

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE MOTORES
ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS PARA USO DIDÁCTICO**

PRESENTADO POR:

**JUAN RAMÓN CONTRERAS VILLEDA
ANA RUTH LOPEZ GONZÁLEZ
MARCOS ERNESTO PADILLA TREJO
KATHERINE MARLENE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO :

Lic. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCIA

SECRETARIO :

Arq. RAUL ALEXANDER FABIAN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

DIRECTOR :

M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMON TORRES RIOS LAZO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE MOTORES
ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS PARA USO DIDÁCTICO**

Presentado por:

JUAN RAMÓN CONTRERAS VILLEDA

ANA RUTH LOPEZ GONZÁLEZ

MARCOS ERNESTO PADILLA TREJO

KATHERINE MARLENE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesor:

Ing. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

SAN SALVADOR, ABRIL DE 2026

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Ing. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

Tribunal Calificador:

F. _____

Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

F. _____

Ing. Francisco Alfredo De León Torres

F. _____

Ing. Rigoberto Velásquez Paz

DEDICATORIA

A mi madre que me ha apoyado desde que inicié esta prueba a la perseverancia que es estudiar una carrera universitaria en la Universidad de El Salvador.

Agradezco también a mi compañero y amigo Marcos Padilla, sin cuya inestimable colaboración, este trabajo de graduación nunca habría llegado a buen término.

También agradezco a mi futura esposa Ingrid Álvarez por no dejarme rendirme en las últimas instancias del proyecto. La amo mucho.

Juan Contreras

DEDICATORIA

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a Dios, quien ha sido la fuente de todo conocimiento y sabiduría en mi vida. Sin Su guía y fortaleza, este logro no habría sido posible.

A mi hermano Isaac López, por su apoyo incondicional durante todos mis años de estudio. Su compañía y respaldo fueron fundamentales para superar cada desafío.

A mi madre Virginia González, quien siempre confió en mí y me brindó su amor, paciencia y palabras de aliento en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mis capacidades y por ser mi inspiración constante.

A mi buen amigo Gabriel Medrano, por estar siempre presente para animarme a continuar, recordándome que nunca debía rendirme. Su motivación y amistad fueron pilares importantes en este camino.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad. Cada gesto de apoyo, cada palabra de ánimo y cada momento compartido han dejado una huella imborrable en mi vida.

Ana Ruth

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por el respaldo a lo largo de toda mi vida; al final no se trata de quién quiere ni de quién puede, es meramente la infinita misericordia de él.

A mi madre Noemi Trejo y mi padre René Padilla, cuyo apoyo ha sido un refugio invaluable. Sus consejos y su respaldo económico han sido fundamentales para alcanzar cada uno de los logros que hoy celebro y el lugar donde ahora me encuentro.

A Víctor García, por convertirse en un pilar en mi desarrollo profesional. Su guía y disposición para ayudarme hicieron que este trabajo de graduación fuera más asequible.

Y a mi amigo Juan Contreras, por ser un apoyo indispensable en la culminación de este proyecto.

Marcos Padilla.

DEDICATORIA

Primeramente, doy gracias a Dios por haberme permitido llegar a este punto de mi vida, por haberme guiado, por darme la fuerza, inteligencia, sabiduría y fortaleza necesaria para poder coronar esta carrera.

Agradecer a mis amados padres por guiarme en todo momento, a mi papá Valmore Rodríguez Funes y a mi mami Gloria Marlene Hernández de Rodríguez por haberme apoyado a lo largo de mi vida, por haber creído en mí y por siempre haberme brindado lo necesario y mucho más para seguir adelante y poder culminar este viaje.

A mi querido hermano mayor Franklin Balmore Rodríguez Hernández por ser un apoyo incondicional, por creer en mí siempre y por ser alguien con el que he podido contar durante toda mi vida.

A mi querida hermanita menor Tania Judith Rodríguez Hernández por ser de igual manera un gran apoyo incondicional, por creer en mí siempre y por ser alguien con quién he podido contar durante toda mi vida.

A mis amigos por haber estado conmigo en los buenos y malos momentos, por haber creído en mí y por el apoyo que me brindaron siempre.

Un agradecimiento muy especial a mis pequeños amigos de cuatro y dos patas que están presentes y a los que lastimosamente ya han partido, por haberme acompañado desde mucho antes de emprender este viaje, porque aún sin necesidad de dirigir una palabra hacia mi persona fueron y serán siempre un gran apoyo incondicional y emocional, y por haberme motivado a seguir adelante.

Katherine Rodríguez

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS PARA USO DIDÁCTICO

Estudiantes: Juan Ramón Contreras Villeda¹, Ana Ruth López González², Marcos Ernesto Padilla Trejo³, Katherine Marlene Rodríguez Hernández⁴.
Docente Asesor: Ing. Rigoberto Velázquez Paz⁵

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y
Arquitectura, Universidad de El Salvador

Resumen

El presente trabajo de graduación titulado “*Diseño y construcción de un banco de motores eléctricos trifásicos para uso didáctico*” tuvo como propósito principal desarrollar una herramienta práctica para el aprendizaje y la experimentación en el área de máquinas eléctricas dentro de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador. El banco se diseñó tomando como base un motor de inducción trifásico de 746 W, sobre el cual se realizaron diferentes pruebas y esquemas de arranque.

En el proyecto se implementaron y documentaron los arranques directo, arranque directo con inversión de giro y arranque mediante variador de frecuencia, explicando en cada caso los dispositivos de protección requeridos para salvaguardar tanto al motor como a los estudiantes durante las prácticas. Adicionalmente, se llevaron a cabo ensayos experimentales para la caracterización del motor: prueba en vacío, prueba de rotor bloqueado y prueba de resistencia en corriente directa, a partir de los cuales se calcularon parámetros eléctricos relevantes y se evaluó el comportamiento del motor bajo diferentes condiciones de operación.

Para complementar las prácticas, se diseñó y construyó un freno de Prony con zapatas de madera, que permitió simular la aplicación de carga al motor y obtener la curva característica par-velocidad, fortaleciendo así el análisis experimental del rendimiento del equipo.

Como complemento, se elaboraron cinco guías de trabajo orientadas al uso del banco didáctico, lo que garantiza una adecuada aplicación pedagógica del mismo y una mayor continuidad en su aprovechamiento por parte de los estudiantes.

Palabras claves: Motores eléctricos trifásicos, freno de Prony, control industrial.

1 E-mail: cv16002@ues.edu.sv

2 E-mail: lq17010@ues.edu.sv

3 E-mail: pt16004@ues.edu.sv

3 E-mail: rh16033@ues.edu.sv

4 E-mail: rigoberto.velasquez@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

1. CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	2
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. CONCEPTOS ELÉCTRICOS BÁSICOS	4
1.2.1. Voltaje	5
1.2.2. Corriente	5
1.2.3. Par o Torque	5
1.2.4. Potencia	6
1.2.5. Frecuencia	7
1.3. MOTOR ELÉCTRICO	7
1.4. BASE DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	7
1.4.1. Deslizamiento del rotor en un motor de inducción	10
1.4.2. Frecuencia eléctrica en el rotor	11
1.4.3. Potencia y par en los motores de inducción	11
1.4.4. Característica par-velocidad de los motores de inducción	14
1.4.5. Circuito equivalente del motor asíncrono o de inducción	16
1.4.6. Conexiones de motores trifásicos	21
1.5. DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS DE CONTROL	30
1.5.1. Normativa	31
1.5.2. Interruptor automático	33
1.5.3. Contactor	34
1.5.4. Relé de sobrecarga	34
1.5.5. Guardamotor	36
1.5.6. Relé temporizador o timer	38
1.5.7. Fusible	39
1.5.8. Pulsadores	39
1.5.9. Conmutador	40
1.5.10. Señalización visual y/o luminosa	41
1.5.11. Transformador de corriente	41
1.5.12. Variador de frecuencia	42
1.6. ARRANQUE DE MOTORES	43
1.6.1. Arranque directo	44
1.6.2. Arranque delta estrella	46
1.6.3. Arranque por autotransformador	48
1.6.4. Arrancadores suaves	49
1.6.5. Arranque con variador de frecuencia	51
1.7. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	52
1.7.1. Multímetro	53
1.7.2. Megóhmetro	53
1.7.3. Tacómetro	53

1.7.4.	Cofímetro o Fasímetro.....	54
1.7.5.	Pinza Cofimétrica.....	54
2.	CAPITULO 2: DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS	55
2.1.	PRUEBAS Y ENSAYOS DE MOTORES.....	58
2.1.1.	Medición de voltaje.....	58
2.1.2.	Medición de corriente.....	58
2.1.3.	Medición de potencia eléctrica y factor de potencia.....	58
2.1.4.	Medición de frecuencia.....	60
2.1.5.	Medición de parámetros mecánicos	60
2.1.6.	Prueba con rotor bloqueado	62
2.1.7.	Prueba en vacío.....	64
2.1.8.	Prueba de cd para determinar la resistencia del estator	67
2.2.	VARIABLES DE DISEÑO	70
2.2.1.	Diagrama unifilar de arrancadores.....	70
2.2.2.	Selección del cable conductor	74
2.2.3.	Selección de equipos auxiliares de protección	76
2.2.4.	Selección del variador de frecuencia.....	78
2.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE FRENADO	79
2.3.1.	Componentes del sistema de frenado.....	79
2.3.2.	Distribución espacial de los componentes.....	81
2.4.	ESTRUCTURA DEL BANCO	82
3.	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	84
3.1.	PROCESO CONSTRUCTIVO.....	84
3.1.1.	Estructura Principal	84
3.1.2.	Bastidores y Conexiones.....	86
3.1.3.	Construcción del dinamómetro de freno	87
3.2.	COSTOS DEL PROYECTO	89
3.3.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
3.3.1.	Lectura de parámetros.....	91
3.3.2.	Prueba de corriente directa.....	91
3.3.3.	Prueba en vacío.....	92
3.3.4.	Prueba de Carga con Freno de Prony.....	96
3.3.5.	Prueba de rotor bloqueado	102
3.3.6.	Prueba de aislamiento	105
3.4.	GUÍAS DE LABORATORIO.....	108
3.4.1.	PRÁCTICA 1. IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL BANCO	108
3.4.2.	PRÁCTICA 2. ARRANQUE DIRECTO	119
3.4.3.	PRÁCTICA 3. PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	127
3.4.4.	PRÁCTICA 4. ARRANQUE DIRECTO CON CAMBIO DE GIRO.....	133

3.4.5. PRÁCTICA 5. ARRANQUE CON VARIADOR DE FRECUENCIA	141
3.4.6. PRUEBA DE MOTORES ELÉCTRICOS	146
CONCLUSIONES	154
BIBLIOGRAFÍA.....	157
ANEXOS	159
ANEXO A: PLANOS	160
ANEXO B: COTIZACIONES	169

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Motor eléctrico trifásico (MORENO, 2019)	8
Figura 1.2. Dibujo de rotor de jaula de ardilla (Chapman, 2012).....	9
Figura 1.3. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción (Chapman, 2012).....	12
Figura 1.4. Gráfico de la característica par-velocidad de un motor de inducción. (Chapman, 2012)	14
Figura 1.5. Curvas par-velocidad típicas para los diferentes diseños de rotor. (Chapman, 2012)	16
Figura 1.6. Modelo de transformador de un motor de inducción (Chapman, 2012)	16
Figura 1.7. Modelo de circuito de rotor de un motor de inducción. (Chapman, 2012)	17
Figura 1.8. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción. (Chapman, 2012).....	19
Figura 1.9. Devanado de motor trifásico conectado en estrella. (Mora, 2003)	22
Figura 1.10. Conexión en estrella de 4 polos con bobinas en serie. (Mora, 2003)	22
Figura 1.11. Conexión trifásica en delta. (Mora, 2003)	23

Figura 1.12. Conexión en delta de un motor tetrapolar con bobinas en serie. (Mora, 2003).....	24
Figura 1.13. Diferencia de conexiones en estrella de un motor de 3 puntas, 4 polos cuando las bobinas están en serie y paralelo. (Mora, 2003).....	25
Figura 1.14. Esquema de conexiones de motor de 9 puntas con conexión en estrella con bobinas en serie para alto voltaje. (Mora, 2003).....	26
Figura 1.15. Conexión en estrella de un motor de 9 puntas con bobinas en paralelo para bajo voltaje. (Mora, 2003).....	26
Figura 1.16. Motor de 9 puntas conectado en estrella con bobinas en serie. (Mora, 2003).....	27
Figura 1.17. Motor de 9 puntas conectado en estrella con bobinas en paralelo. (Mora, 2003).....	27
Figura 1.18. Diagrama de conexión para motor conectado en delta de 9 puntas. (Cabezas Victor, 2013).....	28
Figura 1.19. Motor de 9 puntas con conexión en delta con bobinas en serie. (Mora, 2003).....	28
Figura 1.20. Motor de 9 puntas con conexión en delta con sus bobinas en paralelo para bajo voltaje. (Mora, 2003).....	29
Figura 1.21. Diagrama de conexión para motor con posibilidad de conectar en delta o estrella. (Cabezas Victor, 2013)	30
Figura 1.22. Requerimientos basados en norma IEC 60497 (Darío Ordóñez, 2020).	32

Figura 1.23. Disyuntor de 2 polos 230 V. (Fuente: autores).....	33
Figura 1.24. Contactor de 230V. (Fuente: autores)	34
Figura 1.25. Curva de disparo de relés de sobrecarga térmica. (Darío Ordóñez, 2020).....	36
Figura 1.26. Protecciones equivalentes de un guardamotor. (WEG, 2024).	37
Figura 1.27. Curva característica de guardamotores serie MPW. (WEG, 2024). 38	
Figura 1.28. Pulsador, norma IEC 1082-1. (Darío Ordóñez, 2020).....	39
Figura 1.29. Selector o conmutador, norma IEC 1082-1 (Darío Ordóñez, 2020). 40	
Figura 1.30. Señal auditiva y luz piloto, norma IEC 1082-1. (Darío Ordóñez, 2020).	41
Figura 1.31. Típico arrancador directo a través de la línea de un motor de un motor de inducción (Chapman, 2012).	44
Figura 1.32. Curva Par-Velocidad en el arranque estrella triángulo. (UES, 2016).	47
Figura 1.33. Esquema de fuerza arranque Estrella – Triángulo. (UES, 2016).....	47
Figura 1.34. Arrancador por autotransformador de un motor de inducción. (Chapman, 2012).....	49
Figura 1.35. Esquema de un arrancador suave. (Guru, 2002).....	50
Figura 1.36. Esquema de conexión de un variador de frecuencia. (Guru, 2002) 52	
Figura 2.1. Especificaciones del motor. Fuente: autores.....	56

Figura 2.2. Triangulo de potencia. (Fuente: autores)	58
Figura 2.3. Circuito de prueba de cd de resistencia. (Chapman, 2012).....	68
Figura 2.4 Diagrama del arranque directo. (fuente: autores).....	71
Figura 2.5 Diagrama del arranque directo. (Fuente: autores).....	72
Figura 2.6. Diagrama del arranque por variador de frecuencia. (Fuente: autores).	73
Figura 2.7. Esquema del freno prony. (fuente: autores).	79
Figura 2.8. Distribución espacial de los componentes. (Fuente: autores).	81
Figura 3.1 Construcción de repisa en la estructura principal. (Fuente: Autores). 85	
Figura 3.2. Construcción de bastidores con lamina ACM. (Fuente: autores).	86
Figura 3.3. Cableado de bastidores. Diseño preliminar (fuente: autores).....	87
Figura 3.4. Puesta de relé en el bastidor. Diseño final. (Fuente: autores).....	87
Figura 3.5. Construcción palanca a las zapatas del freno. (Fuente: autores).....	88
Figura 3.6. Construcción de tambor de freno. (Fuente: autores).	88
Figura 3.7. Lectura de corriente de prueba en vacío. (fuente: autores).....	93
Figura 3.8. Lectura de voltaje de línea en vacío. (fuente: autores).....	93
Figura 3.9. Lectura de potencia de línea en vacío en kW. (Fuente: autores).....	94
Figura 3.10. Mediciones de fuerza y rpm para la construcción de curva par- velocidad con la cota del brazo de palanca. (Fuente: autores).....	97

Figura 3.11. Mediciones de potencia por fase en rotor bloqueado en kW. (Fuente: autores) 103

Figura 3.12. Resistencia de fase 2 prueba de CD. Valores en Megaohmios. (Fuente: autores)..... 105

Figura 3.14. Resistencia de fase 2 prueba de CD. Valores en Megaohmios. (Fuente: autores). 106

Figura 3.13. Resistencia de fase 1 prueba de CD. Valores en Megaohmios. (Fuente: autores)..... 106

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de conexiones según voltaje para motores de 9 puntas. (Mora, 2003)	26
Tabla 2. Conjugación de conexión para motores de bobina delta o estrella. (Mora, 2003).....	30
Tabla 3. Clases de corriente, norma IEC 60947-4-1-1. (Darío Ordóñez, 2020)....	36
Tabla 4. Colores para pulsadores, norma IEC/EN 60204 (Darío Ordóñez, 2020).	40
Tabla 5. Colores para luces pilotos, norma IEC/EN 60204. (Darío Ordóñez, 2020)	41
Tabla 6. Dispositivos usados para cada arrancador. (Fuente: autores)	73
Tabla 7. Servicio por régimen de tiempo. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008).....	74
Tabla 8. Ampacidades permisibles en conductores aislador para tensiones nominales de hasta e incluyendo 2000 V. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008).....	75
Tabla 9. Valor nominal o ajuste máximos de los dispositivos de protección contra cortocircuito y falla a tierra para motores. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008).....	77

Tabla 10. Costo de los materiales para la construcción de la estructura del banco. (Fuente: autores).....	89
Tabla 11. Costo de Materiales para los Módulos. (Fuente: autores).....	90
Tabla 12. Resumen de los costos de fabricación del banco de pruebas. (Fuente: autores)	90
Tabla 13. Resultados prueba de carga con freno de Prony. (Fuente: autores).....	99

Índice de gráficas

Gráfica 1. Curva de potencia vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores).
..... 99

Gráfica 2. Curva de par vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores). 100

Gráfica 3. Curva de corriente vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores).
..... 101

Gráfica 4. Curva de eficiencia vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores).
..... 101

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

E_1 : Voltaje transformado del rotor
 f_e : Frecuencia del sistema
 f_r : Frecuencia del rotor
FP: Factor de potencia
 G_C : Conductancia del núcleo
I: Corriente
m: Número de fases
M: Contactor
 n_{des} : Velocidad de deslizamiento de la máquina
 n_m : Velocidad mecánica del eje del motor
 n_{sinc} : Velocidad de los campos magnéticos
P: Potencia
 P_{conv} : Potencia convertida
 P_{entr} : Potencia de entrada
 P_{EH} : Potencia en entrehierro
FP: Factor de potencia
 P_{Fe} : Pérdidas en el hierro
 P_{FyR} : Pérdidas por fricción y por rozamiento
 P_m : Pérdidas mecánicas
 P_{misc} : Pérdidas misceláneas
 $P_{núcleo}$: Pérdidas en el núcleo
 P_{PCE} : Pérdidas en el cobre del estator
 P_{PCR} : Pérdidas en el cobre del rotor
 P_{sal} : Potencia de salida
 Q_0 : Potencia reactiva del motor
R: Resistencia
 R_2 : Resistencia del rotor
S: Deslizamiento
V: Voltaje
 X_m : Reactancia de magnetización
 Θ : Posición angular
 τ : Par o fuerza de torsión
 τ_{ind} : Par inducido
 ω_m : Velocidad mecánica del eje del rotor
 ω_{sinc} : Velocidad síncrona

INTRODUCCIÓN

En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador se ha identificado la necesidad de contar con un laboratorio especializado en motores eléctricos trifásicos, debido a las crecientes exigencias del ámbito laboral, donde el dominio de máquinas eléctricas y sus sistemas de control es fundamental para la formación de ingenieros competentes. La industria demanda profesionales capaces de comprender, operar y analizar equipos eléctricos bajo condiciones reales, lo que hace indispensable la integración de prácticas experimentales en el proceso educativo.

Con este propósito, se plantea el diseño y construcción de un banco didáctico basado en un motor de inducción trifásico de 746 W, que servirá como núcleo del proyecto. A partir de este motor se desarrollará todo el sistema de protecciones y dispositivos necesarios para garantizar la seguridad del equipo y de los estudiantes durante las prácticas. El banco permitirá implementar diferentes esquemas de arranque, como el arranque directo, el arranque directo con opción de inversión de giro y el arranque mediante variador de frecuencia, fortaleciendo así la comprensión de los principios de operación y control.

Para complementar las pruebas, se diseñará y construirá un freno de Prony con zapatas de madera, concebido para aplicar carga al motor y obtener curvas características de par-velocidad. Este elemento será clave en la realización de ensayos experimentales como la prueba en vacío, la prueba de rotor bloqueado y la prueba de resistencia en corriente continua, a partir de las cuales se calcularán parámetros eléctricos esenciales y se analizará el comportamiento del motor bajo distintas condiciones de operación.

Por último, se elaboraron siete guías de laboratorio orientadas al uso del banco didáctico, que permiten a los estudiantes aprender de manera práctica la ejecución de los diferentes arranques de motores y la realización de pruebas experimentales. Estas guías garantizan una adecuada aplicación pedagógica y aseguran la continuidad en el aprovechamiento del equipo dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje.

1. CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

El presente Marco Teórico establece la base conceptual para el diseño, construcción y ensayo del banco didáctico. Inicialmente, se revisan los fundamentos de electricidad pertinentes, incluyendo los sistemas trifásicos y los conceptos de potencia, que son esenciales para comprender la alimentación de la máquina.

El enfoque principal recae en el motor de inducción trifásico (asíncrono), detallando su principio de funcionamiento a partir del campo magnético giratorio, la definición de velocidad síncrona, y el fenómeno del deslizamiento, que rige la relación par-velocidad. Para el análisis, se abordará el circuito equivalente del motor, cuya comprensión es importante para la ejecución y validación de las pruebas estándar (vacío y rotor bloqueado), Se estudiará el impacto de las conexiones Estrella y Delta en la operación de un motor asíncrono y los componentes físicos del banco; esto incluye la descripción de los dispositivos de control (contactores, VFD) y protección (relés térmicos, fusibles), que permiten implementar los esquemas de arranque de forma segura. Finalmente, se detallan los dispositivos de medición utilizados, abarcando los instrumentos eléctricos (analizadores de potencia) y los mecánicos (tacómetros), asociados para la obtención de datos precisos de par y velocidad durante la caracterización experimental.

1.1. ANTECEDENTES

Los Bancos didácticos de motores eléctricos es un recurso muy importante en la formación de ingenieros electricistas, mecánicos y mecatrónicos. A continuación, se describen diversos antecedentes sobre la implementación de bancos de pruebas para motores eléctricos en entornos académicos

En la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, Alvarado, Proaño y Vera diseñaron, construyeron e implementaron un banco de pruebas para el control de

motores industriales con PLC. Este sistema incluyó contactores, pulsadores, indicadores luminosos, medidores, un variador de velocidad y un PLC. Se elaboró un diseño detallado en AutoCAD que facilitó la comprensión del sistema por parte de los estudiantes, además de manuales de uso para maximizar el aprovechamiento del equipo. [(Erick, Richard, & Christopher, 2010)]

Por su parte, en la Universidad Tecnológica de Pereira, dentro de la Facultad de Tecnologías, se desarrolló un proyecto similar al de la Universidad Industrial de Santander. Se diseñó un banco de pruebas para motores monofásicos y trifásicos asincrónicos, incluyendo un tablero de control preparado para el arranque en estrella-delta del motor trifásico y el arranque con condensador del motor monofásico. El sistema incorporaba contactores, pulsadores y protecciones industriales, junto con un módulo de medición que permitía visualizar parámetros como corriente, voltaje y par de arranque mediante el software LABVIEW. Sin embargo, este banco no permite a los estudiantes modificar los esquemas de fuerza y mando, ya que estos están preconfigurados, etiquetados y organizados dentro de canaletas y cajas de distribución. (Pardo, 2015).

En la Corporación Universitaria Minuto de Dios, los estudiantes Cabezas y Lozano, como parte de su trabajo de grado para optar el título (Cabezas Victor, 2013) de tecnología en electrónica, diseñaron un banco de pruebas para conectar un motor trifásico de 1492 W. El sistema se componía de contactores, pulsadores, elementos de protección, un optoacoplador, un eje rotatorio y una rueda dentada. Este banco permite medir corrientes, voltajes y el sentido de giro del motor. También se incorporó un sistema digital basado en el optoacoplador para calcular el número de revoluciones del motor durante el arranque estrella-delta. Al igual que en los casos anteriores, los estudiantes no pueden modificar el diagrama de conexiones de fuerza y mando, ya que los componentes están preinstalados y cableados para ese tipo de arranque. (Cabezas Victor, 2013).

En 2019, Federman Cruz Moreno desarrolló su trabajo de grado titulado “Banco Didáctico para Prueba de Motores Eléctricos Bifásicos y Trifásicos en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad Católica de Colombia”. Este proyecto permitió realizar prácticas sobre inversión del sentido de giro, arranque estrella-delta, secuencia manual de arranque y arranque mediante PLC. (MORENO, 2019)

Por último, en la Universidad de El Salvador se realizó una propuesta para la implementación de un laboratorio de pruebas de motores eléctricos de corriente alterna en cumplimiento al reglamento técnico salvadoreño. En este trabajo se enfocan en las normativas y reglamentos que se deben seguir a la hora de implementar un laboratorio de pruebas además de las normas de seguridad y salud ocupacional. (UES, 2016)

Para comprender de mejor manera el trabajo a realizar es de suma importancia hacer un recordatorio de algunos conceptos básicos que serán descritos a continuación.

1.2. CONCEPTOS ELÉCTRICOS BÁSICOS

El estudio de cualquier máquina eléctrica comienza con el dominio de los principios fundamentales de la electricidad, los cuales son la base del fenómeno de conversión electromecánica de energía.

En el contexto de nuestro proyecto, se analizará la generación y distribución de energía mediante sistemas trifásicos, cuya principal ventaja es la creación de un campo magnético giratorio necesario para la operación de la máquina. Finalmente, para evaluar el consumo y el rendimiento del motor, se deben comprender los diferentes tipos de potencia: activa, reactiva y aparente, así como el factor de potencia, elementos cruciales para la eficiencia y el diseño de la red eléctrica.

1.2.1. Voltaje

El voltaje también conocido como tensión, se define como la medida del trabajo que es requerida para movilizar una carga a través de un elemento. El voltaje puede existir entre un par de terminales aun cuando fluya o no una corriente entre ellos. La unidad del voltaje (tensión) es el volt, 1 volt es equivalente a 1 J/C. Se representa por la letra V o v. (William H. Hayt Jr., 2012)

$$V = RI \quad (2.1)$$

1.2.2. Corriente

La corriente se expresa como la medida de la velocidad a la que una carga se desplaza por un punto de referencia específico en una determinada dirección. Se simboliza por medio de la letra I o i, su unidad es el Ampere y se identifica por medio de la letra A. Un Ampere equivale a 1 Coulomb por segundo. La i minúscula se utiliza cuando se trata de un valor instantáneo, en cambio la I mayúscula es para una cantidad constante. (William H. Hayt Jr., 2012)

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.2)$$

1.2.3. Par o Torque

También llamada par o fuerza de torsión, el torque se define como el producto de una fuerza que es aplicada y la distancia más corta entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación que posee el objeto. Las unidades del torque son Newton-metro. (Chapman, 2012)

$$\tau = rF \sin \theta \quad (2.3)$$

1.2.4. Potencia

La potencia se expresa como la tasa del trabajo que se efectúa o de la energía que se ha gastado. La potencia posee como unidad fundamental el watt y se simboliza por la letra W . Un Watt se define como 1 J/s y es equivalente a 0,7376 pie lbf/s o 1/745,7 caballos de fuerza (hp). (William H. Hayt Jr., 2012)

$$P = VI \quad (2.4)$$

a) Potencia Activa

También llamada potencia promedio, es aquella que se aprovecha como potencia útil y se debe a los dispositivos resistivos. También conocida como potencia real o verdadera. En el caso de sistemas trifásicos la potencia activa es la suma de las potencias activas de los sistemas monofásicos que lo componen.

b) Potencia Reactiva

La potencia reactiva es aquella que se intercambia de forma continua entre la fuente y la carga. Esta potencia se encarga de representar la energía que primero es almacenada para posteriormente ser liberada en el campo magnético de un inductor o en el campo eléctrico de un capacitor. (Chapman, 2012).

c) Potencia Aparente

La potencia aparente es la que se obtiene del producto del voltaje a través de la carga y de la corriente en la carga. Esta potencia es la que pareciera que está siendo suministrada a la carga si se ignoran las diferencias de ángulo de fase que existen entre el voltaje y la corriente. (Chapman, 2012)

d) Factor de Potencia

El factor de potencia es la proporción que se obtiene de dividir la potencia real o promedio (activa) entre el valor de la potencia aparente, además se simboliza por medio de las iniciales FP. (William H. Hayt Jr., 2012)

$$FP = \frac{\text{Potencia promedio}}{\text{Potencia aparente}} \quad (2.5)$$

1.2.5. Frecuencia

La frecuencia está definida como el número de ciclos que se presentan en un tiempo dado, por lo general es en un segundo. La frecuencia tiene como unidad el Hertz, también se simboliza de la siguiente manera Hz. Un Hertzio es equivalente a un ciclo en un segundo (1 c/s).

1.3. Motor eléctrico

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Cuando se convierte energía mecánica en eléctrica se denomina generador y cuando convierte energía eléctrica en mecánica se llama motor.

Un motor para funcionar se vale de las fuerzas de atracción y repulsión que existen entre los polos. Los polos de un motor deben estar alternados para que se repelen entre sí, y dar un movimiento de rotación

1.4. Base de funcionamiento del motor de inducción

En el magnetismo, hay dos tipos de polos: el polo norte (N) y el polo sur (S), que son las partes donde las líneas de fuerza de un imán se concentran. Para que un motor funcione, necesita aprovechar las fuerzas de atracción y repulsión entre estos polos. (Flores, 2009)

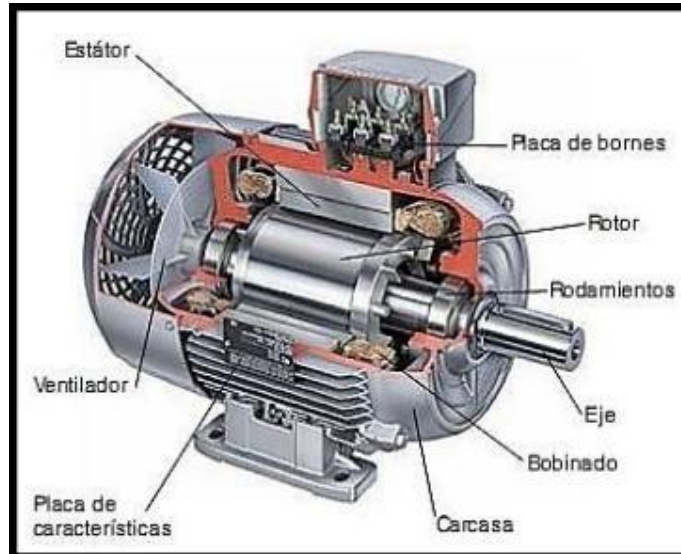


Figura 1.1. Motor eléctrico trifásico (MORENO, 2019)

El motor de inducción, que será el objeto de estudio en el presente trabajo, consta de dos componentes principales: el rotor y el estator. El estator es la parte estacionaria del motor y consiste en un conjunto de bobinas enrolladas alrededor de un núcleo de hierro laminado. Estas bobinas están conectadas a una fuente de alimentación de corriente alterna (CA). Cuando se aplica voltaje a estas bobinas, generan un campo magnético rotativo en el espacio que rodea al estator. (Mora, 2003)

El rotor es la parte móvil del motor y suele consistir en un cilindro de laminaciones de acero apiladas, formando una estructura similar a un tambor. En el interior de este cilindro se encuentran barras conductoras o bobinas cortocircuitadas. Cuando el campo magnético rotativo del estator interactúa con el rotor, induce corrientes eléctricas en estas barras conductoras, generando así un campo magnético en el rotor que interactúa con el campo magnético del estator. La interacción de campos magnéticos provoca la rotación del rotor.

Es importante destacar que no hay conexión eléctrica directa entre el estator y el rotor en un motor de inducción, lo que lo hace extremadamente robusto y adecuado para

una variedad de aplicaciones industriales. La velocidad de rotación del rotor la determina la frecuencia de la corriente alterna suministrada y el número de polos del motor, lo que permite un control sencillo de la velocidad variando la frecuencia de la corriente de entrada.

Hay dos tipos diferentes de rotores de motores de inducción que pueden utilizarse dentro del estator. Uno se llama rotor de jaula de ardilla y el otro se conoce como rotor devanado.

Los rotores de jaula de ardilla constan de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y en cortocircuito en alguno de sus extremos mediante grandes anillos de cortocircuito.

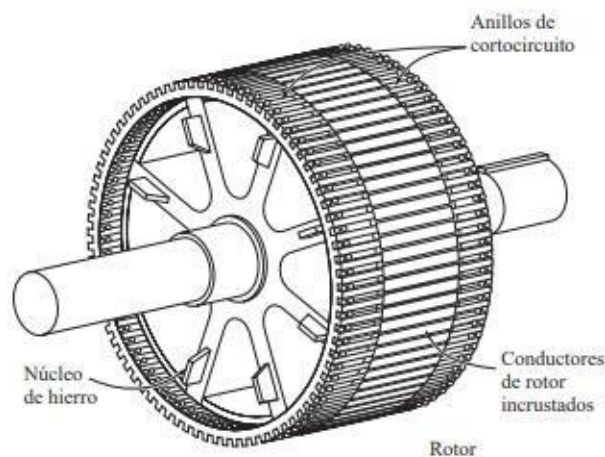


Figura 1.2. Dibujo de rotor de jaula de ardilla (Chapman, 2012)

Los rotores devanados de los motores de inducción son más grandes que los motores de inducción de jaula y requieren mucho más mantenimiento debido al desgaste asociado con las escobillas y con los anillos rozantes. Como resultado, rara vez se utilizan en los motores de inducción.

La velocidad de rotación del campo magnético está dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad (1.1)$$

Donde f_e es la frecuencia del sistema en Hertz y P es el número de polos en la máquina.

Hay un límite superior finito para la velocidad del motor. Si el rotor del motor de inducción gira a velocidad síncrona, entonces las barras del rotor estarán estacionarias en relación con el campo magnético y no habrá ningún voltaje inducido. Si el voltaje inducido fuera igual a cero, entonces no habría corriente en el rotor y no habría campo magnético en él. Sin campo magnético en el rotor, el par inducido sería cero y el rotor reduciría su velocidad como resultado de las pérdidas por fricción. Por lo tanto, un motor de inducción puede acelerar hasta llegar cerca de la velocidad síncrona, mas nunca puede llegar exactamente a ella. (Chapman, 2012)

1.4.1. Deslizamiento del rotor en un motor de inducción

El voltaje inducido en la barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor en relación con los campos magnético. velocidad de deslizamiento mide la diferencia entre la velocidad del campo magnético (velocidad síncrona, n_{sinc}) y la velocidad real del rotor (n_m). Se define la velocidad de deslizamiento como:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (1.2)$$

También puede expresarse en términos de velocidad angular, en donde ω_m es la velocidad angular mecánica del eje del motor:

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (1.3)$$

El deslizamiento (s) es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje.

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (1.4)$$

Si el rotor girara a la misma velocidad que el campo (velocidad síncrona), el deslizamiento sería igual a $s = 0$, mientras que si el rotor está detenido $s = 1$. El deslizamiento está entre estos dos valores. (Chapman, 2012)

1.4.2. Frecuencia eléctrica en el rotor

En un motor de inducción, el voltaje inducido en el rotor tiene una frecuencia distinta a la del estator. Si el rotor está bloqueado, su frecuencia es igual a la del estator. Para cualquier otra velocidad, la frecuencia del rotor (f_r) depende del deslizamiento (s):

$$f_r = s f_e \quad (1.5)$$

También puede expresarse como:

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sinc} - n_m) \quad (1.6)$$

donde f_r es la frecuencia del estator, P es el número de polos, n_{sinc} la velocidad síncrona y n_m la velocidad mecánica del rotor. (Chapman, 2012)

1.4.3. Potencia y par en los motores de inducción

La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor de inducción se muestra en el diagrama de flujo de potencia siguiente (Chapman, 2012):

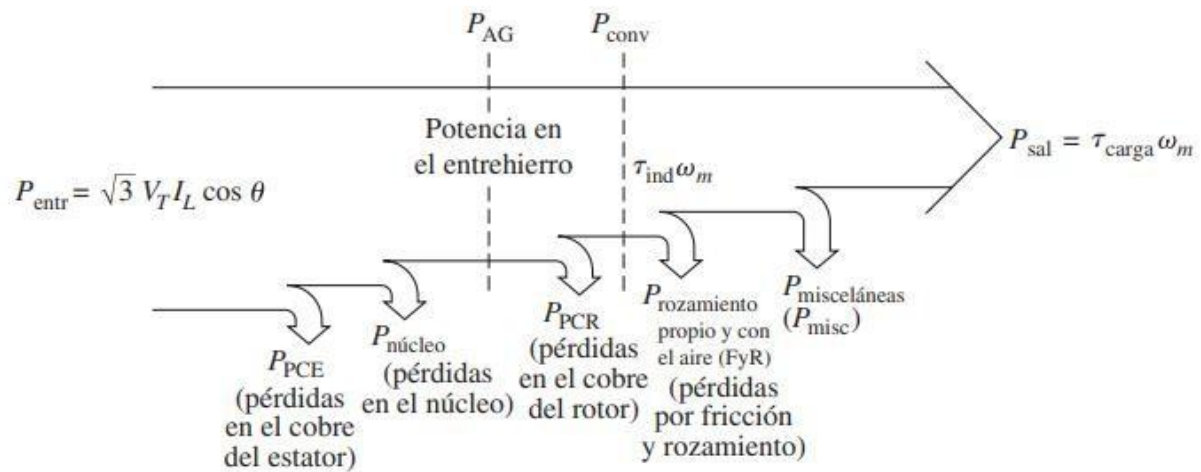


Figura 1.3. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción (Chapman, 2012)

La potencia de entrada de un motor de inducción P_{entr} se presenta en forma de voltajes y corrientes eléctricas trifásicas.

La **pérdida en el cobre del estator** representa la energía que se disipa en forma de calor en los devanados del estator debido a la resistencia de los conductores.

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (1.7)$$

La **pérdida en el núcleo** es la energía que se pierde por histéresis y corrientes parásitas en el material magnético del estator.

$$P_{núcl} = 3E_1^2 G_c \quad (1.8)$$

La **potencia en el entrehierro** se puede calcular de dos formas. Primero, restando las pérdidas eléctricas del estator a la potencia de entrada con la fórmula

$$P_{EH} = P_{entr} - P_{PCE} - P_{núcl} \quad (1.9)$$

También puede calcularse directamente a partir de la corriente del rotor, considerando el efecto del deslizamiento.

$$P_{EH} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (1.10)$$

Recordando que los términos con subíndice 2 hacen referencia a los valores del rotor referidos al estator.

La **potencia convertida de eléctrica a mecánica** es la energía que efectivamente se transforma en movimiento del rotor, y se puede calcular con

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (1.11)$$

. También se puede expresar de forma más simple como

$$P_{conv} = (1-s)P_{EH} \quad (1.12)$$

La **potencia de salida** del motor, es decir, la potencia útil en el eje se obtiene si se conocen las pérdidas por fricción y por rozamiento con el aire P_{FyR} y las pérdidas misceláneas P_{misc} , la potencia de salida se puede encontrar de la siguiente manera:

$$P_{sal} = p_{conv} - P_{FyR} - P_{misc} \quad (1.13)$$

El **par inducido** en el rotor, que es el resultado de convertir potencia eléctrica en torque mecánico, se puede calcular usando

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (1.14)$$

Donde ω_m es la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de velocidad angular. A este par también se le llama par desarrollado de la máquina.

También puede expresarse de manera práctica usando

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EH}}{\omega_{sinc}} \quad (1.15)$$

que expresa el par inducido de manera directa en términos de potencia en el entrehierro y velocidad síncrona, la cual no varía.

1.4.4. Característica par-velocidad de los motores de inducción

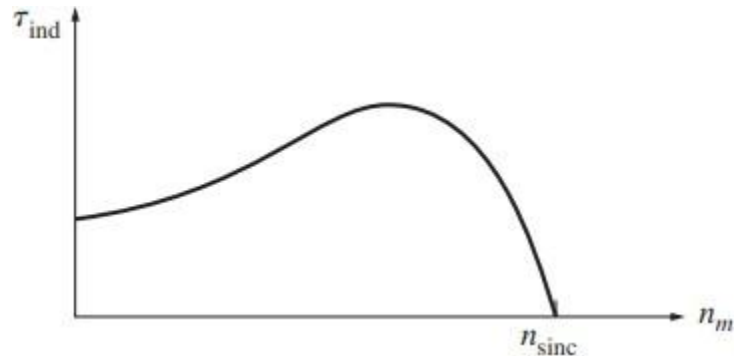


Figura 1.4. Gráfico de la característica par-velocidad de un motor de inducción. (Chapman, 2012)

La curva característica par-velocidad se puede dividir aproximadamente en tres regiones. La primera es la región de bajo deslizamiento. En esta región, el deslizamiento del motor se incrementa de manera aproximadamente lineal conforme aumenta la carga y la velocidad mecánica del rotor disminuye de manera aproximadamente lineal con la carga. En esta región de operación la reactancia (oposición ofrecida al paso de corriente alterna por inductores) del rotor es despreciable, por lo que el factor de potencia del rotor es aproximadamente unitario, mientras que la corriente del rotor se incrementa en forma lineal con el deslizamiento. Todo el intervalo de operación normal en estado estacionario de un motor de inducción se incluye en esta región de bajo deslizamiento. Por lo tanto, en la operación normal, un motor de inducción tiene una caída de velocidad lineal. (Chapman, 2012)

La segunda región en la curva del motor de inducción se llama región de deslizamiento moderado. En esta región la frecuencia del rotor es más alta que antes y la reactancia del rotor tiene el mismo orden de magnitud que la resistencia del rotor. Además, la corriente del rotor ya no se incrementa tan rápidamente como antes y el factor de potencia comienza a disminuir. El par pico (par máximo) del motor se presenta en el punto en que, ante un incremento gradual en la carga, el aumento en la corriente del rotor

está perfectamente equilibrado con la disminución del factor de potencia del rotor. (Chapman, 2012)

La tercera región en la curva del motor de inducción se llama región de alto deslizamiento. En esta región, el par inducido en realidad disminuye ante un incremento de la carga, puesto que el aumento en la corriente del rotor no se percibe debido a la disminución del factor de potencia del rotor. (Chapman, 2012)

En un motor de inducción típico, el par máximo en la curva será de 200 a 250% del par nominal a plena carga de la máquina y el par de arranque (el par a velocidad cero) será más o menos 150% del par a plena carga. A diferencia de un motor síncrono, el motor de inducción puede arrancar con plena carga adherida a su eje. (Chapman, 2012)

Se puede producir una gran variedad de curvas par-velocidad si se cambian las características del rotor de los motores de inducción. Para ayudar a la industria a seleccionar los motores apropiados para las diferentes aplicaciones en la gama completa de caballos de fuerza, la NEMA en Estados Unidos y la International Electrotechnical Commission (IEC) en Europa han definido una serie de diseños estándar con diferentes curvas de par-velocidad. (Figura 1.5)

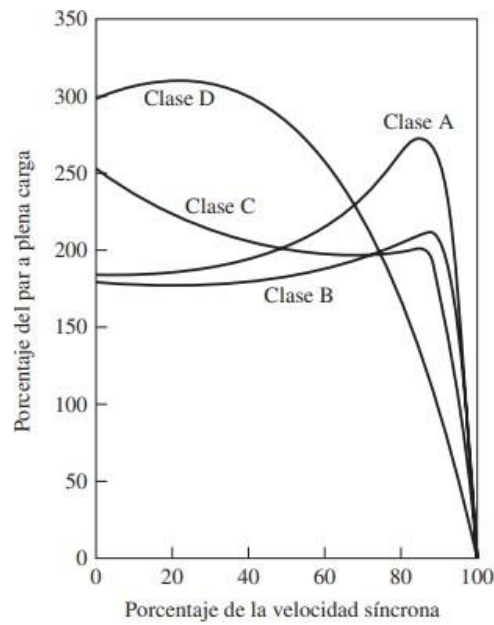


Figura 1.5. Curvas par-velocidad típicas para los diferentes diseños de rotor. (Chapman, 2012)

1.4.5. Circuito equivalente del motor asíncrono o de inducción

Los motores de inducción dependen de la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor desde el circuito del estator (acción transformadora). Puesto que la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor de un motor de inducción es esencialmente una operación transformadora, el circuito equivalente de un motor de inducción será muy similar al circuito equivalente de un transformador. (Chapman, 2012)

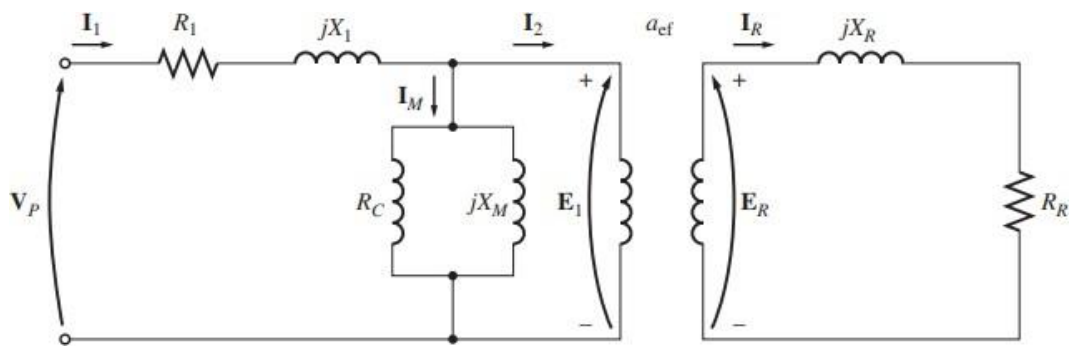


Figura 1.6. Modelo de transformador de un motor de inducción (Chapman, 2012)

En la figura 1.6 se muestra un circuito equivalente transformador por fase que representa la operación de un motor de inducción. Como en cualquier transformador, hay

cierta resistencia y autoinductancia en los devanados primarios (estator) que se deben representar en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llama R_1 y la reactancia de dispersión del estator X_1 . (Chapman, 2012)

El voltaje primario interno del estator E_1 se acopla al secundario E_R por medio de un transformador ideal con una relación efectiva de vueltas a_{ef} , que básicamente es la relación entre los conductores por fase del estator y los conductores por fase del rotor. En el caso de un motor con rotor de jaula de ardilla no hay diferencias entre los devanados en este tipo de rotor. (Chapman, 2012)

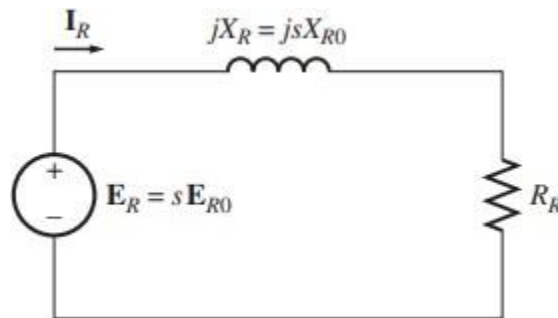


Figura 1.7. Modelo de circuito de rotor de un motor de inducción. (Chapman, 2012)

Cuando se aplica voltaje a los devanados del estator de un motor de inducción, se induce un voltaje en los devanados del rotor de la máquina. En general, mientras mayor sea el movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, mayor será el voltaje resultante del rotor y la frecuencia del rotor. El movimiento relativo es más grande cuando el rotor está estacionario y se llama condición de rotor bloqueado, de manera que se inducen el mayor voltaje y frecuencia en el rotor. El menor voltaje (0 V) y frecuencia (0 Hz) se presentan cuando el rotor se mueve a la misma velocidad que el campo magnético del estator, que tiene como resultado que no haya movimiento relativo. La magnitud y frecuencia del voltaje inducido en el rotor en cualquier velocidad entre estos dos extremos es directamente proporcional al deslizamiento del rotor. Por lo tanto,

si se llama E_{R0} a la magnitud del voltaje inducido del rotor en condición de rotor bloqueado, la magnitud del voltaje inducido con cualquier deslizamiento está dada por la siguiente ecuación:

$$E_R = sE_{R0} \quad (1.16)$$

Y la frecuencia del voltaje inducido con cualquier deslizamiento está dada por la siguiente ecuación

$$f_r = sf_e \quad (1.17)$$

Donde f_e es la frecuencia del sistema.

La reactancia del rotor de un motor de inducción X_R depende de la inductancia del rotor L_R y de la frecuencia del voltaje y corriente en el rotor ω_r . Con una inductancia del rotor de L_R , la reactancia del rotor está dada por:

$$X_R = \omega_r L_R = (2\pi f_r) L_R$$

$$X_R = 2\pi(s f_e) L_R$$

$$X_R = s(2\pi f_e L_R)$$

$$X_R = sX_{R0} \quad (1.18)$$

Donde X_{R0} es la reactancia del rotor en estado bloqueado o detenido. El flujo de corriente del rotor es:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}}$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (1.19)$$

Donde E_{R0} es el voltaje inducido del rotor, R_R es la resistencia del rotor, s es el deslizamiento y el término jX_{R0} es la reactancia del rotor en estado bloqueado expresado en forma fasorial.

De la ecuación 3.20, es posible tratar todos los efectos del rotor, debidos a la variación de velocidad de éste, como ocasionados por una impedancia variable suministrada con la potencia de una fuente de voltaje constante E_{R0} . La impedancia del rotor equivalente desde este punto de vista es

$$Z_{R,eq} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \quad (1.20)$$

Nótese que, con deslizamientos muy bajos, el término resistivo $\frac{R_R}{s} \gg X_{R0}$, por lo que predomina la resistencia del rotor mientras que su corriente varía linealmente con el deslizamiento. Con deslizamientos altos, X_{R0} es mucho mayor que $\frac{R_R}{s}$ y la corriente del rotor se aproxima al valor en estado estacionario o de rotor bloqueado conforme el deslizamiento crece. (Chapman, 2012)

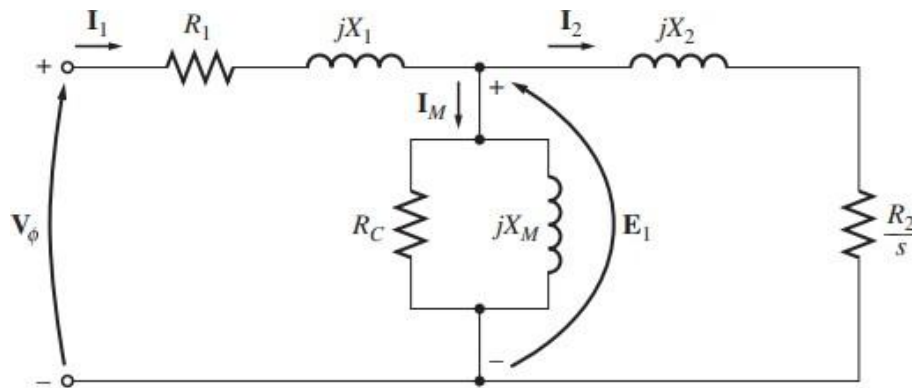


Figura 1.8. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción. (Chapman, 2012).

Para producir el circuito equivalente por fase final de un motor de inducción, es necesario referir la parte del rotor del modelo al lado del estator. En la figura 1.8 se muestra el modelo de circuito del rotor al que se referirá el lado del estator, el cual tiene

todos los efectos de variación de velocidad concentrados en el término de impedancia. (Chapman, 2012)

Se puede referir los voltajes, corrientes e impedancias del lado secundario del aparato al lado primario por medio de la relación efectiva de vueltas de un motor a_{ef} . (Chapman, 2012)

$$E_2 = a_{ef}E_{R0} \quad (1.21)$$

La corriente del estator es

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}} \quad (1.22)$$

Y la impedancia del estator es

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (1.23)$$

La resistencia y reactancia referidas son

$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad (1.24)$$

$$X_2 = a_{ef}^2 X_{R0} \quad (1.25)$$

La resistencia del rotor R_R y la reactancia del rotor en estado bloqueado X_{R0} son muy difíciles o incluso imposibles de determinar directamente en los rotores de jaula de ardilla y la relación efectiva de vueltas a_{ef} también es muy engorrosa de obtener en los rotores de jaula de ardilla. Por suerte, es posible llevar a cabo mediciones que conducirán directamente a la resistencia y reactancia referidas R_2 y X_2 , aun cuando R_R , X_{R0} y a_{ef} no se conozcan por separado. (Chapman, 2012)

1.4.6. Conexiones de motores trifásicos

Los motores eléctricos se disponen de un arrollamiento estático donde el bobinado se realiza por polos alternados y polos consecuentes, la bobina es un conjunto de espiras cerradas que se realizan con un molde sobre una bobinadora.

Cada bobina tiene un principio y un final y además se componen de los denominados lados activos de bobina donde se induce la fem y las cabezas de bobina necesarias para cerrar el circuito.

Los motores de inducción trifásicos (ya sean de rotor de jaula de ardilla o de rotor bobinado) pueden clasificarse según el número de terminales disponibles en el estator. Dependiendo de la cantidad de terminales, un motor de inducción trifásico puede funcionar con uno o dos voltajes nominales y con una o dos velocidades nominales. El usuario o el operador puede realizar las conexiones en la caja de terminales (o bornera) del motor. Cabe señalar que los motores de inducción trifásicos con rotor bobinado tendrán, además, tres terminales adicionales en el rotor. Las clasificaciones son:

- Motor de 3 Puntas.

Un motor con tres terminales tiene una conexión fija tanto para el voltaje como para la velocidad, lo que significa que el motor operará con un voltaje y una velocidad nominales.

- 3 puntas en estrella

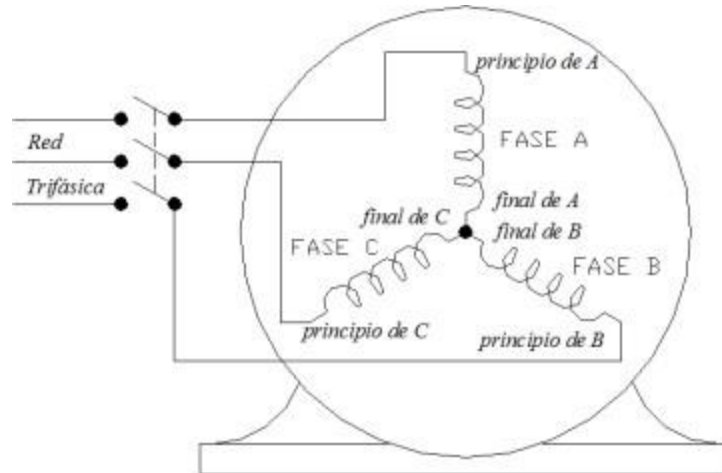


Figura 1.9. Devanado de motor trifásico conectado en estrella.
(Mora, 2003)

La conexión en estrella se da cuando los finales de cada fase están unidos en un punto en común (centro de estrella) y cada principio de fase está conectado al suministro de alimentación de la red, el nombre estrella se adopta por la forma que hacen las fases unidas esquemáticamente y se representa por el símbolo **Y**.

La conexión en estrella con bobinas en serie es una conexión que será considerada en motores de 3 puntas.

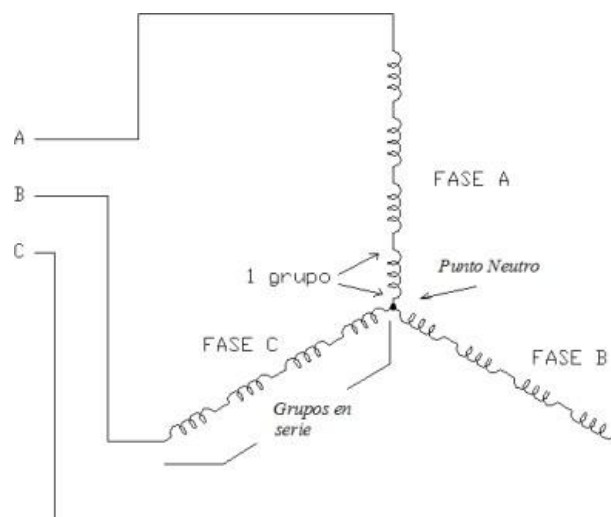


Figura 1.10. Conexión en estrella de 4 polos con bobinas en serie.
(Mora, 2003)

Según la figura anterior, el orden de fases y la conexión de todas estas en un punto común muestran que es una conexión de motor trifásico en estrella, como cada fase tiene 4 grupos de bobinas se trata de un motor de 4 polos, la cantidad de polos de un motor se define por el grupo de bobinas que posee el motor en sus fases.

Como se apreció en la figura anterior las bobinas están conectadas en serie entre sí, se trata de un motor trifásico de 4 polos con 3 puntas o terminales donde sus bobinas están conectadas en serie.

- 3 puntas en Delta

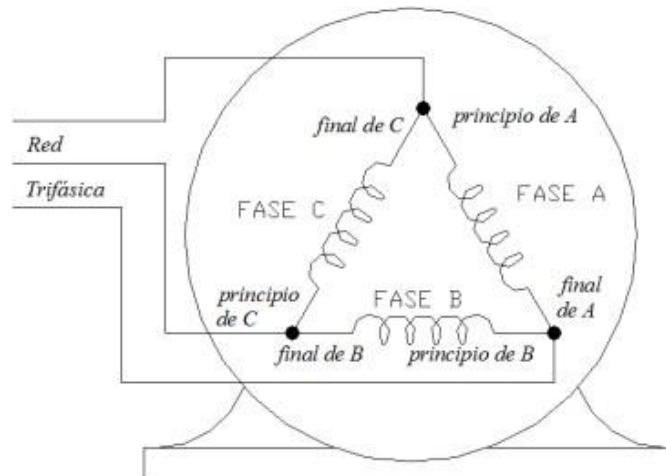


Figura 1.11. Conexión trifásica en delta. (Mora, 2003)

La conexión en delta o triángulo es cuando el final de cada fase está unido al principio de la siguiente, en el esquema anterior se presenta como el final de la fase A está conectada al inicio de la fase B, el final de la base B al principio de la fase C, el final de la fase C al principio de la fase A.

De cada unión de fase parte una derivación para la red, abreviadamente se representa por Δ .

La conexión Delta con bobinas en serie.

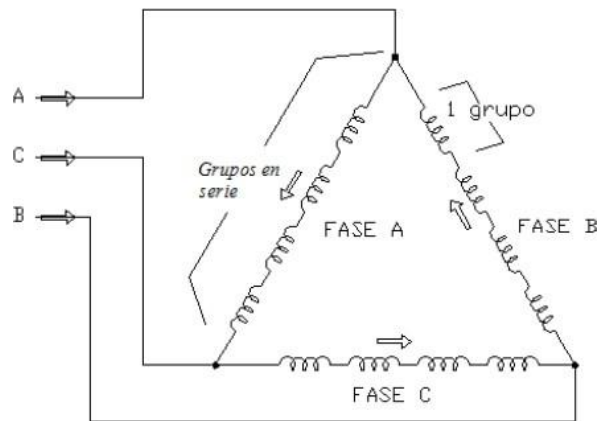


Figura 1.12. Conexión en delta de un motor tetrapolar con bobinas en serie. (Mora, 2003)

Como no existe ningún punto de conexión en común de las 3 fases (centro de estrella) y el final de cada fase está unida al principio de otra fase por lo tanto es ante una conexión Delta.

Se observa que cada fase tiene 4 grupos de bobinas y que estas bobinas están unidas en serie se concluye que es un motor trifásico conectado en Delta con bobinas en serie.

Las conexiones en paralelo están concebidas de forma que cada fase esté dividida en ramales o derivaciones iguales unidas entre sí en paralelo, según las derivaciones por fase se puede tener doble paralelo o triple paralelo.

Un motor puede tener el mismo número de grupo de bobinas por fase, aun así la disposición de estas puede cambiar, una diferencia significativa es la obtención de más vías al paso de corriente.

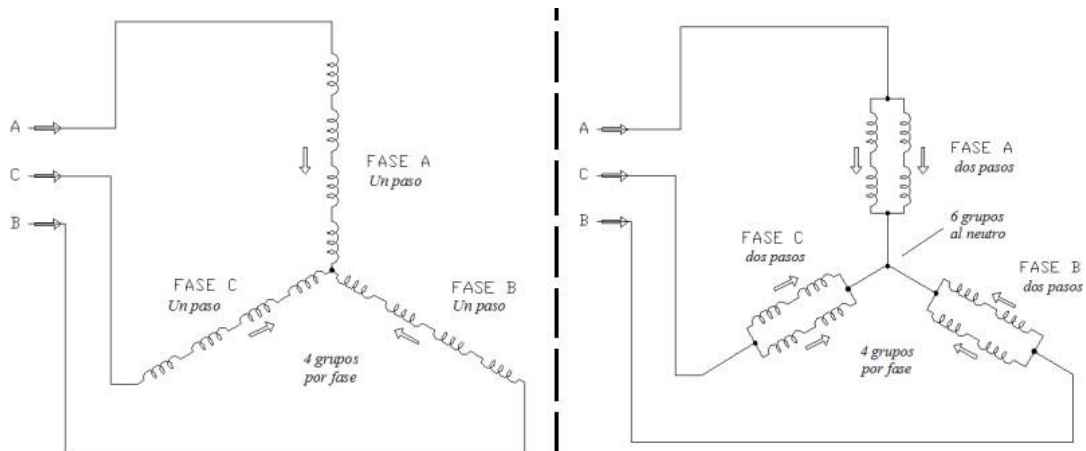


Figura 1.13. Diferencia de conexiones en estrella de un motor de 3 puntas, 4 polos cuando las bobinas están en serie y paralelo. (Mora, 2003)

- Motor de 9 Puntas.

Un motor con nueve terminales tiene una conexión fija para la velocidad, operando con una velocidad nominal, no obstante, permite configuraciones de voltaje. El estator puede conectarse en serie o en paralelo, proporcionando dos voltajes nominales.

La mayoría de los motores trifásicos se construyen de forma que puedan trabajar en 2 valores de tensión de alimentación diferentes, el objetivo de esto es proporcionar alternativas para que el mismo motor pueda trabajar en 2 lugares donde el suministro sea a diferente voltaje.

La clave de este cambio es lograr ya sea una conexión en serie de las bobinas de cada fase (para trabajar a mayor voltaje) o una conexión donde las bobinas de cada fase se dispongan a trabajar en paralelo (para menor voltaje de servicio).

Conexión de motores en estrella para 9 puntas.

Estos motores que poseen 9 puntas o terminales vienen designados en sus líneas del T1 hasta el T9.

entre T4 y T7; T5 y T8; T6 y T9, y las líneas de alimentación trifásica L1 con T1; L2 con T2 y L3 con T3, lo anterior para cuando se trabaja con alto voltaje.

Para trabajar a bajo voltaje se manobra realizando un puente en T4, T5 y T6, y las líneas de alimentación trifásica se conectan tal que L1 queda con T1 y T7, L2 se conecta con T2 y T8, L3 se conecta con T3 y T9.

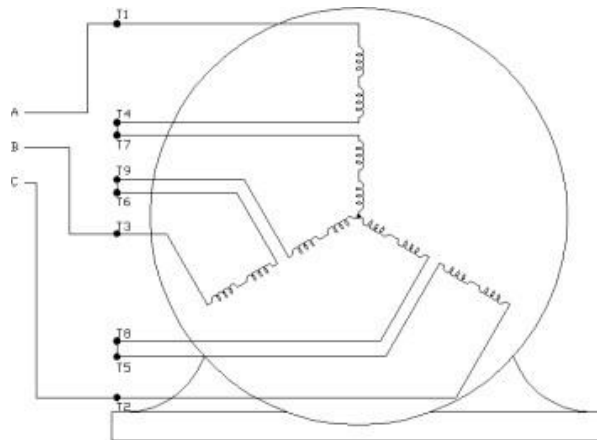


Figura 1.16. Motor de 9 puntas conectado en estrella con bobinas en serie. (Mora, 2003)

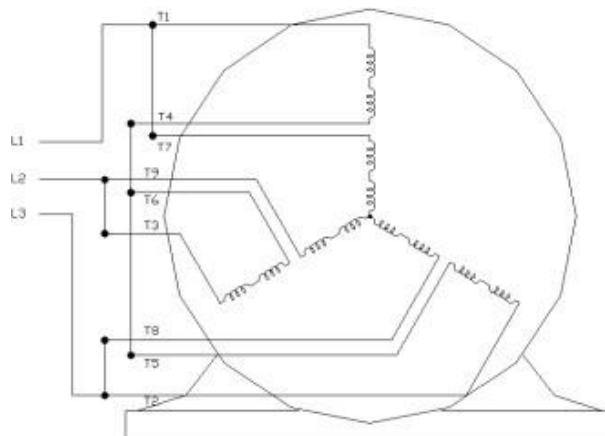


Figura 1.17. Motor de 9 puntas conectado en estrella con bobinas en paralelo. (Mora, 2003)

- Conexión de motores trifásicos de 9 puntas en delta

El estator de estos puede conectarse en delta en serie o en delta en paralelo (también conocido como doble delta).

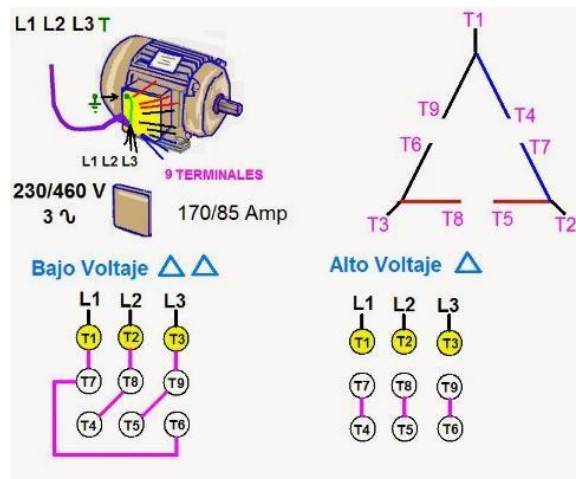


Figura 1.18. Diagrama de conexión para motor conectado en delta de 9 puntas. (Cabezas Victor, 2013)

Como en el caso del motor conectado en estrella, los motores en Delta de 9 puntas también poseen la numeración de T1 hasta T9, sucede lo mismo con el caso anteriormente descrito, para usar el motor con servicio de alta tensión se deben conectar las bobinas en serie y para el uso de bajo voltaje se deben disponer las bobinas en paralelo.

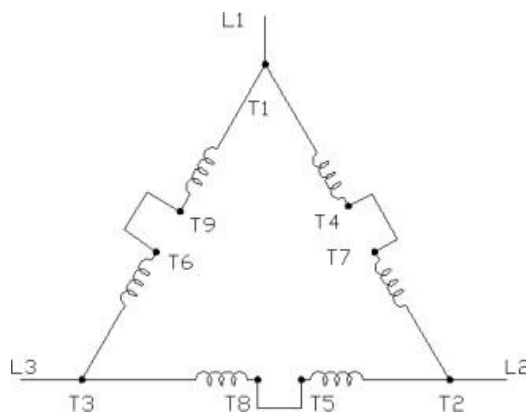


Figura 1.19. Motor de 9 puntas con conexión en delta con bobinas en serie. (Mora, 2003)

La figura anterior muestra los arrollamientos o grupos de bobinas conectados en serie, donde de manera similar que la conexión en estrella para alto voltaje se debe de conectar las líneas de alimentación de manera que queden L1 con T1, L2 con T2, L3 con T3, luego hacer un puente entre T4 y T7, T5 y T8, por último, T6 con T9.

En el caso que se debe conectar un motor en delta abaja tensión, se tiene un caso particular donde solo existirán 3 circuitos, donde están compuestos de una línea de alimentación con 3 puntas del motor.

De esa manera se conecta L1 con los terminales T1, T7 y T6; la línea L2 con T2, T4 y T8; la línea L3 con T3, T5 y T9.

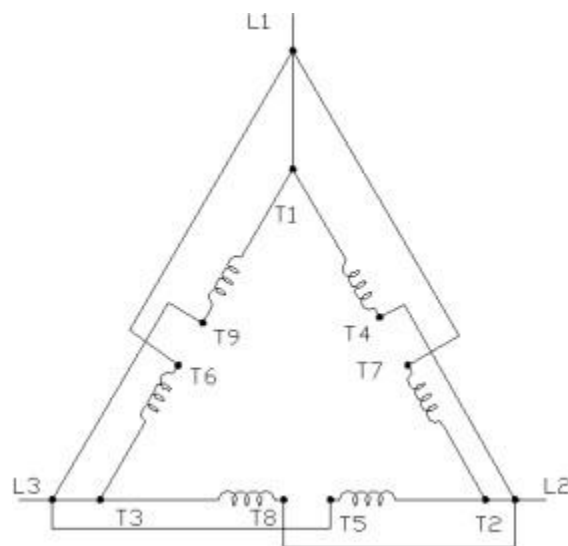


Figura 1.20. Motor de 9 puntas con conexión en delta con sus bobinas en paralelo para bajo voltaje. (Mora, 2003)

- Motores conectados en estrella / delta.

Ciertos motores tienen la capacidad para trabajar en 2 tensiones de servicio y además con 2 conexiones de bobinas diferentes, tienen los terminales previstos de manera que el enrollamiento entero pueda conectarse en estrella (tensión menor) o bien

en Delta (tensión mayor). En tal caso las tensiones mayor y menor deben encontrarse en una relación de $\sqrt{3}: 1$ en vez de una relación de 2:1 como en los demás casos.

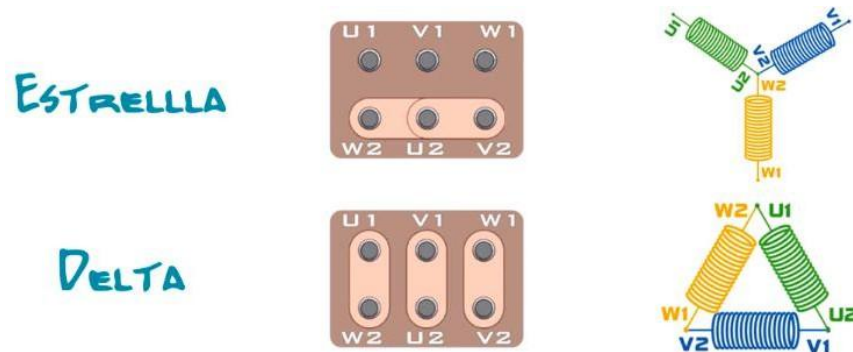


Figura 1.21. Diagrama de conexión para motor con posibilidad de conectar en delta o estrella. (Cabezas Victor, 2013)

Tabla 2. Conjugación de conexión para motores de bobina delta o estrella. (Mora, 2003)

Voltaje de servicio	L1	L2	L3	puentes
Menor	U1	V1	W1	W2, U2 y V2
Mayor	U1 y W2	V1 y U2	W1 y V2	

1.5. Dispositivos eléctricos de control

El control eléctrico es una técnica de regulación de energía a los elementos o dispositivos que están involucrados dentro de un proceso. Este control optimiza la productividad de dichos procesos; al mejorar tiempos, aumentar producción, mejorar calidad, etcétera. La confiabilidad, seguridad y mantenibilidad de los sistemas son características fundamentales que deben poseer.

En procesos industriales, operaciones tales como la inversión de marcha, el frenado, la limitación o variación de la velocidad, el torque y el control de la aceleración en máquinas eléctricas son frecuentes. También operaciones más complejas como la de secuenciación y sincronización de mecanismos.

El tipo de carga y la tarea de control o el grado de regulación que debe hacerse sobre un proceso lo define la naturaleza del controlador a usar una aplicación específica.

Por ello, los controladores para sistemas eléctricos se han clasificado como: eléctricos (residencial), electromagnéticos y electrónicos.

Los dispositivos asociados a un sistema de control electromagnético presentan características muy ventajosas para realizar las unidades de regulación o de mando que requieren las cargas industriales, y particularmente la más importante: el motor eléctrico. (Darío Ordóñez, 2020)

1.5.1. Normativa

La normativa de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 60947 comprende aspectos fundamentales para el diseño y puesta en marcha de sistemas de control.

IEC 60947-1: Normas generales

IEC 60947-2: Interruptores automáticos

IEC 60947-3: Interruptores seccionadores

IEC 60947-4: Contactores y arrancadores

IEC 60947-5.1 y siguientes: aparatos de circuitos de control y elementos de conmutación; componentes de control automático.

En un sistema de control electromagnético intervienen diversos dispositivos. En la norma IEC 60947 (Low Voltage⁴ Switchgear and Controlgear) expresa los requerimientos obligatorios que se necesita.

De acuerdo con las definiciones de la norma generales de la IEC, una sobrecorriente, es cualquier corriente eléctrica en exceso del valor nominal de los equipos o de la capacidad de conducción de corriente de un conductor. La sobrecorriente puede ser causada por una sobrecarga, un cortocircuito o una falla a tierra.

La sobrecarga se define como el funcionamiento de un equipo excediendo su capacidad nominal, de plena carga, o de un conductor que excede su capacidad de conducción de corriente nominal, cuando tal funcionamiento al persistir por suficiente tiempo puede causar daños o sobrecalentamiento peligroso.

Las fallas por cortocircuito pueden darse por un contacto accidental entre fase y fase o fase y neutro que provocan corrientes eléctricas elevada en un corto periodo de tiempo.

Las fallas a tierra se producen cuando hay una conexión involuntaria, conductora de electricidad entre un conductor aislado de tierra de un circuito eléctrico y los conductores que habitualmente no conducen corriente, envoltentes metálicas, conductos metálicos, equipamiento metálico o tierra.

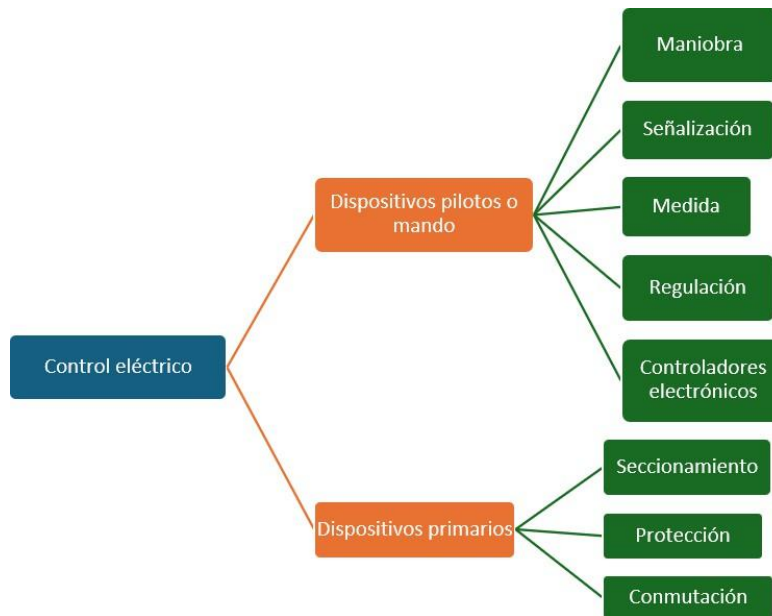


Figura 1.22. Requerimientos basados en norma IEC 60497 (Darío Ordóñez, 2020).

1.5.2. Interruptor automático

Dispositivo diseñado para que abra y cierre un circuito de manera no automática y para que abra el circuito automáticamente cuando se produzca una sobrecorriente predeterminada, sin daños para sí mismo cuando esté aplicado correctamente dentro de su alcance nominal. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008)

Un contactor no detecta altos consumos de corriente, por tal motivo es necesaria hacer uso del térmico, el cual, en caso de recalentamientos o altos consumos de corriente, acciona sus contactos auxiliares los cuales son usados para desenergizar el sistema y poder parar de modo seguro.

Dependiendo del tipo de circuito que se desea proteger, el umbral de disparo magnético se situará entre 3 y 15 veces la corriente térmica (Corriente de cortocircuito de equivalente térmico) Dependiendo del tipo de interruptor automático o disyuntor, dicho umbral de disparo puede ser fijo o ajustable. (Shneider Electric, 1999)

Todos disyuntores pueden realizar cortes omnipolares: la puesta en funcionamiento de un solo disparador magnético basta para abrir simultáneamente todos los polos. Cuando la corriente de cortocircuito no es muy elevada, los disyuntores funcionan a mayor velocidad que los fusibles. (Shneider Electric, 1999)

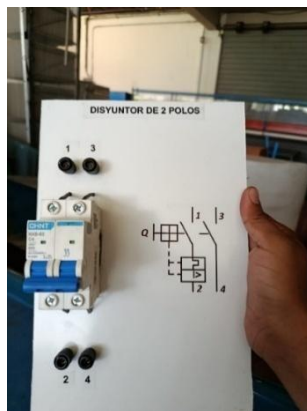


Figura 1.23. Disyuntor de 2 polos 230 V. (Fuente: autores).

1.5.3. Contactor

El contactor es un aparato eléctrico de mando, con el que se puede cerrar o abrir circuitos, ya sea en vacío o en carga. Es el encargado de la apertura y cierra de circuitos eléctricos, principalmente en circuitos de potencia, mediante la activación de un electroimán. A diferencia de un interruptor manual, un contactor se acciona mediante una señal eléctrica, generalmente proveniente de un circuito de control, como un relé o un PLC (MORENO, 2019)

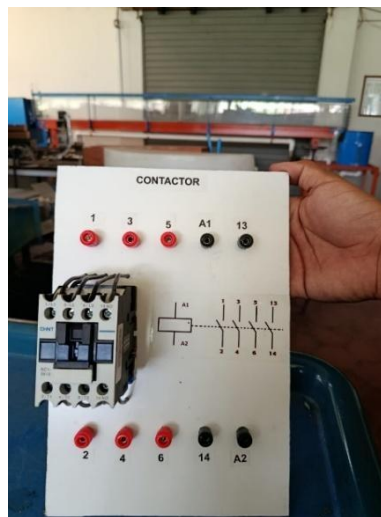


Figura 1.24. Contactor de 230V. (Fuente: autores)

1.5.4. Relé de sobrecarga

Los fallos más habituales en los motores eléctricos son las sobrecargas, que se manifiestan a través de un aumento de la corriente absorbida por el motor y de ciertos efectos térmicos. El calentamiento normal de un motor eléctrico con una temperatura ambiente de 40 °C depende del tipo de aislamiento que utilice. Cada vez que se sobrepasa la temperatura límite de funcionamiento, los aislantes se desgastan prematuramente, acortando su vida útil.

El relé de sobrecarga es un dispositivo que se acopla al contactor para dar protección al motor en caso de sobrecargas o sobrecalentamientos y fallas de fase, su

función principal es accionar sus contactos normalmente cerrado y abierto cuando la corriente supera un valor preestablecido, y con este fin poder desconectar diagramas de mando

Clases de disparo

En la protección de motores se presenta un fenómeno de elevación de la corriente en el arranque de 3 a 7 veces el valor nominal. La protección debe permitir que pase el tiempo de arranque; unos segundos en cargas de poca inercia o varias decenas en cargas con arrastre de mucha inercia.

Una curva de disparo se refiere al tiempo que tarda un relé de sobrecarga térmica en dispararse una vez que se ha sobrecargado en comparación con la corriente que fluye a través de él. Hay cuatro niveles de clase de relé de sobrecarga térmica en uso hoy en día, clase 10 A, clase 10, clase 20 y clase 30.

El relé térmico de clase 10 A se dispara más rápido, en menos de 1.5 segundos, mientras que el relé térmico de clase 30 proporciona la protección más lenta con un tiempo de disparo de más de 5 segundos.

- Relé de sobrecarga térmica clase 10 A: 2-4 segundos
- Relé de sobrecarga térmica clase 10: 4-10 segundos
- Relé de sobrecarga térmica clase 20: 6-20 segundos
- Relé de sobrecarga térmica clase 30: 9-30 segundos (Darío Ordóñez, 2020)

Tabla 3. Clases de corriente, norma IEC 60947-4-1-1. (Darío Ordóñez, 2020)

CLASE	1.05 lr	1.2 lr	1.5 lr	7.2 lr
	Tiempo de disparo en frío			
10 A	>2 h	<2 h	<2 min	$2 s \leq tp \leq 10 s$
10	>2 h	<2 h	>4 min	$2 s \leq tp \leq 20 s$
20	>2 h	<2 h	>8 min	$2 s \leq tp \leq 30 s$
30	>2 h	<2 h	>12 min	$2 s \leq tp \leq 50 s$

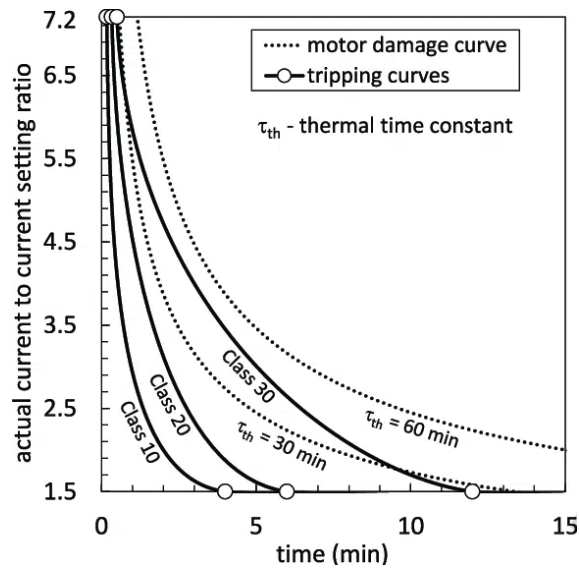


Figura 1.25. Curva de disparo de relés de sobrecarga térmica. (Darío Ordóñez, 2020).

1.5.5. Guardamotor

La principal función del guardamotor es la protección contra cortocircuitos y sobrecargas en aplicaciones de motores eléctricos. Además de eso, también permiten realizar maniobras directamente en su manija o botones. Puede tener la capacidad de ser sensible a la falta de una fase y a la compensación de variaciones en la temperatura ambiente.

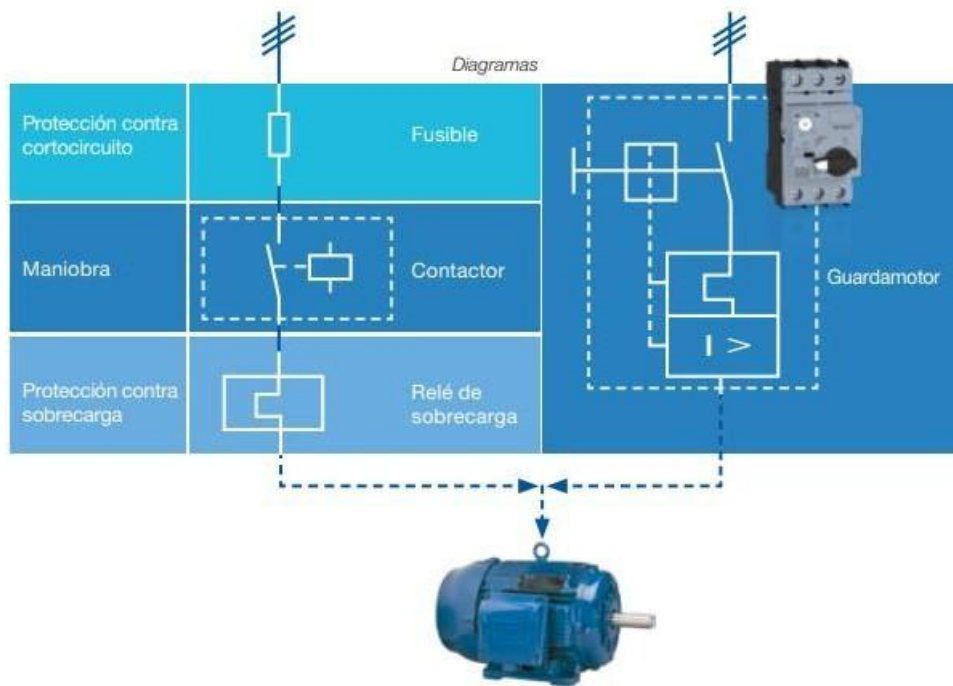


Figura 1.26. Protecciones equivalentes de un guardamotor. (WEG, 2024).

Curvas características

La curva característica de disparo presenta el tiempo de disparo del guardamotor con relación a la corriente nominal, y medidos para temperatura ambiente de 20°C, iniciando desde el estado frío. El tiempo de disparo térmico, cuando está trabajando a la temperatura de operación, es reducido para aproximadamente 25% de los valores que se podrían presentar en la curva. Bajo condiciones normales de operación, las 3 fases de los disyuntores deben estar balanceadas. (WEG, 2024)

MPW12...80

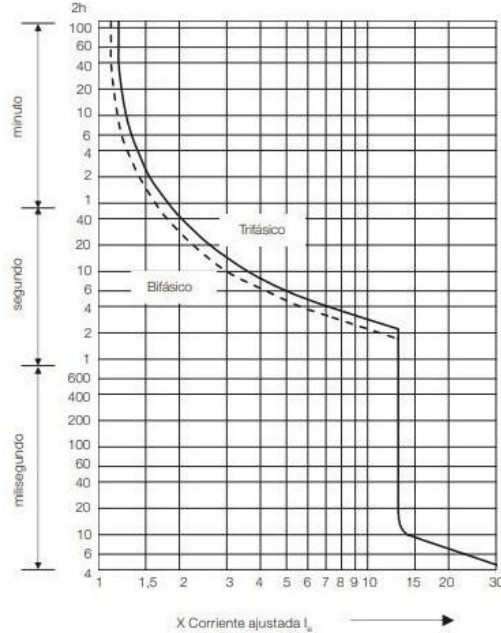


Figura 1.27. Curva característica de guardamotores serie MPW. (WEG, 2024).

1.5.6. Relé temporizador o timer

Son elementos que se utilizan para dar marcha o paro a un sistema después de cierto tiempo, también son usados para dar retardos en la conexión, y desconexión de contactores después de transcurrido un tiempo preestablecido, permitiendo automatizar procesos y controlar secuencias en sistemas eléctricos y electrónicos

La conexión y desconexión de contactores puede ser muy rápida y por consiguiente se podría generar un corto circuito ya que un contactor no ha terminado de desconectarse y al mismo tiempo otro estaría en conexión, es el caso arranque estrella delta donde dos contactores no pueden estar conectados al mismo tiempo o de lo contrario se produce un corto circuito entre contactores. (MORENO, 2019)

1.5.7. Fusible

Un fusible es un dispositivo de seguridad en un circuito eléctrico que se diseña para proteger contra sobrecorrientes. Consiste en un cable o tira metálica que se funde (se rompe) cuando la corriente eléctrica excede un nivel seguro, interrumpiendo así el flujo de corriente y evitando daños mayores al circuito. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008)

Todos los interruptores automáticos o disyuntores pueden realizar cortes omnipolares: la puesta en funcionamiento de un solo disparador magnético basta para abrir simultáneamente todos los polos. Cuando la corriente de cortocircuito no es muy elevada, los disyuntores funcionan a mayor velocidad que los fusibles. (Shneider Electric, 1999).

1.5.8. Pulsadores

Un pulsador, también conocido como botón, es un dispositivo que, al ser presionado, cierra o abre un circuito eléctrico de forma momentánea. En esencia, es un interruptor que solo actúa mientras se mantiene presionado. Su función principal es iniciar o detener una acción, como encender una luz, activar una alarma o controlar el funcionamiento de un aparato.



Figura 1.28. Pulsador, norma IEC 1082-1. (Darío Ordóñez, 2020).

Tabla 4. Colores para pulsadores, norma IEC/EN 60204 (Darío Ordóñez, 2020).

Color	Significado	Aplicación
Rojo	Parada normal o emergencia	Parada de motores eléctricos, elementos móviles o eventos de emergencia parada.
Amarillo	Evento anormal	Intervenir en acciones anormales o retroceso a puntos de partida de sistemas
Azul	Mandatorio	Actúa para condiciones de acción de mandato o resetear sistemas
Verde	Acción normal marcha	Puesta en marcha inicial
Blanco, gris y negro	Para funciones que no se especifique	Desenclavamiento o reposición de contactores.

1.5.9. Conmutador

Establece una conexión entre circuitos. Abre o cierra contactos de acuerdo con una posición seleccionada.

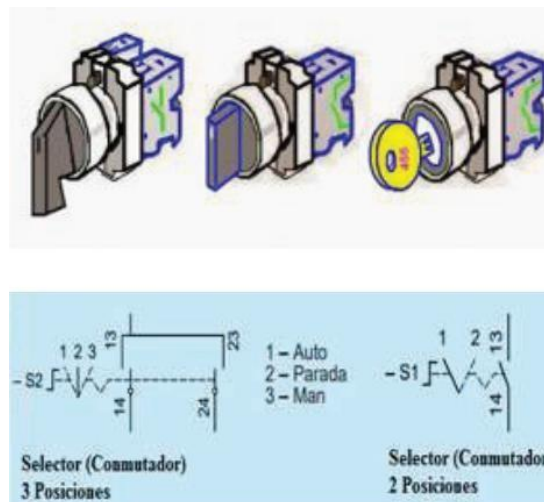


Figura 1.29. Selector o conmutador, norma IEC 1082-1 (Darío Ordóñez, 2020).

1.5.10. Señalización visual y/o luminosa

Indican de manera visual y/o auditiva el estado del sistema

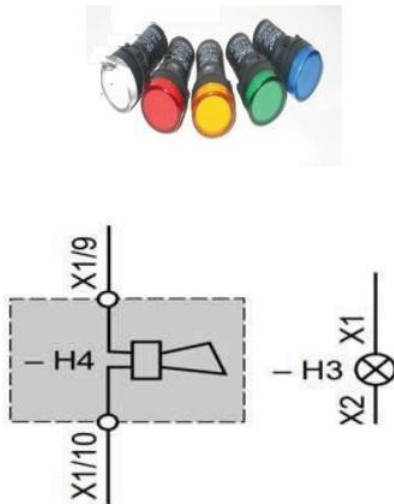


Figura 1.30. Señal auditiva y luz piloto, norma IEC 1082-1. (Darío Ordóñez, 2020).

La norma IEC 60204/ EN 60204-1 establece el código de colores para los visualizadores y los pilotos.

Tabla 5. Colores para luces pilotos, norma IEC/EN 60204. (Darío Ordóñez, 2020)

Color	Significado	Acción operador
Rojo	Emergencia	Intervención inmediata por operador, antes de reiniciar solucionar el fallo.
Amarillo	Evento anormal	Monitorizar el evento anormal
Azul	Mandatorio	Resetear el sistema o acción mandataria
Verde	Acción normal	
Blanco	Neutral / otras condiciones	Monitorizar

1.5.11. Transformador de corriente

Un transformador consta de dos bobinas eléctricamente aisladas una de otra y devanadas sobre el mismo núcleo magnético. Una corriente variable en el tiempo en una bobina establece en el núcleo magnético un flujo también variable en el tiempo. Debido a la elevada permeabilidad del núcleo, la mayor parte del flujo se enlaza con la otra bobina

e induce en ella una fem variable en el tiempo (voltaje). La frecuencia de la fem inducida en la otra bobina es la misma que la corriente en la primera bobina. Si se conecta la otra bobina a una carga, la fem inducida en la bobina establece en ella una corriente. Así, la energía se transfiere de una bobina a otra por medio del flujo magnético en el núcleo.

La bobina a la que la fuente suministra la fuerza se llama devanado primario. La bobina que envía fuerza a la carga se denomina devanado secundario. Cualquiera de los devanados puede conectarse a la fuente o a la carga. (Guru, 2002)

1.5.12. Variador de frecuencia

En los motores asíncronos de corriente alterna la velocidad de giro no depende de la tensión de alimentación sino de la frecuencia de la red. Los variadores de frecuencia (velocidad), tienen como misión variar la frecuencia de la corriente de alimentación. (Viloria, 1993)

Se realizan basándose en tiristores que forman contactores estáticos. Se configura con un convertidor alterna/continua y un convertidor continuo/alterna de velocidad variable entre 0 Hz y la frecuencia de red. (Viloria, 1993)

El variador de frecuencia permite la variación de velocidad total desde 0 rpm a la velocidad nominal del motor a par constante. Su rendimiento es alto, y permite un factor de potencia aproximadamente de 1. Permite la ausencia de sobrecargas por transitorios. Hace innecesario agregar elementos de protección del motor. (Viloria, 1993)

Todos los variadores de frecuencia modernos cuentan con las siguientes partes principales:

- Circuito Rectificador. Recibe la tensión alterna y la convierte en continua por medio de un puente rectificador de diodos o tiristores.

- Circuito intermedio. Consiste en un circuito LC cuya función principal es suavizar el rizado de la tensión rectificadora y reducir la emisión de armónicos hacia la red.

- Inversor. Convierte el voltaje continuo del circuito intermedio en uno de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Los variadores modernos emplean IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) para generar los pulsos de voltaje de manera controlada.

- Circuito de control. El circuito de control enciende y apaga los IGBT para generar los pulsos de tensión y frecuencia variables. Además, realiza las funciones de supervisión de funcionamiento monitoreando la corriente, voltaje, temperatura, etc. con teclados e interfaces amigables de fácil empleo. (Viloria, 1993)

1.6. Arranque de Motores

En muchos casos, los motores de inducción pueden ser puestos en marcha conectándolos simplemente a la red; a veces, sin embargo, hay buenas razones para no hacerlo así. Por ejemplo, la corriente de arranque requerida puede causar una caída en el voltaje del sistema de potencia tal que haga inaceptable el arranque a través de la línea.

En motores de inducción de rotor devanado, el arranque puede llevarse a cabo con corrientes relativamente pequeñas. Insertando resistencia extra en el circuito del rotor durante el arranque. Esta resistencia extra no sólo aumenta el par en el arranque, sino que reduce su corriente. (Chapman, 2012)

1.6.1. Arranque directo

El arranque directo de un motor trifásico es el circuito de control más simple y básico que existe, este circuito solo se compone de los dispositivos más elementales para protección y arranque de motor.

En la figura 1.31 se muestra un circuito de arranque directo.

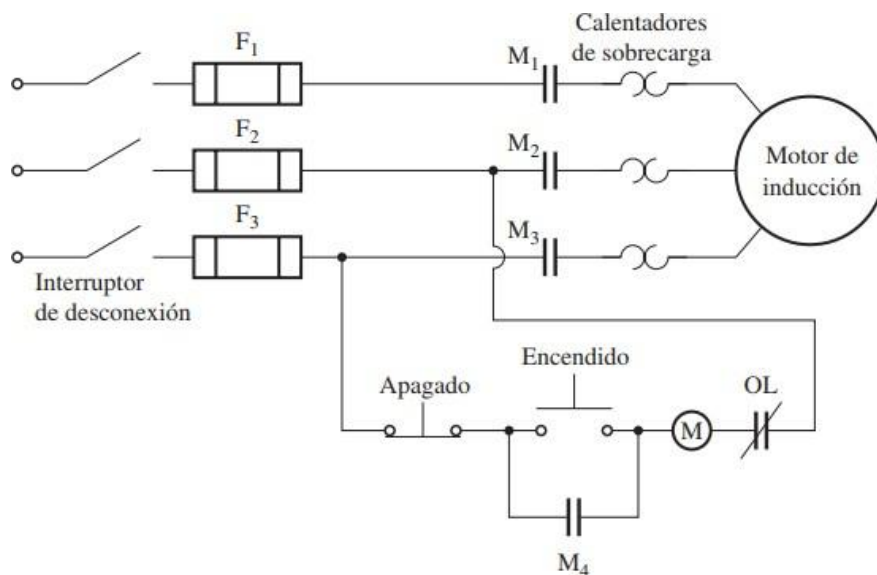


Figura 1.31. Típico arrancador directo a través de la línea de un motor de un motor de inducción (Chapman, 2012).

La operación de este circuito es muy sencilla. Cuando se presiona el interruptor de arranque, la bobina del relé (o contactor) M se energiza, lo que causa que se cierren los contactos M₁, M₂ y M₃ que normalmente están abiertos. Cuando se cierran estos contactos, se aplica potencia al motor de inducción y éste arranca. El contacto M₄ también se cierra, lo que causa un corto en el interruptor de arranque, lo que permite al operador soltarlo sin quitar potencia del relé M. Cuando se presiona el botón de detener, el relé M se desenergiza, se abren los contactos M y se detiene el motor. (Chapman, 2012)

El circuito de arranque de un motor magnético de este tipo tiene varios elementos de protección incorporados:

- 1- protección contra cortocircuito.
- 2- Protección contra sobrecarga.
- 3- Protección contra bajo voltaje.

La protección contra cortocircuito del motor la proveen los fusibles F1, F2 y F3. Si se presenta súbitamente un cortocircuito dentro del motor y provoca un flujo de corriente mucho mayor a la corriente nominal, estos fusibles se funden y desconectan el motor de la fuente de potencia para evitar que se queme por completo. Sin embargo, estos fusibles no se deben quemar durante el arranque normal del motor, por lo que están diseñados para soportar corrientes mucho más altas que la corriente a plena carga antes de abrir el circuito. Esto quiere decir que los cortocircuitos a través de una alta resonancia a las cargas excesivas para el motor no serán evitados por los fusibles. (Chapman, 2012)

La protección contra sobrecarga del motor la proveen los elementos de la figura marcados como OL. Estos elementos de protección contra sobrecarga constan de dos partes, un elemento térmico por sobrecarga y sus contactos. En condiciones normales los contactos de sobrecarga están cerrados. Sin embargo, cuando la temperatura de los elementos térmicos se eleva demasiado, los contactos OL se abren y desenergiza el relé M, que a su vez abre los contactos M que normalmente están abiertos y remueve la potencia del motor. Cuando se sobrecarga un motor de inducción, a la larga se daña con el calentamiento excesivo causado por las altas corrientes. Sin embargo, toma cierto tiempo para que se averíe el motor y un motor de inducción por lo regular no se verá afectado por periodos breves de corrientes altas (como las corrientes de arranque). Solo se dañará si estas se sostienen. Los elementos térmicos de sobrecarga dependen del calor para su operación, por lo que no se verán afectados por periodos breves de

corrientes altas durante el arranque y podrán operar durante largos periodos de corriente alta, desconectando el motor de la fuente de potencia antes de que experimente algún daño. (Chapman, 2012)

La protección contra bajo voltaje la provee también un controlador. Nótese en la figura que el control de potencia del relé M viene directamente a través de las líneas al motor si el voltaje que se aplica al motor cae demasiado elevado, el voltaje aplicado al relé M también caerá y el relé se desenergiza. Entonces se abrirán los contactos M y removerán la fuente de potencia de los terminales del motor. (Chapman, 2012)

1.6.2. Arranque delta estrella

Con el arranque estrella delta o estrella triángulo se procura reducir la corriente en el momento del arranque al alimentar a una tensión menor con la conexión en estrella. Con ello se consigue que la intensidad baje a la tercera parte de la intensidad que se produciría en un arranque directo. También el par de arranque se reduce a menos de la mitad, lo que hace imposible este sistema en motores de media potencia que arranquen con mucha carga. Otro inconveniente es el corte de tensión que se produce al pasar de estrella a delta. (UES, 2016)

En la figura 1.32 se observa que el cambio de estrella a triángulo debe realizarse en el instante en que el par motor en estrella es igual al par resistente, de lo contrario el motor conectado en estrella no tendría fuerza suficiente para vencer el par resistente y seguir acelerando el motor. La diferencia entre par motor y par resistente se traduce en aceleración del motor. Cuando el motor alcanza una velocidad y deja de acelerar es cuando se debe cambiar a triángulo o delta. (UES, 2016)

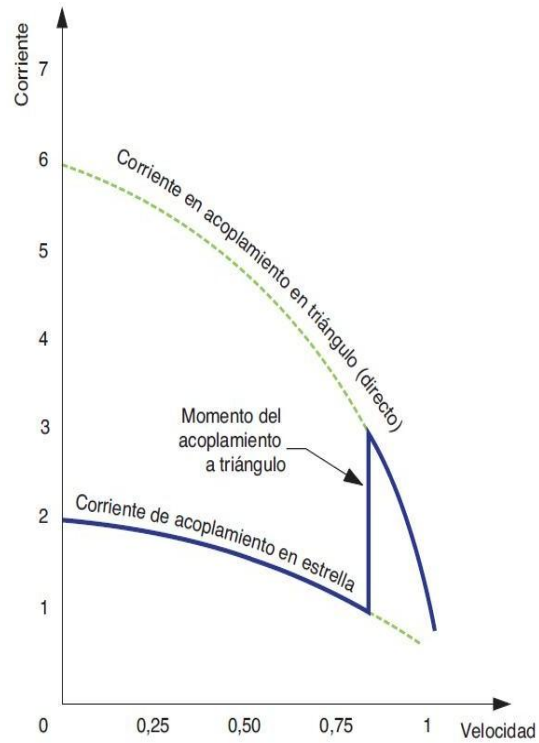


Figura 1.32. Curva Par-Velocidad en el arranque estrella triángulo. (UES, 2016).

En la figura 1.33 se muestra el circuito esquemático de arranque del triángulo estrella de un motor trifásico

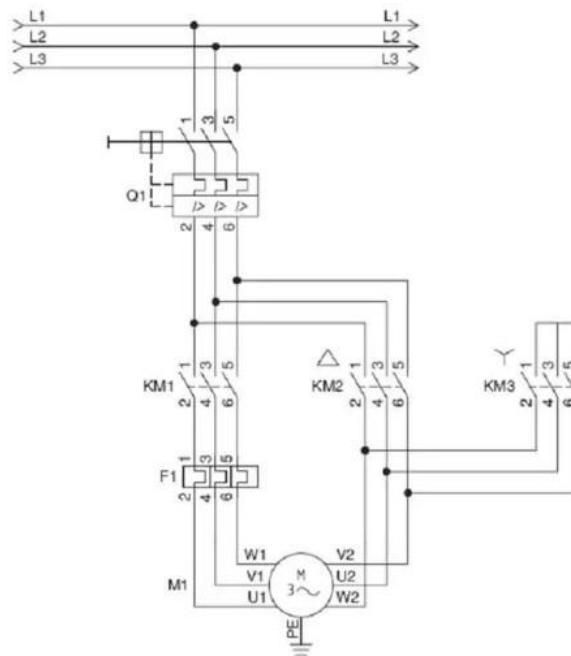


Figura 1.33. Esquema de fuerza arranque Estrella – Triángulo. (UES, 2016).

1.6.3. Arranque por autotransformador

El arranque por transformador es un sistema que consiste en arrancar motores eléctricos de gran potencia, reduciendo la corriente de arranque y protegiendo tanto el motor como la red eléctrica. La idea principal detrás de esta técnica es reducir el voltaje aplicado al motor durante el arranque, lo que disminuye la corriente de arranque y minimiza el estrés en el sistema eléctrico. (Guru, 2002)

Funcionamiento:

El proceso de arranque por transformador implica el uso de un autotransformador conectado en serie con el motor. Durante el arranque, el transformador se configura para suministrar un voltaje más bajo al motor. Esto resulta en una corriente de arranque reducida, lo que a su vez disminuye las caídas de voltaje en la red eléctrica y previene posibles fluctuaciones de tensión que podrían afectar a otros equipos conectados. (Guru, 2002)

Una vez que el motor ha alcanzado una velocidad y carga específicas, el transformador de arranque se desconecta automáticamente y el motor se conecta directamente a la alimentación de la red eléctrica a su voltaje nominal. Este proceso garantiza un arranque suave y gradual, evitando los picos de corriente que podrían dañar tanto el motor como los dispositivos conectados.

La figura 37 muestra un circuito de arranque con voltaje reducido típico que utiliza autotransformadores. Durante el arranque se cierran los contactos 1 y 3, lo que reduce el suministro de voltaje al motor. Una vez que el motor está cerca de la velocidad final, se abren estos contactos y se cierran los contactos 2. Estos contactos permiten la aplicación de voltaje pleno de la línea al motor. Es importante tomar en cuenta que aun cuando se reduce la corriente

de arranque en proporción directa a la disminución del voltaje en los terminales, el par de arranque disminuye con el cuadrado del voltaje aplicado. Por lo tanto, solo se puede lograr una cierta reducción de la cantidad de corriente si el motor debe arrancar con una carga en su eje:

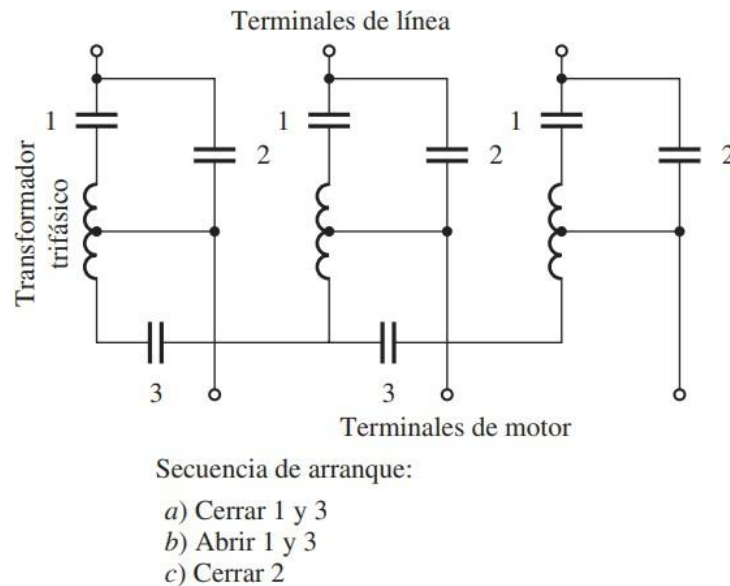


Figura 1.34. Arrancador por autotransformador de un motor de inducción. (Chapman, 2012).

1.6.4. Arrancadores suaves

Un arrancador suave no modifica la frecuencia ni la velocidad de un motor como lo hace el variador. Lo que hace es incrementar gradualmente la tensión aplicada al motor desde un valor inicial determinado hasta la tensión nominal. Inicialmente la tensión aplicada es muy baja y luego al ir incrementándose paulatinamente comienza a haber mayor torque disponible hasta que logra vencer al torque de la carga y el motor comienza a acelerar. Uno de los beneficios de este método es que permite ajustar el torque necesario según el motor esté cargado o no.

Usando un arrancador suave se reduce la corriente de arranque respecto de un arranque directo como así también las caídas de tensión en la línea, el beneficio de este arranque recae en toda la parte mecánica ya que al ajustar el torque al mínimo valor necesario no hay estrés mecánico en las transmisiones, esfuerzos en ejes y manchones, correas que patinan etc. y todo esto da como resultado un menor costo de mantenimiento y mínimo tiempo muerto por roturas.

Algo importante que se debe tener en cuenta es que el arranque suave es un método de arranque a tensión reducida, por lo que la energía necesaria para mover la carga se obtendrá a expensas de un incremento de corriente. Esto quiere decir que si bien el arranque suave sirve para reducir la corriente de arranque de un motor (que en un arranque directo comúnmente es de 6 a 8 I_n) no puede arrancar a corriente nominal. Normalmente en un arranque suave el motor toma tres o cuatro, y en ocasiones hasta cinco veces la corriente nominal, lo cual es una importante reducción frente a un arranque directo.

Esto dependerá de la carga que deba mover. Las cargas con mucha inercia generalmente requieren un mayor tiempo de arranque y absorben más corriente de la red. (Guru, 2002)

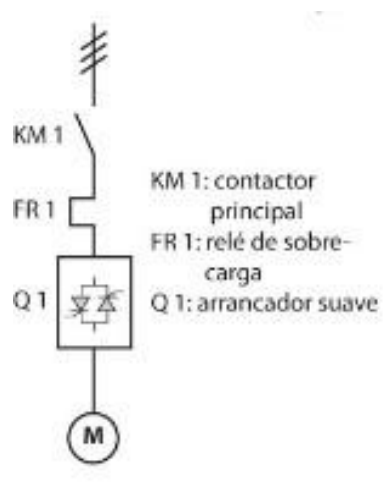


Figura 1.35. Esquema de un arrancador suave. (Guru, 2002)

1.6.5. Arranque con variador de frecuencia

A estos equipos se les suele llamar de distintas maneras. Variador de velocidad (variable speed drive VSD), convertidor o variador de frecuencia (variable frequency drive VFD) o simplemente drives.

Un drive se compone de dos partes principales, una que convierte corriente alterna AC (ya sean 50 o 60 Hz) en corriente continua DC y otra que vuelve a convertir esta corriente continua en una alterna, esta vez, de frecuencia variable, entre 0 y 250 Hz. La velocidad del motor depende directamente de la frecuencia, de modo que controlando esta frecuencia se puede variar la velocidad del motor a voluntad. (Guru, 2002)

Durante el arranque, el variador aumenta gradualmente la frecuencia desde 0 Hz hasta la frecuencia de red (60 Hz en nuestro caso). Haciendo un análisis en varios puntos del arranque se visualiza que para cada frecuencia instantánea que el variador aplica al motor este está girando a la velocidad nominal que corresponde a esa frecuencia aplicada, por lo tanto, el torque nominal va a estar disponible desde el arranque y la corriente absorbida de la red rondará la nominal. Al arrancar un motor con un variador existe un torque disponible aún con el motor detenido y que arranca a corriente nominal. (Guru, 2002)

Cuando se utiliza un variador de velocidad es posible realizar una parada suave del motor. Esto es muy útil sobre todo en aplicaciones con bombas, para evitar el golpe de ariete que se produce al detener abruptamente una bomba. También puede ser útil para detener cintas transportadoras.

En muchas aplicaciones es necesaria una regulación continua de la velocidad y el variador de frecuencia es el elemento indicado para resolver este problema, No obstante, muchas veces se utiliza un variador simplemente para arrancar y parar un motor sin

necesidad de un control de la velocidad durante el proceso. Esto es un error conceptual y una mala decisión técnico-económica, ya que podría realizarse con un arrancador suave a un costo mucho menor.

En relación con el arrancador suave, el variador de velocidad es mucho más voluminoso y requiere más espacio, además de su elevado peso. Adicionalmente, como el drive modifica la frecuencia y debe generar la onda senoidal a partir de una continua, introduce armónicos en la red y es necesario agregar filtros y utilizar cables aislados para reducir los problemas de armónicos, sin embargo, nunca se eliminan por completo. (Guru, 2002)

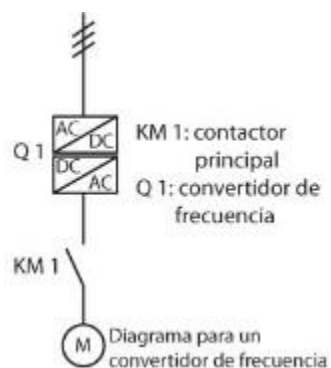


Figura 1.36. Esquema de conexión de un variador de frecuencia. (Guru, 2002)

1.7. Instrumentos de Medición

El banco hará uso de diferentes equipos medidores de parámetros eléctricos. Las mediciones directas necesarias para llevar a cabo las pruebas comprenden la tensión, corriente, velocidad. Estas mediciones direccionan para tener los valores de potencia, energía y factor de potencia.

1.7.1. Multímetro

El multímetro es el medidor más comúnmente usado. Es capaz de medir dos o más cantidades eléctricas, este puede ser de dos tipos: Analógicos y Digitales. La mayoría de los multímetros miden voltaje, corriente y resistencia y tienen escalas separadas para su lectura. Las escalas están usualmente eslabonadas o ligadas en ambos extremos.

1.7.2. Megóhmetro

También conocido como megger, es un dispositivo que se emplea para medir resistencias de muy alto valor, por ejemplo: las que hay en el aislamiento de cables entre los devanados de los motores o transformadores. Estas resistencias, generalmente, varían de varios cientos a miles de megohms.

Normalmente el megaóhmetro consiste en una manivela, un generador en una caja de engranes y un medidor. Al girar la manivela los engranes hacen girar al generador a alta velocidad para que genere una tensión de 100, 500, 1000, 2500 Y 5000 Volts, (según el modelo).

1.7.3. Tacómetro

Un tacómetro es un dispositivo que mide la velocidad de un objeto en movimiento. Estos dispositivos se usan para medir la velocidad de los motores eléctricos y detectar ciertas características de operación que pueden ser anormales. Los tacómetros pueden ser básicamente de tres tipos: Tacómetro de contacto, Foto-tacómetro y Tacómetro estroboscópico.

1.7.4. Cofímetro o Fasímetro

El cofímetro o fasímetro es un instrumento para medir el factor de potencia ($\cos\varphi$) de forma directa. Para obtener el $\cos(\varphi)$, necesita obtener el desfase entre tensión y corriente, por lo que posee 2 bobinas, una para corriente conectada en serie y otra para tensión conectada en paralelo a la carga. La conexión es similar al vatímetro.

1.7.5. Pinza Cofimétrica

Es un instrumento similar a la pinza amperométrica, con la prestación especial de poder determinar el valor de coseno de F_i en cada fase, además de medición de potencias. Para realizar la medición con la pinza, monofásico o trifásico, es necesario además de tomar la medición de corriente, medir tensión para que internamente pueda verificar el desfase entre estas variables.

2. CAPITULO 2: DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

Para el desarrollo del presente proyecto de implementación de un banco de pruebas para motores eléctricos trifásicos, se adoptó una metodología de investigación aplicada, basada en la recolección, análisis y adaptación de experiencias previas a fin de diseñar una solución didáctica y funcional en el contexto de nuestra institución.

La primera etapa consistió en la recopilación de información técnica sobre bancos de prueba ya construidos en distintas universidades. Esta revisión documental permitió identificar buenas prácticas, configuraciones comunes y parámetros frecuentemente evaluados en motores eléctricos de inducción.

De forma complementaria, se realizó varias visitas a la Unidad Productiva de la Escuela de Ingeniería Mecánica, donde se observaron trabajos constructivos previos y se identificaron recursos, materiales disponibles y posibles soluciones prácticas para el diseño estructural del banco. Estas observaciones sirvieron como base para conceptualizar un modelo propio, adaptado a los objetivos de formación y condiciones locales.

Con base en los antecedentes recopilados, se procedió a definir las pruebas principales a desarrollar en el banco:

- Prueba en vacío
- Prueba de rotor bloqueado
- Curva par – velocidad (mediante freno de Prony)
- Prueba de corriente directa.

También se planteó la necesidad de visualizar distintos métodos de arranque del motor: arranque directo, inversión de giro y arranque mediante variador de frecuencia, con el propósito de enriquecer el aprendizaje práctico del estudiante y facilitar el análisis del comportamiento del motor en distintas condiciones.

En cuanto al diseño constructivo, se optó por la implementación de bastidores individuales para cada parte del sistema eléctrico (relés térmicos, contactores, interruptores, protecciones, etc.), con el objetivo de que los estudiantes puedan identificar claramente cada componente y entender su función dentro del sistema.

Finalmente, se elaboró la estructura del banco de pruebas, la cual incluye un soporte robusto para el motor y los elementos de frenado, así como los tableros de control y medición. Esta estructura está pensada tanto para la ejecución segura de pruebas como para el fácil acceso a los componentes durante prácticas académicas.

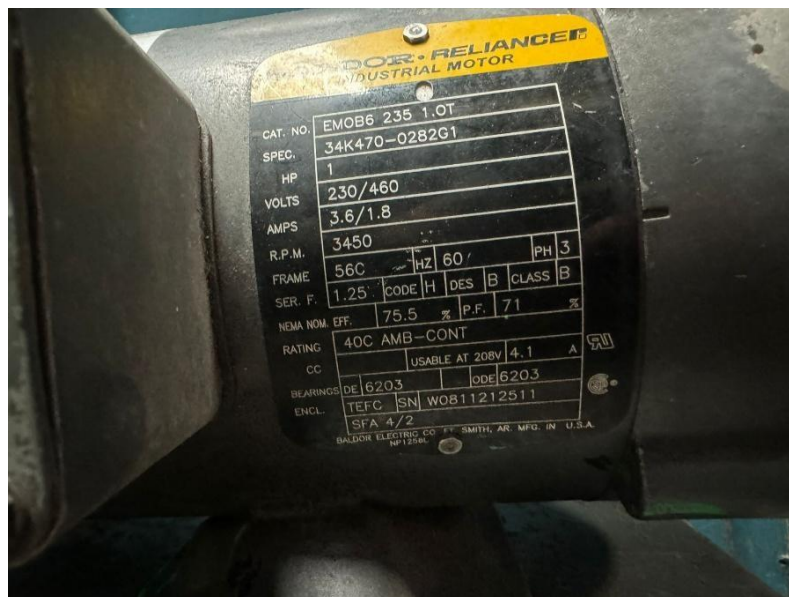


Figura 2.1. Especificaciones del motor. Fuente: autores.

Para el diseño y la parametrización de las protecciones y demás accesorios, se tomó como punto de partida el motor eléctrico. Se seleccionó un motor de inducción trifásico de 746 W y 3450 rpm (2 polos), el cual sirvió como referencia principal para la definición de los elementos del sistema. Se montará en una estructura fabricada de tubo estructural cuadrado de 2.54 cm para soporte del peso del motor y los componentes electromecánicos, además contará con un tablero de control fabricado con soportes de PLA para el montaje de los dispositivos de control y terminales de conexiones rápida para facilitar el uso en prácticas de laboratorio.

El banco podrá disponer de dos tipos de arrancadores, los cuales se detalla a continuación.

Arranque Directo: construido con un interruptor termomagnético, un contactor y un relé térmico para protección en caso de sobrecarga.

Arranque directo con cambio de giro: Se demostrará a los estudiantes los cambios que se le deben de hacer al arranque directo al agregarle cambios de giro, agregándole todas las protecciones necesarias y asegurando que no haya cortocircuito al operar el cambio de giro

Arranque con variador de frecuencia: Se agregará un arranque con variador de frecuencia para denotar como las corrientes de arranque son una de las principales causas de fallo de motor por lo cual es necesario un método de arranque alternativo para disminuir esas corrientes de arranque. Al igual que en el arranque directo se utiliza un interruptor termomagnético, un contactor para energizar el variador de frecuencia, el cual será controlado de forma manual.

2.1. Pruebas y Ensayos de Motores

Un laboratorio de prueba de motores eléctricos debe medir diversas variables para evaluar el rendimiento, eficiencia del motor, las pruebas que se podrán realizar en el presente banco serán:

2.1.1. Medición de voltaje

La prueba consiste en medir la diferencia de potencial aplicada a los terminales del motor. Se puede medir con un voltímetro o con un analizador de potencia instalado entre las fases del motor trifásico para verificar que el voltaje sea el adecuado según la placa del motor.

2.1.2. Medición de corriente

La prueba determinará la magnitud de corriente que circulará por los devanados del motor. Se puede medir con una pinza amperimétrica con un analizador de potencia instalado entre las fases del motor trifásico con el objetivo de verificar que la corriente está dentro del rango nominal.

2.1.3. Medición de potencia eléctrica y factor de potencia

Se medirá la cantidad de energía que el motor consume de la red eléctrica. Hay tres parámetros a calcular: la potencia activa, la potencia aparente y la potencia reactiva.

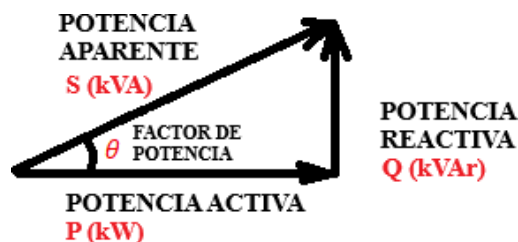


Figura 2.2. Triángulo de potencia. (Fuente: autores)

La potencia activa (P_{elect}), es la energía útil convertida en trabajo y es la que leería el vatímetro o el analizador de potencia, en forma de ecuación la potencia activa es

$$P_{elect} = \sqrt{3} * V * I * \cos\theta \quad (2.1)$$

Donde:

$$V = \text{voltaje}$$

$$I = \text{corriente}$$

$$\cos\theta = \text{factor de potencia}$$

La potencia aparente (S) es la combinación de la potencia activa y reactiva

$$S = \sqrt{3} * V * I \quad (2.2)$$

La potencia reactiva es la energía almacenada en los devanados del motor debido a los campos magnéticos

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.3)$$

El factor de potencia permite evaluar la eficiencia del motor. Para obtenerlo se mide primero la potencia activa con un vatímetro, y se calcula la potencia aparente con la formula (2.2), luego se calcula la proporción

$$\cos\theta = \frac{P}{S} \quad (2.4)$$

2.1.4. Medición de frecuencia

Se mide en Hertz (Hz) con un analizador de red, la frecuencia debe ser de 60 Hz, en el laboratorio, debido a la introducción del variador de frecuencia este valor se puede modificar a voluntad afectando la velocidad del motor asíncrono.

2.1.5. Medición de parámetros mecánicos

Los parámetros mecánicos sirven para evaluar el rendimiento y la eficiencia de un motor pues permiten analizar la capacidad del motor para convertir la energía eléctrica en energía mecánica de manera eficiente. Estos parámetros son:

- Velocidad de rotación (N). Es la cantidad de revoluciones por minuto (RPM) que realiza a el motor. Se verifica con un tacómetro si el motor opera a la velocidad nominal indicada en su placa.
- Torque o par motor (T). Es la fuerza rotacional que genera el motor para mover una carga. Se verifica con un dinamómetro conectado a un freno el torque necesario para detener el motor

$$T = F \times r \quad (2.5)$$

$$T = \text{Torque (N - m)}$$

$$F = \text{fuerza medida por la balanza (N)}$$

$$r = \text{radio del brazo de palanca (m)}$$

- La potencia mecánica P_{mec} . Es la cantidad de energía mecánica generada por el motor y entregada a la carga. Permite determinar cuanta energía útil entrega el motor. Se calcula a partir del torque y la velocidad con la formula

$$P_{mec} = \frac{T \times 2\pi N}{60} \quad (2.6)$$

Donde:

P_{mec} = potencia mecánica en Watts

T = Torque en N – m

N = velocidad en rpm

- Eficiencia (η). Es la relación entre la potencia mecánica generada y la potencia eléctrica consumida. Se calcula con la formula

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elect}} \times 100 \quad (2.7)$$

Donde:

η = eficiencia del motor en %

P_{mec} = potencia mecánica de salida en W

P_{elect} = potencia eléctrica de entrada en W

- Deslizamiento (s). Es la diferencia entre la velocidad sincrónica del campo magnético (N_s) y la velocidad real del rotor (N).

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 \quad (2.8)$$

Donde N_s es la velocidad sincrónica del motor

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (2.9)$$

f = frecuencia de alimentación (Hz)

$$P = \text{número de polos del motor}$$

Los ensayos del motor asíncrono permiten determinar los parámetros del circuito equivalente de la máquina (figura. 1.8). Las pruebas se deben llevar a cabo en condiciones controladas con mucha precisión, puesto que las resistencias varían con la temperatura, mientras que la resistencia del rotor lo hace con la frecuencia del rotor. Los detalles sobre cómo se debe llevar a cabo cada prueba del motor de inducción para obtener resultados exactos se describen en la Norma IEEE 112. (Chapman, 2012)

2.1.6. Prueba con rotor bloqueado

La prueba de rotor bloqueado es un ensayo que se realiza en motores eléctricos, especialmente en motores de inducción, para obtener parámetros clave como la resistencia y la reactancia del rotor, además del factor de potencia en condiciones de arranque. El procedimiento consiste en bloquear el rotor (impidiendo su giro) y aplicar un voltaje reducido en el estator. Luego, se mide la corriente, la potencia y el voltaje para calcular los parámetros eléctricos del motor.

Esta prueba permite determinar parámetros del circuito equivalente (fig. 1.8), la resistencia (R_2) y reactancia (X_2), también permite calcular la corriente de arranque del motor y determinar el factor de potencia de arranque.

Para realizar la prueba se detiene el rotor con un freno mecánico o dispositivo de sujeción, luego con un autotransformador se reduce el voltaje a un 20% o 30% de su voltaje nominal con un autotransformador, por ejemplo, para un motor que se alimenta a 480V, el autotransformador debe bajar la tensión a 96V.

Se procede a medir la corriente (I_{rb}) voltaje (V_{rb}) y potencia (P_{rb}) de entrada.

Con estos valores se puede calcular obtiene la resistencia equivalente (R_{eq}) con la potencia medida:

$$R_{eq} = \frac{P_{rb}}{I^2} \quad (2.10)$$

La potencia medida son las pérdidas correspondientes al calor disipado en los devanados del estator y rotor debido a la resistencia eléctrica, la resistencia obtenida es la resistencia total del circuito equivalente y representa las pérdidas por efecto Joule en condiciones de carga.

la impedancia equivalente (Z_{eq}) del motor es:

$$Z_{eq} = \frac{V_{rb}}{I_{Rb}} \quad (2.11)$$

Que representa la resistencia y la reactancia totales del motor combinadas.

Dado que la prueba se hace con un voltaje reducido, la corriente medida en la prueba no es directamente la corriente de arranque real, se extrapola su valor al voltaje nominal con la siguiente ecuación

$$I_{arranque} = I_{rb} * \frac{V_{nominal}}{V_{rb}}$$
$$I_{arranque} = \frac{V_{nominal}}{Z_{Eq}} \quad (2.12)$$

Finalmente, la reactancia equivalente (X_{Eq}) se obtiene con:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (2.13)$$

Con este valor se puede obtener el desfase entre corriente y voltaje (θ) lo que influye en el factor de potencia de arranque del motor. El ángulo de desfase se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_{eq}}{R_{eq}} \right) \quad (2.14)$$

Si X_{eq} es mucho mayor que R_{eq} el motor tiene un desfase grande, lo que significa un factor de potencia bajo, si X_{eq} es pequeño en comparación con R_{eq} , el motor tiene un menor desfase y un factor de potencia mas alto.

Finalmente, el factor de potencia será

$$FP = \cos(\theta) = \cos(\tan^{-1}(\frac{X_{eq}}{R_{eq}})) \quad (2.15)$$

Que sería el factor de potencia de arranque del motor. Un factor de potencia de arranque bajo significa que el motor está generando una gran cantidad de corriente reactiva, lo cual puede afectar negativamente al sistema eléctrico, también podría ser la causa de un desgaste prematuro del motor debido al excesivo calor generado por el alto consumo de corriente reactiva. (William H. Hayt Jr., 2012)

2.1.7. Prueba en vacío

La prueba de vacío o de rotor libre consiste en hacer funcionar el motor sin ninguna carga mecánica en el eje para obtener parámetros del circuito equivalente, estimar pérdidas en el núcleo, corriente de excitación y rendimiento del motor.

Para realizar la prueba Se energiza el motor con su voltaje nominal en el estator mientras el rotor gira sin carga. Luego se miden los parámetros eléctricos voltaje (V_0), corriente absorbida (I_0) y potencia de entrada (P_0). El motor gira prácticamente a velocidad síncrona, por lo que el deslizamiento (S) es cercano a cero. En estas condiciones, la corriente de rotor es casi nula, y la potencia absorbida se usa principalmente para cubrir pérdidas en el hierro y pérdidas mecánicas (rozamiento y ventilación). Por lo tanto, la prueba en vacío usa para determinar pérdidas en el hierro, parámetros del circuito equivalente y consumo de corriente en vacío en un motor de inducción.

Las pérdidas en el hierro se estiman a partir de la potencia absorbida en vacío (P_0)
Como el rotor gira casi a velocidad síncrona, la corriente en el rotor es mínima y no hay pérdidas de cobre en el rotor.

$$P_{Fe} \cong P_0 - P_{mec} \quad (2.16)$$

Donde:

$$P_{Fe} = \text{pérdidas en el hierro}$$

$$P_0 = \text{Potencia obtenida en la prueba en vacío}$$

$$P_{mec} = \text{pérdidas mecánicas (Rozamiento y ventilación)}$$

Si P_{Fe} es alto, significa que el núcleo magnético del motor tiene muchas pérdidas y puede ser de materiales poco eficientes.

Las pérdidas mecánicas P_{mec} en un motor de inducción provienen del rozamiento en rodamientos, ventilación y fricción del aire en el rotor. Se obtienen de forma experimental durante la prueba en vacío y no se miden directamente, sino que se estiman a partir del cálculo del factor de potencia y la corriente de entrada

La resistencia del hierro (R_{Fe}) se obtiene dividiendo el voltaje aplicado entre las pérdidas en el hierro.

$$R_{Fe} = \frac{V_0^2}{P_{Fe}} \quad (2.17)$$

Si R_{Fe} es baja, significa que el hierro del núcleo tiene muchas pérdidas y el motor puede calentarse más de lo esperado.

El factor de potencia ($FP = \cos\theta_0$) en la prueba en vacío da la información sobre cómo se comporta la corriente que consume el motor sin carga.

$$\cos\theta_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}V_0I_0} \quad (2.18)$$

Un factor de potencia bajo en vacío ($\cos\theta_0 \approx 0.1$ a 0.3) indica que la corriente en vacío es mayormente reactiva, lo cual es normal en motores de inducción, Se debe a que, sin carga, el motor solo necesita mantener el flujo magnético en el entrehierro, consumiendo principalmente corriente reactiva o corriente magnetizante (I_m). La corriente activa o corriente de pérdidas en el hierro (I_{Fe}) en la prueba en vacío corresponde a las pérdidas en el hierro porque en vacío no hay carga mecánica, por lo que la potencia activa solo se usa para compensar las pérdidas del núcleo y algunas pérdidas mecánicas.

Un alto factor de potencia en vacío ($\cos\theta_0 > 0.4$) podría indicar altas pérdidas en el núcleo debido a un material de baja calidad en el hierro del estator o un mal diseño. También puede significar que el motor tiene un entrehierro muy pequeño, reduciendo la corriente magnetizante.

La corriente magnetizante (corriente reactiva) se puede obtener con el factor de potencia y la corriente medida en la prueba en vacío

$$I_m = I_0 \sin\theta_0 \quad (2.19)$$

La corriente magnetizante se relaciona con la reactancia de magnetización X_m que representa la impedancia de magnetización del motor y depende de la calidad del entrehierro y el diseño del estator.

$$X_m = \frac{V_0}{I_m} \quad (2.20)$$

Si X_m es baja, el motor consume mucha corriente magnetizante, lo que puede afectar la red eléctrica.

La corriente de pérdidas en el hierro (corriente activa) se puede obtener con el factor de potencia y la corriente medida en la prueba en vacío

$$I_{Fe} = I_0 \cos \theta_0 \quad (2.21)$$

La corriente de pérdidas en el hierro se relaciona directamente con las pérdidas en el hierro con la ecuación

$$P_{Fe} = V_0 I_{Fe} \quad (2.22)$$

Por lo que ya se puede calcular las pérdidas mecánicas usando la ecuación 2.16. (Mora, 2003)

2.1.8. Prueba de cd para determinar la resistencia del estator

La resistencia del rotor R_2 juega un papel extremadamente importante en la operación de un motor de inducción. Entre otras cosas, determina la forma de la curva par-velocidad pues especifica la velocidad a la que se presenta el par máximo. Se puede utilizar la prueba de rotor bloqueado para establecer la resistencia total del circuito del motor. Sin embargo, esta prueba sólo determina la resistencia total. Para encontrar exactamente la resistencia del rotor R_2 , se requiere saber la resistencia del estator R_1 para que se pueda restar del total. (Chapman, 2012)

La prueba para R_1 , independiente de R_2 , X_1 y X_2 , se llama prueba de cd. Básicamente, se aplica voltaje de cd a los devanados del estator de un motor de inducción. Puesto que la corriente es de cd, no hay voltaje inducido en el circuito del rotor y no hay flujo de corriente directa. Por lo tanto, la única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator y de esta manera se puede calcular esta resistencia. (Chapman, 2012).

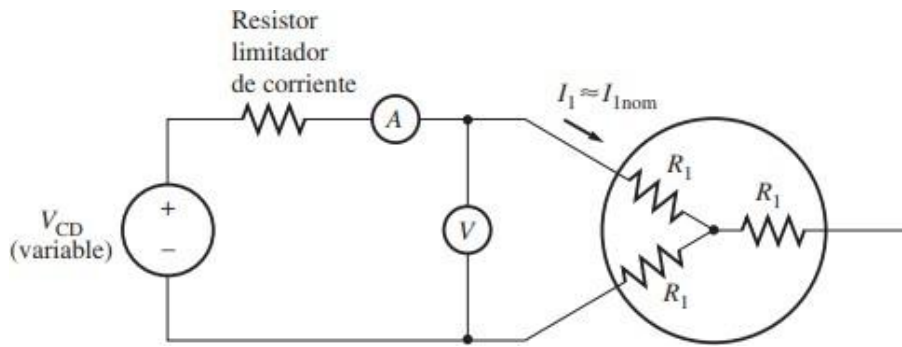


Figura 2.3. Circuito de prueba de cd de resistencia. (Chapman, 2012).

En la figura 2.3 muestra una fuente de potencia de cd conectada a dos de los tres terminales de un motor de inducción conectado en Y. Para realizar esta prueba, se ajusta la corriente en los devanados del estator a su valor nominal y se mide el voltaje entre los terminales. Se ajusta la corriente en los devanados del estator a su valor nominal en un intento por calentar los devanados a la misma temperatura que tendrían dura la operación normal (la resistencia del devanado está en función de la temperatura). (Chapman, 2012)

La corriente de la figura 2.3 fluye a través de dos de los devanados, por lo que la resistencia total en el camino de la corriente es $2R_1$, por lo tanto:

$$2R_1 = \frac{V_{CD}}{I_{CD}}$$

$$R_1 = \frac{V_{CD}}{2I_{CD}} \quad (2.23)$$

Si los devanados del estator están conectados en Delta, el valor de R_1 es:

$$R_1 = \frac{3V_{CD}}{2I_{CD}} \quad (2.24)$$

Con este valor de R_1 se pueden determinar las pérdidas en el cobre del estator en vacío, y se pueden encontrar las pérdidas en el hierro P_{Fe} restando la potencia de entrada en vacío y las pérdidas en el cobre del estator. (Chapman, 2012)

Las pérdidas en el cobre del estator se calculan con la siguiente ecuación:

$$P_{Cobre} = 3R_1 I_0^2 \quad (2.25)$$

La potencia leída en la prueba de vacío P_0 se usa para calcular las pérdidas en el hierro P_{Fe}

$$P_{Fe} = P_0 + P_{Cobre} \quad (2.26)$$

El valor de R_1 calculado de esta manera no es exacto, puesto que desprecia el efecto pelicular que se presenta cuando se aplica un voltaje de ca a los devanados. (Chapman, 2012)

2.2. VARIABLES DE DISEÑO

El proceso de diseño del banco didáctico de motores eléctricos trifásicos inició con la conceptualización de los diagramas eléctricos de arranque, considerados como el núcleo fundamental del proyecto. Estos esquemas permitieron definir con claridad las configuraciones de operación que se implementarían en el equipo, tales como el arranque directo, el arranque directo con inversión de giro y el arranque mediante variador de frecuencia.

A partir del diseño del circuito y tomando en cuenta las características técnicas del motor de inducción trifásico de 746 W, se seleccionaron e integraron los dispositivos de protección necesarios para garantizar la seguridad tanto del motor como de los usuarios durante las prácticas.

Con los elementos eléctricos y de protección ya establecidos, se procedió al diseño físico del banco metálico. Se definió la disposición de cada bastidor y la forma en que los equipos serían montados, buscando una organización lógica que facilitara la comprensión de los estudiantes y permitiera la ejecución ordenada de las pruebas experimentales.

2.2.1. Diagrama unifilar de arrancadores

Se presentarán los diagramas eléctricos de potencia y mando correspondientes a los arranques que se podrán disponer con el banco de pruebas. Estos diagramas han sido modelados y validados mediante el software Cade Simu.

- **Arranque directo**

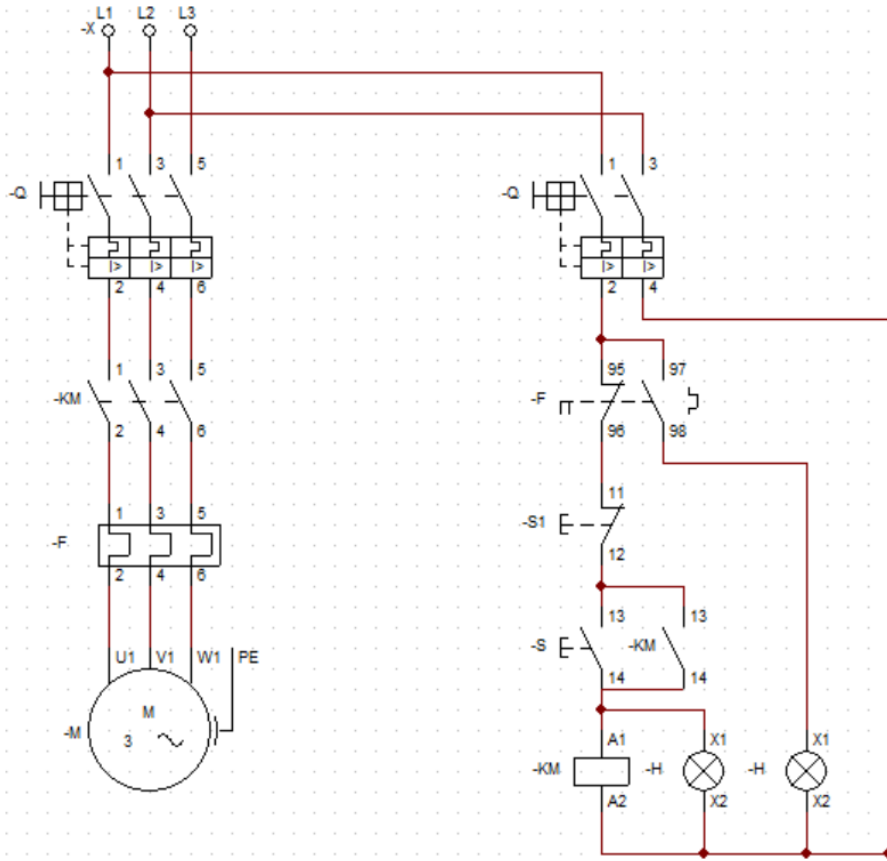


Figura 2.4 Diagrama del arranque directo. (fuente: autores).

El arranque directo precisa de una parte de control y otra parte de potencia para poder entregarle energía al motor, para el arranque del que dispone el banco en la parte de control se requieren de 2 accionamientos manuales, un disyuntor de 2 polos, un contacto NA y un contacto NC, luminarias si se quiere, y los contactos auxiliares de un contactor y un relé bimetálico, la parte de potencia se compone de un disyuntor de 3 polos, un contactor y un relé bimetálico.

- **Arranque directo con cambio de giro**

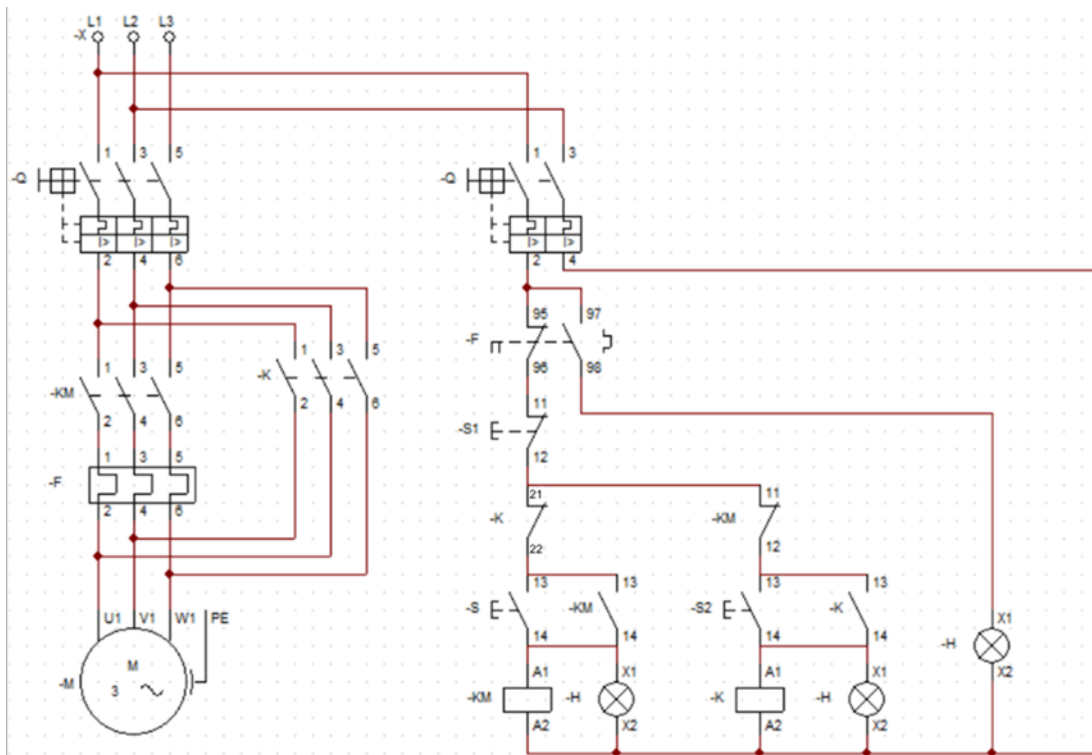


Figura 2.5 Diagrama del arranque directo. (Fuente: autores).

Este arrancador es igual al arranque directo solo que ahora se dispone de 2 contactores donde en el contactor inmerso está agregado el cambio de secuencia de fase para poder invertir tal giro, por todo lo demás se comporta como un arranque directo.

- **Arranque por variador de frecuencia**

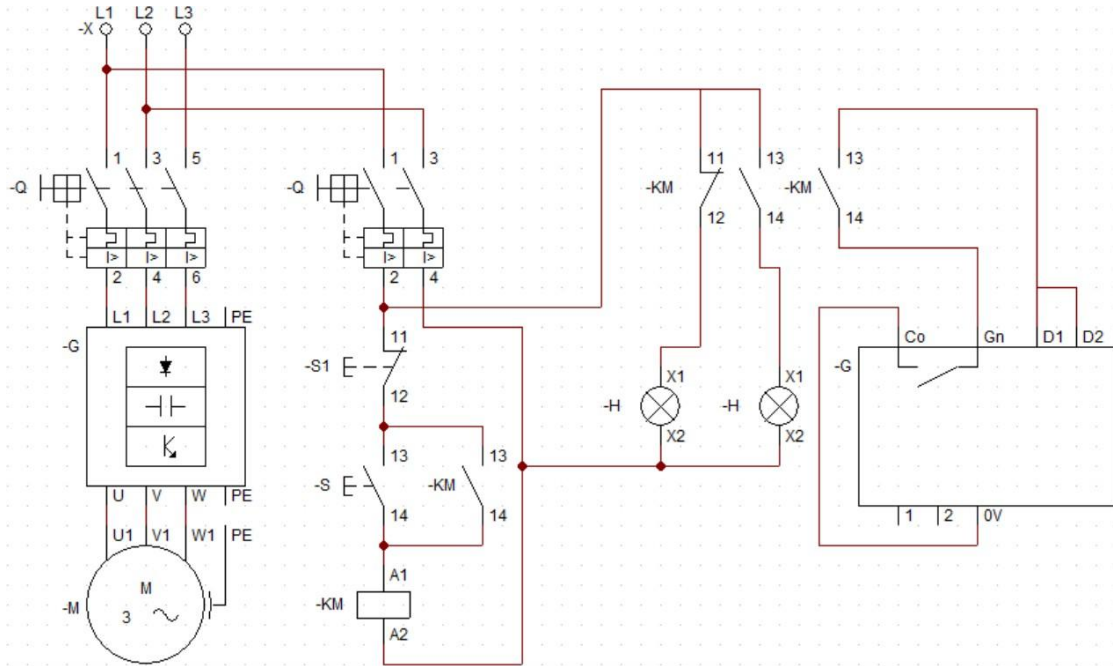


Figura 2.6. Diagrama del arranque por variador de frecuencia. (Fuente: autores).

El arranque por variador de frecuencia en su parte de control necesita un relé, un contacto NA y un NC, un disyuntor de 2 polos y luminarias si se requiere, en su parte de fuerza un disyuntor de 3 polos y el variador de frecuencia.

A continuación, se enlista los dispositivos que se necesitan para cada arrancador.

Tipo de arranque	Circuito de potencia	Circuito de control
Arranque directo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disyuntor de 3 polos 2. Contactor 3. Relé bimetalico 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contactor NA 2. Contacto NC 3. Luminarias 4. Disyuntor de 2 polos
Arranque directo con cambio de giro	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disyuntor de 3 polos 2. Contactor 3. Relé bimetalico 4. Contactor extra para 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 2 contactores NA 2. 2 contactores NC 3. Luminarias 4. Disyuntor de 2 polos
Arranque con variador de frecuencia	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disyuntor de 3 polos 2. Variador de frecuencia 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1 contactor NA 2. 2. Contactores NC 1. 1 relé de control 2. Luminarias 3. 1 disyuntor de 2 polos

Tabla 6. Dispositivos usados para cada arrancador. (Fuente: autores)

2.2.2. Selección del cable conductor

Los cables conductores que alimentan los dispositivos del banco se seleccionarán según nuestra aplicación de servicio de corto tiempo con un aproximado de 15 minutos de funcionamiento (National Fire Protection Association (NFPA), 2008).

Clasificación Del Servicio	Porcentajes del valor nominal de corriente de las placas de características			
	Motor Especificado para	Motor Especificado para	Motor Especificado para	Motor Especificado para
	5 minutos	15 minutos	30 y 60 minutos	continuo
Servicio de corto tiempo: Accionamiento de válvulas, elevación o descenso de rodillos, etc.	110	120	150	-
Elevadores y montacargas, máquinas de herramientas, bombas, puentes, elevadizos, plataformas giratorias, etc. (para soldadoras de arco, ver 630- 11)	85	85	90	140
Servicio periódico: Rodillos, máquinas de manipulación de minerales y carbón, etc.	85	90	95	140
Servicio variable	110	120	150	200

Tabla 7. Servicio por régimen de tiempo. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008)

La ampacidad que deben resistir los cables para nuestro motor de 4.2 A de corriente nominal es

$$\text{Ampacidad} = 120\% \times 4.2$$

$$\text{Ampacidad} = 5.04 \text{ A}$$

De acuerdo con la NEC 2008, para aplicaciones menores a 100 amperes, se debe usar la columna de 60°C de la siguiente tabla para no más de 3 conductores portadores de corriente en una canalización, cable o directamente enterrados, basados en una temperatura ambiente de 30°C (National Fire Protection Association (NFPA), 2008). Por lo que se decide trabajar con cable calibre 14 para todos los conductores del circuito.

Temperatura Nominal del Conductor (Ver Tabla 310.104 (A).)							
	60 °C (140 ° F)	75 °C (167 ° F)	90 °C (194 ° F)	60 °C (140 ° F)	75 °C (167 ° F)	90 °C (194 ° F)	
	Tipos TW, UF	Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Tipos TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW- 2	Tipos TW, UF	Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Tipos TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW- 2	
Calibre AWG o kcmil	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			Calibre AWG o kcmil
18**	-	-	14	-	-	-	-
16**	-	-	18	-	-	-	-
14**	15	20	25	-	-	-	-
12**	20	25	30	15	20	25	12*
10**	30	35	40	25	30	35	10**
8	40	50	55	35	40	45	8
6	55	65	75	40	50	55	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	115	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	145	85	100	115	1

Tabla 8. Ampacidades permisibles en conductores aislador para tensiones nominales de hasta e incluyendo 2000 V. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008).

2.2.3. Selección de equipos auxiliares de protección

Los puntos normativos que considerar en el caso de la selección de protecciones de motores, se encuentran en el artículo 430 de la NEC 2008 (referencia), en donde se indica que como mínimo se deben tener protecciones contra cortocircuito, falla a tierra y para sobrecarga, las cuales tienen funciones diferentes al momento de una posible falla.

Dispositivo de protección contra sobrecarga: La norma NEC (2008) (National Fire Protection Association (NFPA), 2008) menciona que un dispositivo separado de protección contra sobrecarga que sea sensible a la corriente del motor se debe seleccionar para que se dispare o debe tener valor nominal no mayor al siguiente porcentaje del valor nominal de corriente de plena carga de la placa de características del motor:

Motores con un factor de servicio marcado de 1.15 o más: 125%

Motores con un aumento de temperatura marcado de 40°C o menos: 125%

Todos los demás motores 115%

En nuestro caso no tenemos un factor de servicio tan marcado, y con una corriente nominal de 3.6 A, el dispositivo de protección contra sobrecarga se tomará de un 115% de su valor de corriente nominal, es decir una corriente de:

$$I_{sobrecarga} = 3.6 (1.15)$$

$$I_{sobrecarga} = 4.14 A$$

En el mercado el valor más cercano de un relé térmico es de 6 A por lo que se pondrá uno marca CHINT modelo NR2-25.

Tipo de motor	En porcentaje de la corriente de plena carga			
	Fusible sin retardo de tiempo	Fusible de elemento dual (de acción retardada)	Interruptor automático de disparo instantáneo	Interruptor automático de tiempo inverso
Motores monofásicos	300	175	800	250
Motores polifásicos de c.a. distintos a los de rotor devanado	300	175	800	250
De jaula de ardilla - diferentes de los de diseño B energéticamente eficientes	300	175	800	250
De diseño B energéticamente eficientes	300	175	1100	250
Sincrónicos	300	175	800	250
Con rotor devanado	150	150	800	150
De corriente continua (tensión constante)	150	150	250	150

Tabla 9. Valor nominal o ajuste máximos de los dispositivos de protección contra cortocircuito y falla a tierra para motores. (National Fire Protection Association (NFPA), 2008)

Dispositivo de protección contra cortocircuito y fallas a tierra: Se seleccionará este dispositivo en base a la norma NEC (2008) (National Fire Protection Association (NFPA), 2008). Se consultará la tabla 46 de acuerdo con el tipo de motor y al tipo de protección a utilizar, para nuestro caso, no se hace la selección de un fusible debido a que se requiere una protección que perdure, se selecciona un interruptor automático de disparo instantáneo por su precio más económico.

El tipo de motor es de jaula de ardilla, diferente de los de diseño tipo B energéticamente eficiente y guiándonos de la corriente a plena carga que se obtiene de la placa de datos del motor (3.6 A), se calcula la corriente nominal del dispositivo de protección contra cortocircuito y falla a tierra.

$$I_{interruptor} = 3.6(8)$$

$$I_{\text{interruptor}} = 28.8 \text{ A}$$

Se escoge un interruptor automático marca CHINT serie NXB-63 que abarca la corriente nominal valores de 10 a 63 A.

2.2.4. Selección del variador de frecuencia.

Para el motor de inducción trifásico de 746 W utilizado en el banco didáctico se seleccionó un variador de frecuencia **WEG modelo CFW500**. Este variador, diseñado para trabajar con un voltaje de alimentación de **220 V**, ofrece compatibilidad plena con las características eléctricas del motor y garantiza un control adecuado de la velocidad y el par en diferentes esquemas de arranque. Además, incorpora protecciones integradas contra sobrecarga, cortocircuito y sobrecalentamiento, lo que asegura tanto la seguridad del motor como la de los estudiantes durante las prácticas. Su interfaz de programación sencilla y sus opciones de comunicación lo convierten en una herramienta pedagógica idónea, ya que facilita la configuración de parámetros y permite explorar distintos modos de control, como el escalar V/f y el vectorial. En conjunto, estas características hacen del CFW500 una solución óptima para el proyecto, al integrar funcionalidad, seguridad y facilidad de uso en un equipo compacto que fortalece el proceso de enseñanza-aprendizaje.

2.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE FRENADO

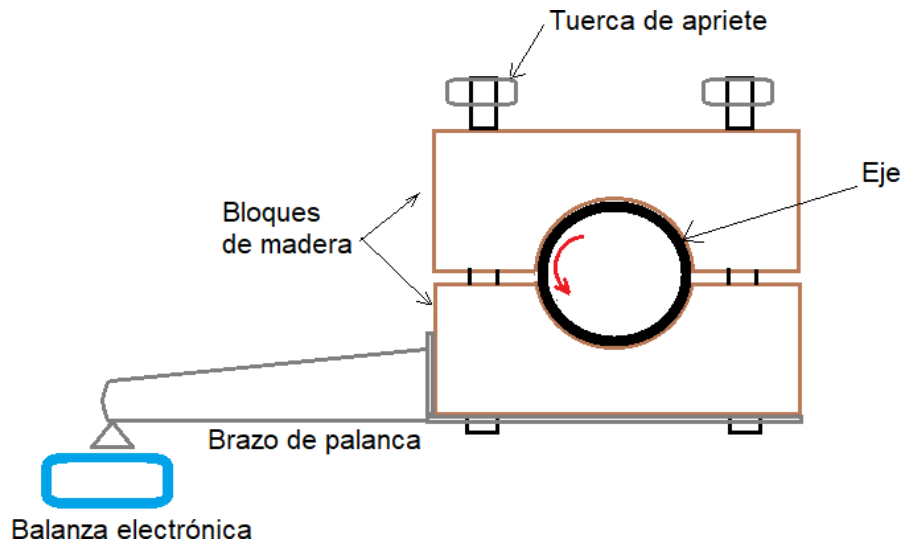


Figura 2.7. Esquema del freno prony. (fuente: autores).

Para la evaluación del rendimiento del motor eléctrico, se implementó un sistema de frenado por zapata y tambor que permite medir el torque y las revoluciones por minuto (RPM). Con estos datos, es posible obtener las curvas características del motor, tales como la curva de torque, la curva de potencia y la curva de eficiencia.

2.3.1. Componentes del sistema de frenado

- Tambor de Freno

Se fabricó en acero según las dimensiones establecidas en plano C1.1. Está acoplado directamente al eje del motor, garantizando una transmisión de fuerza eficiente. Su función es proporcionar una superficie de fricción sobre la cual actúa la zapata de madera.

Zapata de Madera

Fabricada en madera de alta resistencia al desgaste, según plano C1.2.

Su función es generar fricción contra el tambor para ejercer resistencia sobre el motor. Se diseñó para maximizar la disipación de calor y evitar deformaciones durante el frenado.

Brazo de Palanca y Sistema de medición

El brazo de palanca fue construido en platina de acero según el diseño del plano C1.3. Se acopla a la zapata de freno y permite aplicar fuerza mecánica para regular la presión sobre el tambor. La fuerza aplicada la generaran los pernos puestos en las zapatas de madera (figura 2.7). La distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje del tambor permite el cálculo del torque.

Para la medición del torque, se utiliza la ecuación:

$$T = F \times d$$

Donde:

T es el torque en Newton-metro (Nm).

F es la fuerza aplicada por los pesos calibrados (N) (masa por gravedad).

d es la distancia desde el eje del tambor hasta el punto de aplicación de la fuerza (m). se diseñó con una distancia de 330.2 mm (13 pulgadas).

Para la medición de las RPM, se utilizó un tacómetro digital.

A partir de las mediciones de torque y RPM en diferentes condiciones de carga, se construirán las curvas características del motor:

- Curva Torque vs. RPM: Muestra la variación del torque con la velocidad del motor.
- Curva Potencia vs. RPM: Se obtiene mediante la ecuación $P = T \times \omega$ donde ω es la velocidad angular en radianes por segundo.
- Curva de Eficiencia: Se obtiene comparando la potencia de entrada con la potencia mecánica desarrollada.

2.3.2. Distribución espacial de los componentes

El banco de motores eléctricos se construye utilizando placas de material ACM con dimensiones de 187.325 mm (7 3/8") de ancho por 273.05 mm (10 3/4") de alto. La estructura está dividida en 6 secciones principales, con una organización que permite un acceso eficiente a los componentes y facilita la ventilación y el cableado.

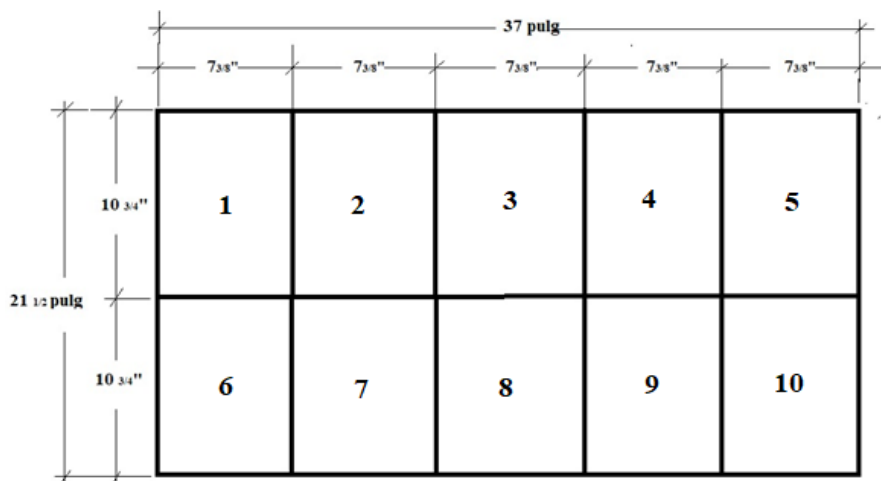


Figura 2.8. Distribución espacial de los componentes. (Fuente: autores).

La distribución en el tablero de medición y protección contará con los siguientes elementos:

1. **Interruptor Termomagnético de 3 polos:** Proporciona protección general contra sobrecargas y cortocircuitos para el circuito de potencia.

2. **Variador de Frecuencia:** Usado solo en el arrancador por variador permitiendo el control de velocidad del motor.
3. **Contactador con su Relé:** Protección del circuito de potencia. Actúan en la conmutación del motor y la protección térmica contra sobrecarga.
4. **Contactador extra para cambio de giro:**
Permite invertir la rotación del motor mediante un sistema de enclavamiento eléctrico.
5. **Interruptor Termomagnético de 2 Polos:** Protección adicional para circuitos secundarios de control.
6. **Relé Auxiliar:** actúa en la conmutación del circuito de control para el arranque con variador de frecuencia.
7. **Botonera de Control:** Permite la operación manual del sistema.
8. **Luminaria:** indicador visual del estado del sistema y la dirección de giro
9. **Analizador de red:** Permite monitorear la calidad de la energía, tensión y factor de potencia.
10. **Transformadores de corriente:** Disminuyen la corriente de alimentación del motor para su posterior medición con el medidor digital.
11. **Medidor digital:** Mide el consumo energético del sistema.

La disposición física de los componentes queda a criterio de los estudiantes, sin embargo, la enumeración asignada resulta fundamental para garantizar un adecuado orden y servir de referencia en el proceso de conexión de los bastidores

2.4. Estructura del banco

Para el diseño de la estructura del banco se consideran las dimensiones que tendrá cada uno de los módulos, para ello se debe tener en cuenta a la vez las medidas

de cada elemento que conformaran los diferentes módulos. Ya que el banco posee partes y dispositivos que pueden ser desmontados se contará con un espacio en el que se puedan almacenar dichos elementos, se debe de tener en consideración el tamaño de estos de manera que no lleguen a ser dañados o golpeados al momento de ser guardados.

Debido a que las cargas que soportará el banco con los bastidores no son considerables, no se hará un análisis de esfuerzo para la construcción de los soportes de los módulos y solo se seleccionara tubo estructural chapa 14 para la sujeción, realizando agujeros en los que se pondrán pernos ajustados con tuerca tipo mariposa que sujetarán los bastidores.

El banco se diseñará con las dimensiones reflejadas en el plano A.1. Se fabricará con tubo cuadrado de acero chapa 14 de 25.4 mm, asegurando rigidez y durabilidad.

La cubierta y compartimentos se realizarán con lámina lisa calibre 16 para proteger los componentes.

Se incorporará un compartimiento con llave en la base de la estructura, contará con una repisa para guardar los componentes cuando no se estén utilizando.

3. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

En esta parte se realiza una secuencia en la construcción del banco. Primero se efectuó la compra de los materiales que intervienen en la fabricación de la estructura para el banco de pruebas. Se construyó la estructura base del banco de pruebas, para luego empezar el trabajo de perforación de los diferentes bastidores para colocar los elementos eléctricos.

3.1. Proceso constructivo

El proceso constructivo se inició con la elaboración de los planos detallados de la estructura principal, sirviendo estos como la guía técnica para el ensamble de los bastidores. Considerando la naturaleza didáctica del equipo y las cargas operacionales ligeras, el diseño estructural se enfocó principalmente en la funcionalidad y la disposición cómoda de los bastidores, prescindiendo de cálculos estructurales complejos de capacidad de carga. La construcción se adaptó a las dimensiones modulares requeridas para alojar y facilitar la interconexión de los componentes eléctricos necesarios para cada arranque. Para optimizar la funcionalidad y el almacenamiento, se integró un compartimiento interno en la estructura principal y se incorporaron ruedas industriales (rodos), garantizando la movilidad y la gestión eficiente del espacio del laboratorio. Paralelamente se prepararon juegos de cables de conexión de longitud variable, para facilitar y agilizar el montaje de los distintos esquemas de control por parte de los estudiantes. Finalmente, se procedió con la fabricación del sistema de frenado (Freno de Prony), asegurando su adecuado acoplamiento y funcionalidad con el eje del motor.

3.1.1. Estructura Principal:

- Se fabricó con tubo cuadrado de acero chapa 14 de 25.4 mm, asegurando rigidez y durabilidad.

- La cubierta y compartimentos se realizaron con lámina lisa calibre 16 para proteger los componentes.
- Se incorporó un compartimiento con llave en la estructura para guardar los componentes cuando no se estén utilizando.
- En las patas del banco se instalaron rodos con freno, permitiendo facilidad de movilización y estabilidad en su ubicación final.
- La estructura principal se encomendó a construir según plano A.1, las posteriores modificaciones se hicieron por los miembros del equipo según las necesidades que iban surgiendo.

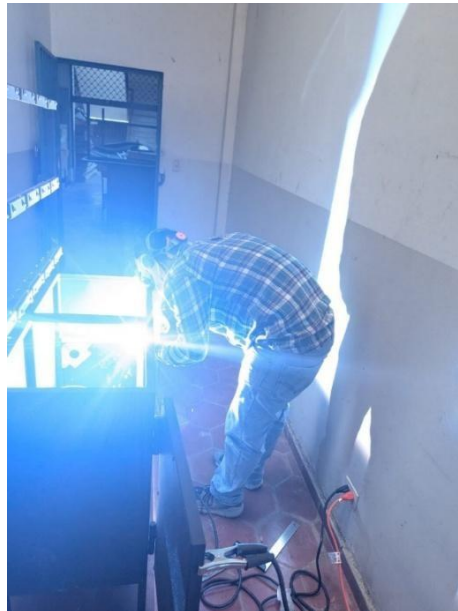


Figura 3.1 Construcción de repisa en la estructura principal. (Fuente: Autores).

3.1.2. Bastidores y Conexiones

- Los bastidores se construyeron por los miembros del equipo con láminas de ACM, asegurando un soporte liviano y resistente. Las láminas tienen su propio aislante para evitar descargas eléctricas
- Para la instalación de los bastidores, se diseñaron y fabricaron estructuras en 3D que permiten deslizar fácilmente los bastidores, asegurando su ajuste y alineación según plano E1 y D1
- Los bastidores se empernan al banco y se fijan con mariposas para facilitar su montaje y desmontaje.
- Se conectarán los dispositivos eléctricos en los bastidores con bornes tipo jack, y conexiones tipo banana conectados a cables de diferentes longitudes, adaptándose a los requerimientos específicos.
- Se encomendaron diferentes stickers identificando cada bastidor con su nombre, símbolo y enumeración de borneras.



Figura 3.2. Construcción de bastidores con lamina ACM. (Fuente: autores).

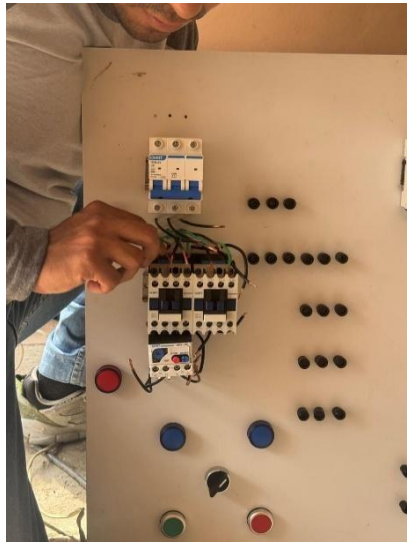


Figura 3.3. Cableado de bastidores. Diseño preliminar (fuente: autores)



Figura 3.4. Puesta de relé en el bastidor. Diseño final. (Fuente: autores)

3.1.3. Construcción del dinamómetro de freno

- Se fabricó un tambor de acero según las dimensiones establecidas en plano C1.1, encargado de generar la fricción necesaria para detener el motor. Como criterio de diseño se estimó pertinente realizarlo hueco para disminuir el peso y facilite la disipación de calor.
- Se encomendó a fabricar zapatas de madera con un carpintero, siguiendo las especificaciones del plano C1.2. Como criterio de diseño se tomaron las

dimensiones necesarias para que se le puedan atravesar pines a los lados de tal forma que se pueda sujetar en la base del motor para impedir que estas zapatas se suelten en pleno funcionamiento. También se reforzaron las zapatas con una platina en ambos lados.

- El brazo de palanca, que acciona el freno, fue construido con platina de acero, respetando el diseño indicado en plano C1.3. Como criterio de diseño se le añadió una palanca ajustable en la punta para facilitar el ajuste de la altura a la hora de tomar mediciones con la balanza.



Figura 3.5. Construcción palanca a las zapatas del freno. (Fuente: autores)



Figura 3.6. Construcción de tambor de freno. (Fuente: autores).

3.2. Costos del Proyecto

En esta sección se detalla el costo económico requerido para llevar a cabo la construcción del banco, para obtener una estimación total de todo el proyecto se consideran todos los materiales y diferentes elementos necesarios para la elaboración del proyecto.

La Tabla 9 proporciona el costo de los materiales requeridos para la construcción de la estructura del banco de pruebas.

Tabla 10. Costo de los materiales para la construcción de la estructura del banco. (Fuente: autores)

Descripción	Precio unitario (\$)	Cantidad (unidad)	Costo Total (\$)
Lamina lisa 1.19 mm (3/64")	21	2	42
Rodos	2.5	4	10
Cerradura gabinete	5.25	1	5.25
Bisagra pin aleta 12.7 mm 1/2"	1.5	2	3
Piezas de riel para bastidores 1	2	10	20
Piezas de riel para bastidores 2	3	5	15
Caja de electrodos	4.5	1	4.5
Disco de corte para metal	1.75	2	3.50
Disco de desbaste	2.35	1	2.35
Tubo estructural de 12.7 mm (1/2") chapa 14, 1/2"	19.25 (6 metros)	2	38.5
1/2 de litro de Pintura negra	6.72	2	13.44
1/4 de litro de pintura roja	6.72	1	6.72
750 ml de thinner	2.25	1	2.25
Lámina lisa acero inoxidable 4.7625 mm (3/16")	139	1	139
Láminas ACM (1.22x2.44 m)	93.34	2	186.68
Zapatas de madera	5	1	5
Balanza digital	19.85	1	19.85
Tambor de freno	65	1	65
Total (\$)			582.04

La Tabla 10 detalla los diferentes materiales, accesorios y dispositivos necesarios para la disposición de los diferentes módulos con los que cuenta el banco.

Tabla 11. Costo de Materiales para los Módulos. (Fuente: autores)

Descripción	Precio unitario (\$)	Cantidad (unidad)	Costo Total (\$)
Cable de control thhn 14 (m)	0.5	40	20.00
Conector tipo banana	0.45	75	33.75
Enchufe tipo Jack	0.33	75	24.75
Contactador 9A 3P 220V CHINT	12.3	2	24.60
Piloto Led Verde	2.3	2	4.60
Piloto Led Rojo	2.3	2	4.60
Piloto Led Azul	2.25	2	4.50
Disyuntor 3P 6A CHINT	10	2	20.00
Disyuntor 2p 6A CHINT	6.55	2	13.10
Pulsador rojo	5.5	1	5.50
Pulsador verde	5.5	1	5.50
Relé bimetálico 4-6A CHINT	13	1	13.00
Riel din perforado (1m)	3	3	9.00
Analizador Klemsan	288.15	1	288.15
Analizador Circuitor	241.33	1	241.33
Variador de velocidad 1hp 240V WEG	280	1	280.00
Motor 746 W 240V 3450 rpm	130	1	130.00
Conector Trifásico Macho	10	1	10.00
Stickers	20	1	20.00
Total:			1152.38

Por último, en la Tabla 13 se presenta un resumen de los costos totales para la fabricación del Banco de Pruebas. Este resumen incluye los costos asociados a la adquisición de materiales, accesorios y dispositivos, así como también la mano de obra requerida para la elaboración del banco.

Tabla 12. Resumen de los costos de fabricación del banco de pruebas. (Fuente: autores)

Costo mano de obra estructura principal del banco (\$)	24
Costo mano de obra construcción zapatas de madera (\$)	10
Costo mano de obra construcción tambor de acero (\$)	35
Costo mano de obra construcción bastidores (\$)	100
Costo materiales estructura (\$)	582.04
Costo materiales bastidores (\$)	1152.38
Total (\$)	1883.42

3.3. Pruebas de Funcionamiento y análisis de resultados

A continuación, se presentan las pruebas realizadas a un motor trifásico de 746 W a 3450 rpm para caracterizar su comportamiento eléctrico y mecánico, y obtener parámetros del circuito equivalente y curvas de desempeño.

Lectura de parámetros

Se realizaron las lecturas de los parámetros de tensión, corriente, potencia y eficiencia del motor trabajando a plena carga con el analizador de red y simulando la plena carga con el freno de Prony, se aplicará un valor de par hasta que el analizador de red marque alrededor los 3.1 A de corriente que debe consumir a plena carga. Los valores fueron de 3457.5 rpm medido con el tacómetro y de 693.5 W (0.93 hp) calculado con la balanza digital y el brazo de palanca. El valor de potencia es consistente con el valor de placa del motor que es de 746 W (1 hp).

3.3.2. Prueba de corriente directa

La prueba de Resistencia en Corriente Directa (CD) es el punto de partida para modelar el motor. Su objetivo es medir la resistencia pura del cobre sin que la reactancia interfiera, ya que en CD la frecuencia es cero y las bobinas se comportan como simples cables.

Para hacer una medición precisa no basta con un multímetro común de mano, ya que las resistencias son muy bajas, a veces menores a 1 ohm. Lo ideal es una fuente de CD variable que permita subir el voltaje poco a poco.

El motor debe estar detenido y desconectado de la red de CA. Se aplica el voltaje de CD a dos de las tres terminales del estator. Se ajusta la fuente para que circule una corriente cercana a la corriente nominal del motor y se registra el Voltaje y la Corriente.

- Resistencia entre terminales

$$R_{medida} = \frac{V_{CD}}{I_{CD}}$$

- Resistencia para motor en estrella:

$$R_1 = \frac{R_{medida}}{2}$$

La corriente pasa por dos bobinas en serie para ir de la terminal A a la B.

- Resistencia para motor en delta:

$$R_1 = \frac{3R_{medida}}{2}$$

La corriente tiene dos caminos: una bobina sola en paralelo con otras dos bobinas en serie.

3.3.3. Prueba en vacío

El objetivo es obtener los valores de pérdidas en el hierro y pérdidas mecánicas totales, y la corriente magnetizante. Para ello se dejará funcionando el motor sin carga a voltaje nominal.

Mediciones:

- Tensión V_L
- Corriente total I_0
- Potencia activa P_0

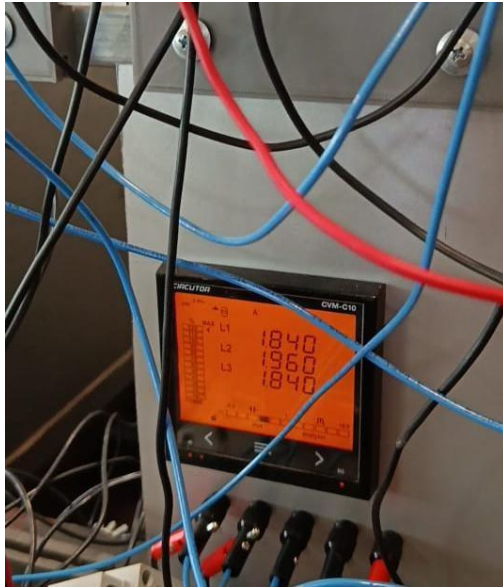


Figura 3.7. Lectura de corriente de prueba en vacío. (fuente: autores)



Figura 3.8. Lectura de voltaje de línea en vacío. (fuente: autores).

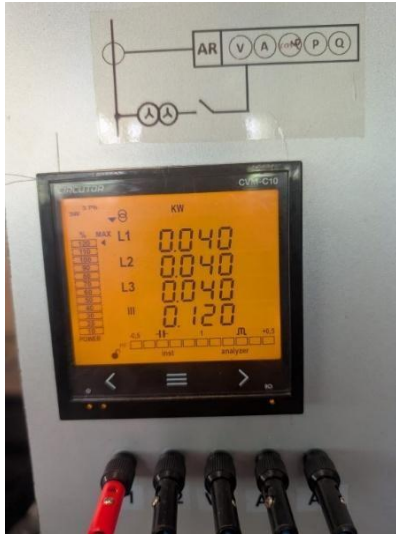


Figura 3.9. Lectura de potencia de línea en vacío en kW. (Fuente: autores).

Cálculos:

- Factor de potencia:

$$f_{p0} = \frac{P_0}{\sqrt{3} * V_L * I_0}$$

$$f_{p0} = \frac{40}{\sqrt{3} * 220 * 1.8}$$

$$f_{p0} = 0.058$$

El motor en vacío tendría un **factor de potencia ≈ 0.06 (6%)**, extremadamente bajo, lo que concuerda con el comportamiento esperado: mucha corriente magnetizante y poca potencia activa consumida.

- Corriente activa (I_w):

$$I_w = i_0 * f_{p0}$$

$$I_w = 1.8 * 0.06$$

$$I_w = 0.1 A$$

Esto confirma que casi toda la corriente en vacío es **reactiva (magnetizante)** y solo una fracción muy pequeña corresponde a pérdidas reales en el hierro, cobre y mecánicas.

- Corriente magnetizante (I_m):

$$I_m = \sqrt{i_0^2 - I_w^2}$$

$$I_m = \sqrt{1.8^2 - 0.1^2}$$

$$I_m = 1.8 \text{ A}$$

Esto significa que casi toda la corriente en vacío ($\approx 99\%$) es magnetizante, mientras que la activa es mínima ($\approx 0.1 \text{ A}$)

Para separar pérdidas en el hierro y pérdidas mecánicas se debe repetir la prueba con distintos voltajes y graficar P_0 vs V^2

- Impedancia de vacío (Z_0):

$$Z_{eq} = \frac{V_0}{\sqrt{3}i_0}$$

$$Z_{eq} = \frac{220}{\sqrt{3} * 1.8}$$

$$Z_{eq} = 70.56 \Omega$$

Como la resistencia tiene al infinito al estar con deslizamiento cero, la impedancia es equivalente a la reactancia X_m en el circuito equivalente.

3.3.4. Prueba de Carga con Freno de Prony

Objetivo: Obtener curvas características de torque, potencia, consumo de corriente y eficiencia del motor.

Instrumentos:

- Freno de prony
- tacómetro digital

Mediciones:

- Corriente por fase (I)
- Voltaje entre líneas (V_L)
- Potencia activa (P_0) (medida con Analizador de redes)
- Velocidad N (rpm)
- Fuerza de frenado (F)
- Brazo de palanca (L)

Se aplicará diferentes valores de presión al freno para variar el torque y se realizará la medición correspondiente con el tacómetro digital. Los valores de par se graficarán en el eje de las ordenadas y los valores de velocidad en el eje de las abscisas.

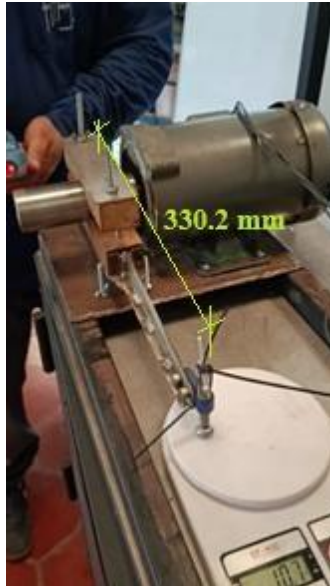


Figura 3.10. Mediciones de fuerza y rpm para la construcción de curva par-velocidad con la cota del brazo de palanca. (Fuente: autores)

Las mediciones en la balanza pueden estar en libras u onzas. Para la prueba fueron medidas en onzas, convertidos en libra masa y luego en libra fuerza multiplicándolo con la gravedad. El brazo de palanca es de 330.2 mm o 1.08 pies tomado desde el centro del eje. La potencia del motor de 746 W es equivalente a 1 hp (550 lbf-pie/s) con velocidad nominal de 3450 rpm.

cálculos:

- Fuerza:

$$F = m * g \quad (\text{Newton})$$

donde:

m = masa leida por la balanza convertido a kg

$$g = \text{gravedad} \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

- Torque:

$$T = F * r \quad (N - m)$$

donde:

$$r = \text{brazo de palanca (0.3302 m)}$$

- Potencia mecánica (sistema internacional):

$$P_m = \frac{T (N - m) * RPM}{9550} \quad (kW)$$

- Eficiencia

$$\eta = \frac{P_m}{P_0} * 100$$

Donde:

$P_m = \text{potencia mecánica calculada con valores experimentales}$

$P_0 = \text{potencia leída con el analizador de redes}$

Velocidad síncrona (2 polos):

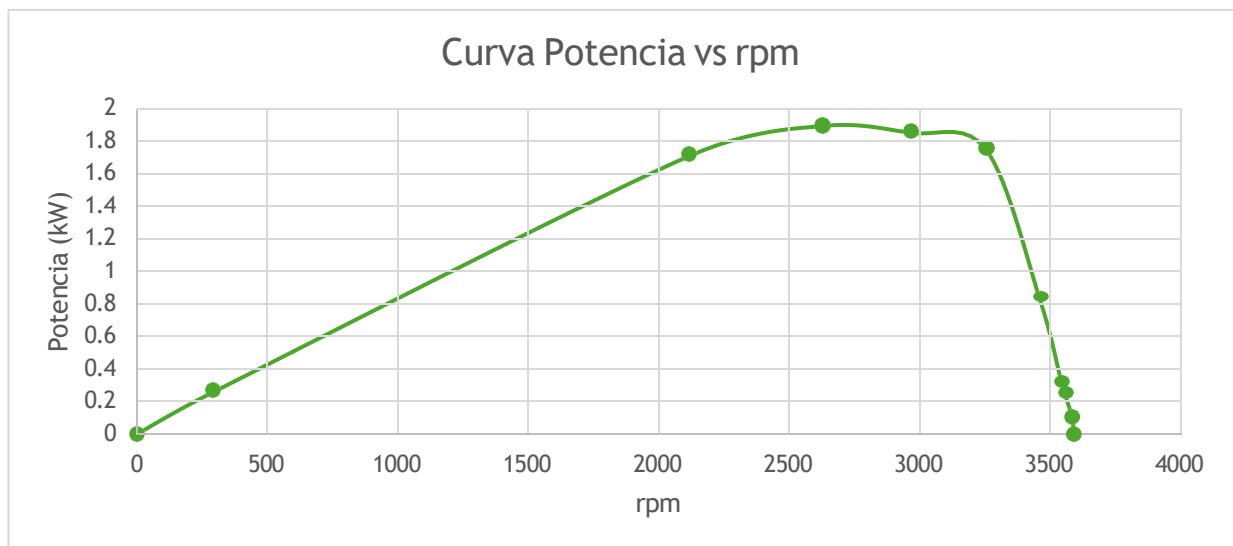
$$N_s = \frac{120f}{P}$$

$$N_s = \frac{120(60 \text{ hz})}{2}$$

$$N_s = 3600 \text{ rpm}$$

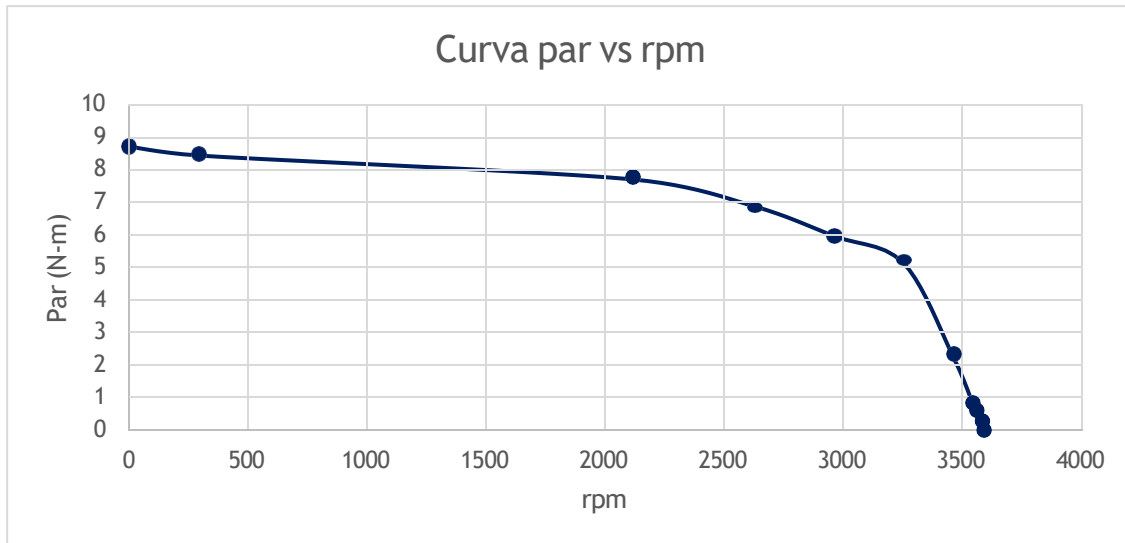
Tabla 13. Resultados prueba de carga con freno de Prony. (Fuente: autores)

RPM	masa (kg)	Fuerza (N)	Potencia P_0 (kW)	Corriente (A)	Par (N-m)	Potencia P_m (kW)	eficiencia (%)
3592	0	0	0.04	1.8	0.00	0.00	0
3585	0.085	0.833	0.48	1.8	0.28	0.10	21.3
3561.5	0.1871	1.835	0.45	1.8	0.61	0.23	49.7
3545.8	0.2551	2.503	0.49	2.4	0.83	0.31	62.4
3462.9	0.700	6.867	1.22	3.5	2.27	0.82	66.9
3254.1	1.5876	15.574	2.43	4.3	5.14	1.75	71.8
2864.3	1.8427	18.077	2.36	6.6	5.97	1.85	75.5
2626.2	2.1262	20.858	2.45	8.8	6.89	1.89	76.9
2114.6	2.3814	23.362	2.37	13.6	7.71	1.71	71.8
290.4	2.6082	25.586	2.13	17.4	8.45	0.26	12.02
0	2.93	26.418	1.50	18.1	8.72	0.00	0



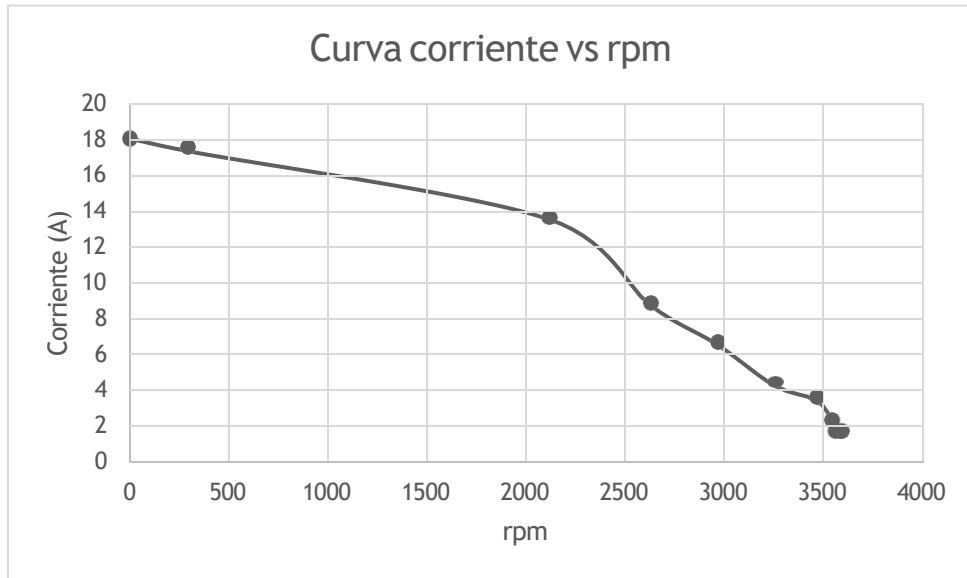
Gráfica 1. Curva de potencia vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores).

La potencia aumenta a medida que crece la velocidad desde el arranque, alcanza un máximo cerca de la velocidad de operación nominal, y luego cae bruscamente cuando se aproxima a la velocidad síncrona.



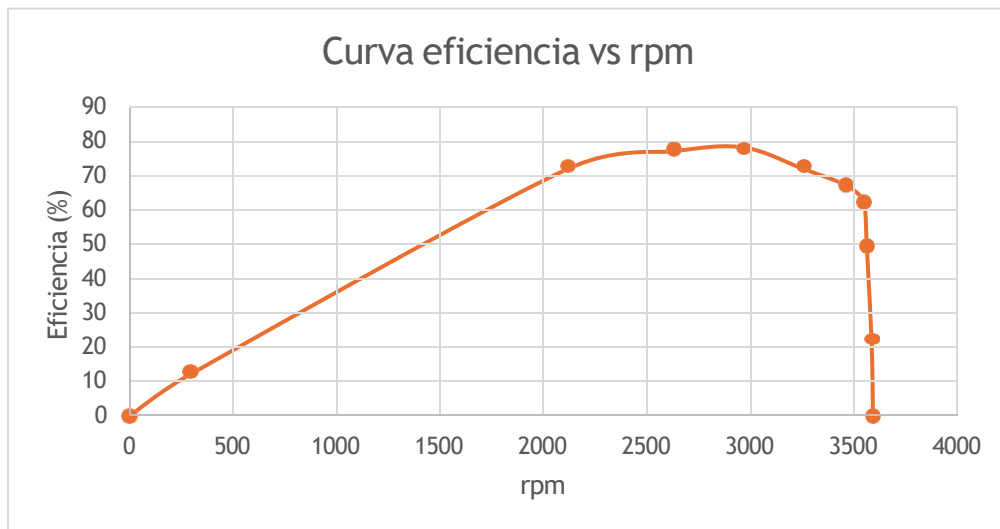
Gráfica 2. Curva de par vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores).

Podemos extraer el par nominal a 3450 rpm que es aproximadamente de $2.06 \text{ N} - \text{m}$ la curva revela un diseño de alto par de arranque (específicamente par de bloqueo) que supera en más de 4 veces al par nominal calculado. La caída abrupta hacia la velocidad de vacío (3600 rpm) confirma que el motor está operando con un **bajo deslizamiento**, típico de motores de inducción de 2 polos de alta eficiencia. El motor entrega su potencia máxima justo antes de esta caída del par (gráfica 1), situando su zona de trabajo más eficiente en un margen de velocidad muy estrecho, donde cualquier carga excesiva que reduzca las revoluciones por debajo de 3400 rpm disparará el par disponible, intentando compensar la carga a costa de un aumento significativo en el consumo de corriente (gráfica 3).



Gráfica 3. Curva de corriente vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores).

La curva corriente vs rpm muestra como varia la corriente de línea con la carga a distintos rpm. La corriente nominal a una velocidad de 3450 rpm es de aproximadamente 2.7 A. Se observa como la corriente llega a valores de 18 A en condiciones de rotor bloqueado. Corrientes peligrosas que pueden llegar a fundir el motor.



Gráfica 4. Curva de eficiencia vs rpm para un motor de 746 W. (Fuente: autores).

La curva de rendimiento vs rpm parte con rendimiento muy bajo a bajas velocidades (arranque). A medida que la velocidad sube, el rendimiento aumenta rápidamente hasta alcanzar un máximo de 76.9%. Después del máximo, el rendimiento se mantiene en una meseta alta (zona de operación eficiente) y cae bruscamente al aproximarse a la velocidad síncrona porque el par útil tiende a disminuir.

3.3.5. Prueba de rotor bloqueado

El objetivo es obtener los parámetros de impedancia total del estator y rotor referidos al estator. Para ello las condiciones de la prueba el rotor debe estar bloqueado. Para el bloqueo del motor se usará el freno de Prony. Se recomienda reducir el voltaje aplicado (10-20% del nominal) con un transformador de corriente para evitar daños

Mediciones:

- Voltaje aplicado V_b (220 V)
- Corriente por fase I_b (18.1 A)
- Potencia activa P_b



Figura 3.11. Mediciones de potencia por fase en rotor bloqueado en kW. (Fuente: autores)

Cálculos:

- Impedancia total del motor:

$$Z_{eq} = \frac{V_b}{\sqrt{3}I_b}$$

$$Z_{eq} = \frac{220}{\sqrt{3}(18.1)}$$

$$Z_{eq} = 7.01 \Omega$$

- Resistencia total por fase:

$$R_{eq} = \frac{P_b}{3I_b^2}$$

$$R_{eq} = \frac{1500}{3(18.1)^2}$$

$$R_{eq} = 1.52 \Omega$$

R_{eq} representa la resistencia total por fase vista desde el estator cuando el rotor está bloqueado.

- Reactancia total:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

$$X_{eq} = \sqrt{(7.01)^2 - (1.52)^2}$$

$$X_{eq} = 6.9 \Omega$$

X_{eq} representa la reactancia total de dispersión por fase. Se puede observar X_{eq} domina frente a R_{eq} (6.9 Ω frente a 1.52 Ω), lo que indica comportamiento fuertemente inductivo en cortocircuito.

- Factor de potencia:

$$\cos\theta = \frac{P_b}{V_b I_b}$$

$$\cos\theta = \frac{1500}{(220)(18.1)}$$

$$\cos\theta = 0.377$$

El factor de potencia de 0.377 (ángulo $\approx 67.9^\circ$) es típico en rotor bloqueado: la corriente está mayormente desfasada (reactiva) y con una componente resistiva suficiente para disipar los 1500 W por fase (pérdidas resistivas).

Las pérdidas por efecto Joule durante la prueba están dadas por $P_b = I_b^2 R_{eq}$ y la pérdida total en las tres fases sería aproximadamente $3 \times 1500 = 4500$ W. Por eso la prueba debe hacerse con cortos intervalos para evitar sobrecalentamiento.

3.3.6. Prueba de aislamiento

El objetivo es medir la resistencia óhmica del estator (R_1). Se medirá la resistencia en cada fase con un óhmetro

Condiciones:

- Motor desconectado de la red.
- Se aplica voltaje DC entre dos terminales con un megóhmetro

Mediciones:

- Resistencia entre fase del motor



Figura 3.12. Resistencia de fase 2 prueba de CD. Valores en Megaohmios. (Fuente: autores)



Figura 3.14. Resistencia de fase 1 prueba de CD. Valores en Megaohmios. (Fuente: autores)



Figura 3.13. Resistencia de fase 2 prueba de CD. Valores en Megaohmios. (Fuente: autores).

Los valores leídos por cada fase del óhmetro están entre los rangos de 268 – 322 $M\Omega$. Valores mayores a 1 $M\Omega$ ya suelen considerarse aceptables. Valores mayores a 100 $M\Omega$ son indicio de aislamiento muy bueno

Los valores de resistencia van subiendo con el tiempo. Esto es comportamiento típico de los materiales aislantes (efecto de absorción/polarización): al aplicar tensión, la corriente de fuga inicial por superficies y capas superficiales cae y la resistencia aparente sube conforme desaparecen los caminos conductivos superficiales.

3.4. GUÍAS DE LABORATORIO

PRÁCTICA 1. IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL BANCO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRÁCTICA 1. IDENTIFICACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL BANCO DE ARRANCADORES DE MOTORES ELÉCTRICOS.

Objetivo general: Identificar, definir el uso y comprobar el funcionamiento de los elementos y equipos correspondientes al banco de arrancadores de motores eléctricos.

Objetivos específicos:

- Identificar los equipos eléctricos que posee el banco de pruebas.
- Identificar los elementos y el funcionamiento del freno mecánico de Prony
- Definir el funcionamiento de los equipos identificados
- Establecer el procedimiento de trabajo y manipulación segura de los equipos eléctricos

Preparación y verificación antes de la práctica

- Verificar de forma visual que los elementos se encuentren en buen estado y no hay cables desconectados antes de realizar cualquier operación con el banco de pruebas

- Tomar las medidas de seguridad necesarias para evitar contactos con equipos o elementos energizados al momento de realizar las prácticas en el banco de pruebas
- Estudiar las funciones de cada elemento del banco de pruebas para conocer sus características y formas de conexión.
- Tomar en cuenta las recomendaciones del docente encargado antes de utilizar el banco de pruebas.

Recursos a utilizar:

- Banco de pruebas de motores eléctricos
- Equipo de medición tester
- Formato para registro de valores experimentales y resultados.
- Motor eléctrico trifásico de 746 W, 1hp con freno mecánico Prony.
- Cable de extensión para alimentación trifásica del banco de pruebas
- Cables con terminales de conexión rápida para el desarrollo de las distintas prácticas

CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL BANCO DE ARRANQUE DE MOTORES Y RECOMENDACIONES DE USO

Definiciones

- Disyuntor o interruptor automático: Un disyuntor es un dispositivo capaz de proteger frente a cortocircuitos y/o sobrecargas; los disyuntores magnéticos presentes en el banco protegen al motor frente a cortocircuitos.
- Contactor: El contactor utilizado en sistemas de automatización, se basa en el cierre de contactos por medio de la fuerza magnética de un electroimán, al aplicar corriente a la bobina, el núcleo se magnetiza y se convierte en imán que atrae una

parte móvil del núcleo (armadura) que puede accionar un contacto o varios. Sirve para conectar y desconectar circuitos eléctricos de alta potencia de forma remota y segura.

- Relé térmico o bimetálico: los relés térmicos cumplen la misión de proteger los motores y transformadores contra calentamientos excesivos debido a intensidades superiores a la de su servicio.
- Pulsadores de paro y marcha: Elemento con varios contactos (NA o NC) según su tipo su función es invertir el estado inicial de los mismos.
- Luces de señalización: Permiten conocer si un determinado elemento o circuito esta activado
- Transformadores de corriente: Los transformadores de corriente cambian el valor de la corriente de uno elevado a otro con el cual se pueden alimentar instrumentos de medición, control o protección.
- Medidor multifuncional: es un dispositivo electrónico que mide varios parámetros eléctricos, como voltaje, corriente, potencia, energía, frecuencia, factor de potencia, etc., en una instalación eléctrica en tiempo real.
- Variador de frecuencia: Un variador de frecuencia es un dispositivo de electrónica de potencia, que es capaz de modificar la frecuencia en hercios de la alimentación de un motor. Trabajan entre una frecuencia mínima y una máxima, pudiéndose regular en todo el rango con suma facilidad.

Descripción y recomendaciones de los elementos del banco de pruebas

Alimentación trifásica del banco:

El banco toma la energía mediante una extensión con enchufes tipo clavija de 16 A para dar una alimentación fija de 220V a todos los componentes del banco de pruebas.

Las recomendaciones de seguridad que se deben tener en cuenta antes de energizar el banco de pruebas son:

a) Para realizar la conexión de energía al tomacorriente trifásico tipo clavija del laboratorio, lo primero que se debe verificar es que el breaker del panel principal del laboratorio que alimenta el tomacorriente el cual se debe conectar este en OFF, luego se realiza la conexión con el cable de extensión que tiene los enchufes tipo clavija, tanto en el tomacorriente del lado del panel del laboratorio como en el lado de los disyuntores trifásicos del banco. Con esto se evita tener algún contacto directo o indirecto con terminales energizados mientras se realiza la conexión. Verificar que los disyuntores principales que alimentan el banco de pruebas están en posición OFF antes de energizar.

b) Verificar de forma visual que no existan conductores desconectados en la parte posterior de cada uno de los bastidores en donde se encuentra cada componente.

c) Si al conectar la alimentación al banco de pruebas, se acciona la protección del disyuntor, colocar en posición OFF el disyuntor y revisar si existe alguna falla en el cable de extensión, tomacorrientes o en la entrada de alimentación del banco.

d) No operar ni conectar ningún equipo eléctrico con manos sucias o mojadas.

e) Evitar el contacto con terminales expuestos en la parte posterior del banco de pruebas cuando este energizado.

El banco de pruebas para motores eléctricos trifásicos fue diseñado con fines didácticos, permitiendo al estudiante interactuar con un sistema real y seguro para la realización de pruebas como la de rotor bloqueado, prueba en vacío y la obtención de la curva par-velocidad. El sistema incorpora una serie de dispositivos eléctricos que cumplen funciones tanto de protección como de control y medición.

Como protección principal del sistema trifásico se incluye un disyuntor CHINT NXB-63 de 6 A, el cual interrumpe el paso de corriente en caso de sobrecarga o cortocircuito, evitando daños al motor y a los usuarios. Además, se emplea un disyuntor bipolar del mismo tipo y calibre (CHINT NXB-63 de 6 A) para proteger circuitos auxiliares, como el de control o alimentación de dispositivos adicionales, actuando también como interruptor de seccionamiento para mayor seguridad.

El control del motor se realiza mediante un contactor CHINT NC1-0910 de 6 A con tres polos principales y un contacto auxiliar. Este componente permite conmutar la alimentación del motor desde el circuito de mando. Acoplado a este se encuentra un relé de sobrecarga CHINT NR2-25, que protege térmicamente al motor ante situaciones de corriente elevada sostenida, permitiendo su ajuste según la corriente nominal del motor.

Para complementar el sistema de mando, se incorpora un relé auxiliar Siemens, cuya función es apoyar las lógicas de control, como enclavamientos y temporizaciones. Este relé mejora la flexibilidad del sistema y permite desarrollar secuencias de arranque y paro más complejas.

El banco también está equipado con cuatro botoneras que permiten el control manual del sistema: una para arranque, una para paro, una para cambio de giro (inversión de fases).

El estado del sistema es visualizado mediante cuatro luminarias indicadoras, donde verde es de motor encendido y rojo indica motor apagado.

Para la medición de parámetros eléctricos se incluyen dos analizadores de red, cuya función es registrar datos como tensiones de línea, corrientes por fase, potencias (activa, reactiva y aparente), frecuencia y factor de potencia. Esta información es clave

para analizar el comportamiento del motor durante las pruebas, y para la elaboración de las curvas características.

Por último, el banco incorpora un variador de frecuencia, el cual permite modificar tanto la frecuencia como la tensión de alimentación del motor, facilitando así el estudio de su respuesta dinámica. Este dispositivo es especialmente útil para realizar arranques suaves, pruebas de velocidad variable.

Para complementar al banco de pruebas se cuenta con un motor eléctrico con un freno de zapata en el cual se puede realizar prácticas con y sin carga.

El motor es de inducción con una potencia de 746 W o 1HP, trifásico de 3450 RPM y 2 polos. Puede trabajar a 440 V o 220V. Se dejó el motor con una conexión para un voltaje de 220V y las líneas ya están conectadas a ese voltaje sin necesidad de acceder a la placa de conexiones del motor.

Para trabajar con carga es necesario poner las zapatas en el eje del motor y ajustar la perilla circular para frenar el motor y con el medidor multifuncional verificar la corriente del motor y ajustar la carga hasta llegar a velocidad 0 en el rotor. La corriente de operación al 100% del motor a 220V es de 6A.

En todo momento se debe verificar las corrientes en el motor para constatar que la corriente esta estable y no se ha sobrepasado de la corriente máxima del motor.

Normas de seguridad para el uso del banco de pruebas

Para seguridad de los estudiantes y para evitar daños en los equipos del banco de pruebas, se deben tomar en consideración las siguientes normas y recomendaciones.

- Para realizar conexiones y energizar los elementos del banco de pruebas se debe conocer las características y datos de placa de los equipos con la finalidad de evitar malos funcionamientos o averías
- El banco de pruebas debe ser operado bajo la supervisión de un docente o encargado.
- No realizar desconexiones o cambios en las conexiones de los elementos instalados en los bastidores.
- Solo se debe realizar conexiones, desconexiones y operaciones en el lado frontal de los bastidores con las conexiones tipo banana y sus borneras.
- Antes de energizar el banco se debe realizar una inspección visual, para verificar que no existan conductores desconectados, o conductores en las borneras haciendo conexiones inapropiadas que puedan producir un fallo eléctrico.
- Revisar los cables de conexión que se requieran para realizar las diferentes prácticas y utilizar únicamente los cables en buen estado para así evitar falsos contactos, cortocircuitos o contactos eléctricos directos a las personas que manipulen los cables mientras se realizan las prácticas.
- Antes de empezar una práctica en el banco de pruebas se debe realizar y revisar el esquema de fuerza y control para iniciar con el cableado respectivo
- Toda práctica debe realizarse utilizando las protecciones adecuadas para los equipos con los que se trabajará.
- En caso de ser necesario realizar algún cambio en las conexiones de la práctica que se está desarrollando deberá desenergizar el circuito conectado.
- Evitar contacto directo o indirecto con terminales expuestos en la parte posterior del banco o en la parte frontal si el banco ya está energizado
- Verificar que ningún cable de conexión este haciendo cortocircuito antes de energizar el banco.

- Evitar contacto directo con el eje del motor a la hora de estar operando. La operación del freno de Prony debe ser realizada por el docente encargado.
- En caso de activarse alguna protección en el banco, verificar las causas del suceso y superar la causa de la falla antes de volver a energizar el banco
- En caso de observar que algún equipo está operando incorrectamente, que emana olor a quemado o que está saliendo humo de él, desconectar la energía inmediatamente y comunicar al docente lo sucedido.

Dispositivos del banco

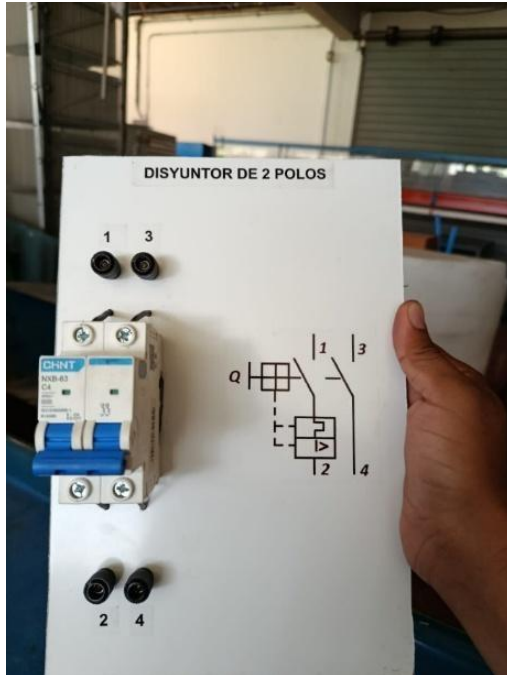


Ilustración 1. Disyuntor 2P 6A CHINT

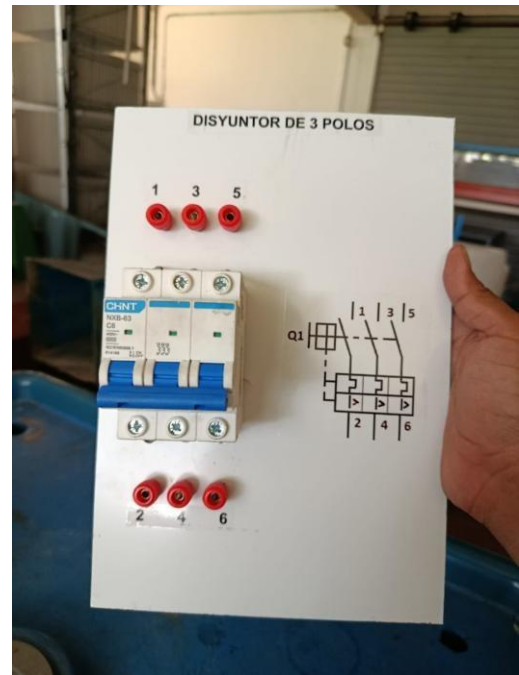


Ilustración 2. Disyuntor de 3P 6A CHINT



Ilustración 3. Luminarias 220V AC



Ilustración 4. Analizador de red de 3 fases Klemsan

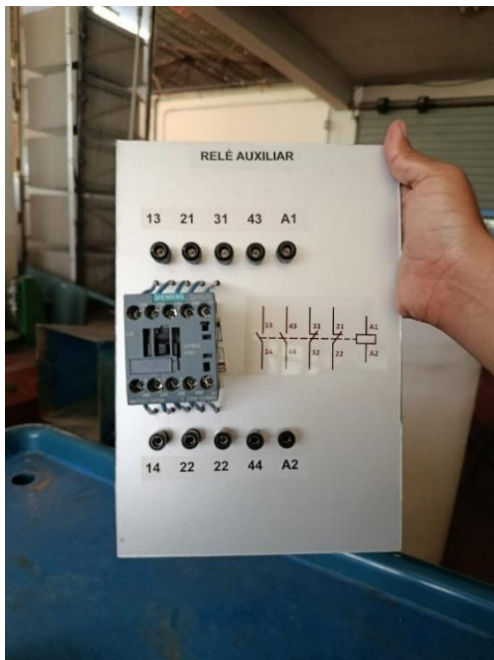


Ilustración 5. Relé auxiliar Siemens

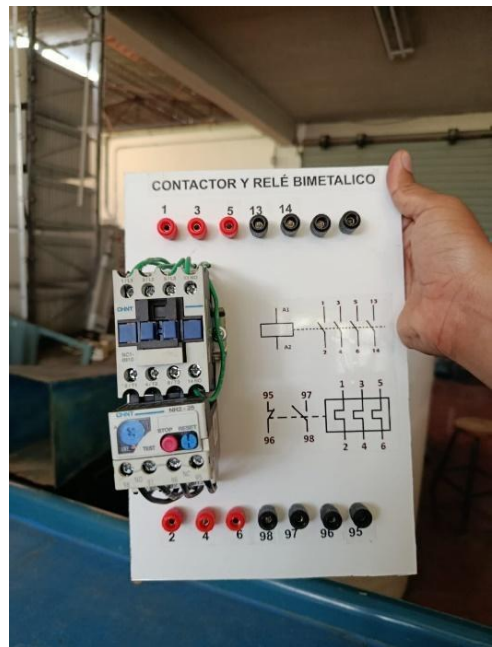


Ilustración 6. Contactor 9A 3P y relé bimetalico 4 - 6A

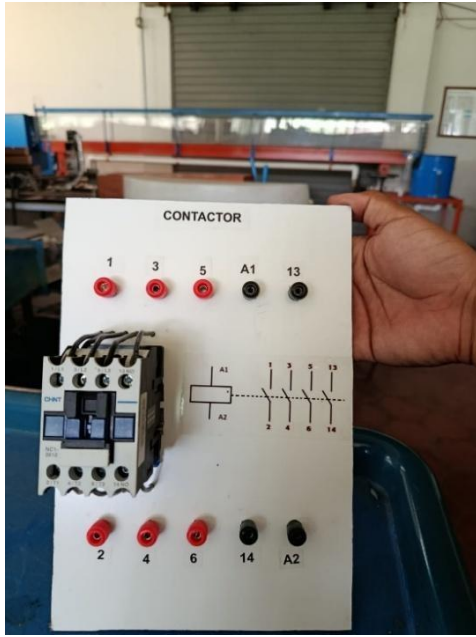


Ilustración 7. Contactor 9A 3P CHINT



Ilustración 8. Pulsador verde NO y rojo NC



Ilustración 9. analizador de red circutor

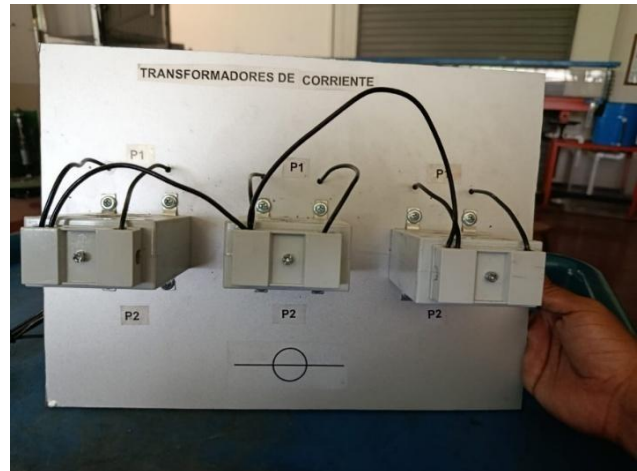


Ilustración10. transformador de corriente.



Ilustración 11. Variador de frecuencia WEG CFW 500

Questionario:

- Especifique cómo conectar la alimentación eléctrica para el banco de pruebas.
- Especifique que debe hacer antes de operar, conectar o energizar algún equipo del banco de pruebas.
- Investigue que cuidados debe tener a la hora de operar un variador de frecuencia.
- ¿Qué tipo de arranques para motores puede realizar en el banco de prueba?
- ¿Qué tipo de motor es el disponible en el banco de pruebas?
- ¿Cuál es la diferencia entre el disyuntor y el relé térmico?

3.4.2. PRÁCTICA 2. ARRANQUE DIRECTO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRACTICA 2: ARRANQUE DIRECTO PARA MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO

Objetivo general: Realizar un arranque directo para motor eléctrico trifásico utilizando los elementos del banco de pruebas

Objetivos específicos:

- Diseñar los esquemas de fuerza y control para desarrollo de un arranque directo
- Identificar los elementos del banco de pruebas que se usaran para elaborar la practica
- Desarrollar la practica en el banco de pruebas
- Comprender el comportamiento y funcionamiento de un arranque directo

Marco teórico:

El arranque directo es el método más básico para poner en funcionamiento un motor de inducción. Consiste en conectar el motor directamente a la red trifásica, suministrándole el voltaje completo desde el inicio. Este tipo de arranque no limita la corriente ni el par, lo que resulta en un alto valor de corriente de arranque.

Al aplicar el voltaje completo, el motor genera una corriente de arranque elevada —normalmente entre 5 a 8 veces la corriente nominal— lo que puede causar caídas de

tensión en la red si no se controla adecuadamente. A pesar de esto, el arranque directo es eficaz para motores pequeños o cuando la red es suficientemente robusta.

Este tipo de arranque requiere de un **contactor**, que cierra el circuito de potencia, y un **relé térmico**, que protege al motor ante sobrecargas. Un sistema de mando con botoneras y señalización complementa el control del encendido y apagado del motor.

Debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad de implementación, este método es ampliamente utilizado en motores pequeños o en redes eléctricas industriales donde las condiciones lo permiten. En motores de mayor potencia, el arranque directo puede provocar caídas de tensión significativas, por lo que se requieren métodos alternativos de arranque.

Resumen del flujo eléctrico:

- Energía → Disyuntor trifásico → Contactor → Relé térmico → Motor
- Control → Botoneras → Relé auxiliar → Bobina del contactor → Acciona el motor.

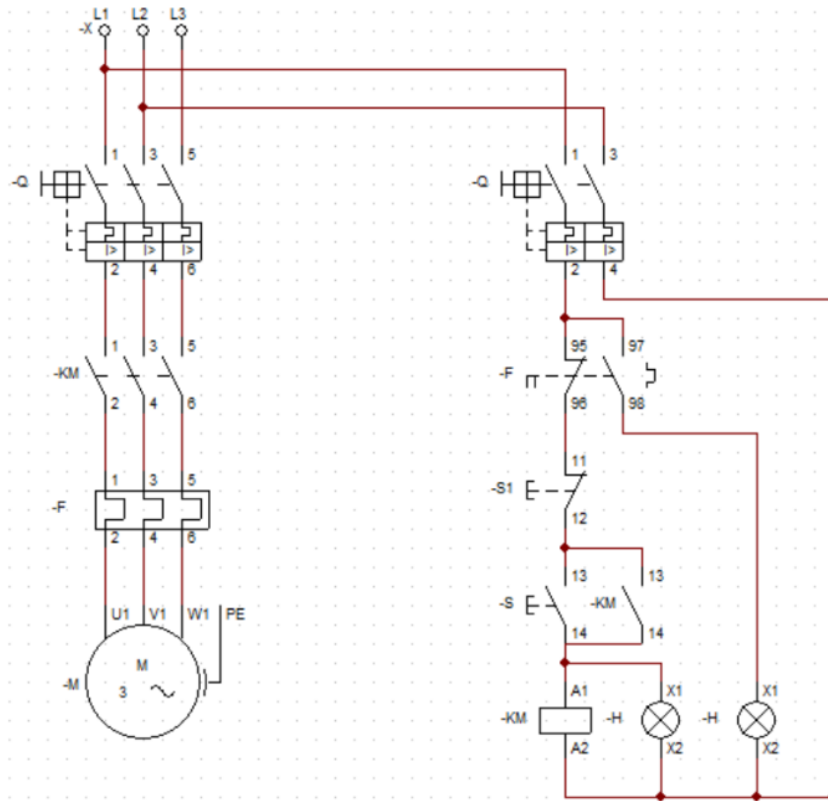


Ilustración 12. diagrama de arranque directo (fuente: autores)

Lógica Cableada Para Armar Arranque.

Se realizará el arranque directo siguiendo la lógica del diagrama presentado anteriormente.

Los bastidores que se montarán en el banco serán:

- Disyuntor de 3 polos (bastidor 1)
- Contactor y relé bimetalítico (bastidor 3)
- Transformador de corriente (bastidor 10)
- Disyuntor de 2 polos (bastidor 5)
- Luminarias (bastidor 8)
- Pulsadores (bastidor 7)
- Analizador de red (bastidor 9)
 - ★ Armado de circuito de potencia.

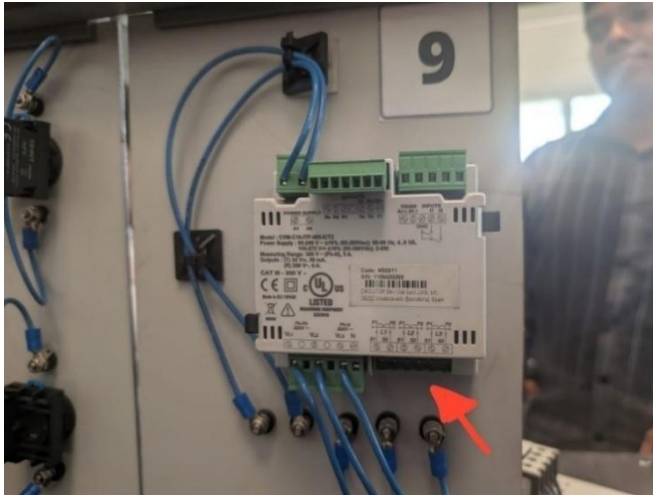


Ilustración 13. conexiones de analizador de red. (fuente: autores)



Ilustración 14. borne de conexión para transformadores de corriente. (fuente: autores)

1. Tomar la alimentación (cable TSJ con 3 conectores macho) y conectar a las entradas (1, 3 y 5) **bastidor 1**{mantener desconectado el cable TSJ, lo último será conectar este a la fuente alimentación, se debe trabajar sin voltaje}
2. Realizar puentes de 2, 4 y 6 del **bastidor 1** hacia las entradas 1, 3 y 5 respectivamente del **bastidor 3**.
3. Conectar las salidas 2, 4 y 6 del **bastidor 3** con los conectores machos del motor. Los cables que salen del motor deben entrar por P2 y salir por P1 del **bastidor 10**, dado que si se conectan de forma inversa el analizador va a detectar potencia negativa.
4. Se realizará la conexión del transformador de corriente hacia el analizador de red, esta conexión ya está realizada por defecto, tomar el módulo de conexión del transformador de corriente e insertarlo en el analizador de red, se muestra el espacio donde se debe conectar.
5. Realizada la conexión se debe de ver así:

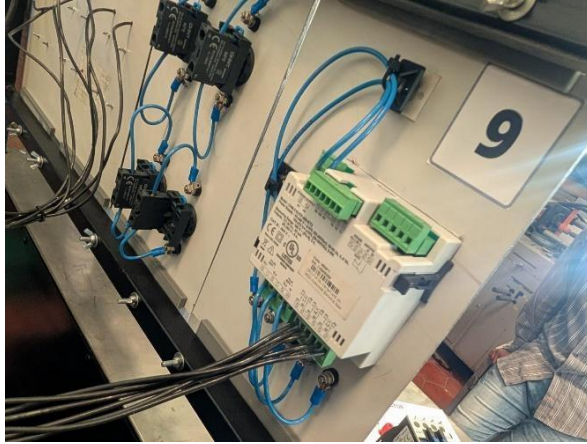


Ilustración 15. módulo de transformadores de corriente conectados al analizador de red. (fuente: autores)

El circuito de fuerza está realizado.

★ Armador de circuito de control.

1. Realizar puentes de los conectores 1 y 3 del **bastidor 1** que vayan a las entradas 1 y 3 respectivamente del **bastidor 5**, de esta manera es que se asegura tener voltaje 220 que es la tensión a la cual trabaja este circuito de control.
2. Lo siguiente es cablear todas las partes que no poseen ningún pulsador o contacto conmutado; es decir todas aquellas conexiones que se encuentran en paralelo, apoyándose del diagrama se puede ver que se deben realizar puentes desde el conector 4 **bastidor 5** hacia el A2 del **bastidor 3** y desde ese mismo A2 se realiza un puente que llegue a X2 del **bastidor 8** (tanto para luminaria roja como luminaria verde); se puede verificar en el diagrama que todos estos puntos están conectados en paralelo, así mismo dejar en paralelo el A2 del **bastidor 9**.
3. Ahora se realizará el circuito de la parte que, si lleva pulsadores y contactos conmutados.

Realizar puente de conector 2 **bastidor 5** hacia el conector 95 **bastidor 3**. NOTA: SIEMPRE IR VERIFICANDO QUE LAS CONEXIONES COINCIDAN CON EL DIAGRAMA PRESENTADO.

4. Del conector 96 **bastidor 3** hacer puente hacia conector 11 del pulsador rojo **bastidor 7**.
5. De ese mismo pulsador rojo mencionado anteriormente, realizar un puente de 12 al 13 del pulsador verde que está al lado.
6. Del pulsador verde mencionado anteriormente, hacer puente de su 14 hacia el A1 del **bastidor 3**.
7. Realizar un puente del A1 mencionado con anterioridad al X1 de la luminaria verde.
8. Realizar un puente del 95 **bastidor 3** al 97 de ese mismo bastidor.
9. Hacer un puente del 98 del bastidor mencionado en el paso 8, que vaya hacia el x1 de la luminaria roja.
10. Hacer un puente del conector 2 **bastidor 5** hacia el A1 del **bastidor 9**.
11. Realizar puentes de 2, 4 y 6 del **bastidor 1** hacia v1, v2 y v3 respectivamente del **bastidor 9**.

Ahora se realizará una prueba para verificar que el sistema de control esté bien cableado, si la prueba sale bien se va a realizar el auto enclavamiento para el contactor de línea, sino verificar los pasos anteriores y comprobar que todo se haya conectado correctamente.

Pasos a seguir:

1. Conectar la fuente de alimentación que está en el cable TSJ a la toma hembra proveniente de la red de energía de la subestación.
2. El accionamiento del disyuntor de 3 polos **bastidor 1** debe permanecer abajo para estas pruebas.

3. Subir el accionamiento del disyuntor de 2 polos **bastidor 5**, si todo está bien debería encender la pantalla del analizador de red, presionar el pulsador verde y mantenerlo, la luz verde se debería encender y el contactor de línea debería enclavarse; una vez dejando de apretar el pulsador verde la luz verde debe apagarse y el contactor debe desenclavarse.
4. Si todo sale bien el arranque queda listo para realizar el auto enclavamiento del contactor de línea.

★ Cableado para auto enclavamiento de contactor de línea

El auto enclavamiento sirve para que no haya necesidad de mantener presionado el pulsador verde para que el equipo funcione, basta de tocar una vez para que el contactor quede enclavado, se detallarán los pasos a seguir:

1. Bajar el accionamiento del disyuntor de 2 polos **bastidor 5** y verificar que el accionamiento del disyuntor de 3 polos esté abajo **bastidor 1**.
2. Realizar un puente entre 13 del pulsador verde **bastidor 7** hacia el contacto 13 del **bastidor 3**.
3. Realizar un puente entre A1 **bastidor 3** y contacto 14 del mismo bastidor
4. Hacer la misma prueba hecha anteriormente para verificar la lógica cableada del arrancador, subir únicamente el accionamiento del **bastidor 5** y luego presionar una vez el pulsador verde, ahora la luminaria debería quedarse encendida sin estar presionando el botón verde, así mismo el contactor debería estar enclavado.
5. Presionar pulsador rojo, ahora la luz verde debería apagarse y el contactor desenclavarse.

Ahora el banco está listo para poner en funcionamiento el motor, verificar que el disyuntor de 3 polos y 2 polos tengan su accionamiento arriba, ahora verificar la posición del motor y que no haya nada sobre la mesa que vaya a generar algún tipo de percance, no dejar manos cerca de la flecha del motor; basta accionar pulsador verde y el motor debería ponerse en marcha.

NOTA: Para este arranque el pulsador verde significa que el equipo está operando y la luminaria roja significa que hay sobrecarga de corriente en el equipo.

Cuestionario:

- Explique cuales son las ventajas y desventajas de utilizar un arranque directo en un motor eléctrico trifásico
- ¿Cuál es la diferencia en usar un guardamotor como protección y un relé térmico con disyuntor?
- ¿Por qué se utilizan protecciones para el circuito de control y para el circuito de fuerza?
- ¿En base a que parámetro se calibra la corriente en un guardamotor o relé térmico?

3.4.3. PRÁCTICA 3. PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRACTICA 3. PROGRAMACIÓN DE VARIADOR DE FRECUENCIA WEG CFW500.

Objetivo general: Elaborar una guía práctica para la configuración y operación del variador de frecuencia WEG CFW500, permitiendo a los estudiantes comprender y aplicar los principios de control de velocidad y protección de motores eléctricos de inducción trifásicos.

Objetivos específicos

- Configurar los parámetros básicos del variador (tensión, corriente, frecuencia nominal del motor) para su correcto funcionamiento.
- Implementar protecciones de sobre y subvoltaje, sobrecorriente y subcorriente para garantizar la seguridad del motor y del sistema.
- Realizar un arranque y parada controlados del motor, ajustando la rampa de aceleración y desaceleración.

Marco teórico:

- Variadores de Frecuencia

Un variador de frecuencia (VFD), también conocido como convertidor de frecuencia o inversor, es un dispositivo electrónico que controla la velocidad de un motor

eléctrico de inducción variando la frecuencia y la tensión de la energía eléctrica suministrada. Esto se logra a través de tres etapas principales:

- **Rectificador:** Convierte la corriente alterna (CA) de la red en corriente continua (CC).
- **Bus de CC:** Almacena la energía y la filtra.
- **Inversor:** Utiliza transistores de potencia (IGBTs) para convertir la CC nuevamente en CA, transformando la frecuencia y tensión a valores deseados.

- **EI WEG CFW500**

El WEG CFW500 es un variador de frecuencia compacto y versátil, ideal para aplicaciones industriales de baja potencia. Permite el control de motores trifásicos, ofreciendo una interfaz de programación intuitiva y diversas funcionalidades de protección y diagnóstico. Sus principales características incluyen:

- Control escalar (V/f).
- Múltiples entradas y salidas digitales y analógicas.
- Fácil programación a través de su HMI (Human Machine Interface) integrada o software.
- Protecciones contra sobrecorriente, sobrecarga, sobre y subvoltaje, entre otras.

PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO

Bastidores a montar:

- disyuntor de 3 polos (bastidor 1)
- Variador de frecuencia (bastidor 2)

A. Consideraciones de Seguridad:

- Asegúrate de que el equipo esté desconectado de la fuente de alimentación antes de realizar cualquier conexión.
- Verifica que las conexiones de potencia estén firmes y correctas.
- Revisa que el accionamiento del disyuntor esté abajo.

B. Conexión del Equipo:

1. Conecta la alimentación trifásica a las entradas 1, 3 y 5 del **bastidor 1**.
2. Realiza un puente entre 2, 4 y 6 del **bastidor 1** a las entradas 1, 3 y 5 del **bastidor 2**.
3. Subir el accionamiento del **bastidor 1**, a este punto la pantalla del VDF debería encenderse.

C. Programación del Variador WEG CFW500:

- En el modo parametrización es posible escoger el grupo de parámetros utilizando las teclas (flecha arriba) y (flecha abajo) para desplazarte entre parámetros.
 - Presione la tecla ENTER/MENÚ para editar el parámetro seleccionado.
 - Presione la tecla BACK/ESC para retornar a los demás parámetros y presione 2 veces para ir al modo monitoreo.
1. Parámetros Básicos del Motor:
 - a. **P0400**: Tensión nominal del motor (V).

Hace referencia al valor de voltaje al cual operará el motor; tomar lectura de tensión de alimentación e ingresar el valor o bien mirar la placa del motor para editar este parámetro. (220).

- b. **P0401**: Corriente nominal del motor (A). Ingresar el valor de la placa de datos del motor que corresponde a la corriente trabajando a 220.

- c. **P0402:** Rotación nominal del motor (rpm). Ingresar las rpm del motor mostradas en placa.
- d. **P0403:** Frecuencia nominal del motor (Hz). Ingresar la frecuencia de trabajo del motor mostrada en placa.
- e. **P0404:** Potencia Nominal del motor (Hp). Ingresar el valor 5, el variador ha asignado ese valor a potencia de 1Hp.

2. Protecciones del Motor:

- a. **P0398:** Factor de servicio del motor (%). Ingresar el valor mostrado en la placa del motor.
- b. **P0296:** Tensión Nominal Red. Ingresar valor 0, puesto que ese valor corresponde a un rango de trabajo de 200 a 240 V.

3. Configuración de Arranque y Parada:

- a. **P100:** Rampa de aceleración. Define el tiempo que tarda el motor en pasar de 0 Hz a la frecuencia máxima. (5 segundos)
- b. **P101:** Rampa de desaceleración. Define el tiempo que tarda el motor en pasar de la frecuencia máxima a 0 Hz. (5 segundos)
- c. **P220:** Fuente de comando. Selecciona la forma en que se dará la orden de arranque y parada (por HMI, entrada digital, etc.). (dejar en 2 puesto que se hará una prueba para arrancar el motor y se usará el HMI), el 2 significa que el VDF estará gobernado en su forma local y se podrá encender con su propio panel de control (HMI).

Parám.	Descripción	Rango de Valores
P0220	Selección LOC/REM	0 = Siempre LOCAL 1 = Siempre REMOTO 2 = Tecla HMI (LOC) 3 = Tecla HMI (REM) 4 = Entrada Digital Dlx 5 = Serial/USB (LOC) 6 = Serial/USB (REM) 7 y 8 = Sin Función 9 = CO/DN/PB/Eth (LOC) 10 = CO/DN/PB/Eth (REM) 11 = SoftPLC

Ilustración 16. Opciones de parámetro P0220

4. Puesta de motor en funcionamiento y observación:
 1. Baja el accionamiento del bastidor 1 si este se encuentra arriba.
 2. Realiza puentes entre las salidas del motor a las conexiones 2, 4 y 6 del **bastidor 2**.
 3. Sube el accionamiento del disyuntor de 3 polos o **bastidor 1**.
 4. Verificar que en la pantalla del Variador este se encuentre en local, de encontrarse en remoto tocar el botón (loc/rem) hasta que aparezca la designación de local.



Ilustración 17. HMI de variador de frecuencia.

Se muestra en que parte se debe verificar que el equipo esté en Loc.



Ilustración 18. HMI de variador de frecuencia.

5. Arranca el motor con el botón verde, comprobar que la rampa de aceleración coincida con la establecida en el parámetro P100

6. Variar la frecuencia (usando los botones de HMI) arriba y abajo para observar el cambio de las rpm; cabe aclarar que con los botones se está cambiando la frecuencia del VDF.
7. Pulsar el botón rojo del panel para apagar el motor y verificar que la rampa de desaceleración esté activada.
8. Desconecta el motor de las salidas 2, 4 y 6 del **bastidor 2**.

Cuestionario De Evaluación

1. ¿Cuál es la función principal de un variador de frecuencia y por qué es importante en el control de motores eléctricos?
2. ¿Con que tipo de motores puede trabajar un variador de frecuencia?
3. Menciona al menos tres parámetros básicos del motor que deben ser configurados en el WEG CFW500.
4. Explica la diferencia entre las rampas de aceleración y desaceleración y cómo influyen en el funcionamiento del motor.
5. Describe un escenario donde la protección contra sobrecorriente sería vital y qué parámetro del variador estaría involucrado en su configuración.
6. ¿Qué pasaría si la tensión de la red eléctrica disminuye considerablemente por debajo del valor configurado en el parámetro de subvoltaje (P251)?
7. ¿Qué etapas componen internamente a un variador de frecuencia? Explica brevemente la función de cada una.

3.4.4. PRÁCTICA 4. ARRANQUE DIRECTO CON CAMBIO DE GIRO.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRÁCTICA 4. ARRANQUE DIRECTO PARA MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO CON INVERSIÓN DE GIRO

Objetivo general: Realizar un arranque directo con inversión de giro para un motor eléctrico trifásico utilizando los elementos del banco de pruebas

Objetivos específicos:

- Diseñar los esquemas de fuerza y control para desarrollo de un arranque directo con inversión de giro.
- Identificar los elementos del banco de pruebas que se usaran para elaborar la practica
- Desarrollar la practica en el banco de pruebas
- Comprender el comportamiento y funcionamiento de un arranque directo con inversión de giro.

Marco teórico

El motor de inducción trifásico es ampliamente utilizado en sistemas industriales debido a su robustez, simplicidad y bajo costo de mantenimiento. Una de las características fundamentales de estos motores es que su sentido de giro depende del orden de las fases aplicadas al estator. Esto permite que, mediante la inversión de dos fases, se invierta también el sentido de rotación del motor.

El método de arranque directo con inversión de giro consiste en arrancar el motor conectándolo directamente a la red trifásica, tal como en el arranque directo convencional, con la diferencia que incorpora un sistema de control que permita cambiar el orden de las fases automáticamente. Para lograr la inversión de rotación, se invierten dos de las tres fases en la conexión del motor, lo cual cambia el sentido del campo magnético giratorio. Esta inversión se controla mediante diferentes pulsadores para gobernar los contactores que logran cambiar la secuencia de fase para alimentar el motor.

Este sistema debe incluir un **interbloqueo eléctrico y mecánico** que impida que ambos contactores actúen simultáneamente, lo cual causaría un cortocircuito entre fases. El **interbloqueo eléctrico** se realiza mediante contactos auxiliares normalmente cerrados entre los contactores, y el **interbloqueo mecánico** se implementa con una pieza física que evita el cierre simultáneo.

Este tipo de arranque es útil en aplicaciones donde el motor necesita cambiar su sentido de rotación, como en elevadores, bandas transportadoras, máquinas herramienta, entre otras.

Aunque el arranque directo genera una corriente elevada al momento de energizar el motor (similar a la de 6 a 8 veces la corriente nominal), su simplicidad lo convierte en una

solución viable para motores de **pequeña y mediana potencia**, siempre que la red eléctrica y la aplicación lo permitan.

- Armado de circuito de control y de potencia.

Esta guía es similar a la guía N°2 por lo cual se facilitará el armado de este arranque, solo se agregará un bastidor que se señala en el siguiente diagrama:

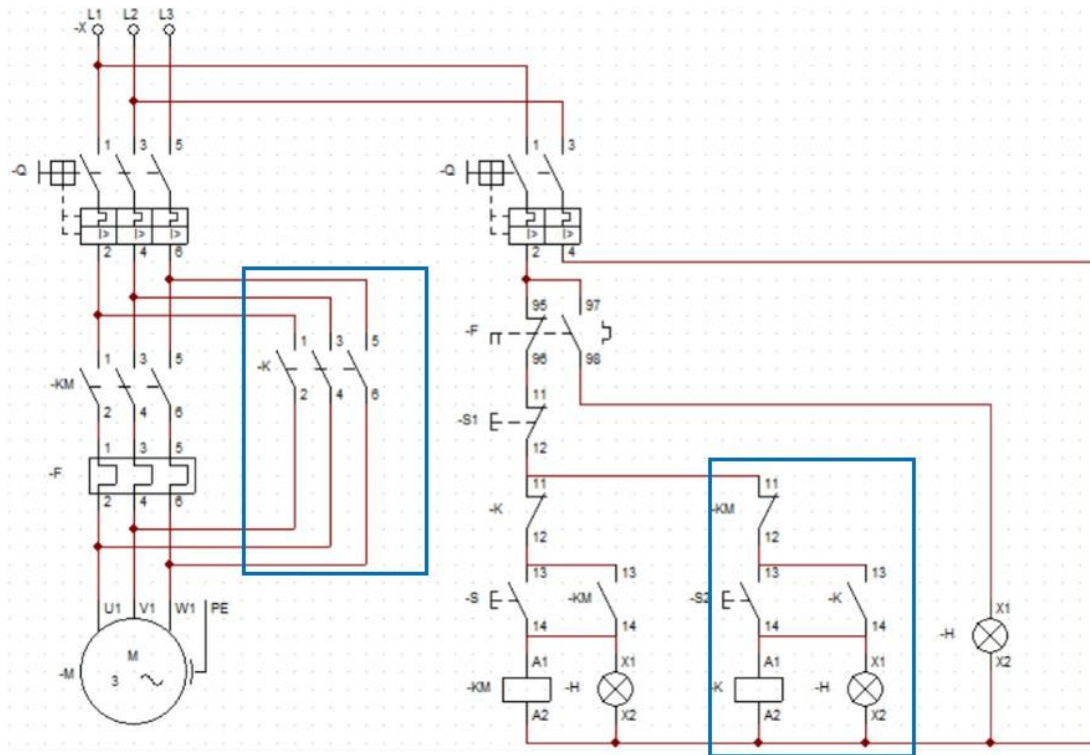


Ilustración 19. comparativa entre arranque directo y arranque directo con cambio de giro (autores)

Lo encerrado en rectángulos azules es el componente nuevo que se agrega con respecto a la guía 2, entonces el único bastidor nuevo a usar es el otro contactor, **bastidor 4**; ya que en el diagrama aparece una luminaria y pulsador nuevo los cuales ya están incluidos en los bastidores que se pusieron en la guía 2.

Así mismo se menciona que el transformador de corriente, analizador de red son los elementos que se usaron en la otra guía y en esta ya no se usarán, **bastidor 10** y **bastidor 9** respectivamente.

Los bastidores que se montarán en el banco serán:

- Disyuntor de 3 polos (bastidor 1)

- Contactor y relé bimetálico (bastidor 3)
- Contactor (bastidor 4)
- Disyuntor de 2 polos (bastidor 5)
- Luminarias (bastidor 8)
- Pulsadores (bastidor 7)
- Relé auxiliar (bastidor 6)
- ★ Lógica Cableada Para Armar Arranque.

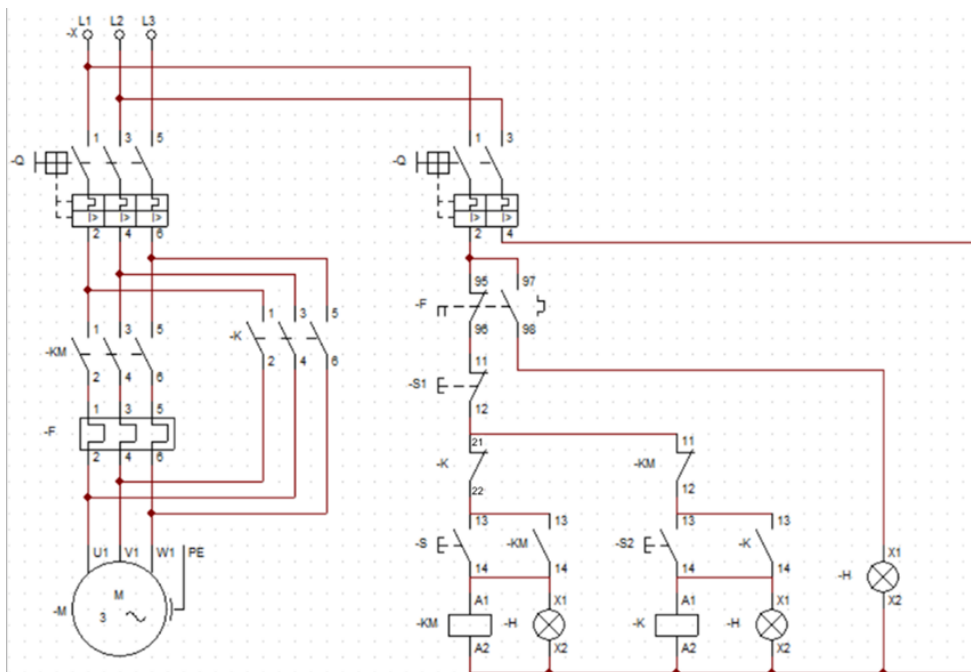


Ilustración 20. diagrama de arranque directo con cambio de giro (fuente: autores)

★ Armado De Circuito De Fuerza.

1. Repetir los pasos (1, 2) del armado del circuito de fuerza de la práctica N°2.
2. Del paso 3 solo realizar la parte de la conexión del motor, omitir la parte donde se usa el **bastidor 10** dado que no se usarán los transformadores de corriente.

3. Realizar puentes en los conectores de entrada (1,3 y 5) del **bastidor 3** con las entradas 1,3 y 5 respectivamente del **bastidor 4**.
4. Ahora realizar puentes en los conectores de salida de los mismos bastidores usados en el paso anterior (**bastidor 3 y 4**); la configuración quedará de la siguiente manera:
 - Conector 2 (**bastidor 3**) con conector 4 (**bastidor 4**).
 - Conector 4 (**bastidor 3**) con conector 2 (**bastidor 2**).
 - Conector 6 (**bastidor 3**) con conector 6 (**bastidor 4**).

Nota: Se puede visualizar que solo se cambió la secuencia de fase entre L1 y L2, ese es el principio de funcionamiento para lograr una inversión de giro en un motor trifásico, alterar la secuencia de fase de las alimentaciones del motor.

★ Armado De Circuito De Control

1. Realizar puentes entre 1 y 3 de **bastidor 1** con 1 y 3 de **bastidor 5**.
2. Realizar puentes entre puntos que se encuentran en paralelo, ir de conector 4 de **bastidor 5** con los X2 de las luminarias amarilla, azul y roja, también con los A2 de los **bastidores 3 y 4**.
3. Hacer puente del conector 2 **bastidor 5** al conector 95 de **bastidor 3**, luego hacer puente entre 95 y 97 del mismo bastidor.
4. Unir el conector 96 **bastidor 3** con el conector 11 de **bastidor 7**.
5. Del conector 12 **bastidor 7** hacer puente hacia conector 11 de **bastidor 4**.
6. Realizar puente entre conector 12 **bastidor 4** hacia conector 13 del **bastidor 7**.
7. Del conector 14 (bastidor mencionado en paso 5) realizar puente hacia A1 del **bastidor 3**.
8. Realizar puente entre A1 del bastidor mencionado con anterioridad al X1 de la luminaria amarilla.

9. Unir los conectores 14 de **bastidor 7** (pulsador verde que se está usando) y **bastidor 3**.
10. Realizar puente del conector 13 del pulsador verde del paso anterior al conector 13 del **bastidor 3**.
11. Unir los A1 de bastidores 3 y bastidor 6.
12. Unir los A2 de bastidores 3 y bastidor 6.
13. Realizar puente del conector 12 del pulsador rojo que se está usando al conector 21 del **bastidor 6**.
14. Hacer puente del conector 22 del **bastidor 6** al conector 13 del pulsador verde (el que no se está usando); luego de ese mismo conector 13 hacer puente al conector 13 del **bastidor 4**.
15. Del conector 14 del pulsador verde trabajado en el paso 14, hacer un puente con A1 del **bastidor 4**.
16. Del A1 mencionado anteriormente hacer puente que vaya al X1 de la luminaria azul.
17. Realizar puente entre conectores A1 y 14 del **bastidor 4**.
18. Del conector 98 **bastidor 3** hacer puente hacia X1 de la luminaria roja.

Se realizará una prueba para ver que el cableado este hecho correctamente.

NOTA: ANTES DE PRESIONAR CUALQUIER PULSADOR VERDE SE DEBERÁ PRESIONAR EL BOTÓN ROJO.

Pasos a seguir para la prueba:

1. El disyuntor de 3 polos deberá permanecer abajo en todo momento, solo subir accionamiento de disyuntor de 2 polos.

2. Presionar un pulsador verde, deberá encender la luz amarilla o azul y enclavar cualquiera de los 2 contactores, todo depende de que circuito esté siendo gobernado por el pulsador verde que se tocó.
3. Presionar el pulsador rojo y verificar que la luminaria se haya apagado y el contactor se haya desenclavado. Una vez verificado el paso 3 proceder a presionar el otro pulsador verde, el que no se ha accionado, se deberá encender la otra luminaria y el otro contactor se debe de enclavar, el que no se enclavo en el paso 2.
4. Volver a presionar el pulsador rojo, siempre verificar que la luminaria se apague y el contactor desenclave.
5. Si todo está bien se continúa poniendo en funcionamiento el motor.
6. Verificar que las luminarias estén apagadas y los contactores desenclavados, si es así subir el accionamiento del disyuntor de 3 polos.
7. Verificar que nada esté sobre la mesa que pueda generar algún accidente, de ser así retirarlo, si se tiene la superficie libre presionar botón verde, en este punto el motor deberá estar operando, chequear hacia que lado está girando.
8. Presionar pulsador rojo, verificar que la luz se apague y el contactor desenclave.
9. Si se cumple el paso 8 presionar el OTRO pulsador verde, verificar que ahora el motor está girando al lado contrario del que giraba en el paso 7.

Cuestionario

- ¿Por qué para realizar el cambio de sentido de giro en el motor se debe detener completamente?
- ¿Por qué es necesario usar dos contactores en el arranque de motor eléctrico con cambio de giro?
- ¿Por qué se debe utilizar las luces piloto para la señalización en los circuitos de las practicas?

- ¿Por qué al utilizar en un circuito de fuerza al relé térmico se lo debe complementar con un disyuntor para la protección del circuito?
- ¿Qué aplicación o uso le podría dar en el ámbito laboral la práctica desarrollada?

3.4.5. PRÁCTICA 5. ARRANQUE CON VARIADOR DE FRECUENCIA.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRÁCTICA 5. ARMADO DE CIRCUITO DE FUERZA Y CONTROL PARA MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO USANDO EL VARIADOR DE FRECUENCIA WEG CFW500

Objetivo General

Desarrollar una guía práctica para el montaje del circuito de potencia y control del variador de frecuencia WEG CFW500, permitiendo la integración segura del motor eléctrico en un banco didáctico de pruebas.

Objetivos Específicos

- **Identificar** los componentes necesarios para el circuito de fuerza y control.
- **Conectar** correctamente los elementos de potencia, incluyendo el variador y el motor, siguiendo las normas de seguridad.
- **Cablear** el circuito de control para comandar el variador de forma remota, utilizando pulsadores.
- **Verificar** el funcionamiento del circuito y la correcta interacción entre los elementos de control y el variador.

Marco Teórico

Circuito de Fuerza (Potencia)

El circuito de fuerza es el responsable de llevar la energía eléctrica desde la fuente de alimentación hasta el motor. Sus componentes principales son:

- **Fuente de Alimentación:** Suministra la energía trifásica (o monofásica, dependiendo del modelo) al sistema.
- **Disyuntor:** Un dispositivo de protección que protege al circuito contra cortocircuitos y sobrecargas.
- **Variador de Frecuencia (WEG CFW500):** El elemento central que recibe la potencia de la fuente y la convierte para controlar la velocidad del motor.
- **Motor Eléctrico:** El componente que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

Circuito de Control

El circuito de control permite al usuario interactuar con el variador para comandar su operación (arranque, parada, cambio de sentido de giro, etc.). Esta guía contiene el arranque y parada de motor; sus componentes típicos son:

- **Pulsadores (NA y NC):** Se utilizan para enviar señales de arranque (normalmente abierto) o parada (normalmente cerrado) al variador.
- **Relé de Control:** Puede ser usado para lógicas de control más complejas.
- **Bornas de Conexión del Variador:** Los puntos donde se conectan los cables del circuito de control. El WEG CFW500 tiene bornas específicas para entradas digitales, analógicas y salidas de relé.

Procedimiento de Laboratorio

A. Consideraciones de Seguridad:

- Asegúrate de que la **alimentación principal esté desconectada** y bloqueada antes de cualquier manipulación.
- Verifica que los cables tengan el calibre adecuado para la corriente nominal del motor.

B. Bastidores A Montar Para Realización De Circuitos.

- Disyuntor De 3 Polos (bastidor 1)
- Disyuntor De 2 Polos (bastidor 5)
- Relé Auxiliar (bastidor 6)
- Pulsadores (bastidor 7)
- Luminarias (bastidor 8)
- Variador De Frecuencia (bastidor 2)

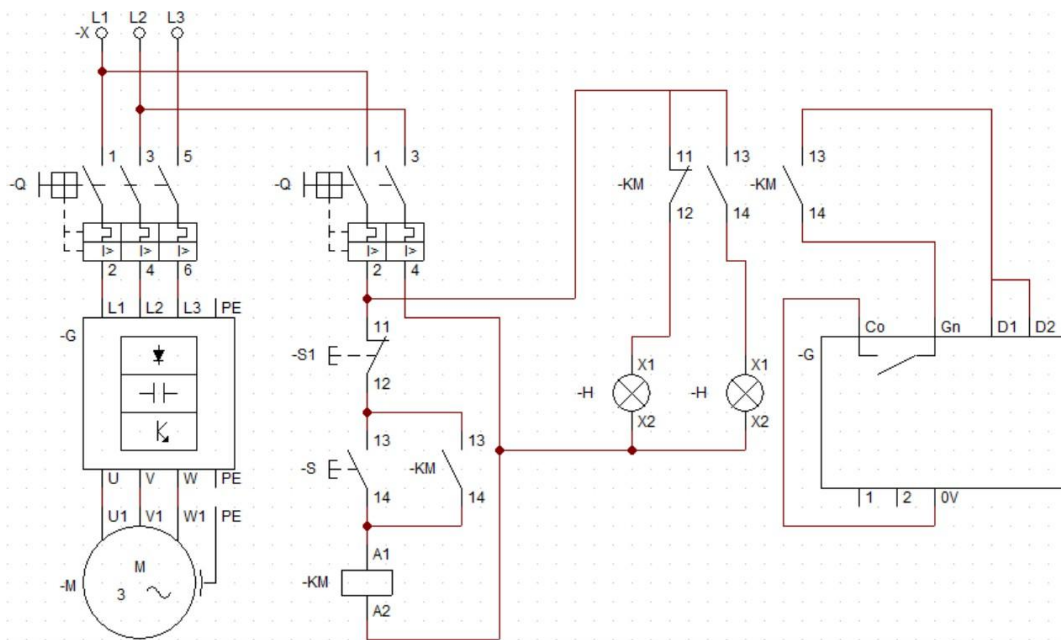


Ilustración 21. Diagrama de arranque con botonera para variador de frecuencia. (fuente: autores)

C. Montaje del Circuito de Fuerza:

1. Conecta la alimentación trifásica (L1, L2, L3) a las entradas del disyuntor de 3 polos.
2. Conecta las salidas del disyuntor a los terminales de entrada de potencia del variador (1, 3 y 5).
3. Conecta los terminales de salida del variador (2, 4 y 6) a conectores del motor eléctrico.

D. Montaje del Circuito de Control:

1. Realizar arranque directo con respecto al relé auxiliar o **bastidor 6**.

Elementos por usar para realizar el arranque directo:

- Pulsador NA
 - Pulsador NC
 - Relé auxiliar
 - Disyuntor de 2 polos
2. Una vez realizado el arranque directo, hacer puente de GND del **bastidor 2** hacia el conector 43 del **bastidor 6**.
 3. Realizar puente del 44 del **bastidor 6** hacia DI1 del **bastidor 2**.
 4. Hacer un puente entre DI1 y DI2 del **bastidor 2**.

D. Verificación y Puesta en Marcha:

1. Revisa todas las conexiones. Asegúrate de que no haya cables sueltos.
2. Conecta la alimentación eléctrica y, con el variador energizado, verifica que la pantalla (HMI) muestre la información correcta.

3. Verificar que en la pantalla del VDF muestre que el arranque esté siendo gobernado de forma remota y no local.
4. Presiona el pulsador de arranque para que el motor comience a funcionar. La rampa de aceleración debe ser visible en la pantalla.
5. Presiona el pulsador de parada. El motor debe detenerse de acuerdo con la rampa de desaceleración programada.

Cuestionario

1. ¿Cuál es la función del disyuntor en el circuito de fuerza?
2. Describe la ruta que sigue la energía eléctrica desde la fuente hasta el motor en este montaje.
3. ¿En base a que corriente se selecciona y calibra el guardamotor al trabajar con un variador de frecuencia, con la del motor o con la del variador?
4. ¿Qué pasaría si conectas un pulsador de parada (NC) en lugar de uno de arranque (NA) a la entrada DI1 y no haces cambios en la programación?
5. Menciona al menos dos precauciones de seguridad que se deben tomar antes de trabajar en el circuito de potencia.
6. ¿Por qué es importante que el calibre del cableado sea el adecuado para la corriente del motor?
7. ¿Cuál es la principal diferencia funcional entre el circuito de fuerza y el circuito de control?

3.4.6. PRUEBA DE MOTORES ELÉCTRICOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRÁCTICA 6. PRUEBA DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS USANDO UN FRENO DE PRONY

Objetivo General

Aprender el procedimiento correcto para realizar ensayos en motores eléctricos trifásicos asíncronos, utilizando un freno de Prony para la obtención de curvas par-rpm, así como las pruebas de vacío y rotor bloqueado, registrando los valores eléctricos y mecánicos más relevantes.

Objetivos Específicos

- Determinar las pérdidas en el hierro, pérdidas mecánicas y obtener el comportamiento del motor sin carga.
- Determinar la impedancia del motor y las pérdidas en el cobre. Por medio de prueba de rotor bloqueado
- Obtener la relación entre el par desarrollado por el motor y su velocidad bajo distintas cargas para describir la capacidad del motor a ensayar.

Marco Teórico

En los motores eléctricos de inducción, las pruebas experimentales permiten determinar parámetros fundamentales para su análisis, caracterización y diagnóstico. Entre las más comunes se encuentran la prueba en vacío, la prueba de rotor bloqueado y la obtención de la curva par–velocidad mediante un sistema de frenado.

1. Prueba en Vacío

La prueba en vacío consiste en hacer funcionar el motor sin carga mecánica acoplada, con el fin de medir las pérdidas asociadas al núcleo (pérdidas en el hierro), las pérdidas por fricción y ventilación, así como la corriente y potencia de vacío. Estos datos permiten calcular la eficiencia y establecer un punto de referencia para el comportamiento del motor bajo carga.

En esta prueba, la potencia medida está compuesta principalmente por las **pérdidas en el hierro** (por histéresis y corrientes parásitas) y las **pérdidas rotacionales** (fricción en rodamientos y ventilación del rotor).

2. Prueba de Rotor Bloqueado

La prueba de rotor bloqueado se realiza inmovilizando mecánicamente el rotor del motor y aplicando una tensión reducida que haga circular la corriente nominal en el estator. Este ensayo permite determinar la resistencia y reactancia del estator y rotor referidos al estator, así como calcular el par de arranque.

Durante la prueba, el motor no produce movimiento, y toda la potencia eléctrica consumida se transforma en calor, por lo que el ensayo debe realizarse en periodos muy cortos para evitar sobrecalentamiento.

3. Obtención de curva Par–Velocidad

La curva par–velocidad describe la relación entre el par desarrollado por el motor y su velocidad de giro bajo diferentes condiciones de carga. Para obtenerla, se puede emplear un **freno de Prony** adaptado con zapatas de madera, el cual aplica una fuerza de fricción sobre una superficie cilíndrica acoplada al eje del motor.

Este método permite variar la carga mecánica gradualmente y medir el par y la velocidad en cada punto, obteniendo así las características de funcionamiento del motor desde vacío hasta casi el bloqueo. La madera se emplea por su bajo costo, facilidad de mecanizado y buen comportamiento frente a la fricción, aunque debe considerarse la disipación de calor debido a la fricción para evitar daños.

El par (**T**) se calcula a partir de la lectura de la fuerza (**F**) ejercida en el brazo de palanca (**r**) mediante la expresión:

$$T = F * r$$

Finalmente, combinando el par medido con la velocidad angular, se puede determinar la potencia mecánica desarrollada y, junto con las mediciones eléctricas, construir la curva de rendimiento del motor.

Procedimiento:

- Prueba en vacío,

Objetivo de la prueba: determinar las pérdidas en el núcleo y la rama de magnetización del circuito equivalente.

1. Realizar una conexión de arranque directo
2. Obtener los valores de tensión de línea V_0 , corriente de línea I_0 y potencia de entrada P_0
3. Calcular la potencia por fase:

$$P_{0f} = \frac{P_0}{3}$$

4. Calcular la corriente en el núcleo. Es la parte de la corriente que representa las pérdidas en el hierro (pérdidas por histéresis y corrientes parásitas) en el estator.

$$I_w = \frac{P_{0f}}{V_{fase}}$$

5. Calcular la componente magnetizante. Es la parte de la corriente que crea el flujo magnético principal en el motor. No produce trabajo útil directamente, sino que establece el campo giratorio

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_w^2}$$

6. Calcular la resistencia del núcleo. Representa las pérdidas en el hierro (histéresis + corrientes parásitas) modeladas como una resistencia en paralelo.

$$R_c = \frac{V_{fase}}{I_w}$$

7. Calcular la reactancia de magnetización. Modela la **inductancia** que genera el flujo magnético principal.

$$X_m = \frac{V_{Fase}}{I_m}$$

- Prueba de rotor bloqueado

Objetivo de la prueba: obtener la suma de resistencias y reactancias del estator y rotor.

1. Realizar una conexión de arranque directo
2. Obtener los valores de tensión aplicada V_{sc} , corriente de línea I_{sc} y potencia de entrada P_{sc}

3. Calcular la potencia por fase

$$P_{Scf} = \frac{P_{sc}}{3}$$

4. Calcular la resistencia total referida al estator

$$R_{total} = \frac{P_{Scf}}{I_{sc}^2}$$

5. Calcular la reactancia total

$$X_{total} = \sqrt{\left(\frac{V_{Fase_{sc}}}{I_{sc}}\right)^2 - R_{total}^2}$$

6. Si se mide previamente la **resistencia de devanado del estator** R_1 con un óhmetro, se puede hallar la resistencia del rotor referida al estator:

$$R'_2 = R'_{total} - R_1$$

- Construcción de la curva Par-velocidad

1. realizar una conexión de arranque directo.
2. Monta el tambor sobre el eje (o en el tambor del freno). La zapata de madera debe apoyar homogéneamente.
3. Mide y registra el **radio efectivo r** (m): distancia desde el eje al punto donde se mide la fuerza F (punto de contacto o punto de aplicación en la palanca).
4. Instala la balanza o celda de carga para medir la **fuerza tangencial F** (N). Si usas una balanza en kg, recuerda convertir a N multiplicando por 9.81.
5. Conecta analizadores (o vatímetro trifásico) y transformadores de corriente. verifica lecturas en vacío
6. Verifica que el tacómetro funcione y esté alineado.

7. Con motor parado y zapata tocando ligeramente el tambor, mide la fuerza F_0 que provoca la fricción estática del sistema (si procede). Esto detecta cualquier pre-carga o fricción residual en el montaje.
8. Con motor en marcha sin carga (zapata sin presión) registra la fuerza que marca la balanza; este será el **offset** a restar si existe.
9. Se recomiendan de 8 a 12 mediciones, espaciadas desde vacío hasta cerca del bloqueo por ejemplo 0%, 10%, 20%... 90% de carga aproximada
10. Acelera el motor hasta velocidad nominal y estabiliza.
11. Aplica carga incrementando la presión de la zapata hasta alcanzar el primer punto deseado. Espera hasta que la velocidad y las lecturas se estabilicen (10–30 s)
12. Registra durante un intervalo (p. ej. 10 s):
 - Velocidad n (RPM) — promedia varias lecturas.
 - Fuerza F (N) en la célula/balanza — promedio
 - Voltaje de línea V_L (V). (lectura del analizador).
 - Corriente por fase I (A) (lectura del analizador).
 - Potencia eléctrica P_{elec} (W) (lectura del analizador).
13. Reduce ligeramente la carga y pasa al siguiente punto. No detener y volver a arrancar cada vez (a menos que quieras medir desde arranque). Evitar ciclos térmicos rápidos: si el motor se calienta, dejar enfriar entre puntos.
14. En el último punto no sobrepasar la capacidad mecánica del freno ni las limitaciones térmicas del motor; no mantener puntos de alta carga por tiempo prolongado.
15. Cálculos por punto
 - Torque(par):

$$T = F * r [N - m]$$
 - Potencia mecánica de salida

$$P_{mec} = \frac{2\pi nT}{60} [W]$$

- Potencia eléctrica de entrada: Usar valor directo del analizador.
- Eficiencia (rendimiento):

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{Elec}} \times 100\%$$

- Velocidad síncrona:

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

- Deslizamiento:

$$s = \frac{N_s - n}{N_s}$$

16. Crear una tabla con las medias de cada punto de carga.

Tabla

Punto	N (rpm)00	F (N)	R (m)	T (N·m)	$P_{mec}(W)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

17. Para cada punto toma **3–5 lecturas** y promedia. Registra desviación estándar como incertidumbre.

18. **Resta del offset:** si determinaste una fuerza de fricción en vacío F_{offset} , réstala de todas las fuerzas medidas.

19. Grafica **T (N·m) vs n (RPM)** para obtener la curva par–velocidad.
20. Grafica P_{mec} vs n y η vs n
21. Identifica puntos clave: par de arranque (máximo en $n \approx 0$), par a velocidad nominal, par máximo (si se observó), y el punto de potencia máxima.
22. Apaga el motor y deja enfriar el tambor y las zapatas antes de manipular (las superficies estarán muy **calientes**).
23. Inspecciona zapatas de madera (quemaduras, desgaste). Sustituir si hay carbonización o grietas.
24. Anota observaciones: chirridos, vibraciones, fluctuaciones en lecturas.

Cuestionario

1. ¿Cuál es el objetivo principal de la prueba en vacío en un motor asíncrono trifásico?
2. ¿Por qué es importante determinar la resistencia del núcleo (**Rc**) y la reactancia de magnetización (**Xm**)?
3. ¿Qué precauciones de seguridad se deben tomar durante esta prueba?
4. ¿Cuál es el propósito de la prueba de rotor bloqueado?
5. ¿Por qué se debe aplicar un voltaje reducido en la prueba de rotor bloqueado?
6. ¿Qué riesgos existen si no se controla el tiempo de la prueba y por qué?
7. ¿Cuál es la finalidad de realizar la curva par–velocidad en un motor trifásico?
8. ¿Qué forma general presenta la curva par–velocidad de un motor asíncrono?
¿Concuerda los datos experimentales con los datos teóricos? Si no concuerdan de posibles causas
9. ¿Cómo se interpreta el punto de par máximo y el punto de par de arranque en esta curva?

CONCLUSIONES

1. La construcción del banco de pruebas de motores eléctricos permitió desarrollar una herramienta didáctica que facilita la comprensión práctica de los principios de funcionamiento, arranque y caracterización de motores asíncronos. El diseño modular de los bastidores y la disposición de los componentes eléctricos favorecen la identificación individual de cada elemento, promoviendo un aprendizaje más autónomo por parte de los estudiantes.

2. El banco didáctico construido soporta la ejecución práctica de múltiples modos de arranque, lo que permite a los estudiantes no solo observar, sino también cablear y operar el sistema:

3. Se diseñó y construyó exitosamente un freno de Prony, dispositivo de carga fundamental para la caracterización completa del motor de inducción. El sistema permitió aplicar la carga necesaria para ejecutar de manera efectiva los ensayos experimentales de las siguientes pruebas: de vacío, de rotor bloqueado, de aislamiento y determinación de la curva par-velocidad.

El éxito de estas pruebas confirmó la funcionalidad del banco para obtener datos reales y calcular parámetros eléctricos esenciales, facilitando el análisis del comportamiento del motor bajo diversas condiciones operativas.

4. La experiencia práctica resalta la inminente necesidad de ampliar métodos de arranque adicionales que son comunes en la industria para motores de alta potencia, como el arranque estrella-triángulo y el arranque por autotransformador. La incorporación de estos esquemas permitirá a los estudiantes analizar la reducción de la corriente de pico durante el arranque y

la transición entre fases de conexión, útil para la protección del motor y la red eléctrica.

5. Para asegurar una formación integral en control industrial, se recomienda la adquisición e interconexión de bastidores didácticos complementarios. Como Bastidores de Controladores Lógicos Programables (PLC) que permitan a los estudiantes migrar el control de relés cableados a la programación automatizada de secuencias de arranque y monitoreo.
6. Durante la realización de la prueba de carga completa y prolongada, se observó que la disipación de calor en las zapatas de madera no era totalmente eficiente. Este fenómeno puede llevar a variaciones en el coeficiente de fricción, afectando la estabilidad del par aplicado y potencialmente sesgando los resultados experimentales obtenidos. Como recomendación crucial para la optimización, se plantea la necesidad de investigar y aplicar materiales de frenado alternativos con mejores propiedades térmicas o la implementación de un sistema de enfriamiento para asegurar la constancia de las condiciones de prueba.
7. Un hallazgo derivado de la operación práctica del freno de Prony, fue la necesidad de proteger el motor a la hora de realizar la curva característica, debido a que la corriente de operación se dispara al usarlo, lo cual puede ser exacerbado por una aplicación inexperta del freno. Este efecto del uso del freno podría ser mitigado con un autotransformador que podría reducir el voltaje aplicado inicialmente y por lo tanto la corriente de operación. previniendo el sobrecalentamiento prematuro y el posible daño del devanado del motor.

8. La medición de torque mediante el freno de Prony manual, aunque didáctica, introduce un margen de error debido a las limitaciones del sistema mecánico y la posible imprecisión en la lectura de los dinamómetros. Para llevar el banco didáctico a un nivel de precisión investigativa, es indispensable la modernización de la instrumentación. Se recomienda la integración de una celda de carga de alta precisión conectada al brazo de torque del freno. Este sensor electrónico permitiría obtener lecturas de fuerza y, por ende, de par (torque), de manera instantánea y digital e integrar la medición de torque directamente con un sistema de adquisición de datos (DAQ), eliminando el error humano de la lectura analógica y permitiendo la construcción automática y más precisa de las curvas características del motor fortaleciendo el rigor analítico del laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

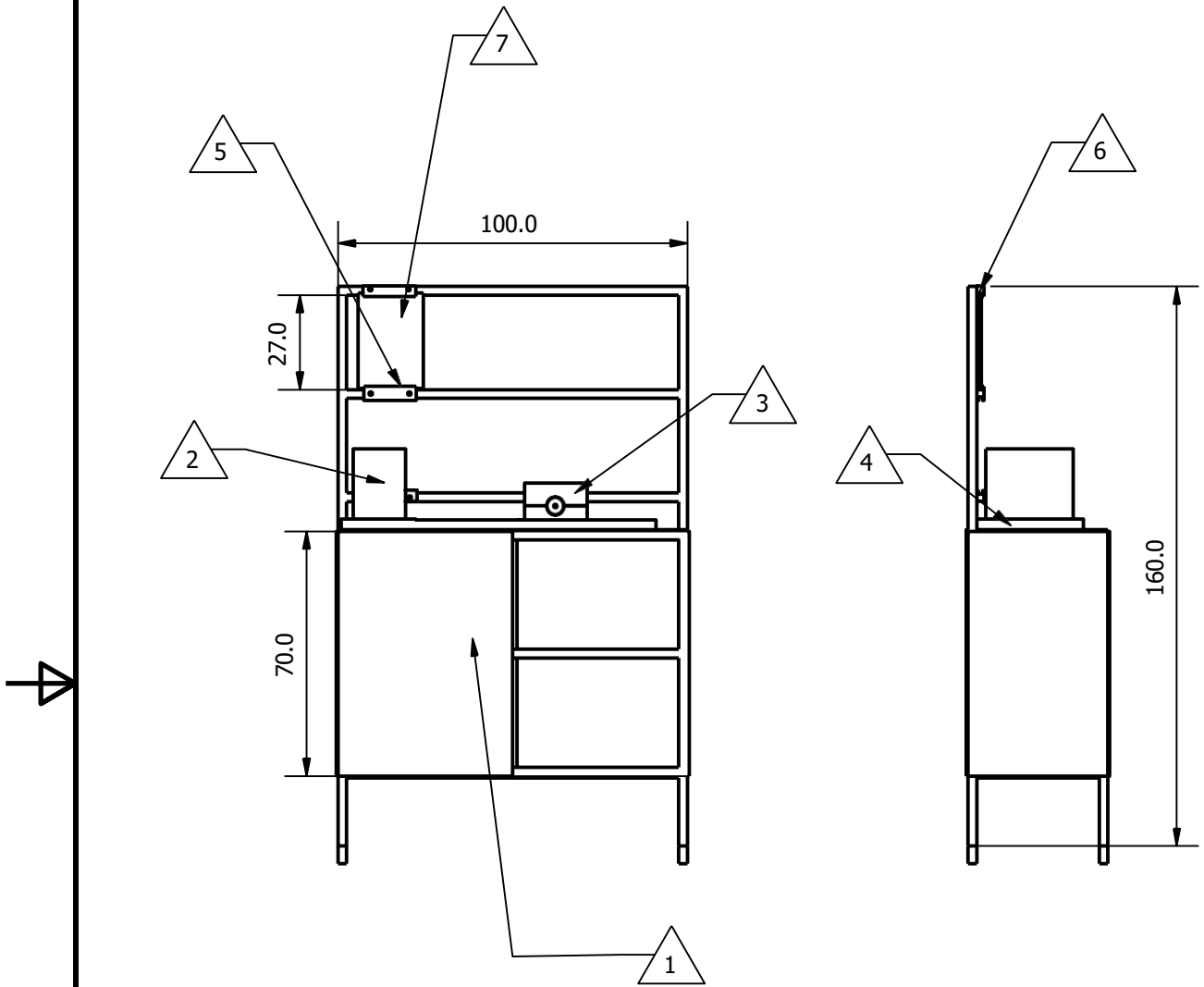
- [1] Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas (5a. ed.)*. McGraw Hill Mexico.
- [2] S. Guru, B. (2002). *Máquinas eléctricas y transformadores (3.ª ed.)*. Oxford University Press.
- [3] Cruz Moreno, Federman. (2019). *Banco didáctico para prueba de motores eléctricos bifásicos y trifásicos en laboratorio de electrónica de la universidad católica de Colombia*. Universidad Católica de Colombia.
- [4] Claudia Gonzáles, Noel Ramos, Henry Treminio (2016) *Propuesta de laboratorio de pruebas de máquinas eléctricas*. Universidad de El Salvador.
- [5] Merlin Gerin, Modicon, Square D, Telemecanique (1999). *Manual electrotécnico Telesquemario*. Schneider Electric.
- [6] Jesús Fraile Mora. (2003). *Maquinas eléctricas (5a. Edición)*. McGraw Hill
- [7] Andrés Videla Flores. (2009). *Manual de motores eléctricos*.
- [8] Dario Ordóñez, Verny Resabala (2020). *Control Eléctrico Industrial Análisis, diseño y ejercicios resueltos*. Editorial Académica Española.
- [9] DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA CONTROL INDUSTRIAL PROGRAMABLE. (2015) *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DE ECUADOR*.
- [10] WEG (2024) *MPW – Guardamotores. La solución completa para maniobra y protección de motores eléctricos*.
- [11] Robert L. Mort. (2004). *Diseño de elementos de Maquinas (4a. Edición)*. Pearson.

[12] National Fire Protection Association (NFPA). (2008). *Código Eléctrico Nacional de los Estados Unidos de América NEC* (Edición en español).

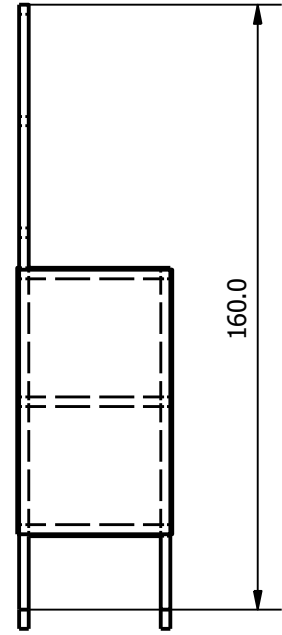
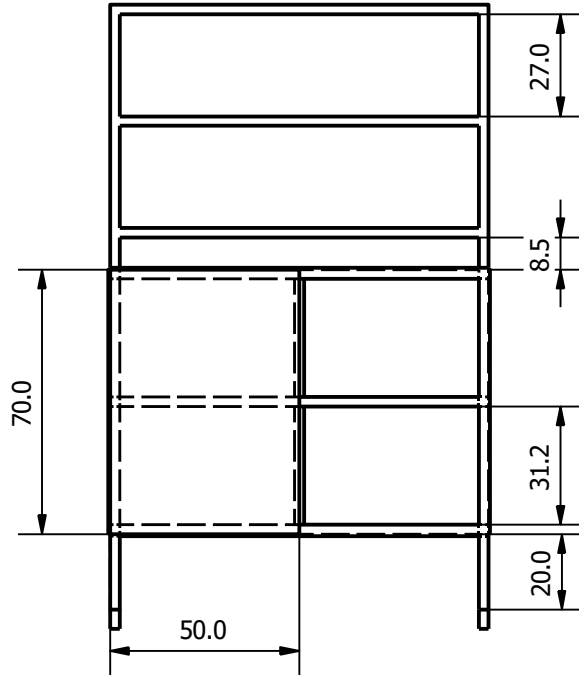
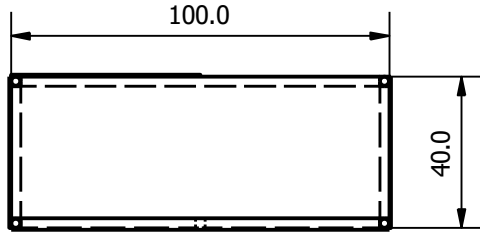
[13] José Roldán Vilorio (1993). *Motores eléctricos. Variación de velocidad*. Paraninfo.

Anexos

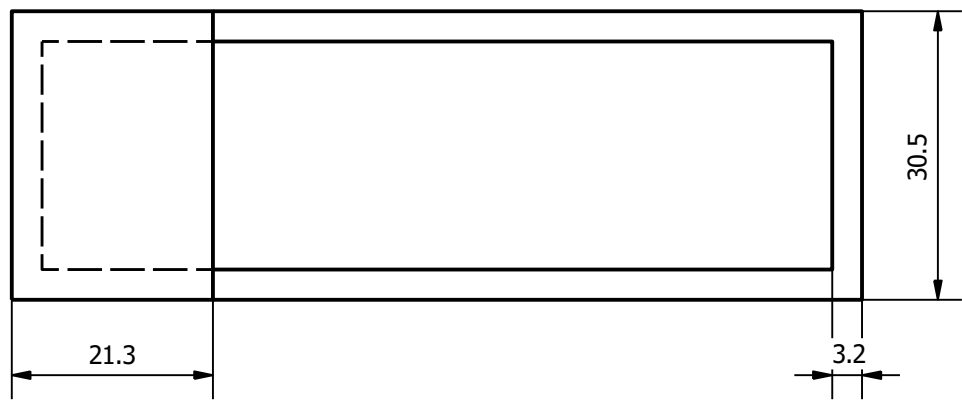
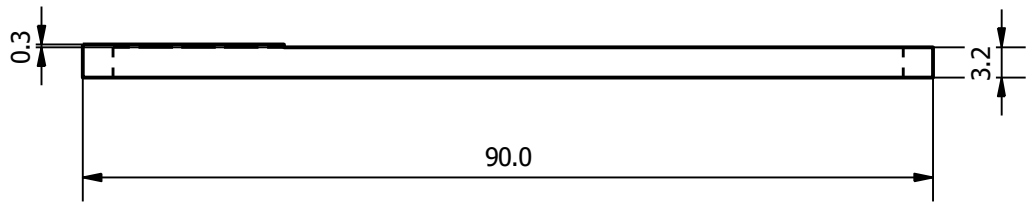
Anexo A: planos



7	Módulo	10	Placa ACM	
6	Carril lateral	2	PLA	Detalle: Carril lateral
5	Carril central	1	PLA	Detalle: Carril central
4	Base para motor	1	Acero	Detalle: Base para motor
3	Freno Prony	1	Acero	Subconjunto 1
2	Motor	1	-	
1	Estructura de banco	1	Acero	Detalle: Estructura del banco
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos		ESCALA 1:20
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández		UNIDADES Centímetros
N° PLANO: A1	FECHA: 20/02/2026	CONJUNTO 1: BANCO DE PRUEBAS		

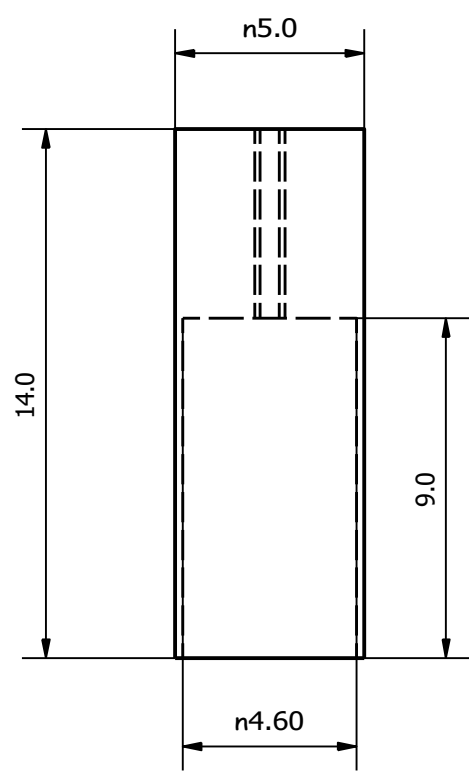
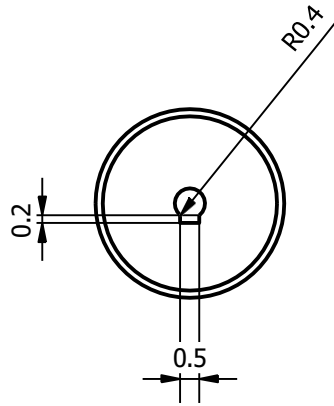


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos	ESCALA 1:20
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández	UNIDADES Centímetros
N° PLANO: A1	FECHA: 20/02/2026	DETALLE ESTRUCTURA DEL BANCO	



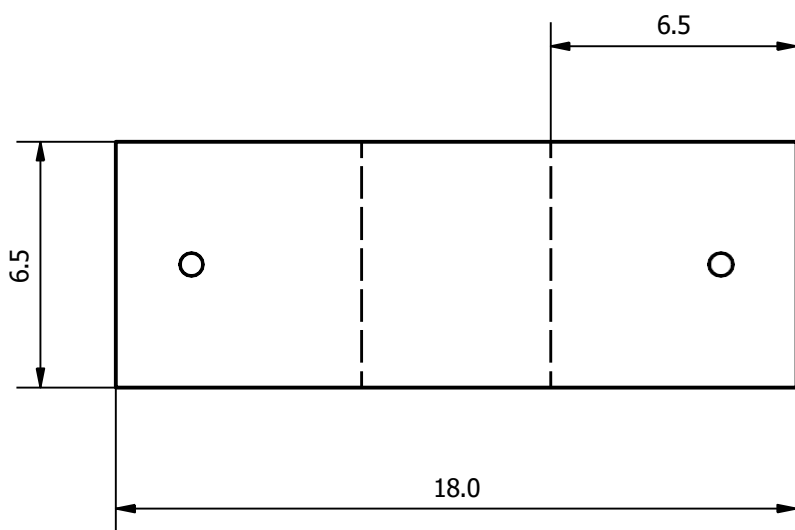
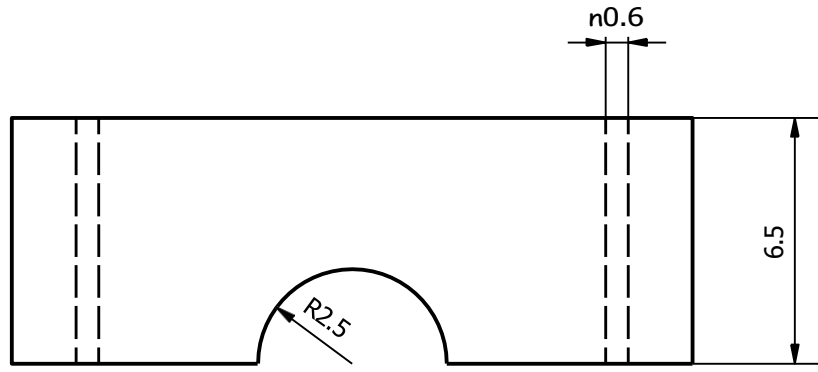
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos	ESCALA 1:8
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		ESTUDIANTES: Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández	UNIDADES Centímetros
N° PLANO: C1	FECHA: 20/02/2026	DETALLE BASE PARA MOTOR	



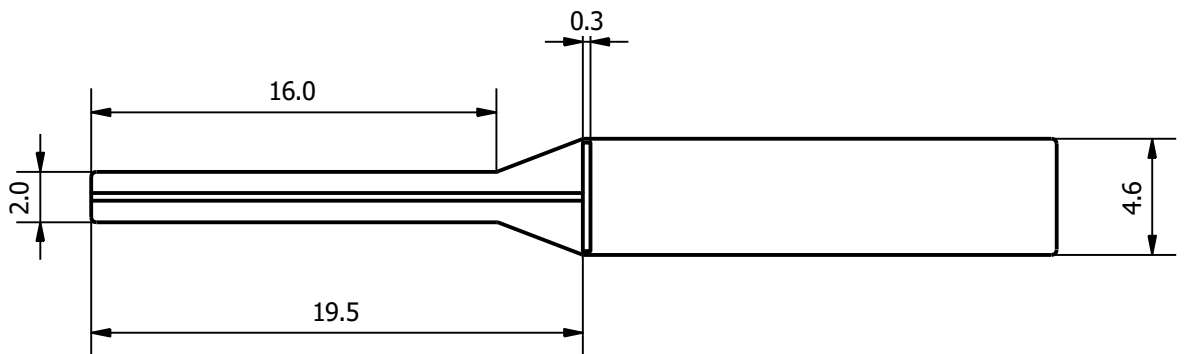
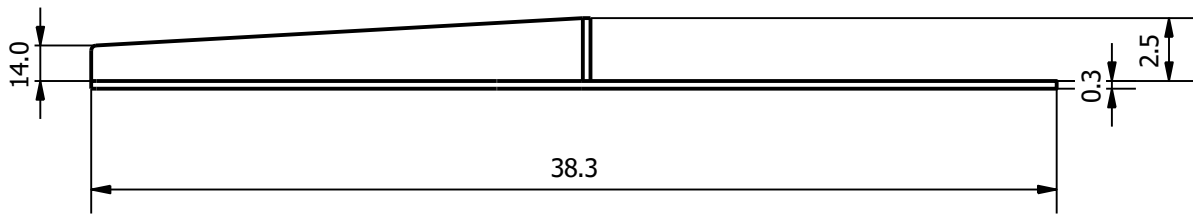


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos	ESCALA 1:2
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		ESTUDIANTES: Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández	UNIDADES Centímetros
N° PLANO: C1.1	FECHA: 20/02/2026	DETALLE 1.1: TAMBOR DE FRENO	

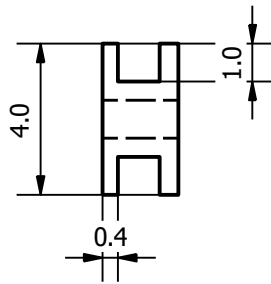
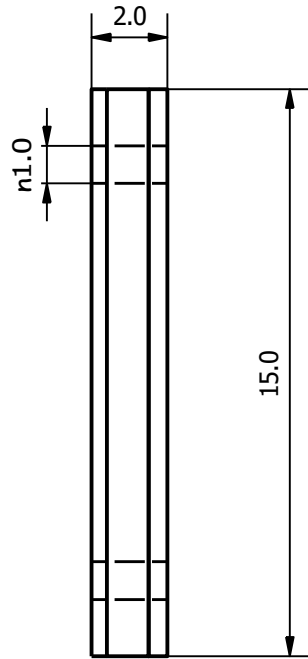




UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos	ESCALA 1:2
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		ESTUDIANTES: Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández	UNIDADES Centímetros
N° PLANO: C1.2	FECHA: 20/02/2026	DETALLE 1.2: ZAPATA DE MADERA	

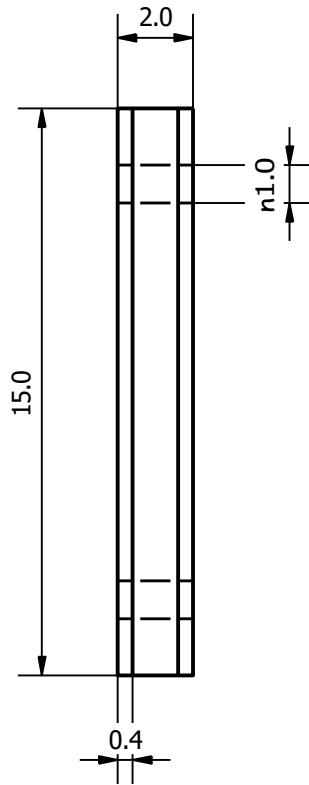
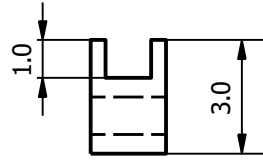


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos	ESCALA 1:3
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández	UNIDADES Centímetros
N° PLANO: C1.3	FECHA: 20/02/2026	DETALLE 1.3: FRENO DE PALANCA	



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos	ESCALA 1:2
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández	UNIDADES Centímetros
N° PLANO: D1	FECHA: 20/02/2026	DETALLE CARRIL CENTRAL	





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco didáctico de motores eléctricos trifásicos	ESCALA 1:2
DOCENTE ASESOR: Ing. Rigoberto Velásquez Paz		Juan Ramón Contreras Villeda Ana Ruth López González Marcos Ernesto Padilla Trejo Katherine Marlene Rodríguez Hernández	UNIDADES Centímetros
N° PLANO: E1	FECHA: 20/02/2026	DETALLE CARRIL LATERAL	



Anexo B: Cotizaciones

Lamina lisa 3/64.



Lámina hierro negro 1.19
mm (3/64") comercial
0.90 mm (2 x 1) m

\$1790

LÁMINA HIERRO NEGRO 3/64 0.90MM 2X1 METRO
Código: SV-3011025

Cantidad

1

Agregar

Rodos para banco.



Rodo giratorio de hule con
freno color negro de 3 plg 90
lbs 1pk

Sku#: 433777 Modelo:

10+ Disponible(s)

\$5.95^{Uni}

- 1 +

Agregar al carrito

[Consulta la disponibilidad](#)

Riel din para bastidores.



Riel din para bornes y
automatos

Sku#: 29594 Modelo:

10+ Disponible(s)

\$3.95^m

- 1 +

Agregar al carrito

Disyuntor 2 polos.



AUTOMATO 3 POLOS 6 AMPS. 6KA 400V
CHINT

Automatos Chint

\$11.30

Disyuntor 3 polos.



AUTOMATO 2 POLOS 6 AMPS. 6KA 400V
CHINT

Automatos Chint

\$7.57

Relé bimetálico.



RELE BIMETALICO 2.5 – 4A P/CONTACTOR
NC1-09-38A UL CHINT

Relé térmico (Bimetálico)

\$14.69

Pulsador.



chint-electric.ru

667232

PULSADOR VERDE ILUMINADO
110/220VAC 1NO 22MM PLASTICO CHINT

Botonería

\$11.30

Luminarias.



LAMPARA LED PARA SEÑALIZACION 120-230 V~ VERDE

CODIGO 625449 / MODELO ND16-22DS/4-G

[Agregar a favoritos](#)

\$3.90

1

[Agregar a carrito](#)

UNIDAD: C/U
CHINT

[Disponible](#)
Despacho a domicilio

[Disponible](#)
Retiro en tienda

Analizador de red Klemsan.



CONTROLADOR DE FACTOR DE POTENCIA 12 ETAPAS, 120-510VAC 60HZ
96*96MM KLEMSAN

Controladores de factor de potencia

\$414.71

Enchufe tipo Jack.



Conector Banana Hembra Rojo 4mm

\$ 5.00

Agregar al carrito

Tubo estructural chapa 14, ½ in.

TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO (1 in) 25.4 mm x 6 m CHAPA 14 (1.80 mm)



CODIGO 1203311 / MODELO 5500497

\$12.00 UNIDAD: c/u

- 1 +

- CUMPLE NORMA ASTM A 500
- UTILIZADO EN CONSTRUCCIÓN, OBRA ESTRUCTURAS EN GENERAL

ADVERTENCIA DE SEGURIDAD

PARA LA UTILIZACION DE ESTE PRODUCTO SEGURIDAD DEL FABRICANTE INCLUIDAS EI

GARANTIA

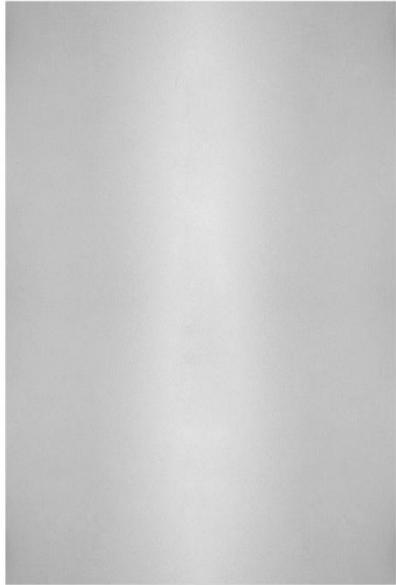


Lámina de acero inoxidable calibre 3.0 mm de 2 x 1 m

Sku#: 8206 Modelo:

10+ Disponible(s)

\$199.90^{Uni}

- 1 +

Agregar al carrito

[Consulta la disponibilidad](#)

Garantía 1 mes

Advertencia de uso

* Todos nuestros productos deben pasar la revisión correspondiente para aplicar la garantía

Lamina Lisa Ac. Inox. 3/16.

Lamina ACM.



MED-080

Báscula digital gramera, hasta 5 kg

Compartir en



★★★★★ (6)

USD17.99

 [Comprar por WhatsA](#)

Haz mediciones de peso con alta precisión

Resolución de 1 gramo

Capacidad de hasta 5Kg

Función tara

Función de auto apagado por inactividad

Indicador de estado de batería

Balanza Digital.



ACM - INCO

93,34 \$ USD* · [En stock](#) · Marca: INCO