

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA MÁQUINAS
ELÉCTRICAS DEL LABORATORIO 12-106 EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
PASCUAL BRAVO**

**YESMITH ADRIANA AGAMEZ JARAMILLO
JAIME ALBERTO HIGUITA HIGUITA**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS
MEDELLÍN
2024**

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA MÁQUINAS
ELÉCTRICAS DEL LABORATORIO 12-106 EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
PASCUAL BRAVO**

**YESMITH ADRIANA AGAMEZ JARAMILLO
JAIME ALBERTO HIGUITA HIGUITA**

Trabajo de grado para obtener el título de Tecnólogo en Sistemas Electromecánicos

**Asesor: WILLIAM OROZCO MURILLO
MsC En Gestión Energética Industrial**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS
MEDELLÍN
2024**

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE FOTOS	8
INDICE DE TABLAS	10
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1. Descripción.	13
1.2. Formulación.	14
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	16
3.1. Objetivo general.	16
3.2. Objetivos específicos.	16
4. REFERENTES TEÓRICOS	17
4.1. Definición de mantenimiento	17
4.2. Tipos de mantenimiento	18
4.2.1. Mantenimiento correctivo:	18
4.2.2. Mantenimiento preventivo:	19
4.2.3. Mantenimiento predictivo:	19
4.2.4. Mantenimiento productivo total	19
4.2.5. Mantenimiento centrado en la confiabilidad:	20
4.2.6. Mantenimiento basado en el riesgo:	20
4.3. Definición de las máquinas eléctricas	20
4.3.1. Generadores:	21
4.3.1.1. Componentes de un generador eléctrico:	21
4.3.2. Motores eléctricos:	21
4.4. Mantenimiento de máquinas eléctricas en específico	22
4.5. Definiciones y esquemas básicas	22
4.6. Aspectos mecánicos de las máquinas eléctricas	23
Constitución general de una máquina eléctrica rotativa	23
4.7. Anotaciones finales sobre mantenimiento eléctrico y mecánico de máquinas eléctricas	23

Mantenimiento Eléctrico:	23
Mantenimiento Mecánico:	24
Trabajo en conjunto:	24
5. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO	25
5.1. Motor 1	25
5.2. Motor 2	26
5.3. Motor 3	27
5.4. Motor 4	28
5.5. Motor 5	30
5.6. Motor 6	30
5.7. Motor 7	32
5.8. Motor 8	33
5.9. Motor 9	34
5.10. Motor 10	36
6. RESULTADOS DE LA PROPUESTA	38
6.1 Registro fotográfico del tipo de motores del salón 106 bloque 2	38
6.2 Elaboración de códigos	40
6.2.1. Codificación los motores del aula 106 bloque 12	40
6.3 Inventario de máquinas	41
6.4 Plano de ubicación de los módulos del 1 al 10	42
6.5 Ficha técnica de los motores	42
6.5.1 Motor de inducción trifásico con rotor en jaula	42
1. Datos técnicos del equipo	42
2. Especificaciones del motor	42
3. Condiciones generales	43
4. Componentes de la maquina	43
6.5.2. Generador Convertidor sincrónico monofásico	43
1. Datos técnicos del equipo	43
2. Especificaciones del motor	44
3. Condiciones generales	44
4. Componentes de la maquina	44

6.5.3. Generador DC	45
1.Datos técnicos del equipo	45
2.Especificaciones del motor	45
3.Condiciones generales	45
4.Componentes de la maquina	45
6.5.4. Motor schrage	46
1.Datos técnicos del equipo	46
2.Especificaciones del motor	46
3.Condiciones generales	46
4.Componentes de la maquina	47
6.5.5. Generador sincrónico con armadura en el rotor	47
1.Datos técnicos del equipo	47
2.Especificaciones del motor	47
3.Condiciones generales	48
4.Componentes de la maquina	48
6.5.6. Motor de inducción en jaula adaptado a una carcasa de rotor devanado	48
1.Datos técnicos del equipo	48
2.Especificaciones del motor	49
3.Condiciones generales	49
4.Componentes de la maquina	49
6.5.6. Motor de inducción trifásico con rotor en jaula	50
1.Datos técnicos del equipo	50
2.Especificaciones del motor	50
3.Condiciones generales	50
4.Componentes de la maquina	50
6.6. Actividad de mantenimiento	51
6.6.1. Mantenimientos correctivos	51
6.6.2. Mantenimientos preventivos	53
6.7. Frecuencia del mantenimiento	56
6.8. Recomendaciones	56
6.9 Formato de uso	57

6.8. Planificación del mantenimiento	58
7. METODOLOGÍA	59
7.1. Tipo de proyecto	59
7.2 Método	60
7.3. Instrumentos de recolección de información	60
7.3.1 Fuentes primarias:	60
8. RECURSOS	61
8.1 Humanos	61
8.2 Técnicos	61
8.3 presupuesto	61
9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	62
10. CONCLUSIONES	63
11. REFERENCIAS.	64
12. ANEXOS	65
Anexo 1 Elementos para el control de motores eléctricos	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo organizacional de Henry Ford	17
Figura 2 Modelo organizacional de Henry Ford reformado	18
Figura 3 Instructivo para generar códigos.....	40
Figura 4 Plano del aula 106 bloque 12 (elaboración propia)	42
Figura 5 Plano explosionado de un motor eléctrico	43
Figura 6 Vista interna de un motor eléctrico con sus partes.....	44
Figura 7 Vista interna de un motor eléctrico con sus partes.....	46
Figura 8 Vista interna de un motor eléctrico.....	47
Figura 9 Vista interna de un motor eléctrico.....	48
Figura 10 Vista interna y partes de un motor eléctrico	49
Figura 11 Vista interna de un motor eléctrico.....	51
Figura 12 Instructivo para generar códigos para el mantenimiento (elaboración propia).....	51
Figura 13 Rodamientos y sellos eléctricos.....	54

INDICE DE FOTOS

Foto 1 Imagen completa del módulo 1.....	25
Foto 2 Motor de inducción trifásica con placa en mal estado.....	26
Foto 3 Imagen completa del módulo 2.....	26
Foto 4 Motor generador sincrónico con armadura en el estator, conexiones expuestas y sucio.....	26
Foto 5 motor de inducción trifásico con rotor devanado, placa no visible, ni legible.....	27
Foto 6 Cables expuestos.....	27
Foto 7 cables expuestos, caja sin tapa y muy sucia (riesgo eléctrico).....	27
Foto 8 Imagen completa del módulo 3 con un solo motor.....	27
Foto 9 Motor de inducción con rotor en jaula, sin ficha técnica.....	28
Foto 10 Caja sin tapa, contactos expuestos.....	28
Foto 11 Imagen completa del módulo 4.....	28
Foto 12 Motor generador DC, sin ficha técnica.....	29
Foto 13 Motor de inducción en jaula.....	29
Foto 14 Caja sin tapa, contactos expuestos.....	29
Foto 15 Imagen completa del módulo 5 sin un motor.....	30
Foto 16 Motor de inducción con rotor en jaula, las placas no son legibles.....	30
Foto 17 Imagen completa del módulo 6.....	30
Foto 18 Motor de inducción trifásico con rotor.....	31
Foto 19 Generador DC sin ficha técnica.....	31
Foto 20 Motores sin placa, sin tapas en las conexiones.....	31
Foto 21 Imagen completa módulo 7.....	32
Foto 22 Motor de inducción con rotor en jaula. Ficha técnica no legible y en mal estado.....	32
Foto 23 Caja y cables expuestos.....	32
Foto 24 Motor generador DC sin placa que contenga su información.....	33
Foto 25 Imagen completa del módulo sin numeración.....	33
Foto 26 Motor de inducción con rotor en jaula sin placa.....	33
Foto 27 Motor generador DC sin placa.....	34
Foto 28 Caja con cables abierta y sucia.....	34
Foto 29 Imagen completa del módulo 9.....	34
Foto 30 Motor generador sincrónico con armadura en el rotor.....	35
Foto 31 Motor de inducción Schrage borneras expuestas.....	35
Foto 32 Cables expuestos y caja sin tapa.....	35
Foto 33 Cables expuestos y desconectados.....	35

Foto 34 Imagen completa del módulo 10 sin placa	36
Foto 35 Motor de inducción con rotor en jaula	36
Foto 36 Cables expuestos, caja sin tapa	36
Foto 37 Generador convertidor sincrónico monofásico con borneras expuestas y sucias.....	37
Foto 38 Motor de inducción trifásico con rotor en jaula	38
Foto 39 Convertidor sincrónico monofásico	38
Foto 40 Motor Schrage	38
Foto 41 Generador DC	39
Foto 42 Generador sincrónico con armadura en el rotor.....	39
Foto 43 Motor de inducción en jaula adaptado a una carcasa de rotor devanado	39
Foto 44 Motor de inducción trifásico con rotor en jaula con conexiones en el panel didáctico ..	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Codificación (elaboración propia).....	41
Tabla 2 Inventario de maquinas del aula 106 bloque 12 (elaboración propia).....	41
Tabla 3 Ficha técnica Motor de inducción trifásico con rotor en jaula	42
Tabla 4 Especificaciones del motor de inducción trifásico	42
Tabla 5 Condiciones generales del Motor de inducción trifásico.....	43
Tabla 6 Ficha técnica del Generador convertidor sincrónico monofásico.....	43
Tabla 7 Especificaciones del generador convertidor.....	44
Tabla 8 Condiciones generales del generador convertidor	44
Tabla 9 Ficha técnica Generador DC.....	45
Tabla 10 Especificaciones del Generador DC	45
Tabla 11 Condiciones generales del generador DC.....	45
Tabla 12 Ficha técnica Motor Schrage	46
Tabla 13 Especificaciones del motor Schrage	46
Tabla 14 Condiciones generales del motor Schrage.....	46
Tabla 15 Ficha técnica Generador Sincrónico	47
Tabla 16 Especificaciones del motor generador sincrónico	47
Tabla 17 Condiciones generales del generador sincrónico.....	48
Tabla 18 Ficha técnica motor de inducción en jaula	48
Tabla 19 Especificaciones del motor de inducción en jaula	49
Tabla 20 Condiciones generales del motor de inducción en jaula.....	49
Tabla 21 Ficha técnica motor de inducción trifásico.....	50
Tabla 22 Especificaciones del motor de inducción trifásico	50
Tabla 23 Condiciones generales del motor de inducción trifásico.....	50
Tabla 24 Mantenimiento correctivo	51
Tabla 25 Descripción de los mantenimientos correctivos.....	52
Tabla 26 Mantenimiento preventivo	53
Tabla 27 Mantenimiento preventivo actividad 1	54
Tabla 28 Mantenimiento preventivo actividad 2	55
Tabla 29 Mantenimiento preventivo actividad 3	56
Tabla 30 Frecuencia de los mantenimientos.....	56
Tabla 31 Frecuencia de mantenimiento correctivo y preventivo anual.....	58
Tabla 32 Presupuesto	61
Tabla 33 Cronograma del trabajo de grado	62

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la educación técnica y profesional, la formación de tecnólogos en el área de la electromecánica y de los demás programas académicos que ofrece la Institución Universitaria Pascual Bravo y el Instituto Técnico Industrial Pascual Bravo en el nivel técnico, requieren no solo de conocimientos teóricos, sino también de una sólida experiencia práctica.

En este sentido, el laboratorio 12-106 se ha convertido en un espacio fundamental para el aprendizaje y la aplicación de conceptos relacionados con las máquinas eléctricas. Sin embargo, la falta de un plan de mantenimiento adecuado para los equipos del laboratorio ha generado preocupaciones sobre su operatividad y eficiencia.

Las máquinas eléctricas, como los motores de corriente alternan (AC) y corriente continua (DC), son esenciales para la realización de prácticas académicas. No obstante, estas máquinas están sujetas a diversas fallas que pueden comprometer su rendimiento y, por ende, la calidad de la formación que reciben los estudiantes. Entre las fallas más comunes se encuentran el sobrecalentamiento, el desgaste de los rodamientos y problemas en los devanados, lo que resalta la necesidad de implementar un plan de mantenimiento preventivo que garantice su disponibilidad y confiabilidad.

El presente trabajo tiene como objetivo elaborar un plan de mantenimiento preventivo para las máquinas eléctricas del laboratorio 12-106. Para ello, se ha realizado un diagnóstico visual del estado actual de cada máquina, así como un registro fotográfico que documenta su condición. Este diagnóstico es crucial, ya que permite identificar las necesidades específicas de mantenimiento y establecer un protocolo que asegure el correcto funcionamiento de los equipos. Además, se ha observado que las máquinas eléctricas del laboratorio no cuentan con fichas técnicas actualizadas ni han recibido mantenimiento desde su adquisición. Esta situación no solo pone en riesgo la operatividad de los equipos, sino que también puede generar costos elevados en reparaciones futuras. Por lo tanto, es imperativo desarrollar un formato de uso para cada máquina, que incluya pautas claras sobre el mantenimiento preventivo a seguir.

La implementación de un plan de mantenimiento preventivo no solo beneficiará a los equipos del laboratorio, sino que también fomentará una cultura de cuidado y responsabilidad entre los

estudiantes y el personal docente. Al establecer procedimientos claros y accesibles, se espera que los usuarios del laboratorio puedan maximizar la vida útil de las máquinas y minimizar los tiempos de inactividad.

Este trabajo se fundamenta en la premisa de que un mantenimiento adecuado es esencial para garantizar la calidad de los procesos académicos y de investigación. Al proporcionar un marco estructurado para el mantenimiento de las máquinas eléctricas, se busca optimizar su operación y contribuir al desarrollo de competencias técnicas en los estudiantes.

Finalmente, se espera que los resultados de este trabajo no solo sirvan como una guía para el mantenimiento de los equipos del laboratorio 12-106, sino que también puedan ser replicados en otros laboratorios de la Institución Universitaria Pascual Bravo, promoviendo así un enfoque integral hacia el mantenimiento de maquinaria eléctrica en el ámbito académico.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción.

En la actualidad, el mantenimiento de maquinaria eléctrica es de vital importancia para garantizar la operatividad y eficiencia de diversos procesos industriales y académicos. En el contexto de las máquinas eléctricas, como los motores de corriente alterna (AC) y corriente continua (DC), se destacan tres tipos de mantenimiento: preventivo, predictivo y correctivo. El mantenimiento preventivo implica la realización de actividades planificadas para evitar fallos y maximizar la vida útil de los equipos. El mantenimiento predictivo se basa en el monitoreo continuo de parámetros clave para identificar posibles problemas antes de que ocurran. Mientras tanto, el mantenimiento correctivo aborda las averías una vez que estas han ocurrido, con el objetivo de restablecer la funcionalidad de la maquinaria lo antes posible.

Las máquinas eléctricas rotativas, como los motores AC y DC, están sujetas a diversas fallas que pueden afectar su rendimiento y causar interrupciones en los procesos productivos. Algunas de las fallas más comunes incluyen sobrecalentamiento, desgaste de los rodamientos, desequilibrio en el rotor y problemas en los devanados. Estas fallas pueden generar costos significativos por reparaciones y tiempos de inactividad no planificados. Por lo tanto, es imperativo estructurar un plan de mantenimiento adecuado que permita prevenir y mitigar estas fallas de manera eficiente.

El objetivo general de desarrollar un plan de mantenimiento para el laboratorio de máquinas eléctricas en la Institución Universitaria Pascual Bravo se fundamenta en la necesidad de garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos eléctricos rotativos, especialmente los motores AC y DC utilizados para fines académicos y de investigación. Este plan busca establecer pautas y procedimientos para la realización de actividades de mantenimiento preventivo y predictivo, con el fin de optimizar la operación de los equipos y prolongar su vida útil.

El desarrollo de un plan de mantenimiento para la Institución Universitaria Pascual Bravo no solo contribuirá a la preservación de sus activos y al aseguramiento de la calidad en los procesos académicos y de investigación, sino que también promoverá una cultura de cuidado y mantenimiento de los equipos en la comunidad universitaria. Además, al establecer un plan estructurado, se facilitará la gestión de recursos y se reducirán los tiempos de inactividad, lo que

impactará positivamente en la continuidad y eficiencia de las actividades llevadas a cabo en el laboratorio de máquinas eléctricas.

1.2. Formulación.

¿Qué tipo de mantenimiento se les realiza a las máquinas rotatorias AC y DC del bloque 12, aula 106?

2. JUSTIFICACIÓN

Al laboratorio 12-106 del departamento de eléctrica asisten diariamente estudiantes a realizar procesos prácticos de las asignaturas que ven durante el semestre en las ingenierías y tecnologías, allí se encuentran las 20 máquinas seleccionadas para la elaboración del presente proyecto, son de las más usadas y que llevan tiempo dentro del laboratorio.

Elaborar un plan de mantenimiento preventivo de máquinas eléctricas es elaborar una ruta de trabajo primordial para el adecuado desempeño de una máquina, pues esto determina una descripción detallada de los procesos y procedimientos necesarios para garantizar la durabilidad y servicio de la maquinaria y reducir costos futuros. Lo primero a tener en cuenta es el estado actual de los equipos con el fin de identificar posibles problemas, por esto para la Institución Universitaria Pascual Bravo, facultad de eléctrica es de vital importancia contar con estos planes de mantenimiento dentro del laboratorio.

Con lo anterior se realiza una hoja de ruta para el personal del laboratorio y todos los estudiantes que asisten a este espacio que les permite conocer el uso adecuado del equipo y los momentos en que a esta debe realizarse mantenimiento con el fin de conservarla funcionalmente.

El no tener un plan de mantenimiento para los equipos reduce la vida útil de los mismos, aumenta el riesgo de daño o avería y genera implicaciones negativas por los costos elevados en futuras reparaciones.

En definitiva, realizar un plan de mantenimiento es fundamental para mantener el funcionamiento óptimo de los equipos y prevenir problemas costosos. Para ello la Institución deberá adaptarlo a las necesidades, el uso continuo de los equipos y la antigüedad de las máquinas en funcionamiento

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general.

Elaborar un plan de mantenimiento preventivo para las máquinas eléctricas del laboratorio 12-106 del departamento de eléctrica en la Institución Universitaria Pascual Bravo.

3.2. Objetivos específicos.

- ✓ Realizar un registro fotográfico donde se evidencia el estado de las máquinas.
- ✓ Elaborar un formato de registro de los mantenimientos preventivos y correctivos de cada máquina
- ✓ Elaborar un formato de uso de cada máquina que permita tener control de la constancia de su uso

4. REFERENTES TEÓRICOS

4.1. Definición de mantenimiento

Según Olarte & Botero (2010) se define el mantenimiento como el conjunto de actividades encaminadas a garantizar el correcto funcionamiento de las máquinas e instalaciones que conforman un proceso de producción permitiendo que éste alcance su máximo rendimiento.

Igualmente, en este texto se habla un poco de historia relacionada con el mantenimiento industrial, pues informa que las empresas anteriormente estaban conformadas por grupos de personas que tenían que trabajar en cada uno de los pasos del proceso de producción y a su vez reparar las herramientas y las máquinas cuando presentaban alguna avería. Debido a que los trabajadores desarrollaban múltiples oficios, el elaborar un producto terminado para ofrecerlo en el mercado implicaba un alto costo en tiempo y dinero. Con el objetivo de ganar más, invirtiendo menos, posteriormente las empresas se vieron obligadas a distribuir a sus trabajadores para que se dedicaran a tareas específicas, dichas tareas fueron de dos tipos: Tareas de operación de las máquinas y tareas de reparación de las mismas.

Se sabe que, en 1930, el empresario automotriz Henry Ford, implementó un nuevo sistema de organización al interior de su empresa al cual llamó "Producción en cadena". Este nuevo sistema, fue establecido a través de la asignación de responsabilidades organizadas como se ilustra en la siguiente ilustración



Figura 1 Modelo organizacional de Henry Ford

Con el nuevo modelo de Ford, surge el concepto de mantenimiento, el cual dependía del departamento de operación quien era el que determinaba en qué momento se debían realizar las labores de reparación. Con la Segunda Guerra Mundial, las empresas tuvieron que aumentar

su producción para suplir la demanda del mercado; para esto, fue necesario incrementar sus jornadas laborales. Esta manera apresurada de producir en grandes cantidades y por largos periodos de tiempo hizo que las máquinas se desgastan debido al exceso de uso y por lo tanto a presentar fallas en su funcionamiento.

La reparación de las máquinas implicaba la parada del proceso de producción lo cual generaba grandes pérdidas. Con el fin de evitar estas paradas, los empresarios le dieron una mayor importancia al mantenimiento reestructurando sus modelos organizacionales tal como se ilustra en la ilustración 2.

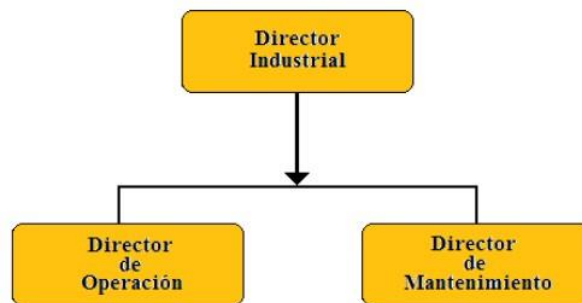


Figura 2 Modelo organizacional de Henry Ford reformado

A partir de este modelo, se toma entonces el mantenimiento como una herramienta vital para las empresas y se vuelve una actividad correctiva o de reparación, así, con el tiempo estas actividades se han convertido en actividades que la mayoría de las empresas realizan, se preocupan por realizar labores de inspección de las máquinas, reparar o cambiar piezas defectuosas antes que se produzcan daños en sus máquinas. (Olarte C. Botero A, 2010)

4.2. Tipos de mantenimiento

4.2.1. Mantenimiento correctivo: Al mantenimiento correctivo también se le denomina mantenimiento reactivo, este mantenimiento se aplica cuando el activo deja de operar, porque se presenta una falla funcional o avería y su objetivo es poner en marcha su funcionamiento, afectando lo menos posible la productividad; generalmente se repara o se reemplaza el componente del equipo, haciéndolo en el menor tiempo posible. (Pinzón, 2023)

Se pueden encontrar dos clases de mantenimiento correctivo: el primero, mantenimiento correctivo no programado o de emergencia: se ejecuta cuando aparece la falla en el

activo, generando la respectiva parada, de manera que se debe remover la pieza averiada y reponerla de inmediato, ya sea nueva o usada, el segundo tipo es el mantenimiento correctivo programado o planificado: se realiza cuando se detecta que algún componente de una máquina está próximo a fallar, por lo tanto, se hace la programación del trabajo de mantenimiento para corregir la falla potencial.

4.2.2. Mantenimiento preventivo: El mantenimiento preventivo se fundamenta en una serie de labores o actividades planificadas que se llevan a cabo dentro de periodos definidos, se diseña con el objetivo de garantizar que los activos de las compañías cumplan con las funciones requeridas dentro del entorno de operaciones para optimizar la eficiencia de los procesos; para prevenir y adelantarse a las fallas de los elementos, componentes, máquinas o equipos; como también hace referencia a diferentes acciones, como cambios o reemplazos, adaptaciones, restauraciones, inspecciones, evaluaciones, etc., realizadas en periodos de tiempos por calendario

4.2.3. Mantenimiento predictivo: El mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento, donde se asocia la relación de parámetros físicos con el desgaste o estado de un activo, en este se tiene en cuenta la medición, el seguimiento y el monitoreo de parámetros y las condiciones de operación de un activo empresarial. En el activo, se evalúan, se controlan y se gestionan valores de alarma y de actuación de todas aquellas variables que se contemplan relevantes de medir y gestionar.

En este tipo de mantenimiento se realizan una serie de pruebas de carácter no destructivo, guiadas a realizar un seguimiento de operación de los equipos para capturar los signos de advertencia que indiquen que alguna de sus partes no está trabajando de forma adecuada.

4.2.4. Mantenimiento productivo total Ventajas Mantenimiento productivo total es la traducción de TPM (Total Productive Maintenance). El TPM es el sistema japonés de mantenimiento industrial la letra M representa acciones de MANAGEMENT y Mantenimiento. Es un enfoque de realizar actividades de dirección y transformación de empresa. La letra P está vinculada a la palabra “Productivo” o “Productividad” de equipos”, la letra T de la palabra “Total” se interpreta como “Todas las actividades que realizan todas las personas que trabajan en la empresa”.

Es un sistema de organización donde la responsabilidad no recae sólo en el departamento de mantenimiento sino en toda la estructura de la empresa “El buen funcionamiento de las máquinas o instalaciones depende y es responsabilidad de todos”.

El sistema está orientado a lograr:

- Cero accidentes
- Cero defectos
- Cero fallas
- Cero tiempos de alistamiento
- Cero contaminaciones
- Cero despilfarros

Este sistema nace en Japón, fue desarrollado por primera vez en 1969 en la empresa japonesa Nippondenso del grupo Toyota y de extiende por Japón durante los 70, se inicia su implementación fuera de Japón a partir de los 80

4.2.5. Mantenimiento centrado en la confiabilidad: El mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM es un tipo de gestión de mantenimiento, que optimiza la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, en función del rango de criticidad de los activos, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de falla de dichos activos, sobre la seguridad, al ambiente, a las operaciones.

4.2.6. Mantenimiento basado en el riesgo: Este tipo de mantenimiento de última generación, en el que se direccionan los recursos de mantenimiento hacia los equipos que un análisis de probabilidad-riesgo determine que son los más riesgosos para el aparato productivo. El RBM es especialmente apto para ser aplicado en procesos operativos cuya operación encarna alta peligrosidad, como la industria petroquímica, nuclear, biológicas, etc.

4.3. Definición de las máquinas eléctricas

Una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador, y cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica se llama motor. (Chapman, 2012)

4.3.1. Generadores: Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de sus componentes principales: el rotor (parte giratoria) y el estator (parte estática). Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido). (Fundación Endesa, 2024)

4.3.1.1. Componentes de un generador eléctrico:

Un generador eléctrico consta de varios componentes importantes, entre ellos:

- ✓ Estator: Es la parte fija del generador que contiene los conductores eléctricos y el campo magnético.
- ✓ Rotor: Es la parte móvil del generador que gira y produce el movimiento mecánico necesario para generar la corriente eléctrica.
- ✓ Campo magnético: Es generado por imanes o electroimanes y es esencial para la generación de corriente eléctrica.
- ✓ Conductores eléctricos: Son los cables o bobinas que se encuentran en el estator y que interactúan con el campo magnético para generar la corriente eléctrica. (Conceptualista, 2023)

4.3.2. Motores eléctricos: Un motor eléctrico es una máquina que convierte la energía eléctrica en energía mecánica de rotación por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. A grandes rasgos, está compuesto por un estator y un rotor.

El estator es la parte fija del motor y contiene los polos del imán o las bobinas de alambre que generan el campo magnético. El rotor es la parte móvil y está conectado al eje que produce el movimiento de rotación. (Plaza, 2023)

El motor eléctrico es una máquina electromecánica, la cual combina partes mecánicas y eléctricas para adecuar su mecanismo, por lo que el aparato mecánico requiere del uso de la electricidad para poder operar, convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica de rotación, a través del movimiento de los campos magnéticos, originados en sus bobinas.

Ciertos motores eléctricos, son reversibles, ya que tienen la posibilidad transformar la energía mecánica en energía eléctrica, como si fuera un generador o un dinamo, como por ejemplo los motores utilizados en trenes y autos híbridos.

El motor eléctrico es utilizado en todos los ámbitos productivos, tales como el sector industrial, el comercial, así como también en el ámbito particular. Su uso se puede encontrar en los

ventiladores, en el sistema de vibración de los teléfonos celulares, en las bombas, transporte eléctrico, en los electrodomésticos, compresores entre otros muchos artefactos, este puede funcionar cuando se conecta a un sistema de suministro eléctrico o a una batería.

El motor eléctrico puede ser activado por una fuente de corriente continua – CC o por una fuente de corriente alterna – CA, aspecto que vamos a definir más adelante, igualmente su uso tiene muchas ventajas, ya que es económico, limpio, aporta comodidad y mucha seguridad en su funcionamiento. (Instrumentos de medición, s.f.)

4.4. Mantenimiento de máquinas eléctricas en específico

El mantenimiento específico de máquinas eléctricas se refiere a las actividades empleadas para garantizar el funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil de las máquinas eléctricas.

El mantenimiento preventivo se reduce básicamente a tres puntos:

1. Inspección visual: el ojo experimentado está en capacidad de distinguir conexiones sulfatadas, conexiones o áreas que presenten síntomas de recalentamiento, borneras de empalme flojas, cintas aislantes desprendidas, áreas de contacto a tierra abiertas, formación de óxido en el gabinete, etc. Y proceder a la corrección adecuada de acuerdo al caso.
2. Limpieza: Debe programarse con periodos de tiempo adecuados para cada necesidad en particular es prudente por lo menos cada tres meses dedicar unos minutos para desalojar el polvo acumulado al interior del rectificador. El uso de aire comprimido está permitido para las áreas del transformador, diodos con sus disipadores y S.C.Rs con sus disipadores. Se recomienda el uso de aire comprimido seco del que utilizan los equipos de oxicortes.
3. Equilibrio de corriente: Con una pinza amperimétrica debe medirse el amperaje que está consumiendo el equipo con el fin de diagnosticar problemas de desbalance en la corriente lo cual puede ser indicio de diodos abiertos o en cortocircuito. En caso de encontrar un desbalance mayor al 15% entre fases, debe contactar el personal especializado para una reparación adecuada (AIU)

4.5. Definiciones y esquemas básicas

El mantenimiento preventivo se refiere a las acciones planificadas y regulares realizadas para evitar fallos o degradación en las máquinas eléctricas. Su objetivo es prevenir problemas antes de que ocurran.

Esquema:

- ✓ Inspecciones periódicas.
- ✓ Limpieza y lubricación.
- ✓ Pruebas funcionales.
- ✓ Verificación de aislamiento.
- ✓ Reemplazo de piezas desgastadas.

4.6. Aspectos mecánicos de las máquinas eléctricas

Constitución general de una máquina eléctrica rotativa

Estator y rotor. Entrehierro Una máquina eléctrica rotativa consta básicamente de dos partes: estator y rotor.

El estator es la parte fija de la máquina y tiene forma de cilindro hueco. El rotor se coloca en el interior del estator y es la parte móvil. Entre el estator y el rotor existe una holgura denominada entrehierro, la cual impide que ambas partes rocen entre sí. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.

En el rotor de la máquina se encuentra un núcleo magnético, bien cilíndrico o bien de polos salientes, sobre el que se coloca el devanado, bobinado o arrollamiento del rotor. El núcleo magnético tiene un hueco central donde se sitúa el eje o árbol de la máquina, el cual se fija rígidamente al mismo mediante una chaveta. Si es preciso se coloca un colector en el eje. Un colector es un elemento que permite conectar eléctricamente el devanado del rotor con un circuito exterior. Además, en el rotor también se suelen colocar dispositivos de refrigeración, tales como:

ventiladores, aletas, canales de ventilación, etc. (pozueta, 2015)

4.7. Anotaciones finales sobre mantenimiento eléctrico y mecánico de máquinas eléctricas

Mantenimiento Eléctrico:

- ✓ Inspección regular: Realiza inspecciones periódicas para detectar posibles problemas eléctricos. Verifica conexiones, cables, aislamientos y componentes eléctricos.
- ✓ Limpieza: Limpia los contactos, bornes y componentes eléctricos para evitar acumulación de polvo o suciedad.
- ✓ Calibración: Asegúrate de que los instrumentos de medición estén calibrados correctamente.
- ✓ Pruebas de funcionamiento: Realiza pruebas de carga y verificación del correcto funcionamiento de los circuitos eléctricos.

Mantenimiento Mecánico:

- ✓ Lubricación: Aplica lubricantes adecuados en los rodamientos, ejes y partes móviles para reducir la fricción y el desgaste.
- ✓ Alineación: Verifica la alineación de las partes giratorias (por ejemplo, en motores eléctricos) para evitar vibraciones y desgaste prematuro.
- ✓ Balanceo: Si hay partes desequilibradas, realiza el balanceo necesario para evitar vibraciones excesivas.
- ✓ Inspección visual: Observa cualquier signo de desgaste, corrosión o daño en las partes mecánicas.

Trabajo en conjunto:

La colaboración entre los equipos eléctricos y mecánicos es crucial. Comunicación constante y coordinación son esenciales para un mantenimiento efectivo.

5. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

Para iniciar el proceso se realizó una visita al laboratorio con el fin de realizar un primer acercamiento y diagnóstico de las máquinas, teniendo presente que son 10 módulos que tienen 2 motores cada uno, en esta visita de observación se encontró lo siguiente:

- ✓ Diez módulos compuestos cada uno por un motor DC, un motor AC y un panel de control que a su vez tiene protecciones y bornes para las conexiones que se realizan en las prácticas de los estudiantes que asisten al laboratorio
- ✓ Los módulos y los motores se encuentran con las siguientes características, solo cuentan con una numeración de 1 a 10 (los módulos), no tienen plaqueta de identificación de la universidad, no tienen rotulo que informe el nombre de la máquina, el fabricante, el año de fabricación ni ficha técnica
- ✓ La institución, dentro del laboratorio, no cuenta con las herramientas especializadas para realizar procesos de desensamble y los chequeos necesarios para los motores, lo que no permite que los estudiantes podamos realizar un diagnóstico a mayor profundidad de los motores
- ✓ El estado en que se encuentran conexiones de los motores es de revisión ya que no está protegido, hay cajas deterioradas y rotas, se encuentra presencia de polvo y suciedad en exceso en las conexiones

A continuación, presento un registro fotográfico del estado de los módulos del laboratorio.

Nota aclaratoria: todas las fotos contenidas en el presente trabajo son de autoría propia y fueron tomadas dentro del aula 106 bloque 12, con autorización de los laboratoristas.

5.1. Motor 1



Foto 1 Imagen completa del módulo 1



Foto 2 Motor de inducción trifásica con placa en mal estado

5.2. Motor 2



Foto 3 Imagen completa del módulo 2



Foto 4 Motor generador sincrónico con armadura en el estator, conexiones expuestas y sucio



Foto 5 motor de inducción trifásico con rotor devanado, placa no visible, ni legible

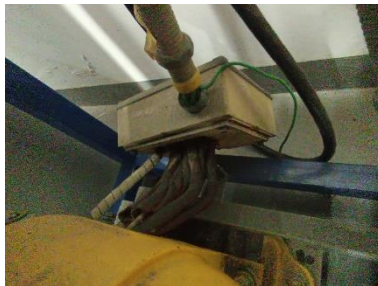


Foto 6 Cables expuestos



Foto 7 cables expuestos, caja sin tapa y muy sucia (riesgo eléctrico)

5.3. Motor 3



Foto 8 Imagen completa del módulo 3 con un solo motor.



Foto 9 Motor de inducción con rotor en jaula, sin ficha técnica.

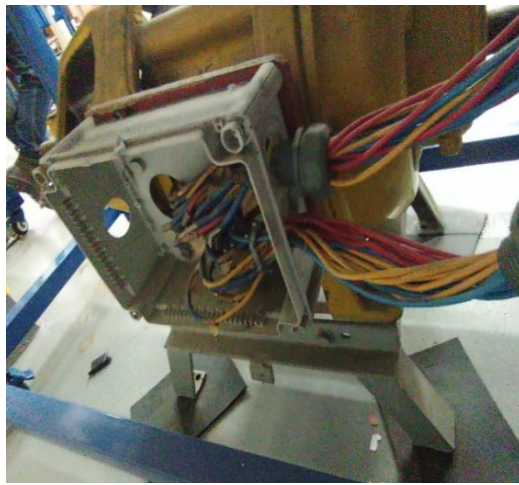


Foto 10 Caja sin tapa, contactos expuestos.

5.4. Motor 4



Foto 11 Imagen completa del módulo 4.



Foto 12 Motor generador DC, sin ficha técnica.



Foto 13 Motor de inducción en jaula.



Foto 14 Caja sin tapa, contactos expuestos.

5.5. Motor 5

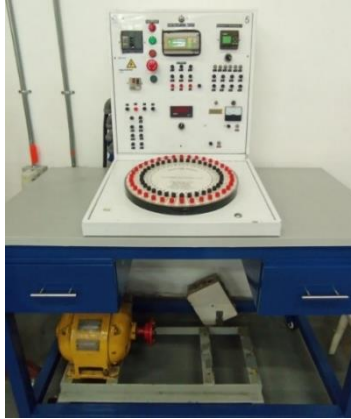


Foto 15 Imagen completa del módulo 5 sin un motor.



Foto 16 Motor de inducción con rotor en jaula, las placas no son legibles.

5.6. Motor 6



Foto 17 Imagen completa del módulo 6



Foto 18 Motor de inducción trifásico con rotor



Foto 19 Generador DC sin ficha técnica



Foto 20 Motores sin placa, sin tapas en las conexiones

5.7. Motor 7



Foto 21 Imagen completa módulo 7



Foto 22 Motor de inducción con rotor en jaula. Ficha técnica no legible y en mal estado



Foto 23 Caja y cables expuestos



Foto 24 Motor generador DC sin placa que contenga su información

5.8. Motor 8



Foto 25 Imagen completa del módulo sin numeración



Foto 26 Motor de inducción con rotor en jaula sin placa



Foto 27 Motor generador DC sin placa



Foto 28 Caja con cables abierta y sucia

5.9. Motor 9



Foto 29 Imagen completa del módulo 9



Foto 30 Motor generador sincrónico con armadura en el rotor



Foto 31 Motor de inducción Schrage borneras expuestas

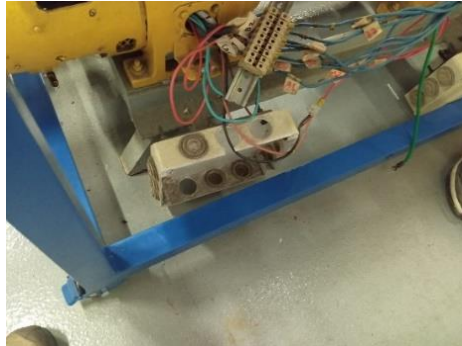


Foto 32 Cables expuestos y caja sin tapa

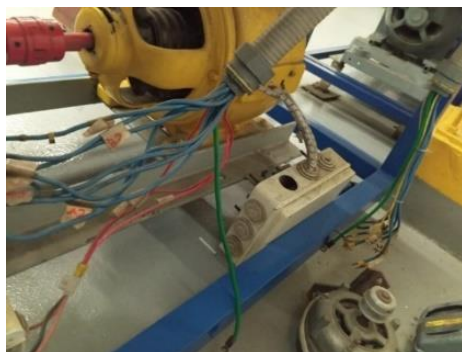


Foto 33 Cables expuestos y desconectados

5.10. Motor 10



Foto 34 Imagen completa del módulo 10 sin placa



Foto 35 Motor de inducción con rotor en jaula

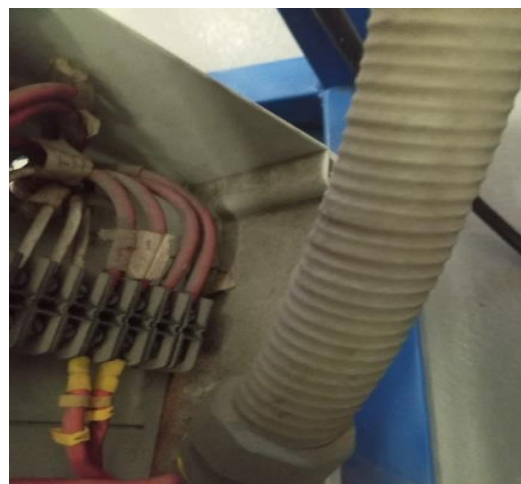


Foto 36 Cables expuestos, caja sin tapa



Foto 37 Generador convertidor sincrónico monofásico con borneras expuestas y sucias

6. RESULTADOS DE LA PROPUESTA

- ✓ Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo para las máquinas eléctricas del laboratorio 12-106 del departamento de eléctrica
- ✓ Diagnóstico visual del estado actual de cada máquina del laboratorio.
- ✓ Registro fotográfico de cada máquina eléctrica de su estado actual
- ✓ Formato de uso de cada máquina

6.1 Registro fotográfico del tipo de motores del salón 106 bloque 2



Foto 38 Motor de inducción trifásico con rotor en jaula



Foto 39 Convertidor sincrónico monofásico



Foto 40 Motor Schrage



Foto 41 Generador DC



Foto 42 Generador sincrónico con armadura en el rotor



Foto 43 Motor de inducción en jaula adaptado a una carcasa de rotor devanado



Foto 44 Motor de inducción trifásico con rotor en jaula con conexiones en el panel didáctico

6.2 Elaboración de códigos

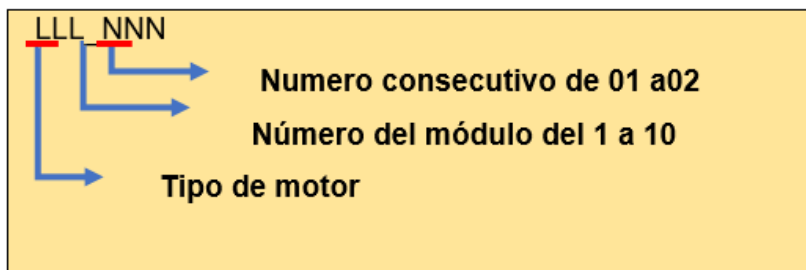


Figura 3 Instructivo para generar códigos

6.2.1. Codificación los motores del aula 106 bloque 12

CODIFICACIÓN	
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
MIT-101_	Motor de inducción trifásico con conexiones en panel didáctico
MIT-201	Motor de inducción trifásico con rotor devanando
GSE-202	Generador sincrónico con armadura en el estator
MIJ-301	Motor de inducción con rotor en jaula
MIJ-401	Motor de inducción con rotor en jaula
GDC-402	Generador DC
MIJ-501	Motor de inducción con rotor en jaula

MIJ-601	Motor de inducción trifásico con rotor en jaula
GDC-602	Generador DC
MIJ-701	Motor de inducción con rotor en jaula
GDC-702	Generador dc
MIJ-801	Motor de inducción con rotor en jaula
GDC-802	Generador dc
MIS-901	Motor de inducción schrage
GSR-902	Generador sincrónico con armadura en el rotor
MIJ-1001	Motor de inducción con rotor en jaula
CSM-1002	Convertidor sincrónico monofásico

Tabla 1 Codificación (elaboración propia)

6.3 Inventario de máquinas

INVENTARIO DE MOTORES DE INDUCCIÓN Y GENERADORES				
Código	Cantidad	Descripción	Año de adquisición	Condición actual
MIT	2	Motor de inducción trifásico con rotor devanando	Desconocido	Bueno sin ficha técnica
MIJ	7	Motor de inducción con rotor en jaula	Desconocido	
MIS	1	Motor de inducción schrage	Desconocido	
GDC	4	Generador DC	Desconocido	
GSE	1	Generador sincrónico con armadura en el estator	Desconocido	
GSR	1	Generador sincrónico con armadura en el rotor	Desconocido	
CSM	1	Convertidor sincrónico monofásico	Desconocido	
TAC	10	Tablero de control	Desconocido	

Tabla 2 Inventario de máquinas del aula 106 bloque 12 (elaboración propia)

6.4 Plano de ubicación de los módulos del 1 al 10

Los módulos tienen un tablero de control, un motor inducido y un motor generador

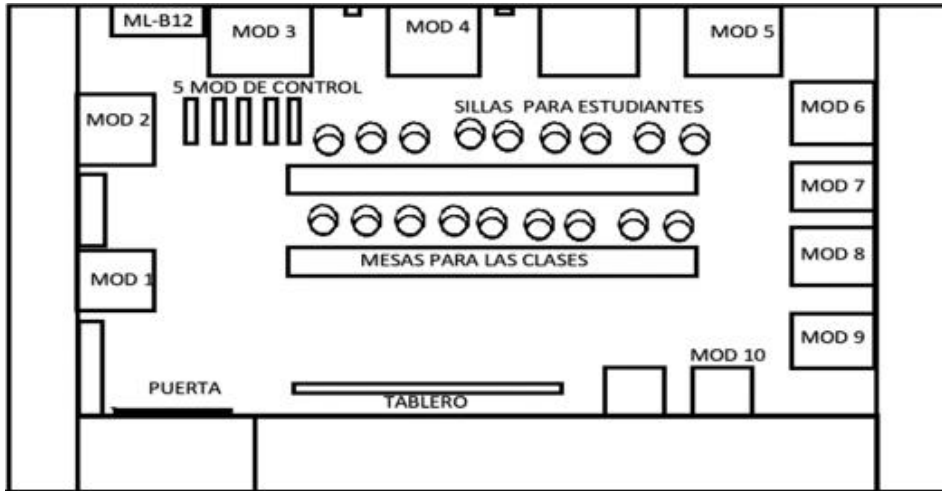


Figura 4 Plano del aula 106 bloque 12 (elaboración propia)

6.5 Ficha técnica de los motores

6.5.1 Motor de inducción trifásico con rotor en jaula

1. Datos técnicos del equipo

FICHA TECNICA	
Nombre	Motor de inducción trifásico con rotor en jaula
Marca	General Electric
Modelo	N/A
Código	MIJ-601
Capacidad de carga	5.01 HP aprox
Año de adquisición	N/A
Ubicación	Salón 106-bloque 12




Tabla 3 Ficha técnica Motor de inducción trifásico con rotor en jaula

2. Especificaciones del motor

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Sistemas de alimentación	220v AC
Lubricante utilizado	Marca: SKF Grasa: LGHQ 2
Rpm	1800
Corriente	17 A
Potencia	3740 W aprox

Tabla 4 Especificaciones del motor de inducción trifásico

3. Condiciones generales

CONDICIONES GENERALES	
Actividad	Formación educativa del pascual bravo
Años de servicio	Mas de 30 años
Criticidad	Alta
Situación actual	Bueno

Tabla 5 Condiciones generales del Motor de inducción trifásico

4. Componentes de la maquina

En la actualidad no se encontraron planos del motor toco buscar lo más parecido al tipo de motor del salón 106.

- Se tuvo en cuenta las partes móviles: rodamientos, eje del rotor
- Se tuvo en cuenta las partes fijas: carcasa del motor

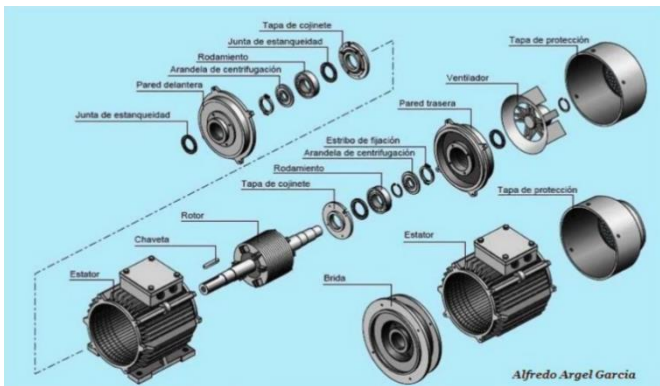


Figura 5 Plano explosionado de un motor eléctrico

Tomado de: https://flickr.com/photos/alfredo_argel/4650887604 (flickr, 2010)

6.5.2. Generador Convertidor sincrónico monofásico

1. Datos técnicos del equipo

FICHA TECNICA	
Nombre	Generador Convertidor sincrónico monofásico
Marca	General Electric
Modelo	N/A
Código	CSM-1002
Capacidad de carga	N/A
Año de adquisición	N/A
Ubicación	Salón 106-bloque 12



Tabla 6 Ficha técnica del Generador convertidor sincrónico monofásico

2. Especificaciones del motor

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Sistemas de alimentación	125/240 v
Lubricantes utilizados	Marca: SKF Grasa: LGHQ 2
Rpm	1800 rpm
Potencia	N/A
Corriente	N/A

Tabla 7 Especificaciones del generador convertidor

3. Condiciones generales

CONDICIONES GENERALES	
Actividad	Formación educativa del pascual bravo.
Años de servicio	Mas de 30 años
Criticidad	Alta.
Situación actual	Bueno.

Tabla 8 Condiciones generales del generador convertidor

4. Componentes de la maquina

En la actualidad no se encontraron planos del motor toco buscar lo más parecido al tipo de motor del salón 106 del bloque 12.

- Se tuvo en cuenta las partes móviles: rodamientos, eje del rotor
- Se tuvo en cuenta las partes fijas: carcasa del motor

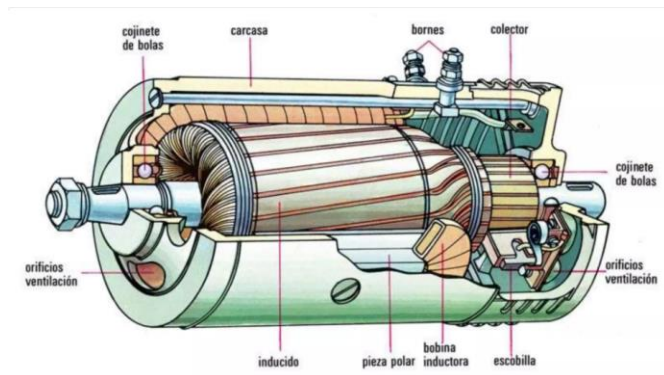


Figura 6 Vista interna de un motor eléctrico con sus partes

Tomado de: (Castillo, 2016)

<https://www.slideshare.net/slideshow/motores-dc-variadores-de-velocidad/63159081#20>

6.5.3. Generador DC

1. Datos técnicos del equipo


FICHA TECNICA		
Nombre	Generador DC	
Marca	General Electric	
Modelo	N/A	
Código	GDC-802	
Capacidad de carga	4,02 HP aprox	
Año de adquisición	N/A	
Ubicación	Salón 106-bloque 12	

Tabla 9 Ficha técnica Generador DC

2. Especificaciones del motor

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Sistemas de alimentación	125 v
Lubricantes utilizados	Marca: SKF Grasa: LGHQ 2
Rpm	1800 rpm
Potencia	3000 W aprox
Corriente	24 A

Tabla 10 Especificaciones del Generador DC

3. Condiciones generales

CONDICIONES GENERALES	
Actividad	Formación educativa del pascual bravo.
Años de servicio	Mas de 30 años
Criticidad	Alta.
Situación actual	Bueno.

Tabla 11 Condiciones generales del generador DC

4. Componentes de la maquina

En la actualidad no se encontraron planos del motor toco buscar lo más parecido al tipo de motor del salón 106 del bloque 12.

- Se tuvo en cuenta las partes móviles: rodamientos, eje del rotor

- Se tuvo en cuenta las partes fijas: carcasa del motor

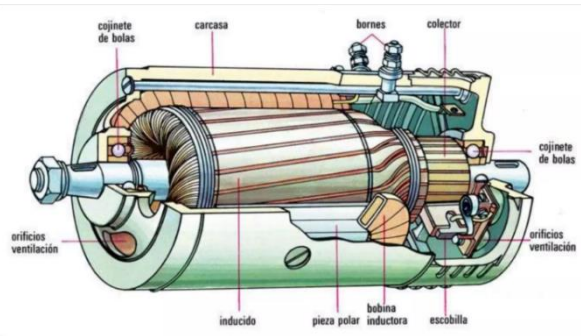


Figura 7 Vista interna de un motor eléctrico con sus partes
Tomado de: (Castillo, 2016)

<https://www.slideshare.net/slideshow/motores-dc-variadores-de-velocidad/63159081#20>

6.5.4. Motor schrage

1. Datos técnicos del equipo

FICHA TECNICA	
Nombre	Motor schrage
Marca	General Electric
Modelo	N/A
Código	MIS-901
Capacidad de carga	3,83 HP Aprox
Año de adquisición	N/A
Ubicación	Salón 106-bloque 12




Tabla 12 Ficha técnica Motor Schrage

2. Especificaciones del motor

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Sistemas de alimentación	Trifásico 220v AC
Lubricantes utilizados	Marca: SKF Grasa: LGHQ 2
Rpm	1800 rpm
Potencia	2860 W aprox
Corriente	13 A

Tabla 13 Especificaciones del motor Schrage

3. Condiciones generales

CONDICIONES GENERALES	
Actividad	Formación educativa del pascual bravo.
Años de servicio	Mas de 30 años
Criticidad	Alta.
Situación actual	Bueno.

Tabla 14 Condiciones generales del motor Schrage

4. Componentes de la maquina

En la actualidad no se encontraron planos del motor toco buscar lo más parecido al tipo de motor del salón 106 del bloque 12.

- Se tuvo en cuenta las partes móviles: rodamientos, eje del rotor
- Se tuvo en cuenta las partes fijas: carcasa del motor

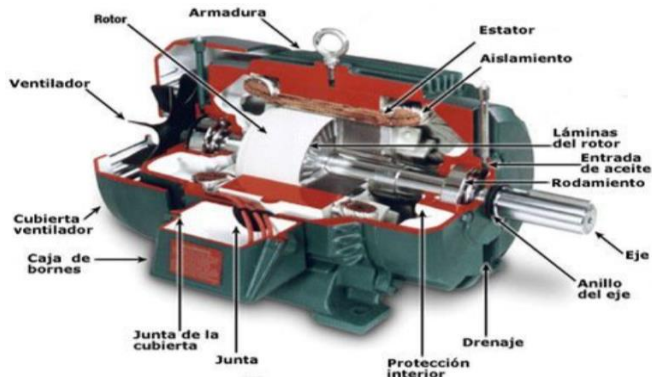


Figura 8 Vista interna de un motor eléctrico

Tomado de: <https://co.pinterest.com/pin/617063586438398157/> (López, s.f.)

6.5.5. Generador sincrónico con armadura en el rotor

1. Datos técnicos del equipo

FICHA TECNICA	
Nombre	Generador síncrono con armadura en el rotor
Marca	General Electric
Modelo	N/A
Código	GSR-902
Capacidad de carga	HP aprox
Año de adquisición	N/A
Ubicación	Salón 106-bloque 12




Tabla 15 Ficha técnica Generador Sincrónico

2. Especificaciones del motor

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Sistemas de alimentación	125v
Lubricantes utilizados	Marca: SKF Grasa: LGHQ 2
Rpm	1800 rpm
Potencia	W
Corriente	A

Tabla 16 Especificaciones del motor generador sincrónico

3. Condiciones generales

CONDICIONES GENERALES	
Actividad	Formación educativa del pascual bravo.
Años de servicio	Mas de 30 años
Criticidad	Alta.
Situación actual	Bueno.

Tabla 17 Condiciones generales del generador sincrónico

4. Componentes de la maquina

En la actualidad no se encontraron planos del motor toco buscar lo más parecido al tipo de motor del salón 106 del bloque 12.

- Se tuvo en cuenta las partes móviles: rodamientos, eje del rotor
- Se tuvo en cuenta las partes fijas: carcasa del motor

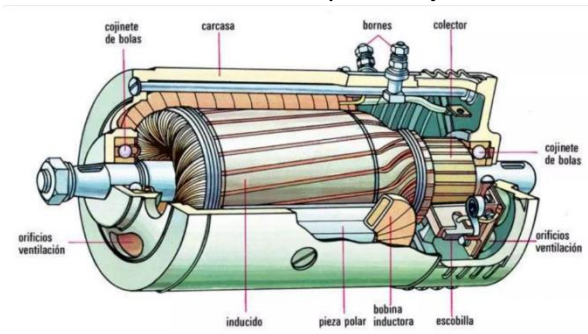


Figura 9 Vista interna de un motor eléctrico
Tomado de: (Castillo, 2016)

<https://www.slideshare.net/slideshow/motores-dc-variadores-de-velocidad/63159081#20>

6.5.6. Motor de inducción en jaula adaptado a una carcasa de rotor devanado

1. Datos técnicos del equipo

FICHA TECNICA		
Nombre	Motor de inducción con rotor en jaula adaptado a una carcasa de rotor devanado	
Marca	General Electric	
Modelo	N/A	
Código	MIJ-301	
Capacidad de carga	3,83 HP aprox	
Año de adquisición	N/A	
Ubicación	Salón 106-bloque 12	

Tabla 18 Ficha técnica motor de inducción en jaula

2. Especificaciones del motor

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Sistemas de alimentación	Trifásico 220v AC
Lubricantes utilizados	Marca: SKF Grasa: LGHQ 2
Rpm	1800 rpm
Potencia	2860 W aprox
Corriente	13 A

Tabla 19 Especificaciones del motor de inducción en jaula

3. Condiciones generales

CONDICIONES GENERALES	
Actividad	Formación educativa del pascual bravo.
Años de servicio	Mas de 30 años
Criticidad	Alta.
Situación actual	Bueno.

Tabla 20 Condiciones generales del motor de inducción en jaula

4. Componentes de la maquina

En la actualidad no se encontraron planos del motor toco buscar lo más parecido al tipo de motor del salón 106 del bloque 12.

- Se tuvo en cuenta las partes móviles: rodamientos, eje del rotor
- Se tuvo en cuenta las partes fijas: carcasa del motor.

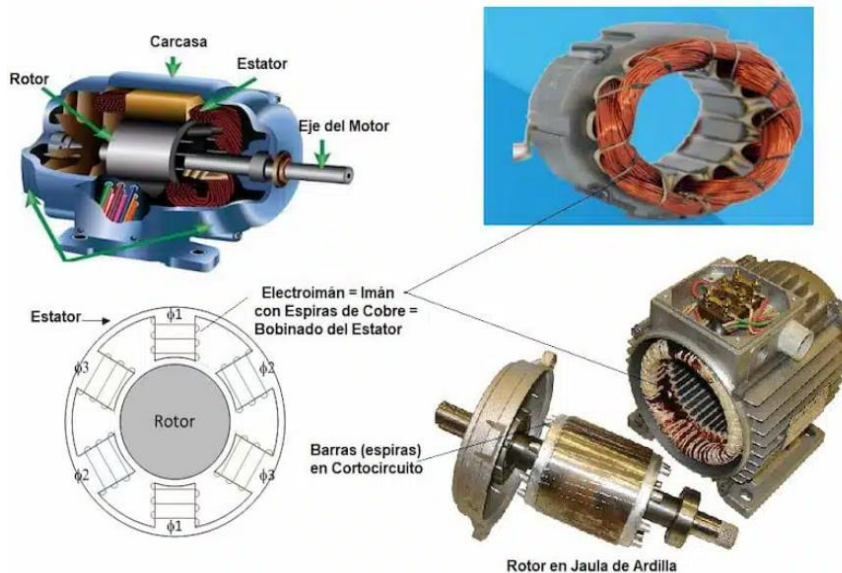


Figura 10 Vista interna y partes de un motor eléctrico

Tomado de: (Mundielectro, s.f.)

<https://mundielectro.com/descubre-cuantos-polos-tienen-los-motores-trifasicos-guia-completa/>

6.5.6. Motor de inducción trifásico con rotor en jaula

1. Datos técnicos del equipo

FICHA TECNICA		
Nombre	Motor de inducción trifásico con rotor en jaula	
Marca	General Electric	
Modelo	N/A	
Código	MIT-101	
Capacidad de carga	2,65 HP aprox	
Año de adquisición	N/A	
Ubicación	Salón 106-bloque 12	

Tabla 21 Ficha técnica motor de inducción trifásico

2. Especificaciones del motor

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Sistemas de alimentación	Acople al motor de inducción
Lubricantes utilizados	Marca: SKF Grasa: LGHQ 2
Rpm	1800 rpm
Potencia	1980 W aprox
Corriente	9 A

Tabla 22 Especificaciones del motor de inducción trifásico

3. Condiciones generales

CONDICIONES GENERALES	
Actividad	Formación educativa del pascual bravo.
Años de servicio	Mas de 30 años
Criticidad	Alta.
Situación actual	Bueno.

Tabla 23 Condiciones generales del motor de inducción trifásico

4. Componentes de la maquina

En la actualidad no se encontraron planos del motor toco buscar lo más parecido al tipo de motor del salón 106 del bloque 12.

- Se tuvo en cuenta las partes móviles: rodamientos, eje del rotor
- Se tuvo en cuenta las partes fijas: carcasa del motor

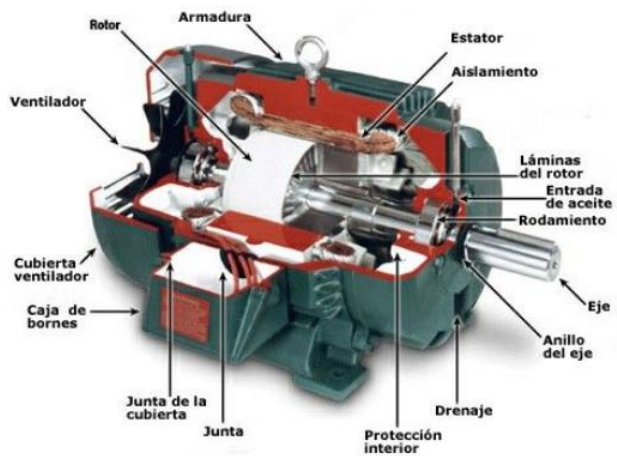


Figura 11 Vista interna de un motor eléctrico

Tomado de: <https://co.pinterest.com/pin/617063586438398157/> (López, s.f.)

6.6. Actividad de mantenimiento

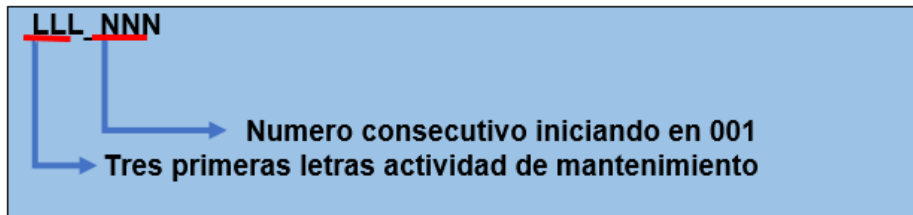


Figura 12 Instructivo para generar códigos para el mantenimiento (elaboración propia)

6.6.1. Mantenimientos correctivos

Mantenimiento correctivo	
Código de la actividad	Descripción
COR-001	Organizar las cajas eléctricas de los módulos.

Tabla 24 Mantenimiento correctivo

Descripción de los mantenimientos correctivos

Código de actividad: COR-001

Descripción: Organizar las cajas eléctricas de los módulos	Código de actividad: COR-001
Objetivo	Establecer un procedimiento, siguiendo una secuencia lógica y segura para organizar la parte eléctrica del módulo, para asegurar su

	funcionamiento y alargar la vida útil del motores, y sus componentes, para que sea utilizado por todos los estudiantes de la universidad.	
Personal requerido	Cantidad	Descripción
	01	Electricista
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cables eléctricos ➤ Cinta aislante ➤ Cajas para aislar las borneras ➤ Coraza ➤ Terminales ➤ Tornillos de diferentes diámetros 	
Partes y repuestos		
Herramientas y equipos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Taladro inalámbrico ➤ Pulidora ➤ Tijera metálica ➤ Destornilladores ➤ Alicates ➤ Pelacables ➤ Copas para las tuercas 	
Equipos de protección de personal	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Calzado de seguridad. ➤ Guantes. ➤ No tener accesorios metálicos. ➤ Llevar el cabello recogido. 	
Precauciones de seguridad	<ol style="list-style-type: none"> a) Verificar que el equipo este apagado. b) Identificar el equipo que se va a intervenir. c) Verificar que los equipos de protección personal estén en buen estado. d) Verificar el buen estado y uso correcto de las herramientas. e) Verificar que el equipo este a temperatura normal. f) Verificar que el módulo de control no tenga bananas cerrando circuitos. g) Asegurar que sea accesible el módulo para la actividad eléctrica a realizar. 	
Descripción de la practica		
<p>Identificar el módulo el cual consta de un tablero de control, un motor de inducción y un motor generador.</p> <p>Observar el estado del tablero de control.</p> <p>Observar el estado de las conexiones de los dos motores.</p> <p>Colocar la caja donde se meterán las conexiones eléctricas.</p> <p>Hacer los empalmes de nuevo, reemplazar los que estén malos y tapar.</p>		

Tabla 25 Descripción de los mantenimientos correctivos

6.6.2. Mantenimientos preventivos

Mantenimiento preventivo	
Código de la actividad	Descripción
ACT.001	Limpieza física del motor
ACT-002	Lubricación de rodamientos
ACT-003	Limpieza del acople de los motores

Tabla 26 Mantenimiento preventivo

Descripción de los mantenimientos preventivos

1. Código de actividad: ACT-001

Descripción: limpieza del motor		Código de actividad: ACT-001	
Objetivo	establecer un procedimiento siguiendo una secuencia lógica y segura para hacer la limpieza del motor, para asegurar su funcionamiento y alargar la vida útil del motor, la pintura y sus componentes, para que sea utilizado por todos los estudiantes de la universidad.		
Personal requerido	Cantidad	Descripción	
	01	operario	
Materiales	➤ Esponjas.		
Partes y repuestos	➤ Detergentes en espray dieléctricos.		
Herramientas y equipos	➤ Aspiradora. ➤ Cepillo		
Equipos de protección de personal	➤ Calzado de seguridad. ➤ Guantes. ➤ No tener accesorios metálicos. ➤ Llevar el cabello recogido.		
Precauciones de seguridad	a) Verificar que el equipo este apagado. b) Identificar el equipo que se va a intervenir. c) Verificar que los equipos de protección personal estén en buen estado. d) Verificar el buen estado y uso correcto de las herramientas. e) Verificar que el equipo este a temperatura normal. f) Verificar que el módulo de control no tenga bananas cerrando circuitos. g) Asegurar que sea accesible la actividad de la limpieza.		
Descripción de la practica			
Identificar el módulo el cual consta de un tablero de control, un motor de inducción y un motor generador. Observar el estado del tablero de control.			

Observar el estado de las conexiones de los dos motores.
 Utilizar cepillo para sacudir el polvo de los motores.
 Utilizar trapo con un poco de jabón dieléctrico para limpiar los motores.
 Utilizar escoba para limpiar el polvo que se sacudió de los motores.
 Utilizar aspiradora.

Tabla 27 Mantenimiento preventivo actividad 1

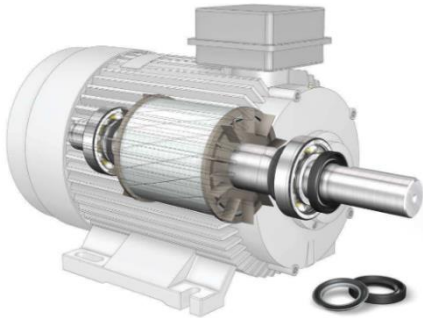


Figura 13 Rodamientos y sellos eléctricos

Tomado de: <https://www.bearing-news.com/5-common-causes-bearing-failures-electric-motors/>
 (Kihlström, 2017)

2. Código de actividad: ACT-002

Descripción: Lubricación de rodamientos		Código de actividad: ACT-002	
Objetivo	establecer un procedimiento siguiendo una secuencia lógica y segura para hacer la lubricación del motor, para asegurar su funcionamiento y alargar la vida útil del motor, y sus componentes móviles, para que pueda ser utilizado por todos los estudiantes de la universidad.		
Personal requerido	Cantidad	Descripción	
	01	operario	
Materiales	Grasa para rodamientos		
Partes y repuestos			
Herramientas y equipos	➤ Engrasadoras manuales o Engrasadoras eléctricas.		
Equipos de protección de personal	➤ Calzado de seguridad. ➤ Guantes. ➤ No tener accesorios metálicos. ➤ Llevar el cabello recogido.		
Precauciones de seguridad	a) Verificar que el equipo este apagado. b) Identificar el equipo que se va a intervenir.		

	<ul style="list-style-type: none"> c) Verificar que los equipos de protección personal estén en buen estado. d) Verificar el buen estado y uso correcto de las herramientas. e) Verificar que el equipo este a temperatura normal. f) Verificar que el módulo de control no tenga bananas cerrando circuitos. g) Asegurar que sea accesible para la actividad de lubricación de las partes móviles del motor.
Descripción de la practica	
<p>Identificar el módulo el cual consta de un tablero de control, un motor de inducción y un motor generador.</p> <p>Observar el estado del tablero de control.</p> <p>Observar el estado de las conexiones de los dos motores.</p> <p>Utilizar cepillo para sacudir el polvo de los motores.</p> <p>Identificar los lugares donde se debe lubricar y posteriormente hacerlo.</p>	

Tabla 28 Mantenimiento preventivo actividad 2

3. Código de actividad: ACT-003

Descripción: Limpieza del acople de los motores		Código de actividad: ACT-003	
Objetivo	establecer un procedimiento siguiendo una secuencia lógica y segura para hacer la limpieza del motor, para asegurar su funcionamiento y alargar la vida útil del motor, la pintura y sus componentes, para que sea utilizado por todos los estudiantes de la universidad.		
Personal requerido	Cantidad	Descripción	
	01	operario	
Materiales			
Partes y repuestos			
Herramientas y equipos			
Equipos de protección de personal	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Calzado de seguridad. ➤ Guantes. ➤ No tener accesorios metálicos. ➤ Llevar el cabello recogido. 		
Precauciones de seguridad	<ul style="list-style-type: none"> h) Verificar que el equipo este apagado. i) Identificar el equipo que se va a intervenir. j) Verificar que los equipos de protección personal estén en buen estado. k) Verificar el buen estado y uso correcto de las herramientas. l) Verificar que el equipo este a temperatura normal. 		

	<p>m) Verificar que el módulo de control no tenga bananas cerrando circuitos.</p> <p>n) Asegurar que sea accesible para la actividad de lubricación de las partes móviles del motor.</p>
Descripción de la practica	
<p>Identificar el módulo el cual consta de un tablero de control, un motor de inducción y un motor generador.</p> <p>Observar el estado del tablero de control.</p> <p>Observar el estado de las conexiones de los dos motores.</p> <p>Utilizar cepillo para sacudir el polvo de los motores.</p>	

Tabla 29 Mantenimiento preventivo actividad 3

6.7. Frecuencia del mantenimiento

Guía de mantenimiento por frecuencia					
Equipo: Motor de inducción trifásico con rotor en jaula		Marca:	Modelo:		Código: MIJ-601
Numero Actividad	Código actividad	Descripción	Responsable	Frecuencia	Tiempo (minutos)
001	ACT-001	Limpieza del motor	Operario	Cada fin de semana	30
002	ACT-002	Lubricación de rodamientos	Operario	Cada mes	10
003	ACT-003	Limpieza del acople de los motores	Operario	Cada mes	10
004	COR-001	Organizar las cajas eléctricas de los módulos	Electricista	Una vez por semestre	40

Tabla 30 Frecuencia de los mantenimientos

6.8. Recomendaciones

1. Realizar inspecciones trimestrales para detectar problemas incipientes.
2. Implementar un programa de análisis de vibraciones para detectar desalineaciones.
3. Revisar y actualizar periódicamente los procedimientos de mantenimiento.
4. Establecer indicadores de desempeño para medir eficacia del plan.

6.9 Formato de uso

Practica a realizar	Paso a Paso
Función OR	Ver anexo 1
Función AND	Ver anexo 1
Devanado trifásico de 4 polos-36 ranuras	Ver anexo 1
Arranque directo por contactor	Ver anexo 1
control para trabajo continuo	Ver anexo 1
Circuito de arranque y parada con dos estaciones de mando.	Ver anexo 1
Circuito de mando para servicio intermitente y servicio continuo	Ver anexo 1
Circuito de maniobra para inversión de giro	Ver anexo 1
Inversión de giro con enclavamiento por pulsador	Ver anexo 1
Circuitos de maniobra con retardo.	Ver anexo 1
Circuito de control para arranque con retardo	Ver anexo 1
Circuito de control con retardo en la parada	Ver anexo 1
Circuitos para controlar la posición	Ver anexo 1
Circuito de mando con control de llegada	Ver anexo 1
Circuito para control de llegada en ambos extremos	Ver anexo 1
Inversión de marcha con retorno automático	Ver anexo 1
Arranque estrella (Y) -triángulo (Δ)	Ver anexo 1
Arranque por impedancias primarias	Ver anexo 1
Arranque por autotransformador	Ver anexo 1
Arranque por devanado parcial	Ver anexo 1
Arranque de motor con rotor devanado	Ver anexo 1
Motor con dos devanados independientes	Ver anexo 1
Motor de dos velocidades con polos conmutables	Ver anexo 1
Motor de corriente directa	Ver anexo 1
Control de arranque y parada de un motor DC	Ver anexo 1
Control de velocidad para motor DC	Ver anexo 1
Circuito de arranque y parada con control de velocidad	Ver anexo 1
Circuito para control de velocidad e inversión de marcha	Ver anexo 1

6.8. Planificación del mantenimiento

Esta tabla describe el proceso que se llevara con cada motor de cada uno de los 10 módulos

PLANIFICACION ANUAL DE MANTENIMIENTO																																					
EQUIPO: Motor de inducción trifásico con rotor en jaula																																					
CÓDIGO:MIJ-601																																					
				Año 2025- Semestre 1								Año 2025- Semestre 2																									
				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre					
No	Código	Descripción	Dur. Min.	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4
1	ACT-001	Limpieza del motor	30																																		
2	ACT-002	Lubricación de rodamientos	10																																		
3	ACT-003	Limpieza del acople de los motores	10																																		
4	COR-001	Organizar las cajas eléctricas del módulo	30																																		
Elaborado por: Operario										Aprobado por: Supervisor																											

Tabla 31 Frecuencia de mantenimiento correctivo y preventivo anual.

7. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la ruta de trabajo bajo la cual se desarrollará el presente trabajo de grado para optar al título de tecnólogos en sistemas electromecánicos

7.1. Tipo de proyecto

Investigación aplicada:

Es un estudio que tiene el objetivo de resolver las problemáticas o necesidades de una situación en particular. En él, se emplean herramientas científicas que ponen en práctica un marco teórico con el fin de dar una respuesta concreta a las preguntas planteadas.

Con esto, prepara el terreno para aplicar un experimento o prueba que logre mejorar la condición actual. Es por esto que se considera que su relación con la investigación básica es muy estrecha, ya que su enfoque depende en parte de los conocimientos y la metodología que esta aporta. (Caos y ciencia)

Este proyecto responde a una investigación aplicada, que es la que permite solucionar problemas reales tanto en la sociedad como a nivel empresarial y se apoya de la investigación básica para conseguirlo, esto aporta conocimientos necesarios para resolver problemas o mejorar la calidad de vida.

Características de la investigación aplicada: La investigación aplicada tiene una serie de características basadas en su objetivo principal:

- ✓ Permite aplicar la ciencia a los problemas de la sociedad y las empresas. Para hacerlo, se nutre de las enseñanzas de la investigación básica, de la que toma los conocimientos necesarios.
- ✓ Su objetivo es resolver situaciones que se presentan en la realidad. Por eso, su enfoque es claro, analizar y estudiar dichos problemas para encontrar soluciones.
- ✓ Una vez se encuentran las respuestas, se puede aplicar en situaciones similares. Por este motivo, puede ser duplicada por otros investigadores.
- ✓ Su fin es crear nuevo conocimiento que mejore la vida de las personas, los procesos productivos de las empresas o la prestación de servicios públicos y privados.

Para este caso en particular, este tipo de investigación permitirá resolver situaciones presentadas en el laboratorio con las 20 máquinas que son de uso constante y que es necesario que se conserven en estado óptimo para su desempeño (Arias, 2020)

7.2 Método

Practica de diagnósticos: Es la que implica la recolección de información por medio de cuestionarios, entrevistas y encuestas. Esta metodología permite establecer las necesidades que perjudican a una población o sector productivo.

En este estudio, la práctica de diagnósticos permitirá realizar recolección de información de las máquinas de estudio para determinar su estado y responder a las necesidades de trabajo de cada una, teniendo presente lo anterior se empleará la observación como instrumento para recolectar información, respondiendo a una ficha o derrotero que deben cumplir las máquinas y sus funciones diarias

7.3. Instrumentos de recolección de información

7.3.1 Fuentes primarias:

- ✓ Manual de usuario de las maquinas a realizar el plan de mantenimientos
- ✓ Ficha técnica de cada máquina Fuentes secundarias:
- ✓ Anotaciones de los observadores del estado de las máquinas

8. RECURSOS

8.1 Humanos

Dos estudiantes de tecnología en sistemas electromecánicos del último semestre

8.2 Técnicos

- ✦ Multímetro
- ✦ Pinza amperimétrica
- ✦ Computador
- ✦ Microsoft office para hogar
- ✦ Juego de herramientas básico
- ✦ Celular con cámara

8.3 presupuesto

CANTIDAD	RECURSO	EN DINERO	EN ESPECIE	TOTAL
1	Multímetro		120.000	120.000
1	Pinza amperimétrica		200.000	200.000
2	Computador		1.500.000	3.000.000
2	Microsoft office para hogar		700.000	1.400.000
1	Juego de herramientas básico		180.000	180.000
2	Celular con cámara		1.100.000	2.200.000
200	Impresión de fichas técnicas	200		40.000
200	Impresión de formatos para registro del diagnóstico de las maquinas	200		40.000
TOTAL				\$7.180.000

Tabla 32 Presupuesto

9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7
Planteamiento y formulación	X						
Justificación y objetivos		X					
Marco teórico			X				
Metodología			X				
Presentación del anteproyecto				X			
Fase 1 revisión de las condiciones de las maquinas					X		
Fase 2 análisis del estado de las maquinas						X	
Fase 3: diseño del plan de mantenimiento						X	
Elaboración de informe final							X

Tabla 33 Cronograma del trabajo de grado

10. CONCLUSIONES

- ✓ La implementación de un plan de mantenimiento preventivo para motores de inducción acoplados a generadores reduce significativamente las fallas y paros no programados.
- ✓ El registro fotográfico detallado facilita la identificación y documentación de problemas potenciales.
- ✓ La creación de formatos estandarizados para mantenimiento preventivo y uso de motores mejora la eficiencia y seguridad operativa.
- ✓ La lubricación regular y verificación de conexiones eléctricas minimiza fallas prematuras.
- ✓ La inspección periódica de componentes críticos (rodamientos, bobinas, etc.) reduce el riesgo de fallas catastróficas.
- ✓ La actualización de registros de mantenimiento facilita la planificación y seguimiento de tareas.
- ✓ La capacitación del personal en procedimientos de mantenimiento y uso adecuado prolonga la vida útil de los motores.

11. REFERENCIAS.

- AIU. (s.f.). *aiu.* Obtenido de <https://cursos.aiu.edu/Mantenimiento%20Industrial/PDF/Tema%203.pdf>
- Arias, E. R. (1 de 11 de 2020). *Economipedia.* Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/investigacion-aplicada.html>
- Caos y ciencia. (s.f.). *Caos y ciencia - investigación aplicada.* Obtenido de <https://www.caosyciencia.com/investigacion-aplicada/>
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas.* México: McGraw Hill.
- Conceptualista. (2023). *Conceptualista.* Obtenido de <https://conceptualista.com/generador/>
- Fundación Endesa. (2024). *Fundación Endesa.* Obtenido de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educacion/recursos/generadorelectrico>
- Instrumentos de medición.* (s.f.). Obtenido de <https://instrumentosdemedicion.org/general/motor-electrico/>
- Olarte C. Botero A, C. A. (2010). Importancia del mantenimiento industrial dentro de los procesos de producción. *Scientia Et Technica*, 354-356.
- Plaza, D. (23 de 03 de 2023). *motor.es.* Obtenido de <https://www.motor.es/que-es/motorelectrico>
- pozueta, M. Á. (2015). *Máquinas eléctricas.* Cantabria - España: Universidad de Cantabria.
- Castillo, A. (16 de junio de 2016). *slideshare.* Obtenido de <https://www.slideshare.net/slideshow/motores-dc-variadores-de-velocidad/63159081#20>
- flickr. (29 de Mayo de 2010). *flickr.* Obtenido de https://flickr.com/photos/alfredo_argel/4650887604
- Kihlström, N. (6 de Marzo de 2017). *Bearing-news.com.* Obtenido de <https://www.bearing-news.com/5-common-causes-bearing-failures-electric-motors/>
- López, J. (s.f.). *Pinterest.* Obtenido de <https://co.pinterest.com/pin/617063586438398157/>
- Mundielectro. (s.f.). *Mundielectro.* Obtenido de <https://mundielectro.com/descubre-cuantos-polos-tienen-los-motores-trifasicos-guia-completa/>
- <https://www.skf.com/co/products/lubrication-management/lubricants/electric-motor-grease>

12. ANEXOS

Anexo 1 Elementos para el control de motores eléctricos



ELEMENTOS PARA EL CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS

HUMBERTO DE JESÚS OCHOA SUÁREZ

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN MUNICIPAL DE MEDELLÍN
COMITÉ DE FORMACIÓN Y CAPACITACIÓN DOCENTE
MEDELLÍN

ELEMENTOS PARA EL CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS

HUMBERTO DE JESÚS OCHOA SUÁREZ

Obra técnica presentada como requisito parcial para ascenso al grado 14 del
Escalafón Nacional Docente

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN MUNICIPAL DE MEDELLÍN
COMITÉ DE FORMACIÓN Y CAPACITACIÓN DOCENTE
MEDELLÍN

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Jurado

MEDELLÍN,

*A la memoria de Roberto Nieto Foronda,
maestro perpetuo del Pascual Bravo, quien
nunca tuvo, realmente, la intención de poner
a buen recaudo sus "Secretos profesionales".*

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. LA LÓGICA DE LOS CONTACTOS ELÉCTRICOS	16
1.1 FUNCIÓN OR	17
1.2 FUNCION AND	17
1.3 PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS FUNCIONES LÓGICAS	18
2. DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS	21
2.1 EL CONTACTOR	21
2.2 APARATOS DE MANIOBRA	23
2.2.1 Contactores auxiliares o relés de control	23
2.2.2 Interruptores de mando o inversores de tambor	23
2.2.3 Temporizadores	23
2.3 DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN	24
2.3.1 Protección contra sobrecarga	25
2.3.2 Protección contra cortocircuito	25
2.3.3 Código IP	26
3. MOTOR DE INDUCCIÓN	28
3.1 DEVANADOS DE DOBLE CAPA	30
3.2 PLACA DE CARACTERÍSTICAS	35
3.3 EFECTOS DE LA RESISTENCIA DEL ROTOR	36
4. ESQUEMAS DE CIRCUITOS DE CONTROL	38
4.1 ARRANQUE DIRECTO POR CONTACTOR	38
4.2 CIRCUITOS DE PROTECCIÓN	41
4.2.1 Instalación del interruptor automático	41
4.2.2 Instalación del relé térmico	42
4.3 EJEMPLOS DE APLICACIÓN	44
4.3.1 Circuito de arranque y parada con dos estaciones de mando	44
4.3.2 Circuito de mando para servicio intermitente-continuo	45

4.3.3	Circuito de maniobra para inversión de giro	46
4.3.4	Inversión de giro con enclavamiento eléctrico por pulsador	49
4.3.5	Circuitos de maniobra con retardo	50
4.3.6	Circuitos para el control de posición	52
4.3.7	Ejemplos de diseño	52
5.	MÉTODOS DE ARRANQUE	56
5.1	ARRANQUE ESTRELLA (Y) -TRIÁNGULO (Δ)	56
5.2	ARRANQUE POR IMPEDANCIAS PRIMARIAS	60
5.3	ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR	62
5.4	ARRANQUE POR DEVANADO PARCIAL	65
5.5	ARRANQUE DE MOTOR CON ROTOR DEVANADO	69
6.	MÉTODOS PARA CAMBIAR LA VELOCIDAD	73
6.1	MOTOR CON DOS DEVANADOS INDEPENDIENTES	73
6.2	MOTOR DE DOS VELOCIDADES CON POLOS CONMUTABLES	75
7.	CONTROL ELECTRÓNICO	80
7.1	MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA	80
7.2	DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	81
7.3	CONCEPTOS BÁSICOS DE CONMUTACIÓN ELECTRÓNICA	82
7.3.1	Conmutación por negativo (-)	82
7.3.2	Conmutación por positivo (+)	83
7.3.3	Conmutación dual	84
7.3.4	Circuito de arranque y parada para motor DC	85
7.3.5	Control de velocidad	86
7.3.6	Circuito de arranque y parada con control de velocidad	89
7.3.7	Circuito para control de velocidad e inversión de marcha	90
7.4	MOTOR PASO A PASO	91
7.4.1	Motor paso a paso unipolar	91
7.4.2	Motor paso a paso bipolar	94
8.	CONCLUSIONES	97
9.	RECOMENDACIONES	98
	BIBLIOGRAFIA	99
	ANEXO. Resumen de simbología IEC para esquemas eléctricos	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tabla de verdad para la función <i>or</i>	17
Tabla 2. Tabla de verdad para la función <i>and</i>	18
Tabla 3. Algunas propiedades de las funciones booleanas	18
Tabla 4. Verificación de equivalencia entre funciones booleanas	20
Tabla 5. Categorías de empleo de los contactores	23
Tabla 6. Grados de protección proporcionados por envolventes	27
Tabla 7. Datos de placa de un motor de inducción	35

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Función <i>or</i>	17
Figura 2. Función <i>and</i>	18
Figura 3. Red de contactos	19
Figura 4. Circuito equivalente para la red de la figura 3	19
Figura 5. Fotografía de un contactor típico	21
Figura 6. Partes funcionales de un contactor	22
Figura 7. Curvatura de una unión bimetálica	25
Figura 8. Esquema simplificado de un relé térmico	25
Figura 9. Ilustración de un motor de inducción	28
Figura 10. Principio de funcionamiento del motor de inducción	29
Figura 11. Representación en el tiempo de un sistema trifásico de corrientes	30
Figura 12. Aspecto de una bobina	30
Figura 13. Localización en la ranura de un devanado de doble capa	31
Figura 14. Grupo polo-fase formado por dos bobinas	31
Figura 15. Arrollamiento trifásico de 2 polos en núcleo de 12 ranuras	32
Figura 16. Esquema de conexiones para arrollamiento trifásico de 2 polos	32
Figura 17. Grupo polo-fase formado por 3 bobinas	33
Figura 18. Devanado trifásico de 4 polos-36 ranuras	33
Figura 19. Esquema de conexiones para el devanado de la figura 18	34
Figura 20. Denominación general de terminales	34
Figura 21. Distribución de flujo magnético en una ranura de barra profunda	36
Figura 22. Distribución de flujo magnético en un rotor de doble jaula	37
Figura 23. Circuito básico de conexión y desconexión	38
Figura 24. Esquema de un circuito de trabajo por pulsos	40
Figura 25. Circuito de control para trabajo continuo	40
Figura 26. Circuito de mando para arranque y parada	41
Figura 27. Instalación del interruptor automático	42
Figura 28. Esquema completo de arranque y parada	43
Figura 29. Circuito de control para dos estaciones de arranque y parada	44
Figura 30. Circuito de control para servicio intermitente continuo	45

Figura 31. Permutación de dos fases para inversión de giro	46
Figura 32. Aspecto físico de un enclavamiento mecánico	47
Figura 33. Enclavamiento eléctrico	47
Figura 34. Circuito completo para inversión de giro	48
Figura 35. Inversión de giro con enclavamiento por pulsador	49
Figura 36. Circuito de control para arranque con retardo	50
Figura 37. Circuito de control con retardo en la parada	51
Figura 38. Interruptor de posición o de final de carrera	52
Figura 39. Detector de proximidad	52
Figura 40. Circuito de mando con control de llegada	53
Figura 41. Circuito para control de llegada en ambos extremos	54
Figura 42. Inversión de marcha con retorno automático	55
Figura 43. Denominación de terminales externas	56
Figura 44. Conexiones estrella y triángulo	57
Figura 45. Intercambio de conexiones Y a Δ	57
Figura 46. Circuito de potencia para un arrancador Y- Δ	58
Figura 47. Circuito de control para un arrancador Y- Δ	59
Figura 48. Circuito de potencia para arranque por impedancias primarias	60
Figura 49. Circuito de control para arranque con impedancia primaria	61
Figura 50. Esquema de terminales de un autotransformador monofásico	62
Figura 51. Circuito de potencia para arranque por autotransformador	63
Figura 52. Circuito de control para arranque por autotransformador	64
Figura 53. Devanado de una fase para un motor de 4 polos	65
Figura 54. Devanados especiales para arranque por devanado parcial	66
Figura 55. Adaptación de motor Y/YY para arranque por devanado parcial	66
Figura 56. Adaptación de motor $\Delta/\Delta\Delta$ para arranque por devanado parcial	67
Figura 57. Circuito de potencia para arranque por devanado parcial	68
Figura 58. Circuito de control para arranque por devanado parcial	69
Figura 59. Motor de rotor devanado	70
Figura 60. Circuito de potencia para arrancador de motor de anillos	71
Figura 61. Circuito de control para arrancador de motor de anillos	72
Figura 62. Circuito de potencia para motor de dos velocidades dos devanados	74

Figura 63. Circuito de control para motor de dos velocidades dos devanados	75
Figura 64. Ilustración de un devanado Dahlander	76
Figura 65. Conexiones internas para un devanado Dahlander	77
Figura 66. Denominación de terminales para motores Dahlander	77
Figura 67. Circuito de potencia para motor Dahlander (Potencia constante)	78
Figura 68. Circuito de control para motor <i>Dahlander</i> (Potencia constante)	79
Figura 69. Estructura básica del motor DC	80
Figura 70. Algunas conexiones para motores de corriente directa	81
Figura 71. Estructura del transistor bipolar	81
Figura 72. Esquema básico de conmutación por negativo	83
Figura 73. Esquema básico de conmutación por positivo	84
Figura 74. Esquema básico de conmutación dual	85
Figura 75. Circuito de control de arranque y parada de un motor DC	86
Figura 76. Circuito de potencia de arranque y parada de un motor DC	86
Figura 77. Ciclo de trabajo (<i>duty</i>) para un motor de corriente directa	87
Figura 78. Implementación de un circuito PWM con el NE555	88
Figura 79. Circuito para control de velocidad de motor DC	89
Figura 80. Circuito de arranque y parada con control de velocidad	89
Figura 81. Inversión de marcha y control de velocidad	90
Figura 82. Esquema de terminales y secuencia de pulsos para motor unipolar	91
Figura 83. Circuito de potencia para control de motor paso a paso unipolar	92
Figura 84. Circuito de control para motor paso a paso unipolar-una fase	93
Figura 85. Secuencia de tiempos y circuito de control a dos fases	94
Figura 86. Motor paso a paso bipolar	95
Figura 87. Circuito de potencia para motor paso a paso bipolar	95
Figura 88. Secuencia de funcionamiento y circuito de control a dos fases	96

GLOSARIO

AMPERIO (*ampere*): unidad de medida para la intensidad de corriente en el Sistema Internacional de Unidades.

ARMADURA: pieza o conjunto de piezas de material ferromagnético, asociado con las piezas polares, de manera que pueda haber un movimiento relativo entre ambas partes.

BOBINA: conjunto de espiras de alambre muy próximas entre sí.

CIRCUITO DE CONTROL: diagrama que muestra los componentes y las interconexiones respectivas, para realizar las acciones de control sobre una máquina u otra parte del circuito.

CIRCUITO DE POTENCIA: diagrama que muestra los componentes y las interconexiones respectivas, para llevar energía desde la fuente de suministro hasta un motor u otra parte del circuito.

CIRCUITO INTEGRADO: producto tecnológico, construido en una única pastilla de material semiconductor, y que contiene miles o millones de transistores en su interior.

COMPUERTA: circuito electrónico (usualmente construido en circuito integrado) que sirve para realizar operaciones con variables binarias.

CONTACTO NORMALMENTE ABIERTO (N-O): contacto de relé, de contactor, o de otro mecanismo, que permanece abierto mientras el dispositivo esté inactivo.

CONTACTO NORMALMENTE CERRADO (N-C): contacto de relé, de contactor, o de otro mecanismo, que permanece cerrado mientras el dispositivo esté inactivo.

CONTACTO: pieza de un relé, de un contactor, o de otro mecanismo, que consta de dos partes metálicas, que se tocan para establecer continuidad, o se separan para aislar dos partes de un circuito.

CONTACTOR: dispositivo electromecánico, que establece o interrumpe una corriente entre la fuente de suministro y una máquina o motor eléctrico.

CORRIENTE ALTERNA: una corriente que tiene valores positivos y negativos, durante un intervalo de tiempo finito.

CORRIENTE DIRECTA (corriente continua): es una corriente unidireccional, cuyos cambios de valor son cero o tan pequeños que se pueden despreciar.

DEVANADO (arrollamiento): conjunto de bobinas localizadas en configuraciones especiales, para dar formas específicas al campo magnético.

FLIP-FLOP (biestable): dispositivo de dos estados internos (activo-inactivo), y dos terminales de entrada que sirven para modificar el estado.

IMPEDANCIA: es la relación entre la amplitud de la onda de voltaje y la amplitud de la onda de corriente, relativa a dos puntos del circuito. La impedancia puede ser de tipo inductivo (reactancia inductiva); de tipo capacitivo (reactancia capacitiva); o de tipo resistivo (resistencia).

INTERRUPTOR AUTOMÁTICO: es una combinación de seccionador con un elemento de protección contra cortocircuito, incorporados en la misma caja o envolvente. Este dispositivo puede operarse manualmente (seccionador), y puede operar para proteger en caso de cortocircuito (Interruptor).

MOTOR ELÉCTRICO: motor que convierte energía eléctrica en energía mecánica.

MOTOR: máquina que convierte una forma de energía en energía mecánica.

OHMIO (ohm): unidad de medida para la impedancia eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades.

ÓRGANO DE MANDO: pieza de un relé, de un contactor, o de otro mecanismo que recibe energía externa para realizar un desplazamiento, con lo cual se abre o se cierra un contacto.

PULSADOR: pieza de maniobra que se opera manualmente, ejerciendo presión con los dedos.

RELÉ TEMPORIZADOR (o simplemente temporizador): relé que establece un tiempo de retardo entre la señal de mando y la acción sobre sus contactos.

RELÉ TÉRMICO (relé de sobrecarga): dispositivo electromecánico, encargado de detectar un incremento en la corriente, y de actuar para desconectar el suministro de energía.

RELÉ: dispositivo electromecánico que recibe energía externa para realizar un desplazamiento, con lo cual se abre o se cierra un contacto.

TRANSISTOR: dispositivo fabricado de material semiconductor, capaz de conducir e interrumpir una corriente entre dos terminales (colector y emisor), de acuerdo con las acciones dirigidas a la terminal de control (base).

VARIABLE BINARIA: cualquier cantidad que pueda existir solamente en dos estados (estado activo y estado inactivo).

VOLTIO (*volt*): unidad de medida para la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) en el Sistema Internacional de Unidades.

RESUMEN

Las redes de contactos se aplican para controlar y proteger los motores eléctricos, en los circuitos de maniobra, y en los sistemas de arranque. El diseño de estas redes es relativamente fácil e intuitivo, ya que los esquemas son simples y representan exactamente el dispositivo físico correspondiente. Además, las expresiones algebraicas involucradas se simplifican fácilmente, por medio de unas cuantas manipulaciones.

Muchas aplicaciones útiles se derivan de simples redes de contactos, las cuales a su vez se implementan con contactores y relés de control, sin tener que recurrir a dispositivos sofisticados y costosos.

Los dispositivos de estado sólido también sirven para implementar redes de contactos. Para tal propósito se emplean transistores bipolares, transistores de efecto de campo y tiristores. La aplicación de estos dispositivos es particularmente útil en el control de motores DC y motores paso a paso, dada la enorme cantidad de conmutaciones y velocidad de respuesta requeridas para su control.

Son términos o palabras clave:

- Contactores
- Relés de control
- Dispositivos de protección
- Motores eléctricos
- Electrónica de potencia

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo curricular del control de motores eléctricos, siempre ha existido una brecha notable entre los contenidos considerados para el trabajo en clase, y la bibliografía disponible en el medio. El material disponible trata de temas avanzados, para ingenieros, con elevado nivel matemático y conceptual. Lo más cercano a un texto técnico de nivel básico, son los manuales de fabricante, pero estos documentos son en extremo puntuales, y no se detienen para hacer observaciones ni aclaraciones conceptuales sobre el tema.

Es aquí donde surge la necesidad de una obra diseñada específicamente para técnicos en proceso de formación; que guarde un adecuado balance entre los aspectos teóricos y el desarrollo práctico; que retroalimente, desde la realización de montajes, el análisis funcional de los componentes; y que ayude a desarrollar en el estudiante la capacidad para realizar diseños adecuados de circuitos de control.

Con esta obra se busca cubrir los contenidos correspondientes a control de motores eléctricos, previstos para los dos últimos períodos del grado undécimo, de Bachillerato Técnico Industrial (ciclo completo), tal como se ofrece en el Instituto Técnico Industrial Pascual Bravo, de la ciudad de Medellín; aunque puede ser usada por estudiantes de Media Técnica, que ya tengan conocimientos de electricidad, y cuenten con la debida supervisión del docente, principalmente a la hora de realizar las prácticas. También puede ser usada como material de consulta, por técnicos electricistas que se desempeñen en el área de control.

1. LA LÓGICA DE LOS CONTACTOS ELÉCTRICOS

Un sistema de control puede entenderse como un conjunto de dispositivos eléctricos, electrónicos, mecánicos, neumáticos, hidráulicos, térmicos, o combinación de éstos, capaz de realizar, de manera autónoma, una secuencia de acciones previamente definidas. Así, por ejemplo, el control de nivel del tanque del inodoro combina acción hidráulica en la boya o bomba del flotador (principio de Arquímedes) y acción mecánica en la válvula de llenado, para mantener el nivel del agua dentro del tanque, después de cada descarga.

En el caso de los motores eléctricos, el interés está en tareas como abrir y cerrar un acceso vehicular, mediante un circuito que le ordene al motor dar marcha adelante y le ordene detenerse justo en el extremo del marco de la puerta.

En este capítulo se estudian los conceptos básicos de las redes de contactos, y un tipo especial de álgebra, que puede entenderse como el lenguaje de los contactos y de los circuitos digitales, llamada álgebra de Boole*, en la cual las redes de contactos se representan con funciones matemáticas, llamadas funciones booleanas o funciones lógicas.

Así, pues, una función lógica se define para un tipo especial de variable que solo puede tener dos posibilidades o estados, por lo cual se le llama variable binaria. Los dos estados de una variable binaria se conocen como estado activo (alto) y estado inactivo (bajo). Con el fin de facilitar el análisis matemático, se asigna al estado alto (activo o encendido) el valor numérico uno (1), y al estado bajo (inactivo o apagado) el valor numérico cero (0).

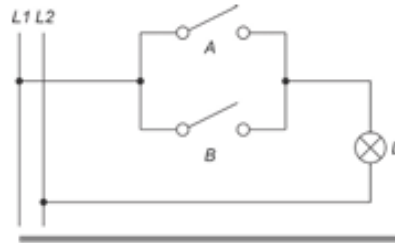
Como ejemplo, se considera un interruptor de pared, el cual tiene un comportamiento binario para los respectivos estados: activo (contacto cerrado) e inactivo (contacto abierto); y se establece una función lógica al relacionar el comportamiento del interruptor con el estado de iluminación de una habitación: estado activo (luz encendida), estado inactivo (luz apagada). Con el fin de facilitar la escritura, se asigna un símbolo a ambas variables, por ejemplo I para nombrar el comportamiento del interruptor, y L para nombrar el comportamiento de la luz. De inmediato, se establece la relación que hay entre las dos variables: el estado activo del interruptor corresponde al estado activo de la luz; y el estado inactivo del interruptor corresponde al estado inactivo de la luz. Esta relación se expresa mediante la simple función matemática: $I = L$

* Nombrada así en honor del matemático británico George Boole (1815-1864)

1.1 FUNCIÓN OR

En la figura 1 se muestra un circuito con dos contactos A y B , conectados en paralelo, y éstos a su vez en serie con una lámpara L .

Figura 1. Función *or*



Para obtener la función matemática de este circuito, se escriben los posibles estados de las variables A y B , asignando los valores numéricos: uno (1) para el contacto activo (cerrado) y cero (0) para el contacto inactivo (abierto). Luego se registran y se ordenan todas estas posibilidades en una tabla de verdad (tabla 1).

Tabla 1. Tabla de verdad para la función *or*

A	B	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

La columna L se obtiene al observar los contactos A y B , notando que la luz se enciende cuando uno de ellos está activo. La función obtenida se escribe con símbolos algebraicos así: $L = A + B$; y se lee: L es igual a A or B .

1.2 FUNCIÓN AND

La figura 2 representa un circuito con dos contactos conectados en serie y éstos, a su vez, en serie con una luz L . Asignando los valores numéricos: uno (1) para el contacto activo y cero (0) para el contacto inactivo, se ordenan y se registran todas las posibilidades en la tabla 2. La función obtenida se escribe con símbolos algebraicos así: $L = A \cdot B$; y se lee: L es igual a A and B .

Figura 2. Función *and*

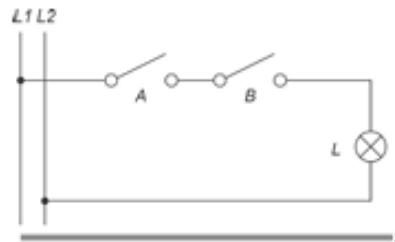


Tabla 2. Tabla de verdad para la función *and*

A	B	L
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

1.3 PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS FUNCIONES LÓGICAS

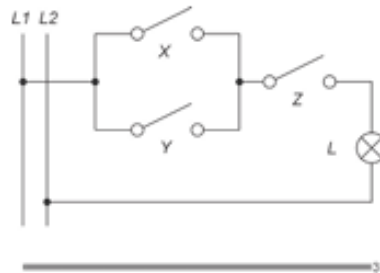
El álgebra de los contactos tiene propiedades de gran utilidad en el diseño de circuitos de control; algunas de estas propiedades también son válidas en el álgebra ordinaria; pero, en general, su validez es exclusiva en el álgebra de Boole, por lo cual se recomienda atención especial. Véase la tabla 3.

Tabla 3. Algunas propiedades de las funciones booleanas

Propiedad	Respecto al producto	Respecto a la suma
Conmutativa	$A \cdot B = B \cdot A$	$A + B = B + A$
Asociativa	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributiva	$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$

Todas las propiedades del álgebra booleana pueden verificarse con la ayuda de una red de contactos. Como ejemplo, se considera el circuito de la figura 3, donde se muestran dos contactos en paralelo x y y , en serie con un tercer contacto z . El conjunto de contactos se encuentra a su vez conectado en serie con una luz L .

Figura 3. Red de contactos



Se pide construir la tabla de verdad y trazar otro circuito equivalente, que ilustre la propiedad distributiva para la función booleana del circuito dado.

Solución: los contactos x y y están conectados en función *or*; y éstos, a su vez, forman una función *and* con el contacto z . De esta manera, la función booleana para la luz es:

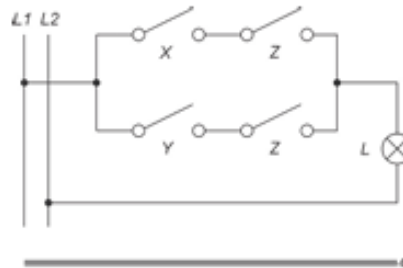
$$L = (x + y) \cdot z = z \cdot (x + y) \quad (\text{Propiedad conmutativa})$$

Aplicando la propiedad distributiva se ve que

$$L = z \cdot x + z \cdot y = x \cdot z + y \cdot z$$

Esta función corresponde al circuito de la figura 4.

Figura 4. Circuito equivalente para la red de la figura 3



La equivalencia de los circuitos representados en las figuras 3 y 4, respectivamente, se verifica comparando las tablas de verdad correspondientes, según el estado de los contactos y el estado de la luz en cada posibilidad. (Véase la tabla 4).

Tabla 4. Verificación de equivalencia entre funciones booleanas

Tabla de verdad para el circuito de la figura 3				Tabla de verdad para el circuito de la figura 4			
x	y	z	L	x	y	z	L
0	0	0		0	0	0	
0	0	1		0	0	1	
0	1	0		0	1	0	
0	1	1	1	0	1	1	1
1	0	0		1	0	0	
1	0	1	1	1	0	1	1
1	1	0		1	1	0	
1	1	1	1	1	1	1	1

Para llenar las tablas de verdad, en la columna L , se buscan aquellos estados en los cuales aparece activa (encendida) la luz L . Observando los contactos del circuito, se nota que la primera condición a cumplir es que el contacto z esté activo (cerrado). Entonces, se identifican los estados en los cuales el contacto z aparece activo. De esos estados que se identificaron, se seleccionan aquéllos para los cuales el contacto x o el contacto y estén activos (cerrados).

Comparando las tablas de verdad (tabla 4), se verifica que ambas funciones son equivalentes; es decir que ambos circuitos tienen las mismas características de funcionamiento.

Una discusión completa y rigurosa acerca de las propiedades del álgebra booleana se puede consultar en la bibliografía que se da al final.

2. DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS

2.1 EL CONTACTOR

Es un dispositivo de conexión y desconexión, utilizado en la conmutación de grandes potencias, como las requeridas cuando se trabaja con motores eléctricos. Este dispositivo es, de hecho, el más importante en la maniobra de motores eléctricos. En la figura 5 se muestra la fotografía de un contactor típico.

Figura 5. Fotografía de un contactor típico



Con referencia a la figura 6, desde el punto de vista funcional, un contactor consta de las siguientes partes:

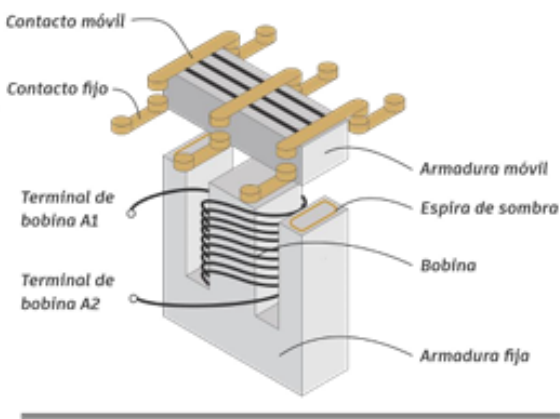
Núcleo o armadura. Esta pieza, a su vez, consta de dos partes: la armadura fija y la armadura móvil. Por la acción del campo magnético, la armadura móvil es obligada a desplazarse hacia la armadura fija. Este desplazamiento lleva consigo las partes móviles de los contactos.

Bobina. Es un arrollamiento de alambre, usualmente de cobre, dentro de un carrete, dispuesto alrededor de la columna central del núcleo. Cuando se aplica corriente a la bobina, en su interior se crea el campo magnético necesario para desplazar la armadura móvil.

Contactos. Un contacto consta de dos piezas, una fija y otra móvil, fabricadas en aleación especial resistente al impacto y al arco eléctrico. Según el calibre del contacto, éste puede ser de potencia, para conducir grandes corrientes, o puede ser auxiliar (de control) para conducir corrientes pequeñas.

Espira de sombra. Es un elemento adicional que sirve para evitar la anulación periódica del flujo magnético, causada por la periodicidad de la onda de corriente.

Figura 6. Partes funcionales de un contactor



Si un contacto está abierto, cuando la bobina está sin energía, se llama contacto normalmente abierto (N-O); si el contacto está cerrado, cuando la bobina está sin energía, se llama contacto normalmente cerrado (N-C). Al aplicar energía a la bobina, todos los contactos cambian su estado: los N-O se cierran, y los N-C se abren.

Desde el punto de vista de la aplicación específica, un contactor viene indicado según su categoría de empleo, definida en la norma IEC 947-1 *. Para corriente alterna, en la tabla 5 se da un resumen de las principales aplicaciones de dichas categorías.

La categoría de empleo determina el valor de la corriente admisible, para los contactos de potencia, principalmente en la conmutación durante las maniobras en carga. El valor de esta corriente se expresa como un porcentaje de la corriente nominal, y depende del tipo de carga en el circuito de potencia, así como de las condiciones en las cuales se efectúan los cortes, que pueden ser cortes durante el arranque, o cortes a plena marcha.

*INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Equipos de baja tensión. NTC-IEC 947-1. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1995. P. 40.

Tabla 5. Categorías de empleo de los contactores

Categoría	Aplicación
AC1	Se aplica a todos los receptores de corriente alterna, con factor de potencia no menor que 0.95; es decir, cargas resistivas, o muy poco inductivas, por ejemplo, hornos de resistencia.
AC'2	Se aplica para el mando de motores de anillos, con corte de corriente a plena marcha. En el arranque, el contactor establece una corriente de 2 a 2.5 veces la corriente nominal del motor. A la apertura el contactor corta la corriente nominal del motor: es un corte fácil.
AC2	Los contactores de esta categoría soportan el arranque, el frenado por contracorriente y la marcha intermitente de los motores de anillos. El factor de potencia puede estar entre 0.3 y 0.7: el corte es difícil.
AC3	En esta categoría están los contactores para mando de motores con rotor de jaula, para arranque directo y corte a plena marcha. Durante el arranque el contactor soporta una intensidad del orden de 5 a 7 veces la intensidad nominal del motor, y en el corte soporta la corriente nominal: es un corte fácil. Estos contactores se construyen para soportar un cierto número de cortes durante el arranque. El fabricante debe especificar el número máximo de maniobras de este tipo.
AC4	Los contactores de esta categoría soportan el arranque directo, el frenado por contracorriente y la marcha intermitente de motores con rotor de jaula. Al arranque, el contactor soporta una corriente que puede estar entre 5 y 7 veces la corriente nominal del motor. El corte es severo: el mismo rango de la corriente de arranque.

2.2 APARATOS DE MANIOBRA

2.2.1 Contactores auxiliares o relés de control. En cuanto a su construcción son similares a los contactores de potencia, pero de un tamaño menor, porque manejan corrientes muy pequeñas. También difieren en la velocidad de respuesta, número de maniobras por hora y tipo de aleación de los contactos, para que tengan la menor resistencia eléctrica posible. Puede requerirse un contactor auxiliar, por ejemplo, cuando la capacidad de maniobra de un PLC es insuficiente para energizar un contactor principal. También puede emplearse para maniobrar pequeños motores.

2.2.2 Interruptores de mando o inversores de tambor. Son seccionadores de tres posiciones: adelante, apagado y reversa. Su accionamiento es manual por medio de una perilla o una palanca. Se emplean principalmente en la maniobra de motores trifásicos hasta de 40 hp, aunque también se les utiliza para conectar y desconectar circuitos principales.

2.2.3 Temporizadores. Se emplean para establecer un tiempo de retardo entre una acción y la siguiente; por ejemplo, para retardar el cambio de conexión durante el arranque de motores eléctricos. Según la tecnología empleada para su construcción, se pueden encontrar varios tipos de temporizadores: con mecanismo

de relojería, con mecanismo neumático, y con mecanismo electrónico (analógico o digital), los cuales pueden ofrecer dos tipos de retardo:

Retardo al trabajo (ON delay). El contacto pasa de la posición normal a la posición negada cuando ha transcurrido un cierto tiempo (predefinido) después de dar la señal de conteo; es decir, después de energizar el órgano de mando. Así, por ejemplo, un contacto temporizado N-C, al trabajo, se abrirá un cierto tiempo después de haber energizado la bobina.

Retardo al reposo (OFF delay). El contacto pasa de la posición negada a la posición normal cuando ha transcurrido un cierto tiempo (predefinido) después de dar la señal de conteo (desenergizar el órgano de mando); por ejemplo, un contacto N-O, al reposo, estará cerrado con la bobina energizada y se abrirá un cierto tiempo después de desenergizar la bobina.

2.3 DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

Los dispositivos de protección detectan y aíslan fallas que se presentan en las instalaciones y en los motores eléctricos, evitando que las corrientes excesivas afecten las instalaciones, las máquinas o el personal. Las sobrecargas se presentan bien sea por sobrecarga en las máquinas o por cortocircuito.

El efecto de una sobrecarga depende del calor generado por el paso de la corriente, a través de un conductor, que tiene un valor de resistencia eléctrica. De acuerdo con la ley de Joule: $Q = I^2 R t$, donde I es la intensidad de la corriente que circula por el conductor, R es la resistencia del conductor, t es el tiempo de exposición a la corriente, y Q el calor transferido al metal. El calor transferido puede aumentar la temperatura hasta destruir el aislamiento y fundir el metal.

El efecto de un cortocircuito es doble: tiene efectos térmicos mucho más severos, y tiene efectos dinámicos, por las fuerzas magnéticas que actúan sobre los conductores, y literalmente pueden romper parte de la instalación.

En el trabajo con motores eléctricos, son frecuentes las siguientes fallas: sobrecarga, bloqueo del eje, pérdida de una fase, y cortocircuito. Dependiendo del tipo de falla, se utilizan diferentes dispositivos de protección. Los siguientes son algunos dispositivos empleados en la protección de los motores eléctricos y sus respectivas instalaciones.

2.3.1 Protección contra sobrecarga. La protección contra este tipo de falla se realiza mediante un dispositivo llamado relé de sobrecarga, o relé térmico, el cual se conecta en el circuito propio de cada motor. Su función es responder a las

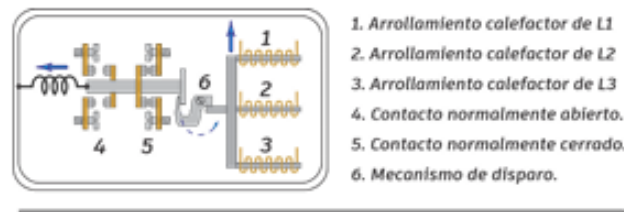
sobreintensidades pequeñas pero prolongadas. La unidad activa es una unión bimetalica (dos láminas metálicas de diferente aleación), que se deforma de manera natural por el incremento en la temperatura. La deformación en un bimetálico es posible gracias a que los metales que la conforman tienen coeficientes de dilatación diferentes. Esto hace que el de mayor coeficiente se curve sobre el otro, como se ilustra en la figura 7.

Figura 7. Curvatura de una unión bimetalica



La sobrecarga se detecta haciendo circular la corriente del motor por los elementos 1, 2 y 3 de la figura 8. Por la ley de Joule, el calentamiento es proporcional al cuadrado de la corriente. Este calentamiento produce deformación en los bimetálicos, y esto, a su vez, hace que se libere el mecanismo de disparo 6, para que los contactos 4 y 5 cambien de estado.

Figura 8. Esquema simplificado de un relé térmico



El contacto normalmente cerrado es el que actúa como protección: corta el suministro de energía a la bobina del contactor, los contactos de potencia se abren y cortan el suministro de energía al motor. Por otro lado, el contacto normalmente abierto se utiliza para activar una señal de sobrecarga, y llamar la atención del personal de mantenimiento.

2.3.2 Protección contra cortocircuito. Un cortocircuito es el contacto entre dos o más conductores de diferente potencial eléctrico: fase-fase, fase-neutro, fase-tierra. El caso más leve de cortocircuito se presenta en una instalación que no tiene motores conectados; en este caso, toda la corriente de cortocircuito proviene de la red, y su valor puede alcanzar varios miles de amperios. Pero, cuando se tienen

motores conectados, cada motor actúa como generador, aportando más a la corriente de cortocircuito, con efectos térmicos y dinámicos muy rápidos y poderosos.

Por otra parte, dado que la acción del relé térmico está condicionada al poder de corte del contactor, esta opción queda descartada para proteger contra cortocircuito; pero existen dos dispositivos capaces de actuar con suficiente poder y rapidez: los fusibles y los interruptores automáticos.

Los fusibles son filamentos encapsulados, hechos de aleaciones especiales, que se funden cuando son recorridos por corrientes superiores al valor especificado. Naturalmente, un fusible se construye para que actúe una sola vez, debiéndose sustituir por uno nuevo, después del cortocircuito. Los fusibles son dispositivos muy compactos y tienen un gran poder de corte.

Los interruptores automáticos, o disyuntores, son dispositivos electrodinámicos que actúan bajo condiciones de cortocircuito, abriendo los polos para interrumpir el suministro de energía. Una vez despejada la falla estos dispositivos pueden rearmarse y continuar en servicio. Un interruptor automático es, básicamente, la combinación de un elemento de apertura (seccionador) y un elemento actuador de protección, ensamblados dentro de una caja o envoltorio llamada caja moldeada.

Las partes activas de un interruptor suelen ubicarse en dos compartimientos: uno para contactos principales, y otro para la unidad de disparo. Los contactos principales sirven para abrir el circuito, ya sea mediante operación manual (seccionador), o bien de manera automática, en situación de cortocircuito. Los interruptores modernos emplean la propia corriente de cortocircuito para reforzar el poder de corte del interruptor. Con este método, las interrupciones se logran entre 2 y 10 milésimas de segundo, menos de un ciclo de onda.

2.3.3 Código IP *. Mediante este código, se indica el grado de protección dado por el encerramiento de un equipo eléctrico. Este código se forma con las letras IP (*Ingress protection*), seguidas por dos cifras: la primera cifra indica el grado de protección contra contactos involuntarios, y contra la penetración de cuerpos extraños; la segunda indica el grado de protección contra la penetración de agua. En la tabla 6 se muestra el significado de dicho código.

* INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grados de protección dados por encerramientos de equipo eléctrico. NTC-IEC 60529. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2013. P. 5.

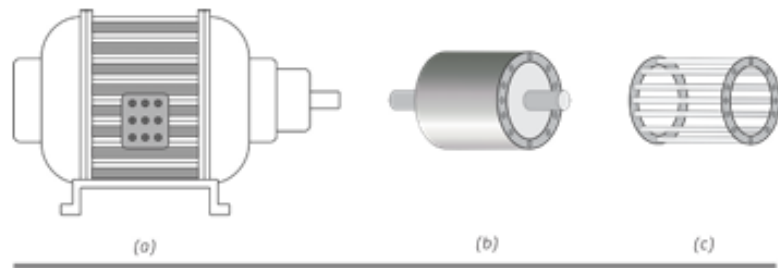
Tabla 6. Grados de protección proporcionados por encerramientos (código IP)

Primera cifra característica	
0	Sin protección especial del personal contra contactos involuntarios con partes energizadas o móviles internas. Sin protección del aparato contra penetración de sólidos extraños.
1	Protección de partes energizadas y partes móviles contra contactos involuntarios con cuerpos grandes (diámetro superior a 50 mm), por ejemplo, la mano. Sin protección contra acceso intencional.
2	Protección de las partes energizadas o partes móviles internas contra contactos involuntarios con cuerpos extraños de dimensiones mayores de 12 mm, por ejemplo, los dedos.
3	Protección de las partes energizadas o partes móviles internas contra contactos involuntarios con cuerpos de diámetro mayor de 2.5 mm, por ejemplo, herramientas, cables u objetos similares.
4	Protección de las partes energizadas o partes móviles internas contra la penetración de cuerpos extraños con diámetro mayor de 1 mm, por ejemplo, alambres u objetos similares.
5	Protección total de las partes energizadas o partes móviles internas contra contactos involuntarios. Protección contra depósitos de polvo perjudiciales. La penetración de polvo no se impide por completo, pero la cantidad que entra no afecta el funcionamiento del aparato.
6	Protección total de las partes energizadas o partes móviles internas contra contactos involuntarios. Protección total contra la penetración de polvo.
Segunda cifra característica	
0	Sin protección del aparato contra penetración de agua.
1	Las gotas de agua que caigan verticalmente no tienen efectos perjudiciales.
2	Las gotas de agua que caigan con una inclinación de hasta 15° respecto a la vertical no tienen efectos perjudiciales.
3	El agua atomizada que caiga con una inclinación de hasta 60° respecto a la vertical no tiene efectos perjudiciales.
4	El agua que salpique al aparato desde cualquier dirección, no tiene efectos perjudiciales.
5	Un chorro de agua que dé contra el aparato desde cualquier dirección, no tiene efectos perjudiciales.
6	En caso de inundaciones ocasionales el agua que penetre en el aparato no produce deterioros.
7	En caso de sumergir el aparato durante el tiempo y a la presión especificada, la cantidad de agua que penetre no ocasiona deterioros.
8	Protegida contra inmersión prolongada en agua.
Código adicional de letra	
A	Prueba con esfera de 50 mm
B	Prueba con dedo de 12 mm x 80 mm
C	Prueba con varilla de 2.5 mm x 100 mm
D	Prueba con varilla de 1 mm x 100 mm
Los procedimientos especializados de limpieza no se indican en el grado de protección IP.	

3. MOTOR DE INDUCCIÓN

Se llama así por su principio de funcionamiento: la ley de inducción de Faraday *. La figura 9(a) ilustra el aspecto externo de un motor de inducción, mientras la figura 9(b) muestra un rotor con devanado en cortocircuito (rotor en jaula de ardilla), y la figura 9(c) muestra la jaula de ardilla correspondiente, incrustada dentro del rotor.

Figura 9. Ilustración de un motor de inducción



Rotor. Es la parte giratoria, encargada de transferir potencia mecánica. El tipo de rotor más común tiene el aspecto de una jaula metálica (jaula de ardilla) conformada por barras metálicas, unidas en ambos extremos por dos aros del mismo material. Existe otro tipo de rotor, el cual, en lugar de barras tiene bobinas incrustadas en ranuras, de donde recibe el nombre de rotor bobinado (véase la sección 5.5). Dichas bobinas van conectadas al exterior por medio de tres anillos de broce llamados anillos rozantes.

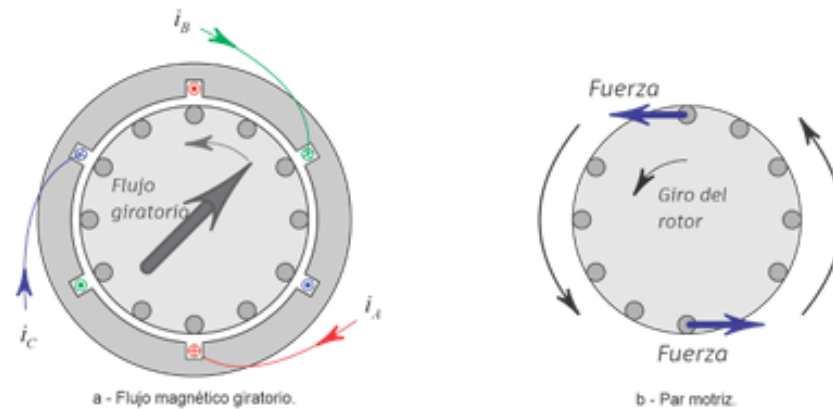
Estator. Es la parte del motor que permanece en reposo, y consta de las siguientes partes: carcasa, núcleo del estator y devanados del estator.

Escudos. Los escudos sirven para dar soporte a los rodamientos, los cuales a su vez dan soporte al eje del rotor.

El funcionamiento del motor de inducción depende de tres bobinas, localizadas en el núcleo del estator y giradas 120° una respecto a otra. La figura 10(a) representa la sección transversal de un motor de inducción trifásico: en el estator, incrustadas en ranuras, se localizan las bobinas de las tres fases, en colores rojo, verde y azul, respectivamente. Esta configuración es el modelo básico de un bobinado trifásico.

* Nombrada así en honor del científico inglés Michael Faraday (1791-1867).

Figura 10. Principio de funcionamiento del motor de inducción

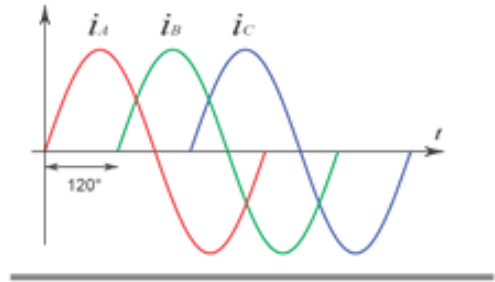


Cuando las tres bobinas son recorridas por las respectivas corrientes de un sistema de suministro trifásico, se produce un flujo magnético giratorio en el interior del núcleo. El flujo magnético giratorio induce corrientes en el rotor, en virtud de la ley de inducción; de ahí el nombre **motor de inducción**. Además, los conductores del rotor que portan dichas corrientes, experimentan fuerzas, por estar en la misma región del campo magnético, como se muestra en la figura 10(b). Así se producen fuerzas diametralmente opuestas, y de sentido contrario, las cuales definen un momento doble de torsión, conocido como par de torsión o *torque*.

El rotor comienza a acelerarse, pero su velocidad siempre será inferior a la velocidad del campo magnético. Este hecho se explica considerando que de ser posible alcanzar la velocidad del campo, no habría movimiento relativo entre campo y rotor, y por lo tanto no habría corriente inducida. Por este hecho, el motor de inducción también recibe el nombre de motor asincrónico.

La figura 11 ilustra el comportamiento en el tiempo de un sistema de suministro trifásico: son tres ondas de corriente, desfasadas una respecto a otra 120° en el tiempo (5.55 ms).

Figura 11. Representación en el tiempo de un sistema trifásico de corrientes



La velocidad del campo magnético (*velocidad sincrónica*) es directamente proporcional a la frecuencia de la red, e inversamente proporcional al número de pares de polos. La velocidad del rotor (*velocidad asincrónica*), es cerca de un 4% inferior a la velocidad del campo. Si f es la frecuencia de la red (60 Hz), y $p = 1$ el número de pares de polos, la velocidad sincrónica está dada por

$$rpm_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{60 \times 60}{1} = 3600 \text{ rpm}$$

Por lo tanto, la velocidad aproximada del rotor es

$$rpm_A \sim 0.96 \times 3600 \text{ rpm} = 3456 \text{ rpm}$$

3.1 DEVANADOS DE DOBLE CAPA

Una bobina es un conjunto de espiras, muy próximas entre sí, como se ilustra en la figura 12, mientras un arrollamiento es un conjunto de bobinas incrustadas en las ranuras de un núcleo magnético. Usualmente un arrollamiento trifásico se instala formando dos capas dentro de las ranuras, de tal manera que cada bobina tenga uno de sus lados en la parte superior, y el otro lado en el fondo de la ranura. Véase la figura 13.

Figura 12. Aspecto de una bobina



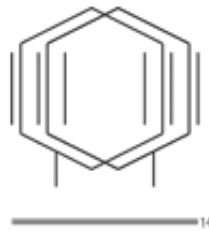
Figura 13. Localización en la ranura de un devanado de doble capa



Un devanado trifásico va distribuido en tres sectores iguales: uno para cada fase; y cada fase se divide, a su vez, en tantos sectores como polos tenga el arrollamiento. Por lo tanto, el número total de ranuras del núcleo debe ser divisible por el producto fases x polos. Además, si cada bobina tiene dos lados, y cada ranura se divide en dos capas, entonces el número total de ranuras es igual al número total de bobinas.

La unidad básica de un devanado trifásico es el grupo polo-fase; es el grupo de bobinas que integran un polo en una fase; por lo tanto, el número total de grupos es igual al producto fases x polos (Véase la figura 14).

Figura 14. Grupo polo-fase formado por dos bobinas

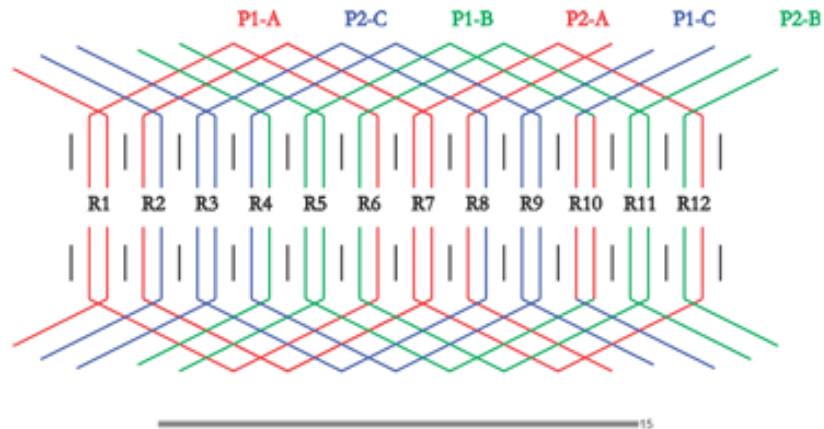


Ejemplo: sea un devanado trifásico de dos polos, en un núcleo de 12 ranuras.

Número de fases	$m = 3$	Ranuras por polo	$S_p = \frac{S}{2p} = \frac{12}{2} = 6$
Número de pares de polos	$p = 1$		
Número de polos	$2p = 2$	Ranuras por polo-fase	$S_{pf} = \frac{S_p}{m} = \frac{6}{3} = 2$
Número de ranuras	$S = 12$		

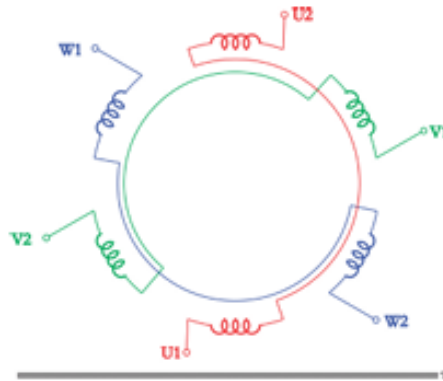
Por lo tanto, este grupo polo-fase se forma con dos bobinas ($S_{pf} = 2$), y una fase consta de dos grupos polo-fase. En la figura 15, se ilustra la distribución de bobinas en esquema desarrollado (plano). En color rojo, la fase A; en color verde, fase B; y en color azul, la fase C.

Figura 15. Arrollamiento trifásico de 2 polos en núcleo de 12 ranuras



Para este ejemplo, se decidió conectar los dos grupos en serie. Véase la Figura 16.

Figura 16. Esquema de conexiones para arrollamiento trifásico de 2 polos

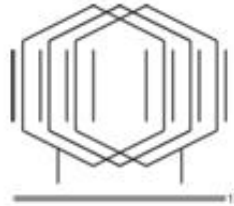


En el siguiente ejemplo se considera un arrollamiento trifásico de 4 polos, alojado en un núcleo de 36 ranuras.

Número de fases	$m = 3$	Ranuras por polo	$S_p = \frac{S}{2p} = \frac{36}{4} = 9$
Número de pares de polos	$p = 2$	Ranuras por polo-fase	$S_{pf} = \frac{S_p}{m} = \frac{9}{3} = 3$
Número de polos	$2p = 4$		
Número de ranuras	$S = 36$		

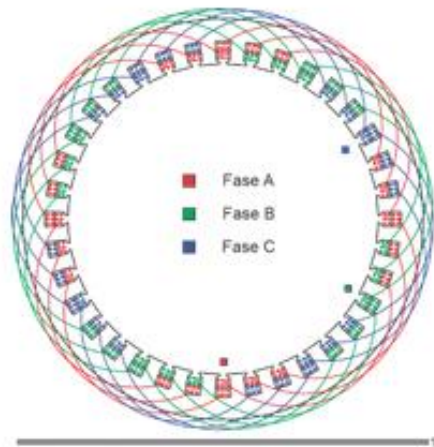
Un grupo polo-fase está formado por tres bobinas ($S_{pf} = 3$). Véase la figura 17.

Figura 17. Grupo polo-fase formado por 3 bobinas



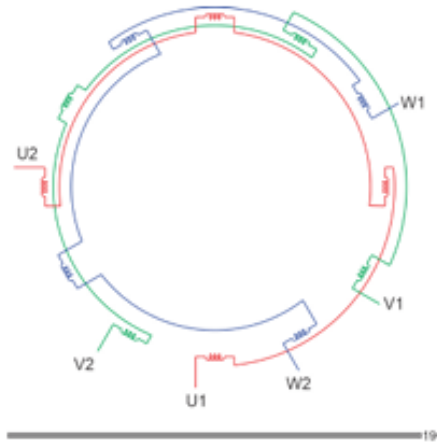
En la figura 18 se muestra un esquema circular, otra manera de representar el arrollamiento completo: en color rojo, la fase A; en color verde, la fase B; y en color azul, la fase C. Nótese que cada fase está formada por cuatro grupos polo-fase.

Figura 18. Devanado trifásico de 4 polos-36 ranuras



Con cuatro grupos polo-fase, se tienen varias posibilidades de conexión: conexión serie, conexión paralela, o conexión mixta. La figura 19 muestra un posible esquema de conexiones, con los grupos polo-fase conectados en serie.

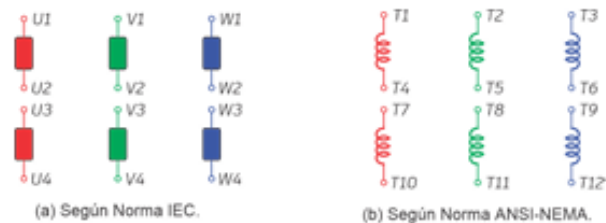
Figura 19. Esquema de conexiones para el devanado de la figura 18



Con la conexión mixta se tiene la posibilidad de cambiar entre una red de 220 V, y una red de 440 V. En este caso, se dejan conectadas, internamente, dos secciones, de dos grupos en serie cada una (sección 1-2 y sección 3-4 de la figura 20a). La conexión para 440 V, se realiza con las dos secciones en serie; en este caso quedan todos los grupos conectados en serie. La conexión para 220 V, se realiza con las dos secciones en paralelo; en este caso, los grupos quedan en una conexión mixta.

Se requieren, entonces, cuatro terminales por fase (12 terminales en total). Esto se ilustra en el diagrama de terminales externas, donde se marcan las 12 terminales resultantes, según las normas IEC y ANSI, respectivamente (Figura 20).

Figura 20. Denominación general de terminales



3.2 PLACA DE CARACTERÍSTICAS

La placa de características suministra la información necesaria para la instalación de un motor de inducción. En la tabla 7, se especifican los datos mínimos que debe contener la placa de un motor de inducción con rotor en jaula.

Tabla 7. Datos de placa un motor de inducción

Ítem	Descripción del dato
Fabricante	Identifica la ubicación de la fábrica o el centro de servicio.
Número de serie	Número de identificación de un lote de motores, construidos sobre la misma línea de producción.
Tipo (<i>Type</i>)	Código que identifica el tipo de carcasa, o forma constructiva de la misma.
Potencia nominal	Es la potencia mecánica que el motor debe desarrollar en condiciones nominales; está dada por el producto del torque multiplicado por la velocidad de rotación del eje.
Factor de servicio (SF)	Porcentaje de sobrecarga sin daños inmediatos en el aislamiento. Un factor de servicio mayor que 1.0 (100%) reduce la vida útil del aislamiento.
Voltaje nominal	Es el voltaje de trabajo, o voltaje al cual debe conectarse el motor para que funcione correctamente.
Corriente nominal	Es la corriente demandada por el motor en condiciones nominales.
Frecuencia (Hz)	Frecuencia de la red a la cual debe conectarse el motor.
Ciclo de trabajo: <i>Duty</i> :	Especifica el tiempo de trabajo y el tiempo de reposo que se deben acatar en un motor, para que el calentamiento no exceda el límite admisible. Puede ser un ciclo de trabajo continuo o intermitente.
Temperatura ambiente:	Máxima temperatura externa a la cual el motor puede desarrollar su potencia nominal. Si la temperatura ambiente es mayor que la máxima temperatura externa admisible, se debe reducir la potencia mecánica demandada al motor, para no dañar el sistema de aislamiento.
Incremento de temperatura:	Diferencia entre la temperatura interna y la temperatura ambiente. Algunos fabricantes omiten este dato.
Velocidad (<i>rpm</i>):	Velocidad nominal de rotación del eje.
Fases (<i>ph</i>):	Número de fases especificado para el motor. Debe coincidir con el número de fases del suministro de energía.
Letras de diseño:	Identifican las características específicas de desempeño, durante el arranque y en estado estable. Cada letra corresponde a un diseño diferente de la jaula (Véase la tabla 8).
Letra de kVA/hp:	Es la relación entre los kVA de arranque por cada hp de potencia nominal.
Número de amazon (<i>frame</i>):	Identifica las dimensiones del motor, y pueden ser normalizadas o de un fabricante particular.

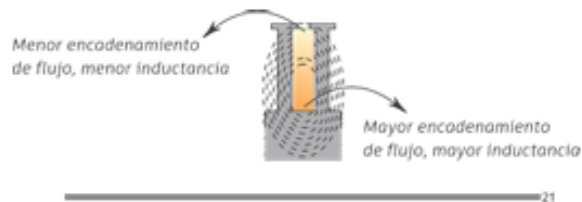
3.3 EFECTOS DE LA RESISTENCIA DEL ROTOR

Una desventaja notable en la aplicación de motores con rotor en jaula, es el hecho de tener una resistencia fija en los conductores del rotor. Más aún, las características de operación en estado dinámico, principalmente el par y la corriente de arranque, se ven drásticamente comprometidos con las características de operación en estado estable, principalmente la eficiencia. De hecho, para obtener una alta eficiencia en condiciones de estado estable, se requiere una resistencia de rotor muy baja, pero una resistencia muy baja hace que la corriente de arranque sea muy elevada, y que el par de arranque y el factor de potencia sean muy bajos.

El motor con rotor devanado no presenta estos inconvenientes, porque se le pueden conectar resistencias externas, para modificar a voluntad las características de funcionamiento. Su corriente de arranque es solo el doble de la corriente nominal; por esta razón es una máquina perfecta para arrancar a plena tensión. Tiene par de arranque cercano al doble del par nominal, el cual se considera bastante alto. Sin embargo, las características constructivas de este motor son más complejas y lo hacen más costoso que el motor con rotor en jaula. Lo anterior, unido a un incremento en las tareas de mantenimiento, hacen que el motor de rotor devanado no tenga mucha acogida en la mayoría de las aplicaciones. En la sección 5.5 se presenta una discusión más detallada acerca del motor de rotor devanado.

Otra solución consiste en reemplazar las barras habituales del rotor por barras profundas, como se ilustra en la figura 21. Nótese que el flujo ligado en la parte inferior de la barra es mayor que el flujo ligado en la parte superior de la misma barra. Por esta razón, la inductancia en la parte inferior es mayor que la inductancia en la parte superior.

Figura 21. Distribución de flujo magnético en una ranura de barra profunda



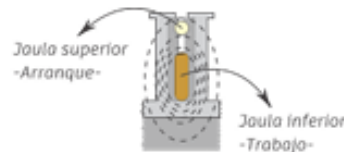
La reactancia inductiva es proporcional al producto de la inductancia por la frecuencia y, en el momento del arranque, la frecuencia de la corriente en el rotor, es igual a la frecuencia de la red, con lo cual se obtiene una reactancia bastante elevada en la parte inferior de la barra. Simultáneamente, se obtiene una reactancia

inductiva muy baja en la parte superior de la barra. Nótese la representación, en degradado, de la variación de la reactancia en función de la altura.

Bajo estas condiciones, en el momento del arranque, se obliga a la corriente del rotor a circular por la parte alta de la barra conductora. Esto aumenta la densidad de corriente en la parte superior, lo cual equivale a aumentar la resistencia. Después, en estado estable, la frecuencia de la corriente en el rotor disminuye a dos o tres Hertz, y el efecto inductivo prácticamente desaparece. Así, la densidad de corriente se hace mucho más uniforme en la barra, lo cual equivale a una disminución en la resistencia del rotor.

Una variante del rotor de barras profundas es el rotor de doble jaula: una jaula mayor con barras de pequeño calibre y alta resistividad, que le dan alta resistencia; y una jaula menor, en el interior de la primera, con barras de mayor calibre y baja resistividad, que le dan baja resistencia.

Figura 22. Distribución de flujo magnético en un rotor de doble jaula



En la figura 22 se ilustra la distribución de flujo ligado en las barras de un rotor de doble jaula. Para este tipo de rotor, el circuito magnético se diseña de tal manera que sea mucho mayor el flujo ligado a la jaula interna, que el flujo ligado a la jaula externa. Así se logra una inductancia mucho más alta en las barras internas que en las barras externas, y en el momento del arranque, cuando la frecuencia en el rotor es mayor, la alta reactancia de las barras internas obligará a la corriente a circular por las barras externas de gran resistencia. En estado estable, la frecuencia de la corriente en el rotor disminuye y la reactancia se hace despreciable; entonces, la corriente tiende a circular por ambas jaulas, y la resistencia del rotor es el equivalente de dos jaulas en paralelo.

4. ESQUEMAS DE CIRCUITOS DE CONTROL

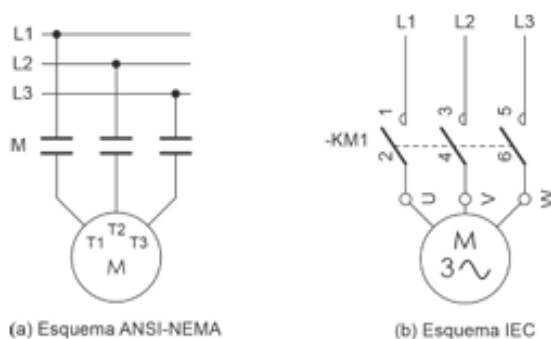
Ya se ha elaborado el trasfondo necesario para abordar el diseño de los circuitos de control para motores de inducción; pero antes de comenzar, debe aclararse que dichos circuitos van surgiendo con la discusión, de acuerdo con las necesidades de cada problema planteado. Por lo tanto, los esquemas presentados en esta sección no son esquemas completos y, deberán asumirse solo como parte del proceso de diseño; así, cuando un esquema esté desarrollado completamente, se hará la respectiva aclaración. De acuerdo con la norma internacional, los circuitos de control para motores se deben representar mediante símbolos normalizados, para dar claridad a la lectura e interpretación de los planos. En este sentido, se destacan dos normas principales: la norma ANSI, de uso cotidiano entre los fabricantes norteamericanos; y la norma IEC, de uso común en el resto del mundo. Un resumen de simbología IEC se anexa al final de la obra.

4.1 ARRANQUE DIRECTO POR CONTACTOR

A partir del esquema general de la figura 20, se realiza la conexión específica requerida por el motor; en este caso se asumirá que el motor fue construido para conexión en estrella serie. Se procede, entonces, a unir los siguientes grupos de terminales: T4-T7, T5-T8, T6-T9 y T10-T11-T12.

Los devanados se energizan por las terminales T1, T2 y T3, con las líneas L1, L2 y L3, respectivamente. El problema planteado, es disponer un medio de conexión y desconexión entre las terminales y las líneas de suministro. La solución es inmediata, con un contactor que tiene tres contactos de potencia: 1-2, 3-4 y 5-6. (Véase la figura 23).

Figura 23. Circuito básico de conexión y desconexión



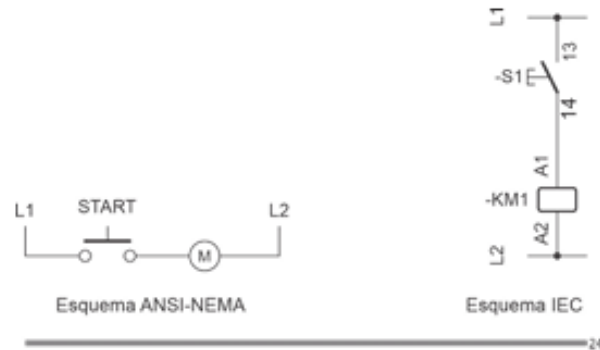
Los contactos empleados se llaman contactos de potencia porque hacen parte del circuito que lleva energía al motor. Nótese la diferencia entre la representación ANSI-NEMA, y la representación IEC.

El motor recibe energía cuando se cierran simultáneamente los tres contactos principales. Estos contactos se identifican mediante las letras M según la norma ANSI-NEMA, o KM1 según la norma IEC. De hecho, la marcación de las partes que corresponden a un mismo contactor, debe hacerse con el mismo rótulo, a fin de poderlas identificar en circuitos complejos. Pero estos tres contactos no pueden funcionar por sí solos; es necesario disponer un circuito adicional que permita maniobrarlos. A dicho circuito, se le llama **circuito de control**. Entonces, cada circuito que se diseña consta de dos partes: un circuito compuesto por todos los elementos necesarios para llevar energía desde la red hasta el motor, llamado **circuito de potencia**; y un circuito compuesto por todos los elementos conectados a las bobinas de los contactores y a otros órganos de mando, llamado **circuito de control**. Esta discriminación es necesaria para facilitar el análisis del funcionamiento. Sabiendo que la bobina es el órgano de mando del contactor, es claro que hacia ella van dirigidas todas las acciones de control; por lo tanto, para la realización del circuito de control se debe considerar la manera de energizar, sostener y desenergizar la bobina del contactor. Si la bobina está especificada para el mismo voltaje del motor, bastarán dos de las líneas del circuito de potencia para energizar el circuito de control; pero, si la bobina es para un voltaje inferior, deberá incluirse un transformador reductor.

En la metodología intuitiva de diseño, el circuito se construye paso a paso, adecuándolo cada vez en función de las necesidades planteadas. En primer lugar, debe notarse que se requiere un componente de maniobra para energizar la bobina; es decir, para establecer continuidad de la corriente desde L1 hasta la terminal A1 de la bobina. Nótese que la terminal A2 está conecta de manera permanente a la línea L2. En la figura 24 se muestra un pulsador normalmente abierto conectado en serie con la bobina del contactor. La acción sobre este pulsador da continuidad a la corriente desde la línea L1, a través de la bobina, hasta la línea 2.

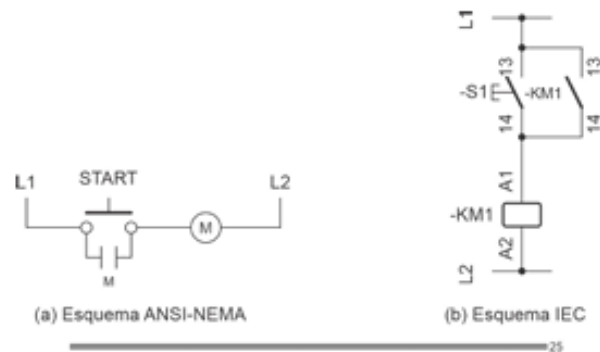
De esta manera, cada vez que la bobina se energiza, los contactos principales (de potencia) se cierran; y al desenergizar, los contactos principales se abren. Esto, a su vez, permite energizar y desenergizar los devanados del motor en el circuito de potencia.

Figura 24. Esquema de un circuito de trabajo por pulsos



El esquema de la figura 24 no es del todo útil, porque todavía requiere un elemento que sostenga la continuidad de la corriente en la bobina, sin necesidad de mantener presionado el pulsador. Este problema se resuelve aplicando una función OR (contactos en paralelo); así se obtiene un camino alternativo para la corriente que llega a la terminal A1 de la bobina. El segundo contacto requerido debe ser tal que permanezca cerrado cuando la bobina esté energizada. Puede elegirse un contacto auxiliar del contactor (normalmente abierto). En la figura 25 se muestra el contacto adicional 13-14, llamado contacto de retención.

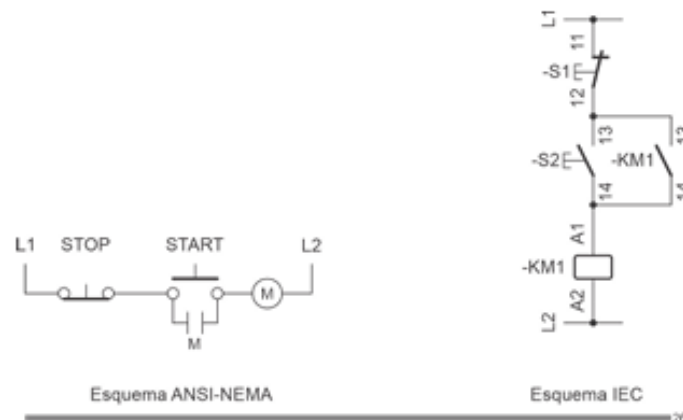
Figura 25. Circuito de control para trabajo continuo



Nótese que el contacto de retención va marcado con la misma referencia del contactor al cual pertenece. Esta observación debe ponerse en práctica siempre; de lo contrario, se hace imposible identificar la correspondencia entre contactos y bobina de un mismo contactor.

El circuito de control de la figura 25, combinado con el de potencia de la figura 23, constituyen el circuito completo de maniobra para el motor; sin embargo, debido a que este circuito no ofrece posibilidad de desenergizar el contactor, es necesario disponer otro contacto, conectado en serie, para que cumpla dicha función. El contacto del pulsador 11-12, de la figura 26, realiza la función de parada requerida, ya que, al presionarlo, se interrumpe la corriente de suministro de la bobina, y se liberan todos los contactos.

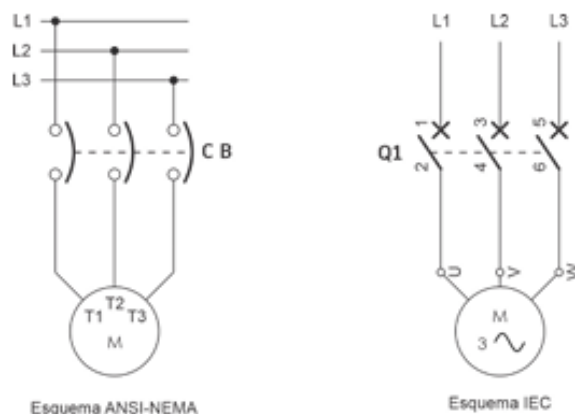
Figura 26. Circuito de mando para arranque y parada



4.2 CIRCUITOS DE PROTECCIÓN

4.2.1 Instalación del interruptor automático. En la sección 2.6.2, se discutió acerca del fenómeno de cortocircuito, y sus efectos perjudiciales tanto para el personal, como para la instalación eléctrica. Ahora el enfoque se dirige propiamente a la instalación del dispositivo de protección. En las instalaciones eléctricas de motores, esta protección se localiza solo en el circuito de potencia y para ello se emplean fusibles o interruptores automáticos. Conviene recordar que un interruptor automático tiene doble función: como interruptor, en condiciones de cortocircuito; y como seccionador en operación manual. La figura 27 muestra la conexión de un interruptor automático.

Figura 27. Instalación del interruptor automático

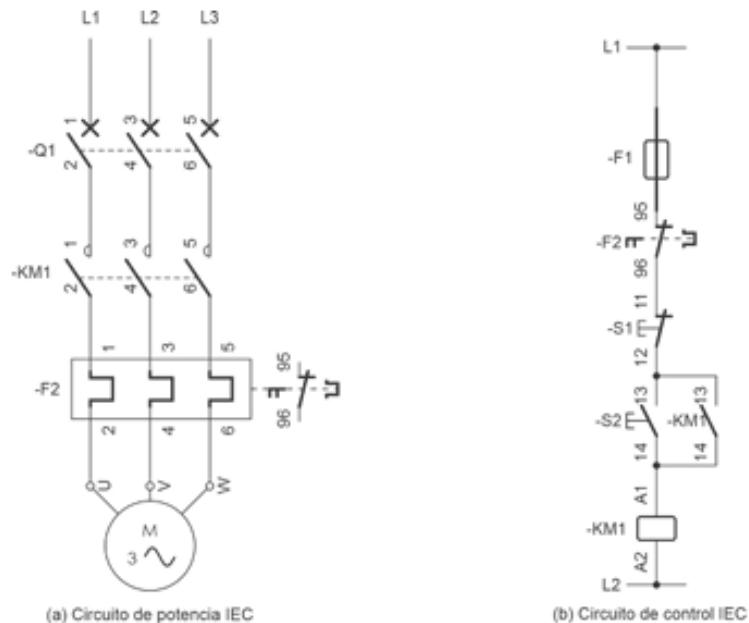


4.2.2 Instalación del relé térmico. En la sección 2.6.1 se discutió acerca de la sobrecarga de un motor. El motor sobrecargado trata de dar el torque requerido, y en consecuencia demanda más corriente de la red; pero el incremento de corriente, implica un mayor calentamiento de los devanados, y el correspondiente deterioro del aislamiento. La pérdida de una fase (marcha en monofásico), también se presenta en la maniobra de motores eléctricos. Durante este tipo de falla, el motor pierde potencia en el eje, y trata de compensarla absorbiendo más corriente de la red, y produciendo un calentamiento excesivo.

Un método eficaz para proteger el motor contra sobrecarga o contra marcha en monofásico, es coordinar la acción de un relé térmico con la acción de un contactor, para cortar la corriente de suministro al motor.

Los componentes de protección térmica se localizan tanto en el circuito de potencia, como en el circuito de control. En el circuito de potencia van los elementos que detectan la sobrecarga, rotulados con -F2, en la figura 28(a). Estos elementos van conectados en serie con cada línea del circuito de potencia del motor. Cuando ocurre la sobrecarga, los arrollamientos calefactores transfieren el calor generado por la corriente a las uniones bimetálicas. El aumento de temperatura hace que estas piezas se deformen liberando el mecanismo de disparo. Cuando actúa el mecanismo de disparo, el contacto normalmente cerrado, rotulado con -F2 en la figura 28(b), se abre. Este es el contacto que se utiliza para desenergizar la bobina del contactor.

Figura 28. Esquema completo de arranque y parada.



Con la inclusión del relé térmico, se llega al esquema completo de maniobra para un motor de inducción trifásico. Además, los circuitos (a) y (b) de la figura 28, se consideran fundamentales para la obtención de nuevos circuitos aplicados. En adelante se hará referencia a ellos como **circuito básico de potencia para arranque y parada**, y **circuito básico de control para arranque y parada**, respectivamente.

La función lógica para el circuito de la figura 28(b), se obtiene por inspección:

$$KM1 = F2 \cdot S1 \cdot (S2 + KM1)$$

Es de especial importancia la dependencia de sí misma de la variable $KM1$, la cual se realiza físicamente a través del contacto de retención, como ya explicó. Nótese, además, la dependencia mutua entre el circuito de potencia y el circuito de control: la sobrecarga se origina en el circuito de potencia, la cual es detectada por los sensores $F2$ en el mismo circuito. El relé actúa en el contacto $F2$ del circuito de control; este contacto, a su vez, corta el suministro de energía de la bobina. La bobina sin energía implica que los contactos, tanto principales como auxiliares, del

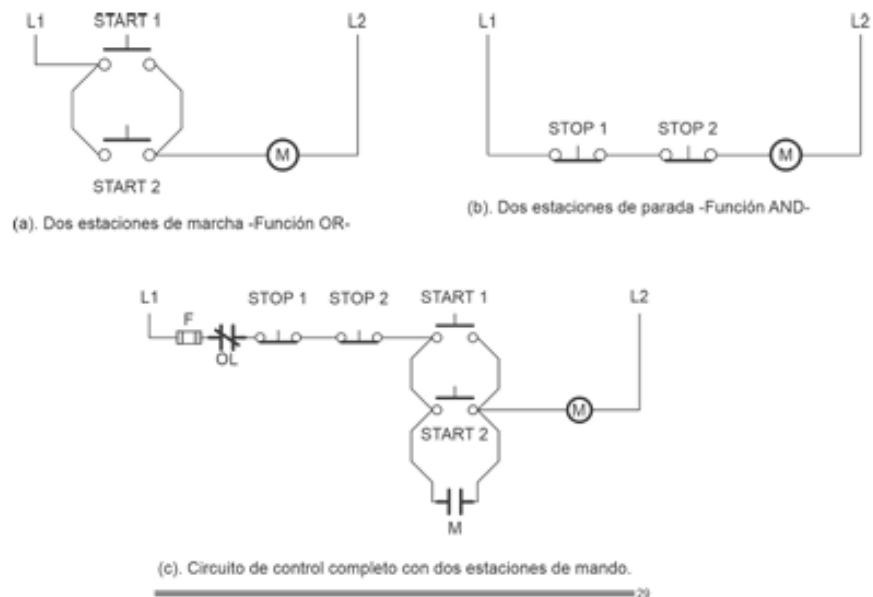
contactor KM1, regresan a su posición normal, particularmente los contactos de potencia, los cuales se abren y cortan el suministro de energía del motor.

Para la designación de contactos del relé térmico se emplean las letras OL (*over load*: sobrecarga) en los esquemas ANSI-NEMA; y la letra F más un consecutivo: F1, F2, F3, ..., para los esquemas IEC.

4.3 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

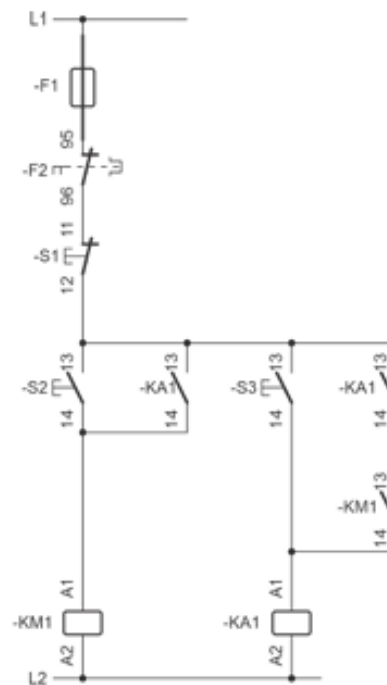
4.3.1 Circuito de arranque y parada con dos estaciones de mando. Este circuito requiere dos órdenes de marcha y dos órdenes de parada. Dos contactos en paralelo establecen dos caminos para la corriente que energizará la bobina: la función OR satisface el primer requisito del circuito, como se muestra en la figura 29(a). Dos contactos en serie, sirven para interrumpir la corriente de la bobina: la función AND satisface el segundo requisito, como se muestra en la figura 29(b). Las dos partes del circuito se integran para obtener el circuito de control completo de la figura 29(c). Por su parte, el circuito de potencia es el mismo circuito básico desarrollado en la sección 4.2.

Figura 29. Circuito de control para dos estaciones de arranque y parada.



4.3.2 Circuito de mando para servicio intermitente y servicio continuo. Este circuito es útil en aplicaciones para las cuales se requiera cambiar el régimen de trabajo de intermitente a continuo, o viceversa. En la figura 30 se muestra solo el circuito de control, trazado según la norma IEC. El circuito de potencia es el mismo circuito básico del ejemplo anterior.

Figura 30. Circuito de control para servicio intermitente continuo

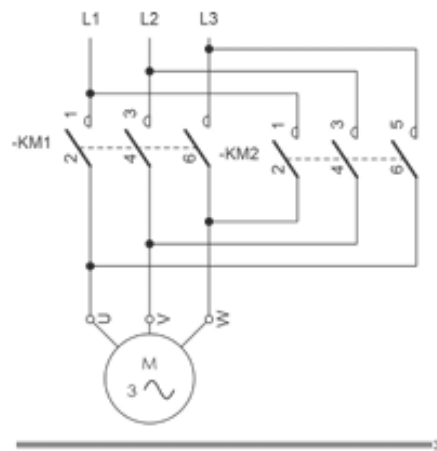


Al presionar S2 (marcha intermitente), se energiza la bobina del contactor principal KM1, pero solo mientras el pulsador está presionado, pues no existe un contacto de retención. De esta manera el motor funciona a intervalos definidos por el operario.

Al pulsar S3 (marcha continua) se energiza el contactor auxiliar KA1, se cierra el contacto de retención KA1, y con éste se energiza el contactor principal KM1. Inmediatamente se cierra el contacto de retención KM1 que está en serie con el otro contacto KA1, definiendo una función AND. Estos dos contactos en serie se encargan de sostener energizada la bobina de KA1. Ambas bobinas quedan energizadas indefinidamente (servicio continuo).

4.3.3 Circuito de maniobra para inversión de giro. La inversión de giro en un motor de inducción trifásico se logra invirtiendo el giro del flujo magnético; el giro del flujo magnético, a su vez, se invierte permutando dos fases en las terminales del motor. El circuito de potencia, específico, para este propósito se muestra en la figura 31. Este circuito incluye dos contactores, que conducen de la siguiente manera: al energizar la bobina de KM1, entran al motor las tres fases en secuencia directa: L1-L2-L3; y al energizar la bobina de KM2, entran al motor las tres fases en secuencia inversa: L3-L2-L1.

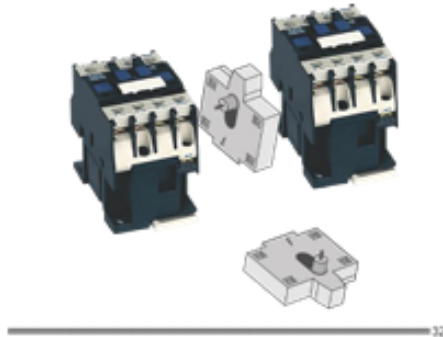
Figura 31. Permutación de dos fases para inversión de giro



La permutación de dos fases exige precauciones, a fin de evitar que los dos contactores lleguen a cerrarse simultáneamente, produciendo un cortocircuito trifásico. A continuación, se explican algunas de las precauciones que suelen tomarse en este sentido.

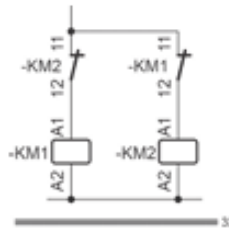
En primer lugar, puede usarse un enclavamiento mecánico. Este enclavamiento se hace por medio de un trinquete tipo balancín, que va sujeto a las piezas móviles de los dos contactores (Figura 32). De esta manera, cuando un contactor está cerrado impide mecánicamente el cierre del otro, haciendo obligatorio desenergizar el primer contactor antes de energizar el segundo.

Figura 32. Aspecto físico de un enclavamiento mecánico



También puede usarse un enclavamiento eléctrico por contacto auxiliar, el cual consiste en un contacto normalmente cerrado del primer contactor, en serie con la bobina del segundo; y viceversa. Véase la figura 33. De esta manera, cuando uno de los contactores se energiza, el contacto de enclavamiento se abre e impide la circulación de corriente por la bobina del otro contactor.

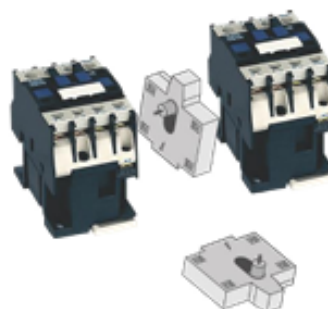
Figura 33. Enclavamiento eléctrico



De otro lado, el circuito de potencia de inversión de giro, se basa por completo en el circuito básico de arranque y parada; pero en lugar de los contactos de potencia de un solo contactor, va el circuito de permutación de dos fases, como se muestra en la figura 34(a). Los componentes de protección Q1 y F1 siguen ocupando la misma posición que tenían.

Nuevamente, con referencia al circuito de control, por tratarse de dos contactores, hay que pensar en controlar dos bobinas; pero, este problema ya está parcialmente resuelto, en el circuito básico de control de arranque y parada; de manera que basta con repetir dicho circuito. Efectivamente, es lo que se hace; además, se puede hacer una simplificación, si se advierte que no se requieren pulsadores de parada independientes para KM1 y para KM2: el pulsador de parada S1 presta su función tanto para la bobina de KM1, como para la bobina de KM2. Véase la figura 34(b), y

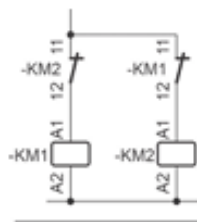
Figura 32. Aspecto físico de un enclavamiento mecánico



32

También puede usarse un enclavamiento eléctrico por contacto auxiliar, el cual consiste en un contacto normalmente cerrado del primer contactor, en serie con la bobina del segundo; y viceversa. Véase la figura 33. De esta manera, cuando uno de los contactores se energiza, el contacto de enclavamiento se abre e impide la circulación de corriente por la bobina del otro contactor.

Figura 33. Enclavamiento eléctrico



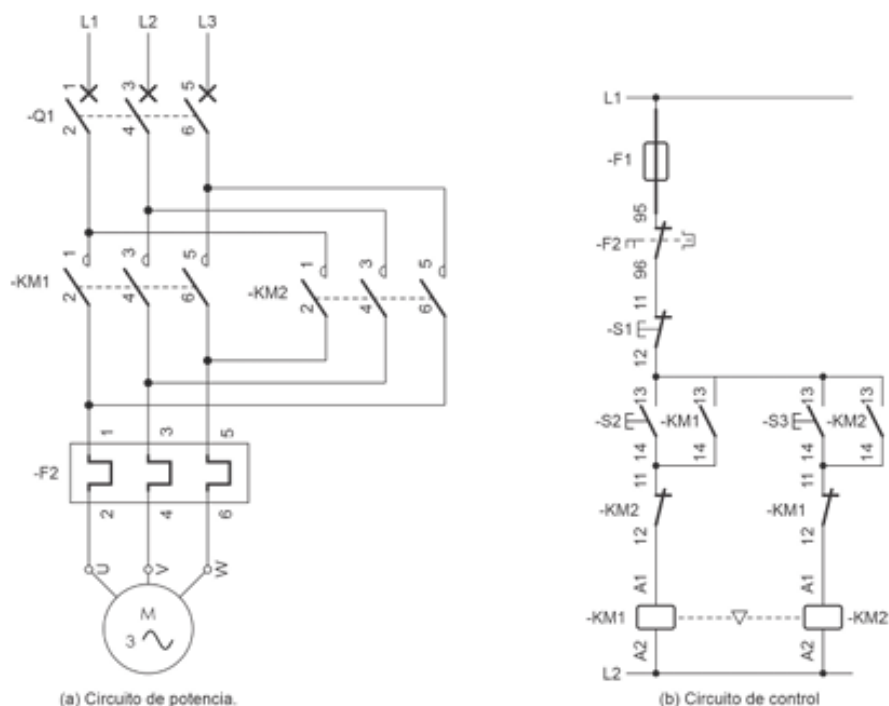
33

De otro lado, el circuito de potencia de inversión de giro, se basa por completo en el circuito básico de arranque y parada; pero en lugar de los contactos de potencia de un solo contactor, va el circuito de permutación de dos fases, como se muestra en la figura 34(a). Los componentes de protección Q1 y F1 siguen ocupando la misma posición que tenían.

Nuevamente, con referencia al circuito de control, por tratarse de dos contactores, hay que pensar en controlar dos bobinas; pero, este problema ya está parcialmente resuelto, en el circuito básico de control de arranque y parada; de manera que basta con repetir dicho circuito. Efectivamente, es lo que se hace; además, se puede hacer una simplificación, si se advierte que no se requieren pulsadores de parada independientes para KM1 y para KM2: el pulsador de parada S1 presta su función tanto para la bobina de KM1, como para la bobina de KM2. Véase la figura 34(b), y

nótese que también el contacto de protección del relé térmico F1, presta su función, sin importar el sentido de giro que tenga el motor en ese momento.

Figura 34. Circuito completo para inversión de giro



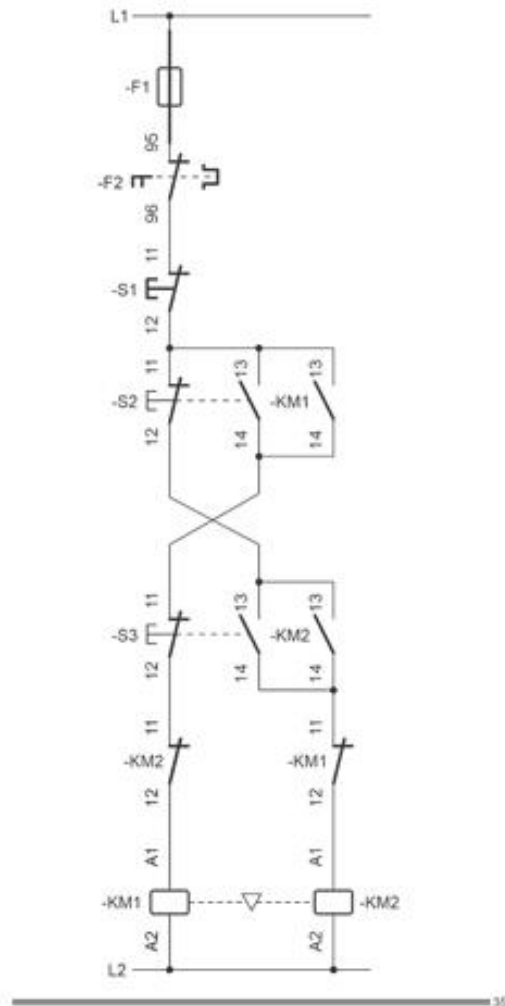
En la figura 34(b) también se incluyeron los contactos auxiliares de enclavamiento: un contacto normalmente cerrado de KM2, en serie con la bobina de KM1; y un contacto normalmente cerrado de KM1, en serie con la bobina de KM2. Así, queda obligatorio detener previamente el motor, para realizar la inversión de giro. Por otra parte, el enclavamiento mecánico se simboliza en la misma figura como un pequeño triángulo invertido, que se traza entre las bobinas de KM1 y KM2.

Los circuitos (a) y (b) de la figura 34 se consideran básicos, y en adelante se hará referencia a ellos como **circuito básico de potencia para inversión de giro** y **circuito básico de control para inversión de giro**, respectivamente.

4.3.4 Inversión de giro con enclavamiento eléctrico por pulsador. Cuando una aplicación requiere inversión de giro, sin parada previa, y se tiene un motor de baja

inercia, apto para soportar los esfuerzos mecánicos y electrodinámicos que ello supone, puede utilizarse un enclavamiento por pulsador, como el de la figura 35. Su funcionamiento es como se describe a continuación:

Figura 35. Inversión de giro con enclavamiento por pulsador

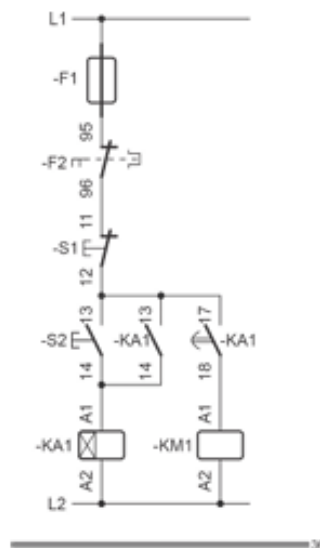


Al presionar S2, se interrumpe el circuito de la bobina KM2, antes de energizar KM1, así se evita el funcionamiento simultáneo. Al presionar S3, se interrumpe el circuito de la bobina KM1, antes de energizar KM2, y de nuevo se evita el funcionamiento simultáneo. Obsérvese que, además del enclavamiento por pulsador, se dispone del enclavamiento eléctrico por contacto auxiliar.

4.3.5 Circuitos de maniobra con retardo. En un circuito que requiera retardo entre una operación y la siguiente, es necesario utilizar relés temporizadores. Como se explicó en la sección 2.2.3, un relé temporizador realiza una de las dos funciones básicas: retardo al trabajo (a la conexión), llamado **ON DELAY**; o retardo al reposo (a la desconexión), llamado **OFF DELAY**. Los contactos pueden ser normalmente abiertos (N-O) o normalmente cerrados (N-C). Véase la simbología correspondiente en el anexo.

Como ejemplo, se diseña un circuito de control para un motor de inducción, de manera que arranque un tiempo después de haberse dado la orden respectiva. En la figura 36 solo se muestra el circuito de control, ya que el circuito de potencia es el mismo circuito básico de arranque y parada. Obsérvese el símbolo para contacto temporizado N-O, al trabajo (contacto 17-18 de KA1).

Figura 36. Circuito de control para arranque con retardo

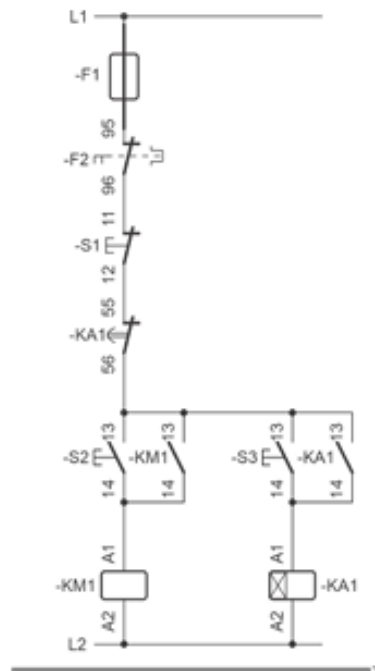


La señal de arranque en S2 energiza el temporizador KA1, y se inicia el conteo. Un contacto instantáneo 13-14 de KA1 sirve como retención. Transcurrido el tiempo

preestablecido, el contacto de retardo al trabajo 17-18, se cierra. Este contacto completa el circuito de suministro de energía de la bobina.

El segundo ejemplo es un circuito de maniobra para motor de inducción trifásico, con arranque instantáneo y parada con retardo. La figura 37 solo muestra el circuito de control, porque el circuito de potencia es el mismo que se usó en el ejemplo básico de arranque y parada.

Figura 37. Circuito de control con retardo en la parada



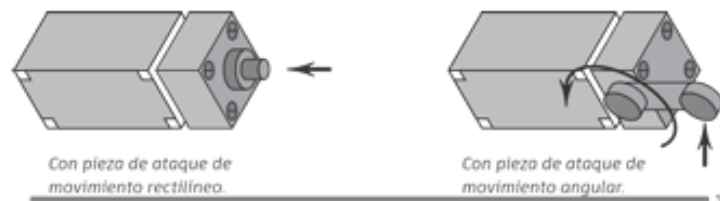
La bobina de KM1 se energiza al presionar el pulsador S2, y los contactos de potencia se cierran, suministrando energía al motor. El motor se pone en marcha, y se queda en funcionamiento por un tiempo indefinido. Se ha dispuesto un temporizador que inicia el conteo cuando se pulsa S3. El contacto instantáneo 13-14 de KA1 se encarga de la retención del temporizador. El contacto temporizado 55-56 de KA1, en serie con el contacto de protección térmica, y con el pulsador S1, realiza la interrupción de todo el circuito, una vez finalizado el conteo.

4.3.6 Circuitos para controlar la posición. Existen aplicaciones, para las cuales es necesario detectar la presencia de una pieza móvil; por ejemplo, en máquinas

herramientas, puertas corredizas, etc. Los componentes más utilizados en la detección de piezas móviles son los interruptores de posición y los detectores de proximidad. Los interruptores de posición también se conocen como sensores electromecánicos, o interruptores de final de carrera, y sirven para detectar la presencia de una pieza, por contacto directo. Véase la figura 38.

El elemento básico de detección es una pieza móvil que puede desplazarse, ya sea linealmente (pieza de ataque rectilíneo), o bien circularmente (pieza de ataque de movimiento angular). La interacción con el circuito depende de un par de contactos (N-O, N-C), que cambian de estado por acción de la pieza móvil.

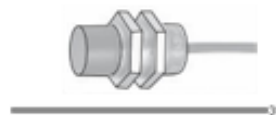
Figura 38. Interruptor de posición o de final de carrera



Existen muchas combinaciones de estos dos elementos básicos, cuyo uso depende de la aplicación específica.

Un concepto más moderno surge con los detectores de proximidad, los cuales no requieren contacto, por lo cual soportan mayor frecuencia de maniobras y pueden detectar objetos a gran velocidad. El principio de funcionamiento puede ser inductivo, capacitivo, óptico o ultrasónico, según el material del objeto a detectar. En la figura 39 se ilustra el aspecto de un detector de proximidad típico.

Figura 39. Detector de proximidad



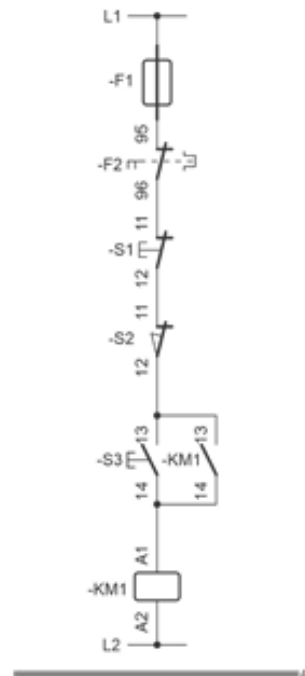
4.3.7 Ejemplos de diseño. En esta sección se presentan tres ejercicios simples de diseño, que se obtienen directamente del circuito básico de arranque y parada, y del circuito básico de inversión de giro.

Como primer ejemplo, se considera la maniobra de una vagoneta, para cargar material a un alto horno. La vagoneta será arrancada manualmente en el nivel bajo (arranque por pulsador), y debe detenerse automáticamente al llegar al nivel

superior. Para la solución de este ejercicio, se aplica el circuito básico de arranque y parada.

El circuito de potencia es el mismo circuito básico de arranque y parada; pero el circuito de control requiere el contacto 11-12, del interruptor de final de carrera (S2), conectado en serie con el contacto de protección térmica, y con el pulsador de parada S1. En la figura 40, se muestra el circuito de control correspondiente, donde se observa el símbolo para el contacto N-C del interruptor de final de carrera (contacto 11-12 de S2).

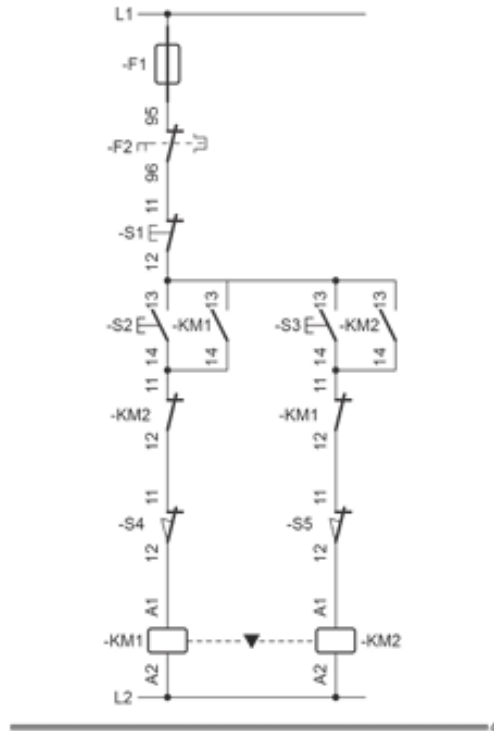
Figura 40. Circuito de mando con control de llegada



Como segundo ejemplo, se modifica la maniobra de la vagoneta, esta vez con control de llegada, tanto en el nivel superior, como en el nivel inferior. La orden de subida, y la orden de bajada se dan manualmente por medio de pulsadores. Dado que esta maniobra requiere dos sentidos de marcha, se aplica el circuito de potencia básico de inversión de giro, sin ninguna modificación.

En cuanto al circuito de control, basta con adaptar el circuito básico de control para inversión de giro, mediante la inclusión de los contactos 11-12 de S4 y 11-12 de S5, cada uno en serie con la bobina del contactor respectivo. Véase la figura 41.

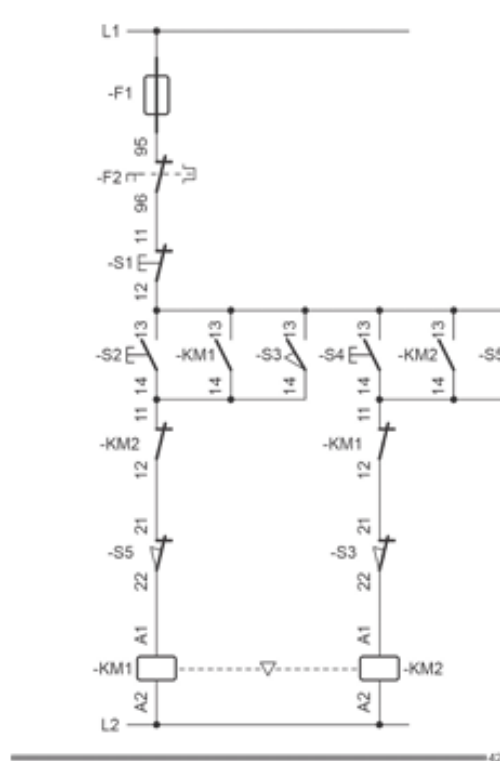
Figura 41. Circuito para control de llegada en ambos extremos



Para el siguiente ejemplo, se cambian las condiciones de funcionamiento de la vagoneta, de manera que, al llegar a cualquiera de los dos niveles, la vagoneta se detenga e invierta la marcha automáticamente.

Nuevamente se aclara que solo cambia el circuito de control, para el cual basta con incorporar los contactos N-O 13-14 de S3 y N-O 13-14 de S5, en paralelo con los respectivos pulsadores de marcha. Véase la figura 42.

Figura 42. Inversión de marcha con retorno automático



5. MÉTODOS DE ARRANQUE

Para comprender el proceso de arranque, es preciso distinguir entre dos estados del motor: el estado dinámico, o estado transitorio; y el estado estable, o permanente. Durante el estado estable el motor demanda una corriente no mayor que la corriente nominal; pero en el momento del arranque (estado dinámico), el motor demanda una corriente varias veces mayor que la corriente nominal. Tal situación es perjudicial tanto para la máquina como para la instalación eléctrica. Es necesario, entonces, idear métodos que permitan reducir la corriente de arranque; entre tales métodos se tienen los de tensión reducida y los métodos electrónicos de arranque suave.

5.1 ARRANQUE ESTRELLA (Y) -TRIÁNGULO (Δ)

También se conoce como arranque estrella-delta, o arranque Y-delta. Para que este método sea aplicable, el motor debe cumplir dos requisitos: primero, que se pueda cambiar externamente la conexión de estrella a triángulo (sueltas las terminales del neutro); y segundo, que el motor sea especificado para funcionar en triángulo (Δ), a la tensión de la red. Si el segundo requisito no se cumple, se logra el efecto contrario.

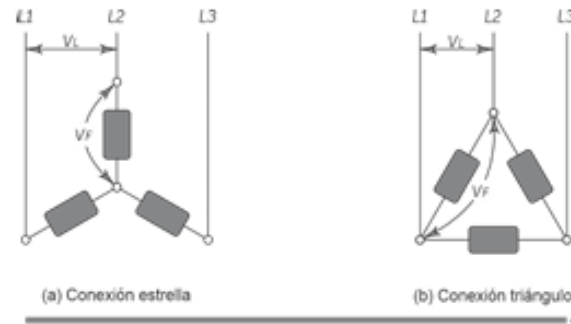
El método consiste en conectar el motor inicialmente en Y, esperar a que adquiera cierta velocidad, y cambiar a la conexión Δ , para que continúe en servicio con esta conexión. En la figura 43, se muestra el esquema de seis terminales, apto para el intercambio de conexiones Y- Δ .

Figura 43. Denominación de terminales externas.



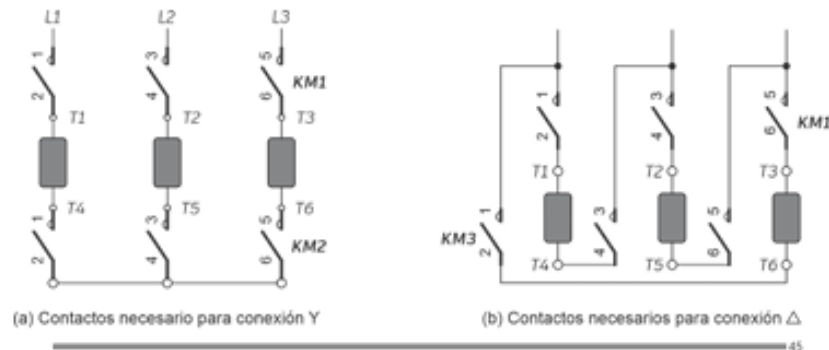
La conexión en estrella se realiza uniendo las terminales T4-T5-T6, y energizando por T1, T2 y T3, con L1, L2 y L3, respectivamente. La conexión en triángulo, se realiza uniendo las terminales T2-T4, T3-T5 y T1-T6, y energizando por T1, T2 y T3, con L1, L2 y L3, respectivamente. En la figura 44 se ilustran las conexiones, y los voltajes de fase y de línea, para ambos casos.

Figura 44. Conexiones estrella y triángulo



Nótese que, en la conexión triángulo, el voltaje de fase es igual al voltaje de línea. En cambio, en la conexión estrella, el voltaje de fase es menor que el voltaje de línea; concretamente $V_f = V_L/\sqrt{3}$; es decir, que el voltaje de fase es aproximadamente el 58% del voltaje de línea. Esta es precisamente la propiedad que interesa; porque, al reducir el voltaje, se reduce la corriente de arranque. Naturalmente, el par de arranque también se reduce; por lo cual este método solo se aplica para motores que arrancan en vacío o con cargas de baja inercia.

Figura 45. Intercambio de conexiones Y a Δ



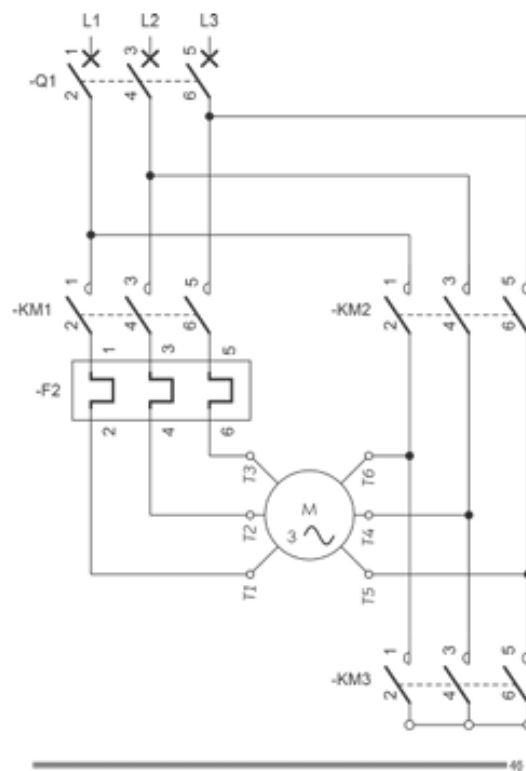
En la figura 45(a), se muestran los contactos necesarios para realizar la conexión Y. El neutro se forma uniendo las terminales T4-T5-T6, con los contactos 1-2, 3-4 y 5-6, del contactor KM2. El suministro de energía llega hasta T1, T2 y T3, a través de los contactos 1-2, 3-4 y 5-6, del contactor KM1.

En la figura 45(b), se abren los contactos del neutro, y se unen los contactos que forman el triángulo: se unen las terminales T1-T6 con los contactos 1-2 de KM1 y

KM3; se unen las terminales T2-T4, con los contactos 3-4 de KM1 y KM3; y se unen las terminales T3-T5, con los contactos 5-6 de KM1 y KM3. El suministro de energía es el mismo de la conexión Y.

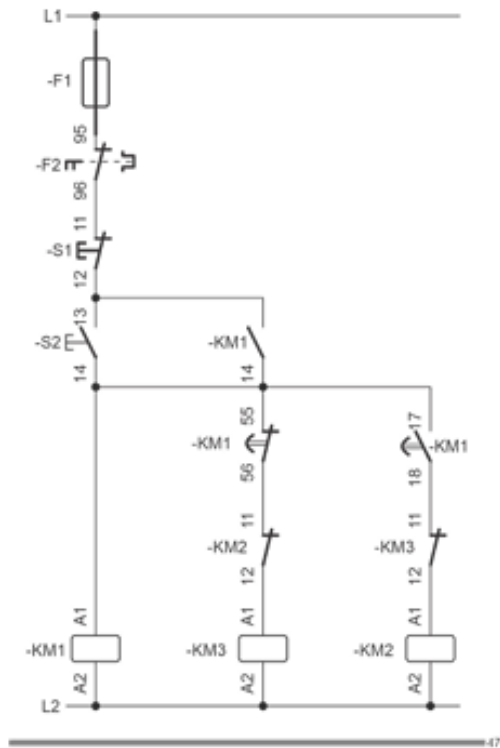
Las partes (a) y (b) de la figura 45, se combinan en el circuito de potencia de la figura 46. Nótese que los sensores de sobrecarga del relé térmico, van instalados dentro del triángulo; esto se hace porque la corriente de fase es solo el 58% de la corriente de línea, y así se reduce el calibre necesario del relé térmico.

Figura 46. Circuito de potencia para un arrancador Y- Δ



En la figura 47, se muestra el circuito de control para un arrancador Y- Δ . Obsérvese la posición de los contactos de enclavamiento entre KM2 y KM3. La secuencia de funcionamiento, para el circuito combinado potencia-control, es la siguiente:

Figura 47. Circuito de control para un arrancador Y-Δ



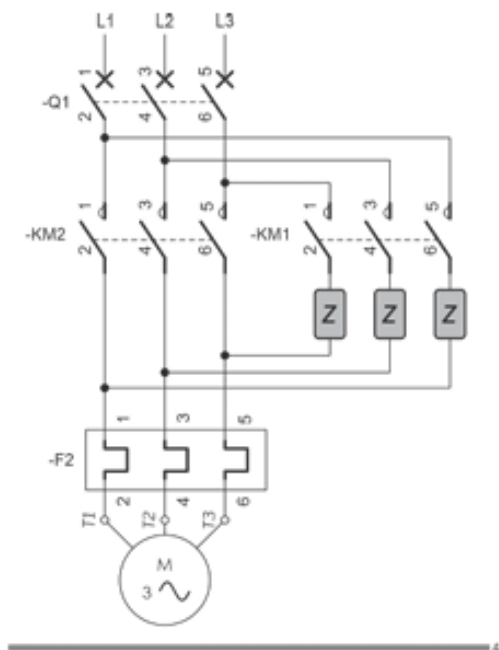
- Acción manual sobre S2 para energizar las bobinas de KM1 y KM3.
- Cierre automático del contacto de retención KM1, para sostener la continuidad del circuito hasta las bobinas de KM1 y KM3.
- Inicia conteo de temporizador KM1.
- Arranque del motor en estrella. Los contactos de potencia de KM1 se conectan a la red, y los contactos de potencia de KM3 forman el neutro de la estrella.
- Finaliza el tiempo de conteo preestablecido.
- Se abre el contacto temporizado 55-56 de KM1, para desenergizar KM3 y deshacer la estrella.

- Se cierra el contacto temporizado 17-18 de KM1, para energizar KM2 y formar el triángulo.
- El motor continúa en servicio, conectado en triángulo.

5.2 ARRANQUE POR IMPEDANCIAS PRIMARIAS

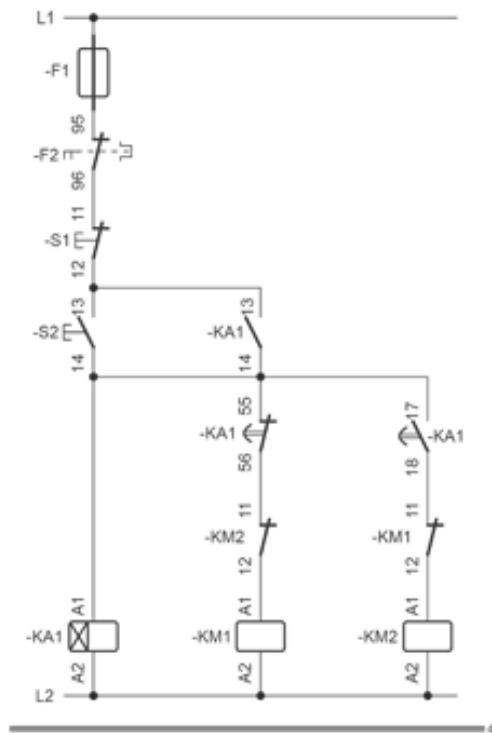
Conocido, también, como arranque por impedancias estáticas, es otro método de arranque a tensión reducida. En este caso, la reducción de voltaje se logra insertando, temporalmente, una impedancia en serie con cada fase del motor. Para este fin se utilizan resistencias o bobinas. Cuando el motor alcanza la velocidad nominal, la impedancia se retira del circuito, y el motor se conecta directamente a la red. Véase la figura 48.

Figura 48. Circuito de potencia para arranque por impedancias primarias



Tipicamente, las reducciones de voltaje son del orden del 20%; es decir, que la corriente de arranque se reduce al 80%; por lo tanto, el par motriz, durante el arranque, se reduce al 64% del par de arranque nominal. Esta es una desventaja notable, pero el método es adecuado para motores cuyas terminales no permiten cambio de conexión. El circuito de control se muestra en la figura 49.

Figura 49. Circuito de control para arranque con impedancia primaria



El circuito combinado potencia-control tiene la siguiente secuencia de funcionamiento:

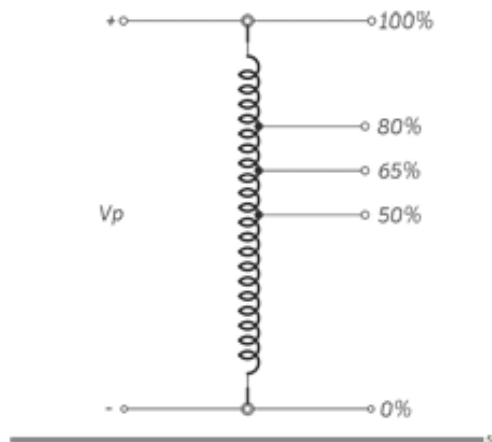
- Acción manual sobre S2 para energizar el temporizador KA1 y el contactor KM1.
- Cierre automático del contacto de retención de KA1, para sostener la continuidad del circuito hasta las bobinas de KA1 y KM1.
- Inicia el conteo del temporizador KA1.
- Arranque del motor en serie con las impedancias Z. Los contactos de potencia de KM1 se conectan a la red.
- Finaliza el tiempo de conteo preestablecido.
- Se abre el contacto temporizado 55-56 de KA1, para desenergizar KM1. Las impedancias Z salen del circuito.

- Se cierra el contacto temporizado 17-18 de KA1, para energizar KM2. El motor queda conectado directamente a la red.

5.3 ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR

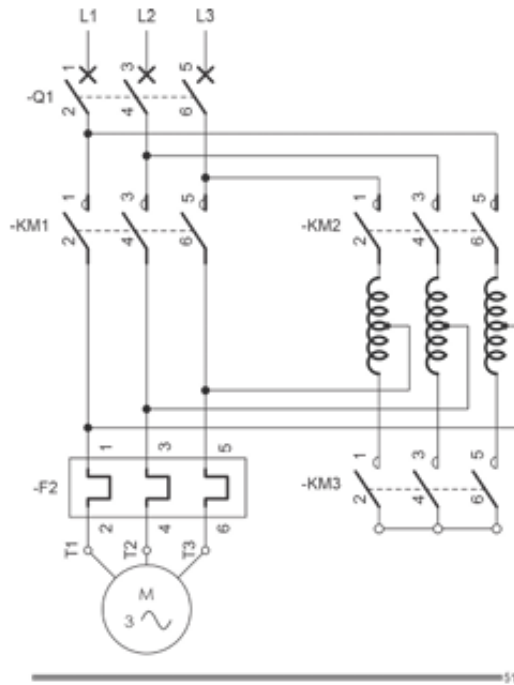
En términos simples, un autotransformador es un transformador con un solo devanado, y varias terminales, que se pueden usar como entradas o como salidas de voltaje. En la figura 50, se muestra un esquema de terminales de un autotransformador monofásico. A las terminales primarias se les aplica el voltaje V_p , y en las terminales secundarias se obtienen diferentes valores de voltaje, según el diseño específico.

Figura 50. Esquema de terminales de un autotransformador monofásico



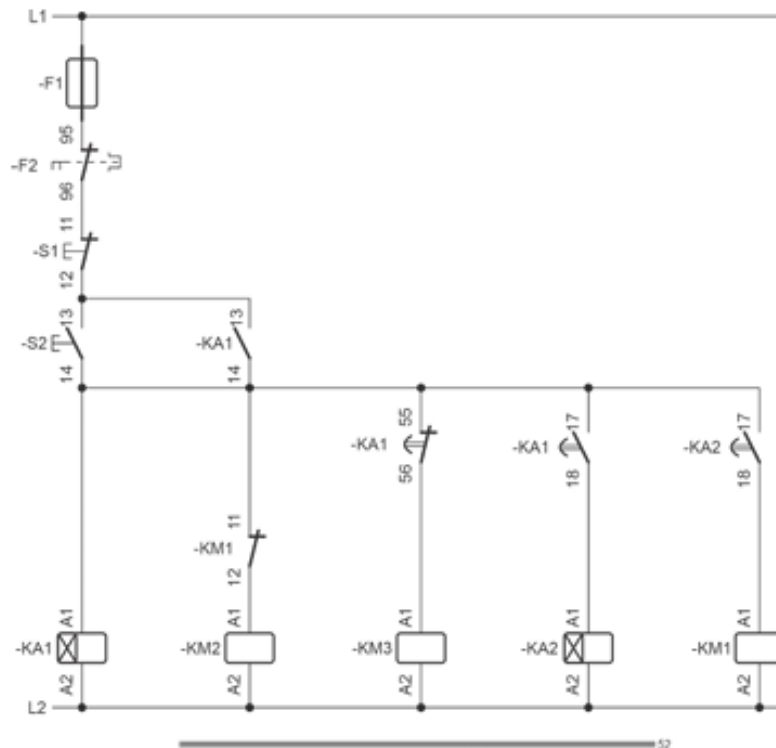
El arranque por autotransformador consiste en aplicar, a las terminales del motor, cierto porcentaje de la tensión de la red, e ir aumentando su valor en varias etapas, a medida que el motor alcanza mayor velocidad. Finalmente, al llegar a la tensión nominal, se pone fuera de servicio el autotransformador, y el motor queda acoplado directamente a la red. La aplicación de este método reduce considerablemente el consumo de energía durante el arranque; de hecho, es considerado entre los más eficientes para el arranque de motores de inducción trifásicos. A continuación, se desarrolla el diseño de un arrancador que utiliza un autotransformador con una sola derivación por fase. El circuito de potencia para este arrancador se ilustra en la figura 51, y su funcionamiento es como se explica a continuación:

Figura 51. Circuito de potencia para arranque por autotransformador



- Mediante el cierre del contactor KM3, el autotransformador queda conectado en estrella.
- A través del contactor KM2, se energiza el autotransformador y éste, a su vez, suministra energía al motor, a tensión reducida.
- Un tiempo después, se abre el contactor KM3, con lo cual se deshace el neutro del autotransformador. Ahora sus arrollamientos se comportan como simples impedancias, y las bobinas del motor quedan en serie con una fracción de dichas impedancias.
- Finalmente, se abre el contactor KM2, y se cierra el contactor KM1, con lo cual el motor queda acoplado directamente a la red.

Figura 52. Circuito de control para arranque por autotransformador



La figura 52, muestra el circuito de control para un arrancador por autotransformador, y su secuencia de funcionamiento es la que se explica a continuación:

- Acción manual sobre S2 para energizar el temporizador KA1 y el contactor KM2.
- Se inicia el conteo de tiempo.
- Se cierra el contacto de retención 13-14 de KA1.
- El contacto 11-12 de KM1, permanece cerrado.
- La bobina del contactor KM3 se energiza inmediatamente, a través del contacto temporizado 55-56 de KA1.
- Finaliza el conteo de tiempo.
- El contacto temporizado 55-56 de KA1 se abre, quitando el suministro a la bobina de KM3.

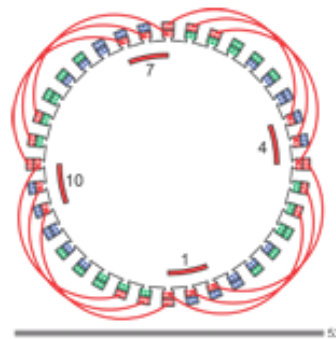
- Se deshace el neutro y el autotransformador queda como simple impedancia.
- Se cierra el contacto temporizado 17-18 de KA1, para suministrar energía a KA2.
- El temporizador KA2 inicia un nuevo conteo de tiempo.
- Finaliza el conteo de tiempo de KA2.
- Se cierra el contacto temporizado 17-18 de KA2, para dar suministro a la bobina de KM1.
- Finalmente, el contacto cerrado 11-12 de KM1, se encarga de desenergizar la bobina de KM2.

Se observa que la secuencia del circuito de control da exactamente los tiempos de operación de los contactores en el circuito de potencia.

5.4 ARRANQUE POR DEVANADO PARCIAL

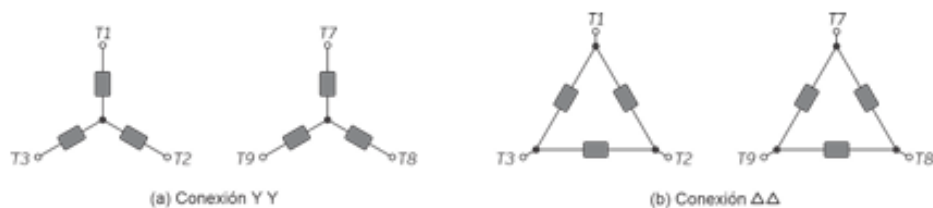
Con este método se busca reducir la corriente de arranque a la mitad, suministrando energía solo a la mitad de cada fase. Se observa, con referencia a la fase A, del motor de 4 polos, ilustrado en la figura 53, que se pueden separar las dos mitades del devanado, conectando entre sí, ya sea los grupos contiguos 1-4 y 7-10, o los grupos diametrales 1-7 y 4-10, aunque estas opciones ya fueron evaluadas y decididas por el fabricante.

Figura 53. Devanado de una fase para un motor de 4 polos



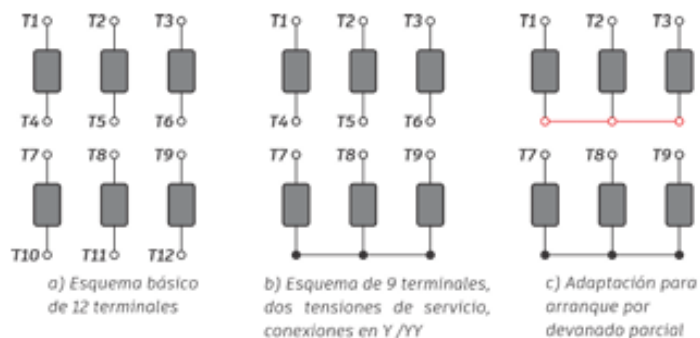
En el entorno comercial, se consiguen motores especialmente contruidos para arranque por devanado parcial; éstos se caracterizan porque tienen solo 6 terminales externas, y pueden tener conexión en YY o conexión en $\Delta\Delta$, como se muestra en la figura 54.

Figura 54. Devanados especiales para arranque por devanado parcial



También es el caso de los motores que vienen especificados para dos tensiones de servicio, los cuales pueden adaptarse para arranque por devanado parcial; por ejemplo, los que vienen para conexión en Y a 440V, y para conexión en YY a 220V. Se entiende que, por tratarse de un devanado parcial, solo se admite la red que corresponda al menor de los dos voltajes.

Figura 55. Adaptación de motor Y/YY para arranque por devanado parcial



A partir del esquema básico de 12 terminales, mostrado en la figura 55(a), se obtiene el esquema de 9 terminales externas, que se muestra en la figura 55(b). La unión T10-T11-T12, la realiza internamente el fabricante. Las nueve terminales externas se usan habitualmente para tener dos opciones de tensión de servicio, ya sea en conexión Y, o en conexión YY. Pero, basta una adaptación, para tener el arrollamiento dividido en dos mitades, y poderle aplicar el método de arranque por devanado parcial.

La adaptación consiste en unir las terminales T4-T5-T6, resaltadas en color rojo en la figura 55(c). Así se forman dos estrellas, o dos mitades del devanado. La primera mitad del devanado, recibe energía por T1, T2 y T3, y es la que soporta la corriente

de arranque. La otra mitad recibe energía por las terminales T7, T8 y T9, con un retardo predefinido.

En la figura 56, se ilustra otro devanado de 9 terminales externas, que se puede adaptar para arranque por devanado parcial. A partir del esquema básico de 12 terminales, mostrado en la figura 56(a), se obtiene el esquema de 9 terminales externas, que se muestra en la figura 56(b). Originalmente, estas terminales se usan para tener dos opciones de tensión de servicio: una para conexión Δ , y otra para conexión $\Delta\Delta$. Ahora bien, dado que el devanado se puede dividir en dos mitades, basta una adaptación, para poderle aplicar el método de arranque por devanado parcial. La adaptación consiste en unir las terminales T1-T6, T2-T4 y T3-T5, formando tres pares distintos, tal como se resalta, en color rojo, en la figura 56(c).

La primera mitad del devanado, recibe energía por T1, T2 y T3, y es la que soporta la corriente de arranque. La otra mitad recibe energía por las terminales T7, T8 y T9, con un retardo predefinido.

Figura 56. Adaptación de motor $\Delta/\Delta\Delta$ para arranque por devanado parcial

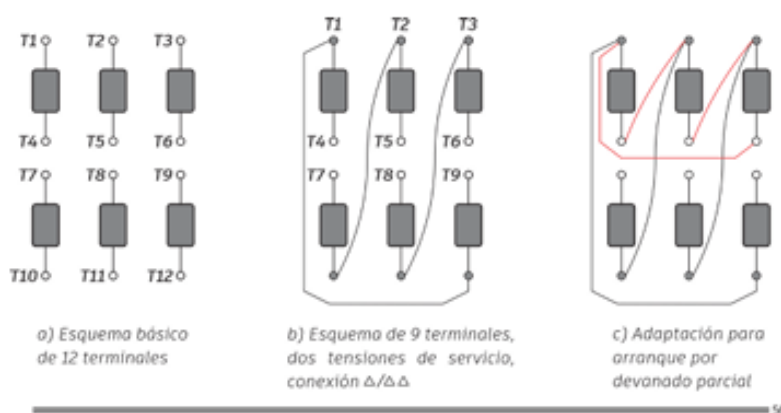
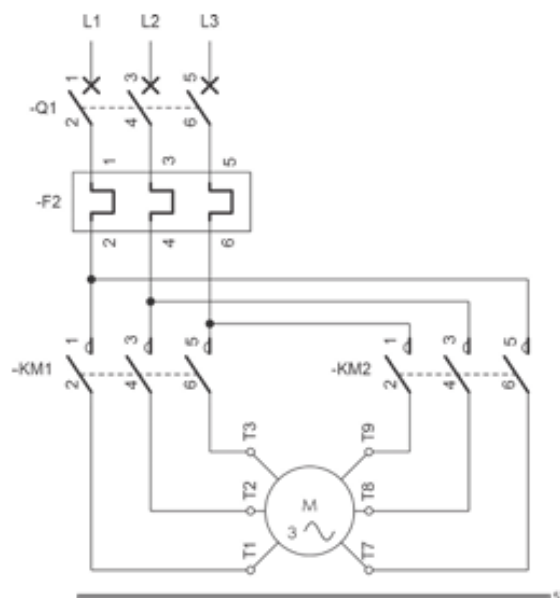


Figura 57. Circuito de potencia para arranque por devanado parcial

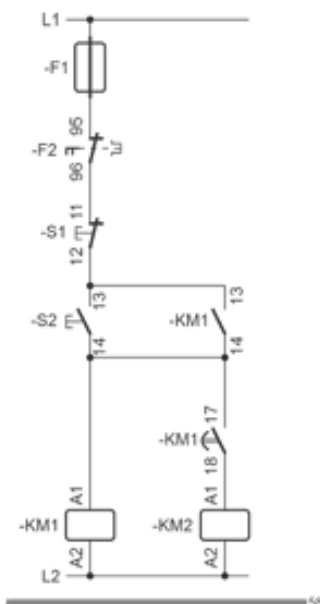


En la figura 57, se muestra el circuito de potencia de un arrancador por devanado parcial, válido en los tres casos explicados, a saber: el motor de arranque por devanado parcial propiamente dicho, el motor de dos tensiones en conexión YY, y el motor de dos tensiones en conexión $\Delta\Delta$. En dicha figura, puede observarse que se requieren dos contactores: uno por cada sección del arrollamiento. El cierre de los contactos de potencia de KM1 suministra energía a la primera mitad del devanado (terminales T1, T2 y T3); entonces se inicia el proceso de arranque, el cual tarda un cierto tiempo, definido por el temporizador. Cuando finaliza el conteo del temporizador, se suministra energía a la otra mitad del devanado, a través de los contactos de potencia de KM2 (terminales T7, T8 y T9). El motor queda en servicio con el devanado completo.

El circuito de potencia está en coordinación con el circuito de control, mostrado en la figura 58, de la siguiente manera:

La acción manual sobre S2, suministra energía a la bobina de KM1. Se cierra el contacto de retención 13-14 de KM1. Inicia el conteo de tiempo. Finalizado el tiempo de retardo, se cierra el contacto temporizado 17-18 de KM1, para suministrar energía a la bobina de KM2.

Figura 58. Circuito de control para arranque por devanado parcial

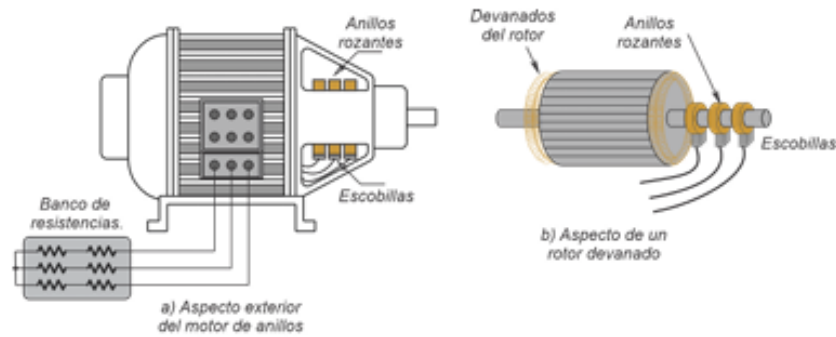


5.5 ARRANQUE DE MOTOR CON ROTOR DEVANADO

También conocido como motor de anillos rozantes, se caracteriza porque no tiene un rotor en jaula de ardilla, sino un rotor devanado, con un arrollamiento trifásico idéntico al arrollamiento del estator. El devanado del rotor se conecta comúnmente en estrella, y las terminales de cada fase van conectadas al exterior por medio de tres anillos colectores, conocidos como anillos rozantes. Estos anillos giran solidarios y concéntricos al eje del rotor. Por medio de ellos, a través de escobillas, pueden conectarse resistencias externas, en serie con el devanado del rotor. Véase la figura 59.

La idea fundamental en la concepción del motor de anillos, fue obtener mejores condiciones de arranque, tanto en el par motriz (del orden de 2.5 veces), como en la corriente, que se reduce a solo dos veces la corriente nominal: un par motriz elevado, con una corriente reducida. Estas condiciones son superiores, considerando que, en promedio, un motor con rotor en jaula demanda unas 5 veces la corriente nominal, y da solamente el 150% del par nominal durante el arranque.

Figura 59. Motor de rotor devanado



Por otro lado, aunque es fácil insertar resistencias para regular las condiciones de arranque, se presentan las siguientes desventajas:

Para velocidades pequeñas, una gran parte de la energía tomada de la red se disipa en forma de calor, en las resistencias.

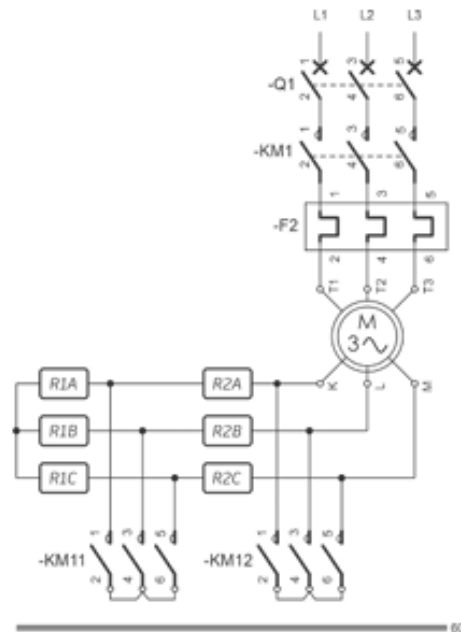
Además, la caída relativa de velocidad o deslizamiento, es muy sensible a la variación del par resistente, lo cual hace que este motor sea inadecuado para regular velocidad en mecanismos de par variable.

Como ya se explicó, el arranque del motor de anillos se realiza insertando varias etapas de resistencias en serie con los anillos rozantes. Para este ejemplo específico, la secuencia de arranque se hará en dos etapas, con una resistencia de rotor dividida en dos secciones.

En la primera etapa del arranque, se suministra energía al arrollamiento del estator, directamente a la tensión de la red. Entre tanto, el arrollamiento secundario (rotor) está en serie con toda la resistencia de arranque, en cada fase. Véase la figura 60. El motor funciona en estas condiciones durante cierto tiempo predeterminado, alcanzando un porcentaje de su velocidad nominal.

La segunda etapa comienza cuando se cierra el contactor KM11, poniendo en cortocircuito a R1. Con esto los arrollamientos del rotor quedan en serie solo con las resistencias R2 de cada fase. Así continúa funcionando el motor hasta alcanzar un porcentaje más de velocidad.

Figura 60. Circuito de potencia para arrancador de motor de anillos



El proceso de arranque finaliza cuando se cierra el contactor KM12, dejando los arrollamientos del rotor en cortocircuito. Es de aclarar que pueden adicionarse tantas etapas como se requieran, con el mismo esquema de funcionamiento.

El circuito de control, para este arrancador, se muestra en la figura 61, donde puede rastrearse la siguiente secuencia de funcionamiento:

La acción manual sobre S2 suministra energía a la bobina de KM1

Se cierra el contacto de retención 13-14 de KM1

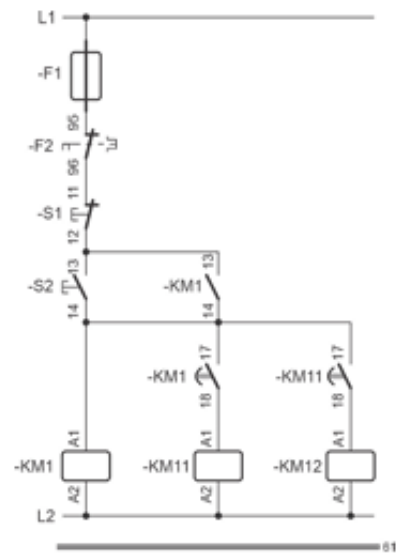
El temporizador KM1 inicia el primer conteo

Finalizado el conteo, se cierra el contacto temporizado 17-18 de KM1 y suministra energía a la bobina de KM11.

El temporizador KM11 inicia el segundo conteo

Finalizado el conteo, se cierra el contacto temporizado 17-18 de KM11, y suministra energía a la bobina de KM12.

Figura 61. Circuito de control para arrancador de motor de anillos



6. MÉTODOS PARA CAMBIAR LA VELOCIDAD

El cambio de velocidad, en un motor de inducción, se logra cambiando ya sea la frecuencia de la red, o el número de polos, de acuerdo con la ecuación $n = 60 f/p$. Donde n es la velocidad de rotación del flujo magnético (velocidad sincrónica), en revoluciones por minuto (rpm); f es la frecuencia de la red en Hertz (Hz); y p es el número de pares de polos del devanado. Aquí se hace referencia a la velocidad del flujo magnético, pero se sabe que la velocidad real del rotor difiere por un valor cercano al 5%. Por ejemplo, para un motor de 4 polos, conectado a una red de 60 Hz, se tendrá una velocidad sincrónica de 1800 rpm, y una velocidad de rotor (asincrónica) de 1720 rpm, aproximadamente. En esta sección, se estudiará el cambio de velocidad por variación del número de polos, para lo cual los métodos más empleados son: el método de devanados independientes, el método de polos conmutables (*Dahlander-Lindström*), y el método de modulación de la amplitud polar, más conocido por su sigla en inglés: motor PAM.

Con estos métodos se obtiene un número limitado de velocidades, dependiendo del número de conexiones que puedan admitir los bobinados. Cuando se tienen devanados independientes y devanados tipo PAM, las velocidades pueden guardar cualquier proporción diferente de 1-2; pero, con devanados de polos conmutables, la proporción tiene que ser estrictamente de 1-2; por ejemplo 900-1800, para 8 y 4 polos, respectivamente. También se pueden tener dos devanados de polos conmutables, con lo cual se obtienen 4 velocidades; por ejemplo: 900-1800 y 600-1200.

6.1 MOTOR CON DOS DEVANADOS INDEPENDIENTES

Para este ejemplo, se eligió un motor con arrollamiento en Δ , para la menor velocidad; y con arrollamiento en Y, para la mayor. En el recuadro, de la figura 62, se observan las siguientes terminales: para la velocidad menor, con un devanado en Δ , las terminales T1, T2, T3 y T7; y para la velocidad mayor, con un devanado en Y, las terminales T11, T12 y T13.

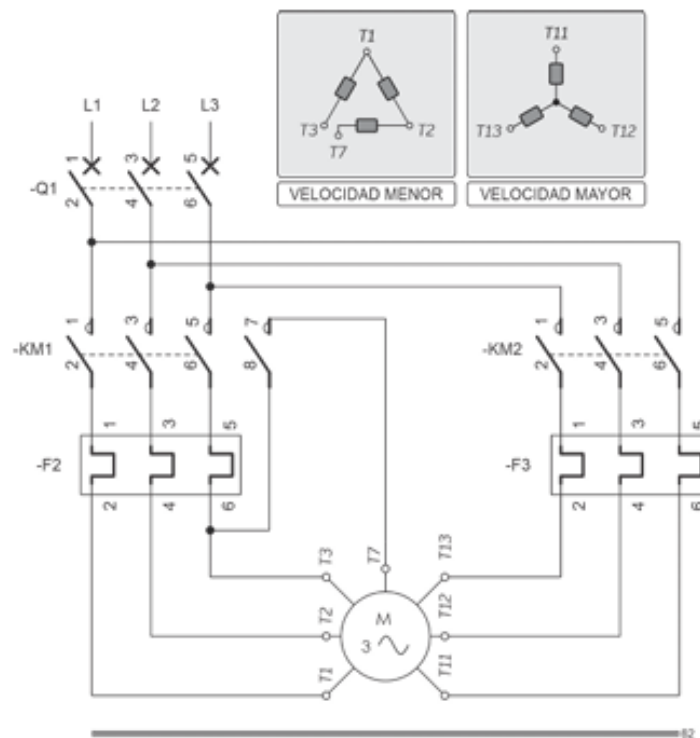
Se escogió esta conexión particular, porque presenta algunos cambios que requieren explicación. Lo primero es el hecho de tener un devanado en Δ , el cual no presentaría problemas si estuviera solo, pero se encuentra con el devanado en Y, en el mismo circuito magnético. Esto implica que, en los devanados de la Δ , se inducen tensiones y, si el circuito está cerrado, aparecen corrientes circulantes, aunque la Δ no esté conectada a la red. Las corrientes circulantes implican pérdidas de energía, y calentamiento que podría quemar el devanado. Es la razón de tener la delta en circuito abierto, siendo reemplazada la terminal T3 por las terminales (T3 y T7).

El segundo cambio surge de la necesidad de unir las terminales T3 y T7, cuando entra en servicio la delta. Para este propósito, se requiere un contactor tetrapolar (de 4 polos).

La maniobra del motor, con el devanado de menor velocidad, requiere el contacto de potencia 7-8, del contactor KM1 para cerrar la delta (Δ), y los contactos de potencia 1-2, 3-4, y 5-6, para suministrar energía al devanado. Por otro lado, la maniobra del motor, con el devanado de mayor velocidad, solo requiere tres contactos de potencia 1-2, 3-4, y 5-6, (contactor KM2). Véase la figura 62.

Obsérvese que se han dispuesto dos relés de sobrecarga: uno por cada arrollamiento, debido a que las características eléctricas de ambos devanados son diferentes.

Figura 62. Circuito de potencia para motor de dos velocidades dos devanados

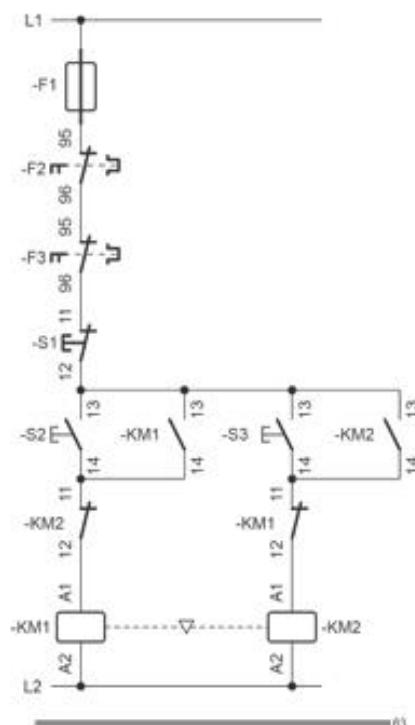


Como siempre, el circuito de control se diseña de acuerdo con los requerimientos y restricciones del circuito de potencia. En este caso, se requiere el control de dos

contactores, a los cuales se les evita el funcionamiento simultáneo, por medio de los contactos de enclavamiento: contacto cerrado 11-12 de KM2, en serie con la bobina de KM1, y contacto cerrado 11-12 de KM1, en serie con la bobina de KM2.

Sabiendo que se tienen dos relés de sobrecarga, los respectivos contactos de protección 95-96 de F2, y 95-96 de F3, se conectan en serie con el contacto de parada 11-12.

Figura 63. Circuito de control para motor de dos velocidades dos devanados



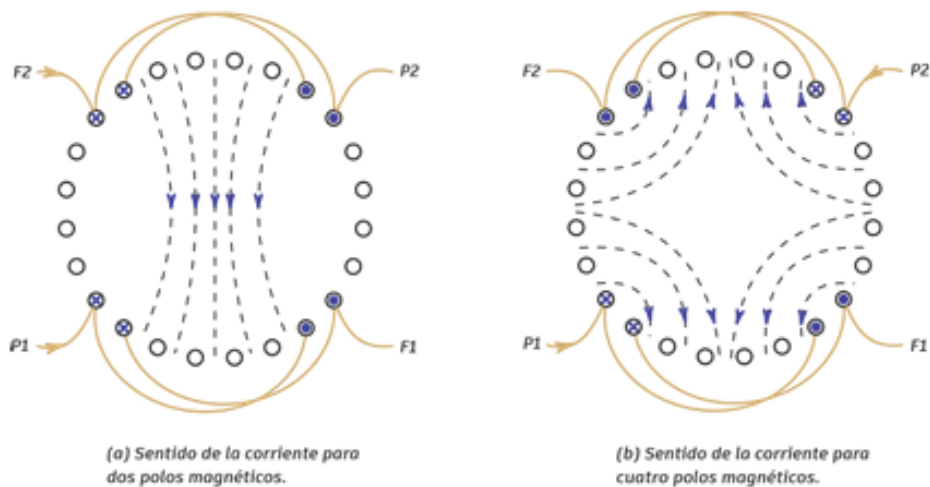
6.2 MOTOR DE DOS VELOCIDADES CON POLOS CONMUTABLES.

El método de polos conmutables, o método de *Dahlander-Lindström*, permite duplicar el número de polos, y reducir la velocidad a la mitad, con un simple cambio de conexión.

Con referencia a la figura 64(a), si las conexiones se realizan de tal manera que la corriente entre por P1, en la bobina de la parte inferior, y entre por F2, en la bobina

de la parte superior, se obtienen dos polos en el circuito magnético. Ahora, con referencia a la figura 64(b), realizando las conexiones de tal manera que la corriente entre por P1, en la bobina de la parte inferior, y entre por P2, en la bobina de la parte superior, se obtienen cuatro polos en el circuito magnético. La verificación puede hacerse inmediatamente, siguiendo la regla de la mano derecha: el pulgar extendido indica la dirección de la corriente, mientras los demás dedos, formando un arco, indican la dirección del campo.

Figura 64. Ilustración de un devanado Dahlander



En la figura 65(a), se muestra el diagrama de conexiones para un devanado de polos conmutables. Las flechas en contorno indican la formación de polos consecuentes; las flechas con relleno indican la formación de polos convencionales. En la figura 65(b), se ilustran las conexiones del devanado trifásico completo, con la configuración para servicio a par constante. Es de aclarar que, en el ámbito comercial, existen tres configuraciones para la conexión de motores trifásicos de polos conmutables: conexión a par constante, conexión a par variable, y conexión a potencia constante, como se ilustra en la figura 66.

Figura 65. Conexiones internas para un devanado Dahlander

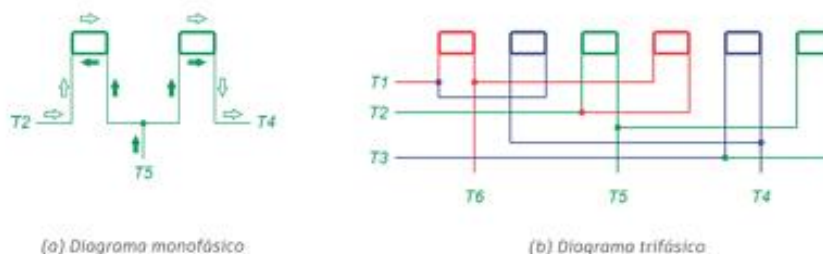


Figura 66. Denominación de terminales para motores Dahlander

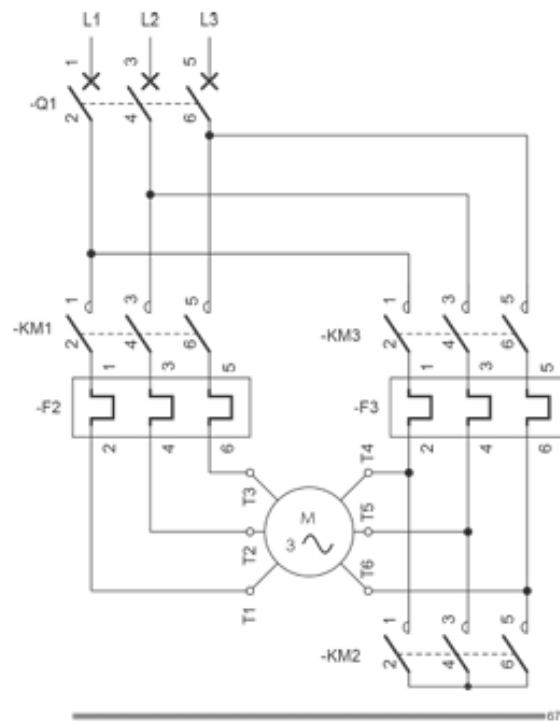
NORMA IEC																				
PAR CONSTANTE				PAR VARIABLE				POTENCIA CONSTANTE												
VEL.	L1	L2	L3	UNIDOS	VEL.	L1	L2	L3	UNIDOS	VEL.	L1	L2	L3	UNIDOS						
BAJA	U1	V1	W1		BAJA	U1	V1	W1		BAJA	U1	V1	W1	U2	V2	W2				
ALTA	U2	V2	W2	U1	V1	W1	ALTA	U2	V2	W2	U1	V1	W1	ALTA	U2	V2	W2			
NORMA ANSI-NEMA																				
PAR CONSTANTE				PAR VARIABLE				POTENCIA CONSTANTE												
VEL.	L1	L2	L3	UNIDOS	VEL.	L1	L2	L3	UNIDOS	VEL.	L1	L2	L3	UNIDOS						
BAJA	T1	T2	T3		BAJA	T1	T2	T3		BAJA	T1	T2	T3	T4	T5	T6				
ALTA	T4	T5	T6	T1	T2	T3	ALTA	T4	T5	T6	T1	T2	T3	ALTA	T4	T5	T6			

Como ejemplo del uso de los esquemas mostrados en la figura 66, se diseñará un circuito de maniobra para un motor de dos velocidades, de polos conmutables, en

configuración para potencia constante. Como siempre, el diseño del circuito de maniobra, se inicia con los datos especificados por el fabricante, ya sea en un catálogo de productos, o en la misma placa del motor

En las indicaciones dice que, para configuración a potencia constante, se realizan las siguientes conexiones: para velocidad baja, energizar por T1, T2 y T3, con L1, L2 y L3, respectivamente (contactos de potencia de KM1), y mantener unidas entre sí las terminales T4-T5-T6 (contactos de potencia de KM2); para velocidad alta, energizar por T4, T5 y T6, con L1, L2 y L3, respectivamente (contactos de potencia de KM3). Véase la figura 67.

Figura 67. Circuito de potencia para motor Dahlander (Potencia constante)

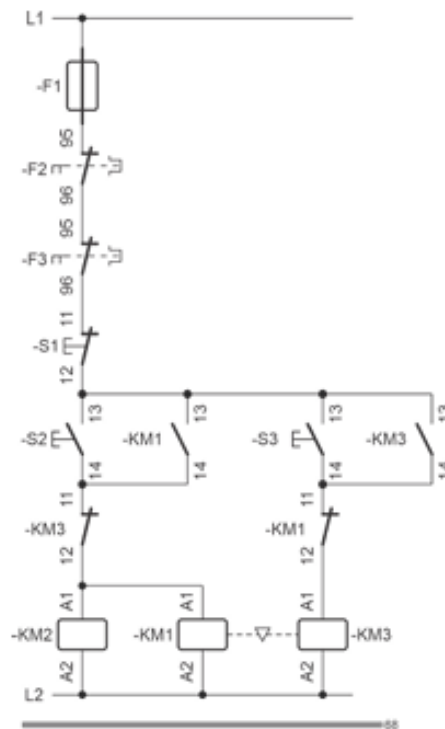


En la figura 68 se muestra el circuito de control, el cual se diseña para responder a los requerimientos del circuito de potencia. Así, en baja velocidad, para activar los contactores KM1 y KM2, sus respectivas bobinas se energizan mediante la acción manual sobre S2; y la retención se realiza con el contacto 13-14 de KM1. Del mismo modo, en velocidad alta, para activar el contactor KM3, se energiza su bobina, por

medio de la acción manual sobre S3; y la retención se realiza con el contacto 13-14 de KM3.

Finalmente, se disponen los contactos de enclavamiento: contacto 11-12 de KM3 en serie con el paralelo de las bobinas KM1 y KM2, y el contacto 11-12 de KM1 en serie con la bobina KM3.

Figura 68. Circuito de control para motor *Dahlander* (Potencia constante)

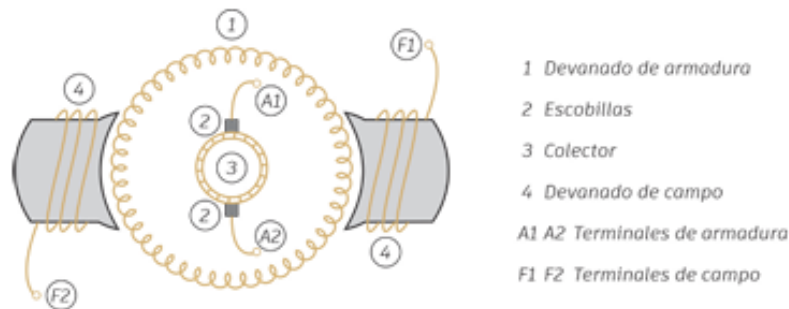


7. CONTROL ELECTRÓNICO

7.1 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (DC)

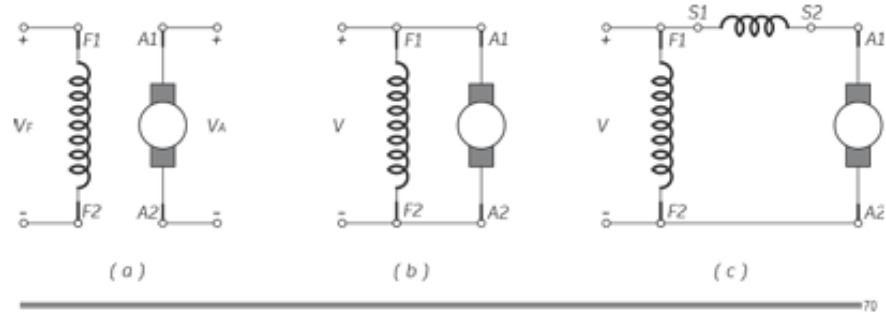
La figura 69 representa la estructura básica de un motor de corriente directa, en el cual, a diferencia del motor de inducción, el suministro de corriente para el rotor se hace directamente desde la fuente de poder, a través de las terminales A1 y A2. El devanado de armadura (rotor) está distribuido sobre la periferia, incrustado en ranuras que van paralelas al eje. Desde cada bobina de este devanado salen terminales que van soldadas al colector, y éste a su vez se conecta a las terminales exteriores por medio de escobillas de grafito. El devanado de campo va arrollado sobre un núcleo magnético, y se compone de dos bobinados: uno de calibre delgado y gran número de espiras (F1-F2), que se conecta en paralelo con la armadura; y otro de calibre grueso y pocas espiras (S1-S2), que se conecta en serie con la armadura. El devanado serie no se muestra en la figura.

Figura 69. Estructura básica del motor DC



Dependiendo de la conexión entre el devanado de campo y el devanado de armadura, existen varias configuraciones, de las cuales se presentan algunas en la figura 70: (a) excitación de campo independiente, (b) excitación de campo en derivación o paralelo, y (c) excitación de campo mixta o compuesta. Obsérvese, en la figura 70(c), que al retirar el devanado F1-F2, queda simplemente una conexión serie. Un caso especial de excitación independiente, es el motor de imán permanente, utilizado en electrodomésticos de bajo consumo, en accesorios para vehículos, en juguetería, y en algunos equipos de oficina.

Figura 70. Algunas conexiones para motores de corriente directa



7.2 DISPOSITIVOS ELECTRONICOS

En general, la electrónica de potencia estudia el control de dispositivos de conmutación de estado sólido, tales como transistores bipolares y de efecto de campo; así como los llamados tiristores, principalmente el SCR y el TRIAC. Se enfocará la atención en el manejo del transistor bipolar, ya que la adaptación a otros dispositivos como los MOSFET de potencia y los IGBT es inmediata.

Un transistor bipolar consta de tres capas de material semiconductor (cualquier elemento químico de la tabla periódica, con 4 electrones de valencia), como el silicio y el germanio. Al material semiconductor puro se le agrega un porcentaje mínimo de impurezas para modificar su conductividad: cuando se agregan impurezas de elementos químicos como el antimonio, el arsénico y el fósforo, con 5 electrones de valencia, se forma un semiconductor negativo o tipo N; y cuando se agregan impurezas de elementos químicos como el galio, indio y boro, con tres electrones de valencia, se forma un semiconductor positivo o tipo P.

Figura 71. Estructura del transistor bipolar



En la figura 71, se ilustra la estructura básica del transistor bipolar, junto con el símbolo respectivo, tanto para las uniones npn, como para las uniones pnp. La denominación de las terminales es B para la base, C para el colector, y E para el emisor.

Es importante notar que el transistor npn tiene emisor negativo (símbolo de flecha alejándose de la base); por esta razón se conecta apuntando al negativo de la fuente de poder o, de manera más conveniente, se conecta directamente al terminal negativo de la fuente de poder, para facilitar el control de la base. Entre tanto, en la base, que es positiva, la corriente apunta hacia adentro del transistor.

Por otro lado, el transistor pnp tiene emisor positivo, (símbolo de flecha acercándose a la base); por esta razón se conecta apuntando al positivo de la fuente de poder o, de manera más conveniente, se conecta directamente al terminal positivo de la fuente de poder, para facilitar el control de la base. Entre tanto, en la base, que es negativa, la corriente apunta hacia afuera del transistor.

En cuanto a las aplicaciones, el transistor bipolar tiene dos modos de operación: el modo activo, y el modo de conmutación. En el modo activo o lineal, la corriente de colector es directamente proporcional a la corriente de base; esta característica es muy útil para el trabajo con circuitos osciladores y amplificadores. En el modo de conmutación, el transistor trabaja en todo o nada (encendido o apagado); son dos estados específicos de operación, conocidos como operación en región de saturación, y operación en región de corte, respectivamente.

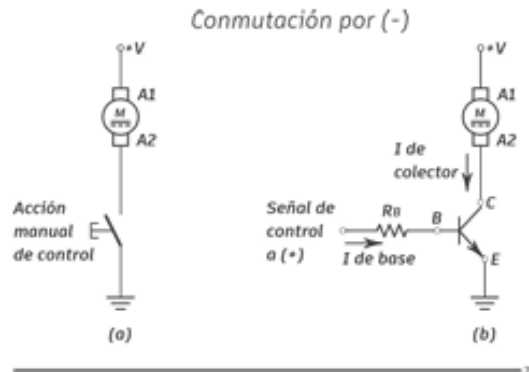
7.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONMUTACIÓN ELECTRÓNICA

Para el control de motores eléctricos, se utiliza el transistor en modo de conmutación, porque se comporta de manera muy aproximada a un interruptor: conducción y no conducción. La conducción ocurre entre colector y emisor, y la corriente de base actúa como señal de control. El control del motor, en los ejercicios de este capítulo, se realiza solamente en el devanado de armadura, y la excitación de campo puede ser independiente, o con imán permanente. En el caso de excitación independiente, el devanado F1-F2 se conecta a plena tensión.

7.3.1 Conmutación por negativo (-). En la figura 72(a), se muestra un circuito de encendido-apagado, para la armadura de un motor DC, por medio de un interruptor manual. La acción de control se realiza sobre el terminal negativo de la fuente de poder; por eso se llama conmutación por negativo (-). La misma acción de encendido-apagado se muestra en la figura 72(b); pero, en vez de un interruptor, se utiliza la propiedad de conmutación entre colector y emisor de un transistor bipolar.

La corriente, por el circuito de potencia, inicia su recorrido en la terminal positiva de la fuente de poder, entra a la armadura por la terminal A1, sale por la terminal A2, entra al transistor por el colector, y finalmente sale por el emisor al negativo de la fuente de poder. Entre tanto, se observa que la corriente de base va entrando hacia el transistor.

Figura 72. Esquema básico de conmutación por negativo

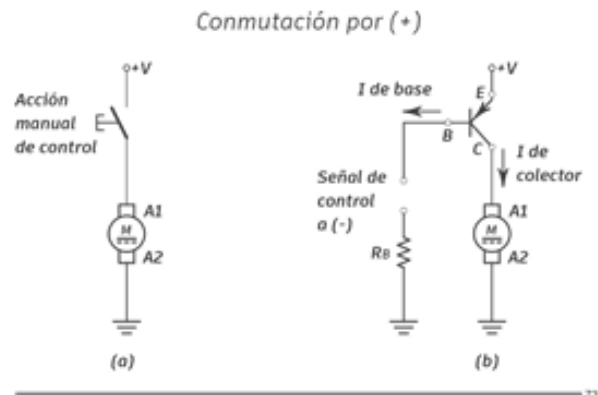


7.3.2 Conmutación por positivo (+). En la figura 73(a), se muestra un circuito de encendido-apagado, para la armadura de un motor DC, por medio de un interruptor manual. La acción de control se realiza sobre el terminal positivo de la fuente de poder; por eso se llama conmutación por positivo (+). La misma acción de encendido-apagado se muestra en la figura 73(b); pero, en vez de un interruptor, se utiliza la propiedad de conmutación entre colector y emisor de un transistor bipolar.

La corriente, por el circuito de potencia, inicia su recorrido en la terminal positiva de la fuente de poder, entra al emisor, sale por el colector, entra a la armadura por la terminal A1, y sale por la terminal A2, hacia el negativo de la fuente de poder. Entre tanto, se observa que la corriente de base va saliendo del transistor.

En lo sucesivo, se llamará circuito de control a los componentes que estén conectados a la base de los transistores de potencia, incluyendo la propia base de esos transistores; y se llamará circuito de potencia a la armadura que se desea controlar, junto con las terminales colector-emisor de los transistores de potencia.

Figura 73. Esquema básico de conmutación por positivo

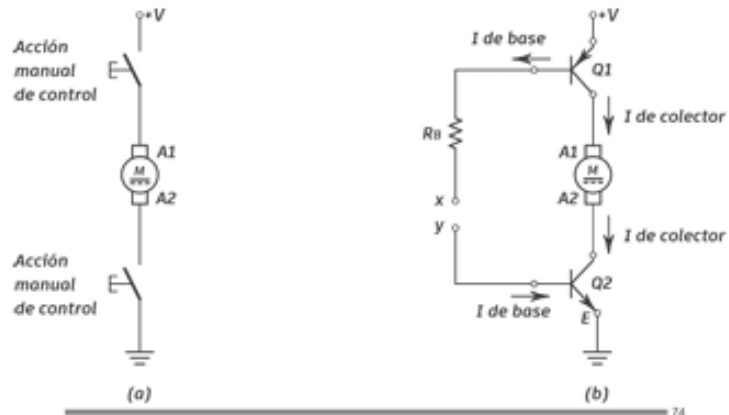


7.3.3 Conmutación dual. Algunas aplicaciones requieren conmutación por ambos extremos. La solución de este problema consiste en combinar las características de conmutación por positivo y conmutación por negativo, aprovechando las propiedades de los transistores pnp y npn.

En la figura 74, se muestra un esquema básico de conmutación dual, utilizando los transistores Q1 y Q2, de polaridades pnp y npn, respectivamente. El transistor Q1 conduce cuando tiene corriente de base saliendo de él; mientras el transistor Q2 conduce cuando tiene corriente de base entrando hacia él. En la figura aparecen sueltas las terminales x-y; de manera que ambos transistores se encuentran en estado de no conducción; pero cuando se juntan dichas terminales, se completa el camino para la corriente que sale de la base de Q1 y entra a la base de Q2, y ambos transistores entran en estado de conducción. Lo anterior, en cuanto al funcionamiento del circuito de control.

Por otro lado, la conducción del circuito de potencia se inicia en la terminal positiva de la fuente, entra al transistor Q1 por el emisor, sale por el colector, entra a la armadura por la terminal A1, sale por la terminal A2, entra al transistor Q2 por el colector, y finalmente sale por el emisor hacia el negativo de la fuente.

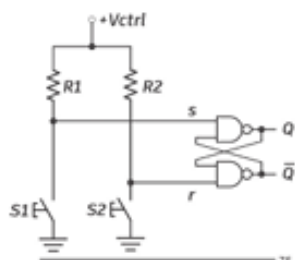
Figura 74. Esquema básico de conmutación dual



Para aplicaciones a baja frecuencia de conmutación, con corriente inferior a 5 A, y voltaje menor que 100 V, se pueden usar las referencias TIP122 (transistor npn), y TIP127 (transistor pnp), los cuales han sido diseñados especialmente para conmutación de carga inductiva, y no requieren protección externa adicional. Por otro lado, para aplicaciones con mayores exigencias en frecuencia de conmutación, voltaje y corriente, es preferible utilizar transistores FET de potencia, o transistores IGBT. La tecnología de estos dispositivos es muy diferente a la del transistor bipolar, pero la adaptación a las arquitecturas de conmutación es inmediata.

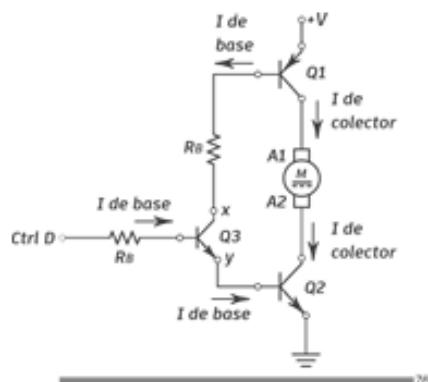
7.3.4 Circuito de arranque y parada para motor DC. Un circuito de maniobra, para las corrientes de base de los transistores Q1 y Q2, podría lograrse con un interruptor manual, pero es más conveniente hacerlo con un circuito que pueda interactuar con otros circuitos, de manera automática. La incorporación de un circuito biestable (*flip-flop*), sirve a este propósito. En la figura 75 se ilustra la estructura básica de un *flip-flop* tipo *set-reset*, el cual consiste en dos compuertas *n-and* interconectadas como se indica: una entrada de la primera, con la salida de la segunda, y viceversa. De esta manera se forma un circuito con dos entradas (s y r), y dos salidas (Q y \bar{Q}). Al lado izquierdo del *flip-flop*, se presenta el circuito de maniobra, que consta de R1-S1, para maniobrar la terminal s, y R2-S2, para maniobrar la terminal r. Cuando se presiona S1, la terminal s del *flip-flop* va a tierra (cero voltios), entonces se activa la salida Q, y se desactiva la salida \bar{Q} ; lo contrario ocurre cuando se presiona S2. El estado de las salidas se conserva cuando los pulsadores vuelven a sus posiciones normales (N-O); es decir, que un *flip-flop* actúa como una memoria elemental, capaz de retener un dato (un cero o un uno).

Figura 75. Circuito de control de arranque y parada de un motor DC



Un *flip-flop* de este tipo, junto con su circuito de maniobra, se emplean para controlar el circuito básico de conmutación dual, donde se requiere unir las terminales x-y, por medio de la conducción de colector-emisor del transistor Q3, como se muestra en la figura 76. La salida Q, del *flip-flop*, se convierte en la acción de control (ctrl D) para la base del transistor Q3. Este transistor puede ser el PN2222, desarrollado específicamente para conmutación, siempre que se mantenga el suministro de voltaje por debajo de los 30V. Obsérvese que, uniendo el circuito de la figura 75 con el circuito de la figura 76, se obtiene el circuito de arranque y parada para el motor DC: el pulsador S1 da la orden de marcha, y el pulsador S2 da la orden de parada.

Figura 76. Circuito de potencia de arranque y parada de un motor DC

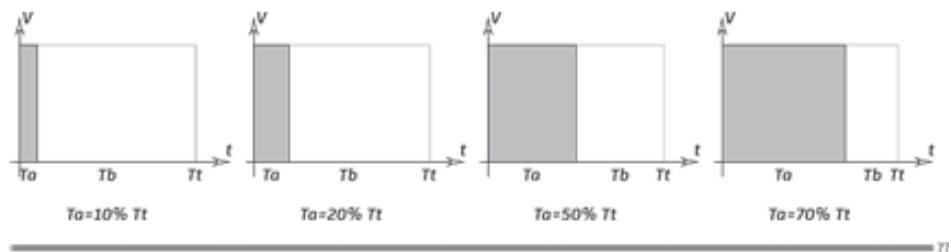


7.3.5 Control de velocidad para motor DC. El control de velocidad es necesario, tanto para el arranque, como para el ajuste del movimiento, en un proceso determinado. En una máquina de corriente directa (DC), la velocidad de rotación es proporcional al producto del voltaje de armadura, multiplicado por la duración del ciclo activo de trabajo. Entonces, para un ciclo de trabajo continuo, la velocidad queda dependiendo solamente del valor del voltaje. Esto permite controlar la

velocidad simplemente modificando el valor del voltaje de armadura; sin embargo, el procedimiento es costoso y poco práctico, por lo cual se prefiere dividir el ciclo de trabajo T_t , en dos tiempos: un tiempo activo o tiempo alto T_a , y un tiempo pasivo o tiempo bajo T_b .

En la figura 77, se ilustran cuatro valores arbitrarios para un ciclo de trabajo (*duty*): en el primer cuadro, el ciclo activo (área sombreada) es solo el 10% del ciclo total; en el segundo cuadro, el ciclo activo es del 20% del ciclo total; en el tercer cuadro, el ciclo activo es del 50% del ciclo total; y en el cuarto cuadro, el ciclo activo el del 70% del ciclo total. Esos porcentajes dan velocidades del 10%, 20%, 50% y 70%, de la velocidad máxima, respectivamente.

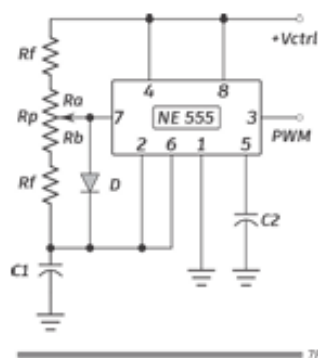
Figura 77. Ciclo de trabajo (*duty*) para un motor de corriente directa



En consecuencia, se requiere un circuito de control capaz de lograr las proporciones de T_a/T_t según la velocidad requerida. Dicho circuito se conoce como circuito de Modulación por ancho de pulso, más conocido por su sigla en inglés: PWM (*Pulse Width Modulation*). Existen muchas opciones para obtener un circuito PWM; por ejemplo, con un microcontrolador; o con cualquiera de los módulos comerciales, diseñados específicamente para este fin; sin embargo, existe uno muy simple y confiable, que se logra con el circuito integrado NE555, tal como se ilustra en la figura 78. La configuración externa es, básicamente, un circuito de carga y descarga, formado por las dos resistencias R_f , el potenciómetro R_p , y el condensador C_f ; y su funcionamiento es similar al funcionamiento de un circuito astable ordinario, excepto por la presencia del diodo de paso D , el cual sirve para desviar la corriente y dejar inactivas la sección R_b del potenciómetro, y la resistencia de la parte inferior R_f . La resistencia R_f , de la parte superior, se incorpora con el fin de limitar la corriente, en el transistor interno de descarga (terminal 7), a un valor inferior a 200 mA (valor recomendado por el fabricante). Así, para un suministro de 5V, se calcula como: $R_f = 5/(0.2) = 25 \Omega$ (valor comercial 27 Ω). Se utiliza una resistencia de igual valor en la parte inferior, para dar simetría a la onda PWM.

Por lo tanto, el tiempo de carga para el condensador corresponde a los dos primeros elementos que encuentra la corriente en serie; a saber, la resistencia de la parte superior R_f y la sección R_a del potenciómetro, multiplicadas por el valor del capacitor C_1 . El diodo, en conducción directa, se puede considerar un corto. A su vez, el tiempo de descarga se determina por los elementos que están en la trayectoria desde el condensador hasta la terminal 7 del circuito integrado. Estos elementos son: la resistencia R_f de la parte inferior, y la sección R_b del potenciómetro. En cuanto a la salida PWM, el tiempo alto corresponde al tiempo de carga, y el tiempo bajo corresponde al tiempo de descarga.

Figura 78. Implementación de un circuito PWM con el NE555

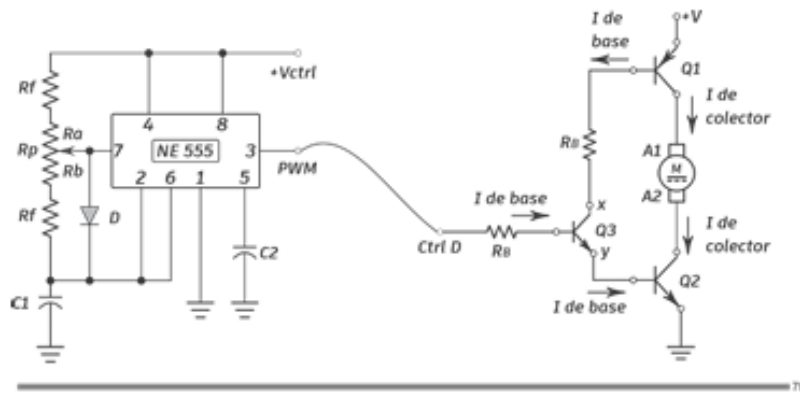


Para diseño de experimentos preliminares, puede escogerse una frecuencia de funcionamiento en el intervalo (50Hz, 1 kHz); es decir, valores para T_c dentro del rango de 0.02 segundos, hasta 0.001 segundos. Para tal efecto, se utiliza la ecuación conjunta de carga y descarga, dada por $T_c = 0.693 \times (2R_f + R_p) \times C_1$

Donde la resistencia R_f es pequeña comparada con R_p (cerca del 1.5%), y se puede despreciar en los cálculos de tiempo, quedando para escoger arbitrariamente el valor de C_1 , para luego despejar el valor de R_p , o viceversa.

Por otro lado, el diodo de paso debe ser de conmutación rápida, como el 1N914, o el 1N4148, aunque para experimentos preliminares, puede usarse el 1N4001. Finalmente, los circuitos de potencia y de control se acoplan como se muestra en la figura 79.

Figura 79. Circuito para control de velocidad de motor DC

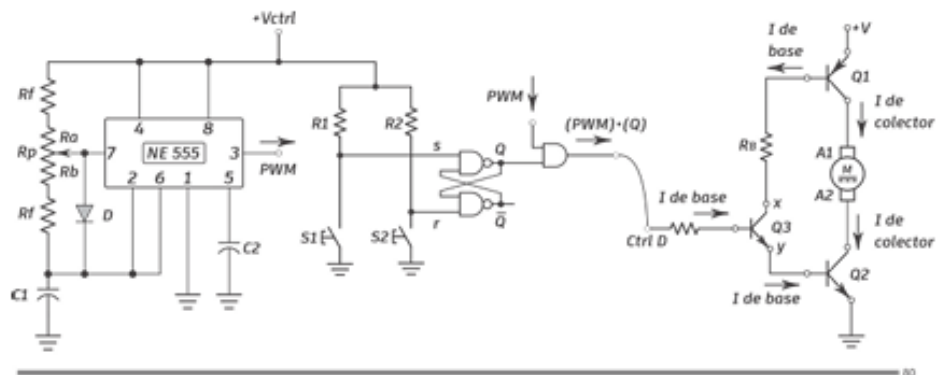


7.3.6 Circuito de arranque y parada con control de velocidad. Para incluir el control de marcha y parada, basta con multiplicar la señal PWM por la salida Q del *flip-flop*. Para esto, se utiliza una compuerta *and*, de donde se obtiene

$$ctrl D = (PWM) \cdot (Q)$$

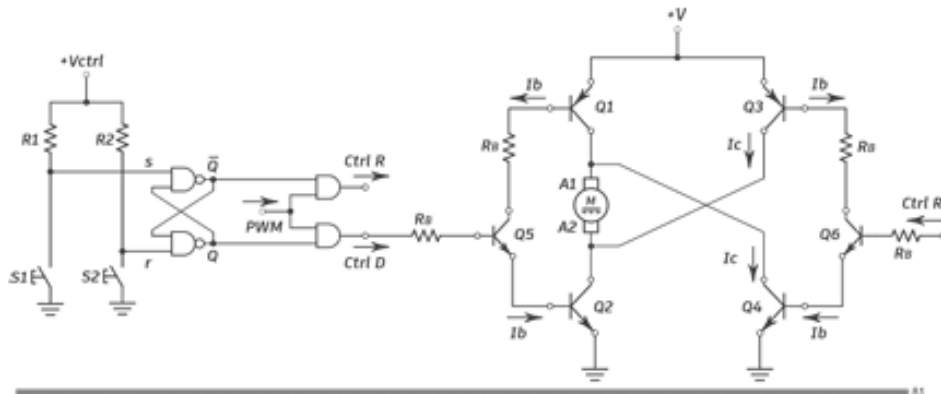
Comparando esta ecuación con la función *and*, estudiada en la sección 1.2, se ve que la salida *ctrl D* es igual a *PWM* cuando *Q* vale uno; y es igual a cero, cuando *Q* vale cero. De esta manera se puede dar la orden de marcha o parada desde el *flip-flop*, mientras la velocidad depende enteramente del porcentaje de PWM en el ciclo de trabajo. Véase la figura 80.

Figura 80. Circuito de arranque y parada con control de velocidad



7.3.7 Circuito para control de velocidad e inversión de marcha. Se sabe que el sentido de giro del motor es en el mismo sentido de las agujas del reloj, cuando la corriente entra por A1; y que es en sentido contrario, cuando la corriente entra por A2. Para invertir el sentido de la corriente, se utiliza un circuito llamado puente H, el cual se construye con cuatro transistores (o cuatro contactos): Q1, Q2, Q3 y Q4. Para dar marcha adelante, la conducción se inicia en la terminal positiva de la fuente, entra al transistor Q1 por el emisor, sale por el colector, entra a la armadura por la terminal A1, sale por la terminal A2, entra al transistor Q2 por el colector, y sale por el emisor hacia el negativo de la fuente. La conducción de Q1 y Q2 se logra haciendo coincidir sus respectivas corrientes de base, por medio de la conducción de colector-emisor del transistor Q5, el cual se activa con la corriente de control (ctrl D) proveniente del *flip-flop*. Para dar marcha en reversa, la conducción se inicia en la terminal positiva de la fuente, entra al transistor Q3 por el emisor, sale por el colector, entra a la armadura por la terminal A2, sale por la terminal A1, entra al transistor Q4 por el colector, y sale por el emisor hacia el negativo de la fuente. La conducción de Q3 y Q4 se logra haciendo coincidir sus respectivas corrientes de base, por medio de la conducción de colector-emisor del transistor Q6, el cual se activa con la corriente de control (ctrl R) proveniente del *flip-flop*. Véase la figura 81.

Figura 81. Inversión de marcha y control de velocidad



La señal para marcha adelante, se obtiene al multiplicar la señal PWM por la salida Q del *flip-flop*. Para esto, se utiliza una compuerta *and*, de donde se obtiene $ctrl\ D = (PWM) \cdot (Q)$. Se observa que la salida *ctrl D* es igual a PWM cuando Q vale uno; y es igual a cero, cuando Q vale cero. La señal de control para marcha en reversa se obtiene al multiplicar la señal PWM por la salida \overline{Q} del *flip-flop*. Para esto, se utiliza otra compuerta *and*, de donde se obtiene $ctrl\ R = (PWM) \cdot (\overline{Q})$. Se observa que la salida *ctrl R* es igual a PWM cuando \overline{Q} vale uno; y es igual a cero, cuando \overline{Q} vale

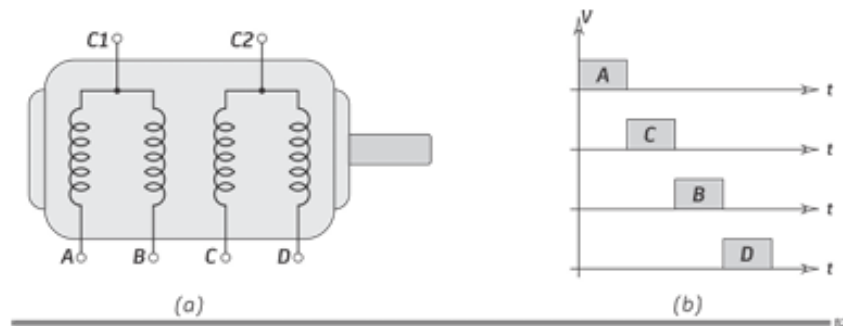
cero. Obsérvese que la señal PWM siempre está presente y, por medio del *flip-flop*, se decide a cuál de los dos lados del puente H se va a dirigir.

7.4 MOTOR PASO A PASO

En aplicaciones de robótica, sistemas de impresión 2D y 3D, mecánica automatizada y otras, se requiere el ajuste del movimiento en pequeños pasos. El motor paso a paso es el más indicado para estas aplicaciones, ya que puede realizar movimientos en pequeños ángulos de giro, de acuerdo con una secuencia de pulsos de corriente, en tiempos exactos, que se deben aplicar a las terminales respectivas.

7.4.1 Motor paso a paso unipolar. En la figura 82(a) se muestra el esquema de terminales de un motor paso a paso tipo unipolar, mientras en la figura 82(b) se muestra la secuencia de pulsos necesarios en las terminales respectivas. Dichas terminales se pueden identificar midiendo la resistencia de los devanados respectivos; por ejemplo, si mide $20\ \Omega$ entre las terminales A-B, la lectura entre A-C1, debe ser de $10\ \Omega$, ya que C1 es el punto medio entre A y B.

Figura 82. Esquema de terminales y secuencia de pulsos para motor unipolar

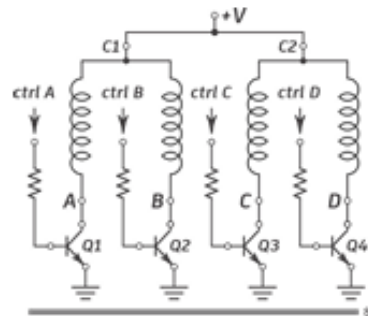


La secuencia de pulsos, de la figura 82(b), muestra que el primer pulso de corriente va a la bobina A; el segundo va a la bobina C; el tercero va a la bobina B; y el cuarto va a la bobina D. Así se obtienen cuatro pasos, en el sentido de las agujas del reloj. El giro en sentido contrario se obtiene aplicando la secuencia inversa: D-B-C-A.

Para aplicar los pulsos de corriente se utiliza el circuito de potencia de la figura 83, en el cual se escogió arbitrariamente la conmutación por negativo (-), y se conectaron las terminales comunes C1-C2 a +V.

También se puede adoptar conmutación por positivo. En este caso, se requieren transistores pnp, en las terminales A-C-B-D, y las dos terminales comunes se conectan a negativo (-).

Figura 83. Circuito de potencia para control de motor paso a paso unipolar



Los cuatro pulsos requeridos, se sincronizan en cuatro tiempos o estados, por medio del circuito de control. Con este fin, cada diseñador escoge el circuito de su preferencia; aquí, por ejemplo, se escoge el contador binario 74LS191, el cual puede realizar un conteo de cuatro bits (cuatro variables): QA, QB, QC y QD, cubriendo un total de 16 estados (tiempos), desde 0000, hasta 1111. Desde luego, para este control solo se requieren cuatro estados, desde el 00, hasta el 11; es decir, que basta con dos bits del contador. Para este diseño se escogieron los bits QA y QB (terminales 3 y 2 respectivamente).

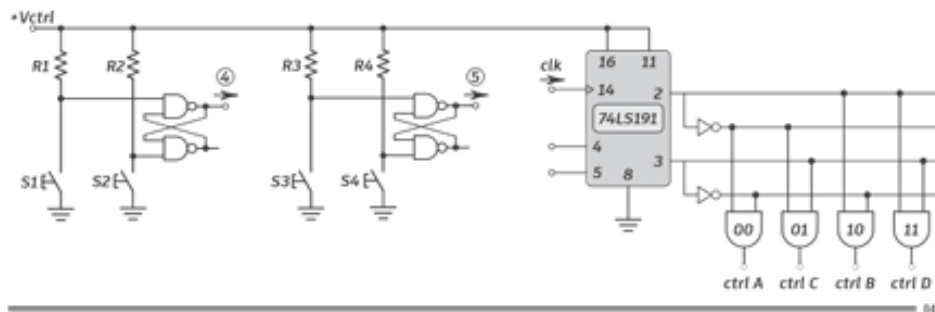
Tabla 8. Asignación de variables de control para cuatro salidas

QB	QA	Salida
0	0	$ctrl\ A = \overline{QB} \cdot \overline{QA}$
0	1	$ctrl\ C = \overline{QB} \cdot QA$
1	0	$ctrl\ B = QB \cdot \overline{QA}$
1	1	$ctrl\ D = QB \cdot QA$

En la tabla de asignación de variables se ve que cada salida está activa en un solo tiempo; por ejemplo, la salida *ctrl A* está activa solamente cuando $QB = 0$ y $QA = 0$. Con estas dos variables en cero, no puede aplicarse la función *and*, porque $0 \cdot 0 = 0$, daría una salida inactiva; pero si se invierten las dos entradas, se obtiene $1 \cdot 1 = 1$. Entonces, este requerimiento se satisface con una función *and*, con la condición de invertir las dos variables de entrada antes de ingresarlas a la compuerta *and*. De manera similar, para obtener la salida *ctrl C*, debe invertirse la entrada *QB*, antes de ingresarla a su respectiva compuerta. Lo propio se hace para obtener las otras dos variables de salida. Véase la figura 84.

Además de las variables de conteo, el 74LS191 tiene varias terminales de control, como la número 4, que se utiliza para detener el conteo, aplicando un 1 en dicha terminal; esto se hace desde el pulsador S1, llevando la salida Q del *flip-flop* a su estado activo, y aplicándola directamente a la terminal 4 del contador. El conteo se reactiva con el pulsador S2, el cual lleva la salida Q del *flip-flop* a su estado inactivo. Así se entiende cómo se utiliza la terminal 4 del contador para las funciones de marcha y parada del motor.

Figura 84. Circuito de control para motor paso a paso unipolar-una fase



Por su parte, la terminal 5 del contador se utiliza para realizar conteo descendente, aplicando un 1 en dicha terminal; esto se logra desde el pulsador S3, llevando la salida Q del *flip-flop* a su estado activo, y aplicándola directamente a la terminal 5 del contador. El conteo ascendente se recupera desde el pulsador S4, el cual lleva la salida Q del *flip-flop* a su estado inactivo. Así se entiende cómo se utiliza la terminal 5 del contador para las funciones de avance y retroceso del motor.

La terminal 11 (*load*), permite cargar a las salidas QA, QB, QC y QD, el contenido de las terminales de datos DA, DB, DC y DD, aplicando un cero en dicha terminal; por lo tanto, al no requerir esta función, se decide llevarla directamente a 1, para que no interfiera en el funcionamiento. Finalmente, la señal de reloj (*clk*), requerida en la terminal número 14, puede implementarse con un temporizador NE555, en modo estable.

Otro método de control, para motor paso a paso, es el control a dos fases, el cual consiste en tener energizadas siempre dos de las cuatro fases del motor. Con este método mejora el par de torsión, respecto al método de control a una fase. Como cabe esperar, el circuito de potencia sigue siendo el mismo; y para el circuito de control, se utilizan los estados de las variables QB y QA, a saber: 00, 01, 10 y 11.

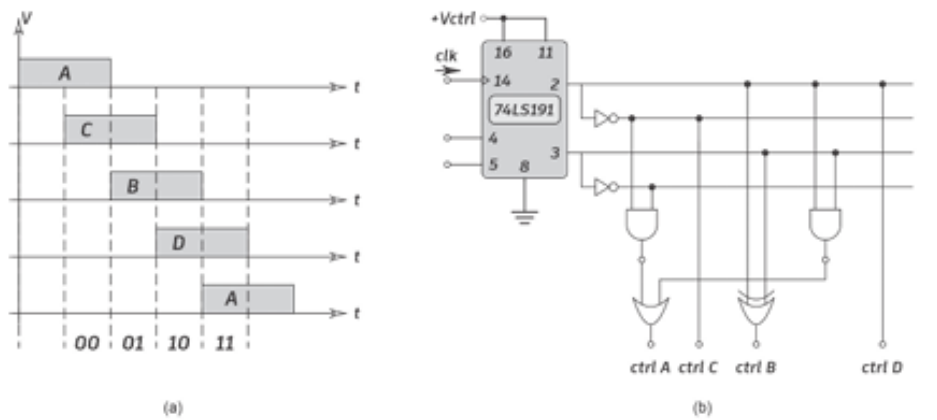
En la figura 85(a) se ilustra la secuencia de tiempos para las cuatro bobinas. Nótese que la bobina A va a estar activa en el estado 00, o en el estado 11; es decir que

$ctrl\ A = \overline{QB} \cdot \overline{QA} + QB \cdot QA$, lo cual no admite simplificación. Por su parte, la bobina C va a estar activa en los estados 00 o 01; es decir que $ctrl\ C = \overline{QB} \cdot \overline{QA} + \overline{QB} \cdot QA$, de cuya simplificación se obtiene: $ctrl\ C = \overline{QB}$. La bobina B va a estar activa en los estados 01 o 10; es decir que $ctrl\ B = \overline{QB} \cdot QA + QB \cdot \overline{QA}$. Esta función, llamada **OR-exclusiva**, no admite simplificación, y se representa por $ctrl\ B = QB \oplus QA$.

Por último, la bobina D va a estar activa en los estados 10 o 11; es decir que $ctrl\ D = QB \cdot \overline{QA} + QB \cdot QA$, de cuya simplificación se obtiene: $ctrl\ D = QB$.

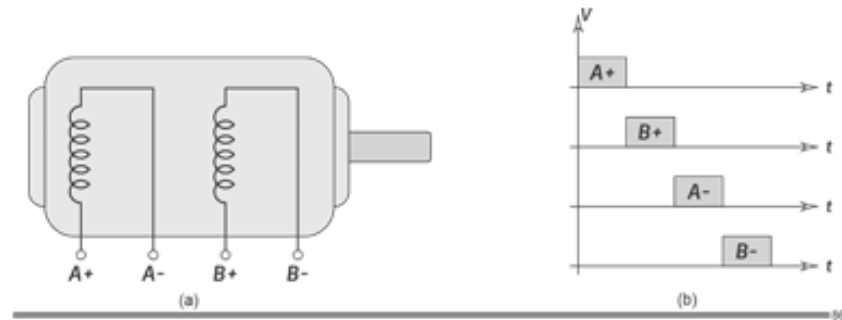
Las cuatro salidas de control se muestran en la figura 85(b), donde se puede observar el símbolo para la función **OR-exclusiva**, en la salida $ctrl\ B$. Las demás partes del circuito de control permanecen inalteradas, y no se muestran.

Figura 85. Secuencia de tiempos y circuito de control a dos fases



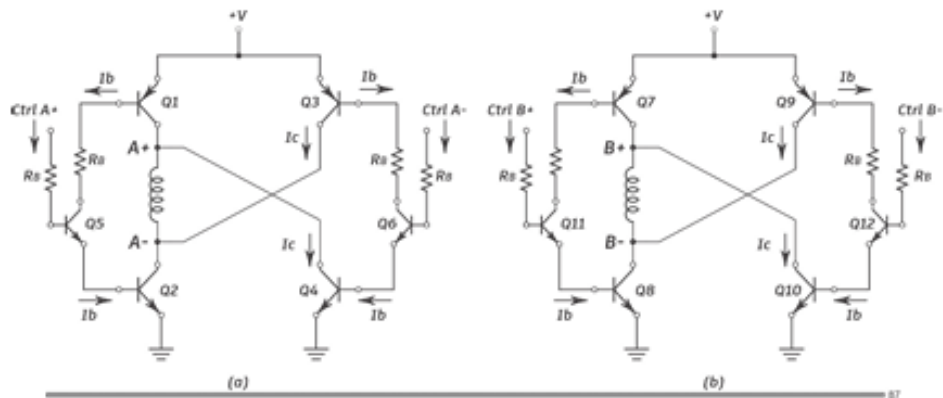
7.4.2 Motor paso a paso bipolar. El motor bipolar se caracteriza porque solamente tiene dos bobinas (cuatro terminales), como se muestra en la figura 86(a). El primer pulso va a la bobina A, por la terminal +; el segundo va a la bobina B, por la terminal +; el tercero va a la bobina A, por la terminal -; y el cuarto va a la bobina B, por la terminal -. Así se obtienen cuatro pasos, en el sentido de las agujas del reloj. El giro en sentido contrario se obtiene aplicando la secuencia inversa, tal como se hizo con el motor unipolar.

Figura 86. Motor paso a paso bipolar



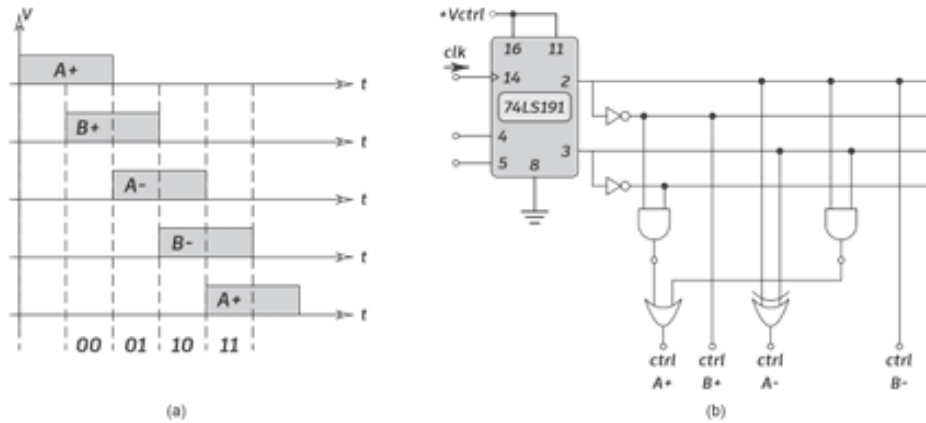
En la figura 86(b), se muestra la secuencia de funcionamiento para control a una fase. Esta secuencia permite advertir que el circuito de control es el mismo que se usó para el motor unipolar controlado a una fase. Sin embargo, el circuito de potencia es más complejo, ya que las bobinas requieren cambio de polaridad para realizar cada paso, siendo necesario adecuar un puente H para cada bobina. La figura 87(a) muestra un circuito en puente H, para cambio de polaridad en la bobina A+ A-; la figura 87(b) muestra otro circuito en puente H, para cambio de polaridad en la bobina B+ B-. El funcionamiento de cada puente es el mismo del circuito inversor de marcha del motor de corriente directa.

Figura 87. Circuito de potencia para motor paso a paso bipolar



Al motor bipolar también se le puede realizar control a dos fases, utilizando la misma secuencia que se utilizó para el motor unipolar controlado a dos fases, asignando los tiempos como se indica en la figura 88(a). Se infiere, entonces, que se puede copiar el circuito de control, si se aplican las respectivas señales, como se muestra en la figura 88(b).

Figura 88. Secuencia de funcionamiento y circuito de control a dos fases



8. CONCLUSIONES

- Sin ánimo de desvirtuar el componente matemático, en el desarrollo de circuitos aplicados, el acercamiento al diseño, desde la intuición, permite ligar los aspectos teóricos con el desarrollo práctico de una manera espontánea, y sin la rigidez que implican los métodos convencionales.
- Aunque esta obra fue diseñada para estudiantes de Bachillerato Técnico Industrial (Ciclo completo); y probada con estudiantes de grado undécimo, con un recorrido amplio en el estudio de la electricidad, el enfoque y la presentación de los temas, la hacen igualmente apta para ser usada por estudiantes de Media Técnica, con solo unos conocimientos básicos de electricidad.
- Al hablar de experiencia docente, se tiene la tendencia a valorarla desde las propias inquietudes del docente, pero esa misma experiencia demuestra que son los estudiantes quienes la enriquecen, con sus intervenciones, sus conceptualizaciones y su propio lenguaje. Por esta razón, la obra se ha llevado con el lenguaje más cotidiano posible, sin que pierda su exactitud ni su rigor técnico.

9. RECOMENDACIONES

- Es necesario leer todos los temas con calma, sin omitir detalles, con papel, lápiz, materiales y equipo de medida a la mano. Cada símbolo y cada conexión son partes fundamentales en la concepción de un circuito, y la ausencia o error, en un solo componente, daña por completo el funcionamiento; pero, después de leer estas sencillas indicaciones, quien se aventure a seguirlas, encontrará que cada logro, por pequeño que sea, brinda grandes satisfacciones, y buenas oportunidades laborales.
- Es importante registrar todas las experiencias vividas durante una práctica, porque es allí donde está el verdadero aprendizaje. Esas luces repentinas, que surgen cuando por fin se logra comprender algo, son las que hacen la verdadera experiencia.
- Realizar siempre el contraste entre las expectativas de funcionamiento, y los resultados prácticos, con el fin de afianzar la capacidad para diseñar circuitos nuevos. Particularmente los pequeños errores, o defectos en algunos componentes, aunque son frustrantes en primera instancia, son un recurso valioso para fortalecer la capacidad de análisis.
- La seguridad del personal es fundamental. Se debe trabajar siempre con los circuitos sin energía, en un ambiente calmado, con plena concentración y bajo la supervisión del docente.
- Se debe utilizar siempre el equipo de seguridad reglamentario. Ninguna medida de precaución sobra.

BIBLIOGRAFIA

SCHNEIDER ELECTRIC. Telesquemario: manual electrotécnico y tecnologías de control industrial. Barcelona: Schneider electric España, S.A., 1999.

MOELLER EATON. Wiring manual: automation and power distribution. Bonn: Heidrun Riege, 2008.

SEW-EURODRIVE. Instrucciones de funcionamiento para motores de corriente alterna. Bruchsal: Sew-Eurodrive GmbH & Co KG, 2019.

LAWRIE, R. J. Biblioteca práctica de motores eléctricos. Bogotá: Océano-Centrum, 1991.

BHAG, S. Guru y HÜSEYING, R. Hiziroğlu. Máquinas eléctricas y transformadores. México: Alfaomega, 2006.

FLOYD, Thomas L. Fundamentos de sistemas digitales. Madrid: Pearson, 2006.

BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. México: Pearson, 2009.

MALONEY, Timothy J. Electrónica industrial moderna. México: Pearson, 2008.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Equipos de baja tensión. NTC-IEC 947-1. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grados de protección dados por encerramientos de equipo eléctrico. NTC-IEC 60529. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2013.

Anexo. Resumen de simbología IEC para esquemas eléctricos

	Corriente alterna		Borne de conexión
	Corriente continua		Clavija macho
	Puesta a tierra		Toma hembra
	Conductor de circuito principal		Clavija y toma asociadas
	Conductor de circuito auxiliar		Dispositivo luminoso con especificación de color: C2-Rojo, C3-Naranja, C4-Amarillo, C5-Verde...
	Haz de tres conductores		Dispositivo luminoso con especificación de tipo: Ne: Neón Na: Sodio, EL: Electroluminiscente, FL: Fluorescente, IR: Infra rojo, UV: Ultravioleta.
	Haz de tres conductores (diagrama unifilar)		Bocina
	Conductor neutro		Símbolo general para contacto de cierre (N.O.) 1. Principal 2. Auxiliar
	Conductor de protección (Tierra)		Símbolo general para interruptor
	Cruce sin conexión		Seccionador fusible
	Cruce con conexión		Disyuntor
	Contacto temporizado al trabajo 1: NO 2: NC		Contacto de potencia
	Contacto temporizado al reposo 1: NO 2: NC		Símbolo general para contacto de apertura (N.C.) 1. Principal 2. Auxiliar
	Símbolo general para interruptor de posición 1: NO 2: NC		Órgano de mando
	Disyuntor		Órgano de mando de acción retardada
	Relé de sobrecorriente de efecto térmico.		Órgano de mando de reposo retardado