R_2 + j \cdot X_{2S}) \quad (1.6)$$

Por lo tanto:

$$I_{21} = \frac{E_{2S}}{R_2 + j \cdot X_{2S}} \quad (1.7)$$

Con los circuitos equivalentes del estator y del rotor queda un acoplamiento inductivo, el cuál puede ser excluido al referir los valores del rotor al estator, teniendo en cuenta la relación del número de espiras del estator y del rotor. La

resistencia que aparece como variable en el rotor, se la puede descomponer con sus valores referidos al estator. Con esto el circuito equivalente por fase del motor trifásico de inducción, queda según la Figura 1.13, para efecto de análisis de fallas.

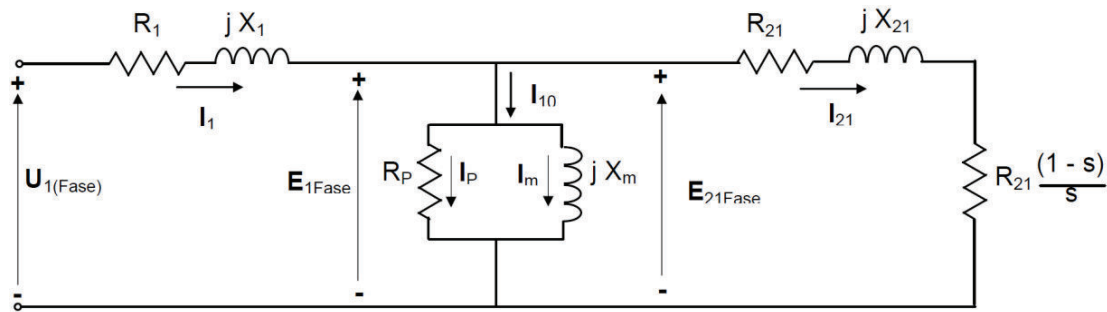


Figura 1.13 Circuito equivalente de una fase del motor trifásico de inducción (Chapman, 2000).

Donde:

- R_1 : Resistencia de la bobina del estator [Ω].
- X_1 : Reactancia de dispersión de la bobina estática de una fase [Ω].
- R_p : Resistencia que representa las pérdidas en el entre hierro [Ω].
- I_p : Corriente que representa las pérdidas en el entre hierro [A].
- X_m : Reactancia de magnetización [Ω].
- I_m : Corriente de magnetización [A].
- U_1 : Tensión de fase de alimentación al motor [V].
- E_1 : Fuerza electromotriz inducida de fase en la bobina del estator [V].
- I_1 : Corriente del estator con carga [A].
- I_{10} : Corriente del estator del motor en vacío [A].
- S : Deslizamiento.
- R_2 : Resistencia de la bobina del rotor [Ω].
- X_{2S} : Reactancia de dispersión de la bobina del rotor [Ω].
- I_{21} : Corriente del rotor [A].
- E_{2S} : Fuerza electromotriz inducida de fase en la bobina del rotor [V].

1.3 Banco de pruebas para obtención de datos experimentales.

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los centros de investigación en su gestión diaria, es el alto precio que deben invertir en la adquisición de equipos para pruebas de laboratorio y en la construcción de prototipos reales que sirven para obtener datos empíricos.

“Un banco de pruebas es una plataforma para experimentación de proyectos de gran desarrollo. Los bancos de pruebas brindan una forma de comprobación rigurosa, transparente y repetible de teorías científicas, elementos computacionales, y otras nuevas tecnologías” (Federación de Enseñanza de CC.OO de Andalucía , 2011).

Con base en esta definición, los bancos de prueba brindan un ambiente de desarrollo que está aislado de los riesgos de las pruebas en un ambiente de producción, y que permiten realizar los ensayos requeridos con una alta precisión y velocidad de respuesta en la regulación dinámica del par y de las revoluciones, acompañados de una estructura metálica resistente, diseñada principalmente para soportar el torque que ejerce el motor en el eje de la carga y las vibraciones (GTISISTEMAS, 2015).

Estos bancos de prueba son instrumentos de hardware y software de última tecnología, que mediante una interfaz gráfica intuitiva, pueden realizar la adquisición de datos de forma manual o automática, ejecutando ciclos predefinidos en memoria y monitoreando en tiempo real los parámetros eléctricos de: tensión corriente, ángulo de fase, así como parámetros mecánicos (Direct Industry, 2015).

Entre las pruebas estandarizadas que ofrecen los diferentes bancos se tiene:

- Pruebas en vacío.
- Pruebas con carga.
- Recalentamiento.
- Par de arranque.

- Adquisición de datos en tiempo real.
- Ciclos manuales y automáticos.
- Pruebas especiales bajo la normativa IEC/EN.

En la Figura 1.14, se tiene bancos de pruebas que son fabricados por empresas que prestan servicios de mantenimiento o universidades que investigan el consumo energético y el desempeño de los motores eléctricos en la industria. Aquí se observa que dependiendo el tipo de banco requerido, el espacio y la inversión pueden llegar a ser considerables al momento de solicitar la construcción de uno de ellos.



Figura 1.14 Bancos de pruebas para motores de inducción (Direct Industry, 2015).

En la Figura 1.15 se muestra el esquema de conexiones de un banco de prueba genérico, el cual consiste de varios bloques funcionales como:

- Estructura mecánica que permite el acople del motor a la carga y además soporta a los diferentes elementos de prueba y toma de datos.
- Motor asíncrono que será sometido a las diferentes pruebas.
- Generador de CC y reóstatos para aplicación de la carga.
- Variador de frecuencia para aplicación de la velocidad.
- Circuitos de potencia, mando y control.
- Sistema de adquisición de datos.

- Controlador central para monitoreo, análisis y almacenamiento de información.

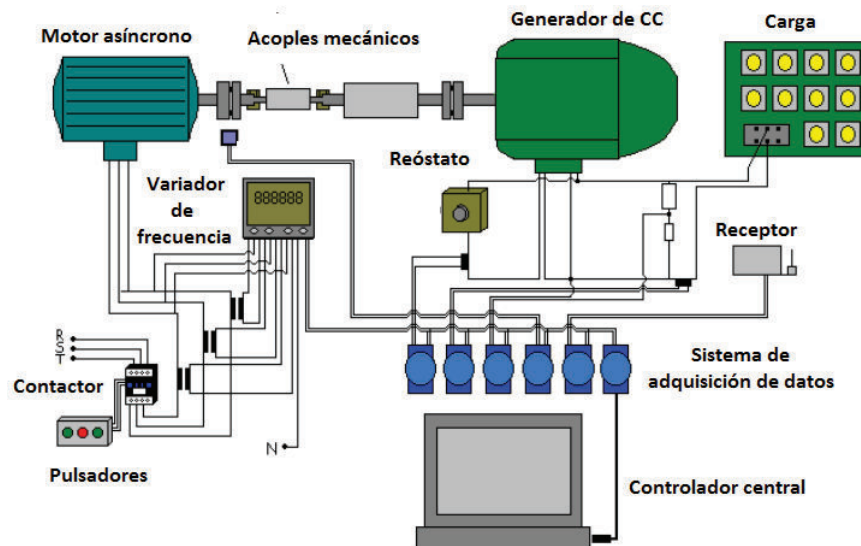


Figura 1.15 Esquema de conexiones de un banco de pruebas para motores de inducción. (Vallvé Navarro & Costa Castelló, 2007).

1.4 Tipos de fallas en motores de inducción.

Los motores eléctricos de inducción operan en un sin número de procesos industriales. Es una máquina eléctrica rotativa de constitución física muy simple, la cual por estar presente en tan diversas aplicaciones, es común la presencia de diferentes tipos de fallas, en las que se encuentran presentes el rotor, el estator, el inversor o en componentes conectados a la máquina, existiendo por este motivo varios estudios acerca de estas fallas (Basak & Tiwari, 2006).

Aproximadamente un 41 % de las fallas en este tipo de máquinas corresponde a anomalías en los rodamientos; entre un 37 % a fallos en el estator; y un 10 % aproximadamente corresponden a fallos en el rotor. El resto de los casos se distribuyen en una gran variedad de fallos por sobrecarga y defectos de manufacturación (Da, Xiaodong, & Mahesh, 2011).

En la Figura 1.16, se presenta una clasificación resumida de los tipos de fallas que puede ocurrir en una máquina de inducción.



Figura 1.16 Clasificación de daños en motores de inducción (Basak & Tiwari, 2006).

1.4.1 Fallas eléctricas.

Las fallas eléctricas normalmente son causadas por daños en el aislamiento en el devanado de la bobina (Basak & Tiwari, 2006). Frecuentemente el desperfecto se presenta en el sector donde se encuentra el inicio del devanado en las ranuras, siendo las posibles razones por las que ocurren estas fallas las siguientes:

- Defectos Constructivos
- Operación en altas temperaturas
- Sobrecarga del motor
- Exceso de Voltaje
- Vibración

1.4.1.1 Fallas por simetría de los bobinados del estator.

Este tipo de fallas en la simetría de los bobinados son producidos únicamente por defectos de construcción, presentándose especialmente en motores que han sido rebobinados sin seguir todas las normas técnicas.

La asimetría en el bobinado produce pequeños campos magnéticos que giran en sentido contrario al campo magnético del estator, este efecto produce esfuerzos que alcanzan su máximo valor en el momento de arranque del motor.

1.4.1.2 Fallas por simetría de los bobinados del rotor (JAULA).

De igual manera que en el estator, la asimetría de las barras del rotor de un motor de inducción se deben netamente a fallas constructivas, barras rotas, agrietadas o barras sueltas. Este defecto puede propagarse a barras aledañas o dañar los devanados del estator al producirse deformaciones, mismas que incluso pueden afectar a las chapas de material ferromagnético que conforman el núcleo.

1.4.1.3 Paquetes de bobinas del estator.

La mayoría de las fallas que se presentan en un motor están relacionadas con los daños en el estator que se producen por el deterioro del aislamiento de las bobinas. Esta falla produce calentamiento, sobretensiones, movimiento de las bobinas, corrientes elevadas, todo esto puede dar como resultado cortocircuitos entre bobinados de diferentes fases o entre los bobinados y tierra.

1.4.1.4 Ranuras del estator y ranuras del rotor.

Las ranuras del estator y del rotor son agujeros ubicados en los bordes de las láminas redondas, su conformación longitudinal es el resultado del apilamiento de estas láminas (Bonnett & Soukup, 1992).

Estas láminas de chapa delgada son aisladas unas de otras impidiendo que las corrientes inducidas magnéticamente circulen en el hierro y provoquen calentamiento, por lo que si estas láminas se encuentran expuestas en algún sector esto degeneraría en un cortocircuito, dando paso a un calentamiento local y consecuentemente una distorsión termal; también acompaña a este desperfecto niveles de vibración más altos.

1.4.1.5 Barras rotas del rotor.

Las barras del rotor se pueden romper como producto del estrés térmico, magnético o dinámico (fuerzas centrífugas), abrasión, pulsaciones de carga, fallas de rodamientos, y ciertos problemas de fabricación que se pueden presentar en los motores de inducción (Elkasabgy, Eastham, & Dawson, 1992). Ciclos de

trabajo pesado y largos tiempos de arranque aumentan la incidencia de grietas en la región de unión de la barra y el anillo del rotor. Aunque pasan sin ser detectadas en su etapa inicial, esta falla aumenta progresivamente en intensidad como consecuencia de la elevación de la temperatura alrededor de la grieta y la corriente adicional sobre las barras en buen estado, incrementando el estrés térmico en el rotor durante los arranques del motor.

Un motor de inducción con barras rotas del rotor produce una vibración que varía lentamente en amplitud a dos veces la frecuencia de deslizamiento del motor. Este problema se encuentra dentro de la categoría de los problemas de origen eléctrico, ya que una barra dañada distorsiona las corrientes que fluyen dentro del motor (Nandi, Toliyat, & Xiaodong, 2005).

Un problema adicional ocasionado por la rotura de una barra del rotor es que puede producir una flexión del rotor, lo que resulta en una condición de desbalanceo.

1.4.2 Fallas mecánicas.

Las fallas mecánicas en motores de inducción usualmente hacen referencia a fallas en los rodamientos y excentricidad en la mayoría de máquinas (Da, Xiaodong, & Mahesh, 2011). Estos daños de componentes mecánicos son de los fallos más comunes en este tipo de máquinas eléctricas, siendo la causa de estos daños mecánicos:

- Fatiga de los materiales
- Tensión desequilibrada
- Instalación incorrecta
- Corrosión / Contaminación

Estos problemas provocan vibraciones y ruidos durante funcionamiento de los equipos, que pueden ser medidos y procesados como indicadores de diagnóstico.

1.4.2.1 Desbalance mecánico

En los motores de Inducción uno de los daños es el desbalance mecánico el cual produce vibración, lo que genera oscilaciones importantes en el par instantáneo requerido por el motor, degenerando en fatiga de los elementos de transmisión tales como: engranes, rodamientos, correas, poleas, chavetas (Da, Xiaodong, & Mahesh, 2011).

Las causas más comunes que pueden producir desbalance son:

- Falta de homogeneidad en partes fundidas
- Excentricidad del rotor.
- Flexión de rodillos,
- Fallas en el ajuste y calibración de la máquina.
- Distribución desigual en las barras de rotor de motores eléctricos o en el enrollado.

El desbalance en un motor puede ser de tres tipos:

- Desbalance estático
- Desbalance en dos planos o tipo par.
- Desbalance por rotor colgante.

1.4.2.2 Fallas en rodamientos.

Las fallas en rodamientos son de las más comunes en los motores de inducción (Da, Xiaodong, & Mahesh, 2011), se generan por vibraciones de alta frecuencia. Sin embargo a medida que el daño es mayor las frecuencias van disminuyendo. Una vez detectada la falla, el rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose.

Los principales causantes de este tipo de fallas suelen ser:

- Carga excesiva
- Falta de alineamiento
- Defectos de asientos del eje y/o de las perforaciones en el alojamiento
- Montaje defectuoso
- Ajuste incorrecto
- Lubricación inadecuada o incorrecta
- Sellado deficiente

1.4.2.3 Excentricidad.

La excentricidad es otra causa común de vibración en un motor de inducción, esta se produce cuando la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor, por lo que el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica, existiendo diferentes tipos de excentricidades:

- Excentricidad de tipo estática.
- Excentricidad de tipo dinámica.
- Excentricidad combinada estática-dinámica

1.4.3 Fallas en dispositivos externos

Este tipo de daños se presentan no directamente en las máquinas eléctricas, se presentan generalmente en los componentes o sistemas conectados a los motores de inducción, este tipo de averías pueden ser provocadas por diferentes motivos y provocan igualmente daños en los componentes de los motores, las causas de estos defectos pueden ser:

- Componentes defectuosos o mal contruidos
- Desgaste de componentes
- Agentes externos de operación
- Mala Operación
- Imprecisión en ensamblaje de componentes

1.4.3.1 Desalineación al acoplar ejes.

La desalineación es una condición en la que los centros de los ejes del motor y del sistema al ser acoplados no coinciden, siendo la mayor parte de casos de desalineación una combinación de desalineación paralela y angular (Da, Xiaodong, & Mahesh, 2011). El diagnostico, como regla general, se basa en vibración dominante al doble de veces de la velocidad de giro, con niveles altos en la velocidad de giro en dirección axial, y bien en la dirección vertical u horizontal.

1.4.3.2 Fallas en engranajes.

Este tipo de falla genera igualmente una vibración que resulta de problemas de engranaje, es de fácil identificación porque normalmente ocurre a una frecuencia igual o a la frecuencia de engrane de los engranajes es decir, la cantidad de dientes del engranaje multiplicada por las rpm del engranaje que falla.

Problemas comunes de los engranajes, que tienen como resultado vibración a la frecuencia de engrane, comprenden el desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallas de lubricación y materias extrañas atrapadas entre los dientes.

No todos los problemas de engranajes generan frecuencias de vibración iguales a las frecuencias de engrane.

La amplitud y frecuencia de vibración debida a los engranajes pueden también parecer erráticas a veces dicho tipo de vibración errática ocurre normalmente cuando un conjunto de engranajes está funcionando en condiciones de carga muy liviana, en tales condiciones la carga puede desplazarse repetidamente de un engranaje a otro de modo irregular.

1.4.3.3 Transmisión de potencia en poleas

El enlace entre dos ejes, mediante el sistema de poleas debe emplearse en conjuntos de giro suave, ya que la banda puede derrapar sobre la ranura de la polea, en cargas que exigen relativamente un alto par de arranque, se presenta generalmente fallos como:

- Distensión de la banda.
- Desalineación de poleas.
- Excentricidad de Poleas.
- Resonancia en la banda.

1.5 Técnicas de detección de fallas

Generalmente un motor eléctrico presenta principalmente, fallos eléctricos o mecánicos; por ser un dispositivo ampliamente utilizado existen un sin número de investigaciones acerca de procedimientos y metodologías para la detección de los diferentes tipos de fallos (Talbot & Saavedra, 2013).

Con el desarrollo de nuevas estrategias de mantenimiento donde se presta mayor atención a la identificación, seguimiento, reparación y finalmente la predicción de problemas mecánicos, actualmente existen varias técnicas disponibles para determinar el estado de los motores eléctricos. Estas técnicas pueden utilizar desde equipos de medición tradicional hasta instrumentos sofisticados con ordenadores integrados (Toliat & Kliman, 2004).

Tabla 1.1 Tipos de fallas y tipos de señal para detectar fallas
(Basak & Tiwari, 2006).

Señal \ Falla	Corriente	Vibración	Flujo	Descarga parcial	Análisis de Gas	Temperatura	Potencia	Torque
Corto circuito en el estator	X			X	X	X		
Corto circuito en el devanado interno del rotor	X	X	X	X	X	X	X	X
Barras Rotas del Rotor	X	X						
Excentricidad del rotor	X	X						
Falla de Rodamientos	X	X						

En la Tabla 1.1 se presentan los métodos de detección de fallas más comunes y el tipo de fallas que estos pueden detectar, en donde los más usados y con mejores resultados son:

1. Análisis de la corriente de alimentación o MCSA¹.
2. Análisis de las variaciones de la Velocidad Angular Instantánea (VAI).
3. Análisis de vibraciones.

¹ Motor Current Signature Analysis

1.5.1 Análisis de la corriente de alimentación

El análisis de las características de la corriente de un motor de inducción o MCSA, es una técnica de monitoreo que se utiliza para evaluar la condición de los motores eléctricos, que no requiere la detención de la planta, y provecha las características de las señales que se producen mientras el motor se encuentra operando (Ojo, Osaloni, & Kshirsagar, 2002).

Se ha demostrado que cuando existen diversas fallas en el motor de inducción, la corriente presenta frecuencias adicionales que pueden ser utilizadas como indicadores de las mismas. Algunas de las fallas más comunes en motores de inducción son: cortocircuito entre las bobinas del estator, barras rotas, excentricidad del rotor y rodamientos.

La consideración de una adecuada metodología de procesamiento de señales, en el análisis para la detección de daños por falla es fundamental. Las técnicas de procesamiento de señales son aplicadas para la medición de las señales generadas, por tal motivo se debe considerar el procesamiento técnico de la señal, para mejorar las señales de las fallas, suprimir el ruido y la dinámica dominante del sistema,

Los daños producidos pueden describirse mediante una señal en el dominio del tiempo; es decir, una de las variables es la frecuencia y la otra la amplitud. Graficando esta señal se obtiene una función frecuencia-amplitud; mediante un espectro de frecuencias existentes en la señal. Por lo tanto, para una mejor representación de la señal se hace necesario disponer de su representación en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

En general todos los fallos que producen variaciones en el par resistente, modulan la corriente. Estos eventos pueden ser variaciones de la carga en el proceso, defectos en rodamientos como daño en las pistas o elementos rodantes o desalineamientos de los ejes a través de los acoplamientos. Estas modulaciones, aunque pequeñas, pueden ser detectadas en el espectro de la corriente con escala logarítmica o expresada en decibeles, presentándose como bandas laterales si estas modulaciones son periódicas.

Las herramientas que permiten el análisis y procesamiento de las señales son: la Transformada de Fourier y la Transformada de Wavelet, como los métodos más utilizados. Sin embargo, es de suma importancia analizar los parámetros que influyen en la capacidad y precisión de estas técnicas para la detección de fallas en motores de inducción (Mariun, Mehrjou, Marhaban, & Misron , 11-13 May 2011).

1.5.1.1 Cortocircuito en el devanado del estator

Los estudios muestran que las fallas relacionadas con un cortocircuito en el estator son las que tienen mayor porcentaje en los motores eléctricos (Ojo, Osaloni, & Kshirsagar, 2002). Esta anomalía generalmente comienza como un problema de aislamiento no detectado entre dos espiras adyacentes, y que luego evoluciona hasta convertirse en una falla de aislamiento entre varias espiras (Awadallah & Morcos, 2004). Estas fallas aumentan cada vez que el motor es encendido, deteriorando su condición en forma progresiva.

Estudios analíticos y experimentales han demostrado un incremento en la componente de secuencia negativa de la corriente del estator, cuando se presenta una falla por corto circuito en los devanados del estator (Williamson & Mirzoian, 1985). Las frecuencias de las componentes por cortocircuito del estator vienen dadas por la ecuación (1.8).

$$f_s = f_1 \left\{ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right\} \quad (1.8)$$

Donde:

f_s = Frecuencias de las componentes por cortocircuito del estator.

f_1 = Frecuencia fundamental de la tensión de suministro.

p = Número pares de polos.

n = Secuencia continua de valores (1,2,3,.....).

k = Secuencia de números impares (1,3,5,.....).

s = Deslizamiento del motor.

1.5.1.2 Barras rotas del rotor

La detección de barras rotas empleando la técnica de MCSA ha sido ampliamente estudiada (Filippetti, F; Franceschini, G; Tassoni, C; Vas, P;, 1996) (Elkasabgy, Eastham, & Dawson, 1992). La presencia de fallas por barras rotas en el rotor, se produce como resultado del estrés térmico, magnético o dinámico, abrasión, fallas de rodamientos y ciertos problemas de fabricación que se pueden presentar en los motores de inducción (Nandi, Toliyat, & Xiaodong, 2005). Este tipo de falla no tiene reparación y se presenta con mayor frecuencia en motores de gran tamaño y con grandes torques de arranque.

La rotura de barras en un rotor representa el 10% de los daños en los motores eléctricos de inducción. Sin embargo, aunque esta falla tenga un porcentaje de incidencia bajo y su presencia no sea motivo de para inminente, provoca la degradación del motor a corto plazo, produciendo daños irreversibles en su funcionamiento (Elkasabgy, Eastham, & Dawson, 1992).

Al presentarse las fallas por barras rotas del rotor, se observa la presencia de frecuencias laterales alrededor de la frecuencia fundamental, producidas por un desequilibrio en las corrientes del rotor, creando un campo giratorio a la frecuencia de deslizamiento y opuesto respecto a la rotación del rotor (Thomson & Fenger, 2000). Estas frecuencias se evalúan mediante la ecuación (1.9), como sigue:

$$f_b = f_1(1 \pm 2s) \quad (1.9)$$

Donde:

f_b = Frecuencias de las componentes por barras rotas del rotor

f_1 = Frecuencia fundamental de la tensión de suministro.

$1 + 2s$ = Término debido a la ruptura de barras.

$1 - 2s$ = Término debido a la oscilación de velocidad consecuente

s = Deslizamiento del motor.

La evaluación de las frecuencias de las componentes espectrales correspondientes a la falla de barras rotas, debe considerar también las componentes armónicas que se puedan presentar en el sistema eléctrico (Filippetti, F; Franceschini, G; Tassoni, C; Vas, P;, 1996). Con esta consideración, las frecuencias de las bandas laterales se calculan por medio de la ecuación (1.10):

$$f_k = f(1 \pm 2ks) \quad (1.10)$$

Donde:

$$k \rightarrow k = 1, 2, 3$$

Si bien este método no es complejo de implementar, se detecta que el diagnóstico basado en el método del análisis de la corriente consiste básicamente en medir la forma de onda de la corriente en cualquiera de las tres fases del motor y luego calcular su espectro. Para medir la corriente, se utiliza un sensor que mide el efecto electromagnético de la corriente que pasa a través de él, entregando una señal de voltaje proporcional a la magnitud de esta corriente.

En la Figura 1.17a se muestra la forma del espectro de la corriente en una fase del motor para el caso en que el equipo no tiene fallas y la Figura 1.17b indica el espectro para el caso de que existe un daño en las barras del rotor.

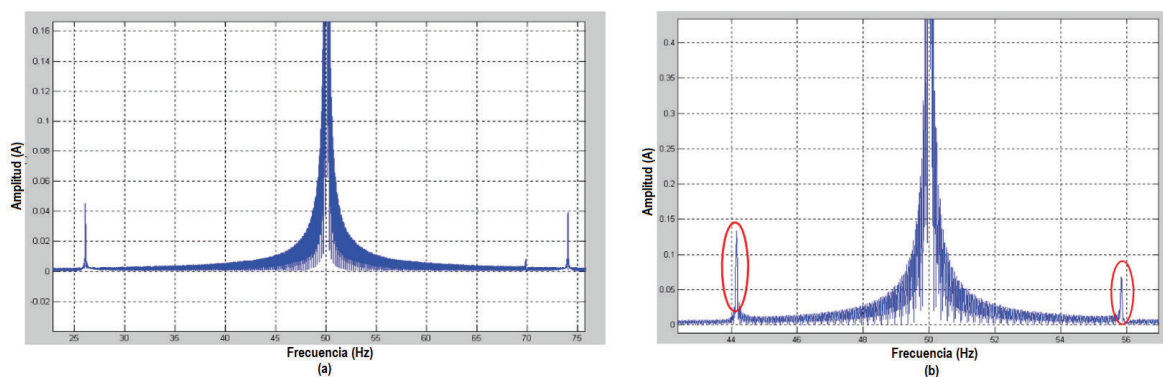


Figura 1.17 Espectro de corriente de un motor de inducción a 50 Hz:
 a) Sin falla b) Falla por barras rotas
 (Cusido, Rosero, Aldabas, & Ortega, 2005)

Para poder realizar el análisis de estos espectros producidos por fallas eléctricas se cuenta con el modelo de los circuitos acoplados magnéticamente, este modelo consiste en representar al rotor como una malla de circuitos con resistencias e inductancias que representan cada barra y cada porción de los anillos como se indica en la Figura 1.18a.

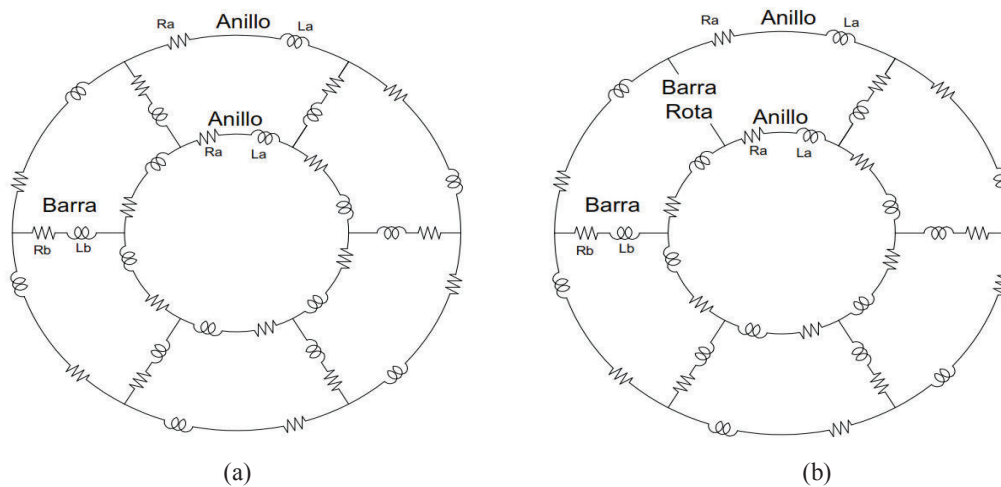


Figura 1.18 Diagrama eléctrico de un rotor: a) Sano b) Falla por barra rota (Talbot & Saavedra, 2013).

Una barra agrietada o rota en el rotor genera que los valores de resistencia e inductancia de esa barra sean distintos. Dependiendo del número de barras rotas, se modifica la resistencia y la inductancia que representa una barra en el modelo, como se muestra en la Figura 1.18b, cuya perturbación se encuentra definida por la ecuación (1.11).

$$r_{ix} = \frac{r_r * n}{n - ix} \quad (1.11)$$

Donde:

r_{ix} = Resistencia del rotor con falla por ix barras rotas del rotor

r_r = Resistencia del rotor

n = Número de barras por fase.

ix = Número de barras rotas del rotor

Las ecuaciones (1.12) plantean las matrices de resistencias del estator y rotor, en función de los parámetros internos del motor.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Donde:

R_s = Matriz de resistencias del estator.

R_r = Matriz de resistencias del rotor.

r_s = Resistencia del estator.

r_r = Resistencia del rotor.

La matriz de resistencias del motor de inducción trifásico, se la obtiene mediante la composición de una matriz, en cuya diagonal presenta los valores de las resistencias del estator y del rotor, dado por la ecuación (1.13) (Cusido, Rosero, Aldabas, & Ortega, 2005).

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Donde:

R = Matriz de resistencias del motor de inducción.

Por lo tanto la matriz de resistencias del motor, que permite modelar la falla por barras rotas, se define mediante la ecuación (1.14).

$$[R_f] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{ix} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Donde:

R_f = Matriz de resistencias del motor de inducción con falla por barras rotas.

Cualquier asimetría que se presente en el campo magnético del rotor, ya sea por barras o anillos extremos dañados, modularán la amplitud de la corriente y el espectro de la corriente presentará bandas laterales alrededor de la componente fundamental de la corriente, separadas a la frecuencia de paso de polos (Talbot & Saavedra, 2013). La frecuencia de paso de polos está dada por:

$$f_{\text{paso de polos}} = 2n_{\text{paso de polos}} \times f_{\text{deslizamiento}} \quad (1.15)$$

Donde

$f_{\text{paso de polos}}$ = Frecuencia de paso de polos

$n_{\text{paso de polos}}$ = Número de pares de polos

$f_{\text{deslizante}}$ = Velocidad de deslizamiento

Debido a la asimetría en la construcción del rotor, se pueden presentar pequeñas bandas laterales a la frecuencia de paso de polos incluso si las barras están en buen estado. Existen estándares que evalúan la condición de las barras del motor utilizando la diferencia en decibeles que existe entre la magnitud de la componente de la frecuencia fundamental de la corriente y la magnitud de su primera banda lateral izquierda, donde las diferencias sobre 60 [dB] indican que el estado de las barras es excelente y diferencias menores a 30 [dB] o 40 [dB] indican barras agrietadas o rotas (Talbot & Saavedra, 2013).

1.5.1.3 Excentricidad del rotor

La excentricidad del rotor, puede presentar rozamiento entre el estator y el rotor. Un gran valor de esta condición de falla o su aumento progresivo ocasiona pandeo del rotor, afectando tanto a los rodamientos del motor como al aislamiento del estator. Esta excentricidad genera componentes de frecuencia inducidas en la corriente del estator, cuyas frecuencias se determinan por la ecuación (1.16) (Dorrell, Thomson, & Roach, 1997).

$$f_{ecc} = f_1 \left\{ 1 \pm k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right\} \quad (1.16)$$

Donde:

f_{ecc} = Frecuencias de las componentes por excentricidad el rotor.

f_1 = Frecuencia fundamental de la tensión de suministro.

p = Número pares de polos

k = Escalar entero (1,2,3,...).

s = Deslizamiento.

Para el análisis de fallas por excentricidad, debe considerarse que las oscilaciones de la carga instalada al motor, generan componentes armónicos en la corriente del estator con valores de frecuencia similares, y por lo tanto pueden enmascarar las componentes de frecuencias producidas por esta falla (Obaid, Habetler, & Gritter, 2000).

1.5.1.4 Falla en rodamientos

El análisis de la corriente es utilizado en la detección de rodamientos dañados. En este caso, cada vez que un elemento rodante pase por la falla, el motor requerirá un leve aumento de corriente, por lo que se tendrá que la corriente estará modulada en amplitud a la frecuencia en que los elementos rodantes pasan por la falla, este tipo de diagnóstico es conocido como Ball Passing Frequency of Outer Race (BPFO).

1.5.2 Análisis de la variación de la velocidad angular instantánea.

El análisis de la variación de la velocidad angular instantánea en el eje de los motores es más nuevo que la técnica de análisis de las corrientes. Este método plantea detectar el daño como el de barras rotas lo más tempranamente posible.

Muchas máquinas eléctricas trabajan con velocidades variables. Estas variaciones de velocidad pueden ser innatas al funcionamiento de la máquina o pueden provenir de fallas en los equipos, por lo que se puede analizar las variaciones de la velocidad angular en el eje para obtener información del estado de las barras del rotor.

El análisis de las variaciones de la velocidad angular instantánea, consiste en medir la velocidad angular del eje en cada instante de tiempo y analizar la frecuencia de sus variaciones (Siddique & Yadava, 2005).

Dependiendo del problema que presente el motor, las frecuencias de las variaciones deberán presentar características del problema en particular, lo que permite diagnosticar la falla.

En su forma diferencial, la velocidad angular del eje viene dado por:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.17)$$

Dónde:

$\omega =$ Velocidad Angular

$\theta =$ Ángulo de giro del eje

Lo que se hace es medir el tiempo que tarda el eje en efectuar algún desplazamiento angular. Así se tiene que la forma discreta de la velocidad angular en el eje está dada por la ecuación (1.18).

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (1.18)$$

Este desplazamiento angular puede obtenerse a través de encoders que son dispositivo que entregan un pulso cada cierto desplazamiento angular efectuado y cuantificar el tiempo que tardó éste desplazamiento, el cociente entre ellos, es la velocidad angular promedio en ese tramo.

Para este análisis se requiere la variación de la velocidad instantánea en cada revolución. Esto significa que se necesita un dispositivo que entregue una cantidad elevada de pulsos por vuelta. El par resistente depende del proceso en particular y de la condición mecánica del rotor debido a rodamientos dañados y roces parciales, siendo independiente de la condición eléctrica del motor.

Una barra dañada en el rotor presenta una resistencia mayor a la que debiera presentar, por lo que cada vez que un polo pasa frente a esta barra, se induce una corriente menor en ella. Al ser menor la corriente en esa barra en particular,

el par ejercido sobre el rotor es también menor. Esto genera un par motor que varía periódicamente en amplitud, produciendo variaciones periódicas en la velocidad de rotación, dada por:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_{motor} - T_{resistente}}{J} \quad (1.19)$$

$\frac{d\omega}{dt}$ = Variación de la Velocidad Angular

T_{motor} = Par generado por el motor

$T_{resistente}$ = Par resistente

J = Momento de Inercia del Motor

El par generado por un motor de inducción no es constante, incluso si es nuevo, existiendo una fluctuación en el par debido al paso del campo magnético del estator entre una barra y la siguiente.

Por este motivo el par motriz varía periódicamente según la frecuencia con la que el campo magnético del estator corta las barras del rotor, cuando existen barras dañadas en el rotor de un motor de inducción, se detectan dos síntomas en el espectro de la IAS², descritos a continuación:

1. Componentes múltiplos de la frecuencia de paso de polos
2. Bandas laterales alrededor de la componente a la velocidad de giro, separadas a la frecuencia de paso de polos.

Se pueden presentar componentes a la frecuencia de giro, debido también a errores geométricos como la separación desigual entre ranuras o en la construcción de un encoder, los cuales se repetirán a cada vuelta, a pesar de que la velocidad no esté variando con esa frecuencia.

El desbalanceo residual del rotor tiene influencia sobre la IAS, por lo que, la componente a 1 x rpm encontrada en el espectro de la IAS, genera bandas laterales alrededor de las componentes múltiplos de la frecuencia de giro del

² Análisis de la variación de la velocidad angular instantánea.

rotor, separadas a la frecuencia de paso de polos, siendo estas generadas por causa de falla por barras rotas o cualquier otro defecto.

Debido a las asimetrías en la construcción del rotor, los campos magnéticos inducidos en éste nunca serán del todo simétricos. Por lo tanto, estos síntomas podrán presentarse incluso cuando el rotor esté sano, pero con una magnitud de las componentes muy reducida (Talbot & Saavedra, 2013).

1.5.3 Análisis de las vibraciones

El análisis de las vibraciones es una de las técnicas más utilizadas comercialmente en el mantenimiento predictivo. Esta técnica consiste en medir las vibraciones de la máquina mediante un acelerómetro y luego procesar la señal mediante herramientas matemáticas de análisis de señales para evaluar si la máquina presenta algún tipo de falla.

Esta metodología de análisis se utiliza para detectar barras rotas, daños en las canastillas de los rodamientos, desbalanceo entre otras. El análisis de vibraciones es una técnica muy difundida debido al número de dispositivos que se encuentran comercialmente y por su facilidad de uso. Esta técnica tiene el problema que cuando realiza la detección de un daño sobre una máquina, la encuentra cuando el desperfecto ya se está muy avanzado (Pérez Pozo & Bermejo Campos, 2013).

Esta técnica detecta daños en barras rotas debido a la disminución en la corriente que circula por la barra dañada. En este punto se crea un efecto sobre el motor, muy similar al que ocurriría si el entre-hierro sería mayor, debido a que la fuerza radial entre el rotor y el estator es menor. En este caso, la dirección radial en la cual se produce esta diferencia en la fuerza radial, gira con el rotor a la velocidad de giro, por lo que se genera una fuerza desbalanceada rotatoria a $1 \times \text{rpm}$ y en consecuencia, vibraciones periódicas a la velocidad de rotación del motor.

Esta fuerza actuará sobre el rotor de la misma manera en que lo hace el desbalanceo, una fuerza de valor constante que gira con el rotor, la fuerza electromagnética desbalanceada, giran a la velocidad de rotación, por lo que ambas se suman para dar una fuerza resultante en el rotor, pudiendo tanto aumentar como disminuir el valor de las vibraciones.

A diferencia del desbalanceo, la fuerza electromagnética desbalanceada no es de valor constante, cada vez que la barra rota se alinea con uno de los polos del estator, se genera un máximo para esta fuerza, por lo que las vibraciones a $1xRPM$ son moduladas a la frecuencia de paso de polos, por este motivo, en el espectro se presentarán bandas laterales alrededor de la componente a la velocidad de giro separadas a la frecuencia de paso de polos.

1.5.4 Análisis de señal por Transformada de Fourier

Las diferentes metodologías basadas en análisis del espectro de las corrientes o vibraciones utilizan la transformada de Fourier, para el análisis, prevención y monitoreo de fallas en motores de inducción, la transformada de Fourier en el análisis del espectro de la corrientes se usan efectivamente en la detección de sobrecarga térmica, daño de rodamientos y barras rotas.

De igual manera la transformada de Fourier es usada para el análisis de vibraciones en la detección de daños en las pistas de rodamientos, detección de barras rotas.

La Transformada de Fourier es una de las más empleadas, especialmente en ingeniería, esta transformada tiene su propia área de aplicación, con ventajas y desventajas.

Un ejemplo de aplicaciones en ingeniería son las señales estacionarias, es muy importante el análisis de estas señales, cuyo contenido de frecuencia no cambia en el tiempo, por lo cual no se necesita saber en qué instante de tiempo existen esas como se puede observar en la Figura 1.19 (Martinez Malo & Castro Fernandez, 2012)

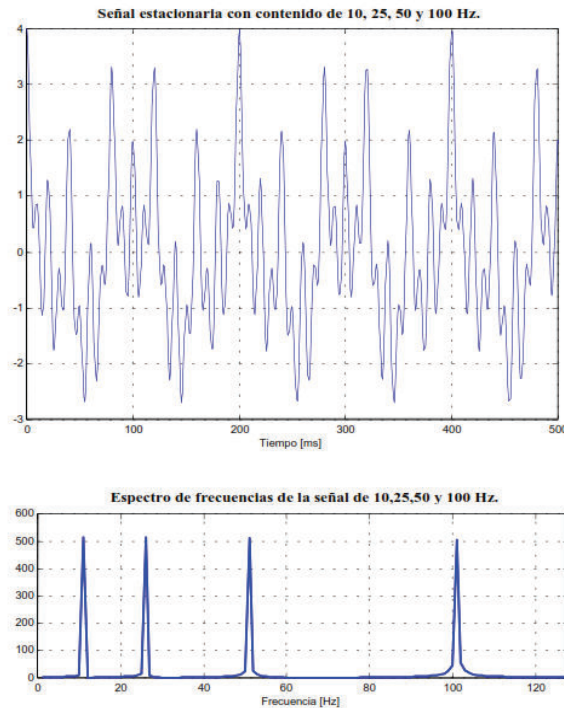


Figura 1.19 Señal estacionaria y espectro de frecuencia.

La transformada de Fourier expresa una función periódica como una suma de exponenciales complejas periódicas tal como se muestra en la ecuación (1.20)

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (1.20)$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot t} df \quad (1.21)$$

Dónde:

$X(f)$ = Transformada de Fourier de la señal en el dominio del tiempo $x(t)$

De la ecuación (1.20), se observa que la señal es multiplicada por un término sinusoidal de frecuencia f . Si la señal tiene una alta componente de frecuencia "f" entonces el producto de la señal y del término sinusoidal es relativamente grande; esto indica que la señal $x(t)$ tiene una fuerte componente de frecuencia "f".

Sin embargo, si la señal no tiene una componente de frecuencia “ f ” el producto tiende a cero.

Es importante destacar que la información proporcionada por la integral corresponde a todos los instantes del tiempo ya que el intervalo de integración va desde $-\infty$ a $+\infty$, esto significa que no importa el instante del tiempo en el que aparece la componente de frecuencia “ f ” porque no afectará el resultado de la integración. (Martinez Malo & Castro Fernandez, 2012)

Para el problema del análisis de señales no estacionarias mediante la transformada de Fourier se la resuelve a través de la transformada rápida de Fourier FFT por las siglas en inglés. Esta técnica básicamente consiste en dividir la señal en diferentes partes donde se puede asumir que la señal es estacionaria.

En cada instante t' y frecuencia f se calcula un nuevo coeficiente de la transformada de Fourier.

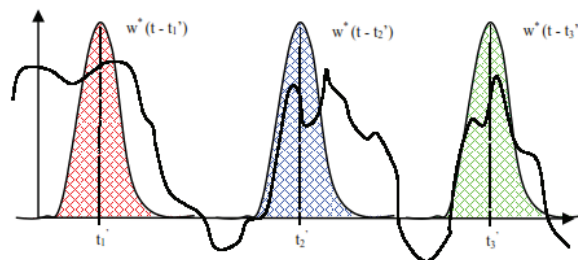


Figura 1.20 Explicación grafica de la transformada rápida de Fourier.

En la Figura 1.20 se muestra una función ventana de tipo gaussiana, la función “roja” muestra la ventana localizada en $t = t_1'$, la azul en $t = t_2'$ y la verde en $t = t_3'$. Estas ventanas corresponderán a tres Transformadas de Fourier en tres tiempos distintos. Por lo tanto, se obtendrá una buena representación tiempo-frecuencia de la señal.

En la Transformada Rápida de Fourier, la ventana es de longitud finita, es decir sólo se aplica a una parte de la señal, causando una disminución de la resolución en frecuencia, con lo cual sólo es posible conocer una banda de frecuencias y no un valor exacto de frecuencias.

CAPITULO 2

2. ANÁLISIS, ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.1 Introducción

En la industria actualmente se tratan diversos temas de importancia, siendo uno de ellos el estudio de técnicas de mantenimiento, que prolonguen la vida útil de los equipos y maquinaria utilizados en la fabricación de bienes. Cerca del 80 % de los motores eléctricos utilizados en las industrias son motores de inducción y en base a un análisis estadístico realizado a motores desde 201 Hp hasta motores mayores a 5000 Hp, se demuestra que existe hasta un 80% de probabilidad de impedir una falla cuando se tiene un sistema de monitoreo, lo que indica que mejorando el sistema de monitoreo del estado y diagnóstico de fallas en las máquinas eléctricas, se mejora sustancialmente su fiabilidad (Basak & Tiwari, 2006).

Por esta razón se hace importante supervisar, diagnosticar y controlar su funcionamiento desarrollando aplicaciones que permitan esta labor, dado que en muchas ocasiones estas unidades se encuentra operando bajo fallos, y no es posible detectar anomalías antes de que estas produzcan daños a los equipos o al sistema y peor aún accidentes laborales.

Es importante contar con herramientas de accionamiento eléctrico para motores de inducción para la realización de investigaciones, puesto que permite visualizar el desempeño de motores de inducción de bajas potencias, y estudiar e investigar estrategias de control y monitoreo de fallas.

El mantenimiento de los motores eléctricos juega un rol crítico en el desempeño eficiente de las industrias. Actualmente se considera el mantenimiento predictivo, como uno de los más relevantes, ya que cuenta con sistemas de monitoreo no invasivo, siendo un sistema prioritario para la seguridad de los procesos industriales, minimizando las consecuencias de una falla por mal funcionamiento.

De igual manera debe considerarse que en equipos, máquinas y sistemas de aplicaciones industriales, existe una altísima presencia de motores de inducción de diferentes potencias, formando parte de sistemas de extracción de humos,

hasta sistemas de refrigeración en plantas nucleares, dando esto una muestra de su amplia versatilidad.

Una de las técnicas de monitoreo no invasivo ampliamente usada en motores de inducción, es la detección de fallas a través del análisis de las formas de corriente del motor MCSA³.

Esta técnica obedece a un procedimiento de diagnóstico como se muestra en la Figura 2.1, el cual consiste en evaluar la amplitud relativa de las diferentes corrientes armónicas que se producen por las fallas presentes.

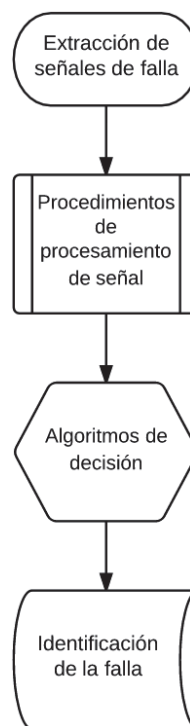


Figura 2.1 Diagrama de flujo para un sistema de detección de fallas (Basak & Tiwari, 2006).

Para este análisis se debe diseñar un banco de pruebas que permita mediante una interfaz gráfica sencilla e intuitiva, someter motores de inducción a diferentes regímenes trabajo, tanto en modo manual o automático, ejecutando ciclos predefinidos en memoria y monitoreando en tiempo real los parámetros eléctricos de: tensión, corriente, potencia, ángulo de fase, además de parámetros mecánicos como descentramiento del eje.

³ Motor Current Signature Analysis

Un esquema general planteado para el banco de pruebas se tiene en la Figura 2.2, en donde se toma en cuenta los siguientes bloques:

1. Soporte mecánico o bancada.
2. Elementos de acople del motor al generador.
3. Generador y cargas resistivas.
4. Variador de frecuencia.
5. Tablero de control.
6. Controlador.

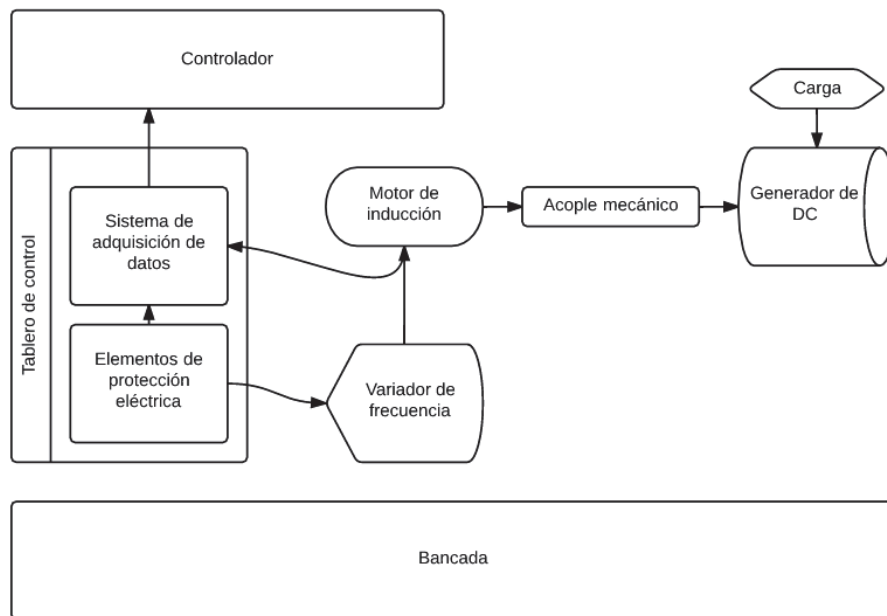


Figura 2.2 Esquema de general del banco de pruebas para detección de fallas en MI.

2.2 Requerimientos técnicos

El diseño que se propone en el siguiente proyecto, tiene como propósito colaborar con el Departamento de Eléctrica y Electrónica (DEEE), de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, específicamente en la línea de investigación de Automática y Control. La universidad se encuentra ubicada en la ciudad de Sangolquí, cantón Rumiñahui.

En el año 2013, el grupo de investigación Wicom Energy del DEEE⁴, plantea varios proyectos de procesamiento, detección y clasificación de señales, al Vicerrectorado de Investigación de la ESPE. Uno de ellos se enfoca en la detección de fallas eléctricas en motores de inducción trifásicos, cuyo presupuesto asignado comprende:

- La adquisición de los motores para experimentación y generación de fallas,
- La construcción de la bancada para generar los ensayos.
- La adquisición de los elementos de protección.
- La adquisición del sistema de toma de datos.

La prioridad para Wicom Energy, es contar con una base de datos por fallas en motores de inducción, con la cual se pueda trabajar y aplicar técnicas avanzadas de procesamiento de señales para detección y clasificación de eventos. La técnica de análisis de fallas MCSA propuesta, centra sus esfuerzos en el análisis espectral de la corriente del estator y detecta fallas por corto circuito del estator, barras rotas del rotor, excentricidad del rotor y falla por rodamientos. Esta técnica al estudiar la amplitud y la frecuencia de los armónicos presentes cuando se produce una falla, permite trabajar con motores de baja potencia y luego esta información pueda ser escalada hacia motores de mayor potencia (Basak & Tiwari, 2006).

Al seleccionar la técnica de MCSA para análisis de fallas, Wicom Energy plantea la experimentación y generación de fallas en motores de inducción trifásicos de 1 HP por la facilidad de manejo y el costo que representa la adquisición de varios motores para el análisis. Con la capacidad del motor definida, se tiene la base para el posterior diseño mecánico y eléctrico del banco de pruebas.

⁴ Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE

2.2.1 Casa de la calidad

Las especificaciones técnicas son determinadas con la ayuda del QFD⁵, herramienta que transforma los deseos y requerimientos del cliente, en requerimientos técnicos a ser evaluados, determinando los de mayor importancia., como se presenta en el Anexo 1.

2.2.2 Voz del usuario

El cliente solicita un banco de pruebas para detección de fallas en motores de inducción trifásicos con las siguientes características:

- Que analice fallas en motores trifásicos de una misma potencia y tipo
- Que se diseñe el banco de pruebas para utilizar el MCSA, como técnica de análisis de fallas en motores de inducción trifásicos.
- Que evalúe la falla, por barras rotas, en varios motores de inducción trifásica.
- Que replique las condiciones de funcionamiento normal de un motor en los ensayos.
- Que varíe la carga aplicada al motor.
- Que varíe la velocidad de funcionamiento del motor.
- Que opere en modo manual y automático.
- Que genere y almacene archivos de datos.
- Que monitoree localmente las señales de falla.
- Que proteja a los diferentes equipos contra cortocircuitos y sobrecargas

2.2.3 Voz del ingeniero

Luego del análisis de los requerimientos y deseos del grupo de investigación Wicom Energy, se llega a la conclusión que el diseño y construcción del banco de pruebas para someter motores de inducción a fallas, debe proporcionar una base

⁵ Quality Function Deployment

de datos útil y válida, para la aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento de señales, lo que se traduce en especificaciones técnicas cuantificables, como:

- Tipos de fallas que analiza la técnica MCSA en motores de inducción.
- Amplitud y frecuencia de las señales a adquirir.
- Tipo de motor.
- Características de operación.
- Tipo de Carga que soporta el motor.
- Carga máxima del motor.
- Frecuencia de funcionamiento del motor.
- Tipo de señales que requiere la técnica MCSA.
- Características del software de adquisición de datos.
- Capacidad en memoria fija para archivos de datos.
- Tamaño de pantalla, resolución y tipo de gráficos, para el monitoreo local de las señales.
- Sitio de trabajo.

2.2.4 Especificaciones técnicas.

En la Tabla 2.1 se tiene una lista de especificaciones necesarias para el diseño y construcción de un banco de pruebas para la detección de fallas en motores de inducción trifásica. Estas especificaciones son el resultado del análisis de los requerimientos del Wicom Energy, con las propuestas técnicas del grupo de ingeniería, encargado del diseño y construcción del banco de pruebas.

Tabla 2.1 Especificaciones para el banco de pruebas
(Ribas, 2002).

Empresa: WICOM GROUP ESPE		Fecha inicial: 01/03/2013 Última Revisión: 07/05/2012		
		Producto: Banco de pruebas para motores de inducción trifásicos		
ESPECIFICACIONES				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	01/03/2013	W	R	<p>Analizar los patrones de fallas para en motores de inducción trifásica de 1HP Someter a pruebas de falla motores de un solo tipo y tamaño. Permitir la repetitividad de los ensayos. Facilitar la movilidad y sujeción de los diferentes elementos. Variar la carga y velocidad del motor a prueba. Permitir un modo manual y automático de funcionamiento. Adquirir y almacenar las señales de fallas de corriente y tensión. Generar matrices de datos con los vectores de fallas. Permitir un monitoreo y supervisión local. Proteger al sistema eléctrico y de adquisición de datos. Validar el banco de pruebas, obteniendo los patrones de falla por barras rotas. Uso de software licenciado. Simular parámetros de operación normal del motor Lugar de Operación</p>
Energía	01/03/2013	W	R	Tensión trifásica 220 VAC 60 Hz
Costos y plazo	01/03/2013	W	R	Presupuesto asignado 14660 USD. Tiempo máximo de entrega del proyecto año 2015.
Material	01/03/2013	W	R	<p>Motor trifásico tipo jaula de ardilla:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Potencia: 1 hp - Numero de polos: 4 - Torque: 4.2 Nm - Corriente nominal: 3.2 A - Velocidad: 1800 rpm - Volumen: 285 x 225 x 145 mm - Diámetro del eje: 30 mm - Peso: 17 kg
		W	R	Tipo de sensor: Efecto hall
		W	R	Variador de frecuencia: 0 – 60 Hz
		W	R	Carga variable
Fallas	01/03/2013	W	R	Barras rotas del motor
		W+I	D	Rodamientos
		W+I	D	Excentricidad
		W+I	D	Devanado del rotor
Técnica	01/03/2013	W	R	Análisis de la corriente de alimentación: MCSA
Vida Útil	01/03/2013	W+I	R	En operación 10 años, fiabilidad del 99%
Dimensión	01/03/2013	W+I	R	Matrices de datos: > 300000:3
Fuerza	01/03/2013	W	R	Carga: 0 – 100 % Velocidad: 0 – 1800 rpm
Señales y Control	01/03/2013	W	R	<p>Corriente de alimentación:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Numero de fases: 3 - Frecuencia: 0 – 1000 Hz - Amplitud: 0 – 20 A - Frecuencia de muestreo: > 3 KHz - Resolución: > 16 bits
	01/03/2013	W	R	<p>Tensión de alimentación:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Número de fases: 1 - Frecuencia: 0 – 120 Hz - Amplitud: 0 – 220 VAC - Frecuencia de muestreo: > 3 KHz - Resolución: > 16 bits

	01/03/2013	W	R	Generar secuencias de prueba manuales y automáticas
	01/03/2013			Graficas de respuesta en tiempo y frecuencia
Seguridad y ergonomía	01/03/2013	W + I	R	Protección contra cortocircuitos
	01/03/2013	W + I	R	Protección contra sobrecargas
	01/03/2013	W + I	D	Tablero de control para encendido y apagado del sistema
Transporte	01/03/2013	W	D	Sistema compacto

Propone: I = Ingeniería; W = Wicom Group.

R/D: R = Requisito; D = Deseo.

2.3 Diseño conceptual

Esta etapa usa las especificaciones del producto, y genera varias alternativas de solución que son evaluadas, es seleccionada la idea con mejores prestaciones, obteniendo una solución conveniente.

2.3.1 Análisis funcional

En la función global o nivel 0 se presenta la función principal del banco de pruebas, misma que es, someter motores de inducción trifásica de 1 hp con una fallas de un solo tipo, a pruebas de variación de carga y velocidad, para obtener patrones de respuesta en base al análisis de corrientes por el método de MCSA.

El nivel 0 para el análisis funcional planteado, se presenta en la Figura 2.3.

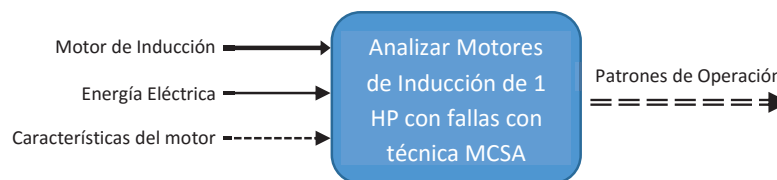


Figura 2.3 Análisis funcional banco de prueba – Nivel 0.

Las funciones o procesos relacionados a las pruebas de los motores en el Nivel 1, considera en general el nivel de análisis al que serán sometidos los mismos en función de lo requerido por el usuario, como se observa en la Figura 2.4.

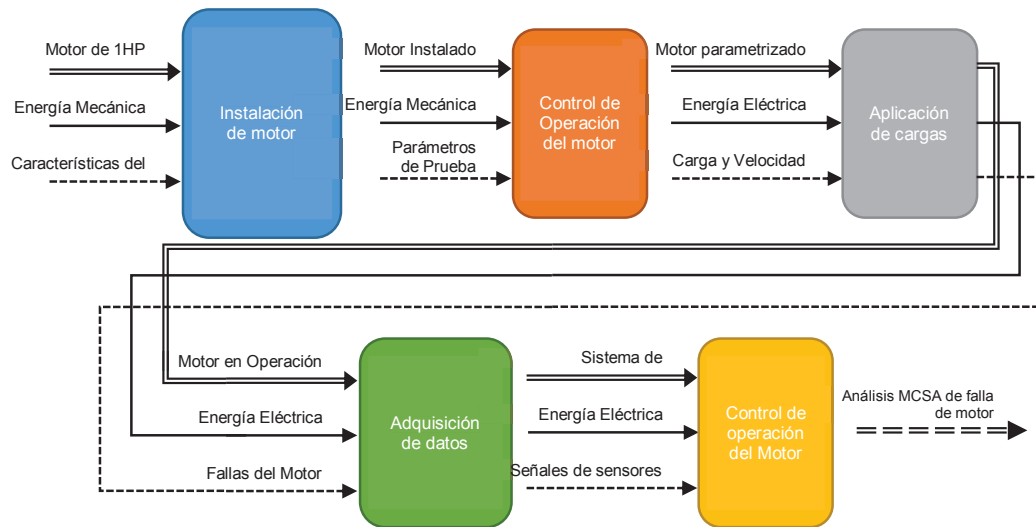


Figura 2.4 Análisis funcional banco de prueba - Nivel 1.

En el nivel 2, se desglosan varias acciones de cada proceso designado en el nivel 1, como se muestra en la Figura 2.5. En este nivel está considerado las solicitudes del cliente tales como, replicar las condiciones de funcionamiento del motor en los ensayos y facilidad de instalación, por lo que implica el posicionamiento, forma de sujeción y acoplamiento del motor, también en este nivel se describen las señales a ser adquiridas para el procesamiento de la información y las señales a ser adquiridas, debido a que el cliente solicita un análisis a través de MCSA de las fallas de un motor.

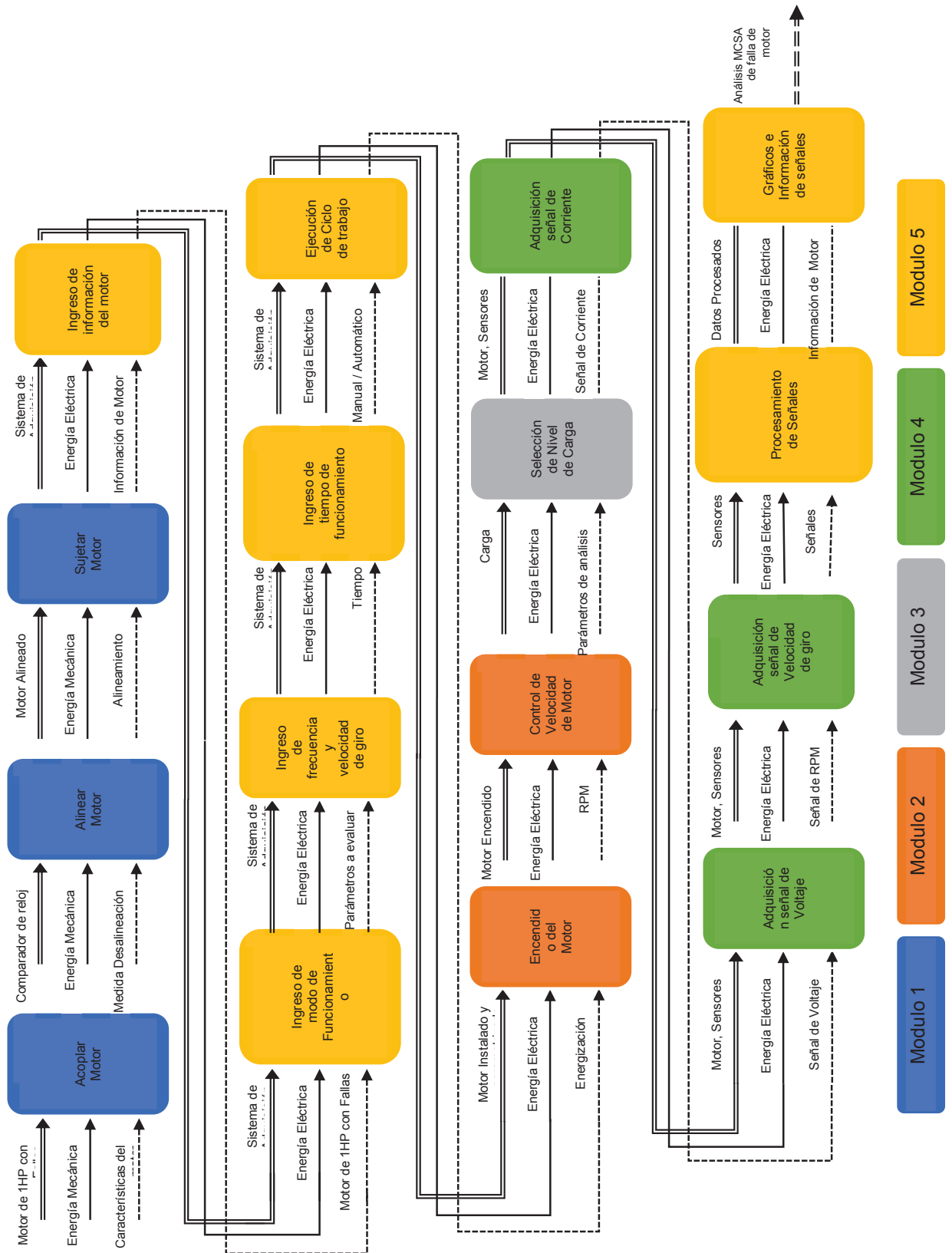


Figura 2.5 Análisis funcional banco de prueba - Nivel 2.

2.3.2 Definición de módulos funcionales

La modularidad del diseño nos permite definir varios bloques funcionales, que permiten facilitar la construcción del equipo permitiendo optimizar recursos, análisis de problemas en el diseño y evitar soluciones inconsistentes.

El banco de pruebas presenta en su análisis funcional cinco etapas que a la vez son los módulos funcionales considerados en el diseño, mismos que son:

- Instalación del Motor (Modulo 1)
- Control de Operación del Motor (Modulo 2)
- Aplicación de carga al motor (Modulo 3)
- Adquisición de datos (Modulo 4)
- Procesamiento y evaluación de señales (Modulo 5)

2.3.3 Soluciones para cada módulo

Módulo 1: Instalación del Motor

En el primer módulo se analiza las especificaciones del cliente, donde requiere información de fallas en motores de 1HP, debe ser de un solo tipo y tamaño. Por otro lado debe considerarse que la instalación del mismo debe permitir la repetitividad de los ensayos, la simulación de condiciones operación comunes donde físicamente se consideraría el tipo sujeción, tipo de acoplamiento entre motor – carga, fácil instalación y con operación en el laboratorio del WICOM Energy.

En este caso se plantea una solución única a ser considerada que consta de una estructura soporte donde será montado un motor de 1 HP con sujeción inferior con patas, también se cuenta con un acople motor-carga que facilita la instalación, sujeción y alineamiento del motor, por otra parte para la facilidad de monitoreo y supervisión local se considera el acoplamiento de todos los elementos de control y carga.

Módulo 2: Control de Operación del Motor

Este módulo debe realizar el control de la velocidad del motor para su funcionamiento en las diferentes secuencias de trabajo, tanto manual como automático, proporcionando variación en la frecuencia de funcionamiento del equipo, en esta función existe una única alternativa con capacidad de ejecutar esta función.

El comando y protección electrónica de motores provee un desempeño mayor que las soluciones tradicionales electromecánicas. Cuando la necesidad es únicamente arrancar un motor, la opción idónea es elegir entre los métodos tradicionales electromecánicos de arranque (directo o a tensión reducida como estrella triángulo o autotransformador para motores jaula de ardilla, o con resistencias rotóricas para motores de rotor bobinado, entre otros), y un arrancador electrónico progresivo.

Cómo la necesidad fundamental del banco de pruebas es poder variar la velocidad y controlar el par del motor, y con esto analizar los patrones de respuesta asociados a falla por barras rotas, las opciones restantes serían implementar alguna solución mecánica, utilizar un motor especial (de corriente continua, servo, etc.), o la que se ha seleccionado finalmente, utilizar un motor asíncrono jaula de ardilla con variador de frecuencia como el mostrado en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Variador de frecuencia Schneider-Altivar 312.

Para la elección correcta del variador se debe considerar la red de suministro, entrada y salida (E/S o I/O), comunicaciones, control, programación y

monitorización del variador (o variadores) en el conjunto de aparatos de control empleados.

Módulo 3: Aplicación de carga al motor

Para este módulo se enfoca específicamente en la aplicación de carga al motor, para cumplir con las condiciones expuestas por el usuario, es necesario también considerar el requerimiento que solicita reproducir las diferentes condiciones reales de trabajo, esto se traduce en tener diferentes niveles de carga aplicadas al motor, considerando estas condiciones se presentan las siguientes soluciones.

a. Motor síncrono de imanes permanentes

Aplicar carga al motor trifásico de pruebas mediante un motor síncrono asegura niveles de precisión en la toma de datos y determinación de patrones, además que es un elemento muy resistente en el área de la industria siendo sencilla la medición del torque y la velocidad de giro. El motor de imanes permanentes se muestra en la Figura 2.7.

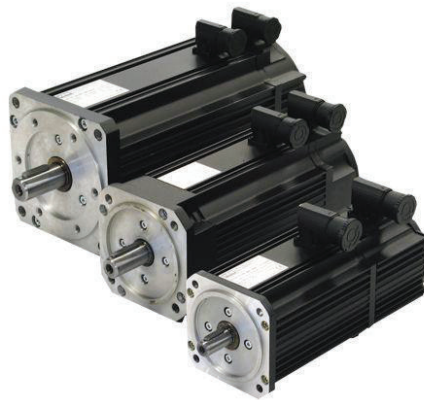


Figura 2.7 Motor síncrono de imanes permanentes.

b. Generador de DC

En términos generales, los generadores son máquinas eléctricas que se utilizan para convertir la energía mecánica en eléctrica, o a la inversa, con medios electromagnéticos. A una máquina que convierte la energía mecánica en eléctrica se le denomina generador, alternador o dínamo, y a una máquina que convierte la

energía eléctrica en mecánica se le denomina motor. Al aplicarle carga a este generador, se logrará variar la corriente del motor de inducción para las diferentes pruebas, y de esta manera obtener los patrones de respuesta (Guerrero Pérez, 2011).



Figura 2.8 Generador de DC – DEGEM 43.

Módulo 4 Adquisición de Datos

En este módulo se encuentra la parte neurálgica del sistema que permitirá cumplir con el principal requisito del usuario que es, tener la información de la falla en el motor a través de la técnica MCSA, en este módulo se obtiene las señales de operación del equipo y se adquiere la información entregada por los sensores.

Esta función tiene el objetivo de tomar muestras de la señal de voltaje, corriente y velocidad de giro del motor, a través de tarjetas de adquisición de datos o módulos de entradas analógicas (Daneri, 2008).

A continuación se presentan posibles soluciones para esta función

a. Tarjetas de adquisición de datos

Estas tarjetas de adquisición de datos trabajan conectadas a un Pc de escritorio por medio del bus PCI y cuentan con una gran resolución de bits de lectura, aproximadamente de 12 a 14 bits.

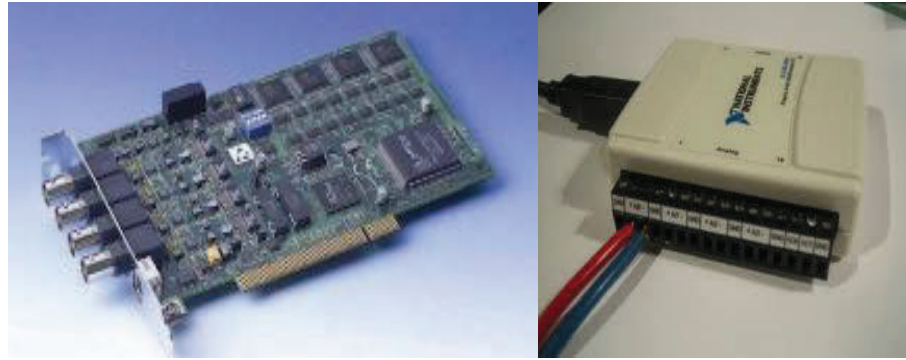


Figura 2.9 Tarjetas de adquisición de datos.

b. Módulos de entradas analógicas

En la actualidad con el avance tecnológico se cuenta con sistemas embebidos, robustos y con gran capacidad de procesamiento de información, como son los controladores en tiempo real modulares, los cuales se los puede configurar de acuerdo a los requerimientos de las aplicaciones. Uno de estos módulos son las entradas analógicas, que tienen la capacidad de trabajar independientemente con una resolución que va desde los 16 a 24 bits con entradas de rango de voltaje de 110 o 220 AC. National Instruments ofrece las CDAQ, que son sistemas de adquisición de datos que pueden ser configurados en base a las necesidades de la aplicación como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10 Módulo de entradas analógicas NI.

Módulo 5: Procesamiento y evaluación de señales

Finalmente para lograr el principal requerimiento del usuario que son los resultados para el análisis MCSA, se procesan los vectores de voltaje y corriente que son muestreados, grafican y almacenados por un controlador central. Esta función es la última en el proceso de evaluación de las señales de falla.

Además de las funciones principales este módulo permite cumplir con otras funciones de operación tales como: ingreso de información del motor, modo y tiempo de funcionamiento, ciclos de frecuencia y velocidad de operación del motor, procesar señales de falla, graficar señales de falla, almacenar señales de falla y generación de matriz de datos e información

a. Computador de escritorio (PC)

Un computador de escritorio tiene elevada velocidad de procesamiento y gran capacidad de manejo de memoria, lo que permite la implementación y ejecución de los algoritmos de detección y clasificación de las señales. Además facilita el almacenamiento de datos en tiempos prolongados de funcionamiento y la configuración e intercambio de información desde la planta.



Figura 2.11 PC de escritorio como controlador central.

b. Controlador en tiempo real (PLC)

Los controladores lógicos programables PLC⁶, son dispositivos muy robustos que procesan la información en tiempo real, con aceptable capacidad de almacenamiento de información. Existen de tipo compacto y modular para acoplarse a diferentes requerimientos de la aplicación.

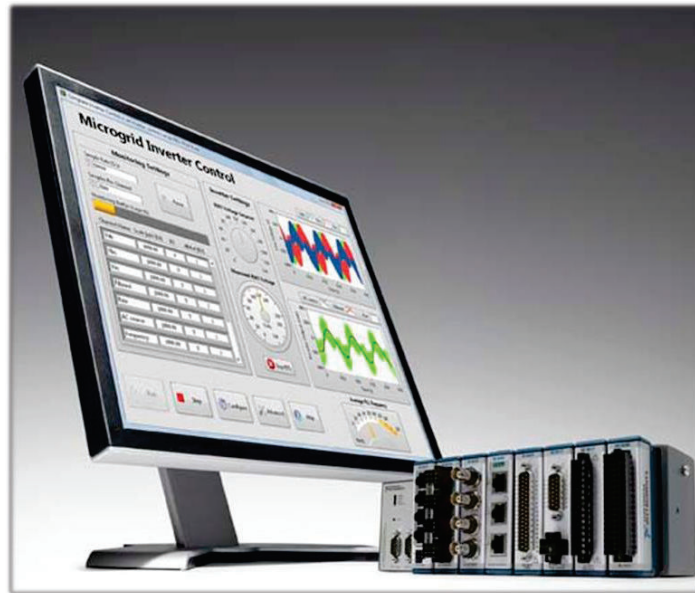


Figura 2.12 Controlador en tiempo real – COMPAC RIO NI.

2.4 Matriz morfológica

En la matriz morfológica se determina las diferentes alternativas de solución para la función del banco de pruebas para motores, se procura una combinación adecuada de soluciones que se acople a las exigencias y requerimientos del cliente, como se presenta en la Tabla 2.2.

La matriz se encuentra dividida en dos etapas que permite analizar objetivamente la solución más viable.

⁶ Controlador lógico programable

Tabla 2.2 Matriz morfológica.

FUNCIÓN	COMPONENTE
Acoplar motor	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Acoplamiento con junta flexible</div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↓ ↓ </div>
Alinear motor	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Reloj Palpador con soporte magnético</div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↓ ↓ </div>
Sujetar motor	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Empernado</div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↓ ↓ </div>
Accionamiento de motor	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Variador de Velocidad</div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↓ ↓ </div>
Control de Velocidad	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Variador de Velocidad</div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↓ ↓ </div>
Aplicación de Carga	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Generador de DC</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Motor síncrono de imanes permanentes</div> </div> <p style="text-align: center; color: orange;">Alternativa 1 - Alternativa 2</p>
Adquirir señales de voltaje	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">CDAQ</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Módulo de entradas analógicas</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↔ ↔ </div>
Adquirir señales de corriente	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Sensor de Efecto Hall</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Punta Amperimetrica</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↔ ↔ </div>
Adquirir señal de velocidad del motor	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Tacómetro Digital</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Encoder Incremental</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↔ ↔ </div>
Procesar señales de falla Almacenar señales de falla	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Controlador de Tiempo Real</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Computador Personal</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> ↓ ↓ </div>
Graficar señales de falla	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Panel de Operador</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Monitor</div> </div>
Soluciones	Alternativa 1 - Alternativa 2

2.5 Método de Selección

2.5.1 Matriz de criterios ponderados

A fin de determinar la solución que resulte más conveniente se emplea una metodología ordinal corregida de criterios ponderados, en las funciones que presentan varias alternativas.

a. Aplicación de Carga.

Las alternativas de solución para esta función son:

Alternativa 1: Variador de velocidad y motor síncrono de imanes permanentes

Alternativa 2: Variador de velocidad y generador de DC

Los criterios de valoración más determinantes para este módulo se listan a continuación:

- Costo accesible
- Complejidad en los circuitos de variación de carga
- Disponibilidad

Tabla 2.3 Evaluación criterios.

	Costo accesible	Circuitería de variación de carga	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo accesible		0	0.5	1.5	0.25
Complejidad de circuitos	1		1	3	0.5
Disponibilidad	0.5	0		1.5	0.25
			Suma	6	1
Complejidad en los circuitos de variación de carga > costo accesible = disponibilidad					

A continuación se evalúa las alternativas de solución respecto a cada criterio

Tabla 2.4 Evaluación soluciones respecto a costo accesible.

Costo accesible	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.33
Alternativa 2	1		2	0.66
			3	1
Alternativa 2 > Alternativa 1				

Tabla 2.5 Evaluación soluciones respecto a complejidad de circuitos de variación de carga.

Circuitería de variación de carga	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0.66
Alternativa 2	0		1	0.33
			3	1
Alternativa 1 > Alternativa 2				

Tabla 2.6 Evaluación soluciones respecto a disponibilidad.

Disponibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.33
Alternativa 2	1		2	0.66
			3	1
Alternativa 2 > Alternativa 1				

Finalmente se presenta la Tabla 2.7 de conclusiones para la función, en donde la alternativa 2: variador de velocidad y generador de DC, es la solución con mayor peso.

Tabla 2.7 Conclusiones.

Conclusiones	Costo accesible	Circuitería de variación de carga	Disponibilidad	\sum	Prioridad
Alternativa 1	0.33x0.25	0.66x0.5	0.33x0.25	0.495	2
Alternativa 2	0.66x0.25	0.33x0.5	0.66x0.25	0.495	1

b. Adquisición de datos, procesamiento y evaluación de señales

Las alternativas de solución para estas funciones son:

Alternativa 1: Modulo de entradas analógicas, sensor de efecto hall, controlador PLC y panel de operador

Alternativa 2: CDAQ, punta amperimétrica, tacómetro, PC y monitor

Los criterios de valoración más determinantes para este módulo se listan a continuación

- Inmunidad al ruido
- Velocidad de procesamiento
- Robustez
- Capacidad de memoria

La evaluación de los criterios, para las funciones se detalla en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Evaluación criterios.

	Inmunidad al ruido	Velocidad de procesamiento	Robustez	Capacidad de memoria	$\Sigma+1$	Ponderación
Inmunidad al ruido		0.5	1	1	2.5	0.31
Velocidad de procesamiento	0.5		1	1	2.5	0.31
Robustez	0	0		0.5	1.5	0.19
Capacidad de memoria	0	0	0.5		1.5	0.19
			Suma		8	1
Inmunidad al ruido = velocidad de procesamiento > capacidad de memoria = robustez						

A continuación se evalúa las alternativas de solución respecto a cada criterio.

Tabla 2.9 Evaluación soluciones respecto a inmunidad al ruido.

Inmunidad al ruido	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.33
Alternativa 2	1		2	0.66
			3	1
Alternativa 2 > Alternativa 1				

Tabla 2.10 Evaluación soluciones respecto a velocidad de procesamiento.

Velocidad de procesamiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.33
Alternativa 2	1		2	0.66
			3	1
Alternativa 2 > Alternativa				

Tabla 2.11 Evaluación soluciones respecto a buena robustez.

Robustez	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0.66
Alternativa 2	0		1	0.33
			3	1
Alternativa 1 > Alternativa 2				

Tabla 2.12 Evaluación soluciones respecto a capacidad de memoria.

Capacidad de memoria	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.33
Alternativa 2	1		2	0.66
			3	1
Alternativa 2 > Alternativa 1				

Finalmente se presenta la Tabla 2.13 donde se concluye que la alternativa 2: CDAQ, punta amperimétrica, tacómetro, PC y monitor, es la solución con mayor prioridad.

Tabla 2.13 Conclusiones.

Conclusiones	Inmunidad al ruido	Velocidad de procesamiento	Robustez	Capacidad de memoria	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.33x0.31	0.33x0.31	0.66x0.19	0.33x0.19	0.393	2
Alternativa 2	0.66x0.31	0.66x0.31	0.33x0.19	0.66x0.19	0.597	1

Finalmente como resultado de la evaluación está determinado que el banco de pruebas se encontrara compuesto de los siguientes componentes:

- Variador de velocidad
- Generador de DC
- CDAQ
- Punta Amperimétrica,
- Tacómetro
- PC y monitor

CAPITULO 3

3. DISEÑO

Como resultado del análisis, estudio y selección de alternativas para el banco de pruebas de motores de inducción trifásica, se propone el diseño mostrado en la Figura 3.1, que cumple los requerimientos de casa de la calidad y las especificaciones técnicas de la Tabla 2.1 (Ribas, 2002).

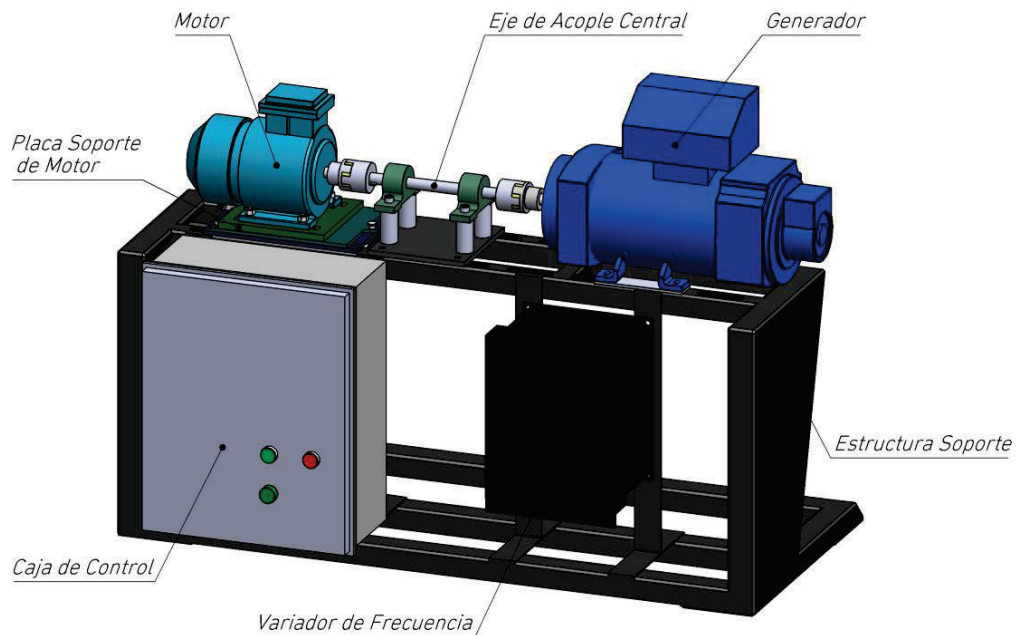


Figura 3.1 Banco de pruebas para detección de fallas propuesto

Como requisito principal para el banco, el grupo de investigación Wicom Energy proporciona cuatro motores de inducción trifásicos de 1 Hp de potencia, serie M2QA 80M4B y marca ABB. Las principales características técnicas de este motor se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos técnicos para motores trifásicos del tipo jaula de ardilla
(ABB LV Motors, 2008).

Potencia		Eficiencia [%]		Factor de potencia		Corriente			Torque			Momento de inercia		Peso [kg]	Ruido [dBA]					
[kW]	[HP]	% de la potencia nominal			FS			In [A]	Is In [A]	Ivacio [A]	Tn [Nm]	Ts Tn	Tmax Tn			J=1/4GD2 [kgm ²]				
4 polos = 1800 r/min		440 V 60 Hz																		
0,25	0,33	M2QA	71 M4A	1679	60,1	66,3	66,9	0,48	0,63	0,72	1,15	0,68	3,2	0,6	1,4	2,2	2,7	0,00053	11	46
0,37	0,5	M2QA	71 M4A	1614	66,2	66,4	62,7	0,62	0,75	0,82	1,15	0,95	4,9	0,6	2,2	1,4	1,7	0,00053	11	46
0,55	0,75	M2QA	71 M4B	1609	69,4	69,2	65,3	0,66	0,78	0,85	1,15	1,3	4,9	0,6	3,3	1,4	1,7	0,00066	11	48
0,75	1	M2QA	80 M4B	1687	69,2	74,8	75,4	0,53	0,67	0,77	1,15	1,7	5,6	1,3	4,2	2,5	2,5	0,00174	17	50
1,1	1,5	M2QA	80 M4B*	1625	74,7	74,7	70,9	0,67	0,80	0,85	1	2,4	5,6	1,3	6,6	1,6	1,6	0,00174	17	50
1,5	2	M2QA	90 S4A	1644	76,8	77,8	75,0	0,65	0,77	0,83	1,15	3,1	5,5	1,4	8,7	1,7	1,7	0,00254	21	56
2,2	3	M2QA	100 L4A	1724	80,0	82,7	82,1	0,63	0,74	0,80	1,15	4,4	5,5	2,6	12,2	2,3	2,6	0,00679	32	57
3	4	M2QA	100 L4B	1706	81,1	83,6	83,1	0,72	0,81	0,87	1,15	5,5	6,0	2,8	16,8	2,3	2,6	0,00862	36	57
3,7	5	M2QA	112 M4A	1730	82,6	85,4	85,4	0,61	0,73	0,80	1,15	7,2	6,0	4,4	20,4	2,6	3,0	0,01306	45	60
4,5	6	M2QA	112 M4A	1715	84,3	85,5	84,6	0,67	0,77	0,84	1,15	8,3	4,8	4,4	25,1	2,1	2,4	0,01306	45	60

En la Tabla 3.2, se muestran los parámetros del motor de inducción que se consideran para el diseño y dimensionamiento de los módulos funcionales del banco de pruebas.

Tabla 3.2 Parámetros del motor considerados para el diseño del banco de pruebas
(ABB LV Motors, 2008).

Característica	Descripción
Marca	ABB
Serie	M2QA 80M4B
Motor	Trifásico
Tipo	Jaula de ardilla
Aplicación	General
Potencia	1hp - 0,75kw
Voltaje	220 VAC
Velocidad	1687 rpm
Frecuencia	60 Hz
Corriente nominal	3.4 A
Torque nominal	4.2 Nm
Factor de potencia	0.53
Momento de inercia	0.00174 kgm ²
Número de barras por fase	8
Número de polos	4
Material	Hierro fundido
Peso	17 kg
Forma constructiva	IM1001, B3 con apoyos
Posición de la caja de conexiones	Parte superior
Dirección de rotación	Bidireccional
Dimensiones	Anexo 2

3.1 Diseño y selección del circuito de mando y potencia.

Este módulo tiene como función proteger al sistema contra cortocircuitos y sobrecargas, además de variar la velocidad de funcionamiento del motor. Para

efectuar el cálculo de los cables, protecciones y elementos de potencia, se utiliza la corriente nominal del receptor a plena carga, que según la tabla proporcionada por el fabricante ABB, para un motor de 1 Hp con una tensión de alimentación de 220 VAC, la corriente nominal es:

$$I_N = 3.4 A$$

3.1.1 Cálculo de los conductores.

Para calcular la intensidad de corriente máxima admisible que circula por el circuito, tomando en cuenta: los factores de simultaneidad, utilización de las cargas y los picos de corriente de arranque del motor, la norma NEC en la sección 430-22, establece que se debe prever un incremento de corriente del 125% sobre la nominal (Baisón Santiago, 2010).

Por lo tanto la corriente máxima admisible que circula por los conductores es:

$$I_{m\acute{a}x} = I_N \cdot 125\% \quad (3.1)$$

$$I_{m\acute{a}x} = (3.4) \cdot (1.25)$$

$$I_{m\acute{a}x} = 4.25 A$$

Con el valor de la corriente máxima admisible que circula por el tablero eléctrico, se selecciona el tipo y calibre de los conductores, pulsadores y lámparas indicadoras. La Tabla 3.3 muestra los elementos de mando utilizados en el circuito eléctrico del banco de pruebas, que cumplen con los requerimientos de diseño.

Tabla 3.3 Parámetros - Conductores, pulsadores y lámparas indicadoras (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION, 2004).

Característica	Descripción
Tipo de cable	16 AWG
Pulsadores	1 - NO 1 - NC
Lámparas indicadoras	1 - Roja – 220 VAC 1 - Verde – 220 VAC

3.1.2 Cálculo del contactor.

Para el cálculo y selección del contactor, se necesita definir la corriente de corte y la categoría de empleo, tipo de bobina y número de contactos auxiliares, para lo cual se considera los requerimientos de la Tabla 3.2 como características del receptor. En la Tabla 3.4, se especifica las categorías de servicio y las aplicaciones generales de cada categoría, observando que la categoría del contactor a utilizar es AC3, puesto que es para un motor de inducción jaula de ardilla (Baisón Santiago, 2010).

Tabla 3.4 Categorías de servicio para contactor
Norma IEC 947-4 (UNE-EN 60947-4).

CATEGORÍA	APLICACIONES CARACTERÍSTICAS	
CORRIENTE ALTERNA	AC1	Cargas no inductivas o ligeramente inductivas, hornos y resistencias.
	AC2	Arranque de motores de rotor bobinado, inversión del sentido de giro
	AC3	Arranque de motores de jaula de ardilla. Desconexión de motores en marcha.
	AC4	Arranque de motores de jaula de ardilla. Inversión a rotor lanzado y marcha por impulsos.
CORRIENTE CONTINUA	DC1	Cargas no inductivas o ligeramente inductivas, hornos y resistencias.
	DC2	Arranque de motores con excitación en derivación, desconexión de motores durante la marcha.
	DC3	Arranque de motores con excitación en derivación. Inversión a rotor lanzado y marcha por impulsos
	DC4	Arranque de motores con excitación en serie, desconexión de motores durante la marcha.
	DC5	Arranque de motores con excitación en serie. Inversión a rotor lanzado y marcha por impulsos

Con la categoría de servicio seleccionada, se realiza el cálculo de la corriente de corte, en base a la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Factor de potencia en base a la categoría de servicio
Norma IEC 947-4 (UNE-EN 60947-4).

Categoría de servicio	I_c/I_e	Factor de potencia
AC1	1	0,95
AC2	2,5	0,65
AC3	1	0,35
AC4	6	0,35

Por lo tanto la corriente de corte I_c para una categoría de servicio AC3, donde

$$I_e = I_N, \text{ es:}$$

$$\frac{I_C}{I_N} \cdot (0.35) = 1 \quad (3.2)$$

$$\frac{I_C}{3.4 A} \cdot (0.35) = 1$$

$$I_C = 9.7 A$$

En la Tabla 3.6 se muestran las características técnicas del contactor utilizado.

Tabla 3.6 Parámetros - contactor.

Característica	Descripción
Marca	SIEMENS
Modelo	SIRIUS 3RT2024-1AN20
Tipo de accionamiento	Electromagnético
Alimentación	Trifásica
Tensión nominal	220 VAC
Corriente de corte	12 A
Frecuencia	60 Hz
Categoría de servicio	AC3
Tensión de la bobina	220 VAC
Número de contactos secundarios	1 NO 1 NC

3.1.3 Cálculo del guardamotor.

El guardamotor es un dispositivo de maniobra y control magneto-térmico, utilizado para proteger motores de corriente alterna contra cortocircuitos y sobrecargas.

Se dice que un circuito se encuentra sometido a una sobrecarga cuando durante un tiempo determinado es recorrido por una corriente eléctrica, que es mayor a la corriente admisible, y que normalmente no produce ningún tipo de avería en la instalación. Sin embargo cuando el tiempo de la sobrecarga es muy alto, puede ocasionar daños graves en equipos, cables y problemas físicos a las personas.

Para el diseño de las protecciones contra sobre cargas se debe considerar:

- La corriente nominal, de arranque y de funcionamiento en régimen estacionario del motor.
- Las curvas características de intensidad-tiempo

- Los valores en tabla de la marca distribuidora.
- Tamaño del contactor.

La norma IEC 947-4-1-1 define tres tipos de disparo:

- Relés clase 10

Para motores pequeños, de potencia fraccionaria con aceleración casi instantánea cuyo tiempo de disparo es extremadamente corto.

- Relés clase 20

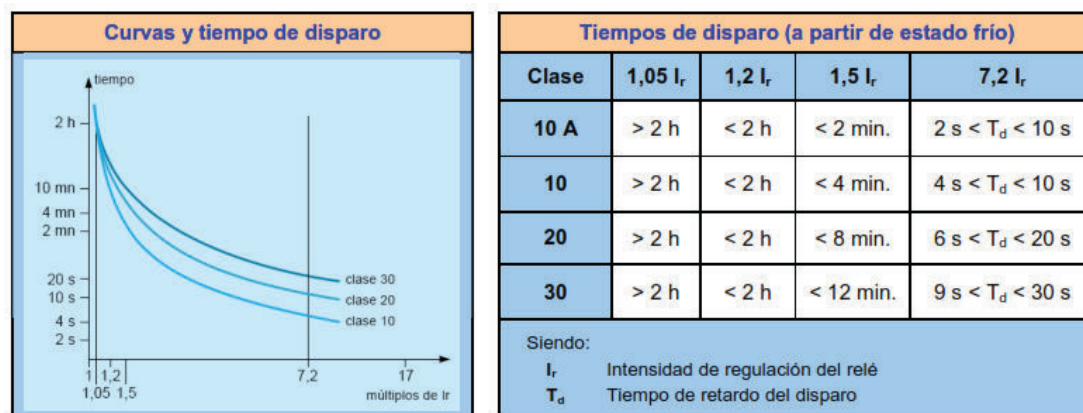
Para la mayoría de los motores de uso general clasificados por NEMA

- Relés clase 30

Para motores con tiempos de aceleración de más de 10 segundos con altas cargas de inercia. Para arranques con un máximo de 30 segundos de duración.

En la Tabla 3.7 se muestra las curvas y clases de disparo de los relés térmicos correspondientes.

Tabla 3.7 Curvas y tiempos de disparo de los relés térmicos
(Guerrero Pérez, 2011).



En la Tabla 3.8 se muestran las características técnicas del guardamotor utilizado, que cumplen con los requerimientos de diseño, considerando una intensidad de regulación $I_r = 3.4 A$ y con un incremento de esta corriente de 125%.

Tabla 3.8 Características técnicas - Guardamotor.

Característica	Descripción
Marca	SIEMENS
Modelo	SIRIUS 3RV2011-1KA10
Clase	10
Tensión nominal	220 VAC
Corriente nominal	4.25 A

3.1.4 Cálculo del generador.

Las características del generador que va a acoplado al motor, se determinan en base a los requerimientos de las diferentes pruebas, a las que son sometidos los motores de inducción, en donde se necesita calcular principalmente la potencia y la velocidad a la cual opera la carga.

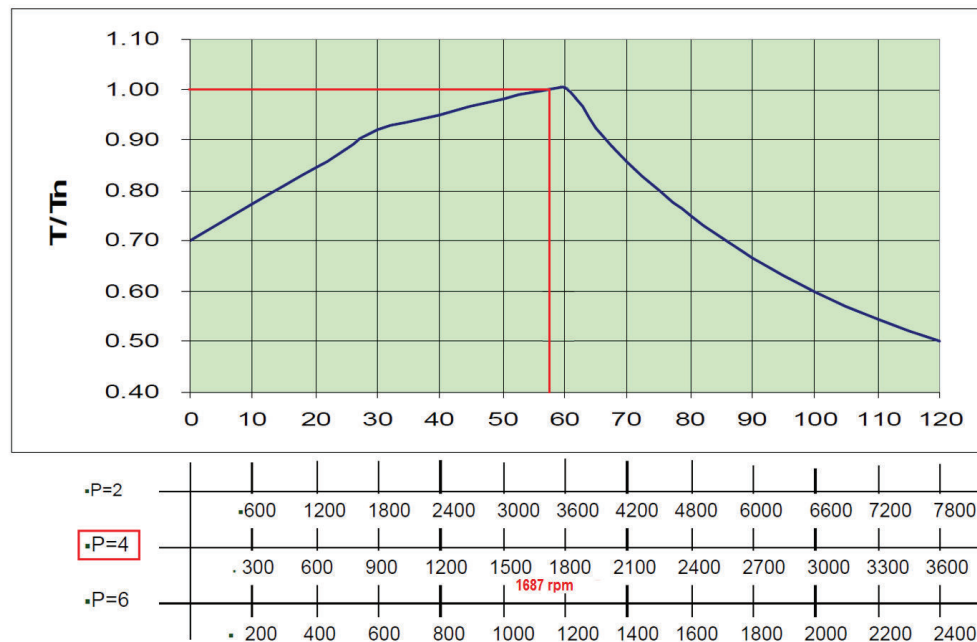


Figura 3.2 Curva de carga de motores de inducción por número de polos (Norton, 2011).

En base a la Figura 3.2, que corresponde a la curva de carga de motores de inducción por número de polos y con las especificaciones técnicas de la Tabla 2.1, se determina que el motor a una velocidad nominal de 1687 rpm y cuatro polos, entrega el 100% del par motriz. Con esto se considera la corriente nominal del motor 3.4 A, para calcular la corriente en zona de flujo constante para sobrecargas hasta un 150%.

Por lo tanto:

$$i_m = I_N. (1.5)$$

$$i_m = 3.4 A. (1.5)$$

$$i_m = 5.1 A$$

La corriente en zona de flujo constante, en función del par motriz de la carga, viene dada por la ecuación (3.3).

$$i_m = \left(\frac{T_{carga}}{T_N} \right) I_N \quad (3.3)$$

$$T_{carga} = \frac{i_m \cdot T_N}{I_N}$$

$$T_{carga} = \frac{(5.1 A) \cdot (4.2 N_m)}{3.4 A}$$

$$T_{carga} = 6.3 N_m$$

Para el cálculo de la potencia necesaria de la carga, se parte de la expresión del par motriz transmitido por el eje, y está dada por:

$$T_{carga} = \frac{P_{carga} \cdot 9550}{n} \quad (3.4)$$

Donde:

T_{carga} = Par motriz del generador

P_{carga} = Potencia del generador en kw.

n = Velocidad real de giro del generador.

9550 = Factor numérico para calcular la potencia en revoluciones por minuto $\left(\frac{60}{2\pi} \cdot 1000 \right)$.

Por lo tanto, para una velocidad de giro real de 1687 rpm y un par motriz en el eje de 6.3 N_m , la potencia necesaria del generador para someter los motores a pruebas de sobrecarga es:

$$P_{carga} = \frac{6.3 N_m * 1687 rpm}{9550}$$

$$P_{carga} \geq 1.11 kw$$

En la Tabla 3.9 se plantea las características del generador que cumple con los requerimientos de diseño.

Tabla 3.9 Características técnicas – Generador de DC.

Generador de DC	Marca	DEGEM
	Modelo	DEM- 43
	Potencia	1.6 Kw
	Voltaje de armadura	110 V
	Voltaje de campo	110 V
	Velocidad	1800 rpm
	Tacómetro	Incluido 40 VDC máximo
	Auto inductancia	Si

3.1.5 Cálculo del variador de velocidad.

Los variadores de frecuencia son dispositivos electrónicos, que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción con rotor tipo jaula de ardilla. Estos variadores pueden proporcionar frecuencias de salida superiores a la de trabajo del motor, rectificando la tensión alterna de la red trifásica y por medio de transistores con modulación de anchura de pulso, generar una corriente trifásica de frecuencia y tensión variable.

Para definir la variador más adecuado para el banco de pruebas, se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- Red de suministro: Trifásica (R-S-T)
- Señal de control: 1 entrada analógica (0 – 10 V)
- Tipo de carga: Par variable, potencia constante
- Tipo de motor: Jaula de ardilla
- Rangos de funcionamiento: 0 – 100 Hz
- Par en el arranque: $6.3 N_m$
- Salida: Tres hilos (U-V-W)
- Reactores: PWM o Filtro de potencia activa
- Corriente nominal: 5.1 A

Con estas consideraciones, con la ayuda de tablas y sobre todo teniendo en cuenta equipos disponibles en la Universidad ESPE, en la Tabla 3.10 se muestran las características técnicas del variador de frecuencia utilizado, para la variación y control de velocidad de los motores de inducción del banco de pruebas.

Tabla 3.10 Características técnicas – Variador de velocidad.

Variador de velocidad ATV312HD11M3	Marca:	Schneider
	Modelo:	Altivar 312
	Potencia del motor	11 kW – 15 hp
	Tensión de alimentación	200...240 V (- 15...10 %)
	Frecuencia de alimentación	50...60 Hz (- 5...5 %)
	Número de fases de la red	3 fases
	Corriente de línea	55.6 A para 240 V 63.5 A para 200 V
	Control	Vectorial tipo PWM
	Rango de frecuencias de salida	0...500 Hz
	Número de entradas analógicas	3
	Tipo de entrada analógica	AI3: 0...20 mA AI2: +/- 10 V AI1: 0...10 V

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama esquemático implementado para el circuito de mando y potencia del banco de pruebas.

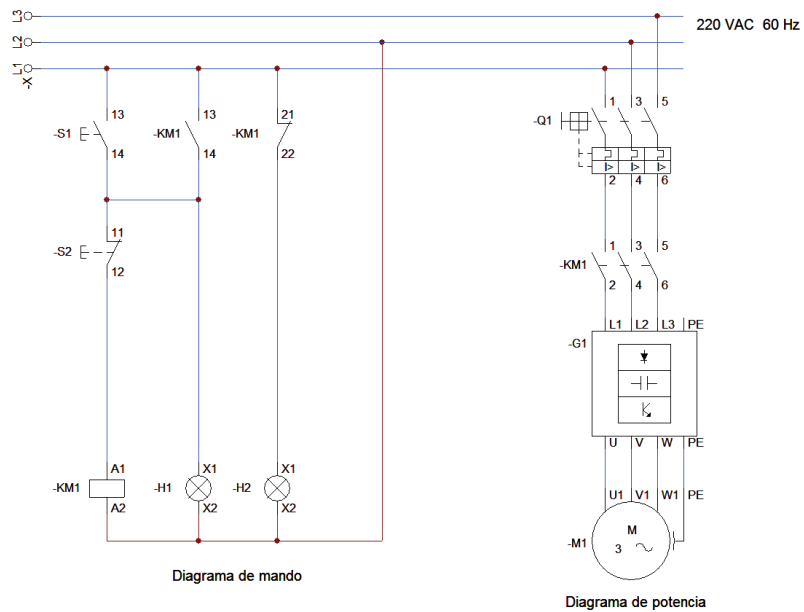


Figura 3.3 Diagrama esquemático del circuito

Conectando el banco de pruebas a la red de suministro trifásico, la lámpara indicadora H2 se enciende. Al presionar el pulsador de arranque S1, la lámpara H1 se enciende, se apaga la lámpara H2 y se activa el contactor KM1 que permite la alimentación trifásica del variador de frecuencia. Al presionar el pulsador de apagado S2, el contactor KM1 se desenchava, la lámpara H1 se apaga y lámpara H2 se enciende nuevamente, indicando que existe alimentación eléctrica hacia el banco.

3.2 Diseño y selección del sistema de adquisición de datos.

Para poder identificar los equipos e instrumentos de una manera sencilla, además de tener claras las condiciones de diseño del banco de pruebas para motores de inducción, en la Figura 3.4 se muestra el diagrama de instrumentación P&ID⁷ según la Norma ISA S5.1. Este diagrama P&ID presenta el flujo del proceso, los equipos instalados y los instrumentos de medición.

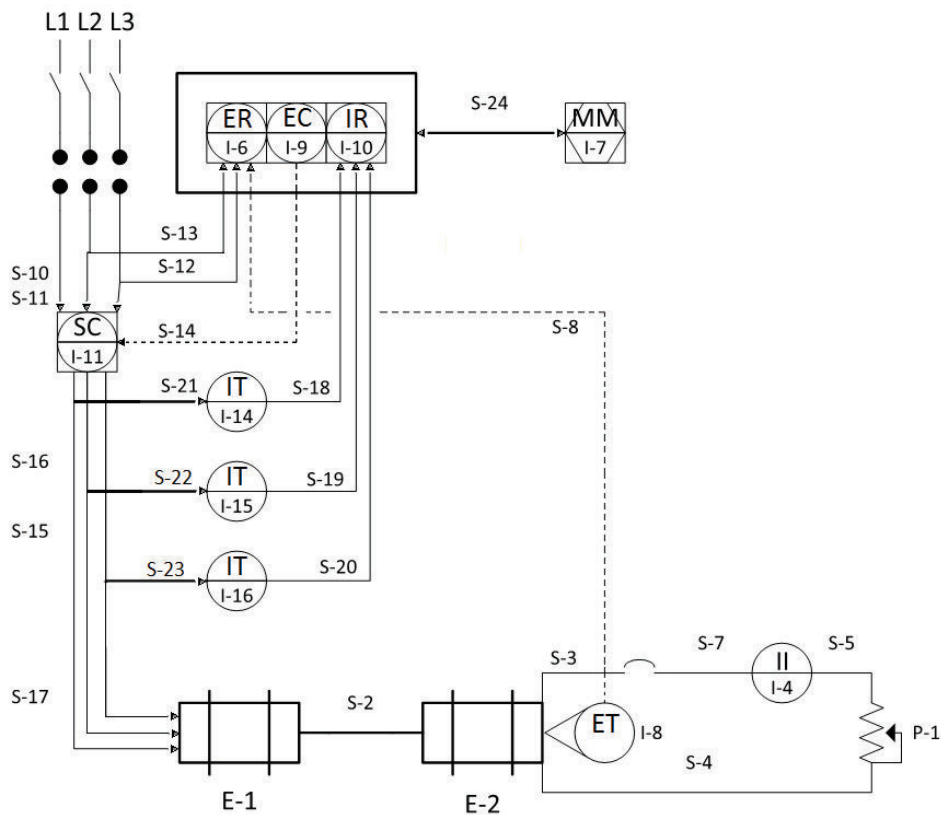


Figura 3.4 Diagrama P&ID del banco de pruebas.

⁷ Piping and Instrumentation Diagram/Drawing

En la Tabla 3.11 se presentan las etiquetas correspondientes, variables medidas y la función de salida de cada uno de los instrumentos considerados en el diagrama P&ID, para el sistema de adquisición de datos.

Tabla 3.11 Identificación de los instrumentos del banco de pruebas
(Norma ISA S5.1)

Etiquetas	Variable	Función de salida	Equipo / Instrumento asignado
ER	Voltaje	Registrador	Módulo de entradas trifásicas
EC	Voltaje	Controlador	Módulo de salidas analógicas
IR	Corriente	Registrador	Módulo de entradas analógicas
SC	Velocidad	Controlador	Variador de frecuencia
IT	Corriente	Transmisor	Sensor de efecto hall
ET	Voltaje	Transmisor	Tacómetro
MM	Multivariable	Multifunción	Estación de procesamiento

En la Tabla 3.12 se especifican las características de cada una de las señales del diagrama de instrumentación, en base a los parámetros requeridos por la técnica de análisis de fallas MCSA (Filippetti, F; Franceschini, G; Tassoni, C; Vas, P;., 1996).

Tabla 3.12 Características de las señales del diagrama P&ID

Instrumento	Lazo	Características de las señales	
ER	S-8	Tensión:	0 – 40 VAC
	S-12	Tensión:	0 – 220 VAC
	S-13	Frecuencia:	60 Hz
EC	S-14	Tensión:	0 - 10 V
IR	S-18	Tensión:	0 – 10 V
	S-19	Frecuencia:	0 – 1000 Hz
	S-20		
SC	S-15	Tensión:	0 – 220 VAC
	S-16	Frecuencia:	0 – 100 Hz
	S-27	Corriente:	0 – 5.1 A
IT	S-21	Frecuencia máxima:	1000 Hz
	S-22	Corriente máxima:	5.1 A
	S-23		
MM	S-24	Ethernet LabView	

En la Tabla 3.13, se muestran las características del módulo de entradas analógicas trifásicas utilizado, que cumple los requisitos para el instrumento ER I-6.

Tabla 3.13 Características técnicas – Módulo de entradas analógicas.

ER I-6	Marca	National Instruments
	Serie	9225
	Canales	3
	Canales diferenciales	3
	Resolución	16 bits
	Muestreo simultáneo	Si
	Velocidad de muestreo	50kS/s/canal
	Ancho de banda	24.56 KHz
	Sistema operativo	Real time
	Rango de medida	300 vrms

En la Tabla 3.14, se muestran las características del módulo de entradas analógicas utilizado, que cumple los requisitos para el instrumento IR I-10.

Tabla 3.14 Características técnicas – Módulo de entradas analógicas trifásicas.

IR I-10	Marca	National Instruments
	Modelo	9215
	Tipo de aplicación	Industrial
	Sistema Operativo	Real Time, Windows
	Tipo de medida	Voltaje
	Tipo de aislamiento	Aislamiento de canal a tierra
	Canales diferenciales	4
	Resolución	16 bits
	Velocidad de muestreo	100kS/s
	Máximo voltaje de entrada analógica	10V
	Muestreo simultáneo	Si
	Conector de E/S	Conectores BNC

En la Tabla 3.15 se muestran las características del módulo de salidas analógicas utilizado, que cumple los requisitos para el instrumento EC I-9.

Tabla 3.15 Características técnicas – Módulo de salidas analógicas.

EC I-9	Marca	National Instruments
	Modelo	9263
	Canales	4
	Actualización simultánea	Si
	Velocidad de actualización	100kS/s
	Resolución	16 bits
	Sistema operativo	Real time - Windows
	Rango de voltaje	-10Vdc a 10Vdc
	Operación intercambiable	Si
	Protección de sobre voltaje	Si
	Protección de corto circuito	Si
	Conector de E/S	Terminales de tornillo

En la Tabla 3.16, se muestran las características del sensor de efecto hall, que cumple los requisitos para el instrumento IT (I-14 I-15 I-16).

Tabla 3.16 Características técnicas Modulo 3 – Punta amperimétrica.

IT I-14 I-15 I-16	Marca	Fluke
	Modelo	i200S
	Tipo	Pinza
	Rango de medida	0,1 a 20 A
	Máxima corriente	24 A
	Señal de salida	100mV/A
	Impedancia de salida:	$\leq 20\Omega @ 1\text{kHz}$
	Ancho de banda	- 1,5 dB 40Hz a 10Khz - 3 dB 40 KHz
	Índice de protección	IP40.
	Temperatura de operación	-10 a 55 C
	Tipo de conector de entrada	BNC

En la Tabla 3.17, se muestran las características de la estación de procesamiento central, que cumple los requisitos para el instrumento MM I-7

Tabla 3.17 Características técnicas – Estación de procesamiento central

MM I-7	Marca	DELL
	Modelo	Optiplex 9010
	Procesador	Core I7
	Velocidad de procesamiento	3.4 GHz
	Memoria RAM	8Gb
	Disco duro	500 Gb
	Sistema operativo	Windows 7

3.3 Diseño de la Interface Hombre-Máquina.

La Interfaz Hombre Máquina (HMI)⁸, para el monitoreo, control y supervisión del banco de pruebas para la detección de fallas en motores de inducción trifásicos, se desarrolla en LabView.

LabView es un entorno de desarrollo basado en programación gráfica. Utiliza símbolos gráficos en lugar de lenguaje textual para describir acciones de programación. Está totalmente integrado para la comunicación con hardware GPIB⁹, RS-485, RS-232¹⁰ y tarjetas de adquisición de datos. Además incorpora librerías para estándares de software como TCP/IP y active X.

3.3.1 Funciones de la HMI

Las funciones que cumple la HMI del banco de pruebas, tomando como referencia las especificaciones técnicas de la Tabla 2.1 requeridas por el cliente, son:

- Monitoreo: Obtener y visualizar los voltajes y corrientes de las fases del motor de inducción trifásico en tiempo real, en forma numérica y gráfica para una lectura más fácil de interpretar.
- Supervisión: Permite junto con el monitoreo, ajustar la velocidad del motor para las diferentes pruebas de carga, desde la computadora.
- Históricos: Capacidad de muestrear y almacenar los vectores de corriente y voltaje de las fases del motor de inducción trifásica, con una frecuencia de 25Khz.

Entre las tareas planteadas para el software de supervisión se tiene:

- Permitir la comunicación con las pinzas amperimétricas y el variador de frecuencia.
- Visualizar las variables: voltaje, corriente, velocidad; mediante pantallas con objetos animados.

⁸ Human Machine Interface.

⁹ Bus de interfaz de propósito general.

¹⁰ Protocolos de comunicación serial Síncrona y Asíncrona respectivamente.

- Permitir que el operador pueda enviar señales de inicio/fin, y ajustes continuos de la velocidad del motor.
- Supervisar la corriente del estator, en función de los parámetros de prueba del motor.
- Almacenar los vectores de corriente y voltaje para análisis estadístico y control.

3.3.2 Criterios para el diseño de la HMI.

La HMI se diseña siguiendo la guía ergonómica GEDIS¹¹, tomando parámetros estéticos como son: la proporción, la simetría y el equilibrio, con el objetivo de facilitar al operador la visualización de los datos, estableciendo diferencias entre ellos, y proporcionando interfaces intuitivas y a prueba de error por parte del usuario.

Los principales criterios que se consideran son:

- **Visibilidad:** la información en la pantalla debe permitir la identificación de elementos gráficos y texto, con un tamaño adecuado para que el usuario no confunda la información.
- **Perceptibilidad:** La identificación del estado de la planta debe ser fácil de identificar para que el usuario tome acciones.
- **Información:** La pantalla debe tener elementos que permiten dar información clara e intuitiva sobre el estado del sistema.
- **Interactividad:** La interfaz debe facilitar accionar comandos al operario.

¹¹ Guía Ergonómica de Diseño de Interfaz de Supervisión.

3.3.3 Estrategias para el diseño de las interfaces.

Con el fin de describir, organizar y estructurar las interfaces humano máquina, del banco de pruebas para motores de inducción trifásica, se propone las siguientes estrategias:

1. Dividir el proceso en etapas que simplifiquen la abstracción mental del usuario, mediante la utilización de la menor cantidad de recursos por ventana, evitando la sobrecarga visual.
2. Emplear metáforas de orientación para obtener facilidad de movimiento y sobre todo una navegación flexible entre ventanas.
3. Realizar una interfaz intuitiva y amigable, determinando alarmas visuales que alerten en el caso de la existencia de algún tipo de error, así como, proporcionar al usuario información clara sobre el desarrollo del proceso evitando la memorización de comandos de navegación o principios de funcionamiento de los diferentes componentes.

3.3.4 Implementación de la interfaz

La interfaz se implementa en una pantalla amplia de 1366 x 768 pixeles, y presenta un diseño sencillo pero a la vez completo, facilitando al usuario el control y visualización del funcionamiento del banco de pruebas en tiempo real.

El sistema permite dos modos de someter los motores a pruebas de falla: manual y automático. En el modo manual el usuario modifica y selecciona los controles individualmente para cada uno de los parámetros que evalúa y almacena el banco. En el modo automático el usuario previamente debe configurar los parámetros de prueba como: velocidad y tiempo de muestreo, para que luego el sistema realice el cambio y la ejecución de la secuencia. La interfaz gráfica se divide en dos pantallas principales: parámetros de prueba y análisis de falla.

3.3.4.1 Pantalla - PARÁMETROS DE PRUEBA

En la Figura 3.5 se muestra la interfaz interactiva o panel frontal de usuario, para configuración de los parámetros de prueba a la que es sometido el motor de inducción. En este panel se simula el funcionamiento de instrumentos reales

como graficas de tendencia, potenciómetros, selectores, indicadores numéricos y digitales. Permite seleccionar el modo de funcionamiento: manual o automático, además de las características de muestreo y el tiempo de adquisición de datos.

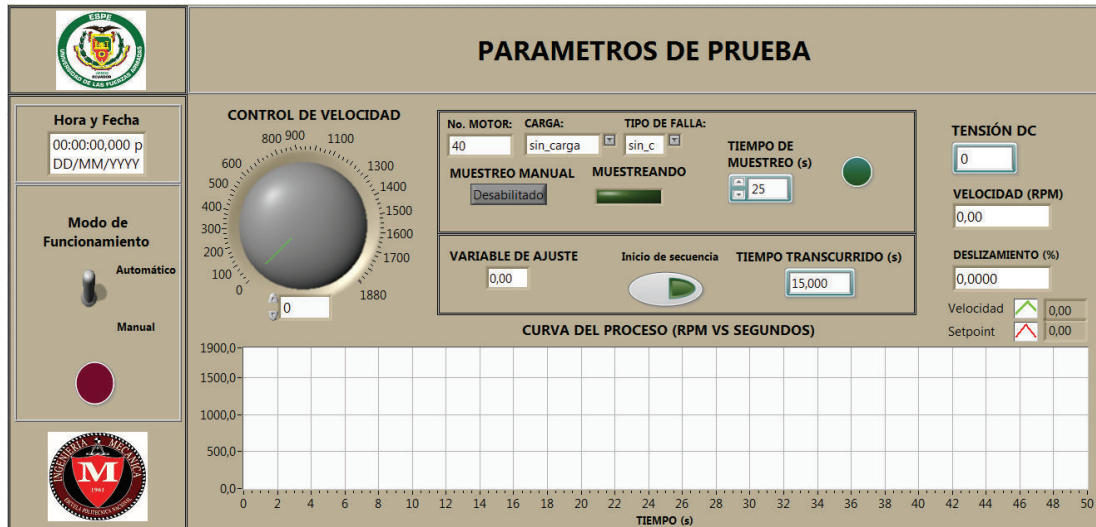


Figura 3.5 Pantalla - Parámetros de prueba

3.3.4.2 Pantalla – ANÁLISIS DE FALLA.

En la Figura 3.6 y Figura 3.7, se muestra la interfaz interactiva o panel frontal de usuario para el análisis de fallas en motores de inducción. En este panel se visualiza las curvas de las corrientes y voltajes del motor, así como los espectros de las corrientes mediante la técnica del MCSA. Una vez que el tiempo de muestreo ha terminado, se almacena automáticamente la información en matrices, que relacionan el nombre de la matriz con los parámetros de prueba previamente ingresados.

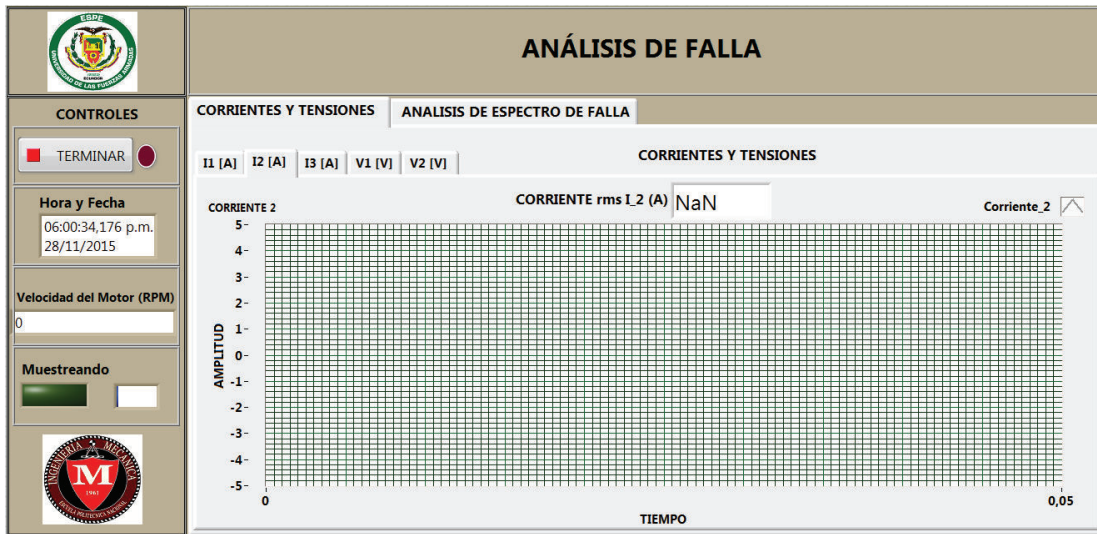


Figura 3.6 Pantalla de análisis de falla - CORRIENTES Y TENSIONES

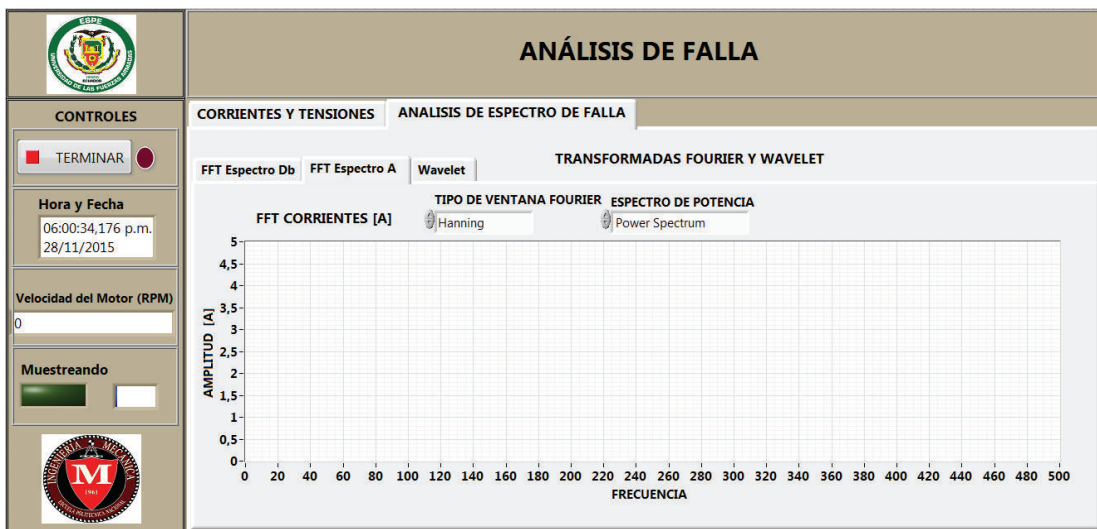


Figura 3.7 Pantalla de análisis de falla – ESPECTRO DE FALLA

3.4 Diseño del módulo de componentes mecánicos

Para el diseño de componentes mecánicos es importante cumplir con las normas y especificaciones que respalden los procedimientos de cálculo, a fin de obtener piezas y estructuras seguras, económicas y funcionales, basadas en las necesidades y requerimientos del cliente. El banco de pruebas cuenta con tres componentes mecánicos como se muestra en la Figura 3.1, los cuales son:

- El eje de acople central entre el motor y el generador,
- Placa de soporte para el acople del motor y
- Estructura soporte principal para el acople de los componentes.

3.4.1 Diseño de acople motor-generador

3.4.1.1 Especificaciones para el diseño del acople motor-generador

El eje de acople central a diseñar permite ensamblar el motor de 0,75 KW de potencia y a un generador eléctrico de 1.6 KW. La finalidad de este eje es el evitar la transmisión de desbalances, excentricidades o vibraciones desde el eje del motor con fallas hacia el eje del generador.

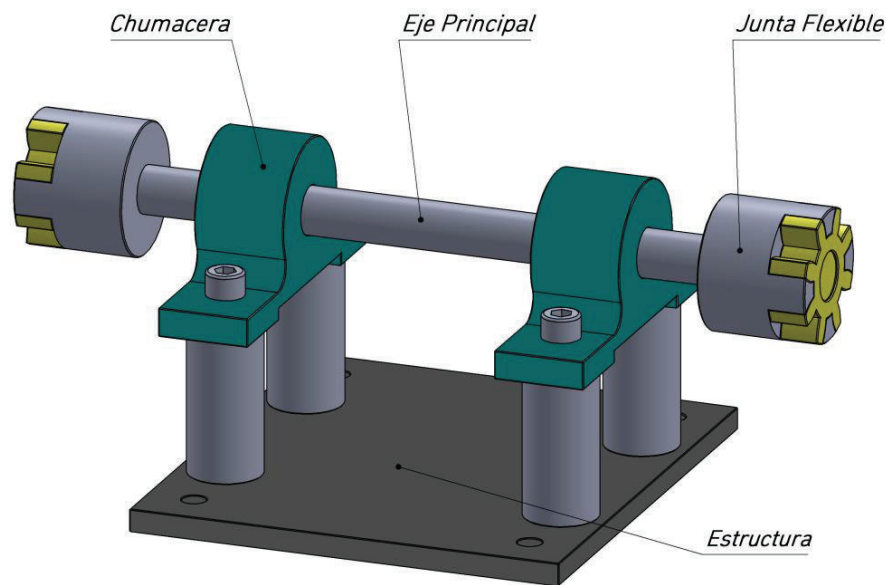


Figura 3.1

Por requerimientos del usuario el acople central trabaja a una velocidad de giro máxima de 1687 rpm y soporta un torque máximo de 4,2 N-m, según las especificaciones del fabricante del motor. (ABB LV Motors, 2008)

El acople consta principalmente de cuatro elementos, los cuales son: un eje principal, dos chumaceras, dos juntas flexibles y una estructura simple que soporta a los elementos y posiciona el eje concéntricamente con el generador y el motor, como se observa en la Figura 3.1.

3.4.1.2 Dimensionamiento

El eje del acople central por la función que cumple en el sistema, es un elemento que se considera sometido a un esfuerzo de torsión debido a tener únicamente la acción del torque. El torque en el motor cambia, en base a la acción del variador de frecuencia sobre la velocidad, lo que convierte al torque en una carga fluctuante en el tiempo de forma repetida, por tal motivo se realiza un cálculo a fatiga aplicando la ecuación (3.5) (Norton, 2011).

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(k_f * M_a)^2 + \frac{3}{4}(k_{fs}T_a)^2}}{S_f} + \frac{\sqrt{(k_{fm} * M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm}T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

Donde:

$d =$ diámetro

$N_f =$ factor de seguridad contra la fatiga

$K_f, K_{fs} =$ Factores de concentración de esfuerzos por fatiga

$M_a, M_m =$ Momento alternante y medio

$T_a, T_m =$ Torque alternante y medio

$S_f =$ Resistencia a la fatiga

$S_{ut} =$ Resistencia última a la tensión

El acero comercial para construcciones mecánicas AISI 1045, que se considera para el diseño del acople, presenta las siguientes características:

- resistencia última a la tensión de 565 MPa,
- resistencia a la flexión de 310 MPa
- dureza de 163 HB.

Para el cálculo de la resistencia a la fatiga se consideran los siguientes factores como:

$C_{carga} =$ (1) por ser una carga por torsión.

$C_{tamaño} =$ (1) por encontrarnos a determinar el diámetro luego corregido.

$C_{superficial} =$ (0.8) por ser una superficie maquinada.

$C_{temperatura} =$ (1) por encontrarse a temperatura ambiente.

$C_{confiabilidad} =$ (0.814) se busca una confiabilidad del 99%.

$$S_e' = 0.5 * S_{ut} = 282.5 \text{ MPa.}$$

Donde

$$S_f = C_{carga} * C_{tamaño} * C_{sup} * C_{temp} * C_{conf} * S_e'$$

$$S_f = 183.964 \text{ MPa}$$

$K_{fs} = 1.57$ Considerando un radio de 2 mm en el escalón y carga por torsión.

En el cálculo se considera un factor de seguridad N_f de 2.5 para asegurar el óptimo funcionamiento del sistema, y por no tener cargas ni momentos externos se asume M_a y M_m igual a 0. Aplicando en la ecuación (3.5), se tiene:

$$d = \left\{ \frac{32(2.5)}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(0)^2 + \frac{3}{4}(1.57 * 4.2 \text{ N.m})^2}}{282.5 \text{ MPa}} + \frac{\sqrt{(0)^2 + \frac{3}{4}(1.57 * 4.2 \text{ N.m})^2}}{565 \text{ MPa}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Por lo tanto:

$$d = 9.17 \text{ mm}$$

Con este resultado de 9.17 mm de diámetro, se plantea la opción de construir el eje con el mismo diámetro del eje del motor de 1 Hp que corresponde a 19 mm, ya que con este diámetro se cumple con los requerimientos de diseño, facilita el acople del motor y la construcción de la junta flexible, y a la vez se aumenta el factor de seguridad a 22.21. El diseño final del eje se muestra Figura 3.2.

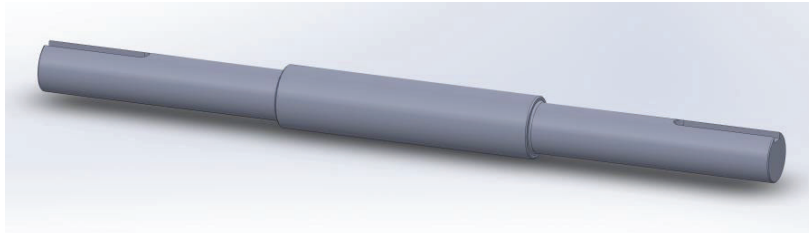


Figura 3.2 Diseño de eje central

3.4.1.3 Selección de rodamientos y selección de juntas.

Las principales consideraciones técnicas establecidas para la selección de las juntas flexibles son:

- Que tolere un torque de 4.2 N-m.
- Diámetro interior de 19 mm.
- Absorba desalineaciones axiales ligeras, angulares hasta de 2°, paralelas no mayores a 0.25 mm y torsionales moderadas.

Debido a que se realizan pruebas de arranque con diferentes cargas y velocidades del motor, es importante que la junta permita absorber el choque que esto genera facilitando el montaje y desmontaje del motor. Por tal motivo y considerando estas características técnicas, se plantea utilizar un acoplamiento de quijada de aluminio marca LoveJoy AL070 con inserto flexible como se muestra en la Figura 3.3.

Los rodamientos se seleccionan tomando en consideración la operación de la máquina, las revoluciones de trabajo y el diámetro del eje central. No son consideradas las cargas debido a que son muy bajas.

Se selecciona una chumacera clase Y, de rodamientos esféricos con un diámetro interior de 20 mm, y con un promedio de revoluciones de 5000 RPM. Se selecciona el rodamiento YAR 204-2RF acoplado en un soporte SY 504 M de la SKF.

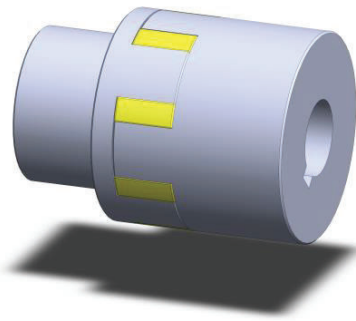


Figura 3.3 Acople de Quijada con inserto Flexible

3.4.2 Diseño de la estructura soporte

La estructura soporte del banco de pruebas para detección de fallas en motores de inducción trifásicos, debe soportar con elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos que componen el equipo como se observa en la Figura 3.1.

Esta bancada está diseñada de una manera funcional para el acoplamiento de:

1. Un Motor trifásico de 1 HP – 0.75 KW
2. Un generador de DC de 1.6 KW
3. Un eje de acople entre motor y generador
4. Una caja de control
5. Un variador de frecuencia 15 Hp

La estructura soporte se encuentra elaborada con perfiles laminados de acero de 2.5 mm de espesor y unido a través de soldadura. Da soporte a un motor que se encuentra fijado firmemente a la estructura. Para el desarrollo de las pruebas al motor se considera el variar la velocidad de funcionamiento y la carga aplicada.

Este dispositivo no debe receptor ruido externo en el espectro de la frecuencia que se debe analizar. Por tal motivo se estudia las frecuencias naturales de la estructura soporte, para evitar que el motor sea sometido a pruebas de funcionamiento en estas frecuencias.

Igualmente el análisis de las frecuencias naturales de la estructura soporte, evita que se presente condiciones de resonancia provocados por una coincidencia con las frecuencias de funcionamiento del motor. Con esto se evita la tendencia del sistema a oscilar con una amplitud mayor en algunas frecuencias.

Se evita llegar a esta condición de resonancia, ya que esto significa que si se aplicara una fuerza de magnitud pequeña por el motor este podría lograr grandes amplitudes de oscilación en el sistema, creando con ello perturbaciones.

La estructura soporte que se muestra en la Figura 3.4, está diseñada de manera que permita un fácil acoplamiento entre los dispositivos montados (motor y generador), procura reducir los tiempos de montaje y adaptarse a las medidas estándar de los elementos.

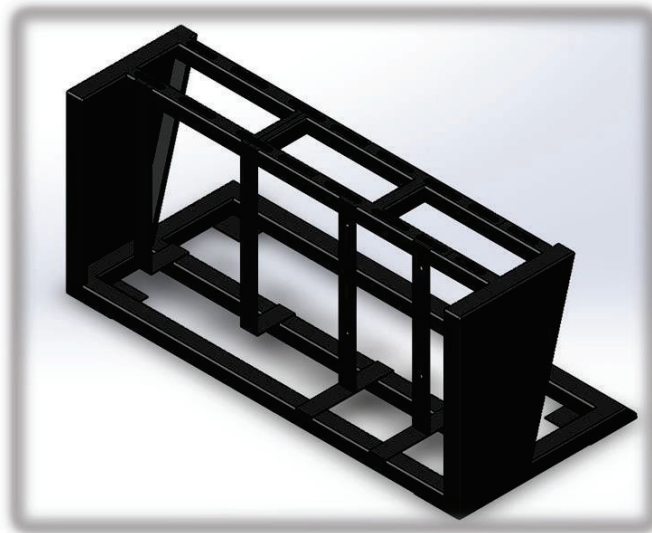


Figura 3.4 Estructura soporte del banco de pruebas

3.4.2.1 Cargas de Diseño

La estructura tiene la capacidad de soportar el peso de los elementos que están distribuidos en tres diferentes puntos. La estructura tiene como parte principal los rieles superiores, donde se sujetan los elementos. Los rieles cuentan con agujeros alargados que facilitan el montaje y desmontaje de los equipos como se muestra en la Figura 3.5.

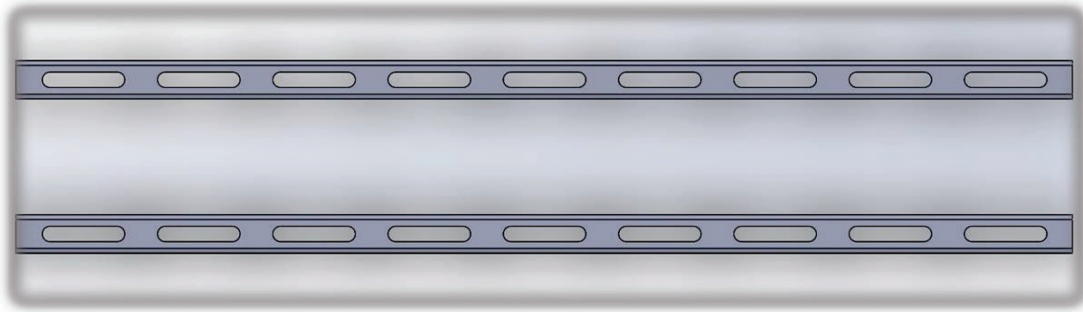


Figura 3.5 Rieles Superiores de Bancada

Las cargas que se presentan son: el peso del motor, peso del generador y el eje central. Por estar soportados sobre placas y estas posadas sobre las rieles, se las considera cargas distribuidas y se encuentran resumidas en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Elementos y cargas presentes en estructura Soporte de equipo

Elemento	Peso	Carga	Carga Distribuida por Riele	Sector
Motor de Inducción con soporte	21.75 Kg	213.15 N	0.367 N/mm	1
Eje Central	7.80 Kg	76.44 N	0.212 N/mm	2
Generador	32.00 Kg	313.6 N	0.950 N/mm	3

Para efectos de cálculo las cargas son aplicadas en tres sectores diferentes. Los cálculos de las reacciones en las rieles están presentes en la Tabla 3.19. En la Figura 3.6, se presenta el diagrama de fuerzas, cortante y momento máximo a las que se encuentra sometido cada riel superior de la estructura soporte.

Tabla 3.19. Elementos y cargas presentes en estructura Soporte de equipo

Característica	Valor
Reacción en A :	136.68 N
Reacción en B :	161.81 N
Fuerza Cortante Máxima (V) :	161.81 N
Momento Flector Máximo (M) :	36764.25 N*mm

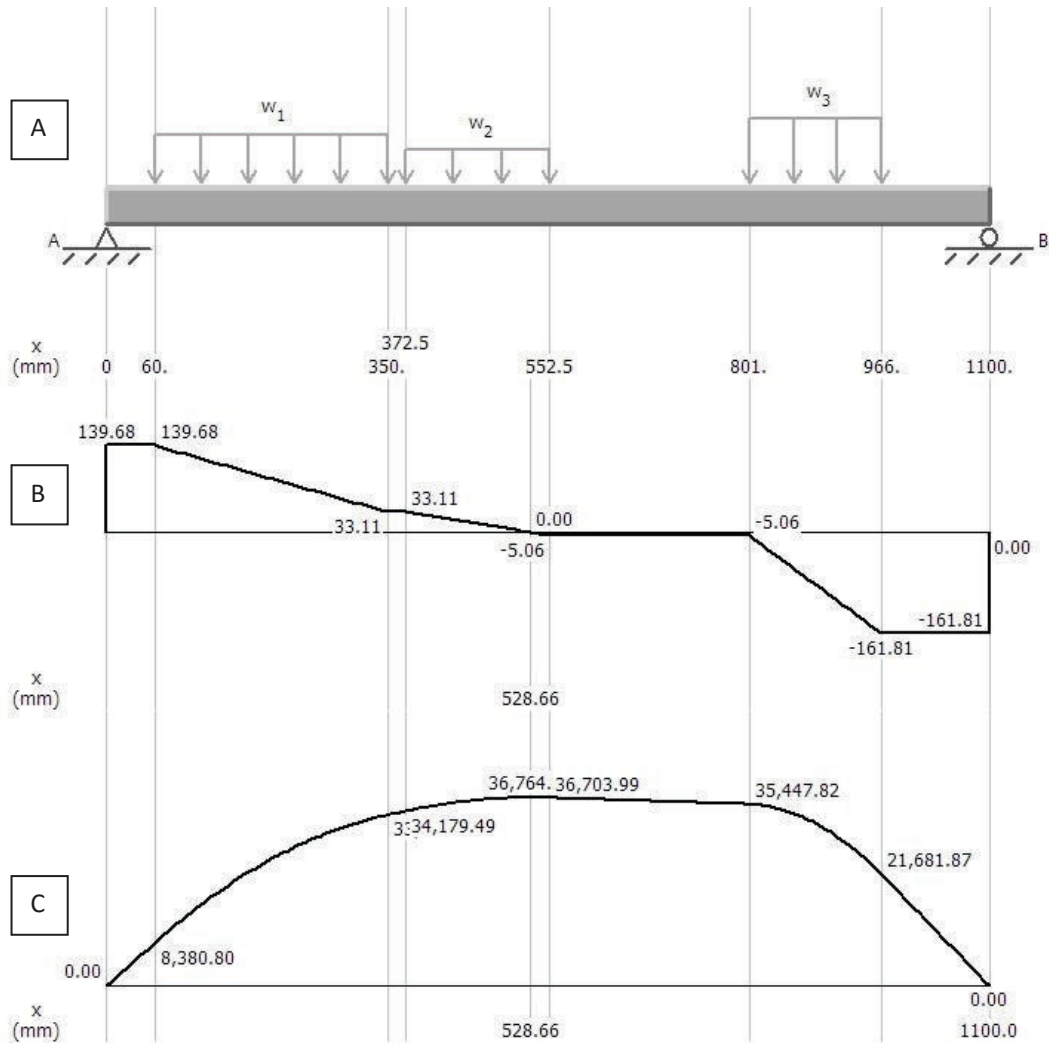


Figura 3.6 Diagrama de a) Fuerzas, b) Cortante Máximo y c) Momento Flector Máximo

Es seleccionado un perfil U de 40 x 40 x 2.5 mm doblado, elaborado en acero ASTM A-36 y con perforaciones internas para el desplazamiento longitudinal de los elementos, la sección transversal y propiedades del perfil se considera según la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Propiedades y sección de perfil para rieles superiores

Característica	Valor	Esquema
Área (A) :	239.45 mm ²	
Limite Fluencia (Sy) :	248 Mpa	
Inercia (I _x) :	38079.05 mm ⁴	
Espesor (e) :	2.5 mm	
Módulo de Elasticidad (E):	200 Gpa	
Distancia X a centroide (Cx) :	23.06 mm	

Se calcula los esfuerzos a flexión y cortante con las ecuaciones (3.6) y (3.7) (Budymas, 2012), dónde:

σ_x = Esfuerzo a flexión

τ_{xy} = Esfuerzo cortante

$$\sigma_x = \frac{M * C_x}{I_x} \quad (3.6)$$

$$\sigma_x = \frac{36764.25 \text{ N} * \text{mm} * 23.06 \text{ mm}}{38079.05 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_x = 22.2637 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{V}{A} \quad (3.7)$$

$$\tau_{xy} = \frac{161.81 \text{ N}}{239.45 \text{ mm}^2}$$

$$\tau_{xy} = 0.675 \text{ MPa}$$

Se aplica la teoría de Von Mises con la ecuación (3.8), para obtener el esfuerzo admisible del perfil. Por lo tanto:

$$\sigma_{adm} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 * \tau_{xy}^2} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{adm} = \sqrt{22.2637^2 + 3 * 0.675^2}$$

$$\sigma_{adm} = 22.2943 \text{ MPa}$$

Para el factor de seguridad se tiene:

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{Adm}}$$

$$FS = \frac{248 \text{ MPa}}{22.2943 \text{ MPa}}$$

$$FS = 10.81$$

Un cálculo complementario está dado por el análisis de la soldadura presente en la unión de las rieles en la estructura soporte como se observa en la Figura 3.7; la soldadura de este elemento se encuentra directamente sometida a las cargas presentadas por los elementos y el valor del esfuerzo cortante máximo es de 161.81N. Analizado en la Figura 3.6, la unión se encuentra realizada con un electrodo E6011. En la Tabla 3.21 se presenta las propiedades mecánicas.

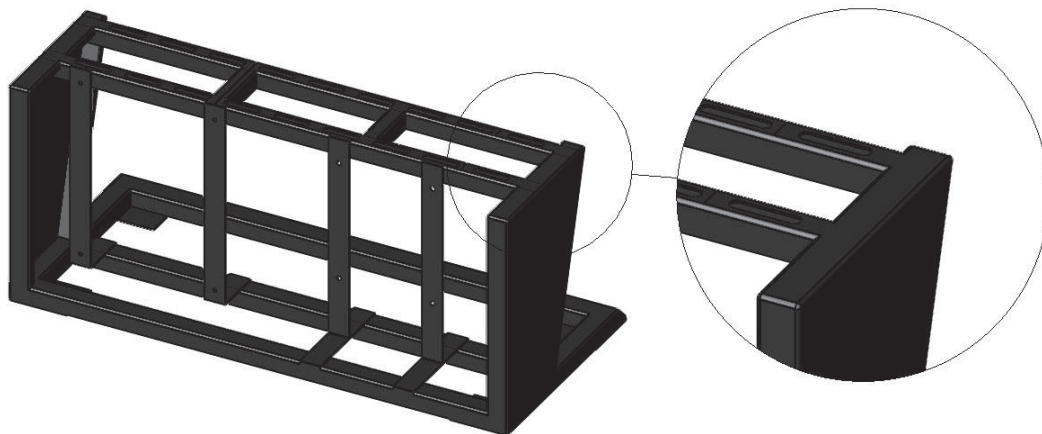


Figura 3.7 Detalle de soldadura en estructura soporte.

Tabla 3.21. Propiedades Mecánicas del Electrodo E6011
(Budymas, 2012)

Electrodo :	E6011
Resistencia a la Tracción :	427 MPa
Límite de Fluencia :	345 MPa
Amperaje de operación :	80-120
Longitud :	350 mm

Se calcula la resistencia de la soldadura a tensión a través de la ecuación (3.9) (Budymas, 2012).

$$\tau_{adm} = \frac{F}{h * l} \quad (3.9)$$

Dónde:

F = Fuerza Cortante

h = Altura de la Soldadura

l = Longitud de la Soldadura

Por lo tanto:

$$\tau_{adm} = \frac{161.81 \text{ N}}{2.5 \text{ mm} * 40 \text{ mm}}$$

$$\tau_{adm} = 1.6181 \text{ MPa}$$

Considerando que la junta es a tope y la soldadura se encuentra sometida a tensión, se toma la consideración establecida en la AISC para el esfuerzo permisible en el material de soldadura de la ecuación (3.10) (Budymas, 2012).

$$S_{y \text{ perm}} = 0.6 * S_y \quad (3.10)$$

$$S_{y \text{ perm}} = 0.6 * 345 \text{ MPa}$$

$$S_{y \text{ perm}} = 207 \text{ MPa}$$

Dónde:

$$FS = \frac{S_{y \text{ Perm}}}{\tau_{Adm}}$$

$$FS = \frac{207 \text{ MPa}}{1.618 \text{ MPa}}$$

$$FS = 127.93$$

El diseño de la estructura soporte está basada en la funcionalidad del equipo, la adaptabilidad y la estandarización con los otros elementos con los que se cuenta en los laboratorios del DEEE. Por tal motivo no se ha realizado una optimización en el diseño, debido a que es notable el alto factor de seguridad y la inversión para su construcción dentro del presupuesto.

CAPITULO 4

4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

4.1 Simulación de fallas por barras rotas

Como requerimiento de validación de los datos adquiridos por el banco de pruebas, se simula la falla por barras rotas, partiendo de un modelamiento matemático del motor de inducción, y generando hasta tres barras rotas, para luego contrastar estos resultados con los obtenidos de forma experimental.

La resolución matemática de las ecuaciones diferenciales ordinarias del modelo del motor planteado, se realiza mediante el software de simulación Matlab, que es un programa de ingeniería diseñado para realizar cálculos técnicos científicos y de propósito general, integrándose operaciones, visualización y programación, donde la interacción con el usuario emplea una notación matemática clásica (Ong, 1988).

El presente proyecto requiere construir un modelo de simulación para un sistema físico y de control, como lo es un motor de inducción trifásico. Simulink es una aplicación que mediante diagramas de bloques, define el comportamiento de dicho sistema con funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo. Simulink también dispone de una serie de utilidades que facilitan la visualización, análisis y almacenamiento de los resultados de simulación (Vidal Bort, 2002).

4.1.1 Modelamiento matemático del motor de inducción.

Para el modelado de un motor de inducción trifásico, se analiza una sección transversal del motor formado por tres conjuntos de bobinas, en donde cada una corresponde a una fase. Cada conjunto es llamado devanado de la fase a , b y c , y se encuentran desfasadas geométricamente 120 grados ($\frac{2\pi}{3} rad$), como se muestra en la Figura 4.1 (Pardo García & Díaz Rodríguez, 2006). Generalmente estos devanados son iguales entre sí, o sea, presentan la misma resistencia y el mismo número de espiras. Este planteamiento sirve como esquema para el

modelo matemático de la máquina de inducción que se requiere simular (Vidal Bort, 2002).

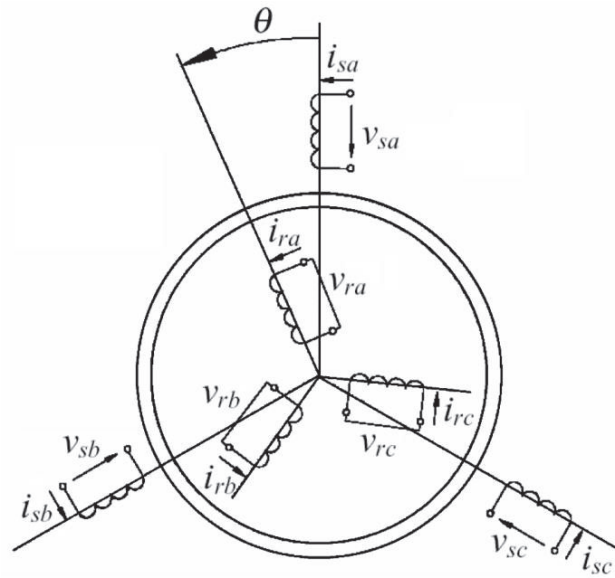


Figura 4.1 Modelo propuesto para el motor de inducción trifásico (Vidal Bort, 2002).

Para simplificar las ecuaciones que rigen el funcionamiento de estas máquinas eléctricas, se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Estator y rotor lisos.
- Máquina de inducción trifásica equilibrada y simétrica.
- Comportamiento magnético del entrehierro en forma lineal.
- Permeabilidad magnética del entrehierro elevada.
- Distribución senoidal del campo en el entrehierro, tanto en el devanado del rotor como del estator.

Con estas consideraciones, se plantea las ecuaciones (4.1) que rigen el comportamiento eléctrico de la máquina de inducción para el estator.

$$V_{sa} = r_s * i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt}; V_{sb} = r_s * i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt}; V_{sc} = r_s * i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \quad (4.1)$$

Donde:

V_{si} = Tensión en la fase “i” del estator.

ϕ_{si} = Flujo que atraviesa la espira “i” del estator.

$r_s * i_{si}$ = Caída de tensión óhmica en la espira “i” del estator.

i = a,b,c.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento eléctrico para el rotor, son:

$$V_{ra} = r_r * i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt}; V_{rb} = r_r * i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt}; V_{rc} = r_r * i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \quad (4.2)$$

Donde:

V_{ri} = Tensión en la fase “i” del rotor.

ϕ_{ri} = Flujo que atraviesa la espira “i” del rotor.

$r_r * i_{ri}$ = Caída de tensión óhmica en la espira “i” del rotor.

i = a,b,c.

La ecuación (4.3), modela el comportamiento eléctrico del estator y del rotor en notación matricial:

$$[V] = [R][i] + \frac{d}{dt}[\phi] \rightarrow \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Cada uno de los términos de la ecuación (4.3), representa una matriz de 3x3 o en un vector de 3x1. Las ecuaciones (4.4), representan las tensiones de alimentación de los devanados de las tres fases del estator y del rotor.

$$[V_s]^t = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]; [V_r]^t = [V_{ra} \quad V_{rb} \quad V_{rc}] \quad (4.4)$$

Las ecuaciones (4.5), representan las corrientes que circulan por cada uno de los devanados del estator y del rotor.

$$[i_s]^t = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]; [i_r]^t = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}] \quad (4.5)$$

Las ecuaciones (4.6), representan el flujo que atraviesa las espiras del estator y del rotor.

$$[\phi_s]^t = [\phi_{sa} \quad \phi_{sb} \quad \phi_{sc}]; [\phi_r]^t = [\phi_{ra} \quad \phi_{rb} \quad \phi_{rc}] \quad (4.6)$$

La ecuación (4.7), plantea las relaciones entre flujos e intensidades, dadas por:

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & R_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

La matriz de coeficientes de acoplamiento del estator, se encuentra conformada según la ecuación (4.8).

$$[M_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & L_{ms} \cdot \cos(2\pi/3) & L_{ms} \cdot \cos(-2\pi/3) \\ L_{ms} \cdot \cos(-2\pi/3) & L_s & L_{ms} \cdot \cos(2\pi/3) \\ L_{ms} \cdot \cos(2\pi/3) & L_{ms} \cdot \cos(-2\pi/3) & L_s \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Donde:

M_{ss} = Matriz de coeficientes de acoplamiento del estator.

L_s = Inductancia del estator.

L_{ms} = Inductancia de magnetización del estator

La matriz de coeficientes de acoplamiento del rotor, se encuentra conformada según la ecuación (4.9).

$$[M_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & L_{mr} \cdot \cos(2\pi/3) & L_{mr} \cdot \cos(-2\pi/3) \\ L_{mr} \cdot \cos(-2\pi/3) & L_r & L_{mr} \cdot \cos(2\pi/3) \\ L_{mr} \cdot \cos(2\pi/3) & L_{mr} \cdot \cos(-2\pi/3) & L_r \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Donde:

M_{rr} = Matriz de coeficientes de acoplamiento del rotor.

L_r = Inductancia del rotor.

L_{mr} = Inductancia de magnetización del rotor.

La matriz de coeficientes de acoplamiento del estator-rotor, se encuentra conformada según la ecuación (4.10).

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} L_m \cdot \cos(\theta) & L_m \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) \\ L_m \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta) & L_m \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) \\ L_m \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

La matriz de coeficientes de acoplamiento del rotor-estator, se encuentra conformada según la ecuación (4.11).

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} L_m \cdot \cos(\theta) & L_m \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) \\ L_m \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta) & L_m \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) \\ L_m \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) & L_m \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Donde:

L_m = Inductancia de magnetización.

La matriz de inductancias o matriz de acoplamientos del motor de inducción queda definida mediante la ecuación (4.12), de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} [M_{ss}(\theta)] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{rs}(\theta)] & [R_{rr}(\theta)] \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Donde:

M = Matriz de inductancias.

Tomando en cuenta que la matriz de acoplamientos entre las bobinas del estator ecuación (4.8) y la matriz de acoplamientos entre las bobinas del rotor ecuación (4.9), no dependen del ángulo formado entre la bobina “a” del estator y la bobina “a” del rotor (Vidal Bort, 2002), se tiene que:

$$L_{ms} = L_{mr} = L_m \quad (4.13)$$

4.1.2 Función para el cálculo de la matriz de inductancias

Para realizar el cálculo de la matriz de inductancias M , se desarrolla la función en Matlab que se muestra en la Figura 4.2. Esta función basada en la

ecuación (4.12), tiene como entradas los parámetros característicos del motor de inducción y el ángulo eléctrico de giro del motor (Jhongming & Bin, 2000).

La función entrega dos resultados, uno es la matriz de inductancias M , y el otro es la derivada con respecto al ángulo eléctrico de la matriz de coeficientes de acoplamiento del estator-rotor en base a la ecuación (4.10). El código de la función se presenta en el Anexo 6.

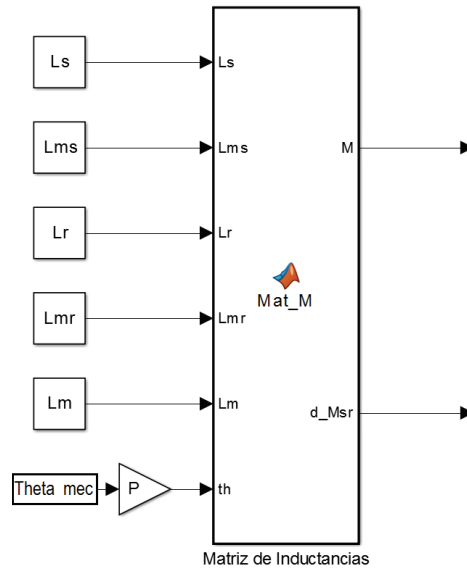


Figura 4.2 Función desarrollada para el cálculo de la matriz de inductancias.

4.1.3 Función para el cálculo de las corrientes de estator y rotor.

Partiendo de la ecuación (4.3) que modela el comportamiento eléctrico del motor, y expresando dicha ecuación en términos de la matriz de inductancias, se obtiene:

$$[V] = [R][i] + \frac{d}{dt}([M][i]) \quad (4.14)$$

En base a las ecuaciones (4.1) y (4.2), se definen las tensiones del estator y rotor de un generador trifásico, como sigue:

$$\begin{aligned} V_{sa} &= \sqrt{3} \cdot V_{ms} * \sin(2\pi f) & V_{ra} &= \sqrt{3} \cdot V_{mr} * \sin(2\pi f) \\ V_{sb} &= \sqrt{3} \cdot V_{ms} * \sin\left(2\pi f - \frac{2\pi}{3}\right) & V_{rb} &= \sqrt{3} \cdot V_{mr} * \sin\left(2\pi f - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{sc} &= \sqrt{3} \cdot V_{ms} * \sin\left(2\pi f - \frac{4\pi}{3}\right) & V_{rc} &= \sqrt{3} \cdot V_{mr} * \sin\left(2\pi f - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Donde:

V_{ms} = Tensión fase fase del estator.

V_{mr} = Tensión del rotor.

Para realizar el cálculo de las corrientes del estator y del rotor se desarrolla los bloques en Simulink que se muestra en Figura 4.3. Estos bloques se basan en la ecuación (4.14), en donde el término $[R]$ corresponde a la matriz de resistencias del motor de inducción, cuyos valores se modifican al eliminar la resistencia y la inductancia que representa una barra según el modelo planteado en la Figura 1.18. Esta función tiene como entradas: las tensiones del estator y rotor de un generador trifásico, la matriz de inductancia mutua y la matriz de resistencias del motor de inducción, y como salidas los vectores de corriente del rotor y estator. Los vectores de corriente del estator serán utilizados para generar los oscilogramas de corriente y posteriormente permitir un análisis en frecuencia del nivel de falla producido al rotor. (Morales & Vanegas, 2005) (Shi, Chan, Wong, & Ho, 1999).

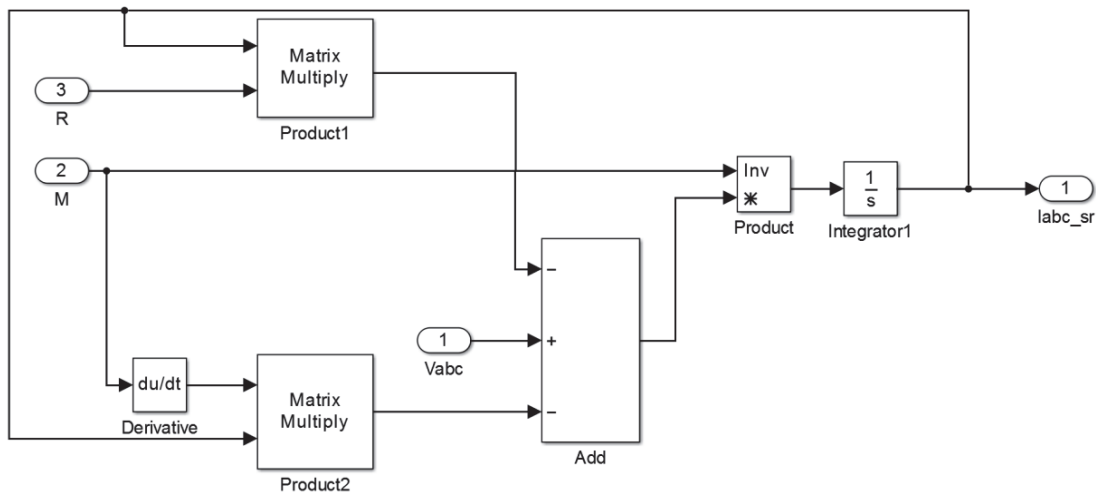


Figura 4.3 Bloques para calcular las corrientes de estator y rotor.

4.1.4 Función para el cálculo del torque del motor de inducción.

Teniendo en cuenta que la matriz de coeficientes de acoplamiento de los flujos creados por las bobinas del rotor y concatenados por las bobinas del estator M_{rs} , es igual, a la traspuesta de la matriz de coeficientes de acoplamiento de los flujos

creados por las bobinas del estator y concatenados por las bobinas del rotor M_{sr} , es decir:

$$M_{sr} = M_{rs}^t \quad (4.16)$$

Por lo tanto, la expresión con la que se calcula el torque eléctrico instantáneo del motor en función de las corrientes del rotor y estator es:

$$\Gamma_{elec}(t) = P \cdot [i_s]^t \cdot \frac{d}{d\theta} [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_r] \quad (4.17)$$

Donde:

Γ_{elec} = Torque eléctrico instantáneo del motor de inducción.

P = Número de polos.

Para realizar el cálculo del torque eléctrico instantáneo del motor, se desarrolla la función en Matlab que se muestra en la Figura 4.4. Esta función está basada en la ecuación (4.17), y tiene como entradas las corrientes del estator y rotor de cada fase, y como salida el torque instantáneo del motor eléctrico (Vidal Bort, 2002). El código asociado a la función embebida se presenta en el Anexo 7.

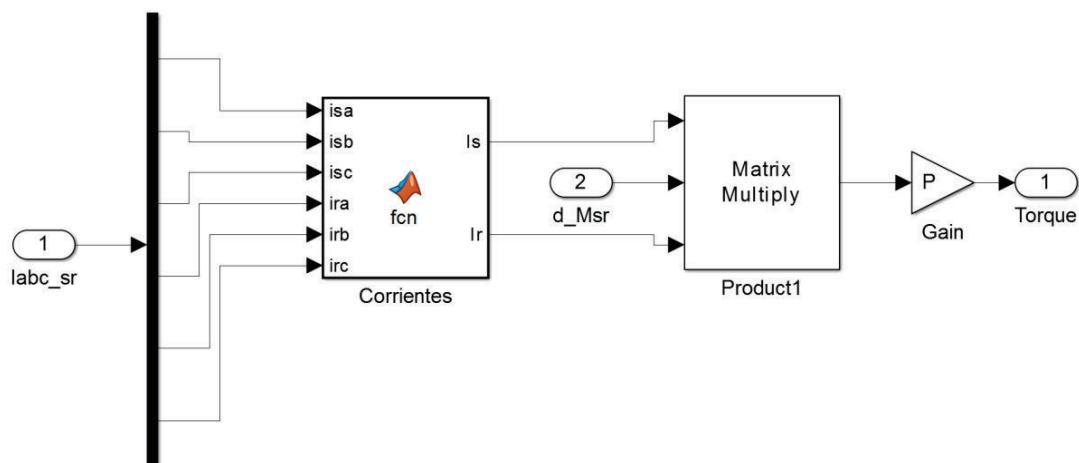


Figura 4.4 Bloques para el cálculo del torque del motor de inducción.

4.1.5 Función para el cálculo de la velocidad del motor de inducción.

La expresión que describe el comportamiento de la velocidad o la posición del rotor, en función del torque electromagnético y los parámetros de la carga es:

$$\frac{\partial \bar{\omega}_{mec}}{\partial t} = \frac{1}{J} (\Gamma_{elec} - \Gamma_{carga}) \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \theta_{mec}}{\partial t} = \bar{\omega}_{mec} \quad (4.19)$$

Donde:

J = Momento de inercia del motor.

$\bar{\omega}_{mec}$ = Velocidad angular del motor.

θ_{mec} = Ángulo mecánico.

Para realizar el cálculo de la velocidad del motor, se desarrolla la función en Matlab que se muestra en la Figura 4.5. Esta función se basa en las ecuaciones (4.18) y (4.19), teniendo como entradas: el torque del motor y el torque externo de carga; como salidas: la velocidad angular del motor, el ángulo mecánico y la velocidad del motor en rpm (Pardo García & Díaz Rodríguez, 2006).

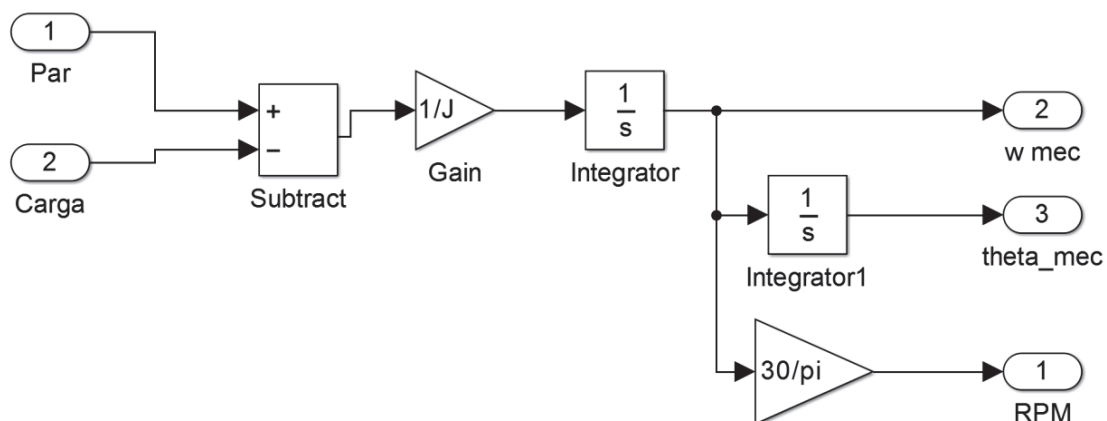


Figura 4.5 Bloques de la función para el cálculo de la velocidad del motor.

4.1.6 Función para el cálculo del deslizamiento.

La expresión que describe el deslizamiento en un motor de inducción es:

$$s = \frac{2\pi f - \bar{\omega}_{mec} \cdot P}{2\pi f} \quad (4.20)$$

Donde:

s = Deslizamiento del motor de inducción.

f = Frecuencia de funcionamiento del motor.

P = Número de polos.

Para realizar el cálculo del deslizamiento, se desarrolla la función en Matlab que se muestra en la Figura 4.6. Esta función se basa en la ecuación (4.20), que tiene como entradas: la frecuencia de funcionamiento, la velocidad angular y el número de polos del motor; como salidas: el deslizamiento del motor de inducción (Pardo García & Díaz Rodríguez, 2006).

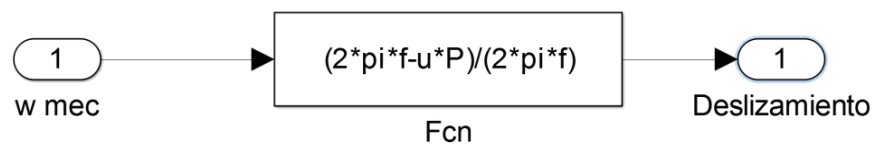


Figura 4.6 Bloques para el cálculo del deslizamiento.

4.1.7 Diagnóstico de falla por barras rotas en Simulink.

Para realizar el diagnóstico de falla por barras rotas utilizando el modelo planteado se considera:

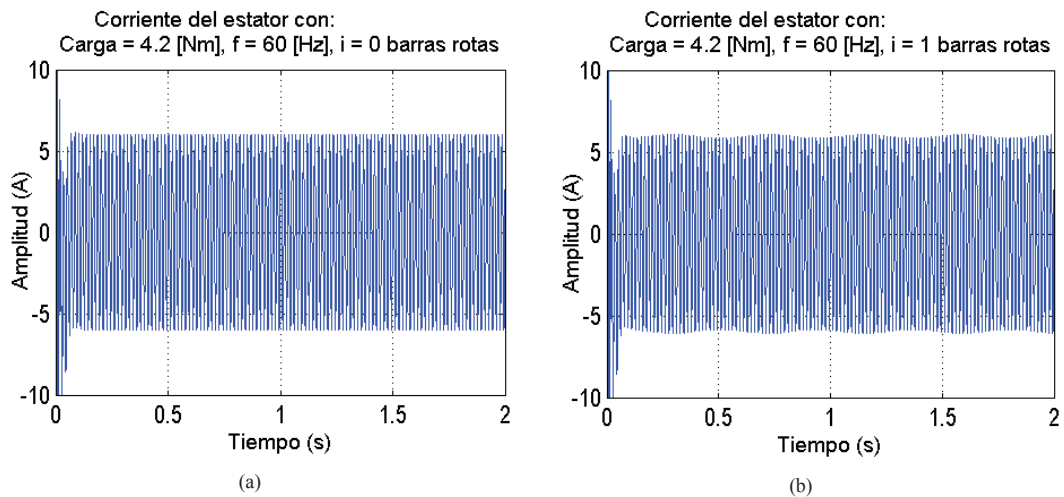
- Datos de placa: Motor ABB de 1hp (Tabla 3.1)
- Parámetros eléctricos: Valores de la máquina de inducción de rotor tipo jaula de ardilla SIEMENS de 1 hp (Tabla 4.1)

En la Tabla 4.1, se presentan los resultados tabulados del cálculo de los parámetros eléctricos del circuito equivalente de la Figura 1.13, con aplicación de ensayos en vacío, rotor bloqueado y prueba de corriente continua.

Tabla 4.1 Parámetros eléctricos de la máquina de inducción de 1 Hp, 220 V YY/ 440V YΔ .
(Gonzales, Fransisco , Rios, Strauss, & Terán, 2008).

Resistencia del estator: R_s	2.75 Ω
Inductancia del estator: L_s	0.1451 H
Resistencia de rotor: R_r	2.9643 Ω
Inductancia del rotor: L_r	0.1451 H
Inductancia de magnetización: L_m	0.13847 H

Con los valores de la Tabla 4.1, ingresados en la matriz de inductancias (ecuación (4.12)), se ejecuta el modelo matemático del motor de inducción desarrollado en Simulink, para cada condición de falla por barras rotas del rotor, extrayendo los vectores de corriente, como se muestra en la Figura 4.7.



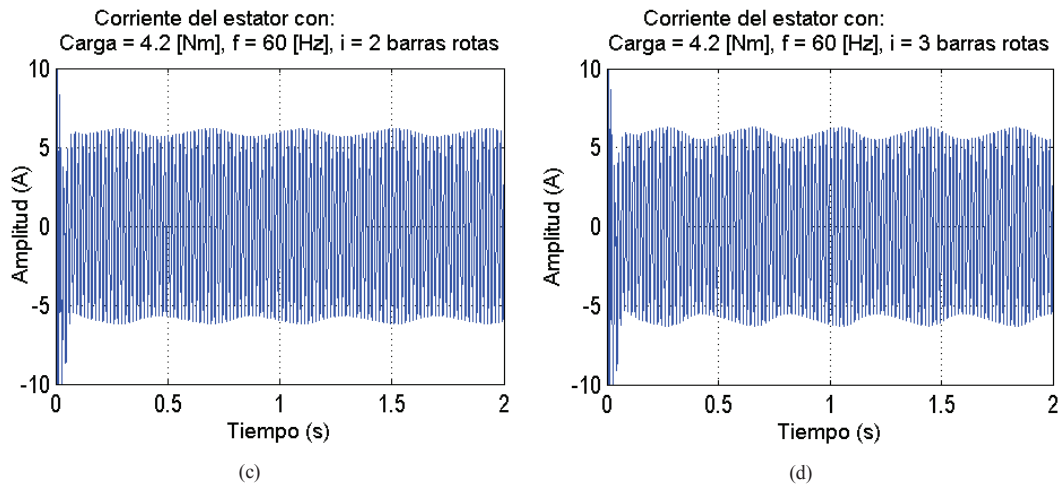
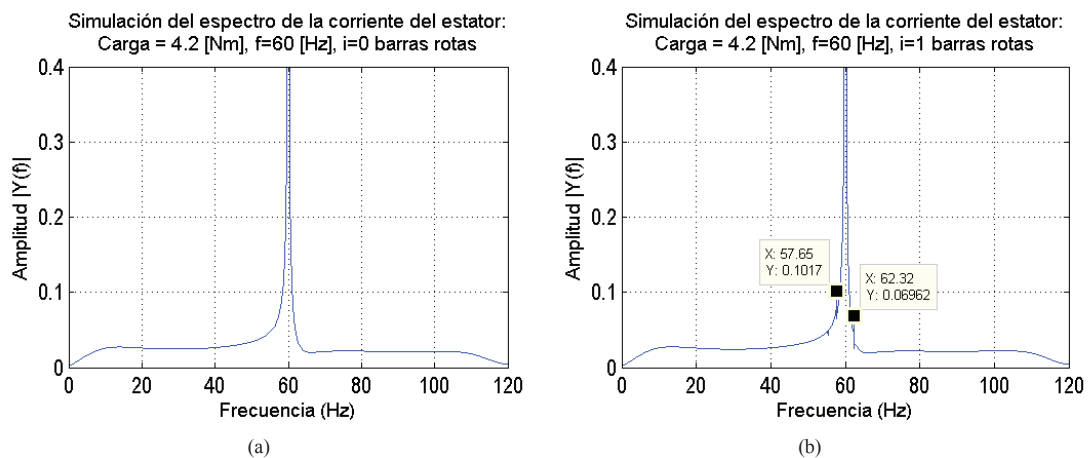


Figura 4.7 Forma de onda de la corriente del estator simulada con par de carga y velocidad nominal (a) motor sin fallas. (b) motor con 1 barra rota. (c) motor con 2 barras rotas. (d) motor con 3 barras rotas.

En la Figura 4.7 se observa los oscilogramas de corriente extraídas del modelo, con velocidad y carga nominal del motor, y barras rotas del rotor (0, 1, 2, 3). Al aumentar el número de barras rotas, la perturbación en el flujo de la corriente del estator es más evidente, definiéndose este cambio en base a la ecuación (1.11) e influyendo directamente en la matriz de resistencias del motor de inducción definida por la ecuación (1.13). Dado que el análisis en tiempo de los vectores de corriente, no permite identificar claramente el nivel de perturbación presente en las barras del rotor, se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT¹²) a los vectores de corriente extraídos, para realizar un análisis en frecuencia, como se observa en la Figura 4.8.



¹² Fast Fourier Transform

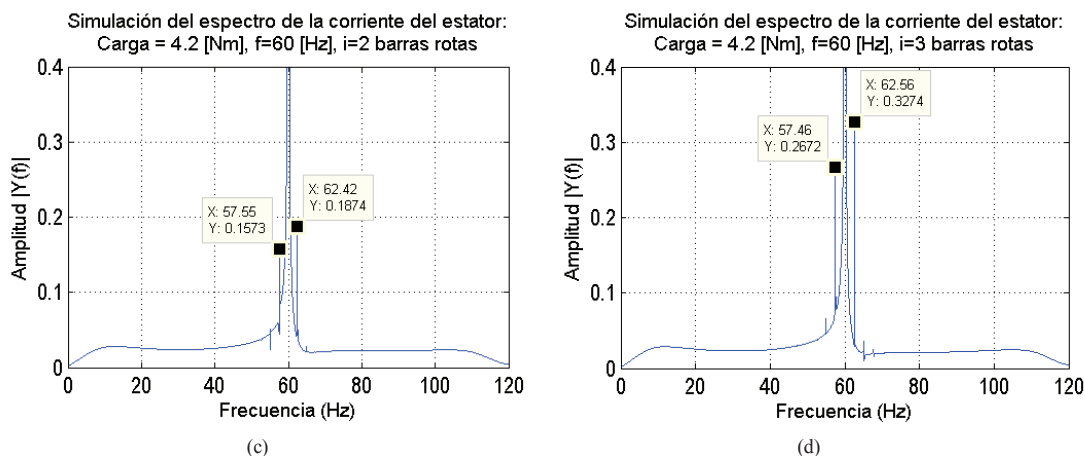


Figura 4.8 Simulación del espectro de la corriente del estator con par de carga y velocidad nominal
 (a) motor sin fallas. (b) motor con 1 barra rota. (c) motor con 2 barras rotas.
 (d) motor con 3 barras rotas.

En la Figura 4.8, se determina que la máxima amplitud de los armónicos del espectro de la corriente del estator, se consigue con el tercer nivel de daño $i=3$ barras rotas, facilitando una futura identificación y clasificación de la falla.

Los pasos establecidos para la simulación, partiendo de la formulación clásica de la máquina con un análisis de tiempo en SIMULINK, que permiten obtener las formas de onda de corriente, y posteriormente el espectro en frecuencia son:

- Paso 1. Abrir el modelo de Simulink (MI_25k.mdl).
- Paso 2. Cargar datos iniciales de la simulación (MI_Ini.m).
- Paso 3. Ejecutar la simulación.
- Paso 4. Ingresar el número " ix " de barras rotas que se desea simular.
- Paso 5. Establecer la nueva matriz de resistencias del motor con " ix " barras rotas (MI_Falla.m).
- Paso 6. Ejecutar la simulación
- Paso 7. Obtener los vectores de corriente del estator para las condiciones de fallas ingresadas.
- Paso 8. Aplicar la FFT para un análisis en frecuencia de las señales (MI_FFT.m).

El modelo matemático del motor de inducción desarrollado en Simulink, con todos sus bloques y funciones se presenta en el Anexo 8.

4.2 Análisis por Método de Elementos Finitos de la estructura soporte.

Según los requerimientos del usuario, para la operación del sistema de detección de fallas en motores de inducción trifásicos, se debe determinar las frecuencias naturales de vibración que se producen en la estructura del banco de pruebas, al someter los motores de inducción a las frecuencias de funcionamiento. Este análisis se lo desarrolla en el software de análisis por el método de elementos finitos MEF¹³ en la plataforma ANSYS.

Previo al análisis MEF, es necesario definir completamente el modelo de estudio, considerando:

1. Geometría del Sistema
2. Propiedades de los Materiales
3. Mallado del sistema
4. Condiciones de borde y estado de carga del sistema.

4.2.1 Creación de la geometría

El primer paso para el análisis, es el modelamiento del banco de pruebas, mismo que está desarrollado en el software de diseño CAD SOLIDWORKS, este modelo cumple con dimensiones, requerimientos de funcionamiento y adaptabilidad de los elementos de control y componentes mecánicos del sistema, cómo se muestra en la Figura 3.1, donde se presenta el banco a ser analizado y sus componentes.

4.2.2 Propiedades del material

La estructura soporte se encuentra construida con perfiles doblados en frío comercialmente comunes de acero al carbono. A continuación se presenta las propiedades del acero ASTM A36 en la Tabla 4.2.

¹³ Método de Elementos Finitos

Tabla 4.2 Propiedades del Material
(Norton, 2011)

Aceros ASTM A36	
Propiedad	Valor
Densidad	7800 Kg/m ³
Módulo de Elasticidad	200 Gpa
Coefficiente de Poisson	0.32
Límite de Fluencia	248 MPa.
Resistencia Ultima a la Tracción	400 – 550 MPa.
Dureza	120 HB

4.2.3 Mallado

La malla discretiza el modelo de la estructura soporte en miles de elementos pequeños pertenecientes a la geometría. La discretización permite calcular y dar solución a las ecuaciones finales del conjunto.

El modelo en tres dimensiones permite realizar el mallado en elementos tetraédricos, hexaédricos, piramidales o prismáticos, este componente está analizado con elementos tetraédricos, puesto que estos presentan buenos resultados en análisis estructurales.

La estructura soporte cuenta con un mallado que considera un criterio de convergencia basado en la relación de aspecto, esta relación es la medida de la razón entre el lado mayor y el lado menor de cada elemento, esta relación debe tener entre uno y seis para obtener un resultado fiable (Marcial & Rosero, 2012).

La división del modelo en elementos pequeños permite fidelizar los resultados, el número de elementos tetraédricos que tiene el modelo, logra la convergencia de las soluciones, este criterio es aplicado debido a la geometría de la estructura soporte, ya que este tipo de geometría puede distorsionar los elementos dando mallados y resultados de pobre calidad.

El mallado de la estructura soporte tiene una relación de aspecto promedio de 2.14, con un tamaño de elemento de 2.0 mm general. Estos valores permiten obtener resultados óptimos con un consumo de recursos informáticos aceptable. Las características del mallado de la estructura soporte se presenta en la Figura 4.9.

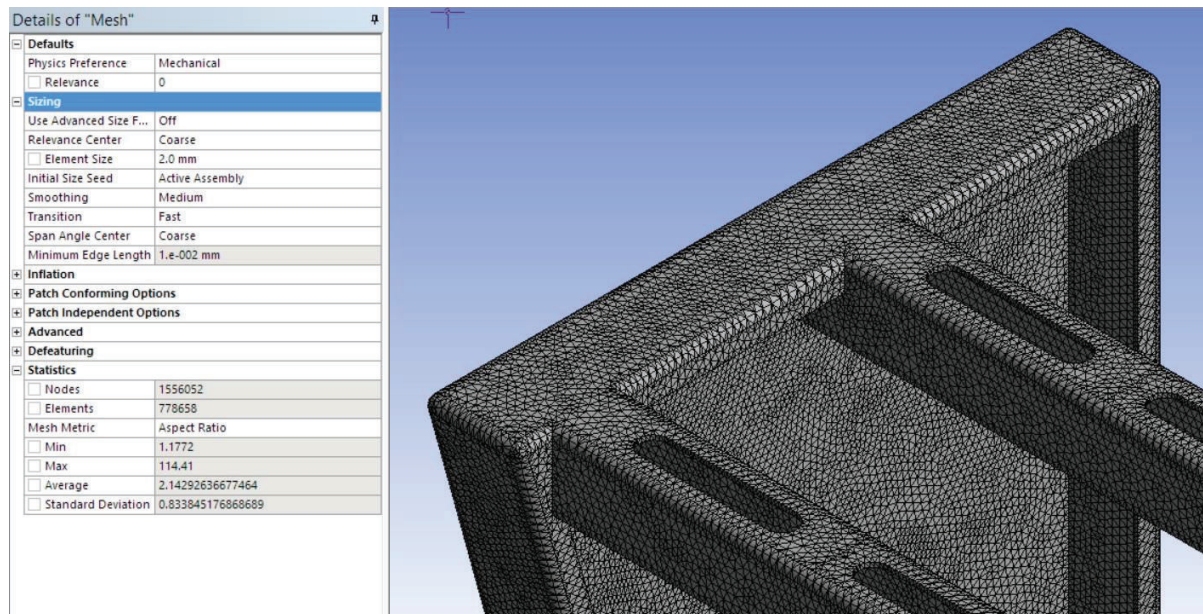


Figura 4.9 Características del mallado en estructura soporte

4.2.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno del conjunto están dadas en función de las cargas aplicadas. Se considera que el dispositivo permanecerá en un sitio fijo, trasladándose esporádicamente dentro de un área de 20 metros cuadrados, la estructura soporte cuenta con dos soportes fijos y dos móviles, esta condición ha sido establecida en el software como se observa en la Figura 4.10.

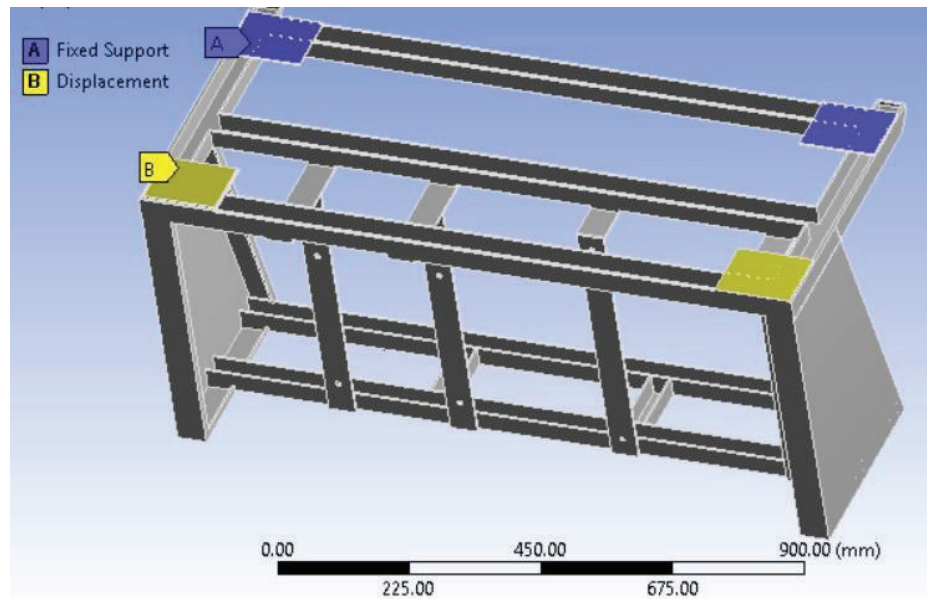


Figura 4.10 Fijaciones de la estructura soporte

En la Tabla 3.18 se presentan los elementos y pesos de las cargas estáticas aplicadas a la estructura como: el peso del motor, peso del generador y el eje central. En la Figura 4.11 se presenta la aplicación de las cargas descritas sobre el modelo de la estructura soporte.

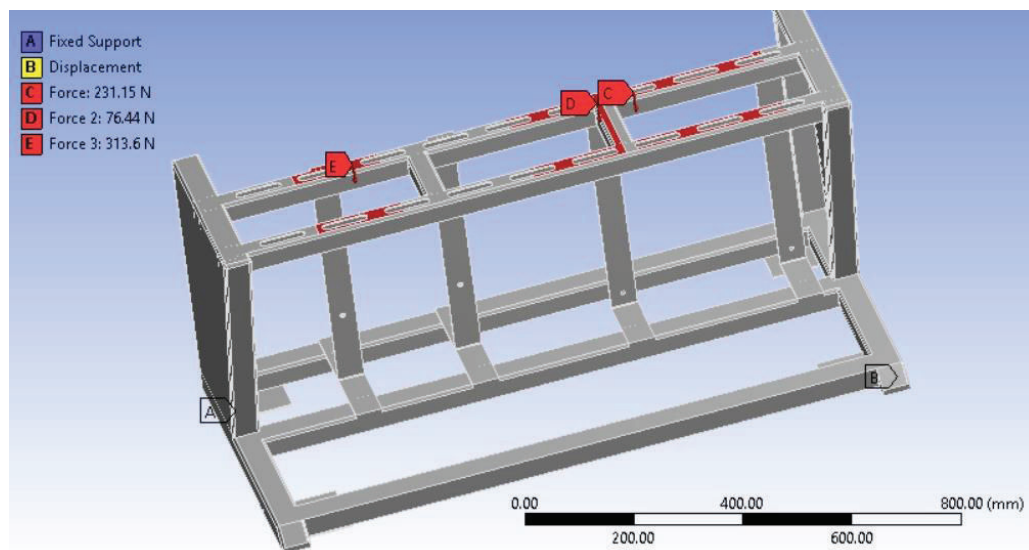


Figura 4.11 Emplazamiento de cargas en estructura soporte

Con el establecimiento de las cargas, fijaciones del modelo y condiciones de contorno, se realiza el análisis MEF de la estructura soporte.

4.2.5 Procedimiento de análisis

Se realizan tres tipos de análisis sobre la estructura soporte, un análisis estático para determinar la resistencia de la estructura ante las cargas, un análisis modal para determinar las frecuencias naturales de la estructura y un análisis armónico que permite establecer la respuesta de la estructura ante las frecuencias producidas por el torque.

El MEF están desarrollados en los respectivos módulos de análisis del programa ANSYS, el proyecto queda esquematizado como se observa en la Figura 4.12, los módulos están enlazados entre si debido a que comparten los datos de geometría, materiales y mallado, debiéndose configurar las opciones específicas de cada módulo de análisis.

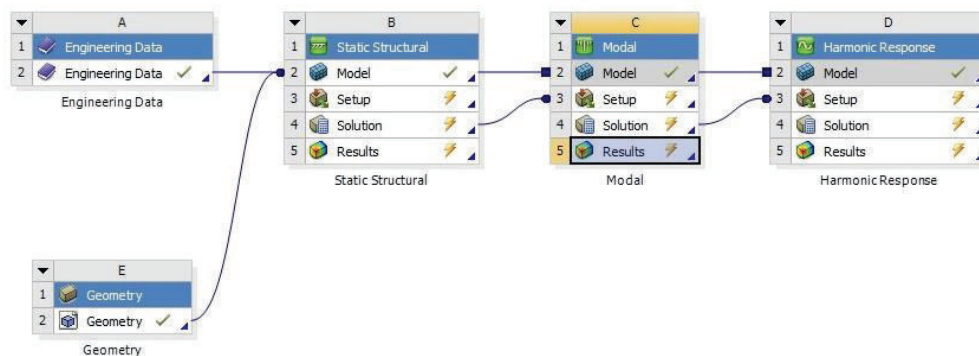


Figura 4.12 Esquema modular del análisis MEF en la plataforma Workbench del software ANSYS.

4.2.5.1 Análisis estático estructural

El análisis determina el comportamiento de la estructura ante la acción de las cargas a las que se encuentra sometida la estructura. La configuración del módulo considera un solo paso y debido a la cargas constantes es aplicable una duración corta de 0.5 segundos.

Dentro de los controles de salida está tomado principalmente el factor de seguridad, donde el mayor esfuerzo es de 112.26 MPa y presenta un factor de seguridad que se encuentra entre 15 y 2.20; la deformación máxima total no supera los 0.3077 mm como se observa en la Figura 4.13.

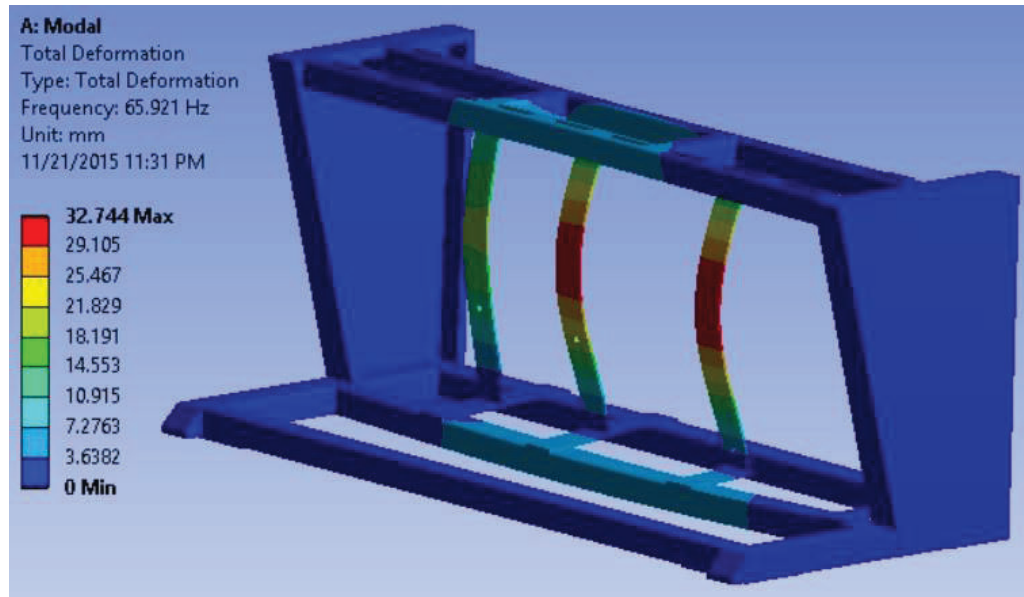


Figura 4.13 Deformación máxima de la estructura soporte.

4.2.5.2 Análisis modal

El análisis modal identifica las frecuencias naturales de la estructura soporte y las deformaciones correspondientes en cada modo de vibración.

La Tabla 4.3 se presenta los valores correspondientes al análisis modal, donde se tiene que el primero y el último modo de vibración son respectivamente 65.921 y 93.346 Hz. Se debe tomar en cuenta que a la máxima frecuencia de funcionamiento del motor (60 Hz), se presentan armónicos de falla por barras rotas, cercanos a las frecuencias naturales de la estructura soporte.

Tabla 4.3 Modos y frecuencias naturales de la estructura soporte.

Numero de Modo	Frecuencia (Hz)
1	65.921
2	71.794
3	76.618
4	82.772
5	85.660
6	93.346

4.2.5.3 Análisis de respuesta armónica

La respuesta armónica considera el comportamiento producido por la carga variable que ejerce el torque de 4.2 N-m sobre la estructura soporte en el espectro

de las frecuencias que presenta el análisis modal. En la Tabla 4.4, se presenta los resultados de las frecuencias naturales vs amplitudes.

Tabla 4.4 Frecuencias naturales y amplitudes de la estructura soporte.

Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm)
33.3	6.3372e-003
66.67	2.876e-002
100.00	4.7308e-003
133.33	1.9737e-003
166.67	1.1083e-003
200.00	7.2114e-004

En la Figura 4.14, se observa que la deformación máxima de la estructura está en un rango de frecuencia de 0 a 66.67 Hz. Por lo tanto, en las frecuencias de funcionamiento a las que se somete a los motores (15, 30, 45 y 60 Hz), se tendrá un valor máximo de deformación de 0.0287 mm.

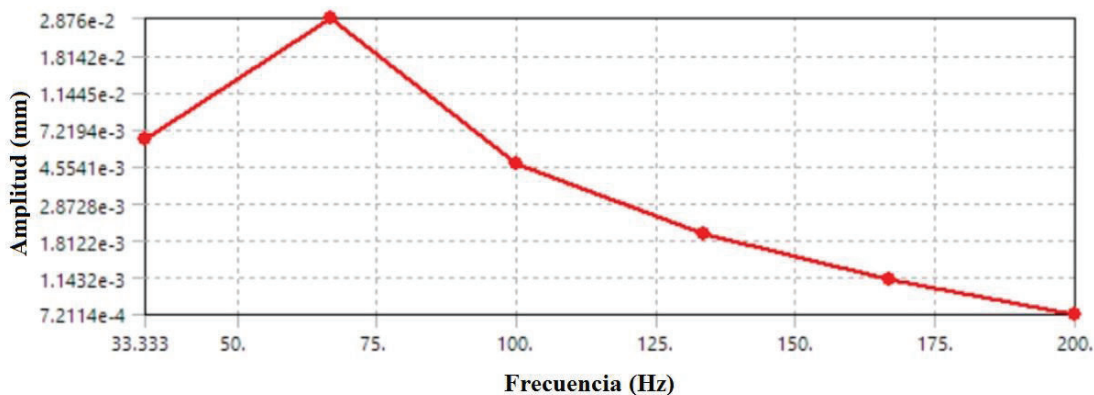


Figura 4.14 Curva de la deformación máxima de la estructura en un rango de 0 a 150 Hz

4.2.6 Análisis de resultados

4.2.6.1 Resultado análisis estático

Analizando los resultados entregados por el software, se observa, de los valores obtenidos del análisis estático una deflexión máxima de 0.0287 mm y un factor de seguridad entre 1.5 y 2.2. Estos valores se encuentran acordes a lo obtenido en la memoria de cálculo, lo que permite desestimar la posibilidad de existir un fallo ocasionado por causa de las cargas estáticas del sistema.

Se considera que las diferencias que se presentan para el análisis estático, entre la memoria de cálculo y el análisis FEM, se producen debido a que los valores finales del estudio computacional no son valores que se encuentren en la zona de convergencia de datos obtenidos, ya que el equipo de cómputo reporta una falta de capacidad de memoria para realizar el cálculo. Por tal motivo se considera un criterio de convergencia basado en la relación de aspecto, donde se obtiene un valor de seguridad de 2.14, lo que permite validar el estudio.

4.2.6.2 Resultado análisis modal

Los valores obtenidos en el análisis modal determinan que las frecuencias naturales de la estructura soporte están entre 65.921 y 93.346 Hz. La máxima frecuencia fundamental de funcionamiento de los motores es 60 Hz. Al trabajar a esta frecuencia, no se afecta a la rigidez de la estructura. Sin embargo, se producen armónicos de falla por barras rotas cercanos a la frecuencia natural de 65.921 que podrían adicionar ruido en los vectores de corriente, al utilizar una técnica de análisis de falla por vibración.

4.2.6.3 Resultado análisis de respuesta armónica

La deformación que se presenta en la respuesta armónica analizada en el rango de 0 a 200 Hz, se encuentra en el rango de 0.00637 mm a 0.0287 mm, como se observa en la Figura 4.14. Del diagrama Frecuencia – Amplitud, se toma el valor máximo de deformación 0.0243 mm a 66.67 Hz. Considerando la mayor frecuencia de funcionamiento del sistema 60 Hz, el valor de deformación es considerablemente bajo, y no causa perturbación en los vectores de corriente extraídos la técnica de MCSA.

CAPITULO 5

5. PROTOCOLO DE PRUEBAS

5.1 Formato de pruebas

Los parámetros de prueba corresponden a la información que requiere el banco para desarrollar los ensayos a los motores con fallas utilizando la técnica del análisis de la corriente MCSA. Esta información permite especificar los parámetros del motor, tipos de fallas, tipo de operación y parámetros de funcionamiento.

A continuación se plantea las opciones en cada uno de los parámetros de prueba, para la validación del modelo construido.

a. Especificaciones del motor:

Se refiere a las características del motor que será sometido a prueba. En la Tabla 5.1 se presenta la información básica que debe ser ingresada.

Tabla 5.1 Especificaciones del motor.

Potencia:Kw	Corriente nominal:A	Número de polos: 2 [] 4 [] 6 []
Torque nominal: A	Velocidad nominal:rpm	Factor de potencia:
Código del motor: ___ ___		
Número de serie:		Marca:

En la Tabla 5.2 se tiene el modelo y serie de los motores de inducción con los que se cuenta en una primera fase para los ensayos.

Tabla 5.2 Modelo y serie de los motores de inducción.

Marca : ABB Tipo : Motor trifásico jaula de ardilla Modelo: M2QA 80M4B - 3GQA082302-AXA	
Código del motor	Serie del motor
M09	3GC12500642105011109
M11	3GC12500642105011111
M12	3GC12500642105011112
M40	3GC12500642105011040

b. Tipo de falla:

Se refiere al tipo de falla que será evaluada en el banco. El diseño del banco de pruebas y la técnica utilizada para análisis de fallas (MCSA), permite evaluar: barras rotas, excentricidad del rotor, cortocircuito del estator y rodamientos, pese a que en el presente trabajo únicamente se generó fallas por barras rotas en el rotor. A cada falla se le ha asignado una letra identificativa b, e, c y r, respectivamente, para estructurar la matriz de datos como se presenta en la Tabla 5.3. Dependiendo de la falla se escoge el nivel de daño que se ha producido: 0, 1, 2, 3 o 4 para barras rotas; 0, 25, 50, 75 y 100% para cortocircuito del estator y fallas por rodamientos; plano X-Y y plano X-Z para excentricidad del rotor. Si se necesita especificar un nivel de falla diferente, se tiene la opción en la parte derecha de esta tabla.

Tabla 5.3 Tipos de falla.

Barras rotas del rotor:	[] b	Nivel de daño					___ [] ___ %
Excentricidad del rotor:	[] e	Plano X-Y:		Plano X-Z:			
Cortocircuito del estator:	[] c	0 []	1 []	2 []	3 []	4 []	
Falla de rodamientos:	[] r	0 %	25 %	50%	75%	80%	

En la Tabla 5.4 se presenta la relación entre el código del motor y el número de barras rotas que se han generado. En los motores con tres barras rotas, los ensayos fueron realizados desde 0 a tres barras.

Tabla 5.4 Número de barras por motor generadas.

Código del motor	Número de barras rotas
M09	3
M11	1
M12	0
M40	3

c. *Parámetros de prueba*

En la Tabla 5.5 se presenta los parámetros de prueba a los que será sometido el motor. El tiempo y la frecuencia de muestreo son parámetros que se configuran al iniciar cada uno de los ensayos para luego activar el modo manual o automático. En forma manual el tiempo de muestreo es indefinido y la velocidad de trabajo puede ser modificada en cualquier instante de tiempo. En forma automática el operador deber ingresar el tiempo de muestreo y los cambios de velocidad a los cuáles será sometido el motor.

Tabla 5.5 Parámetros de prueba

Modo de operación:	Manual: []				Automático []		
Par de carga:	0 []	1 []	2 []	3 []	4 [] Nm	___ []
Velocidad:	0 % []	25% []	50% []	75% []	100% [] rpm	___ %
Frecuencia de muestreo:Hz						
Tiempo de muestreos						

Par de carga:

Se refiere al nivel de carga al cuál el motor será sometido en el ensayo. En la Tabla 5.6 se especifica los niveles de carga que se plantearon para las pruebas.

Tabla 5.6 Niveles de carga.

Código del nivel de carga	Par de carga: %	Par de carga: Nm
0	0	0
1	50	2.10
2	75	3.15
3	100	4.20

Velocidad:

Este parámetro se refiere a la velocidad a la cual está trabajando el motor, cuyo rango esta entre 0 a 1687 rpm. Por la naturaleza de la investigación y la aplicación de los motores de inducción, se establece velocidades fijas para los diferentes niveles de carga y numero de barras rotas, como se especifica en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Velocidades de funcionamiento establecidas para pruebas de carga.

Código de la velocidad del motor	Velocidad del motor: rpm	Velocidad del motor: Hz
0	0	0
25	421.75	15
50	843.50	30
75	1265.25	45
100	1687.00	60

Tiempo de muestreo:

Se refiere al tiempo total que se realiza la adquisición y almacenamiento en disco de los vectores de corriente de las tres fases del motor y los vectores de tensión de dos fases del motor. Este tiempo en base a las pruebas experimentales realizadas está en el rango de 5 a 30 segundos.

Frecuencia de muestreo:

Establece el tiempo que el sistema de adquisición de datos va a tomar muestras de las señales de corriente y de tensión en forma simultánea de las tres fases de alimentación del motor.

c. Código de la matriz de datos

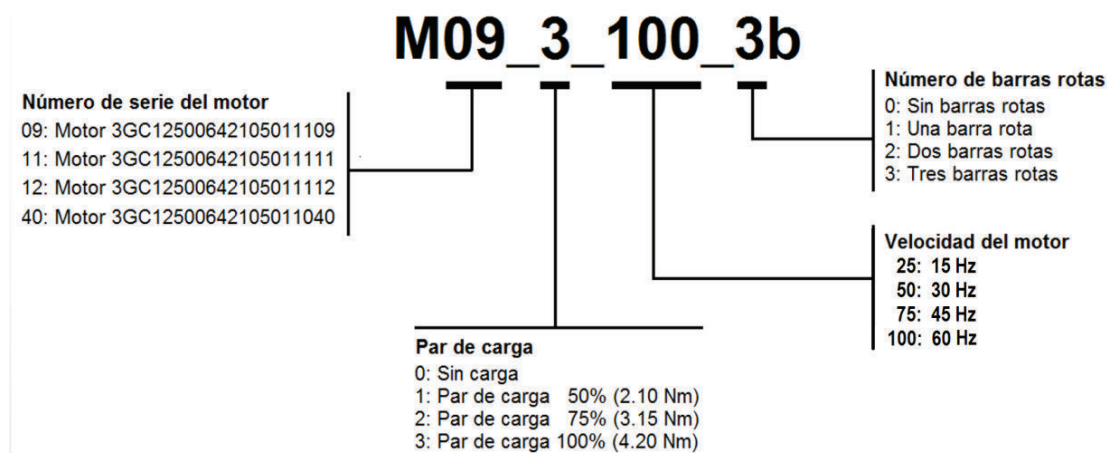


Figura 5.1 Codificación de las matrices de datos.

Los archivos que entrega el sistema están configurados con el ingreso de los parámetros de prueba, donde se obtiene una matriz de codificación como se muestra en la Figura 5.1. Esta matriz es el resultado de varias pruebas iterativas en diferentes motores y con diferentes parámetros en cada uno de los ensayos. El formato para realizar las pruebas de fallas en motores de inducción trifásica se presenta en el Anexo 9.

5.2 Procedimiento Experimental

El procedimiento de prueba describe la secuencia con la cual se desarrollan los ensayos para la validación del banco y obtención de las señales de corriente. Con el objetivo de obtener las matrices de datos requeridas por el Wicom Energy, se propone combinaciones entre la carga y la velocidad de funcionamiento, con una variación del 25 % en cada una de las magnitudes. Estas combinaciones se evalúan con cada nivel de falla por barras rotas generadas en los cuatro motores, obteniendo un total de **175 matrices de datos de 60000x3**. Esta base de datos

permite iniciar con la aplicación de algoritmos de procesamiento, detección y clasificación de señales, en el grupo de investigación.

5.2.1 Generación de la falla

El primer paso para validar los modelos teóricos anteriormente descritos, es crear en los motores de inducción trifásica de 1 Hp (0.75 kw) fallas por barras rotas. Se producen daños de hasta tres barras rotas por motor.

Previo a la generación de la falla se procede a desensamblar los motores, evitando generar algún tipo de defecto adicional como daño en rodamientos o desalineamiento del eje motriz.

El daño en cada barra se produce realizando perforaciones de 15 mm de profundidad y 6 mm de diámetro para garantizar la ruptura completa de la barra. (Talbot & Saavedra, 2013).

En la Figura 5.2, se muestran los daños generados en el rotor de los motores de inducción con una, dos y tres barras rotas.

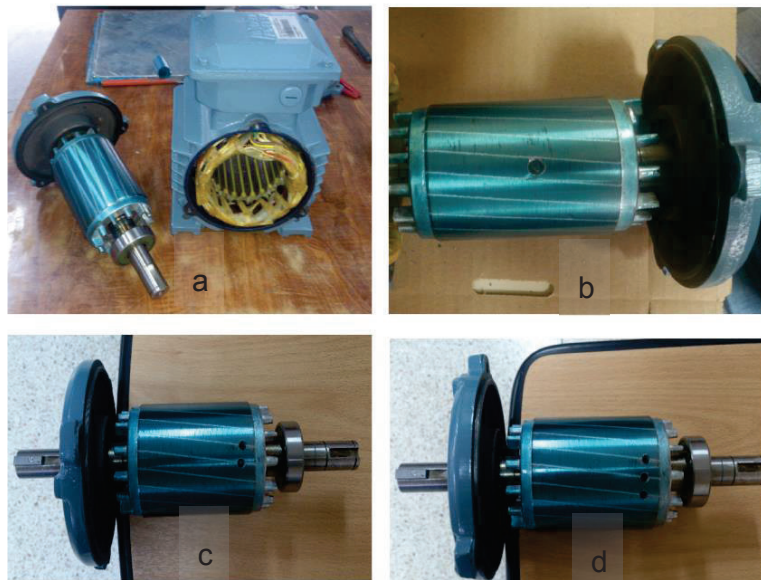


Figura 5.2 Daños producidos en el rotor del motor:
a) Rotor sin daño b) Rotor con una barra rota
c) Rotor con dos barras rotas d) Rotor con tres barras rotas

5.2.2 Procedimiento de Montaje

Luego de contar con el motor con una falla provocada, se procede con la secuencia previamente estudiada en el análisis funcional de segundo nivel en el diseño conceptual del modelo de la Figura 2.2.

a. Acoplamiento del Motor

El primer paso en el proceso de análisis es el montaje del motor en el banco de pruebas, donde se sigue la siguiente secuencia:

1. Acople del Motor:

En este paso se procede a montar al motor sobre su placa de sujeción, se proporciona un pequeño ajuste a las tuercas que fijan al motor en el banco y se procede a acoplarlo con la junta flexible del eje de acoplamiento central.

2. Alineación de Motor

Posterior al montaje del motor se realiza un procedimiento normal de alineación de motores, donde se monta un fijador de base magnética al eje del acople central y se ubica la punta del comparador de reloj sobre el eje del motor, se debe tener precaución de no realizar la alineación en la junta flexible, pues de ser realizado así esta puede ya absorber la desalineación presente en los ejes.

La alineación se la realiza en los planos X-Y y Y-Z, y se contempla una desalineación máxima de 0,1 mm. Este valor permite tener la certeza que se encuentra dentro de las tolerancias de desalineación que soporta la junta flexible. (LOVEJOY Coupling, 2015)

3. Sujeción del Motor

Luego de encontrarse alineado el motor en el banco de pruebas se procede con su fijación, realizando un apriete de los pernos de sujeción del motor a su placa de montaje. Como medida de precaución se debe realizar una verificación del alineamiento del eje motriz.

b. Parámetros de Funcionamiento:

En este paso se realiza el ingreso de los parámetros previamente establecidos en el *Formato de Pruebas*, para el funcionamiento del banco y la información del motor en el sistema de adquisición de datos del banco de pruebas. La información a ser tabulada es la siguiente:

- *Código del motor*
- *Tipo de Falla*
- *Descripción de la falla*
- *Modo de operación*
- *Tiempo de muestreo*
- *Velocidad de trabajo*
- *Nivel de Carga*

c. Análisis de fallas:

En este paso se procede con la ejecución del análisis donde el sistema procede a someter al motor al procedimiento siguiendo los parámetros establecidos en el paso anterior. En el análisis a través de la técnica MSCA, es necesario observar el espectro de frecuencia de la corriente del estator, puesto que los fallos eléctricos o mecánicos perturban el flujo normal de la máquina, creando armónicos adicionales sobre los vectores de corriente de falla.

Para el análisis de fallas por barras rotas, se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT), observando dos variables principales: el cambio en la magnitud de los armónicos resultantes debido a la variación del par de carga y a la frecuencia en la que se producen. En la Tabla 5.8, se indica las características y configuración del sistema de adquisición de datos.

Tabla 5.8 Parámetros de adquisición de datos MCSA.

Tarjeta de adquisición	
Frecuencia de muestreo	25 kHz
Resolución	16 bits
Número de canales diferenciales	3
Número de fases muestreadas	3
Transductor (Punta amperimétrica)	
Rango de medida	0.1 a 24 A
Señal de salida	100mV/A
Ancho de banda	40 Hz a 10 kHz

La Figura 5.3 muestra la respuesta del controlador al cambio de velocidad en modo automático. En este ensayo se configura el motor M40 sin carga, sin daño por barras rotas y con un tiempo de muestreo de 25 segundos, alcanzando una velocidad máxima de 1800 rpm, observando el tiempo de respuesta del sistema ante una perturbación.

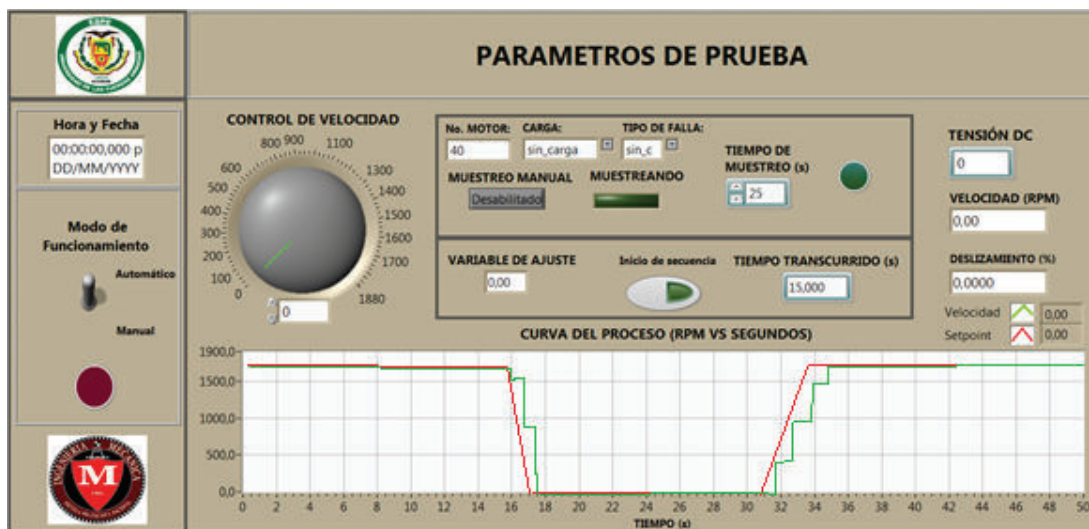


Figura 5.3 Respuesta del controlador a variaciones de velocidad en tiempo real en modo automático.

La Figura 5.4 muestra la curva de corriente en tiempo real para un motor sin fallas por barras rotas, trabajando sin carga y a velocidad nominal. También se puede acceder a la curva de tensiones de las fases a 220VAC.

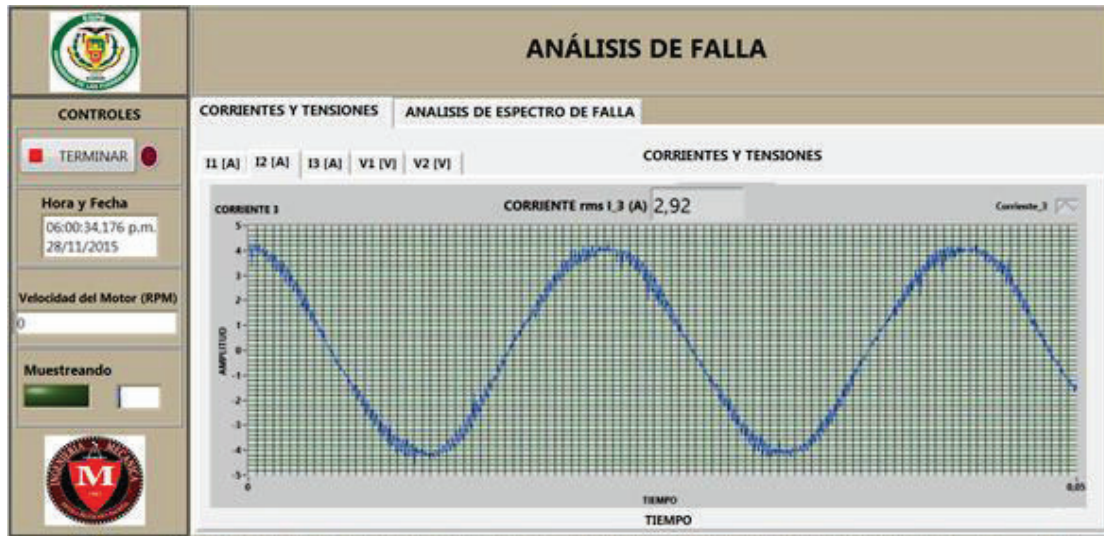


Figura 5.4 Espectro de corriente en tiempo real para un motor sin fallas.

La Figura 5.5 muestra el espectro de la corriente en tiempo real para un motor con fallas por barras rotas, trabajando al 50% de carga y a velocidad nominal. En este espectro se visualiza la presencia de bandas laterales cerca de la frecuencia fundamental, que corresponden al 5% del deslizamiento y tres barras rotas.

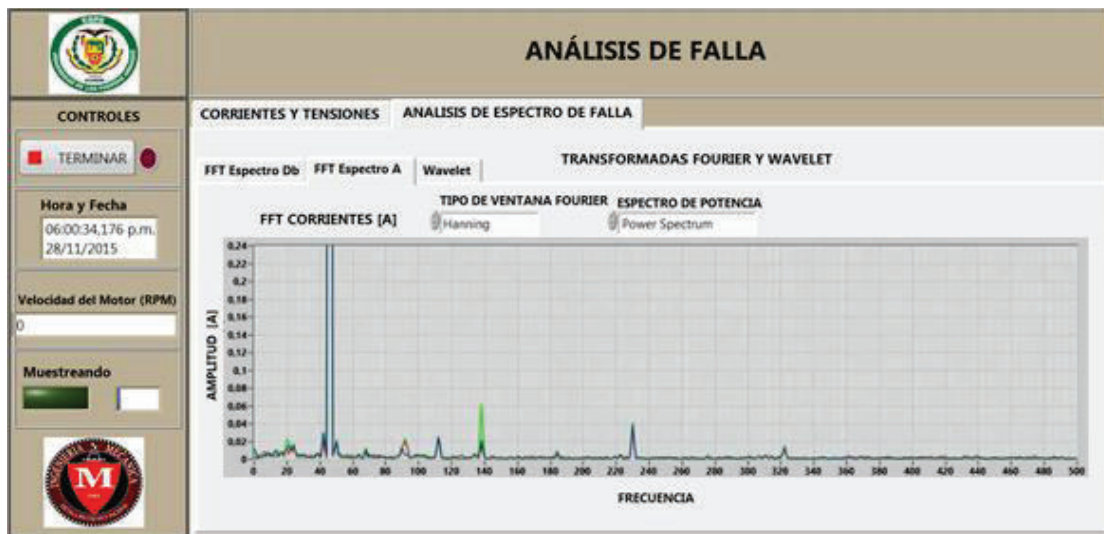


Figura 5.5 Espectro de corriente en tiempo real para un motor con fallas por barras rotas.

5.3 Análisis de Resultados

En la Figura 5.6, se presentan los oscilogramas de corriente correspondientes al motor M09, extraídos con el banco de pruebas a velocidad y carga nominal del

motor, y con un nivel de daño en el rotor de 0 a 3 barras rotas. En estos oscilogramas, se observa que existe una mayor perturbación en las formas de onda de la corriente a medida que se incrementa el número de barras rotas en el rotor, con una respuesta similar a las formas de onda analizadas en la Figura 4.7.

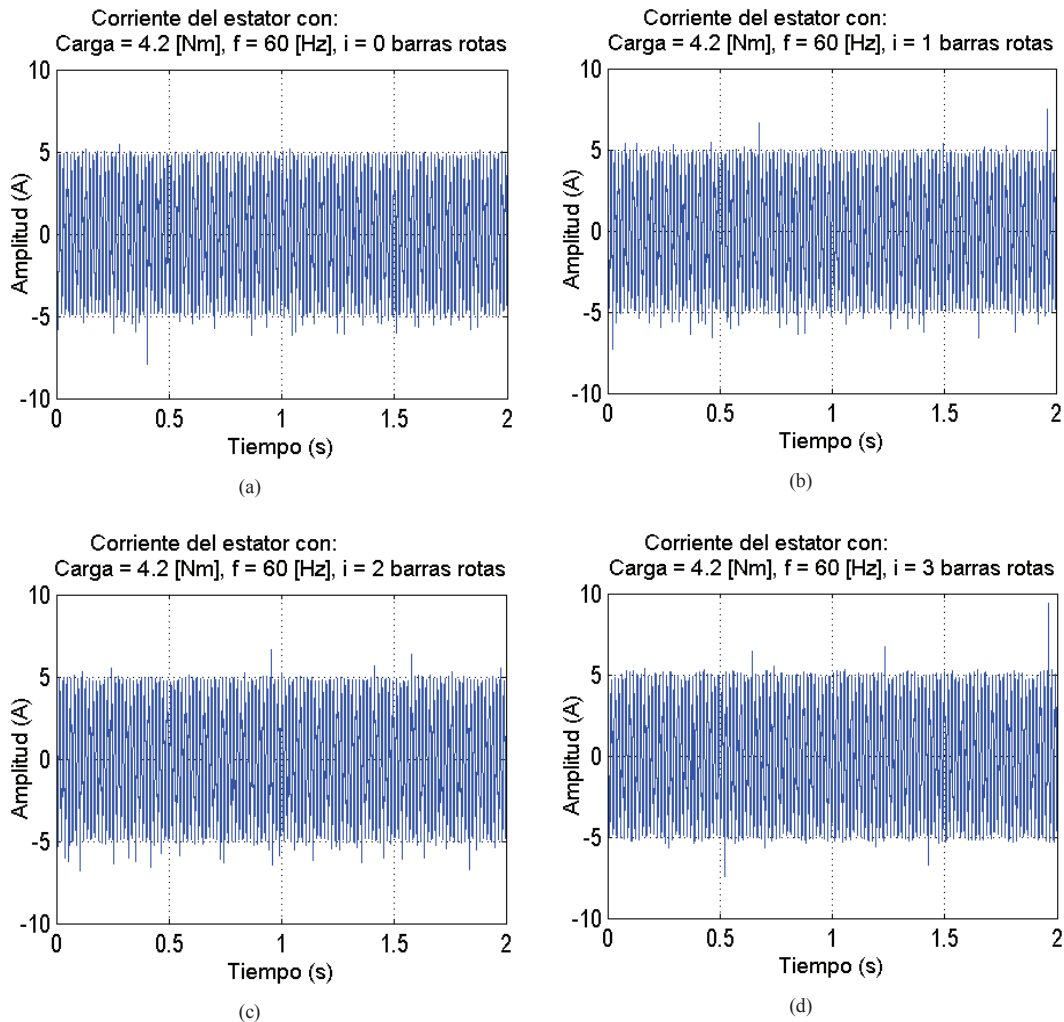


Figura 5.6 Forma de onda de la corriente del estator con par de carga y velocidad nominal para motor M09
(a) motor sin fallas. (b) motor con 1 barra rota. (c) motor con 2 barras rotas.
(d) motor con 3 barras rotas.

Empleando la técnica MSCA, se obtiene los vectores de corriente cuyos espectros en análisis de frecuencia se presenta en la Figura 5.7, con el motor funcionando a carga y velocidad nominal (4.2 N-m y 1687 rpm). Se comprueba que a medida que incrementa el número de barras rotas en el motor de inducción, el número de armónicos presentes en el espectro de la corriente del estator y su amplitud

también se incrementa (Milimonfared, Meshgin Kelk, Nandi, & Toliyat, 1998), consiguiendo en este caso el máximo valor con $i=3$ barras rotas

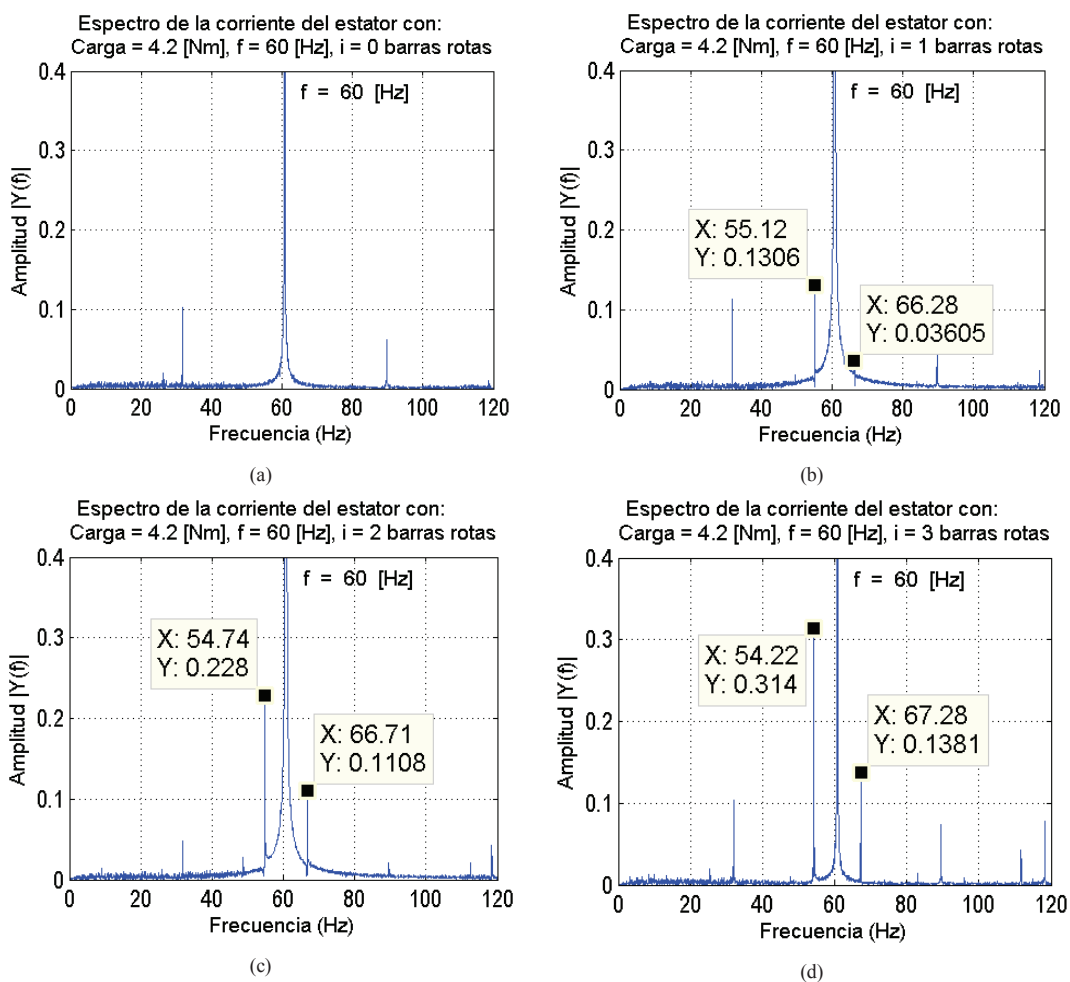


Figura 5.7 Espectro de la corriente del estator con par de carga y velocidad nominal, para motor con fallas por barras rotas.

La Figura 5.8 (a) (b) y (c) muestra escenarios del espectro de la corriente para un daño de una a tres barras rotas respectivamente, con el motor funcionando a velocidad nominal y con distintos niveles de carga. El espectro de corriente para el estado inicial del motor no presenta síntomas de falla, mientras que a medida que el par de carga aplicado al motor aumenta, las bandas laterales alrededor de la componente fundamental de la corriente a 60 Hz, comienzan a distinguirse y son más notorias, aumentando su magnitud y evidenciando una falla por barras rotas en el motor.

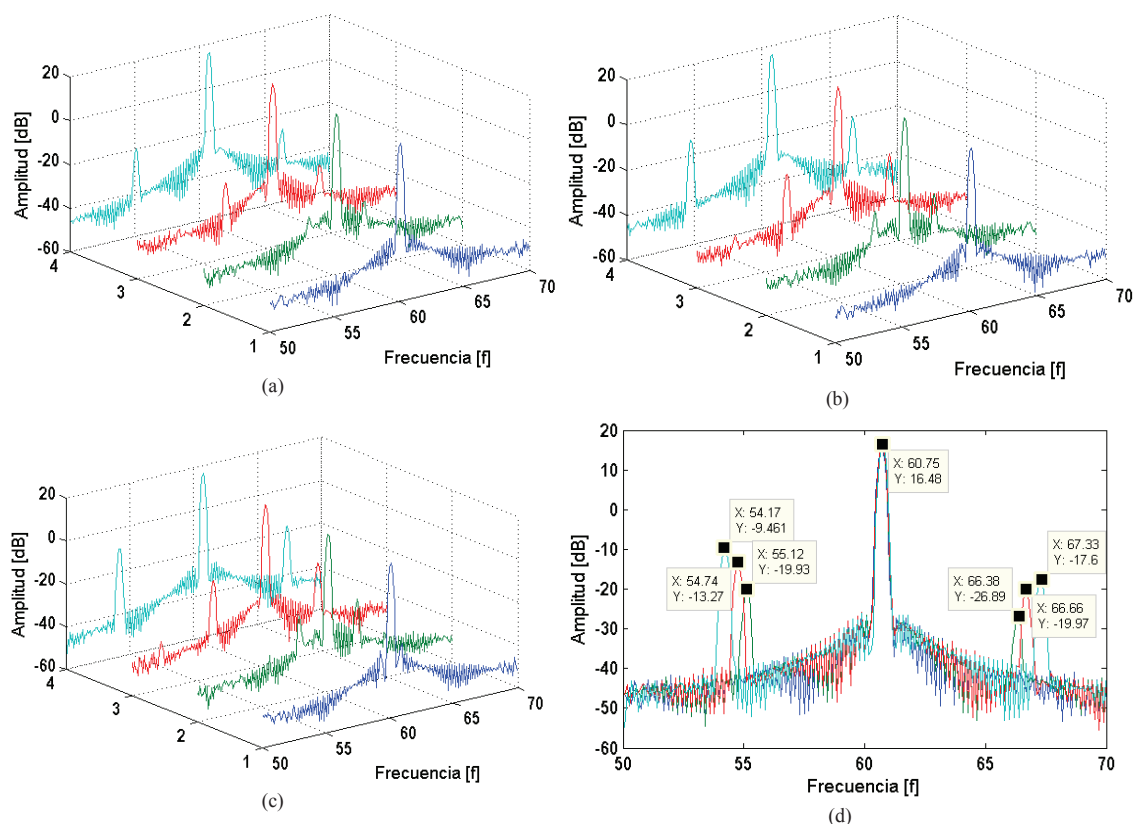


Figura 5.8 Densidad espectral de potencia para el motor M09 con fallas por barras.
 a) Variación del par de carga con una barra rota b) Variación del par de carga con dos barras rotas.
 c) Variación del par de carga con tres barras rotas.
 d) Par de carga y velocidad nominal con una a tres barras rotas.

Se puede observar que cuando se tiene una barra rota y cuando el porcentaje de la corriente nominal que alimenta al motor está bajo el 50%, el método de la corriente MCSA, no es capaz de detectar el problema (Jhongming & Bin, 2000).

En la Figura 5.8 (d) se analiza el número de barras rotas en el rotor, trabajando a un par de carga y a velocidad nominal. En este escenario se observa que a medida que el número de barras rotas se incrementa la magnitud de las bandas laterales también aumenta.

En la Figura 5.9, se observa la caracterización de fallas por barras rotas de dos motores de inducción trifásica con una, dos y tres barras rotas. Y se detecta nuevamente que solo cuando el motor trabaja por debajo del 50 % de su velocidad nominal no es posible detectar este tipo de falla en los motores (Elkasabgy, Eastham, & Dawson, 1992)

De los resultados experimentales se concluye, que para detectar al menos una barra rota, el motor debería estar funcionando en el banco de pruebas a un 50% de velocidad y a un 75% de su carga nominal, ya que la amplitud de los armónicos se encuentran en un valor aproximado de 0.05 A. Con esto se determina que la magnitud de las bandas laterales irá incrementándose un 30% aproximadamente por cada barra rota, como se muestra en la Figura 5.9.

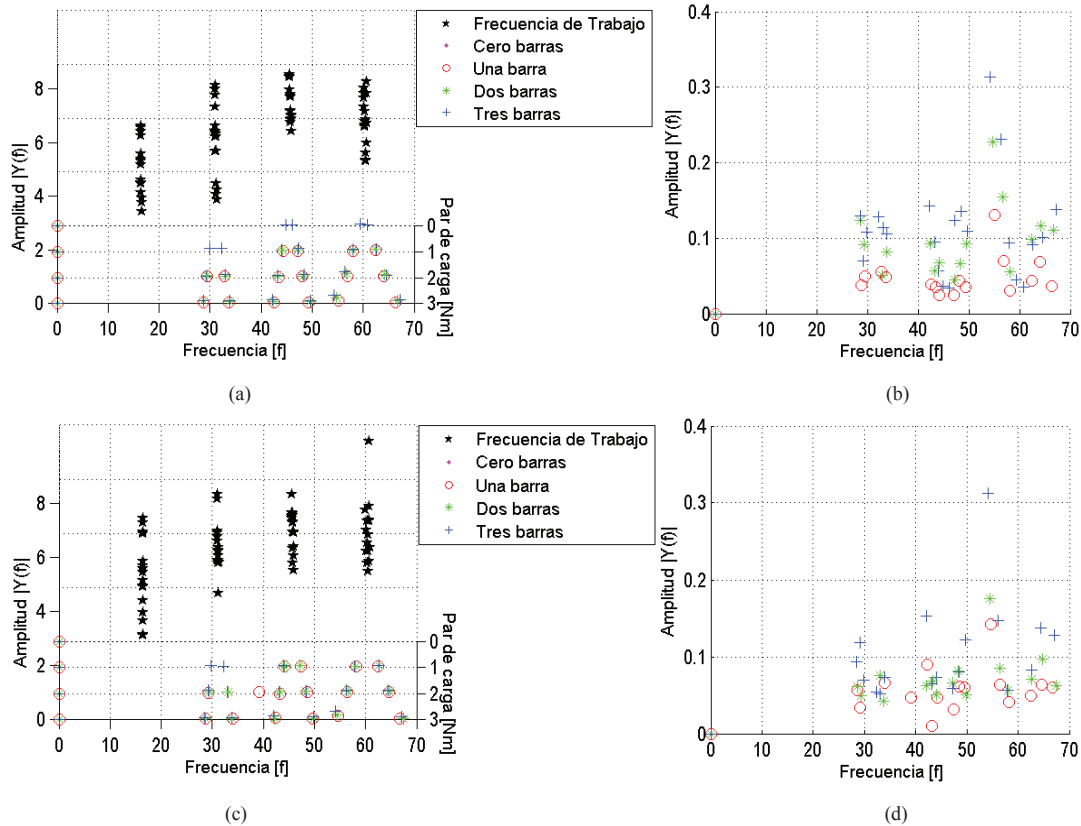


Figura 5.9 Caracterización de fallas por barras rotas:
a) M09 Frecuencia vs Par de carga. b) M09 Amplitud vs Frecuencia.
c) M40 Frecuencia vs Par de carga. d) M40 Amplitud vs Frecuencia.

Con los resultados obtenidos se concluye que el banco de pruebas, cumple con las funciones para las que fue diseñado, ya que los resultados se ajustan a la ecuación (1.10), que sirve para determinar las frecuencias laterales a las que se producen las fallas por barras rotas. En el Anexo 10 se presentan los valores espectrales de las matrices de datos con los resultados de los motores sometidos a regímenes de trabajo con variación de la velocidad de funcionamiento y el nivel de carga aplicado.

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El diseño conceptual ayuda a la implementación y validación de los requerimientos técnicos que definen el producto, mientras que el análisis funcional permite evaluar las mejores alternativas para lograr un producto que satisfaga las necesidades y requerimientos del usuario.
- Como producto principal del banco de pruebas, se tiene un total de **175 matrices de datos de 60000x3**, tomadas simultáneamente en las tres fases del motor de inducción, a una frecuencia de muestreo de 25 khz en un intervalo de 24 segundos, y que se encuentran relacionadas con fallas por barras rotas del rotor.
- La información obtenida permite aplicar en un futuro algoritmos de minería de datos para llegar a conclusiones respecto a cuál es la información que se debe medir en un motor de inducción que hipotéticamente pueda tener una falla,
- La base de datos producto de esta investigación, permitirá realizar la comparación de información, identificación y clasificación de la falla por barras rotas, lo que representa un aporte significativo y está en concordancia con el estado del arte del mundo científico actual, al utilizar información de campo para obtener resultados investigativos, con algoritmos educados y adaptados en base a la información que se puede obtener del banco de pruebas.
- Las diferencias que se presentan para el análisis estático, entre la memoria de cálculo y el análisis FEM, se producen debido a que los valores finales del estudio computacional no son valores que se encuentren en la zona de convergencia de datos obtenidos, ya que el equipo de cómputo reporta una falta de capacidad de memoria para realizar el cálculo. Por tal motivo se considera un criterio de convergencia basado en la relación de aspecto, donde se obtiene un valor de seguridad de 2.14, lo que permite validar el estudio.

- La deformación máxima de la estructura está en un rango de frecuencia de 0 a 66.67 Hz. Por lo tanto, en las frecuencia de funcionamiento a las que se somete a los motores (15, 30, 45 y 60 Hz), se tendrá un valor máximo de deformación de 0.0287 mm, que en la técnica de MCSA para la obtención de los oscilogramas de corriente, no influye de manera significativa.
- Con el análisis modal, se determina que el primero y el último modo de vibración son respectivamente 65.921 y 93.346 Hz, por lo que se debe considerar que a la máxima frecuencia de funcionamiento del motor (60 Hz), se presentan armónicos de falla por barras rotas, cercanos a las frecuencias naturales de la estructura soporte.
- El análisis de las frecuencias naturales de vibración, deformaciones y esfuerzos aplicados a la estructura por elementos finitos, utilizando el software ANSYS, permite determinar el rango en los ciclos de funcionamiento del motor tanto manuales y automáticos, para evitar entrar en resonancia con la estructura al momento de someter los motores al protocolo de pruebas.
- Las herramientas computacionales como SolidWorks, Ansys, Matlab, Simulink y LabView utilizadas en este proyecto permiten el acceso a elementos estandarizados facilitando: el diseño y simulación de estructuras, la implementación de algoritmos avanzados de procesamiento, adquisición y configuración de señales y el diseño de interfaces HMI.
- La técnica del MCSA permite analizar la variación en amplitud y frecuencia de los armónicos producidos frente a una falla por barras rotas del rotor, a modificar la carga y velocidad aplicadas al motor.
- El diseño estructural del banco de pruebas permite el ajuste de los movimientos lateral y axial del motor en décimas de grado, para garantizar y mantener los parámetros de prueba entre un ensayo y otro.
- La formulación clásica de la máquina con un análisis de tiempo en SIMULINK, permite obtener los espectrogramas de corriente, basado en un modelo del rotor con matriz de resistencias.

- Al contrastar los resultados obtenidos en la simulación, resultados experimentales y los resultados presentados en artículos técnicos referentes a este tema, se evidencia que los valores en módulo no son exactamente iguales con respecto a fallas por barras rotas. Sin embargo las perturbaciones observadas en los espectrogramas de corriente y espectros de frecuencia medidos en forma experimental, son comparables con los resultados obtenidos en la simulación y con la bibliografía actual.
- Los sensores de efecto hall (puntas amperimétricas), son los sensores óptimos para implementar la técnica de detección de fallas MCSA, y así obtener los vectores de corriente hasta una frecuencia de 10 kHz en cada una de las fases.
- El sistema de adquisición de datos utilizado, luego del respectivo análisis funcional, permite muestrear simultáneamente las corrientes de las tres fases del motor hasta una tasa de 25Khz y 200 A de amplitud, lo que implica que el sistema de detección de fallas y procesamiento de datos, puede ser utilizado para evaluar el estado de motores de hasta 65 hp con voltaje de alimentación de 220 VAC, según el catálogo de motores de ABB de 4 polos.
- Luego de las pruebas realizadas a varios motores de inducción trifásica de 1Hp, se cuenta con una matriz de vectores de corriente confiable para trabajar con técnicas de procesamiento de datos como: wavelets, clasificadores SVM o redes neuronales.
- Se logró diseñar la HMI, para someter el motor de inducción a modos manuales y automáticos de funcionamiento, con la opción de modificar tiempos de prueba y curvas de trabajo, además de identificar en tiempo real los armónicos de respuesta debido a barras rotas del rotor o agrietamientos del rotor.
- La Necesidad que se detectó para el diseño y construcción del presente banco de pruebas, es la línea base para un proyecto de investigación más ambicioso y permitirá al grupo de investigación Wicom Energy, contar con una máquina capaz de someter a motores de inducción trifásica a fallas por barras rotas, cortocircuito del estator, excentricidad del rotor y fallas por rodamientos, con lo cual el grupo tendrá la capacidad de obtener una base de información sólida y fiable para

aplicar los algoritmos de minería de datos para detección y procesamiento de información.

6.2 Recomendaciones

- Continuar con la investigación en motores de inducción trifásica, abarcando fallas mecánicas como descentramientos en el eje y fallas en rodamientos.
- Profundizar en otras técnicas de detección como wavelets y clasificadores como SVM, redes neuronales o métodos núcleo.
- Llegar a programar los algoritmos de detección en fallas de motores de inducción trifásica en sistemas embebidos, microcontroladores, FPGA, para impulsar una patente y promover su masificación.
- Debido a que la técnica del MSCA es no invasiva y el sistema implementado puede analizar en tiempo real el estado de un motor de inducción, se recomienda continuar con el análisis y adquisición de vectores de corriente en motores que se encuentren trabajando en procesos reales, para seguir con la validación de los algoritmos y resultados obtenidos en el presente trabajo. (Bonnett & Soukup, 1992)

CAPITULO 7

7. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

7.1 BIBLIOGRAFIA

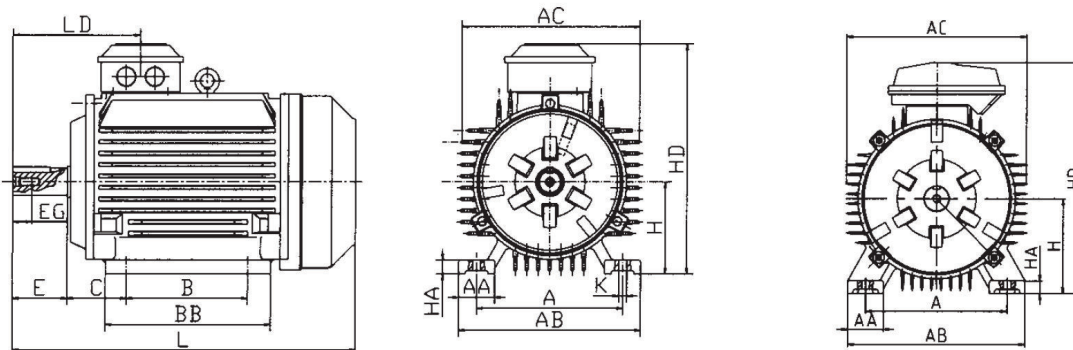
- ABB LV Motors. (2008). Motores eléctricos trifásicos - 50 y 60 Hz. España.
- Awadallah, M., & Morcos, M. (2004). ANFIS-based diagnosis and location of stator interturn faults in PM brushless DC motors. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 19, 795-796.
- Baisón Santiago, L. (2010). *Manual de electricidad industrial: formación para el empleo*. Editorial CEP, S.L.
- Basak, D., & Tiwari, A. (2006). Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A Review. *IEEE*, 6.
- Bonnett, A., & Soukup, G. (1992). Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Trans*, 28, 921-937.
- Budymas, R. (2012). *DISEÑO EN INGENIERIA MECANICA*. México: MCGRAW-HILL.
- Chapman, S. (2000). *Máquinas eléctricas*. McGraw Hill.
- Cusido, J., Rosero, J., Aldabas, E., & Ortega, J. (2005). Fault Detection techniques for Induction Motors. *IEEE 2005 Compatibility in Power Electronics*, 85-91.
- Da, Y., Xiaodong, S., & Mahesh, K. (2011). Health Monitoring, Fault Diagnosis and Failure Prognosis Techniques for Brushless Permanent Magnet Machines. *IEEE*, 1-7.
- Daneri, P. (2008). *PLC: automatización y control industrial*. Editorial Hispano Americana HASA.
- Direct Industry. (2015). <http://www.directindustry.es/prod/assing/product-21181-48379.html>.
- Dorrell, D., Thomson, W., & Roach, S. (1997). Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors. *IEEE Trans*, 24-34.
- Electrical Knowhow*. (2013 Electrical Knowhow). Retrieved from www.electrical-knowhow.com/2012/05/electrical-motors-basic-components.html
- Elkasabgy, N., Eastham, A., & Dawson, G. (1992). Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine. *IEEE Trans. Ind. Appl*, 22, 165-171.
- Federación de Enseñanza de CC.OO de Andalucía . (2011). Temas para la educación. (Nº 12).
- Filippetti, F; Franceschini, G; Tassoni, C; Vas, P;. (1996). AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect. *Industry Applications Conference. 31st IAS Annual Meeting*. San Diego.

- Gonzales, L., Fransisco, M., Rios, A., Strauss, A., & Terán, R. (2008). Estimación experimental de los parámetros eléctricos de una máquina de inducción tipo jaula de ardilla. *CIBELEC*.
- GTISISTEMAS. (2015). <http://www.gtisistemas.com/bp-motores-electricos.html>.
- Guerrero Pérez, R. (2011). *Electrotecnia (UF0149)*. Málaga: IC Editorial.
- Guzmán Rodríguez, R., Serrano Salazar, L., & Bustos Román, N. (2002). *Devanado de máquinas eléctricas*. Instituto Politécnico Nacional.
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION. (2004). *Conductores y alambres aislados con material termoplástico - requisitos*. Quito - Ecuador: Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 345:2004.
- Jhongming, Y., & Bin, W. (2000). A review on Induction Motor Online Fault Diagnosis. *Proceedings IPEMC 2000 the Third Power Electronics and Motion Control Conference, 3*, 1353-1358.
- LOVEJOY Coupling. (2015). *Catalogo de Acoplamientos de Mordaza*. Retrieved from LOVEJOY Coupling: <http://www.lovejoy-inc.com/jaw-type-couplings.aspx>
- Marcial, A. S., & Rosero, D. F. (2012). *Análisis Mediante Elementos Finitos del Sistema de Suspensión de un Automóvil Liviano*. Quito: EPN.
- Mariun, N., Mehrjou, M. R., Marhaban, M. H., & Misron, N. (11-13 May 2011). An experimental study of induction motor current signature analysis techniques for incipient broken rotor bar detection. *IEEE2011 International Conference*, 1-5.
- Martinez Malo, J., & Castro Fernandez, R. M. (2012). *Analisis de la teoría de Ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica*. Madrid.
- MathWorks. (2015). *Matlab & Simulink*. Natick - USA.
- Meaton, R. (1991). *Motores eléctricos: selección, mantenimiento y reparación (2a ed.)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Milimonfared, J., Meshgin Kelk, H., Nandi, S., & Toliyat, H. (1998). A Novel Approach for Broken Rotor Bar Detection in Cage Induction Motors. *IEEE*, 4.
- Morales, D., & Vanegas, J. (2005). Diseño de un controlador de velocidad para un Motor de Inducción utilizando Control Vectorial. *Tesis de Grado Universidad del Cauca*, 53-75.
- Nandi, S., Toliyat, H., & Xiaodong, L. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review. *IEEE Trans. Energy Convers*, 20, 719-729.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Maquinas Un Enfoque Integral*. Mexico: Pearson Educación.
- Obaid, R., Habetler, T., & Gritter, D. (2000). A simplified technique for detecting mechanical faults using stator current in small induction motors. *Conference Record of the 2000 IEEE*. Roma.

- Ojo, O., Osaloni, O., & Kshirsagar, P. (2002). Models for the control and simulation of synchronous type machine drives under various fault conditions. *Conference Record Ind. Applicat. Conf. 37th IAS Annual Meeting*, (pp. 1533-1540). Pittsburgh, USA.
- Ong, C.-M. (1988). *Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink*. Prentice Hall.
- Pardo García, A., & Díaz Rodríguez, J. (2006). THREE-PHASE INDUCTION MOTOR MODELING. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(8).
- Pérez Pozo, P., & Bermejo Campos, V. (2013). *Estudio de la vibración en baja frecuencia del motor eléctrico*. Madrid - España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Pimienta Dueñas, A. (2007). *Conceptos básicos de máquinas eléctricas*. El Cid Editor - Ingeniería.
- Ribas, C. (2002). *Diseño concurrente*. Profesor del departamento de Ingeniería Mecánica ETSEIB - UPC.
- Rockwell Automation. (1996). *Conceptos Básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos*. Suiza.
- Shi, K., Chan, T., Wong, Y., & Ho, S. (1999). Modeling and Simulation of the Three-Phase Induction Motor using Simulink. *Int. J. Elect. Enging. Educ.*, 36, 163-172.
- Siddique, A., & Yadava, G. S. (2005). A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors. *IEEE*, 9.
- Talbot, C. E., & Saavedra, P. N. (2013). Diagnosis of Induction Motors Bar Condition. *IEEE*, 15.
- Thomson, W., & Fenger, M. (2000). Industrial application of current signature analysis to diagnose faults in 3-phase squirrel cage induction motor. *Pulp and Paper Industry Technical Conference*, (pp. 205-211). Atlanta.
- Toliyat, H., & Kliman, G. (2004). *Handbook of Electric Motors 2nd ed*. Boca Raton, FL: Taylor and Francis.
- Vallvé Navarro, J., & Costa Castelló, R. (2007). Laboratorio virtual para prácticas de control por computador. *XXVIII Jornadas de Automática*. Huelva, España.
- Vidal Bort, J. (2002). Estudio del modelo matemático del motor de Inducción trifásico - Simulación en Régimen Dinámico. *Universitat Rovira i Virgili - Escola Tècnica Superior d'Enginyeria*. Tarragona - España.
- Williamson, S., & Mirzoian, K. (1985). Analysis of Cage Induction Motors with Stator Winding Faults. *IEEE Trans. PowerApp. Syst*, 1838-1842.

Anexo 2. Dimensiones motores de inducción carcasa 80M

Motor trifásico, con patas, caja de bornes arriba



Tamaño de carcasa	Polos	A	AA	AB	AC	AD	B	BB	C	D	DB	E	EG
71M	2-6	112	30	145	145	120	90	110	45	14	M5	30	12.5
80M	2-6	125	35	160	165	145	100	135	50	19	M6	40	16
90S	2-6	140	35	175	180	150	100	140	56	24	M8	50	19
90L	2-6	140	35	175	180	150	125	165	56	24	M8	50	19
100L	2-6	160	40	200	205	175	140	180	63	28	M10	60	22
112M	2-8	190	50	235	225	185	140	190	70	28	M10	60	22
132S	2-8	216	55	270	265	205	140	205	89	38	M12	80	28
132M	2-8	216	55	270	265	205	178	240	89	38	M12	80	28

Tamaño de carcasa	Polos	F	G	GD	H	HA	HD	HF	K	L	LD
71 M	2-6	5	11	5	71	10	200	-	7	255	100
80 M	2-6	6	15.5	6	80	12	225	170	10	285	116
90 S	2-6	8	20	7	90	12	240	185	10	310	128
90 L	2-6	8	20	7	90	12	240	185	10	335	128
100 L	2-6	8	24	7	100	14	275	245	12	380	144
112 M	2-6	8	24	7	112	15	290	265	12	380	144
132 S	2-6	10	33	8	132	18	335	300	12	465	169
132 M	2-6	10	33	8	132	18	335	300	12	505	169

Tolerancias:

A, B, C	+ , - 0.8	H	+ 0, - 0.5
D, DA	ISO m6	N	ISO j6
F, FA	ISO h9		

Anexo 3. Carga de parámetros iniciales del modelo de SIMULINK (MI_Ini.m)

```

%-----
% Parámetros del Motor de Inducción
%-----
Vms=220;    %Tensión fase-fase del estator
Vmr=0;      %Tensión del rotor
Rr=2.9643;  %Resistencia del rotor
Rra=Rr;
Rrb=Rr;
Rrc=Rr;
Rs=2.75;    %Resistencia del estator
Rsa=Rs;
Rsb=Rs;
Rsc=Rs;
Lm=0.13847; % Inductancia de magnetización
Ls=0.1451;  % Inductancia del estator
Lr=0.1451;  % Inductancia del rotor
f=60;       % Frecuencia de operación
P = 4;      % Numero de polos del motor de inducción
J = 0.00174; % Inercia del motor
Lms=Lm;     % Inductancia de magnetización del estator
Lmr=Lm;     % Inductancia de magnetización del rotor
Tcarga=4.2; % Par de carga externa

R = diag([Rsa Rsb Rsc Rra Rrb Rrc]); %Matriz de resistencias

% Parámetros para simulación de barras rotas
%-----

n=8; %numero de barras por fase
ix=0; %numero de barras rotas
fig=1; %Variable auxiliar para la simulación

```

Anexo 4. Matriz de resistencias del motor con ix barras rotas (MI_Falla.m)

```

%-----
%Cálculo del nuevo valor de resistencia proveniente de un fallo de [ix] barras rotas
%-----

Rf=(Rr*n)/(n-ix);
Rrb=Rf;
R = diag([Rsa Rsb Rsc Rra Rrb Rrc]);

```

Anexo 5. Análisis en frecuencia de las señales (MI_FFT.m).

```

%Transformada de Fourier
%-----
D0=corriente(1:600000,2);
%-----
%----- Parámetros para FFT -----
Lim=0.4;
F=60;           % Frecuencia de funcionamiento
Fs = 25000;     % Frecuencia de muestreo
T = 1/Fs;       % Tiempo de muestreo
L = 300000;     % Longitud de la senal
t = (0:L-1)*T;  % Vector de tiempo
%-----
%----- Parametros para Graficar
y=D0;
i=0;
NFFT = 2^nextpow2(L);
Y = fft(y,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
y1=2*abs(Y(1:NFFT/2+1));
figure1 = figure;
%-----
%Grafico del espectro y configuracion de la figura
%-----
axes1 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.13 0.127058823529412 0.788518518518519 0.710588235294118],...
    'FontSize',14,...
    'FontName','Arial Narrow');
xlim(axes1,[0 120]);
ylim(axes1,[0 0.4]);
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(f,y1);
title(['Simulación del espectro de la corriente del estator:',sprintf('\n'),'Carga = 4.2 [Nm],
f=',num2str(F),' [Hz], i=',num2str(ix),' barras rotas'],...
    'FontSize',12,...
    'FontName','Arial');
xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',12,'FontName','Arial');
ylabel('Amplitud |Y(f)|','FontSize',12,'FontName','Arial');

```

Anexo 6. Código en Matlab de la función para el cálculo de la matriz de inductancias

```
function [M, d_Msr]=Mat_M(Ls,Lms,Lr,Lmr,Lm,th)
%#eml
Mss=[Ls Lms*cos(2*pi/3) Lms*cos(-2*pi/3);Lms*cos(-2*pi/3) Ls
Lms*cos(2*pi/3);Lms*cos(2*pi/3) Lms*cos(-2*pi/3) Ls];

Mrr=[Lr Lmr*cos(2*pi/3) Lmr*cos(-2*pi/3);Lmr*cos(-2*pi/3) Lr
Lmr*cos(2*pi/3);Lmr*cos(2*pi/3) Lmr*cos(-2*pi/3) Lr];

Msr=[Lm*cos(th) Lm*cos(th+2*pi/3) Lm*cos(th-2*pi/3);Lm*cos(th-2*pi/3) Lm*cos(th)
Lm*cos(th+2*pi/3);Lm*cos(th+2*pi/3) Lm*cos(th-2*pi/3) Lm*cos(th)];

Mrs=Msr';
d_Msr=[-Lm*sin(th) -Lm*sin(th+2*pi/3) -Lm*sin(th-2*pi/3);-Lm*sin(th-2*pi/3) -
Lm*sin(th) -Lm*sin(th+2*pi/3);-Lm*sin(th+2*pi/3) -Lm*sin(th-2*pi/3) -Lm*sin(th)];

M=zeros(6,6);
M(1:3,1:3) = Mss;
M(4:6,4:6) = Mrr;
M(1:3,4:6) = Msr;
M(4:6,1:3) = Mrs;
```

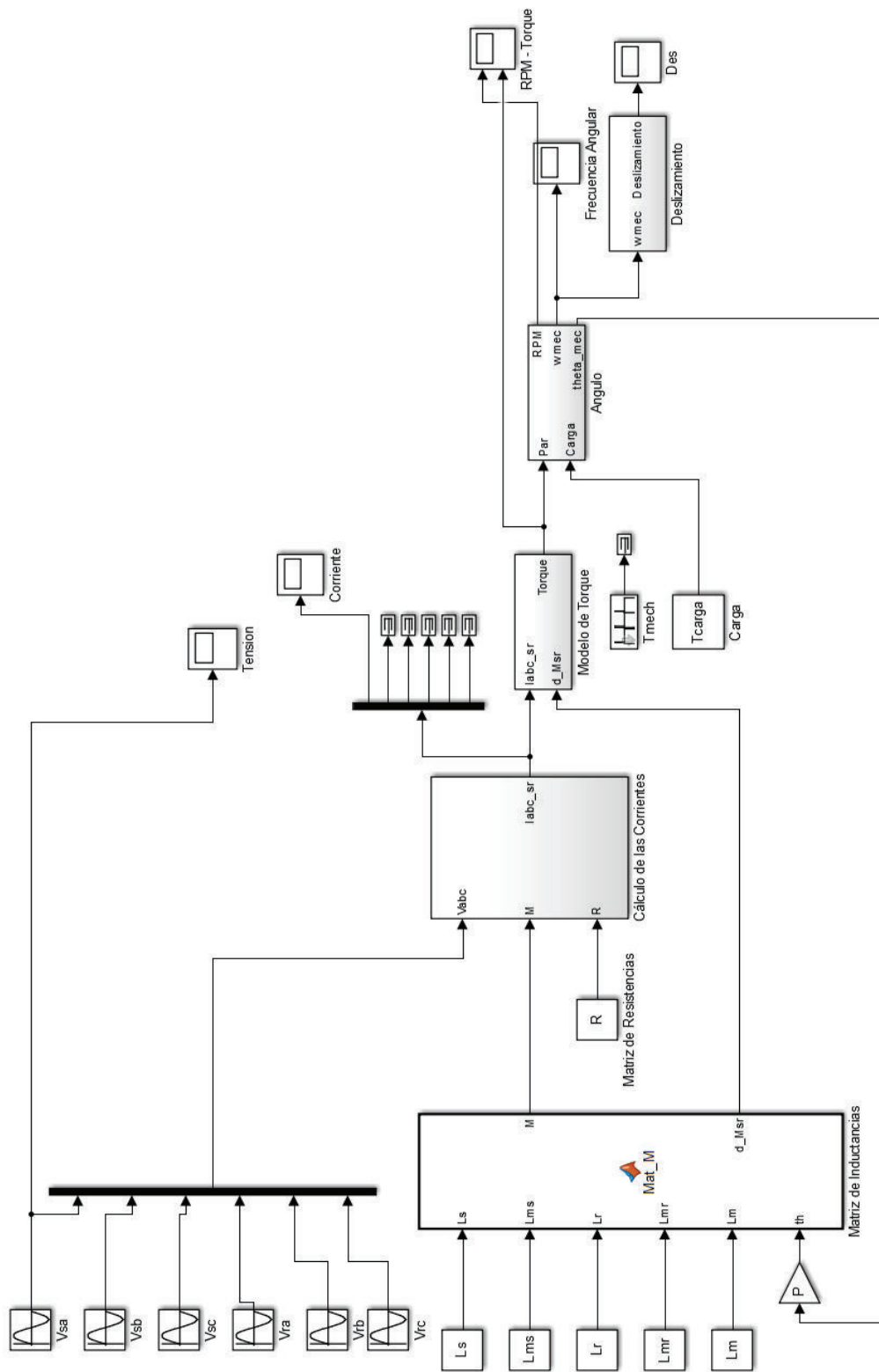
Anexo 7. Código de la función en Matlab para el cálculo del torque del motor

```
function [Is,Ir] = fcn(isa,isb,isc,ira,irb,irc)
%#eml

Is= zeros(1,3);
Ir= zeros(3,1);

Is = [isa isb isc];
Ir= [ira;irb;irc];
```

Anexo 8. Modelo del motor de inducción en Simulink



Anexo 9. Formato de pruebas

BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS

HOJA DE DATOS DE PRUEBA

1. Información General		
Nombre del técnico:		
Fecha:		Número de prueba:
2. Especificaciones del motor		
Potencia:Kw	Corriente nominal:A	Número de polos: 2 [] 4 [] 6 []
Torque nominal: A	Velocidad nominal:rpm	Factor de potencia:
Código del motor: _____		
Número de serie:		Marca:
3. Tipo de falla		
Barras rotas del rotor: [] b Excentricidad del rotor: [] e Cortocircuito del estator: [] c Falla de rodamientos: [] r	Nivel de daño Plano X-Y: Plano X-Z: 0 [] 1 [] 2 [] 3 [] 4 [] 0 % 25 % 50 % 75 % 80 %	____ [] ____ %
4. Parámetros de prueba		
Modo de operación: Manual: [] Automático []		
Par de carga: 0 [] 1 [] 2 [] 3 [] 4 []	Nm ____ []	
Velocidad: 0 % [] 25 % [] 50 % [] 75 % [] 100 % []	Rpm ____ %	
Frecuencia de muestreo:Hz		
Tiempo de muestreo:s		
4. Código de la matriz de datos		
<div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; gap: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p style="font-size: 2em; margin: 0;">M</p> <p style="font-size: 0.8em; margin: 5px 0;">-----</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Código del motor</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Par de carga</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Velocidad</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Nivel de daño</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Tipo de falla</div> </div> </div> </div>		
5. Observaciones		
.....		

Firma:

Anexo 10.- Matrices de datos para barras rotas del rotor

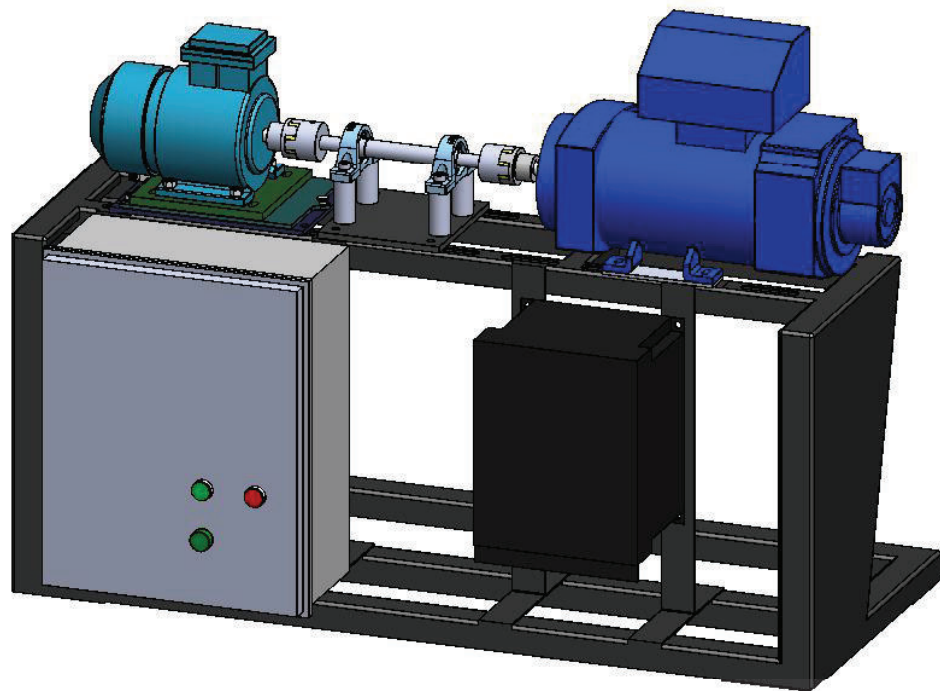
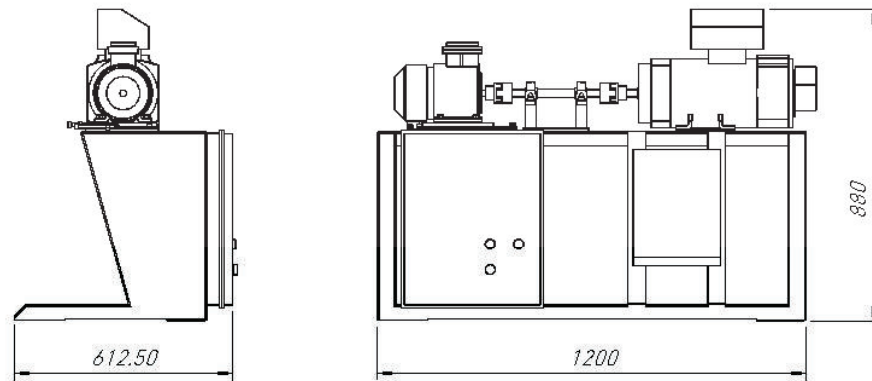
Código del motor	Par de carga	Velocidad %	# Barras rotas	Frecuencia de Funcionamiento (Hz)	Y(f)	Banda Lateral f1 (Hz)	Y(f1)	Banda Lateral f2 (Hz)	Y(f2)
M09	0	25	0	16,36	3,7117	-----	-----	-----	-----
	0	25	1	16,36	3,65	-----	-----	-----	-----
	0	25	2	16,36	3,52	-----	-----	-----	-----
	0	25	3	16,4	3,35	-----	-----	-----	-----
	1	25	0	16,45	3,23	-----	-----	-----	-----
	1	25	1	16,4	3,449	-----	-----	-----	-----
	1	25	2	16,4	3,372	-----	-----	-----	-----
	1	25	3	16,45	3,652	-----	-----	-----	-----
	2	25	0	16,45	3,501	-----	-----	-----	-----
	2	25	1	16,45	3,561	-----	-----	-----	-----
	2	25	2	16,45	3,643	-----	-----	-----	-----
	2	25	3	16,45	3,186	-----	-----	-----	-----
	3	25	0	16,55	3,442	-----	-----	-----	-----
	3	25	1	16,55	3,441	-----	-----	-----	-----
	3	25	2	16,55	3,77	-----	-----	-----	-----
	3	25	3	16,55	3,94	-----	-----	-----	-----
	0	50	0	30,95	5,086	-----	-----	-----	-----
	0	50	1	30,95	4,853	-----	-----	-----	-----
	0	50	2	30,95	5,229	-----	-----	-----	-----
	0	50	3	30,95	4,414	-----	-----	-----	-----
	1	50	0	31,04	4,461	-----	-----	-----	-----
	1	50	1	31,04	4,501	-----	-----	-----	-----
	1	50	2	31,04	4,697	-----	-----	-----	-----
	1	50	3	31,04	3,749	29,85	0,1085	32,28	0,1287
	2	50	0	31,04	5,265	-----	-----	-----	-----
	2	50	1	31,14	5,257	29,47	0,049	32,85	0,055
	2	50	2	31,14	5,369	29,37	0,091	32,9	0,051
	2	50	3	31,14	4,734	29,28	0,07	33,04	0,114
	3	50	0	31,23	4,488	-----	-----	-----	-----
	3	50	1	31,28	3,873	28,75	0,038	33,66	0,048
	3	50	2	31,23	4,079	28,71	0,123	33,81	0,082
	3	50	3	31,28	4,247	28,61	0,129	33,9	0,106
	0	75	0	45,54	5,079	-----	-----	-----	-----
	0	75	1	45,54	5,578	-----	-----	-----	-----
	0	75	2	45,54	5,547	-----	-----	-----	-----
	0	75	3	45,54	5,638	44,92	0,037	46,16	0,034
	1	75	0	45,68	5,242	-----	-----	-----	-----
	1	75	1	45,68	5,859	44,25	0,024	47,11	0,024
	1	75	2	45,68	5,751	44,16	0,067	47,16	0,045
	1	75	3	45,68	5,785	44,06	0,057	47,3	0,123
	2	75	0	45,82	5,892	-----	-----	-----	-----
	2	75	1	45,82	5,895	43,49	0,035	48,11	0,043
	2	75	2	45,82	5,797	43,34	0,057	48,3	0,066
	2	75	3	45,82	6,233	43,25	0,095	48,4	0,135
	3	75	0	45,97	6,422	-----	-----	-----	-----
3	75	1	45,97	6,915	42,58	0,039	49,35	0,035	
3	75	2	45,97	7,026	42,34	0,093	49,59	0,093	
3	75	3	45,97	7,011	42,25	0,143	49,73	0,109	
0	100	0	60,08	4,411	-----	-----	-----	-----	
0	100	1	60,08	4,931	-----	-----	-----	-----	
0	100	2	60,08	4,748	-----	-----	-----	-----	
0	100	3	60,08	5,136	59,37	0,045	60,84	0,035	
1	100	0	60,27	4,655	-----	-----	-----	-----	
1	100	1	60,27	4,73	58,08	0,03	62,37	0,044	
1	100	2	60,27	5,226	58,08	0,055	62,47	0,098	
1	100	3	60,27	4,868	58,03	0,094	62,56	0,091	
2	100	0	60,51	4,362	-----	-----	-----	-----	
2	100	1	60,51	4,657	56,89	0,07	64,09	0,069	
2	100	2	60,51	4,368	56,7	0,155	64,28	0,117	
2	100	3	60,51	5,894	56,41	0,231	64,56	0,101	
3	100	0	60,7	7,836	-----	-----	-----	-----	
3	100	1	60,7	6,72	55,12	0,131	66,28	0,036	
3	100	2	60,7	5,996	54,74	0,228	66,71	0,111	
3	100	3	60,75	8,287	54,22	0,314	67,28	0,138	

Código del motor	Par de carga	Velocidad %	# Barras rotas	Frecuencia de Funcionamiento (Hz)	Y(f)	Banda Lateral f1 (Hz)	Y(f1)	Banda Lateral f2 (Hz)	Y(f2)
M40	0	25	0	16,36	4,393	-----	-----	-----	-----
	0	25	1	16,36	3,99	-----	-----	-----	-----
	0	25	2	16,36	4,553	-----	-----	-----	-----
	0	25	3	16,36	4,045	-----	-----	-----	-----
	1	25	0	16,4	3,515	-----	-----	-----	-----
	1	25	1	16,4	3,923	-----	-----	-----	-----
	1	25	2	16,45	3,665	-----	-----	-----	-----
	1	25	3	16,4	3,769	-----	-----	-----	-----
	2	25	0	16,45	4,211	-----	-----	-----	-----
	2	25	1	16,5	3,437	-----	-----	-----	-----
	2	25	2	16,45	3,95	-----	-----	-----	-----
	2	25	3	16,45	3,981	-----	-----	-----	-----
	3	25	0	16,5	3,68	-----	-----	-----	-----
	3	25	1	16,5	3,14	-----	-----	-----	-----
	3	25	2	16,5	3,982	-----	-----	-----	-----
	3	25	3	16,5	3,16	-----	-----	-----	-----
	0	50	0	30,95	5,261	-----	-----	-----	-----
	0	50	1	30,95	5,437	-----	-----	-----	-----
	0	50	2	30,95	4,021	-----	-----	-----	-----
	0	50	3	30,95	5,285	-----	-----	-----	-----
	1	50	0	31,04	4,673	-----	-----	-----	-----
	1	50	1	31,04	5,049	-----	-----	-----	-----
	1	50	2	31,04	3,966	-----	-----	-----	-----
	1	50	3	31,04	4,847	29,8	0,07	32,33	0,054
	2	50	0	31,14	5,29	-----	-----	-----	-----
	2	50	1	31,19	5,104	29,23	0,034	39,09	0,047
	2	50	2	31,14	5,322	29,33	0,05	33,09	0,076
	2	50	3	31,14	5,43	29,18	0,118	33	0,052
	3	50	0	31,23	5,8	-----	-----	-----	-----
	3	50	1	31,23	5,915	28,66	0,057	34	0,066
	3	50	2	31,33	5,838	28,61	0,061	33,81	0,042
	3	50	3	31,23	4,681	28,51	0,094	33,86	0,073
	0	75	0	45,54	4,64	-----	-----	-----	-----
	0	75	1	45,54	4,751	-----	-----	-----	-----
	0	75	2	45,49	5,439	-----	-----	-----	-----
	0	75	3	45,54	4,554	-----	-----	-----	-----
	1	75	0	45,68	5,617	-----	-----	-----	-----
	1	75	1	45,68	5,373	44,2	0,047	47,4	0,031
	1	75	2	45,68	5,7	44,11	0,051	47,16	0,066
	1	75	3	45,68	5,392	44,01	0,073	47,25	0,059
	2	75	0	45,82	4,836	-----	-----	-----	-----
	2	75	1	45,87	4,581	43,2	0,01	48,54	0,061
2	75	2	45,82	5,994	43,3	0,058	48,3	0,061	
2	75	3	45,82	5,367	43,11	0,065	48,49	0,08	
3	75	0	45,97	6,407	-----	-----	-----	-----	
3	75	1	45,97	6,067	42,3	0,09	49,59	0,06	
3	75	2	45,97	6,965	42,15	0,062	49,88	0,051	
3	75	3	45,97	6,937	42,1	0,153	49,78	0,122	
0	100	0	60,7	7,412	-----	-----	-----	-----	
0	100	1	60,8	3,473	-----	-----	-----	-----	
0	100	2	60,03	4,873	-----	-----	-----	-----	
0	100	3	60,08	3,355	-----	-----	-----	-----	
1	100	0	60,27	4,612	-----	-----	-----	-----	
1	100	1	60,27	5,426	58,13	0,041	62,42	0,05	
1	100	2	60,27	3,854	57,98	0,047	62,7	0,031	
1	100	3	60,2	5,083	57,84	0,056	62,61	0,083	
2	100	0	60,46	4,541	-----	-----	-----	-----	
2	100	1	60,51	4,54	56,46	0,064	64,56	0,064	
2	100	2	60,51	5,896	56,51	0,085	64,8	0,047	
2	100	3	60,51	5,265	56,17	0,1472	64,47	0,137	
3	100	0	60,7	7,412	-----	-----	-----	-----	
3	100	1	67	7,925	54,69	0,142	66,71	0,06	
3	100	2	60,7	5,889	54,45	0,1753	67,42	0,062	
3	100	3	60,75	7,382	54,07	0,313	67	0,128	

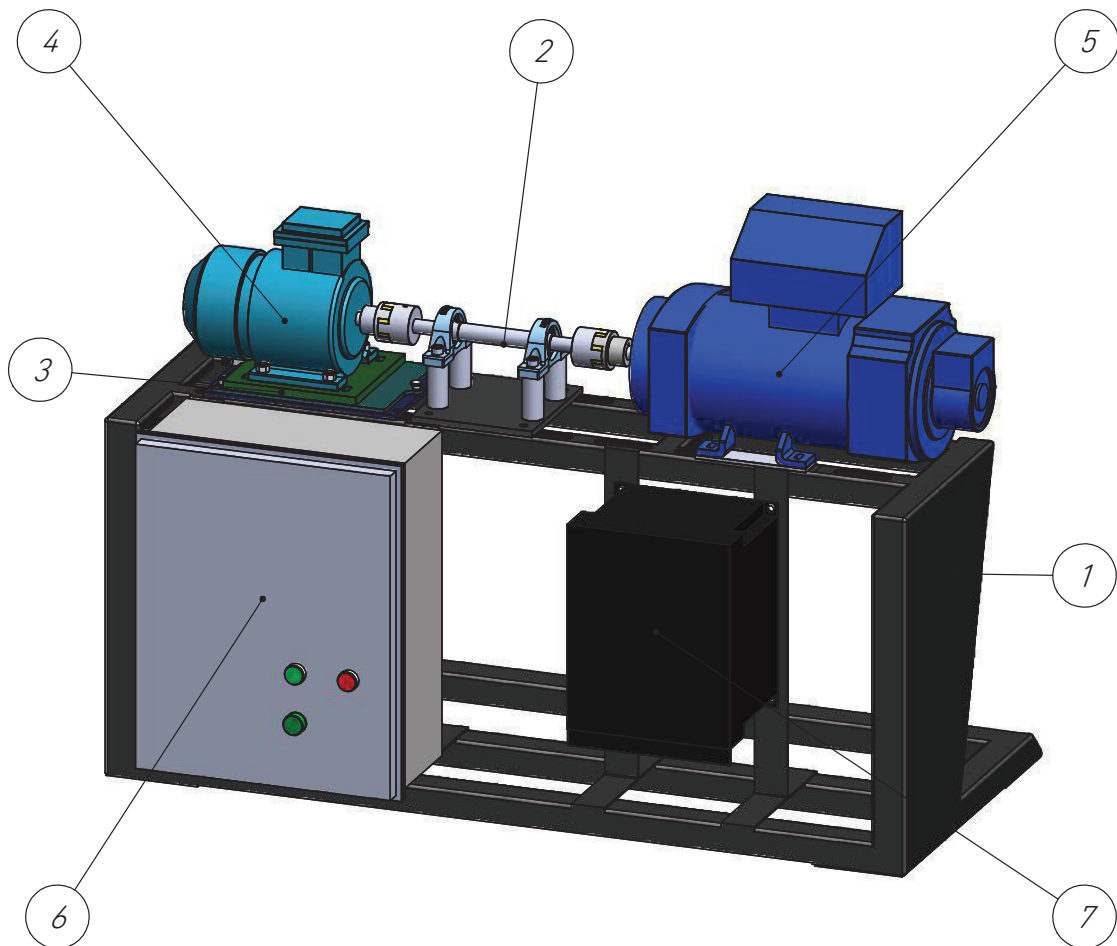
Código del motor	Par de carga	Velocidad %	# Barras rotas	Frecuencia de Funcionamiento (Hz)	Y(f)	Banda Lateral f1 (Hz)	Y(f1)	Banda Lateral f2 (Hz)	Y(f2)
M11	0	25	0	16,36	4,512	-----	-----	-----	-----
	0	25	1	16,36	4,58	-----	-----	-----	-----
	0	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	25	0	16,4	4,57	-----	-----	-----	-----
	1	25	1	16,4	4,459	-----	-----	-----	-----
	1	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	25	0	16,45	4,604	-----	-----	-----	-----
	2	25	1	16,45	4,367	-----	-----	-----	-----
	2	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	25	0	16,5	4,478	-----	-----	-----	-----
	3	25	1	16,5	4,147	15,07	0,062	17,98	0,046
	3	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	50	0	30,95	4,936	-----	-----	-----	-----
	0	50	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	50	0	31,04	5,167	-----	-----	-----	-----
	1	50	1	31,04	5,062	-----	-----	-----	-----
	1	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	50	0	31,14	5,297	-----	-----	-----	-----
	2	50	1	31,14	5,4	-----	-----	-----	-----
	2	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	50	0	31,23	5,708	-----	-----	-----	-----
	3	50	1	31,23	5,707	28,85	0,023	33,62	0,038
	3	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	75	0	45,54	3,851	-----	-----	-----	-----
	0	75	1	45,54	4,472	-----	-----	-----	-----
	0	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	75	0	45,98	4,9	-----	-----	-----	-----
	1	75	1	45,68	5,108	-----	-----	-----	-----
	1	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	75	0	45,82	3,912	-----	-----	-----	-----
	2	75	1	45,82	5,294	43,49	0,041	48,16	0,053
2	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	75	0	45,97	5,213	-----	-----	-----	-----	
3	75	1	45,97	5,755	42,58	0,0619	49,3	0,061	
3	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
0	100	0	60,03	3,902	-----	-----	-----	-----	
0	100	1	60,08	3,95	-----	-----	-----	-----	
0	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
0	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
1	100	0	60,27	5,307	-----	-----	-----	-----	
1	100	1	60,27	5,183	58,27	0,033	62,32	0,0476	
1	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
1	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	100	0	60,46	5,104	-----	-----	-----	-----	
2	100	1	60,46	4,439	56,93	0,083	63,99	0,038	
2	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	100	0	60,7	5,979	-----	-----	-----	-----	
3	100	1	60,7	7,253	55,36	0,08	65,99	0,065	
3	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	

Código del motor	Par de carga	Velocidad %	# Barras rotas	Frecuencia de Funcionamiento (Hz)	Y(f)	Banda Lateral f1 (Hz)	Y(f1)	Banda Lateral f2 (Hz)	Y(f2)
M12	0	25	0	16,36	4,375	-----	-----	-----	-----
	0	25	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	25	0	16,4	4,348	-----	-----	-----	-----
	1	25	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	25	0	16,45	4,184	-----	-----	-----	-----
	2	25	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	25	0	16,5	3,667	-----	-----	-----	-----
	3	25	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	25	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	25	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	50	0	30,95	5,366	-----	-----	-----	-----
	0	50	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	50	0	31,04	5,139	-----	-----	-----	-----
	1	50	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	50	0	31,14	5,62	-----	-----	-----	-----
	2	50	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	50	0	31,23	5,863	-----	-----	-----	-----
	3	50	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	50	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3	50	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	75	0	45,54	4,886	-----	-----	-----	-----
	0	75	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	0	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	75	0	45,86	5,195	-----	-----	-----	-----
	1	75	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	1	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2	75	0	45,82	5,393	-----	-----	-----	-----
	2	75	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	75	0	45,97	6,715	-----	-----	-----	-----	
3	75	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	75	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	75	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
0	100	0	60,08	3,6	-----	-----	-----	-----	
0	100	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
0	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
0	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
1	100	0	60,27	5,306	-----	-----	-----	-----	
1	100	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
1	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
1	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	100	0	60,71	4,616	-----	-----	-----	-----	
2	100	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	100	0	60,75	7,164	-----	-----	-----	-----	
3	100	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	100	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	100	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	

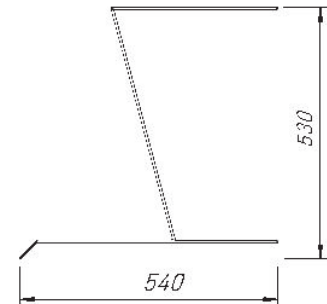
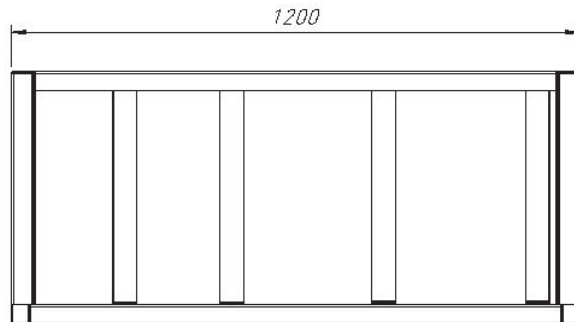
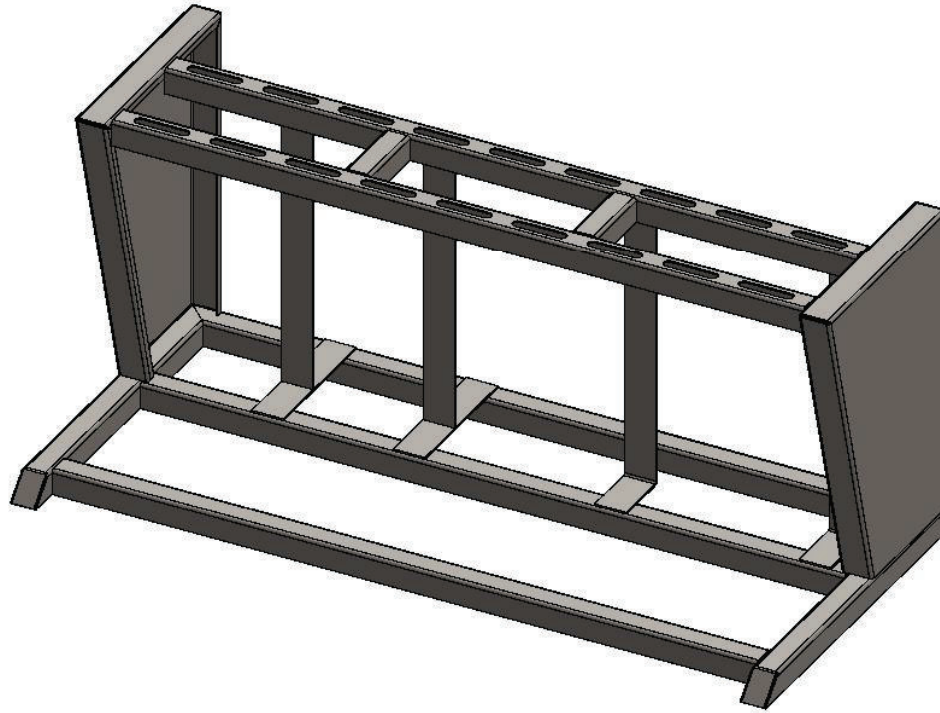
Anexo 11.- Conjunto de planos



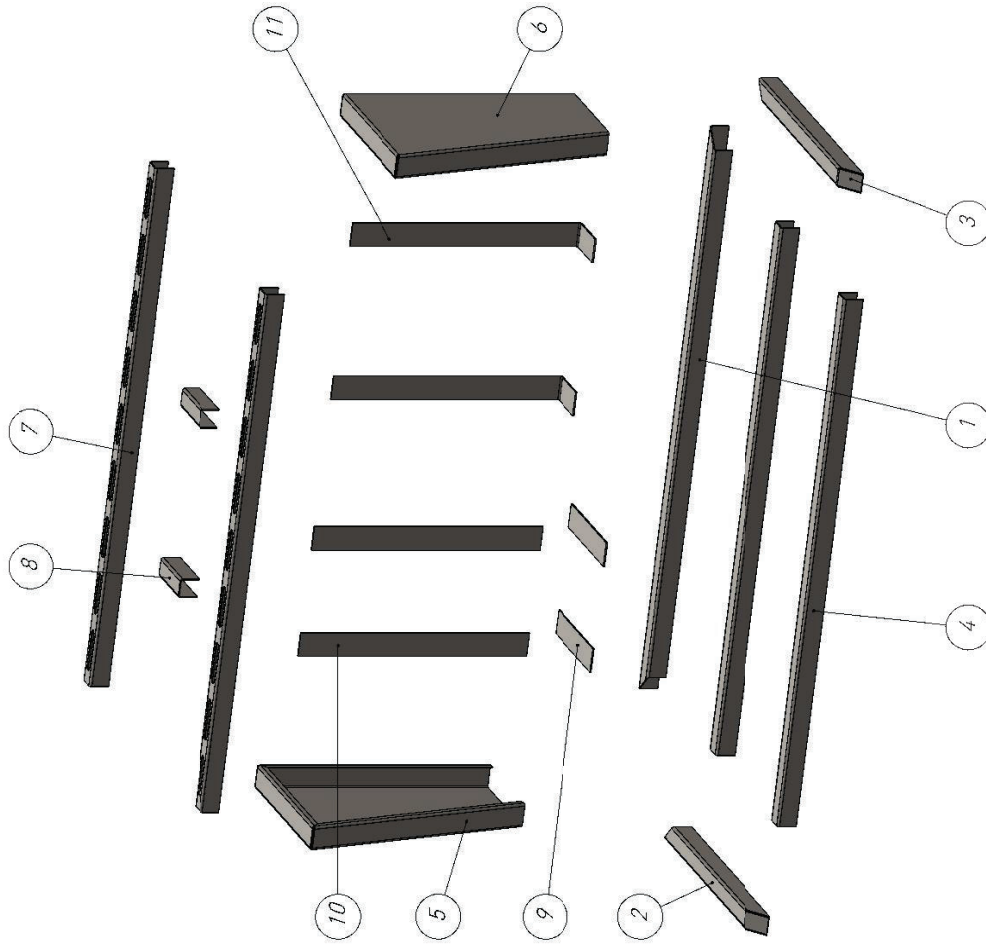
RECUBRIMIENTO	PINTURA	<i>E. P. N.</i>	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO			
TRATAMEINTO SUPERFICIAL	NINGUNO			
Material:	Tol. Gral. :	Escala :	DIB:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
Varios	+/- 0.1	1:10	DIS:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
			REV:	
<i>Banco de Pruebas para Motores de Inducción Trifasicos</i>		3022.EPN.CIM.DC.RG.100.1		Fecha :
				20/11/2014



No.	DENOMINACIÓN	CANTIDAD	MATERIAL	No. DE PLANO
1	Estructura Soporte	1	ASTM A36	101
2	Acople Central	1	AISI 1045	102
3	Soporte de Motor	1	AISI 1045	103
4	Motor de 1 HP	1	N/A	N/A
5	Generador de 1.6 KW	1	N/A	N/A
6	Caja de Control	1	N/A	N/A
7	Variador de Frecuencia	1	N/A	N/A
RECUBRIMIENTO		PINTURA		E. P. N. MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
TRATAMIENTO TÉRMICO		NINGUNO		
TRATAMEINTO SUPERFICIAL		NINGUNO		
Material: Varios		Tol. Gral. : +/- 0.1	Escala : 1:10	DIB: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D. DIS: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D. REV:
Banco de Pruebas para Motores de Inducción Trifasicos			3022.EPN.CIM.DC.RG.100.2	Fecha : 20/11/2014



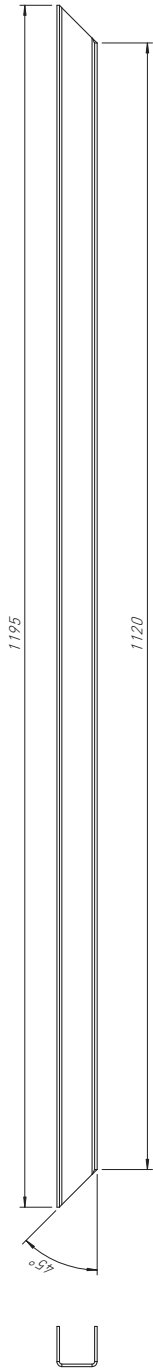
RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL		
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO				
TRATAMEINTO SUPERFICIAL	NINGUNO				
Material:	ASTM A36	Tol. Gral. : +/- 0.1	Escala : 1:15	DIB: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.	
				DIS: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.	
				REV:	
ESTRUCTURA SOPORTE PLANO CONJUNTO			3022.EPN.CIM.DC.RG.101		Fecha : 20/11/2014



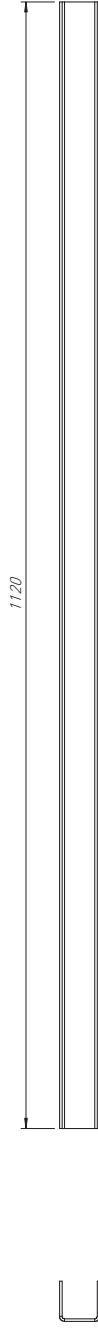
No.	DENOMINACIÓN	CANT.	MATERIAL	No. DE PLANO
1	Perfil Base Posterior	1	ASTM A36	101.3
2	Perfil Base Izquierdo	1	ASTM A36	101.3
3	Perfil Base Derecho	1	ASTM A36	101.3
4	Perfil Base Medio	2	ASTM A36	101.3
5	SopORTE Lateral Izquierdo	1	ASTM A36	101.4
6	SopORTE Lateral Derecho	1	ASTM A36	101.5
7	Perfil Superior Riel	2	ASTM A36	101.6
8	Perfil Superior Medio Riel	2	ASTM A36	101.6
9	Perfil Inferior SopORTE Variador	2	ASTM A36	101.6
10	Perfil SopORTE Variador	2	ASTM A36	101.6
11	Perfil SopORTE Caja de Control	2	ASTM A36	101.6

RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACION INDUSTRIAL
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NINGUNO		
Material:	ASTM A36		
Tol. Gral.: +/- 0.1		Escala:	DIB: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
			DIS: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
			REV:
ESTRUCTURA SOPORTE DESPIECE		3022.EPN.CIM.DC.RG.101.2	
		Fecha: 20/11/2014	

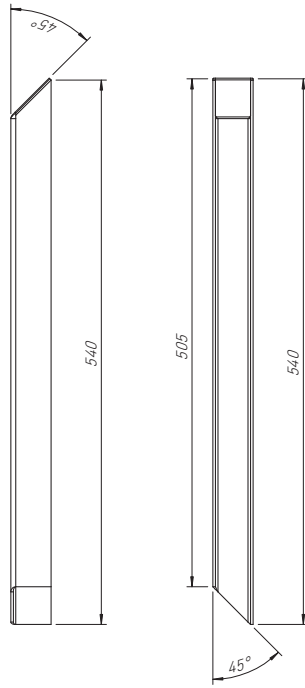
PERFIL BASE POSTERIOR



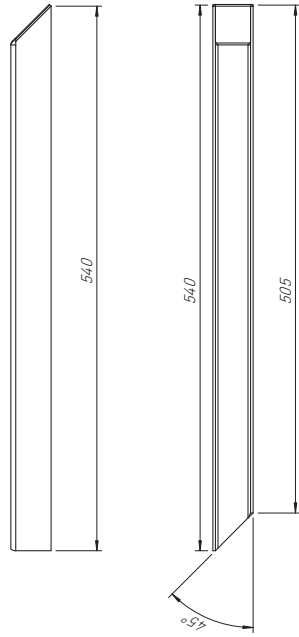
PERFIL BASE MEDIO



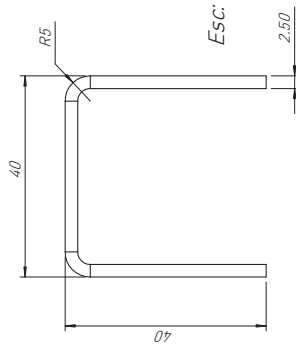
PERFIL BASE LATERAL IZQUIERDO



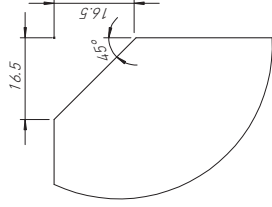
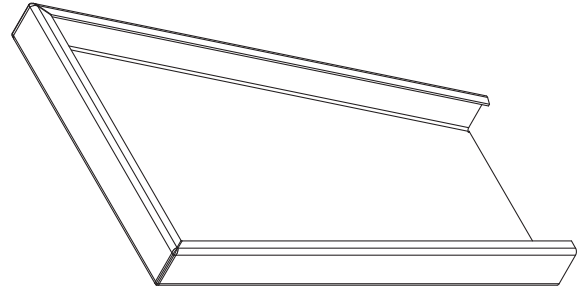
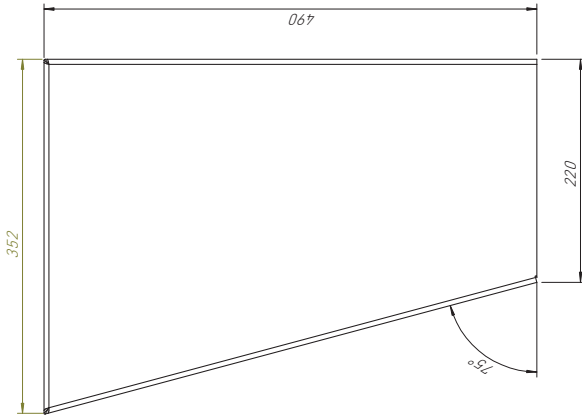
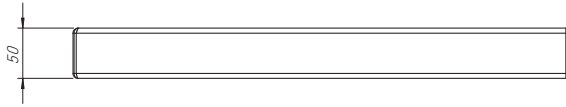
PERFIL BASE LATERAL DERECHO



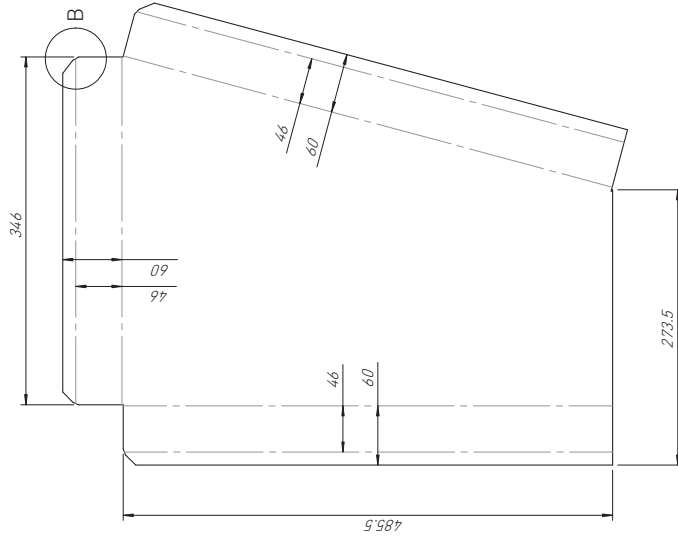
FORMA DE PERFILES BASE



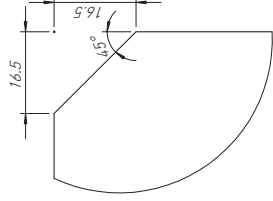
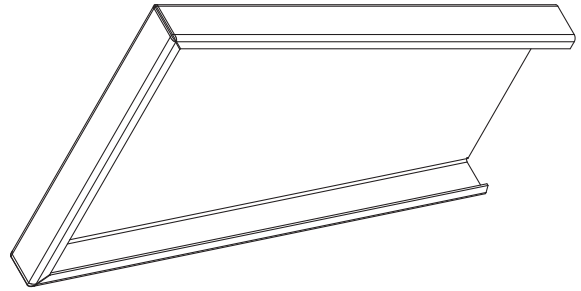
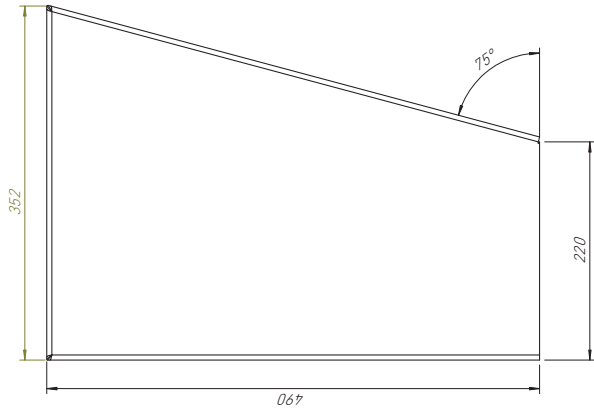
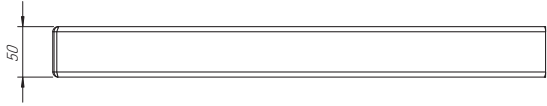
RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO		
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NINGUNO		
Material:	ASTM A36	Escala:	DIB: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
		Tol. Graf.:	DIS: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
			REV:
Perfiles para Base Posterior, Laterales y Medios		3022.EPN.CIM.DC.RG.101.3	
		Fecha: 20/11/2014	



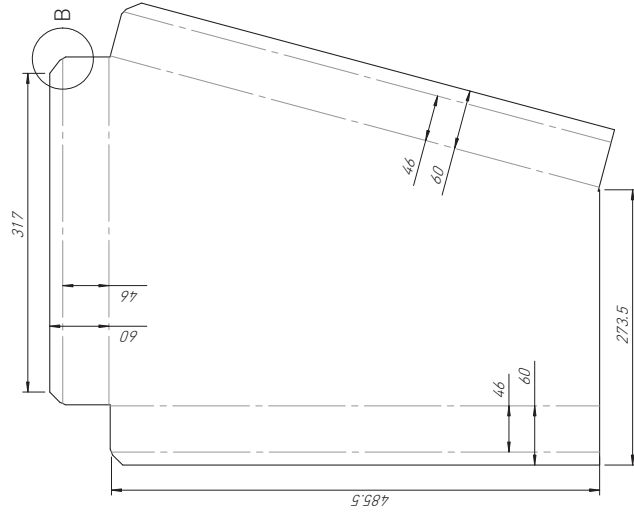
DETALLE B
ESCALA 1 : 1



RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO		DIB: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NINGUNO		DIS: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
Material:	ASTM A36	Escala: 1:5	REV:
		Tol. Graf.: +/- 0.1	
Soporte Lateral Derecho		3022.EPN.CM.DC.RG.101.4	
		Fecha: 20/11/2014	

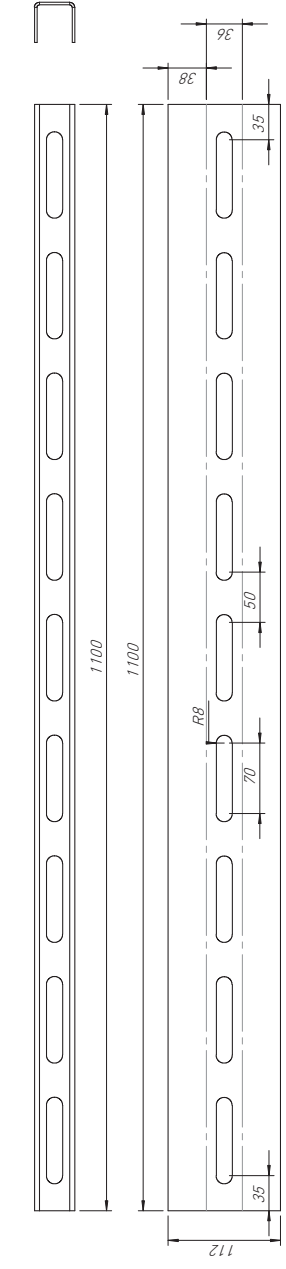


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

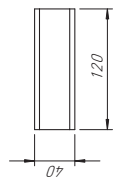


RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO		
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NINGUNO		
Material:	ASTM A36	Escala:	1:5
		Tol. Graf.:	+/- 0.1
Soporte Lateral Izquierdo		3022.EPN.CIM.DC.RG.101.5	
		Fecha: 20/11/2014	

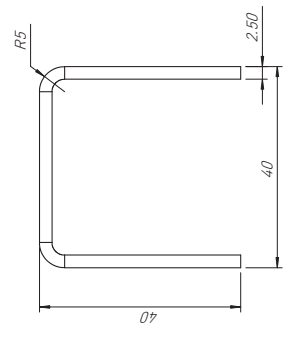
PERFIL SUPERIOR RIEL



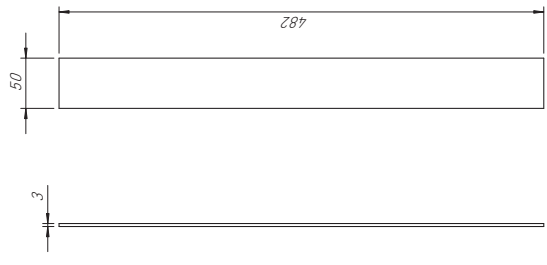
PERFIL SUPERIOR MEDIO



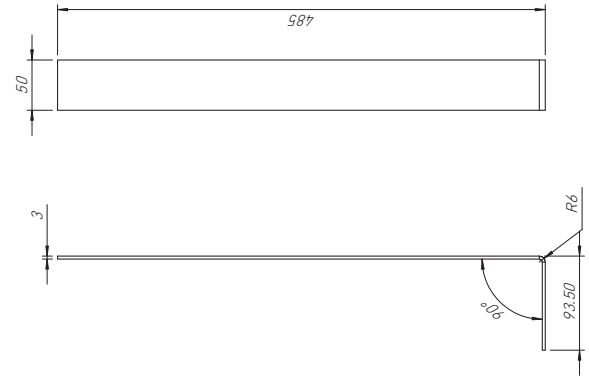
FORMA PERFIL



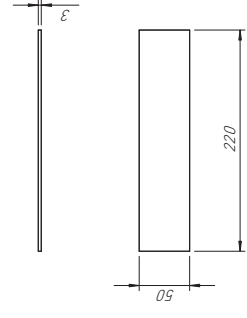
PERFIL SOPORTE VARIADOR



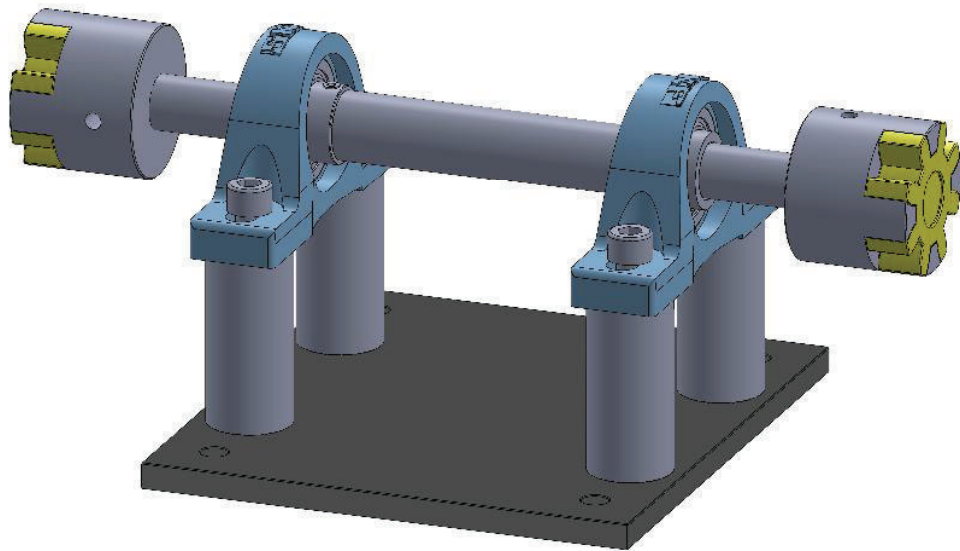
PERFIL SOPORTE CAJA DE CONTROL



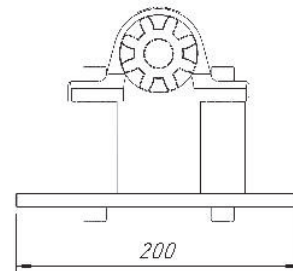
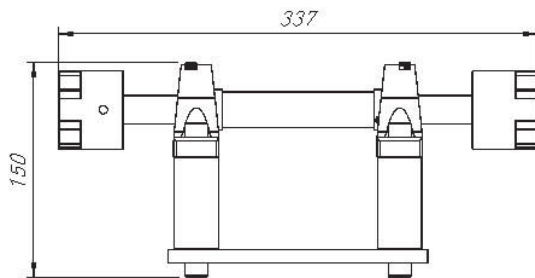
PERFIL INFERIOR SOPORTE VARIADOR



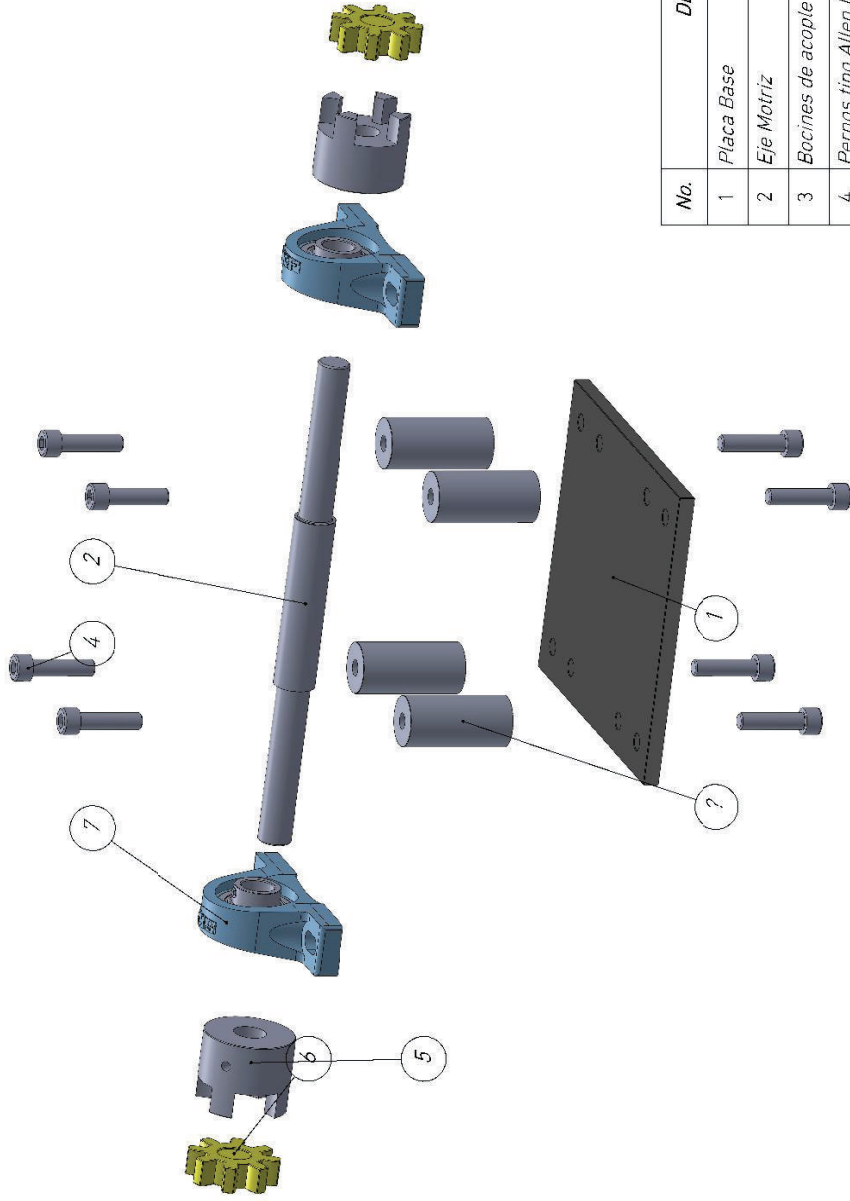
RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL		
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO		DIB:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.	
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NINGUNO		DIS:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.	
Material:	ASTM A36	Escala:	1:5	REV:	
Tol. Graf.:		+/- 0.1			
PERFILES RIELES SUPERIORES Y SOPORTES VARIADOR Y CAJA DE CONTROL		3022.EPN.CIM.DC.RG.101.6			
		Fecha: 20/11/2014			



Esc: 1:10



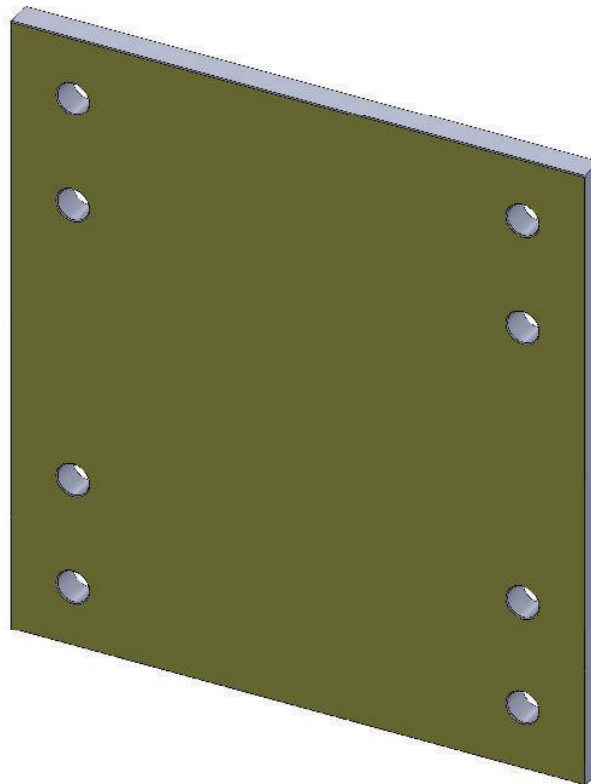
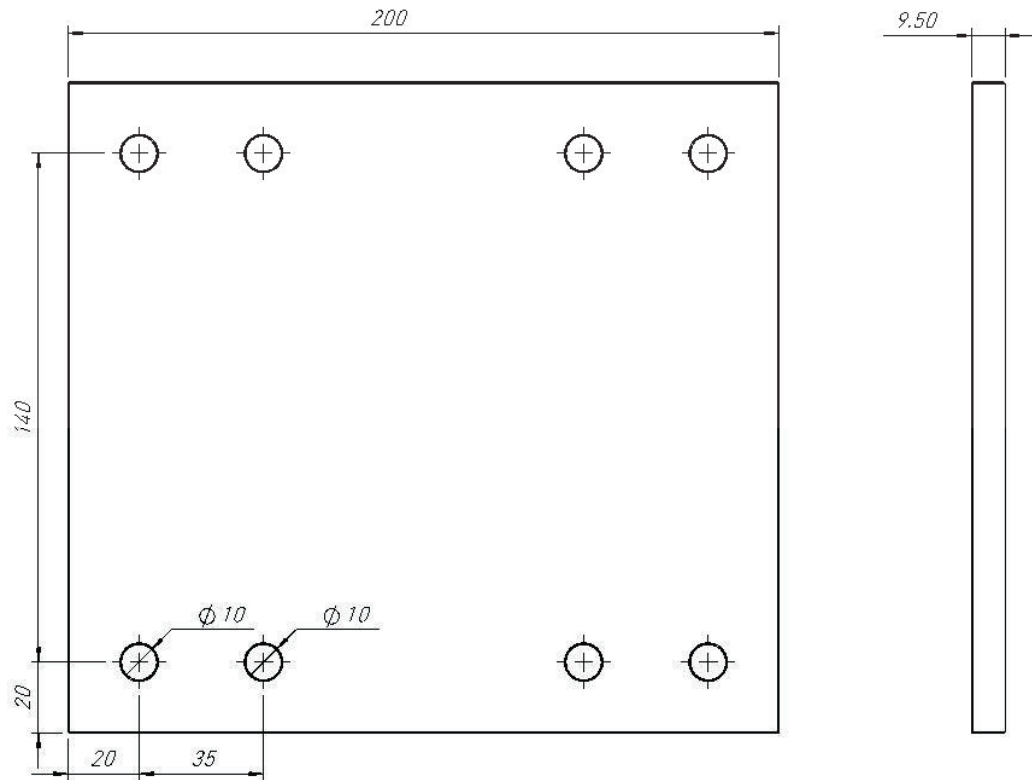
RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO			
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NINGUNO			
Material:	Tol. Gral. :	Escala :	DIB:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
Varios	+/- 0.1	1:5	DIS:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
			REV:	
Acople Central Plano Conjunto		3022.EPN.CIM.DC.RG.102		Fecha : 20/11/2014



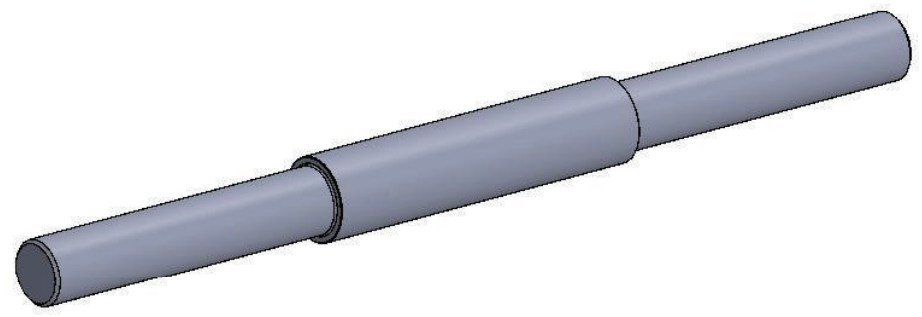
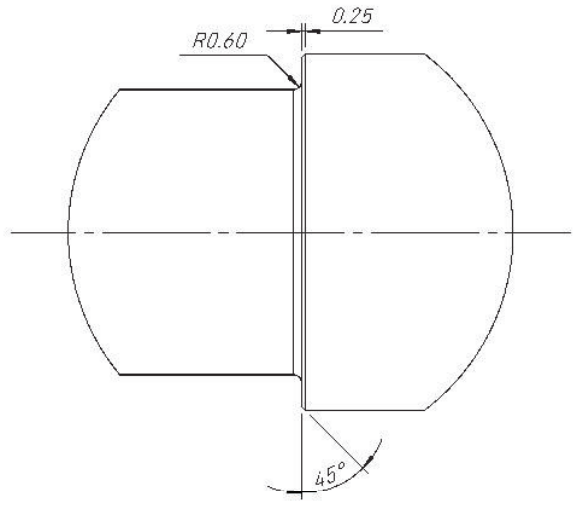
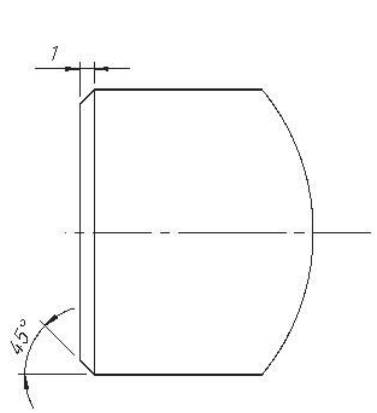
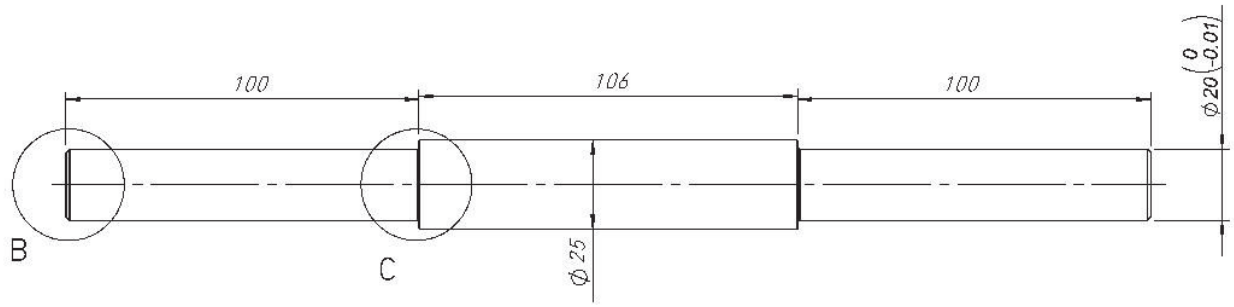
No.	DENOMINACIÓN	CANT.	MATERIAL	No. DE PLANO
1	Placa Base	1	ASTM A36	102.2
2	Eje Motriz	1	AISI 1045	102.3
3	Bocines de acople	4	AISI 1045	102.4
4	Pernos tipo Allen M10 x 1,5 x 40	8	GRADO 8.8	N/A
5	Acople de quijada marca LoveJoy AL070	2	Aluminio	N/A
6	Inserto Flexible	2	Caucho	N/A
7	Chumacera marca SKF SY 20 TF con Rodamiento YAR-204	2	Varios	N/A

RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NINGUNO		
Material:	Varios		
Tol. Gral.: +/- 0.1		Escala:	DIB: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
			DIS: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
			REV:

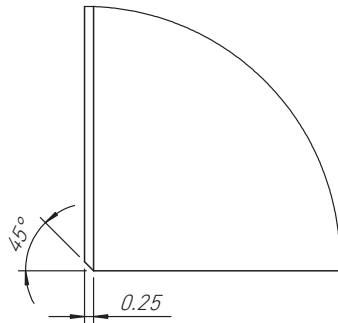
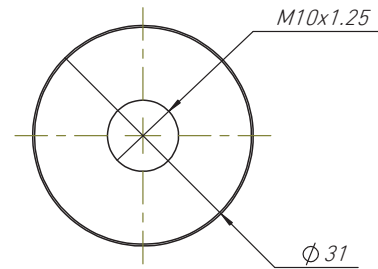
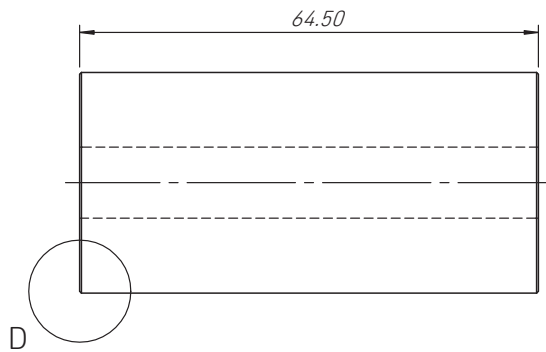
Despiece Acople Central		3022.EPN.CIM.DC.RG.102.1	Fecha: 20/11/2014
-------------------------	--	--------------------------	-------------------



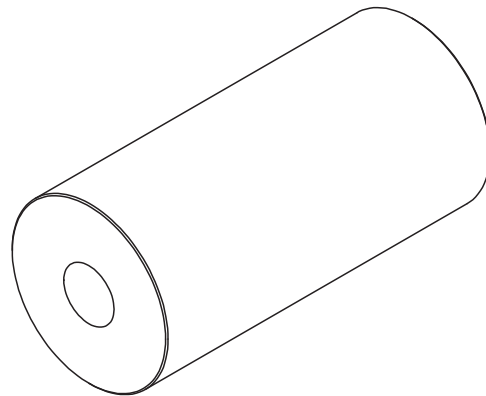
RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO		DIB:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
TRATAMEINTO SUPERFICIAL	NINGUNO		DIS:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
Material:	ASTM- A36	Tol. Gral. : +/- 0.1	Escala : 1:2	REV:
Placa Base Acople Central			3022.EPN.CIM.DC.RG.102.2	Fecha : 20/11/2014



RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO		DIB:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
TRATAMEINTO SUPERFICIAL	NINGUNO		DIS:	CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.
Material:	AISI 1045	Tol. Gral. : +/- 0.02	Escala : 1:2	REV:
<i>Eje de Acople Central</i>			3022.EPN.CIM.DC.RG.102.3	Fecha : 20/11/2014



DETALLE D
ESCALA 5 : 1



RECUBRIMIENTO	PINTURA	E. P. N.	MAESTRIA EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL		
TRATAMIENTO TÉRMICO	NINGUNO				
TRATAMEINTO SUPERFICIAL	NINGUNO				
Material:	AISI 1045	Tol. Gral. : +/- 0.02	Escala : 1:1	DIB: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.	
				DIS: CASTELLANOS S./SOTOMAYOR D.	
				REV:	
BOCIN DE ACOUPLE			3022.EPN.CIM.DC.RG.102.3		Fecha : 20/11/2014