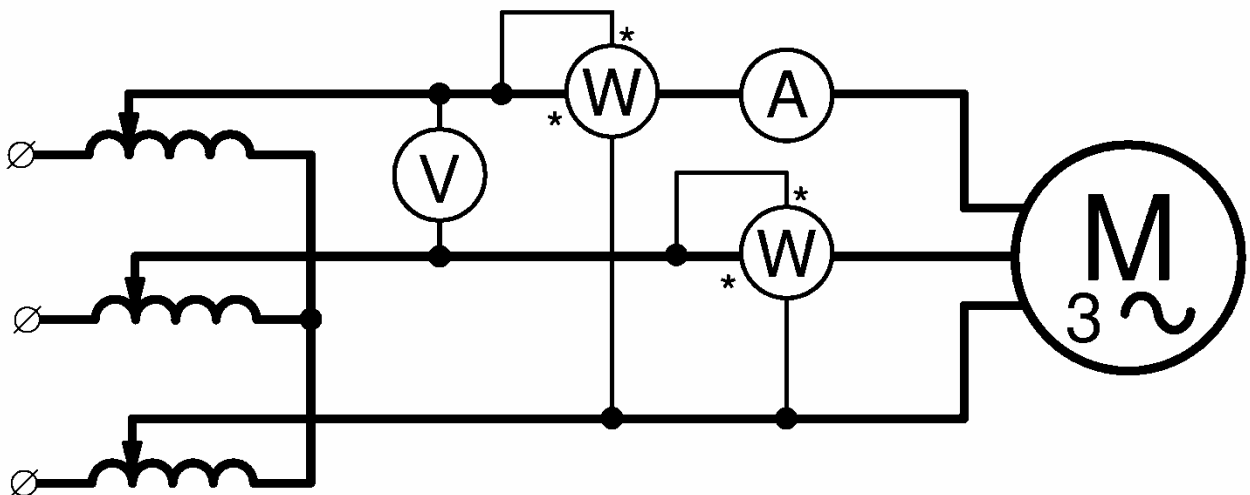


UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

LABORATORIO DE ELECTROTECNIA



Miguel Angel Rodríguez Pozueta
Profesor Titular de Universidad

Fernando Bustillo Ojeda
Profesor Asociado de Electrotecnia

ÍNDICE

Prólogo

Advertencias sobre la nomenclatura

1ª Parte: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Capítulo 0: DATOS, NORMAS Y SÍMBOLOS

1. Introducción	0.1
2. Datos históricos	0.1
2.1. Inicios de la electricidad	0.1
2.2. Inicios de los motores	0.2
2.3. Inicio de la transmisión de energía	0.2
2.4. Inicio de la electrónica	0.2
2.5. Inicio de la automatización	0.3
3. Normalización y reglamentación	0.4
4. Símbolos eléctricos	0.5
5. Bibliografía	0.9

Capítulo 1: MEDIDAS EN CORRIENTE CONTINUA

1. Introducción	1.1
2. Instrumentos de medida	1.1
2.1. Fundamentos	1.1
2.2. Constitución de los aparatos de medida analógicos	1.2
2.3. Constitución de los aparatos de medida digitales	1.6
3. Errores	1.7
3.1. Errores sistemáticos, accidentales y de lectura	1.7
3.2. Errores absoluto, relativo y reducido	1.8

3.3.	Especificación de la exactitud de un instrumento de medida	1.9
3.4.	Sensibilidad	1.11
3.5.	Símbolos e indicaciones sobre los cuadrantes de los aparatos analógicos	1.12
3.6.	Constantes de medición	1.15
4.	Técnicas de medida de varias magnitudes eléctricas en corriente continua	1.16
4.1.	Medida de intensidades de corriente. Amperímetros	1.16
4.2.	Medida de tensiones. Voltímetros	1.19
4.3.	Medida de resistencias	1.21
4.3.1.	Medida de resistencias con un voltímetro y un amperímetro	1.21
4.3.2.	Medida de resistencias con un óhmetro	1.23
4.3.3.	Medida de resistencias con un puente de Wheatstone	1.24
5.	Polímetros	1.26
6.	Bibliografía	1.29

Capítulo 2: MEDIDAS EN CORRIENTE ALTERNA

1.	Introducción	2.1
2.	Medida de intensidades	2.1
3.	Medida de tensiones	2.4
4.	Medida de potencias	2.5
4.1.	Circuitos de c.a. monofásicos	2.5
4.2.	Circuitos de c.a. trifásicos	2.7
4.2.1.	Circuitos equilibrados	2.7
4.2.2.	Circuitos de tres hilos	2.8
4.2.3.	Circuitos de cuatro hilos	2.10
5.	Medida de factores de potencia. Fasímetros	2.11
5.1.	A partir de las potencias activa y reactiva	2.11
5.2.	A partir de la potencia activa, la tensión y la corriente	2.11
5.3.	Mediante fasímetros	2.12

6. Medida de frecuencias. Frecuencímetros	2.12
7. Medida de impedancias, resistencias, reactancias, inductancias y capacidades	2.13
8. Medida de resistencias de aislamiento	2.16
9. El osciloscopio	2.18
10. Contadores de energía	2.19
11. Bibliografía	2.21

Capítulo 3: APARAMENTA DE MANIOBRA, CONTROL Y PROTECCIÓN. AUTOMATISMOS

1. Introducción	3.1
2. Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano	3.1
3. Protección diferencial	3.2
4. Protección magnetotérmica	3.5
5. Fusibles	3.7
6. Contactores y relés	3.9
7. Pulsadores	3.13
8. Ejemplos de automatismos con contactores y relés	3.13
8.1. Guardamotor	3.13
8.2. Inversor	3.17
8.3. Inversor con temporización	3.20
11. Bibliografía	3.22

Capítulo 4: CONTROLADORES LÓGICOS Y AUTÓMATAS PROGRAMABLES

1. Introducción	4.1
2. Mandos de programa cableado y de memoria	4.3
2.1. Mandos de programa cableado	4.3
2.2. Mandos de programa de memoria	4.3
3. Señales binarias. estado de señal	4.4
4. Programa de mando. Instrucciones de mando	4.5
5. Memoria de programa	4.6
6. Elaboración de señales en el autómata	4.7
6.1. Adquisición de entradas	4.7

6.2.	Tratamiento del programa	4.7
6.3.	Actualización de las salidas	4.8
7.	Lenguajes de programación. Formas de representación	4.8
8.	Estructura o arquitectura interna	4.9
8.1.	Sección de entradas	4.10
8.2.	Unidad central de proceso (CPU)	4.10
8.3.	Sección de salidas	4.11
9.	Funciones de los autómatas	4.13
9.1.	Funciones combinacionales (lógicas)	4.13
9.1.1.	Función serie (AND)	4.13
9.1.2.	Función paralelo (OR)	4.14
9.1.3.	Función negada (NOT)	4.14
9.2.	Función memoria (guardamotor)	4.15
9.3.	Función de contador	4.16
9.4.	Funciones de temporización	4.17
9.4.1.	Impulso	4.18
9.4.2.	Impulso prolongado	4.18
9.4.3.	Retardo a la conexión	4.19
9.4.4.	Retardo a la conexión memorizado y borrado	4.19
9.4.5.	Retardo a la desconexión	4.20
9.5.	Funciones de comparación	4.20
9.5.1.	Visión general	4.20
9.5.2.	Comparación a igual	4.21
9.5.3.	Comparación a distinto	4.21
9.5.4.	Comparación a mayor	4.22
9.5.5.	Comparación a mayor o igual	4.22
9.5.6.	Comparación a menor	4.23
9.5.7.	Comparación a menor o igual	4.23
10.	Ejemplos de programación	4.23
10.1.	Guardamotor mediante funciones combinacionales	4.24
10.2.	Guardamotor utilizando funciones de memoria	4.25
10.3.	Inversor	4.26
11.	Bibliografía	4.29

Capítulo 5: TRANSFORMADORES

1. Descripción de un transformador	5.1
2. Autotransformadores	5.4
3. Valores asignados o nominales	5.6
4. Circuito equivalente de un transformador monofásico	5.9
4.1. Separación de los efectos de las resistencias y de los flujos de dispersión	5.9
4.2. Marcha en vacío	5.11
4.3. Ecuación del circuito magnético	5.13
4.4. Reducción al primario	5.13
4.5. Circuito equivalente	5.14
5. Transformador en carga	5.16
6. Ensayos de un transformador monofásico	5.17
6.1. Ensayo de vacío	5.17
6.2. Ensayo de cortocircuito	5.20
6.3. Ensayo en carga	5.24
7. Ensayos de un transformador trifásico	5.25
8. Bibliografía	5.27

Capítulo 6: MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN

1. Descripción de una máquina asíncrona trifásica	6.1
2. Principio de funcionamiento	6.7
3. Balance de potencias	6.9
4. Valores asignados	6.12
5. Circuito equivalente	6.12
5.1. Separación de los efectos de las resistencias y de los flujos de dispersión	6.13
5.2. Marcha en vacío	6.14
5.3. Reducción del rotor al estator	6.15
5.4. Circuito equivalente	6.16
6. Par de rotación	6.17
6.1. Obtención del par	6.17
6.2. Curva par-velocidad	6.19

6.3.	Puntos notables	6.20
6.4.	Punto de funcionamiento	6.21
6.5.	Efectos de variar V_1 y de introducir resistencias en serie con el rotor	6.22
7.	Arranque	6.24
8.	Regulación de velocidad	6.27
9.	Ensayos de un motor asíncrono trifásico	6.28
9.1.	Conexión eléctrica	6.28
9.2.	Ensayo de vacío a tensión variable	6.29
9.3.	Ensayo de vacío a tensión asignada	6.31
9.4.	Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado	6.32
9.5.	Ensayo en carga	6.33
10.	Bibliografía	6.39

2ª Parte: PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Práctica 0: PRESENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

1.	Presentación	P0.1
2.	Descripción del laboratorio	P0.1
3.	Organización y desarrollo de cada práctica	P0.4
3.1.	Preparación de la práctica	P0.4
3.1.1.	Elección del método a utilizar en la medida	P0.4
3.1.2.	Elección de los aparatos de medida a utilizar	P0.5
3.1.3.	Dibujo del esquema de conexiones	P0.5
3.1.4.	Preparación de las hojas de prácticas	P0.6
3.2.	Montaje y realización de la práctica	P0.6
3.2.1.	Montaje del circuito	P0.6
3.2.2.	Realización de la práctica	P0.7
3.2.3.	Desconexión del circuito	P0.8
3.3.	Preparación del informe	P0.9
4.	Bibliografía	P0.9

Práctica 1: MEDIDAS ELÉCTRICAS

1. Introducción	P1.1
2. Objetivos	P1.1
3. Práctica de laboratorio	P1.2
4. Esquema eléctrico	P1.2
5. Materiales y equipos	P1.2
6. Desarrollo de la práctica	P1.4
7. Informe de la práctica	P1.5

Práctica 2: AUTOMATIZACIÓN

1. Introducción	P2.1
2. Objetivos	P2.1
3. Práctica de laboratorio	P2.2
4. Materiales y equipos	P2.2
5. Desarrollo de la práctica	P2.2
6. Informe de la práctica	P2.3

Práctica 3: ENSAYO DE TRANSFORMADORES

1. Introducción	P3.1
2. Objetivos	P3.1
3. Práctica de laboratorio	P3.2
4. Esquema eléctrico	P3.3
5. Materiales y equipos	P3.5
6. Desarrollo de la práctica	P3.6
7. Informe de la práctica	P3.9

Práctica 4: ANÁLISIS DE MOTORES Y CONVERTIDORES

1. Introducción	P4.1
2. Objetivos	P4.1
3. Práctica de laboratorio	P4.2
4. Esquema eléctrico	P4.2
5. Materiales y equipos	P4.4
6. Desarrollo de la práctica	P4.5
7. Informe de la práctica	P4.7

PRÓLOGO

El presente libro pretende ser una guía útil para el alumno que realice las Prácticas de Laboratorio de las asignaturas de “Electrotecnia” en las titulaciones de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería Técnica de Obras Públicas.

Las Prácticas de Laboratorio de Electrotecnia tienen como fin el completar la formación del alumno, mostrándole de forma práctica los conceptos explicados en la teoría y familiarizándole con los equipos, aparatos y máquinas eléctricos utilizados más frecuentemente en las industrias y en los laboratorios.

Estas prácticas abarcan también algunos conceptos que, por su carácter práctico y/o descriptivo, no se incluyen en las clases teóricas de estas asignaturas.

El libro está dividido en dos partes. En la primera se muestran los fundamentos teóricos en los que están basadas estas prácticas y en la segunda parte se describen las prácticas que se van a realizar en el laboratorio, indicando las precauciones y los pasos a seguir en el desarrollo y montaje de cada una de ellas, así como los cálculos a realizar.

Para agilizar el desarrollo de cada práctica es conveniente que los alumnos las hayan leído en este libro antes de acudir al laboratorio.

ADVERTENCIAS SOBRE LA NOMENCLATURA

1. En este libro se ha seguido el siguiente criterio para representar las magnitudes de c.a.:

- Con minúsculas se representan sus valores instantáneos.
- Con mayúsculas se representan sus valores eficaces.
- Con mayúsculas y el subíndice M se representa sus valores máximos.
- Con mayúsculas y un guión encima se representan dentro del plano complejo.

Así, por ejemplo, se tiene que:

$$i = I_M \cos(\omega t + \psi) = \sqrt{2} I \cos(\omega t + \psi)$$
$$\bar{I} = I \mid \underline{\psi}$$

2. El subíndice E se utiliza para representar los valores leídos directamente en la Escala o en la pantalla de los aparatos de medida. Los valores de la magnitud correspondiente se obtienen a partir de estos valores leídos multiplicándolos por la constante del aparato de medida y, si procede, por la relación de transformación de los transformadores de medida (véanse los capítulos 1 y 2).
3. En corriente alterna trifásica se utiliza el subíndice L para las tensiones e intensidades de línea y sin él para las tensiones e intensidades de fase.
4. Las velocidades de rotación se representan con la letra n si están expresadas en revoluciones por minuto (r.p.m.) y con la letra Ω si se miden en radianes por segundo (rad/s).

1ª Parte:

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Capítulo 0: DATOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS

Capítulo 1: MEDIDAS EN CORRIENTE CONTINUA

Capítulo 2: MEDIDAS EN CORRIENTE ALTERNA

**Capítulo 3: APARAMENTA DE MANIOBRA, CONTROL Y PROTECCIÓN.
AUTOMATISMOS**

Capítulo 4: CONTROLADORES LÓGICOS Y AUTÓMATAS PROGRAMABLES

Capítulo 5: TRANSFORMADORES

Capítulo 6: MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN

Capítulo 0:

DATOS, NORMAS Y SÍMBOLOS

- 1. - INTRODUCCIÓN**
- 2. - DATOS HISTÓRICOS**
- 3. - NORMALIZACIÓN Y REGLAMENTACIÓN**
- 4. - SÍMBOLOS ELÉCTRICOS**
- 5. - BIBLIOGRAFÍA**

DATOS, NORMAS Y SÍMBOLOS

1. - INTRODUCCIÓN

El progreso técnico científico es inconcebible sin la electrificación; sobre esa base se desarrollan los medios técnicos de producción más perfectos.

Con el auge de la electrificación ha tenido que desarrollarse la industria y la ingeniería electrotécnicas; esto es, los transformadores, los motores eléctricos, los equipos o aparatos de conexión, los materiales electrotécnicos, diferentes equipos y aparatos para automatización de los procesos industriales, etc.

La energética y la electrificación requieren la preparación de especialistas bien cualificados; es decir, energéticos y electricistas de alta categoría, con buenos conocimientos de la electrotecnia; siendo ésta la rama de la técnica que abarca la producción, el transporte y el uso múltiple de la energía eléctrica.

2. - DATOS HISTÓRICOS

2.1. - Inicios de la electricidad

En primer lugar es necesario establecer un breve bosquejo histórico que comienza en el año 585 antes de Cristo con las observaciones de los antiguos griegos. En este período de 24 siglos es de destacar en 1600 la construcción de la primera máquina electrostática (máquina generadora de electricidad por fricción). En 1820 *Oersted* da a conocer sus descubrimientos sobre los efectos magnéticos de la corriente eléctrica. Doce años después (1832) *Faraday* desarrolla gran cantidad de máquinas eléctricas, entre ellas el modelo primitivo del generador homopolar de corriente continua. También formuló por esa época las leyes de la inducción. Por otro lado y en el mismo año *Pixii*, mecánico de *Ampère*, construyó el primer generador rotativo de corriente alterna. En enero de 1867 *Werner Siemens* presenta su generador autoexcitado y, en 1872, *Hefner-Altener* desarrolla el inducido de tambor, que es el utilizado universalmente en nuestros días.

2.2. - Inicio de los motores

En cuanto a los motores, su desarrollo corrió parejo con el de los generadores. Así en 1831 *Henry* desarrolló un motor primitivo y elemental. El descubrimiento de que la acción de un motor es simplemente la inversa de la de un generador fue realizado por *Jacobi* en 1850. En cuanto a los motores de inducción, su origen se sitúa en 1885, con la construcción del primer modelo bifásico por *Galileo Ferraris*. En 1889 *Dolivo Dobrowolsky* estudió la influencia del número de fases en la creación de campos magnéticos giratorios. Este investigador eligió el sistema trifásico como el sistema óptimo desde el punto de vista económico, construyó el primer motor asíncrono utilizable y, en 1893, desarrolló el motor de doble jaula, que conserva su uso en la actualidad.

2.3. - Inicio de la transmisión de energía

En lo referente a la transmisión de energía, la primera tuvo lugar en la exposición de Viena de 1873 y fue realizada por *H. Fontaine*. En 1882 se efectuó la primera a larga distancia (57 km) con un rendimiento global del 22%. En la exposición de Frankfurt (1891) se utilizó por primera vez un sistema trifásico. Ya en 1900 las centrales eléctricas y las distribuciones de energía en corriente trifásica eran muy numerosas y se había impuesto la corriente alterna trifásica en la totalidad de los países industrializados.

2.4. - Inicio de la electrónica

En la electrónica de aplicación electrotécnica hay que destacar los estudios que llevó a cabo en 1883 *Thomas A. Edison*, a fin de alargar la vida de sus lámparas incandescentes. Edison descubrió que poniendo una placa sobre el filamento éste ya no se ennegrecía y vio que la chapa se cargaba eléctricamente. Más tarde, *J. A. Fleming* estudió este efecto y demostró, que la carga de la placa era debida a los electrones emitidos por el filamento incandescente que incidían sobre ella. Este fenómeno se denominó emisión termoiónica y dio origen al diodo de vacío.

Aunque las primeras propiedades, estudiadas por *Faraday* y *Becquerel*, sobre los semiconductores, se remontan a los años 1833 y 1839, solamente a comienzos de este siglo se empiezan a estudiar las aplicaciones electrotécnicas de éstos.

En 1923, *Schottky* publicó una teoría sobre los rectificadores, pero hasta la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) no se utilizaron. Fue en 1948 cuando *Brattain* y *Bardeen*, trabajando en los laboratorios de Bell Telephone de los Estados Unidos, descubrieron el transistor de puntas de contacto. Y en 1949 en los laboratorios Schockley se desarrolló el primer transistor de unión.

Los tiristores, o tiratrones en estado sólido, son elementos electrónicos de desarrollo más tardío. Los primeros fueron fabricados por General Electric en EE.UU. en 1957 y estaban fundamentados en los diodos de cuatro capas.

2.5. - Inicio de la automatización

Al terminar la II Guerra Mundial y dado el importante incremento que la industria había experimentado, se crea el concepto de “*automatismo*” aplicado a la maniobra y control de los circuitos eléctricos, en particular a la puesta en marcha de motores trifásicos.

Posteriormente, partiendo de las especificaciones que establece General Motors, Digital Corporation C. desarrolla un sistema intermedio entre la lógica cableada y los microcomputadores denominado “*Autómata Programable*”. Los primeros equipos aparecen en 1968 con memorias de ferritas y procesador cableado. Y en la primera mitad de la década de los 70 incorporan la tecnología de los microprocesadores. Los autómatas programables han experimentado un desarrollo espectacular debido al progreso de la microelectrónica, por un lado, y de las técnicas de programación, por otro.

Las últimas décadas han contemplado un gran progreso en la tecnología de la electrónica de potencia, que comprende la utilización específica de la electrónica para la conversión controlada de potencia eléctrica. Muestra de ello es la generación actual de accionamientos, tanto en c.c. con convertidores de tiristores, como en c.a. mediante inversores de semiconductores. Estos inversores proporcionan frecuencia y tensión variables a un motor trifásico por el principio de impulsos rectangulares modulados en anchura y su tecnología está evolucionando positivamente y conquistando aplicaciones.

3. - NORMALIZACIÓN Y REGLAMENTACIÓN

La necesidad de normalización determinó que de las diferentes frecuencias utilizadas sólo subsistieran dos (50 y 60 Hz). En 1908 la *Comisión Electrotécnica Internacional* (CEI) recomendó la adopción de un sistema práctico de unidades, que engloba entre éstas: el voltio, el amperio, el ohmio, el culombio, etc. En 1950 recomendó el empleo del sistema MKSA.

En 1954 la Décima Conferencia General de Pesos y Medidas adoptó como Sistema Internacional de Unidades, un sistema con unidades fundamentales iguales a las del sistema MKSA racionalizado.

La reglamentación sobre instalaciones eléctricas en España comienza en la Ley de 24 de noviembre de 1936 sobre Ordenación y Defensa de la Industria, pero se hace necesario considerar los dos grupos siguientes:

- Alta Tensión (A.T.)
- Baja Tensión (B.T.)

En A.T.

Real Decreto 3151/1968, de 28 de noviembre, del Ministerio de Industria por el que se aprueba el “*Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión*”, publicado en el B.O.E. de 27 de diciembre de 1968.

Real Decreto 3275/1982, de 12 de noviembre de 1982, del Ministerio de Industria y Energía por el que se aprueba el “*Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación*”, publicado en el B.O.E. de 1 de diciembre de 1982.

En B.T.

El antiguo *Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión* fue aprobado en Consejo de Ministros y quedó reflejado en el Decreto 2.413/1973 de 20 de Septiembre y publicado en el B.O.E. de 9 de Octubre de 1973.

El actual “*Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*” (REBT) [8] ha sido aprobado por el Decreto 842/2002 de 2 de Agosto y publicado en el B.O.E. de 18 de Septiembre de 2002.

Este Reglamento tiene 29 artículos. A su vez dispone de las 51 Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC) que lo desarrollan. A partir de septiembre de 2003 el Ministerio de Ciencia y Tecnología ha ido publicando periódicamente una “*Guía técnica de aplicación del REBT*” [9] con interpretaciones, explicaciones y puntualizaciones de las ITC.

El REBT hace referencia en muchas ocasiones a las normas UNE. Estas son normas españolas, publicadas por AENOR, que en su mayor parte son normas UNE-EN; es decir, versiones españolas de normas europeas. La mayoría de las normas UNE y UNE-EN relativas a la electrotecnia son, a su vez, adaptaciones de las normas CEI.

En el B.O.E. del 28 de noviembre de 1997 [7] se publicó la “*Ley 54/1997 del Sector Eléctrico*”. Esta ley tiene como objetivos el garantizar la seguridad y la calidad del suministro de energía eléctrica y que esto se realice al menor coste posible y manteniendo la protección al medio ambiente. Esta ley liberaliza el mercado eléctrico, pero mantiene temporalmente la estructura de tarifas que existía previamente para ciertos suministros. De forma regular cada año se publica en el B.O.E. una actualización de estas tarifas. Las *Tarifas Eléctricas* para el año 2007 han sido publicadas en el B.O.E. del 30 de diciembre de 2006 mediante el Real Decreto 1634/2006 del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

4. - SÍMBOLOS ELÉCTRICOS

Se define como *símbolo eléctrico* todo dibujo o signo gráfico esquemático que representa elementos o componentes utilizados en los circuitos. No indican necesariamente su forma o dimensiones, sino simplemente el elemento de que se trata.

Los códigos de signos y símbolos empleados en los dibujos de esquemas y circuitos se hallan actualmente normalizados en casi todo el mundo mediante las normas CEI (véanse las referencias bibliográficas [5], [10] y [11]). Algunos de ellos se han incluido en las tablas de las páginas siguientes.

Denominación	DIN	CEI	ANSI/CSA
Accionamientos electro-mecánicos, electromagnéticos			
Accionamiento en general, por ejemplo relés, contactores			 x aparato
Accionamiento con particularidades especiales, en general			
Accionamiento con retardo al cierre para relés, contactores			
Accionamiento con retardo a la apertura para relés, contactores			
Accionamiento con retardo al cierre y a la apertura para relés, contactores			
Disparador de sobreintensidad electromagnético (disparo por cortocircuito)			
Disparador de sobreintensidad electrotérmico (disparo por sobrecarga)			
Disparador de corrientes de defecto			
Contactos			
Contacto abierto en reposo (de cierre)			
Contacto cerrado en reposo (de apertura)			
Contacto conmutado			
Contacto abierto en reposo adelantado al cierre			
Contacto cerrado en reposo retrasado a la apertura			
Contacto abierto en reposo con retardo al cierre			
Contacto cerrado en reposo con retardo a la apertura			
Contacto abierto en reposo con retardo a la apertura			
Contacto cerrado en reposo con retardo al cierre			

Denominación	DIN	CEI	ANSI/CSA
Aparatos de conexión			
Contactor			 × Letra código
Contactor con relé térmico			
Interruptor seccionador trifásico			
Interruptor automático trifásico			
Interruptor automático trifásico con disparador de sobreintensidad térmico			
Interruptor automático trifásico con disparador de sobreintensidad magnético			
Interruptor automático trifásico con disparador de sobreintensidad térmico y magnético			
Interruptor trifásico, con disparador de sobreintensidad térmico y magnético (p. e.: interruptor protector de motor)			
Fusibles, en general			

Denominación	DIN	CEI	ANSI/CSA
Transformadores, Transformadores de intensidad			
Transformadores con dos devanados separados			
Autotransformador			
Transformador de intensidad			
Máquinas			
Generador, en general			
Motor, en general			
Motor de corriente continua, en general			
Motor de corriente alterna, en general			
Motor de corriente alterna, motor de jaula de ardilla			
Motor corriente alterna, de anillos rozantes			

5. - BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHACÓN. “Medidas eléctricas para ingenieros”. Publicaciones de la Universidad Pontificia de Comillas. Madrid. 2000.
- [2] DPTO. TÉCNICO DISTESA. “Manuales de Laboratorio. Sistema Electrodidac.” (varios tomos)". Distesa. Madrid. 1976.
- [3] FRAILE y GARCIA GUTIÉRREZ. “Prácticas de Electrotecnia”. Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [4] KARCZ. “Fundamentos de la metrología eléctrica (3 tomos)”. Marcombo. Barcelona. 1976.
- [5] KLÖCKNER MOELLER. “Automatización y distribución de energía. Manual de esquemas”.
- [6] LAGUNAS, ANGEL. “Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión”. Editorial Paraninfo. Madrid 1995.
- [7] “Ley del Sector Eléctrico”. B.O.E. nº 285, 28 noviembre 1997.
- [8] Ministerio de Ciencia y Tecnología. “Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias”. B.O.E. nº 224, 18 septiembre 2002.
- [9] Ministerio de Ciencia y Tecnología. “Guía Técnica de Aplicación del Reglamento Electrotécnico para B. T.”. www.ffi.nova.es/puntoinfomcyt/guia_rbt.asp.
- [10] Norma UNE-EN 60617. “Símbolos gráficos para esquemas”. 1997.
- [11] RUIZ VASSALLO, FRANCISCO. “Esquemas eléctricos y electrónicos”. Creaciones Copyright, S.L. Madrid. 2005.

Capítulo 1:

MEDIDAS EN CORRIENTE CONTINUA

- 1. - INTRODUCCIÓN**
- 2. - INSTRUMENTOS DE MEDIDA**
- 3. - ERRORES**
- 4. - TÉCNICAS DE MEDIDA DE VARIAS MAGNITUDES
ELÉCTRICAS EN C.C.**
- 5. - POLÍMETROS**
- 6. - BIBLIOGRAFÍA**

MEDIDAS EN CORRIENTE CONTINUA

1. - INTRODUCCIÓN

Este primer capítulo tiene como fin el que al alumno empiece a conocer algunos de los aparatos de medida que usará posteriormente en el Laboratorio, así como el iniciarle en las técnicas y procedimientos empleados para la medida de magnitudes eléctricas.

Las técnicas de medida que se describen en este capítulo se realizan con corriente continua y se refieren a la medición de intensidades, tensiones y resistencias eléctricas.

2. - INSTRUMENTOS DE MEDIDA

2.1. - Fundamentos

Una medición se puede realizar por comparación directa con la unidad de medida. Este procedimiento se realiza en los laboratorios para mediciones de alta precisión y requiere utilizar patrones de la magnitud a medir. Así se hace, por ejemplo, al comparar una f.e.m. desconocida con la generada por una pila patrón.

También se pueden realizar, sobre todo a escala industrial, medidas indirectas en las que la magnitud eléctrica se transforma en una magnitud de otro tipo (normalmente mecánico o eléctrico) y es ésta la que se mide.

Los instrumentos de medida eléctricos se ajustan al diagrama de bloques de la figura 1.1. La magnitud a medir X es transformada en la magnitud Y, de tal manera que entre ambas existe la relación

$$Y = f_1(X)$$

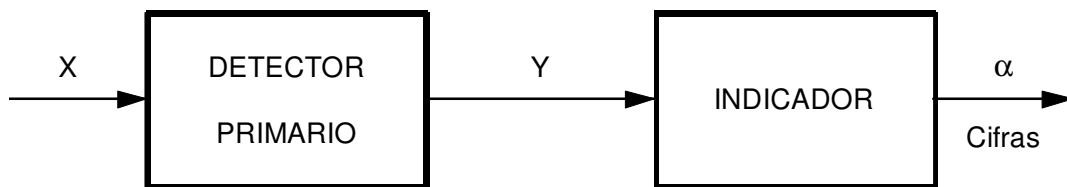


Fig. 1.1: Diagrama de bloques de un instrumento de medida

La magnitud Y actúa sobre el sistema indicador, el cual muestra la magnitud medida X mediante la desviación α de una aguja o de un haz luminoso sobre una escala graduada en los *aparatos analógicos*, o mediante unas cifras sobre una pantalla en los *aparatos digitales*.

Los aparatos analógicos son los instrumentos de medida eléctricos clásicos, aunque actualmente los aparatos digitales han alcanzado altas cotas de precisión y están desbancándolos en muchas aplicaciones.

2.2. - Constitución de los aparatos de medida analógicos

En los aparatos de medida analógicos el sistema indicador está compuesto por una parte fija y una parte móvil a la cual está fijada la aguja indicadora. La magnitud transformada Y (Fig. 1.1) que se aplica al indicador consiste en una o varias corrientes eléctricas.

Sobre la parte móvil actúan dos momentos mecánicos de sentidos opuestos: el *momento motor* M_m y el *momento resistente o antagonista* M_a . El par motor se produce mediante fenómenos electromagnéticos originados por la acción de una (o varias) corriente(s) eléctrica(s) que circula(n) a través de las bobinas del aparato de medida. El par resistente es proporcional al ángulo α girado por la parte móvil y normalmente es producido por un resorte en espiral.

Para una corriente dada i se genera un par motor M_m que da lugar a una desviación α de la parte móvil con la que se produce el equilibrio de los pares, es decir,

$$\left. \begin{array}{l} M_m = M_a \\ M_m = f_m(i) \\ M_a = K_a \cdot \alpha \end{array} \right\} \alpha = \frac{M_m}{K_a} = \frac{f_m(i)}{K_a} = f_\alpha(i)$$

$$\boxed{\alpha = f_\alpha(i)}$$

(1.1)

Por lo tanto, la desviación de la parte móvil es función de la corriente medida.

Cuando se efectúa una medida la aguja indicadora realiza varias oscilaciones hasta alcanzar la desviación α dada por la relación (1.1). Para reducir la amplitud de estas oscilaciones y conseguir que la parte móvil llegue lo más pronto posible a la posición de equilibrio, los aparatos de medida están provistos de *amortiguadores*.

Las variaciones de temperatura, los golpes, las vibraciones, etc. pueden afectar al instrumento de medida de tal manera que su aguja no señala el cero de la escala cuando está desconectado. El *mecanismo corrector de cero* sirve para llevar la aguja a la división cero. Normalmente este mecanismo se regula actuando sobre un tornillo fijado en la caja del aparato.

Los aparatos de medida analógicos más utilizados están fabricados según cuatro formas constructivas básicas que dan lugar a distintas relaciones funcionales entre la desviación α y la corriente i ($\alpha = f_{\alpha}(i)$).

1) INSTRUMENTOS MAGNETOELÉCTRICOS O DE CUADRO MÓVIL

El par motor se produce por la interacción entre un imán permanente fijo y una bobina móvil recorrida por la corriente. En estos instrumentos se cumple que

$$\alpha = K' \cdot i \quad (1.2)$$

Si se invierte la corriente se invierte también el sentido de giro de la aguja. Por lo tanto, una corriente alterna daría lugar a que la aguja oscilara rápidamente alrededor de la división cero, siendo incapaz de medir su valor. Estos instrumentos son solamente aptos para medir magnitudes en corriente continua.

Cuando la corriente que recorre el aparato es unidireccional, pero no perfectamente constante en el tiempo, la inercia del aparato hace que la desviación de la aguja sea proporcional al valor medio de la corriente. Estos aparatos sirven para medir valores medios de las magnitudes eléctricas.

Incorporando a estos instrumentos un sistema rectificador, que transforma la corriente alterna en corriente unidireccional, se pueden realizar mediciones en c.a. Realmente el instrumento mide el valor medio de la corriente rectificada; pero, utilizando una escala graduada de forma conveniente, la aguja indicará el valor eficaz de la corriente alterna. En estos casos, la c.a. debe ser perfectamente sinusoidal o se pueden cometer errores importantes en la medida.

2) INSTRUMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS O DE HIERRO MÓVIL

El par se produce por la repulsión entre dos núcleos de hierro, uno fijo y otro móvil, magnetizados con igual polaridad por una bobina fija recorrida por la corriente.

En estos instrumentos se verifica que

$$\alpha = K'' \cdot i^2 \quad (1.3)$$

Al cambiar el sentido de la corriente no cambia el sentido de giro de la aguja. Estos instrumentos son aptos para medir magnitudes tanto de c.c. como de c.a.

Cuando la corriente que recorre el aparato no es constante con el tiempo, su inercia hace que la desviación de la aguja sea proporcional al valor medio del cuadrado de la corriente, es decir, a su valor eficaz. Estos aparatos miden los valores eficaces de las magnitudes eléctricas.

Estos instrumentos pueden medir el valor eficaz de corrientes alternas no perfectamente sinusoidales.

Aunque estos aparatos son capaces de medir prácticamente corrientes de cualquier forma, la escala de un aparato dado puede estar calibrada sólo para corrientes de un tipo determinado, cometiéndose errores importantes al medir otros tipos de corriente debidos a los efectos de las pérdidas en el hierro por histéresis y corrientes de Foucault. En los instrumentos fabricados con hierros especiales se puede utilizar la misma escala para medir distintos tipos de corriente.

A diferencia de lo que ocurre con los aparatos de cuadro móvil, en las medidas en c.c. los instrumentos de hierro móvil no son capaces de distinguir si la corriente circula en un sentido o en el contrario. Sea cual sea el sentido de la corriente, la aguja gira siempre en el mismo sentido.

3) INSTRUMENTOS ELECTRODINÁMICOS

El par motor se origina por la interacción entre dos bobinas, una fija y otra móvil, recorridas por sendas corrientes eléctricas i_1 e i_2 .

Se cumple que

$$\alpha = K''' \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (1.4)$$

Cambiando simultáneamente los sentidos de las corrientes en ambas bobinas, el sentido de giro de la aguja no cambia. Estos instrumentos son aptos para medir magnitudes tanto de c.c. como de c.a., además la escala del instrumento es la misma en ambos casos.

Cuando i_1 e i_2 son funciones sinusoidales del tiempo, de valores eficaces I_1 e I_2 , respectivamente, y están desfasadas entre sí un ángulo ϕ , se puede demostrar que la inercia del aparato da lugar a que la desviación de la aguja tome un valor

$$\alpha = K''' \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \phi \quad (1.5)$$

En algunos casos se conectan las bobinas de tal manera que $i_1 = i_2 = i$, con lo que el aparato mide el valor eficaz de la corriente i .

4) INSTRUMENTOS DE INDUCCIÓN

El par motor es producido por la acción de dos electroimanes fijos, recorridos por sendas corrientes alternas i_1 e i_2 , sobre un disco móvil de aluminio.

Si i_1 e i_2 varían en el tiempo de forma sinusoidal con frecuencia f , tienen valores eficaces I_1 e I_2 , respectivamente, y θ es el desfase entre los flujos magnéticos que producen los electroimanes, se verifica que

$$\alpha = K^{IV} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot f \cdot \sin \theta \quad (1.6)$$

Como α es función de la frecuencia f , estos instrumentos sólo son aptos para medir magnitudes de c.a. a la frecuencia para la cual están calibrados. En algunos casos se conectan las bobinas de tal manera que $i_1 = i_2 = i$, con lo que el aparato mide el valor eficaz de la corriente i .

2.3. - Constitución de los aparatos de medida digitales

La incorporación de circuitos digitales en los instrumentos de medida ha ido produciendo en ellos cambios notables.

Los primeros instrumentos digitales aparecieron, en el ámbito comercial, en E.E.U.U. a principios de los años cincuenta. Desde entonces la tecnología de estos aparatos ha sufrido cambios sorprendentes, que se reflejan de forma especialmente clara en los *multímetros*. En éstos, a la presentación numérica siguieron la capacidad de cálculo y la transmisión de datos, la realización de nuevas funciones sin aumentar la complejidad del manejo, la reducción del tamaño y la incorporación de indicadores analógicos, acompañado todo ello de una resolución y exactitud crecientes.

En los aparatos de medida digitales la magnitud transformada Y (Fig.1.1) que se aplica al sistema indicador consiste en una tensión continua. El sistema indicador de los instrumentos digitales está formado por el D.V.M. (Medida Digital de la Tensión), cuyo diagrama de bloques aparece representado en la figura 1.2.

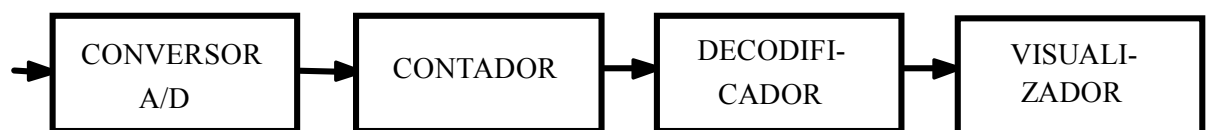


Fig. 1.2: Diagrama de bloques de un D.V.M.

La tensión a medir es transformada por el convertidor analógico-digital en un número determinado de impulsos, los cuales son contados por un contador binario. La señal en código binario que suministra este contador es convertida -mediante el decodificador- en otra señal en el código que utiliza el visualizador. El visualizador generalmente consiste en una pantalla de diodos LED o de cristal líquido y en él se puede leer directamente el valor de la magnitud medida.

3. - ERRORES

3.1. - Errores sistemáticos, accidentales y de lectura

El resultado de una medida siempre es inexacto, pues resulta inevitable el cometer errores. Estos errores pueden ser: sistemáticos, accidentales o de lectura.

Los *errores sistemáticos* se repiten al realizar sucesivas medidas -en las mismas condiciones- del mismo valor de una magnitud. Estos errores son debidos a las características del instrumento y del método de medida empleado y a las condiciones ambientales (humedad, temperatura, ...) en que se ha realizado la medición. Los errores sistemáticos sólo pueden ser eliminados utilizando instrumentos más exactos o cambiando las condiciones de medida.

Los *errores accidentales*, también denominados *aleatorios* o *fortuitos*, son producidos por circunstancias desconocidas que causan pequeñas variaciones en la medida. El valor de estos errores cambia de forma aleatoria al repetir la medida -en iguales condiciones- del mismo valor de una magnitud. Los errores accidentales se pueden reducir repitiendo varias veces una medida y calculando la media aritmética de los valores obtenidos.

Los *errores de lectura* son los cometidos al leer la indicación de un aparato de medida analógico. Pueden ser de paralaje o de apreciación.

El *error de paralaje* se comete cuando el índice de la escala no se observa perpendicular a ésta, con lo cual se lee una división de la escala errónea. Este error se evita colocando un espejo sobre la escala: la lectura se realizará correctamente cuando la aguja indicadora y su imagen reflejada en el espejo se vean superpuestas.

El *error de apreciación* es el producido cuando se lee la indicación de un aparato de medida analógico si el índice no se sitúa exactamente sobre una división de la escala. Este error es debido a la dificultad con que el ojo humano puede apreciar una fracción de intervalo entre dos divisiones consecutivas.

3.2. - Errores absoluto, relativo y reducido

Cuando se mide una magnitud de valor M el resultado obtenido M_i contiene cierto error.

Se denomina *error absoluto* e_a a la diferencia entre M_i y M :

$$e_a = M_i - M \quad (1.7)$$

e_a puede tomar valores positivos o negativos, según que M_i sea mayor o menor que M .

El *error relativo* e_r es la razón entre e_a y M , expresada en tanto por ciento:

$$e_r = \frac{e_a}{M} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

El *error reducido* δ de un instrumento de medida es la razón, expresada en tanto por ciento, entre el error absoluto de la medida y el alcance¹ M_{nom} del instrumento:

$$\delta = \frac{e_a}{M_{\text{nom}}} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

¹ El *alcance* o *calibre* de un instrumento es el valor de la magnitud que mide correspondiente al límite superior de su escala

3.3. - Especificaciones de la exactitud de un instrumento de medida

1) APARATOS ANALÓGICOS

La exactitud de un aparato de medida analógico se expresa mediante su *clase de precisión*, que es el valor máximo que puede adoptar el error reducido δ de una medida realizada con dicho instrumento. Las clases de precisión normalizadas son

$$0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 1,5 - 2,5 - 5$$

Así, un voltímetro de clase 1 con un alcance de 300 voltios no cometerá un error absoluto positivo o negativo superior a

$$e_a \leq \pm \frac{1}{100} \cdot 300 = \pm 3 \text{ Voltios}$$

En algunos instrumentos el fabricante no garantiza que en toda la escala el error absoluto esté comprendido entre los límites que corresponden a su clase de precisión. En estos casos, unas divisiones señaladas con un punto (Fig. 1.3b y c) indican la zona de la escala donde las medidas tienen un error dentro de los límites de la clase del aparato. Si sólo existe una división señalada con un punto (Fig. 1.3d), a partir de dicha división hasta el final de la escala el aparato cumple las condiciones de exactitud correspondientes a su clase.

En un instrumento analógico el error absoluto es el dado por su clase. Según la expresión (1.8), el error relativo de una medida efectuada con el instrumento aumentará si la magnitud a medir tiene un valor M pequeño. Para evitar el cometer grandes errores relativos, es conveniente no utilizar en las medidas el primer tercio de la escala y procurar realizar la lectura en la parte superior de la escala.

Así, en el ejemplo anterior unas medidas de 10, 100 y 250 voltios darían estos errores relativos máximos:

$$e_{r1} = \frac{3}{10} \cdot 100 = 30\% \quad (\text{Muy grande})$$

$$e_{r2} = \frac{3}{100} \cdot 100 = 3\%$$

$$e_{r3} = \frac{3}{250} \cdot 100 = 1,2\%$$

Los aparatos de clases 0,1 y 0,2 son de alta precisión, los de clase 0,5; 1 y 1,5 son instrumentos de laboratorio industrial y los de clase 2,5 y 5 son de poca precisión y se emplean en cuadros eléctricos.

2) APARATOS DIGITALES

La especificación del error absoluto que se comete al efectuar una medida con un aparato digital se suele dar como suma de dos partes:

- a) Un tanto por cierto de la entrada (o lectura).
- b) Un error de resolución igual a un número de dígitos de la década menos significativa.

Por ejemplo, si con un voltímetro digital con un visualizador de 3 dígitos, un alcance de 99,9 voltios y una especificación de exactitud así:

$$\pm (0,5\% \text{ de la entrada} + 2 \text{ dígitos})$$

se realiza una lectura de 53,5 V, el error cometido se calcula de esta manera:

$$0,5 \text{ de la entrada} \approx 0,5 \text{ de la lectura} = \frac{0,5}{100} \cdot 53,5 = 0,2675 \text{ V}$$

En este aparato la última cifra del visualizador indica décimas de voltio, luego,

$$2 \text{ dígitos} = 0,2 \text{ V}$$

Por lo tanto, el límite del error absoluto cometido en esta medida vale

$$e_a \leq \pm(0,2625 + 0,2) = \pm 0,4675 \text{ V}$$

y el error relativo será

$$e_r \leq \frac{0,4675}{53,5} \cdot 100 = 0,874\%$$

3.4. - Sensibilidad

Cuando un instrumento ANALÓGICO está midiendo una magnitud de valor M su aguja indicadora gira un ángulo α . Una variación ΔM del valor de la magnitud medida dará lugar a una variación $\Delta\alpha$ de la desviación del índice. Se denomina sensibilidad S al cociente entre $\Delta\alpha$ y ΔM :

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta M} \quad (1.10)$$

Interesa que un aparato de medida sea sensible, pues entonces las pequeñas variaciones de M se podrán apreciar más fácilmente ya que originarán variaciones notables de α .

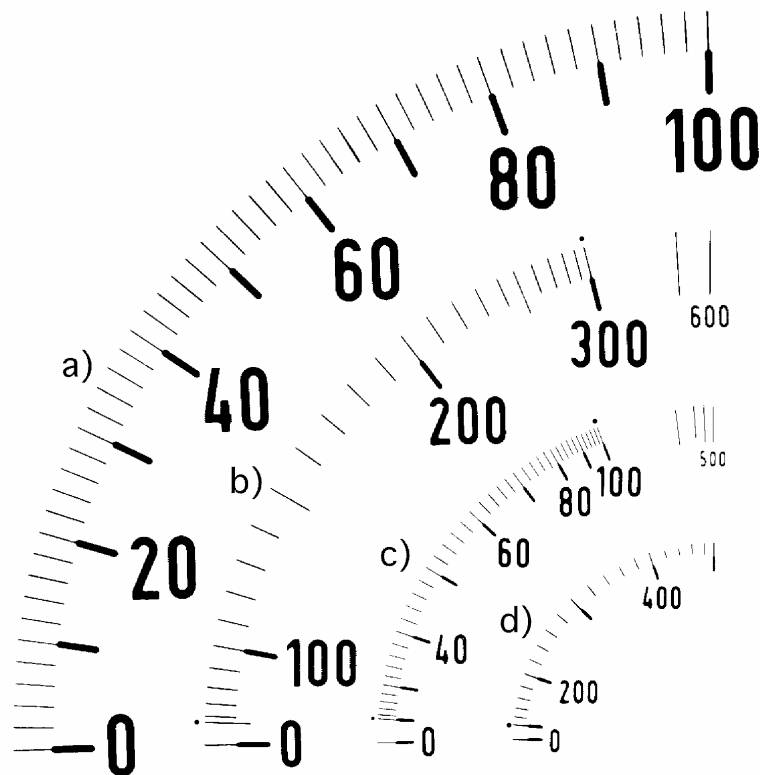


Fig. 1.3: Ejemplos de escalas de aparatos de medida analógicos

Hay aparatos en los que la separación entre las divisiones es la misma en toda la escala (Fig. 1.3a) y otros en los que esta separación varía de una zona de la escala a otra (Fig. 1.3b, c y d). En los primeros la sensibilidad se mantiene constante en toda la escala y en los segundos la sensibilidad es diferente en las distintas zonas de ésta.

En los instrumentos DIGITALES la sensibilidad se da indicando qué valor de la magnitud medida corresponde a una unidad en la década menos significativa del visualizador.

Así, en el ejemplo citado anteriormente de un voltímetro con un visualizador de 3 dígitos y un alcance de 99,9 voltios, la última cifra del visualizador indica décimas de voltio. Por lo tanto, su sensibilidad es de 0,1 voltios.

En algunos aparatos digitales se especifica que su visualizador tiene un número de dígitos no entero. Esto quiere decir que la década más significativa sólo puede representar el dígito 1. En estos instrumentos sus alcances son tales que la sensibilidad se mantiene constante, tanto se representen las cantidades utilizando la década más significativa como si no.

Así, un amperímetro con un alcance de 15 A y pantalla de 3,5 dígitos tiene una sensibilidad de 0,01 A, tanto cuando representa con 3 cifras valores por debajo de 10 A (por ejemplo 5,38 A), como cuando señala con 4 cifras cantidades entre 10 y 15 A (por ejemplo 13,43 A).

3.5 - Símbolos e indicaciones sobre los cuadrantes de los aparatos analógicos

Normalmente, los aparatos de medida analógicos llevan impresos en una esquina de su cuadrante una serie de símbolos que indican sus características más importantes, así como un número que señala la clase de precisión del instrumento (véase la norma UNE-EN 60051-1 [8]).

Los símbolos empleados más usualmente figuran en las tablas 1.1 a 1.5.

Tabla 1.1: Símbolos de sistemas de funcionamiento de aparatos de medida

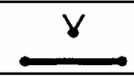
Designación	Símbolo
Instrumentos de bobina móvil e imán permanente (magnetoeléctricos)	
Logómetro (cocientímetro) magnetoeléctrico	
Instrumento de imán permanente móvil	
Logómetro (cocientímetro) de imán permanente móvil	
Instrumento de hierro móvil (ferromagnético)	
Instrumento de hierro móvil e imán	
Logómetro (cocientímetro) ferromagnético	
Instrumento electrodinámico sin hierro	
Instrumento electrodinámico de núcleo de hierro (ferrodinámico)	
Logómetro (cocientímetro) electrodinámico sin núcleo de hierro	
Logómetro (cocientímetro) de núcleo de hierro (ferrodinámico)	
Instrumento de inducción	
Logómetro (cocientímetro) de inducción	
Instrumento bimetalico	
Instrumento electrostático	
Instrumento de láminas vibrantes	
Termopar no aislado (convertidor térmico)	 3)
Termopar aislado (convertidor térmico)	 3)
Dispositivo electrónico en un circuito de medida	 3)
Dispositivo electrónico en un circuito auxiliar	 3)
Rectificador	 3)

Tabla 1.2: Símbolos de los tipos de corriente en aparatos de medida

Designación	Símbolo
Circuito de corriente continua y/o elemento de medida que responde a la corriente continua	
Circuito de corriente alterna y/o elemento de medida que responde a la corriente alterna	
Circuito de corriente continua y corriente alterna y/o elemento de medida que responde a la corriente continua y a la corriente alterna	
Circuito de corriente alterna trifásica (símbolo general)	
Elemento de medida para una red de 3 hilos	
Elemento de medida para una red de 4 hilos	
Dos elementos de medida para una red de 3 hilos con cargas no equilibradas	
Dos elementos de medida para una red de 4 hilos con cargas no equilibradas	
Tres elementos de medida para una red de 4 hilos con cargas no equilibradas	

Tabla 1.3: Símbolos de posición de utilización de aparatos de medida

Designación	Símbolo
Instrumento a utilizar con el cuadrante en posición vertical	
Instrumento a utilizar con el cuadrante en posición horizontal	
Instrumento a utilizar con el cuadrante en posición inclinada con respecto a la horizontal (por ejemplo 60°)	

Tabla 1.4: Símbolos de tensión de prueba de aislamiento de un aparato de medida

Designación	Símbolo
Tensión de prueba de aislamiento. El número indica la tensión en kV (por ejemplo 2 kV)	
Si no se indica ningún número, la tensión de prueba es 500 V	
Si se indica un cero el aparato no ha sido sometido a prueba de aislamiento	

Tabla 1.5: Símbolos especiales (ejemplos)

Designación	Símbolo
Atención: No tocar durante el trabajo; puede resultar peligroso	
Atención: No utilizar antes de consultar instrucciones especiales adjuntas; puede resultar peligroso	
Blindaje magnético	
Blindaje electrostático	

3.6 - Constantes de medición

La *constante de medición* K_M de un aparato es el número por el que hay que multiplicar las divisiones leídas M_E en la escala del aparato para obtener el valor M de la magnitud medida:

$$M = K_M \cdot M_E \quad (1.11)$$

Cuando un aparato tiene diferentes calibres de medida suele disponer en su cuadrante de tantas escalas como calibres tiene. De esta manera, la lectura en divisiones de la escala adecuada expresa directamente el valor de la magnitud medida. Sin embargo, existen aparatos con varios alcances y con una sola escala. En este caso hay que emplear una constante de medida diferente en cada caso.

La constante de medida de un aparato para un calibre dado se calcula así:

$$K_M = \frac{\text{Calibre del instrumento}}{\text{Número de divisiones de la escala}} \quad (1.12)$$

Ejemplos:

- 1) Un voltímetro con los alcances 150 - 300 - 600 Voltios y 150 divisiones tiene estas constantes de medida:

$$\text{Para } 150 \text{ V} \rightarrow K_{V1} = \frac{150 \text{ V}}{150 \text{ div}} = 1 \text{ V / división}$$

$$\text{Para } 300 \text{ V} \rightarrow K_{V2} = \frac{300 \text{ V}}{150 \text{ div}} = 2 \text{ V / división}$$

$$\text{Para } 600 \text{ V} \rightarrow K_{V3} = \frac{600 \text{ V}}{150 \text{ div}} = 4 \text{ V / división}$$

- 2) Un amperímetro con los calibres 5 - 10 Amperios y 5 divisiones grandes (estas divisiones están numeradas de 1 a 5 y cada una de ellas está subdividida, a su vez, en 20 divisiones pequeñas) tiene estas constantes de medición:

$$\text{Para } 5 \text{ A} \rightarrow K_{A1} = \frac{5 \text{ A}}{5 \text{ div}} = 1 \text{ A / división grande}$$

$$\text{Para } 10 \text{ A} \rightarrow K_{A2} = \frac{10 \text{ A}}{5 \text{ div}} = 2 \text{ A / división grande}$$

En el capítulo siguiente se estudia el vatímetro y se da un ejemplo de cómo se calcula su constante de medida K_W .

En el caso de que la constante de medición de un instrumento tenga un valor diferente de 1, es conveniente no realizar la multiplicación (1.11) de memoria. Es mejor anotar los valores de M_E y K_M y realizar su producto más tarde. De esta manera se evita que un error al realizar de memoria dicho producto impida conocer después el valor de lo que realmente se ha medido.

4. - TÉCNICAS DE MEDIDA DE VARIAS MAGNITUDES ELÉCTRICAS EN CORRIENTE CONTINUA

4.1. - Medida de intensidades de corriente. Amperímetros

La medida de intensidades de corriente se realiza con *amperímetros*. Un amperímetro debe estar recorrido por la corriente que se desea medir, por lo tanto, estos aparatos se conectan en serie (Fig. 1.4) con la parte del circuito recorrida por dicha corriente.

La introducción de un aparato de medida en un circuito no debe afectar apreciablemente a sus características. Esto exige que la caída de tensión en el amperímetro sea despreciable frente a

las que se producen en los elementos del circuito que se mide. Por lo tanto, los amperímetros tienen una resistencia interna R_A muy pequeña.

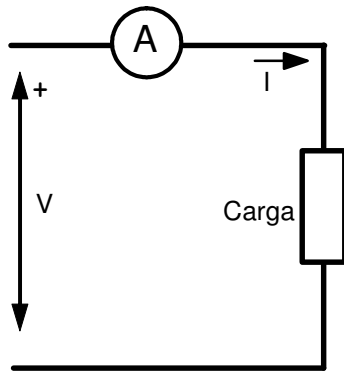


Fig. 1.4: Conexión de un amperímetro

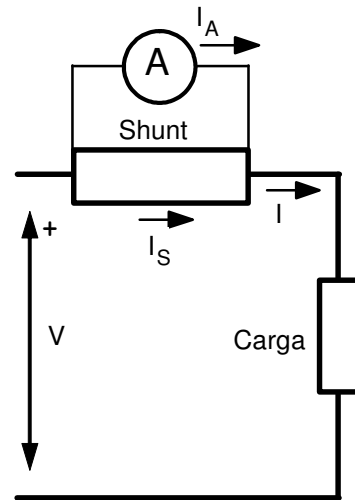


Fig. 1.5: Conexión de un amperímetro con un shunt

Cuando se desean medir intensidades mayores que el alcance del amperímetro se utilizan *shunts* (Fig. 1.5 y 1.6). Un shunt es una resistencia calibrada de pequeño valor que se coloca en paralelo con el amperímetro. La corriente total a medir I se desdobra en dos: I_A a través del amperímetro e I_S a través del shunt. Denominando R_S a la resistencia del shunt y R_A a la resistencia del amperímetro (R_A incluye también la resistencia de los hilos de conexión entre el amperímetro y el shunt), se verifica que:

$$\left. \begin{array}{l} I = I_A + I_S \\ R_A \cdot I_A = R_S \cdot I_S \end{array} \right\} I = \left(\frac{R_A}{R_S} + 1 \right) \cdot I_A = m \cdot I_A$$

$I = m \cdot I_A$

(1.13)

Por lo tanto, la intensidad I_A medida directamente por el amperímetro deberá multiplicarse por el *factor multiplicador o constante del shunt m* para obtener el valor de la intensidad a medir I . Normalmente los shunts tienen valores de m múltiplos de diez: 10, 100, 1000, ...

En un shunt se especifica la intensidad de su calibre (5, 15, 50 A, ...) y la caída de tensión en milivoltios (60 mV, 100 mV, ...) que se produce en él cuando está conectado con el amperímetro y circula su intensidad de calibración por la línea principal. Los shunts suelen disponer de 4 terminales (Figs. 1.6 y 2.3), dos se conectan al circuito a medir y los otros dos al amperímetro.

En la conexión de un amperímetro con un shunt, realmente el amperímetro actúa como un milivoltímetro que mide la caída de tensión que se produce en el shunt.

Se ha visto antes que los sistemas indicadores ANALÓGICOS son activados por corrientes eléctricas. Podría pensarse, entonces, que un amperímetro analógico podría estar formado únicamente por el sistema indicador, sin necesidad de ningún detector (Fig. 1.1). Sin embargo, normalmente un instrumento analógico sin sistema detector constituye un *galvanómetro*, es decir, un instrumento de gran sensibilidad que mide tensiones e intensidades muy pequeñas. Un amperímetro analógico, por lo tanto, deberá disponer de un shunt interno que le permita medir intensidades superiores a las que su sistema indicador puede medir directamente (Fig. 1.7a).



Fig. 1.6: Shunts

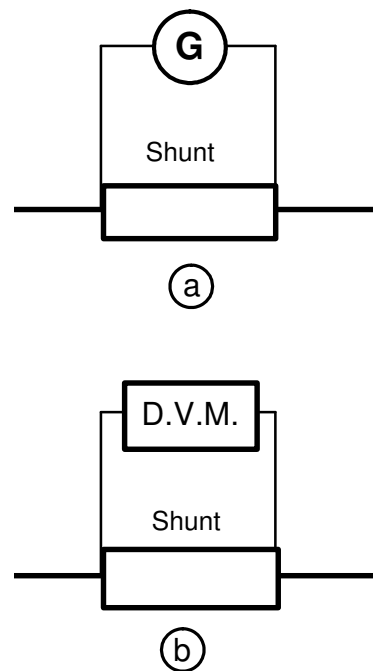


Fig. 1.7: Constitución de un
amperímetro analógico
(a) y digital (b)

Los amperímetros analógicos de c.c. suelen ser de cuadro móvil, los cuáles son sensibles al sentido de la corriente eléctrica. Es preciso, pues, conectarlos al circuito respetando la polaridad

de sus terminales. También hay amperímetros de c.c. de hierro móvil que son insensibles al sentido de la corriente.

El sistema indicador de los aparatos DIGITALES es el D.V.M. que puede medir tensiones pequeñas de c.c. (por ejemplo, hasta 100 mV). Un amperímetro analógico de c.c. consiste en un D.V.M. conectado en paralelo con un shunt (Fig. 1.7b). El D.V.M. mide la caída de tensión en el shunt, la cual es proporcional a la corriente que se mide, y refleja en su pantalla el valor de dicha corriente.

4.2. - Medida de tensiones. Voltímetros

La medida de tensiones eléctricas se realiza con *voltímetros*. Un voltímetro debe de estar sometido a la tensión que se desea medir, por lo tanto, estos aparatos se conectan en paralelo (Fig. 1.8) entre los dos puntos del circuito cuya diferencia de potencial se quiere medir.

La introducción de un voltímetro en un circuito no debe afectar apreciablemente a sus características. Esto exige que la corriente que circula por este aparato sea despreciable frente a la que circula por las ramas del circuito que se mide. Por lo tanto, los voltímetros poseen una resistencia interna R_V muy elevada.

Cuando se desean medir tensiones mayores que el alcance del voltímetro se utilizan resistencias multiplicadoras (Figs. 1.9 y 1.10). Estas resistencias son de alto valor óhmico y se conectan en serie con el voltímetro. La tensión total a medir V se descompone en dos: V_V en el voltímetro y V_R en la resistencia. Denominando R_R al valor de la resistencia multiplicadora y R_V a la resistencia interna del voltímetro, se verifica que

$$\left. \begin{array}{l} I_V = \frac{V}{R_R + R_V} \\ V_V = I_V \cdot R_V \end{array} \right\} V = \left(\frac{R_R}{R_V} + 1 \right) \cdot V_V = m' \cdot V_V$$

$$\boxed{V = m' \cdot V_V}$$

(1.14)

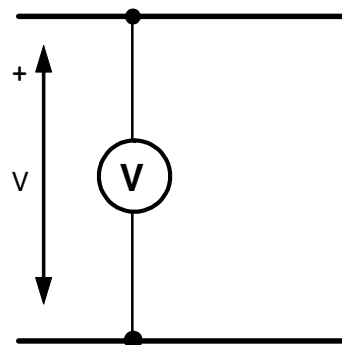


Fig. 1.8: Conexión de un voltímetro

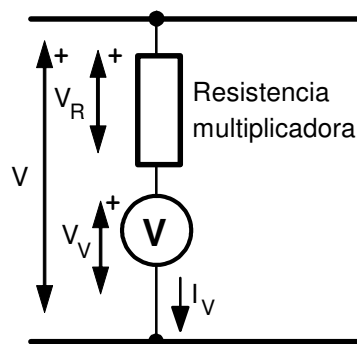


Fig. 1.9: Conexión de un voltímetro con resistencia multiplicadora



Fig. 1.10: Resistencias multiplicadoras

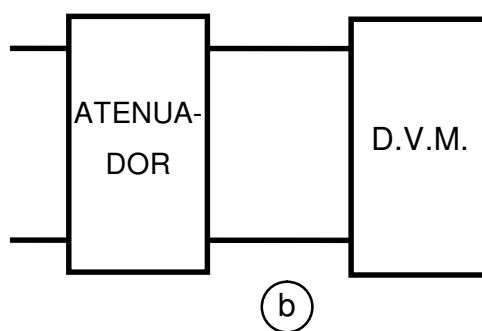
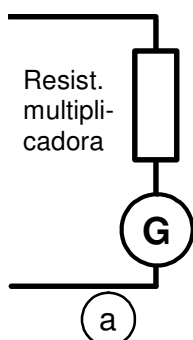


Fig. 1.11: Constitución de un voltímetro analógico (a) y uno digital (b)

Por lo tanto, multiplicando la tensión V_v , medida directamente por el voltímetro, por el *factor multiplicador de la resistencia m'* se obtiene el valor de la tensión a medir V .

Un voltímetro ANALÓGICO está formado por un galvanómetro conectado en serie con una resistencia (Fig. 1.11a). Por el voltímetro circulará una corriente proporcional a la tensión a medir. Esta corriente es medida por el galvanómetro, el cual tiene su escala preparada de tal manera que señala la tensión que corresponde a dicha corriente.

Los voltímetros analógicos de c.c. suelen ser de cuadro móvil, luego hay que conectarlos respetando la polaridad de sus terminales. También hay voltímetros de c.c. de hierro móvil que son insensibles a la polaridad de la tensión que se les aplica.

Un voltímetro DIGITAL está formado por un sistema atenuador y la unidad D.V.M. (Fig. 1.11b). El atenuador reduce la tensión de entrada a valores aceptables para el D.V.M. El circuito atenuador puede ser pasivo, es decir, formado sólo por resistencias (una resistencia en serie con el D.V.M. o un divisor de tensión que alimenta al D.V.M.), o puede estar combinado con un amplificador electrónico.

4.3. - Medida de resistencias

A continuación se van a describir varios sistemas de medida de resistencias, pero antes es preciso hacer notar que ésta es una magnitud que varía con la temperatura. Por lo tanto, los métodos de medida que hacen circular corrientes apreciables por la resistencia a medir pueden suministrar resultados de mayor valor que otros métodos, pues estas corrientes calientan el elemento que se mide. Además, habrá que esperar a que la temperatura se estabilice para que al medir la resistencia se lea un valor constante.

4.3.1. - Medida de resistencias con un voltímetro y un amperímetro

Este sistema de medida consiste en alimentar la resistencia a medir R_x con una tensión continua (si se utilizara una tensión alterna se medirían impedancias), medir el valor de dicha

tensión con un voltímetro y la corriente que circula por la resistencia con un amperímetro y aplicar la ley de Ohm:

$$R_X = \frac{V}{I} \quad (1.15)$$

Existen dos formas de colocar el voltímetro y el amperímetro: el montaje largo o anterior (Fig. 1.12a) y el montaje corto o posterior (Fig. 1.12b).

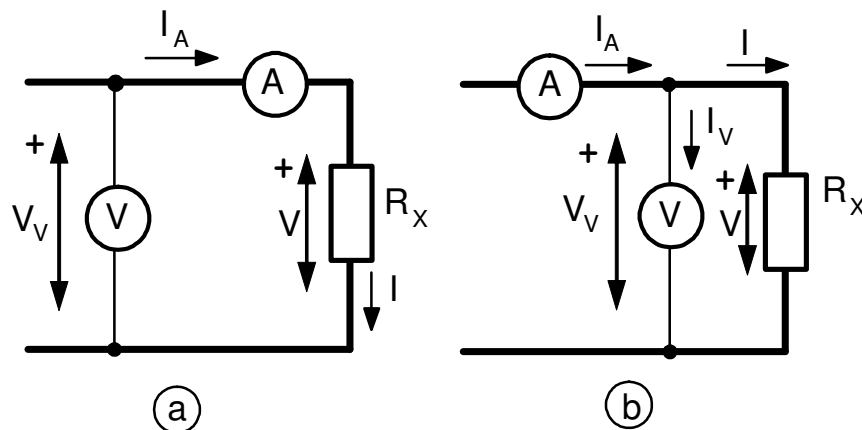


Fig. 1.12: Medida de resistencias con un amperímetro y un voltímetro

a) Montaje largo; b) Montaje corto

En el *montaje largo o anterior* la intensidad I_A que mide el amperímetro es la misma intensidad I que circula por la resistencia, pero la tensión V_V medida por el voltímetro es ligeramente distinta de la tensión V a la que está sometida la resistencia (véase la Fig. 1.12a).

En el *montaje corto o posterior* el voltímetro mide la tensión V a la que está sometida la resistencia, pero el amperímetro mide una intensidad I_A ligeramente distinta de la intensidad I que circula por la resistencia (véase la Fig. 1.12b).

La resistencia R_{LIM} , en la que al medir usando los dos montajes se comete el mismo error relativo, se obtiene mediante esta expresión

$$R_{LIM} = \sqrt{R_A \cdot R_V} \quad (1.16)$$

R_A es la pequeña resistencia interna del amperímetro y R_V es la elevada resistencia interna del voltímetro

Se comete menos error utilizando el montaje corto para la medida de resistencias de valor inferior a R_{LIM} y utilizando el montaje largo para la medida de resistencias de valor superior a R_{LIM} .

4.3.2. - Medida de resistencias con un óhmetro

Los óhmetros son aparatos de lectura directa graduados en ohmios.

Un óhmetro ANALÓGICO con montaje serie consta en esencia de una fuente de tensión continua, una resistencia variable y un galvanómetro (Fig. 1.13).

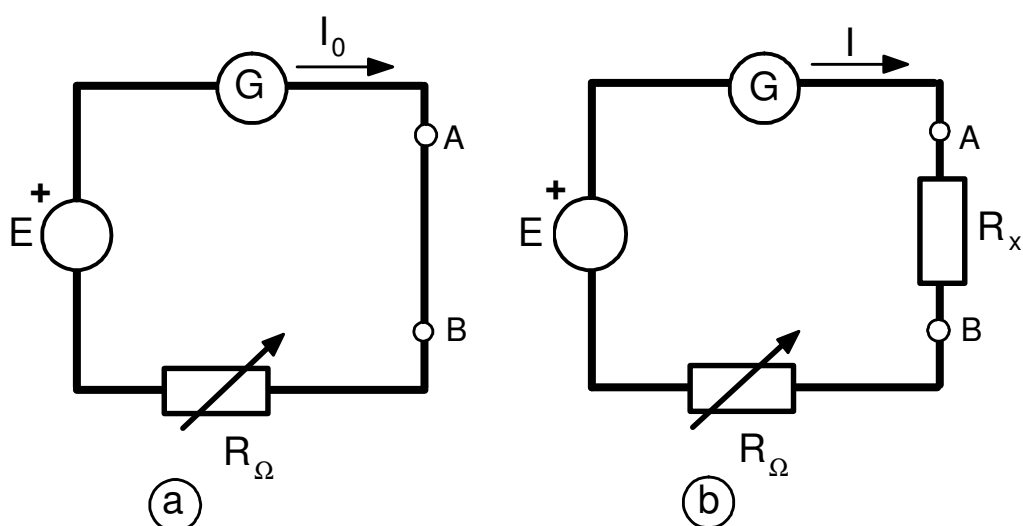


Fig. 1.13: Medida de resistencias con un óhmetro analógico:

a) Ajuste previo del cero; b) Medida de la resistencia R_X

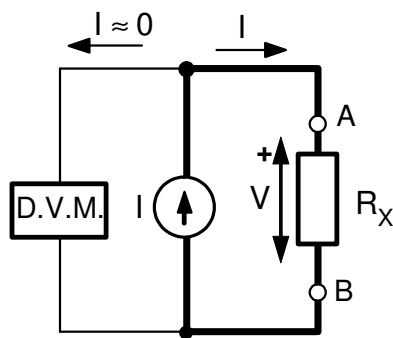
La medida con este aparato se realiza del siguiente modo: se cortocircuitan los terminales A y B (Fig. 1.13a) y se ajusta la resistencia variable R_Ω hasta conseguir que circule la intensidad I_0 que corresponde a la desviación máxima de la aguja del galvanómetro. A continuación, se coloca la resistencia a medir R_X entre los terminales A y B con lo que circulará una corriente I por el circuito. Se cumple que

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= \frac{E}{R_\Omega} \\ I &= \frac{E}{R_X + R_\Omega} \end{aligned} \right\} \frac{I_0}{I} = \frac{R_X + R_\Omega}{R_\Omega}$$

$$R_X = R_\Omega \left(\frac{I_0}{I} - 1 \right) \quad (1.17)$$

En realidad se utiliza un circuito algo más complejo que el representado en la Fig. 1.13 para que la medida sea prácticamente independiente del ajuste de la resistencia variable R_Ω .

El cuadrante del galvanómetro está graduado en ohmios por lo que la medida de la resistencia se realiza por lectura directa sobre este aparato.



Los óhmetros DIGITALES constan básicamente de una fuente de corriente y de un elemento de medida digital de tensión (D.V.M.) (Fig. 1.14). Colocando la resistencia a medir R_X entre los terminales A y B, la caída de tensión medida por el D.V.M. es proporcional a R_X :

Fig. 1.14: Óhmetro digital

$$V = I \cdot R_X$$

El aparato se construye de tal manera que su pantalla señala directamente el valor de la resistencia medida.

4.3.3. - Medida de resistencias con un puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es, en principio, un método para medir resistencias más exacto que los mencionados anteriormente.

En la figura 1.15 se representa el principio de funcionamiento de este puente. R_X es la resistencia a medir y R_1 , R_2 y R_3 son resistencias de valor conocido. Se varía el valor de la

resistencia R_3 mediante un mando hasta conseguir que el galvanómetro indique que I_G tiene un valor nulo. En este caso se puede demostrar que se verifica la siguiente relación:

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} \quad (1.18)$$

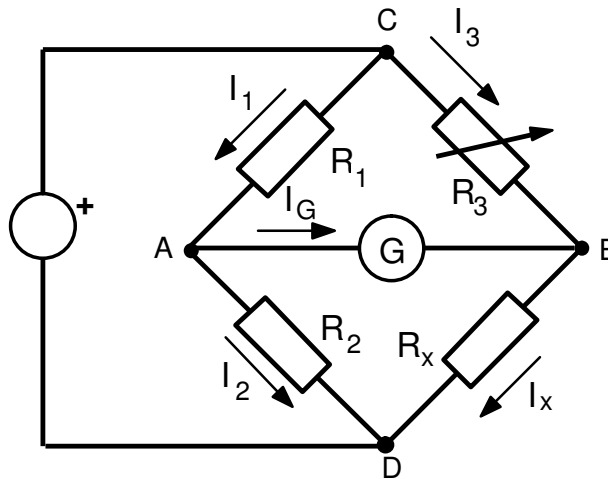


Fig. 1.15: Principio de funcionamiento un Puente de Wheatstone

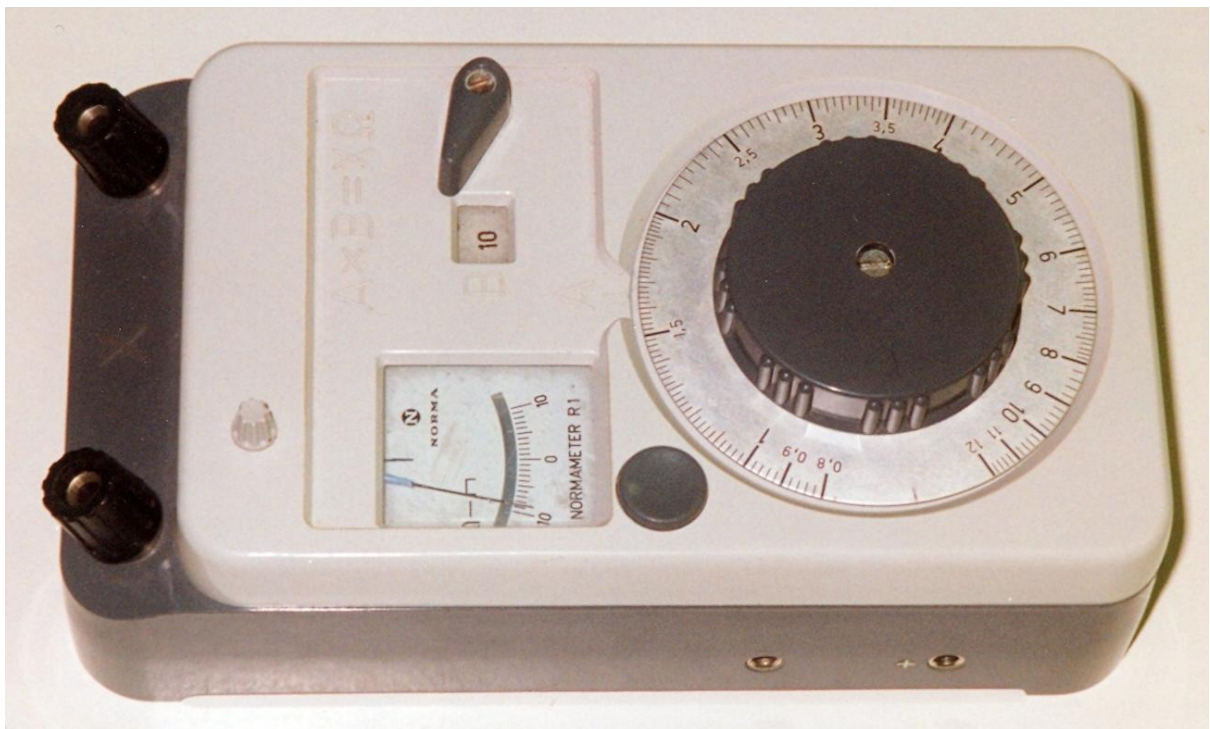


Fig. 1.16: Puente de Wheatstone

Normalmente el aparato posee un mando que permite variar el cociente R_2/R_1 de forma que tome los valores 10^3 , 10^2 , 10, 1, 10^{-1} , 10^{-2} , ... Por otra parte, el mando que varía la resistencia R_3 indica el valor de esta resistencia en cada instante.

Por lo tanto, para medir la resistencia R_X con el puente de Wheatstone se accionan los mandos que varían los valores de R_3 y R_2/R_1 hasta conseguir que la intensidad I_G sea nula y se aplica entonces la expresión (1.18).

Se puede demostrar que si se tiene un puente de Wheatstone equilibrado ($I_G = 0$) de tal manera que $R_1 = R_2 = R_3 = R_X = R_0$ y la resistencia R_X varía su valor en una pequeña cantidad ΔR_X , la intensidad I_G que circula por el galvanómetro es proporcional al cociente

$$\frac{\Delta R_X}{4R_0}$$

Luego, conocido R_0 , se puede obtener el valor de ΔR_X a partir de I_G .

Esta propiedad del puente de Wheatstone se aplica frecuentemente en sistemas de instrumentación. Así, por ejemplo, la medida de deformaciones en una estructura se realiza con bandas extensiométricas, cuya resistencia varía según las deformaciones que detecta. Estas variaciones de resistencia se pueden medir con puentes de Wheatstone.

5 - POLÍMETROS

Los *polímetros*, también denominados *multímetros*, *testers*, *multitesters* o *medidores universales*, son aparatos capaces de medir varias magnitudes eléctricas. Por lo general, un polímetro puede medir, al menos, tensiones e intensidades, tanto de c.c. como de c.a., y resistencias. Algunos modelos pueden medir, además, otras magnitudes: capacidades, frecuencias, ganancias de transistores, etc.

En un polímetro siempre existe algún sistema de selección de la magnitud a medir. En unos modelos esta selección se realiza por medio de un conmutador múltiple, en otros por medio de una serie de teclas y en otros utilizando el par de terminales adecuado entre los varios que posee el aparato. Algunos modelos combinan varias de estas maneras de selección.

Los polímetros ANALÓGICOS suelen utilizar un galvanómetro de bobina móvil como elemento indicador. A este galvanómetro se le conecta un rectificador en las medidas con c.a. Un conjunto de resistencias, shunts e impedancias permiten conectar el aparato como voltímetro, amperímetro u óhmetro.

Los polímetros o multímetros DIGITALES utilizan una unidad D.V.M. como sistema indicador, lo que significa que estos aparatos presentan los resultados de forma numérica (digital). Una serie de circuitos del polímetro permiten la medida de diversas magnitudes eléctricas, tensiones, corrientes, resistencias. Algunos modelos permiten medir además, conductancias, frecuencias y capacidades. Con sondas adecuadas se miden temperaturas y también potencias y corrientes (sin apertura del circuito).

La figura 1.17 muestra un diagrama de bloques funcionales de un polímetro digital, en el que, aparte de la unidad de control, los otros bloques son complementarios del D.V.M.

En la entrada del D.V.M. deben aparecer todas las magnitudes que se quieren medir, convertidas en una tensión continua U_e con un valor máximo limitado (generalmente 10 V).

Para la medida de tensiones en c.c. y c.a. se utiliza un atenuador de tipo resistivo. Además se pueden incorporar filtros y circuitos protectores contra sobretensiones, inversión de la polaridad, etc.

Para las medidas de escala inferior al valor mínimo que acepta el D.V.M. se dispone de un amplificador.

La intensidad se mide a partir de la caída de tensión que se produce en una resistencia en derivación (shunt) cuyo valor se cambia al pasar de una escala a otra.

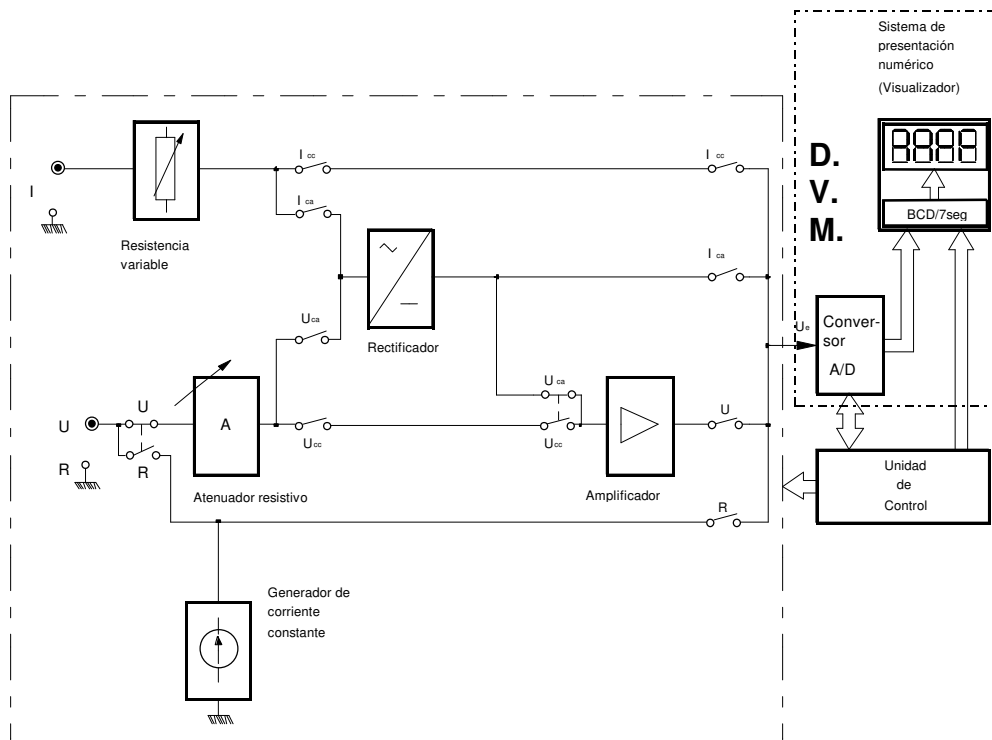


Fig. 1.17: Diagrama de bloques de un polímetro digital

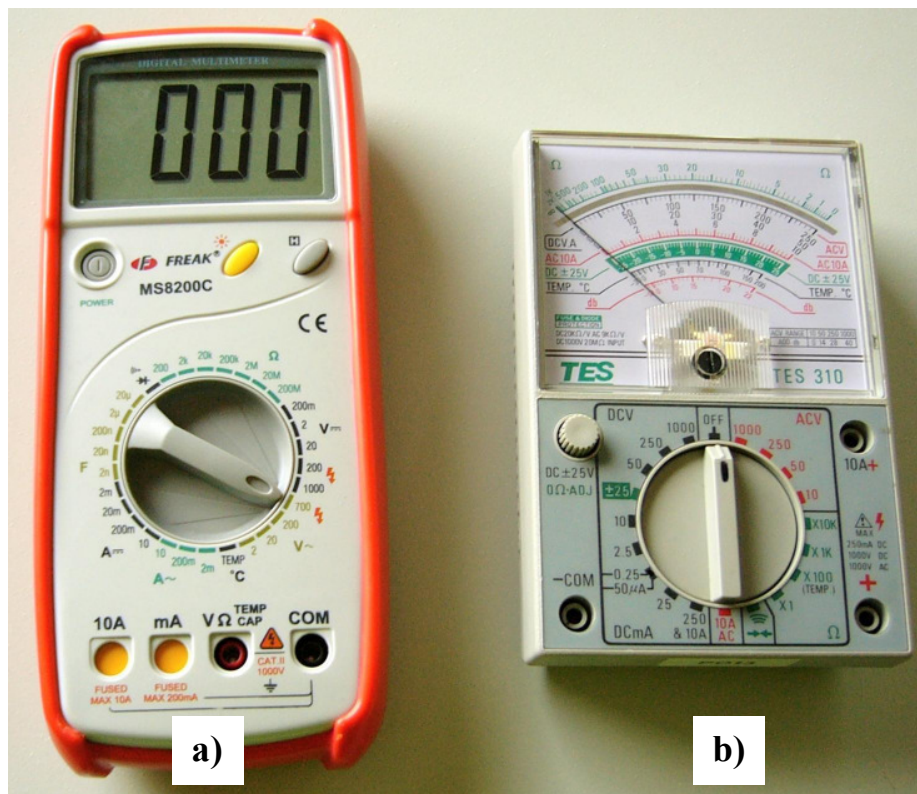


Fig. 1.18: Polímetros digital a) y analógico b)

Para la medida de resistencias se mide la caída de tensión producida en ellas por una corriente suministrada por un generador de intensidad constante. El valor de la corriente constante se modifica con cada escala, de manera que en el fondo de escala se obtiene el valor máximo de tensión del D.V.M.

Las medidas de tensiones y corrientes en c.a. se realiza convirtiéndolas en c.c. mediante un rectificador y se mide el valor medio de la corriente rectificada, a continuación se multiplica el valor obtenido por el *factor de forma* (relación valor eficaz / valor medio) correspondiente al tipo de señal (sinusoidal pura, sin distorsionar y sin componente continua).

6. - BIBLIOGRAFÍA

- [1] AVTGIS, COUGHLIN y LOOMOS. “Manual de laboratorio para circuitos eléctricos”. Marcombo. Barcelona. 1976.
- [2] CHACÓN. “Medidas eléctricas para ingenieros”. Publicaciones de la Universidad Pontificia de Comillas. Madrid. 2000.
- [3] DPTO. TECNICO DISTESA. “Manuales DISTESA: Medidas”. DISTESA. Madrid. 1976.
- [4] DUSHIN. “Basic metrology and electrical measurements”. Mir Publishers. Moscú. 1989.
- [5] FRAILE y GARCIA GUTIERREZ. “Prácticas de Electrotecnia”. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [6] GREGORY. “Instrumentación eléctrica y sistemas de medida”. Gustavo Gili. Barcelona. 1984.
- [7] KARCZ. “Fundamentos de metrología eléctrica (3 tomos)”. Marcombo. Barcelona. 1982.
- [8] Norma UNE-EN 60051-1 “Instrumentos de medida eléctricos con indicación analógica por acción directa y accesorios. Parte 1: Definiciones y requisitos generales a todas las partes”. AENOR. 2000.

- [9] Norma UNE-EN 60617-8. “Símbolos gráficos para esquemas. Parte 8: Aparatos de medida, lámparas y dispositivos de señalización”. 1997.
- [10] NUÑEZ. “Laboratorio de electricidad y magnetismo”. Urmo. Bilbao. 1972.
- [11] PALLAS ARENY. “Instrumentación electrónica básica”. Marcombo. Barcelona. 1987.
- [12] RUIZ VASSALLO, FRANCISCO. “Esquemas eléctricos y electrónicos”. Creaciones Copyright, S.L. Madrid. 2005.
- [13] SALAZAR. "Ingeniería eléctrica experimental". Marcombo. Barcelona. 1973.
- [14] STÖCKL y WINTERLING. “Técnica de las medidas eléctricas”. Labor. Barcelona. 1979.
- [15] THURIN. “Medidas eléctricas y electrónicas”. Paraninfo. Madrid. 1963.
- [16] WOLF. “Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio”. Prentice Hall. Méjico. 1988.

Capítulo 2:

MEDIDAS EN CORRIENTE ALTERNA

- 1. - INTRODUCCIÓN**
- 2. - MEDIDA DE INTENSIDADES**
- 3. - MEDIDA DE TENSIONES**
- 4. - MEDIDA DE POTENCIAS**
- 5. - MEDIDA DE FACTORES DE POTENCIA. FASÍMETROS**
- 6. - MEDIDA DE FRECUENCIAS. FRECUENCÍMETROS**
- 7. - MEDIDA DE IMPEDANCIAS, RESISTENCIAS,
REACTANCIAS, INDUCTANCIAS Y CAPACIDADES**
- 8. - MEDIDA DE RESISTENCIAS DE AISLAMIENTO.**
- 9. - EL OSCILOSCOPIO**
- 10. -CONTADORES DE ENERGÍA**
- 11. -BIBLIOGRAFÍA**

MEDIDAS EN CORRIENTE ALTERNA

1. - INTRODUCCIÓN

Este capítulo es continuación del anterior y en él se describen varios sistemas de medida de magnitudes de corriente alterna.

Así, aquí se trata de las medidas de tensiones, corrientes y potencias de c.a., así como, de la medida de impedancias, energías, frecuencias y factores de potencia.

En este capítulo también se muestra el uso del osciloscopio.

2. - MEDIDA DE INTENSIDADES

Para la medida de intensidades de corriente alterna se utilizan *amperímetros* cuyo sistema indicador acepte este tipo de corriente (véase el capítulo 1).

Para la medida de corrientes alternas elevadas se utilizan:

- Resistencias en paralelo (*shunts*) (Figs. 1.5, 1.6 y 2.3)
- *Transformadores de intensidad* (t.i.) conectados como se indica en la figura 2.1.

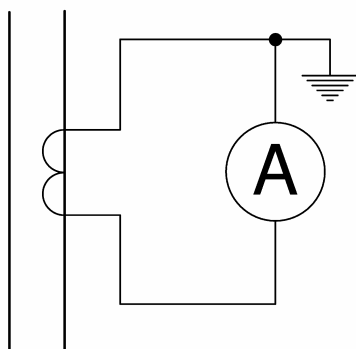


Fig. 2.1: Transformador de intensidad

Así, si se desea medir una intensidad de 500 A, se puede usar un amperímetro de escala 5 A y 0,1 Ohms de resistencia interna, junto con un shunt cuya constante m será de $500/5 = 100$ y cuya resistencia R_S se obtiene a partir de la relación (1.13):

$$R_S = \frac{R_A}{m - 1} = \frac{0,1}{100 - 1} = 10^{-3} \text{ Ohms}$$

Esta medida se puede realizar también con un amperímetro de 5 A y un transformador de intensidad de relación de transformación 500/5 A (es decir cuando circulen 500 A por el circuito, el transformador de intensidad suministra 5 A al amperímetro). Las lecturas que se realicen con este amperímetro habrá que multiplicarlas por 500/5 para obtener la intensidad medida.

La intensidad secundaria de los transformadores de intensidad (la que suministran al amperímetro) suele ser 5 ó 1 A.

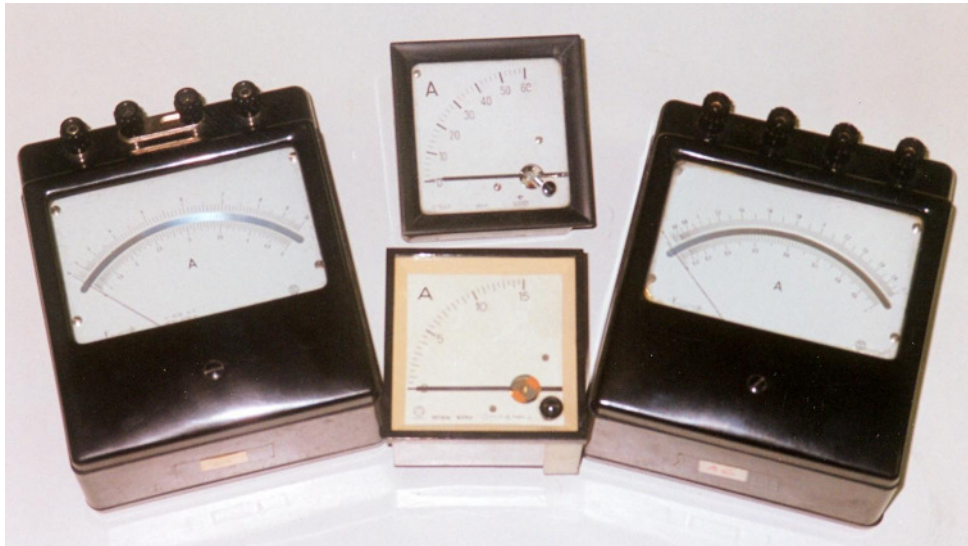


Fig. 2.2: Amperímetros analógicos



Fig. 2.3: Shunts

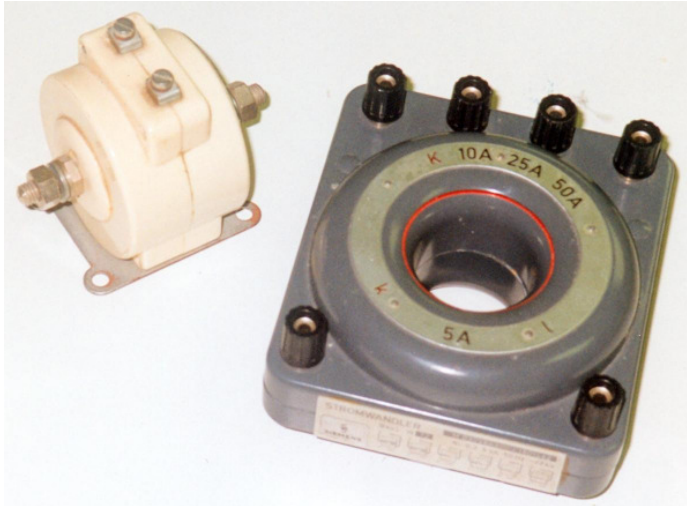


Fig. 2.4:
Transformadores
de intensidad



Fig. 2.5: *Tenazas*
amperimétricas

Con los transformadores de intensidad hay que tener cuidado de no dejar nunca el secundario abierto (es decir, desconectado), pues puede dar lugar a sobretensiones peligrosas.

La *tenaza amperimétrica* (Fig. 2.5) es un aparato que consta de un amperímetro y de un transformador de intensidad incorporado. Este t.i. está formado por un circuito magnético, que se puede abrir como una tenaza para abrazar un conductor, y un devanado secundario. Para medir una intensidad I con este aparato basta con abrazar con el circuito magnético a un conductor por donde circule la intensidad I y leer su valor en la escala del amperímetro.

3. - MEDIDA DE TENSIONES

Para la medida de tensiones alternas se utilizan *voltímetros* cuyo sistema indicador acepte este tipo de tensión (véase el capítulo 1). Si la tensión a medir es elevada se utilizan:

- *Resistencias multiplicadoras* (Fig. 1.10).
- *Transformadores de tensión* conectados según se indica en la Fig. 2.6.

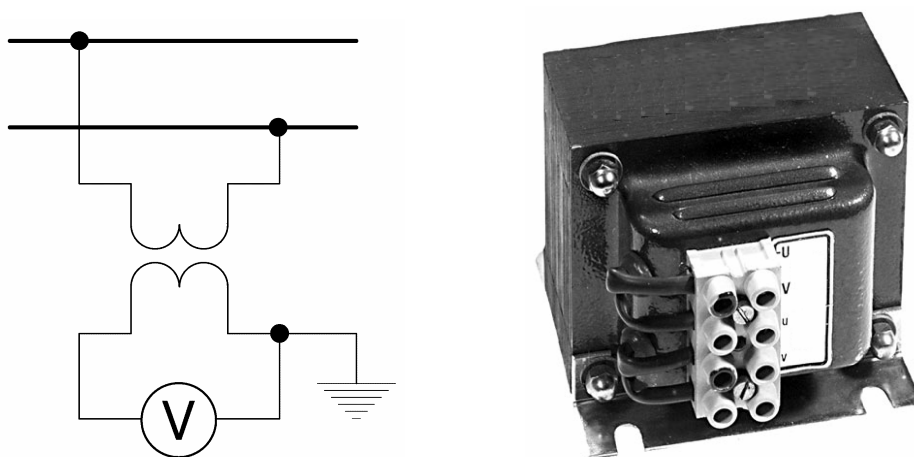


Fig. 2.6: Transformador de tensión

Así, si se desea medir una tensión de 10.000 V se puede emplear un voltímetro de 400 V y 15.000 ohms de resistencia interna junto con una resistencia multiplicadora de factor multiplicador m' igual a 25 (ya que $25 \times 400 \text{ V} = 10.000 \text{ V}$). El valor de esta resistencia se puede deducir de la ecuación (1.14):

$$R_R = R_V \cdot (m' - 1) = 15.000 \cdot (25 - 1) = 360.000 \text{ Ohms}$$

Alternativamente se puede utilizar un voltímetro de 110 V y un transformador de tensión de relación de transformación de 10.000/110 V (es decir, cuando el circuito está a 10.000 V, el transformador de tensión suministra 110 V al voltímetro). Las lecturas que se realicen con este voltímetro habrá que multiplicarlas por 10.000/110 para obtener el valor de la tensión medida.

La tensión nominal secundaria de los transformadores de tensión (la que se suministra al voltímetro) suele ser de 100 ó 110 V.

No es conveniente utilizar los transformadores de medida (tanto de tensión, como de intensidad) para medir magnitudes cuyos valores difieran mucho de los valores nominales del primario de estos transformadores, pues se pierde precisión en la medida.

Los transformadores de medida permiten aislar galvánicamente el circuito que se está midiendo de los aparatos de medida. De esta forma, los aparatos de medida se encuentran sometidos a una tensión respecto a tierra menos peligrosa y, por consiguiente, más segura para las personas que se acerquen a leer sus indicaciones.

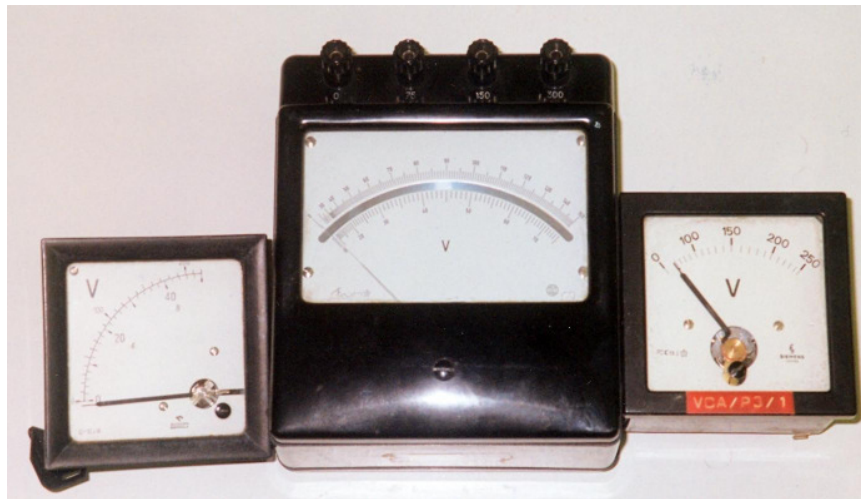


Fig. 2.7: Voltímetros analógicos

4. - MEDIDA DE POTENCIAS

4.1. - Circuitos de c.a. monofásicos

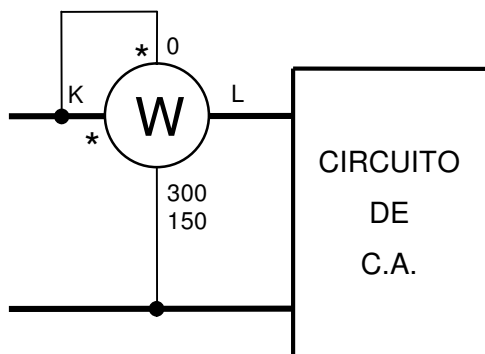


Fig. 2.8: Vatímetro monofásico

La medida de la potencia activa consumida por un circuito de c.a. monofásico se realiza mediante *vatímetros*.

Un vatímetro posee dos circuitos (Fig. 2.8): uno *voltimétrico*, conectado en paralelo con la tensión del circuito cuya potencia se mide, y otro *amperimétrico*, recorrido por la intensidad que

circula por el circuito cuya potencia se mide.

Al conectar el vatímetro es preciso tener cuidado con la *polaridad* de estos circuitos, la cual suele indicarse mediante un punto o un asterisco en uno de los bornes de cada circuito (véase la Fig. 2.8). Un vatímetro conectado como se muestra en la Fig. 2.8 indicará una potencia activa positiva cuando el circuito consume potencia y señalará una potencia negativa cuando el circuito genera potencia. En este último caso (potencia negativa), si el vatímetro es analógico, la aguja indicadora intentará moverse hacia atrás y no se puede realizar la lectura. Para medir esta potencia negativa en un vatímetro analógico, habrá que invertir las conexiones del circuito voltimétrico o las del circuito amperimétrico -pero no la de los dos a la vez- y dar signo negativo al resultado obtenido.

Para obtener la potencia activa que se está midiendo con este aparato hay que multiplicar la lectura por la *constante del vatímetro* K_W . Así, si se tiene un vatímetro que mide hasta 5 A y 300 V y su escala posee 500 divisiones, la constante K_W , por la que habrá que multiplicar el número de divisiones que se lean al realizar una medición, será:

$$K_W = \frac{1.500 \text{ W}}{500 \text{ div}} = 3 \text{ W/div}$$

pues la máxima potencia que puede medir este vatímetro es $300 \times 5 = 1.500 \text{ W}$.

Hay vatímetros especiales para medidas de cargas con bajos factores de potencia (Fig. 2.9b). En ellos hay que tener en cuenta su f.d.p. máximo a la hora de calcular su constante K_W . Por ejemplo, un vatímetro cuyo f.d.p. máximo sea 0,4, esté conectado a las tomas de 5 A y 250 V y su escala posea 125 divisiones puede medir hasta

$$5 \times 250 \times 0,4 = 500 \text{ W}$$

y su constante K_W vale

$$K_W = 500 / 125 = 4 \text{ W/div}$$

En caso de ser necesario, el circuito voltimétrico de un vatímetro puede estar conectado al circuito a través de un transformador de tensión y el circuito amperimétrico a través de un transformador de intensidad. En estos casos, hay que multiplicar la lectura obtenida por la constante del vatímetro (K_W) y por las relaciones de transformación de los transformadores de medida para obtener el valor de la potencia medida.

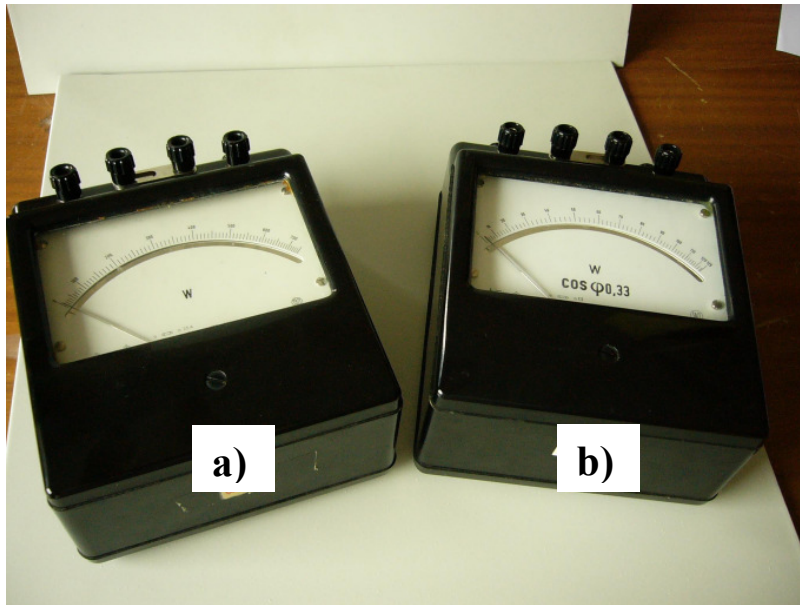


Fig. 2.9: Vatímetros

monofásicos analógicos:

a) Normal

b) Especial para bajos factores de potencia

4.2. - Circuitos de c.a. trifásicos

4.2.1. - Circuitos equilibrados

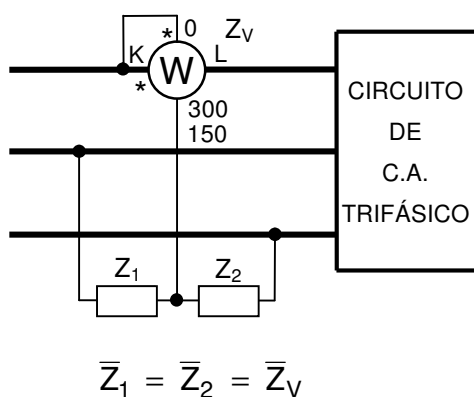


Fig. 2.10: Medida de potencia activa con un sólo vatímetro monofásico

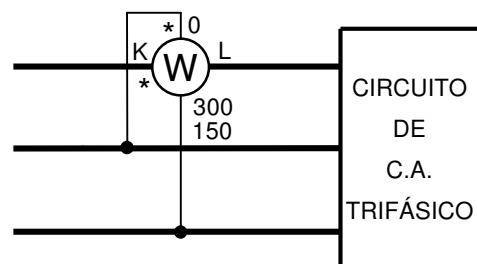


Fig. 2.11: Medida de potencia reactiva con un sólo vatímetro monofásico

En circuitos trifásicos *equilibrados*, tanto de 3 hilos (las 3 fases) como de 4 hilos (3 fases y neutro) se puede medir la potencia *activa* mediante un sólo vatímetro. Este vatímetro tiene su circuito amperimétrico conectado en serie con una fase de la red y su circuito voltimétrico conecta a la tensión entre esta fase y el neutro -en el caso de red de 3 hilos se forma un neutro artificial (véase la Fig. 2.10, donde Z_V es la impedancia del circuito voltimétrico del vatímetro)-. La potencia activa P consumida por la carga trifásica será igual al triple de la potencia P_1 medida por el vatímetro:

$$P = 3 \cdot P_1 \quad (2.1)$$

Para medir la potencia *reactiva* en circuitos *equilibrados* se puede usar un sólo vatímetro conectado como se indica en la figura 2.11. Si P_1 es la potencia medida por dicho vatímetro, la potencia reactiva Q consumida por la carga trifásica es igual a

$$Q = \sqrt{3} P_1 \quad (2.2)$$

4.2.2. - Circuitos de tres hilos

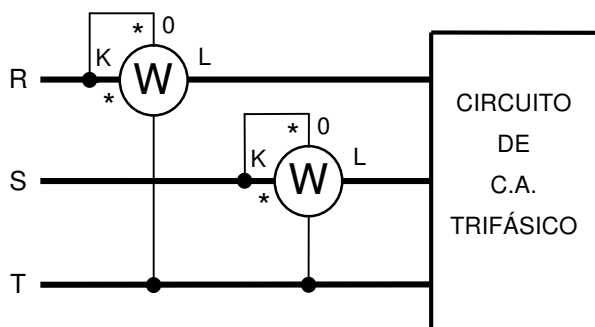


Fig. 2.12: Método de los dos vatímetros (*conexión Arón*)

En los sistemas desequilibrados de tres hilos el método de mayor interés es el de dos vatímetros monofásicos conectados como se indica en la Fig. 2.12, llamada *conexión Arón*.

Si la potencia que se quiere medir vale P y las potencias medidas por los vatímetros son P_1 y P_2 se verifica que

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.3)$$

Si el circuito es equilibrado, se verifica, además, que la potencia reactiva Q , absorbida por el circuito en el que se realiza la medición, vale

$$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2) \quad (2.4)$$

Se pueden medir las potencias P_1 y P_2 con un solo vatímetro si se introduce un *conmutador amperimétrico* (véase la figura 2.13).

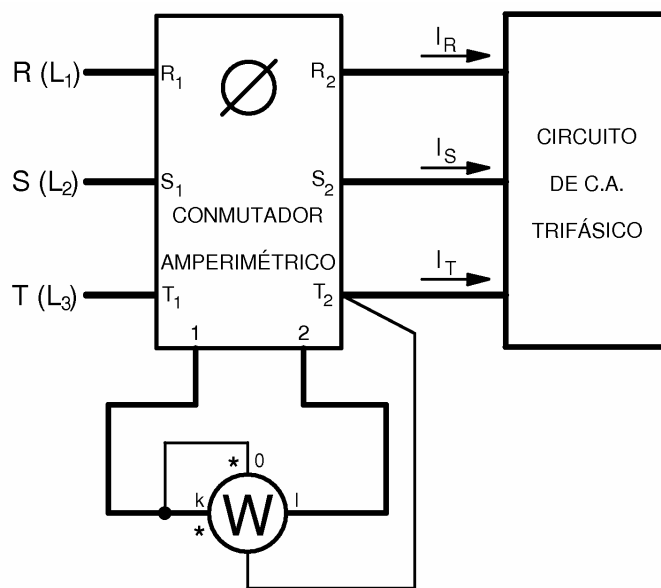


Fig. 2.13: Medida de potencia en circuitos trifásicos mediante un conmutador amperimétrico y un vatímetro monofásico

Cuando el mando del conmutador amperimétrico está en la posición R, el vatímetro está recorrido por la intensidad I_R y está sometido a la tensión V_{RT} , por lo que se mide la potencia P_1 . Cuando el mando del conmutador está en la posición S, el vatímetro está recorrido por la intensidad I_S y está sometido a la tensión V_{ST} , por lo que se mide la potencia P_2 .

Si al medir P_1 o P_2 mediante un vatímetro analógico la aguja indicadora se desvía en sentido inverso, esto se debe a que la potencia medida es negativa. Intercambiar entonces las conexiones del conmutador amperimétrico para la fase correspondiente -R para P_1 (pues en P_1 interviene la corriente I_R) y S para P_2 (pues en P_2 interviene la corriente I_S)- y la lectura que se realice habrá de afectarle de un signo -.

Existen *vatímetros trifásicos* que dan directamente el valor de la potencia activa P consumida por un sistema trifásico. Existen otros aparatos que proporcionan, además, el valor de la potencia reactiva Q (Fig. 2.15). Algunos de estos vatímetros sólo valen para medir potencia en cargas equilibradas (Fig. 2.14).

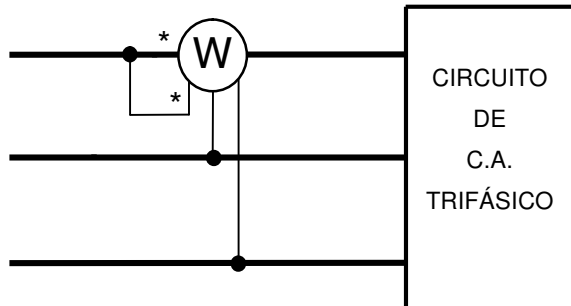


Fig. 2.14: Conexión de un vatímetro trifásico para cargas equilibradas



Fig. 2.15: Vatímetro-varmetro trifásico para cargas equilibradas

4.2.3. - Circuitos de cuatro hilos

En sistemas trifásicos desequilibrados de cuatro hilos, la potencia se mide mediante el *método de los tres vatímetros* (Fig. 2.16). Si P_1 , P_2 y P_3 son las potencias medidas por los tres vatímetros, la potencia activa consumida por el circuito trifásico vale

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2.5)$$

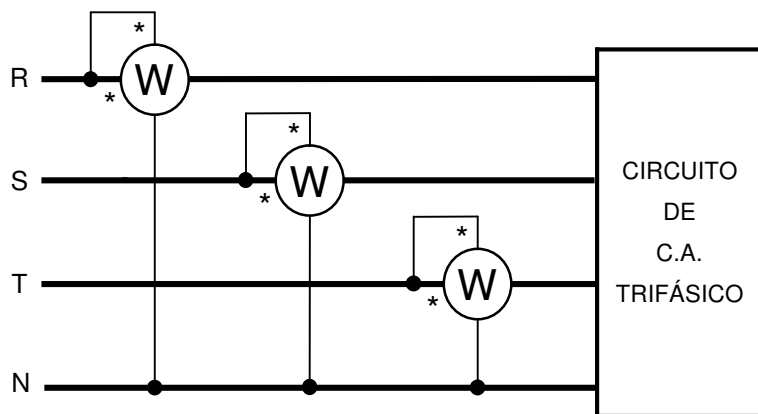


Fig. 2.16: Método de los tres vatímetros

5. - MEDIDA DE FACTORES DE POTENCIA. FASÍMETROS

5.1. - A partir de las potencias activa y reactiva

Este método es el mejor y es válido tanto para cargas monofásicas como trifásicas (equilibradas o desequilibradas).

El factor de potencia ($\cos \varphi$) se calcula a partir de P y Q mediante esta expresión:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.6)$$

5.2. - A partir de la potencia activa, la tensión y la corriente

En un circuito monofásico alimentado con la tensión V, recorrido por la corriente I y que consume la potencia activa P, su factor de potencia vale

$$\cos \varphi = \frac{P}{V I} \quad (2.7)$$

En un circuito trifásico equilibrado cuya tensión y corriente de línea son V_L e I_L , respectivamente, y que consume una potencia activa P, su factor de potencia es

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V_L I_L} \quad (2.8)$$

Este método no vale para circuitos trifásicos desequilibrados.

5.3. - Mediante fasímetros

Un *fasímetro* es un aparato de medida para medir factores de potencia y que tiene un aspecto muy similar a un vatímetro, ya que también consta de un circuito voltimétrico y de un circuito amperimétrico.

Para medir el factor de potencia en un circuito de c.a. monofásico se utiliza un fasímetro monofásico que se conecta de igual manera que el vatímetro (Fig. 2.8).

Para medir el factor de potencia en circuitos trifásicos equilibrados de 3 ó 4 hilos, se puede utilizar un sólo fasímetro monofásico, al igual como se indicó en la medida de la potencia activa (Fig. 2.10). Este fasímetro, por lo tanto, tiene su circuito amperimétrico en serie con una fase de la red y su circuito voltimétrico conectado entre esta fase y el neutro (neutro artificial si el circuito es a 3 hilos).

También existen fasímetros trifásicos para medir el factor de potencia en circuitos trifásicos, tanto equilibrados como desequilibrados.

6. - MEDIDA DE FRECUENCIAS. FRECUENCÍMETROS

La medida de la frecuencia de una tensión se realiza mediante un *frecuencímetro*, el cual se conecta en paralelo con la tensión (Fig. 2.17), al igual que un voltímetro.

Los frecuencímetros *analógicos* pueden ser de aguja o de láminas vibrantes. En el primer tipo, una aguja sobre una escala graduada indica el valor de la frecuencia medida. En el segundo tipo, hay una línea de láminas que se ven de canto, unas a continuación de otras (Fig. 2.18). La/s

lámina/s que se ven vibrar indican la frecuencia que se está midiendo. También existen frecuencímetros *digitales*.

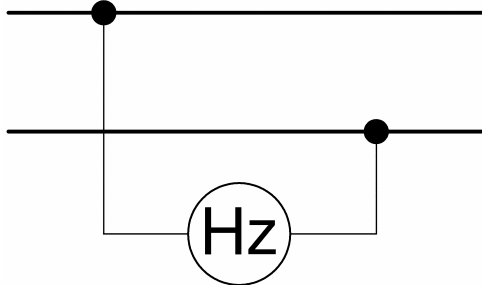


Fig. 2.17: Conexión de un frecuencímetro

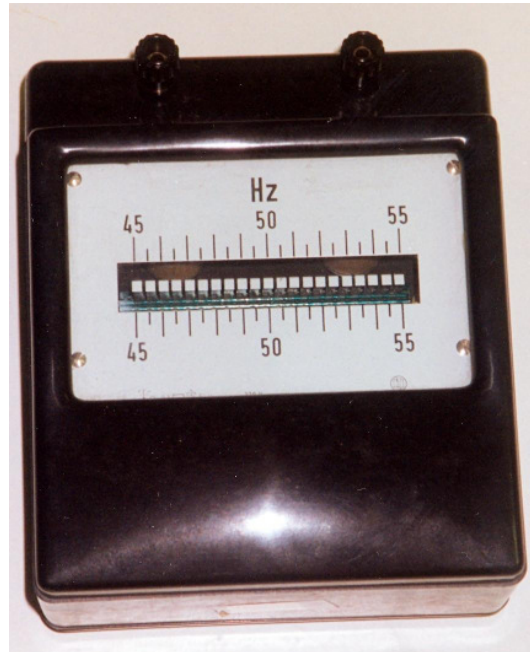


Fig. 2.18: Frecuencímetro de láminas vibrantes

7. - MEDIDA DE IMPEDANCIAS, RESISTENCIAS, REACTANCIAS, INDUCTANCIAS Y CAPACIDADES

La medida de una *impedancia* se puede realizar alimentándola con c.a., midiendo la corriente I que circula por ella y su tensión en bornes V mediante un voltímetro y un amperímetro, respectivamente, y aplicando la ley de Ohm

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.9)$$

Por lo tanto, este método es similar al explicado en el capítulo 1 para la medida de resistencias con un amperímetro y un voltímetro; con la diferencia que para la medida de impedancias se utiliza c.a. mientras que para las resistencias se utiliza c.c.

Una *resistencia* se puede medir siguiendo los procedimientos explicados en el capítulo 1: con un amperímetro y un voltímetro, con un óhmetro o con un puente (Fig. 2.19).



Fig. 2.19: Puente de Wheatstone

Si se conocen la corriente I y la potencia activa P de la carga, su resistencia R se puede obtener por medio de esta expresión

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (2.10)$$

Si se conocen la tensión V , la corriente I y el factor de potencia ($\cos \varphi$) de la carga, su resistencia se puede obtener así:

$$R = Z \cos \varphi = \frac{V}{I} \cos \varphi \quad (2.11)$$

La *reactancia* X de una carga se puede medir si se conocen su tensión V , su corriente I y su potencia activa P (o su factor de potencia $\cos \varphi$). Primero se calculan su impedancia Z y su resistencia R como se ha indicado más arriba y luego se aplica la relación

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (2.12)$$

Es evidente, pues que para calcular los valores Z , R y X de una carga basta con medir su tensión V , su corriente I y su potencia activa P mediante un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro, respectivamente, y luego aplicar las relaciones 2.9, 2.10 y 2.12. Existen dos formas de conectar estos aparatos de medida, la representada en la figura 2.20a es mejor para medir cargas de impedancia grande y la representada en la figura 2.20b es mejor para cargas de baja impedancia.

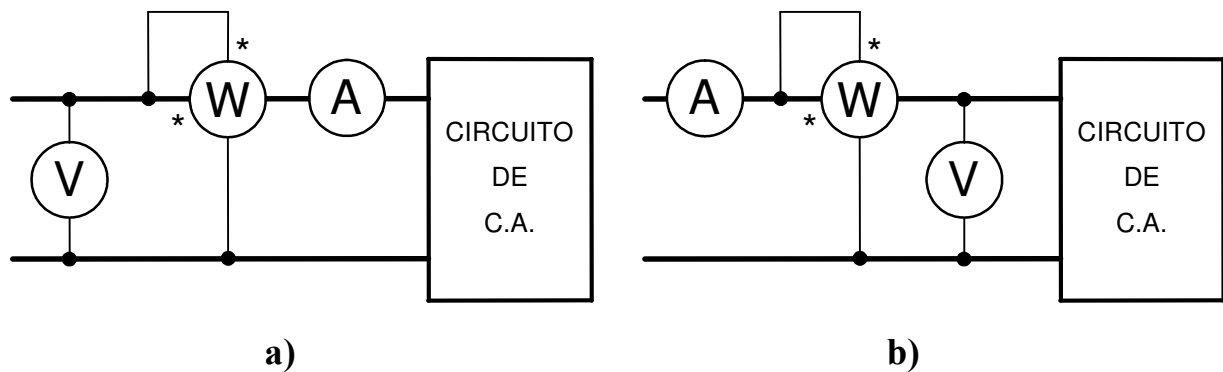


Fig. 2.20: Método técnico de c.a. para la medida de Z , R y X

En cargas cuya reactancia sea puramente inductiva o capacitiva, su *inductancia* L o su *capacidad* C se pueden calcular a partir de su reactancia X y de la frecuencia f :

$$L = \frac{X}{2 \pi f} \quad (2.13)$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f X} \quad (2.14)$$

Existen aparatos de medida especiales para medir inductancias (puentes de Maxwell, de Maxwell-Wien, de Owen, de Hay, de Carey-Foster, ...) y capacidades (puentes de Sauty, de Wien, de Nernst, de resonancia, de Schering, ...).

Cuando se miden capacidades con estos aparatos, normalmente también se mide su *factor de pérdidas* $\tan \delta$. Este parámetro se introduce por el hecho de que en un condensador sometido a una tensión alterna aparecen unas pérdidas (es decir, el consumo de potencia activa) debidas al fenómeno de la histéresis dieléctrica. En consecuencia, en un condensador real el desfase ϕ entre tensión y corriente es inferior a 90° (Fig. 2.21). Según se aprecia en la Fig. 2.21 *ángulo de pérdidas* δ es igual a

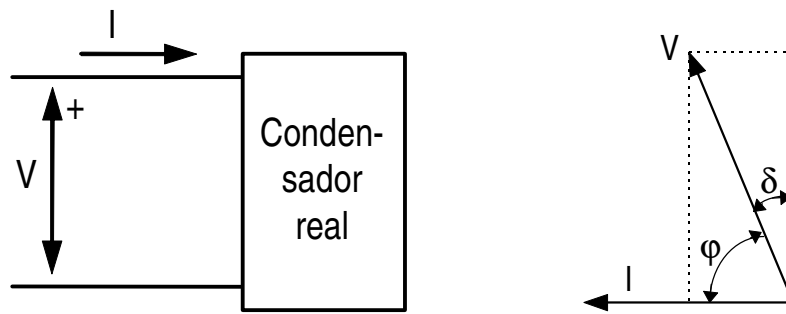


Fig. 2.21: Factor de pérdidas ($\tan \delta$) de un condensador real

$$\delta = 90^\circ - \varphi \quad (2.15)$$

8. – MEDIDA DE RESISTENCIAS DE AISLAMIENTO

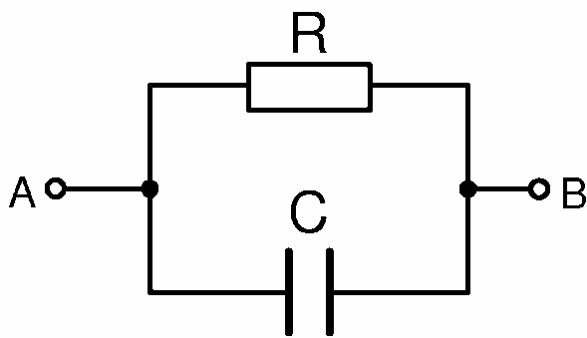


Fig. 2.22: Circuito equivalente de un aislante

Los materiales aislantes presentan una resistencia elevada, pero no infinita, al paso de la corriente. Por otra parte, dos conductores separados por un dieléctrico constituyen un condensador. Por todo ello, dos conductores, A y B, separados por un material aislante equivalen al circuito de la Fig. 2.22¹, donde R es la *resistencia de aislamiento* y C es la capacidad del conjunto. Los valores de R y de C no permanecen constantes, pues varían con la temperatura, con la humedad y con la frecuencia y la tensión a la que está sometido el dieléctrico. Además, los materiales aislantes presentan un proceso de envejecimiento que origina una degradación de sus propiedades dieléctricas con el transcurso del tiempo.

Para medir la resistencia de aislamiento entre dos conductores separados por un aislante se utiliza un *megóhmetro o megger*. Este aparato posee una fuente de corriente continua (c.c.) (en algunos modelos es una dinamo incorporada al aparato y accionada a mano mediante una manivela (Fig. 2.24)) que produce una tensión de al menos 500 V. Dicha tensión se aplica entre los dos

¹ En la Fig. 2.22 no se han tenido en cuenta las *pérdidas dieléctricas* que se producen cuando el material aislante se ve sometido a un campo eléctrico variable con el tiempo y que se representarían mediante una nueva resistencia conectada en serie con el condensador C. Si entre A y B se aplica c.c. (como cuando se utiliza un megóhmetro) la única resistencia que interviene es la resistencia de aislamiento.

conductores que están aislados por el dieléctrico cuya resistencia de aislamiento R se quiere medir. Al aplicar la tensión se produce el paso de una corriente I a través del aislante de valor

$$I = \frac{V}{R}$$

El megóhmetro dispone de un amperímetro que mide la intensidad I , pero en su escala expresa directamente el valor de la resistencia de aislamiento R . En efecto, dado que la tensión V generada por la fuente de c.c. permanece constante, la corriente y la resistencia son inversamente proporcionales y se puede graduar la escala para que indique la resistencia que corresponde a cada valor de la corriente.



Fig. 2.23: Megóhmetro digital



Fig. 2.24: Megóhmetro analógico

En los aparatos eléctricos se comprueba la resistencia de aislamiento entre los elementos que van a estar sometidos a tensión y entre ellos y la carcasa del aparato. Naturalmente, estas medidas se realizan con el aparato desconectado de la red.

Se suele exigir una resistencia de aislamiento mínima de un megaohmio para las máquinas eléctricas con tensiones nominales de hasta 1000 V.

La Fig. 2.22 muestra que si entre los conductores A y B se establece una tensión continua, el condensador C queda cargado. Por ello, es conveniente cortocircuitar los conductores A y B entre los que se había conectado el megóhmetro y descargar así las cargas eléctricas almacenadas en el condensador C durante la medición.

9. - EL OSCILOSCOPIO

El osciloscopio es un instrumento que permite visualizar en una pantalla la forma de la tensión aplicada al aparato, así como medir su magnitud y su frecuencia (Fig. 2.25). Existen osciloscopios *analógicos* y *digitales*.

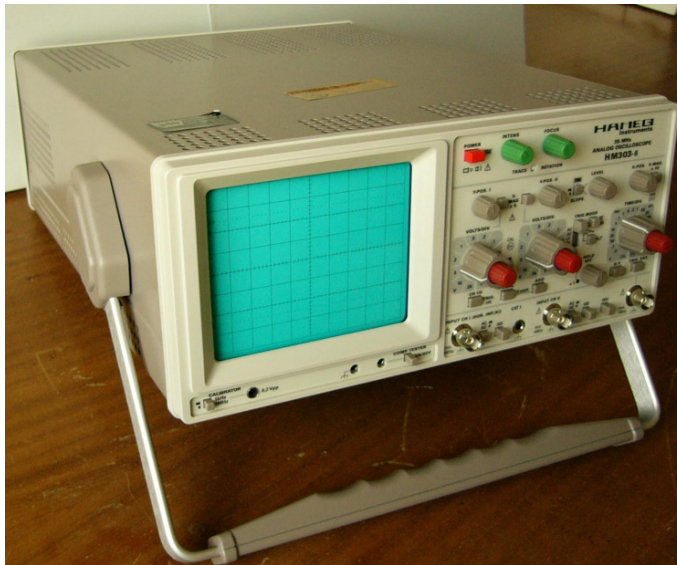


Fig. 2.25: Osciloscopio analógico

La pantalla de un osciloscopio está dividida en cuadrículas que permiten medir el periodo y la magnitud de la tensión a la que está conectado.

Un mando permite escoger la escala vertical adecuada: 20 v/div, 10 v/div. y otro permite escoger la escala horizontal: 500 ms/div, 100 ms/div.

La *sonda* es el accesorio por medio del cuál se conecta la tensión a medir al osciloscopio. A veces se utilizan *sondas atenuadoras* que suministran al osciloscopio, no la tensión a medir, sino una fracción de ésta. Así, una sonda con atenuación 1/10 suministra al osciloscopio una onda de tensión de igual forma que la que hay en bornes de la sonda, pero con su amplitud reducida a la décima parte. Hay que tener en cuenta la atenuación que introduce la sonda cuando se miden tensiones mediante un osciloscopio.

Aunque un osciloscopio está preparado para visualizar tensiones también se puede utilizar para medir y visualizar corrientes. Para ello se hace pasar la corriente por un shunt de resistencia conocida y se visualiza en el osciloscopio la caída de tensión en bornes del shunt.

Existen *osciloscopios de doble haz* que permiten visualizar simultáneamente la forma de dos tensiones diferentes. Por lo tanto, disponen de dos mandos para las escalas verticales, uno para cada tensión. En estos osciloscopios es posible medir también el ángulo de desfase entre las dos ondas de tensión.

10. - CONTADORES DE ENERGÍA

Como es sabido, en esta sociedad es necesario medir la cantidad de energía suministrada con el fin de poder facturar el importe de la misma. Es decir, por un lado se necesita un sistema que permita contabilizar la energía y, por otro, un sistema que permita facturar según el precio de las tarifas vigentes.

Para medir la energía eléctrica se utilizan contadores de energía eléctrica, auxiliados en algunos casos por relojes e indicadores o registradores de máxima potencia.

La energía es el producto de la potencia por el tiempo; luego un contador de energía no es más que un dispositivo capaz de medir la potencia y el tiempo simultáneamente. Aquí vamos a tratar de los contadores más utilizados que son los de corriente alterna.

En la Fig. 2.27 se puede observar de forma esquemática los elementos que componen un contador de energía *analógico de inducción* (véanse también las Figs. 2.26 y 2.29). Básicamente consta de dos electroimanes, uno conectado a la tensión (V), el cual genera un flujo magnético proporcional a la tensión aplicada, y el otro, conectado en serie con la carga, es atravesado por la intensidad (I) generando un flujo proporcional a dicha intensidad. Estos dos flujos inducen f.e.m.s en un disco de aluminio, lo que origina unas corrientes de Foucault en él. La interacción de estas corrientes con los flujos que las originan da lugar a un par mecánico que provoca un movimiento de rotación del disco sobre el eje.

Se dispone de un imán permanente de manera que al girar el disco crea en él otras corrientes de Foucault, provocando un frenado proporcional a la velocidad de giro. Este frenado sirve para amortiguar las oscilaciones del disco.

En la actualidad se está generalizando el uso de contadores *digitales*. Estos instrumentos pueden incorporar un sistema de teledistribución que envía información en tiempo real del consumo de un cliente a la compañía suministradora de energía eléctrica. Estos contadores también permiten un fácil control del consumo por franjas horarias, la determinación de la máxima potencia demandada en un período, etc.

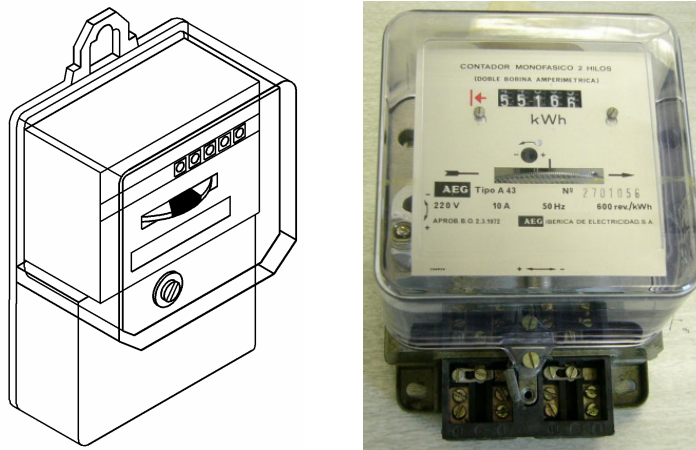


Fig. 2.26: Contador de energía eléctrica de inducción

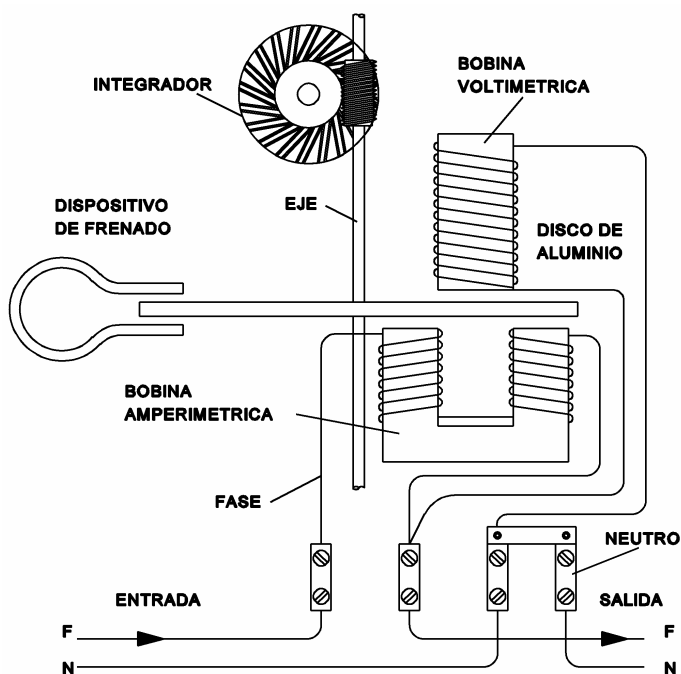


Fig. 2.27: Circuito eléctrico de un contador de inducción

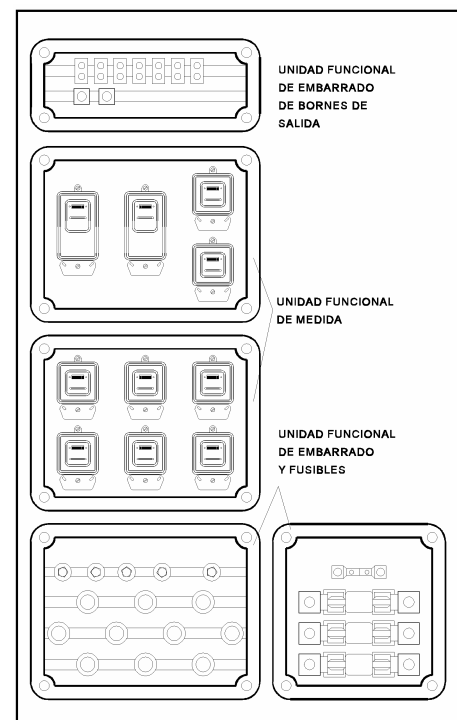


Fig. 2.28: Centralización de contadores para un bloque de viviendas



Fig. 2.29: Interior de un contador de energía eléctrica de inducción

11. - BIBLIOGRAFÍA

- [1] AVTGIS, COUGHLIN y LOOMOS. “Manual de laboratorio para circuitos eléctricos”. Marcombo. Barcelona. 1976.
- [2] CHACÓN. “Medidas eléctricas para ingenieros”. Publicaciones de la Universidad Pontificia de Comillas. Madrid. 2000.
- [3] DPTO. TECNICO DISTESA. “Manuales DISTESA: Medidas”. DISTESA. Madrid. 1976.
- [4] FRAILE y GARCIA GUTIERREZ. “Prácticas de Electrotecnia”. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [5] GREGORY. “Instrumentación eléctrica y sistemas de medida”. Gustavo Gili. Barcelona. 1984.
- [6] KARCZ. “Fundamentos de metrología eléctrica (3 tomos)”. Marcombo. Barcelona. 1982.
- [7] Norma UNE-EN 60617-8. “Símbolos gráficos para esquemas. Parte 8: Aparatos de medida, lámparas y dispositivos de señalización”. 1997.
- [8] NUÑEZ. “Laboratorio de electricidad y magnetismo”. Urmo. Bilbao. 1972.
- [9] RUIZ VASSALLO, FRANCISCO. “Esquemas eléctricos y electrónicos”. Creaciones Copyright, S.L. Madrid. 2005.
- [10] PALLAS ARENY. “Instrumentación electrónica básica”. Marcombo. Barcelona. 1987.
- [11] RUIZ VASALLO. “Manual del osciloscopio”. CEAC. Barcelona. 1979.
- [12] STÖCKL y WINTERLING. “Técnica de las medidas eléctricas”. Labor. Barcelona. 1979.
- [13] THURIN. “Medidas eléctricas y electrónicas”. Paraninfo. Madrid. 1963.
- [14] WOLF. “Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio”. Prentice Hall. Méjico. 1988.

Capítulo 3:

APARAMENTA DE MANIOBRA, CONTROL Y PROTECCIÓN. AUTOMATISMOS

- 1. – INTRODUCCIÓN**
- 2. – EFECTOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL CUERPO HUMANO**
- 3. – PROTECCIÓN DIFERENCIAL**
- 4. – PROTECCIÓN MAGNETOTÉRMICA**
- 5. – FUSIBLES**
- 6. – CONTACTORES Y RELÉS**
- 7. – PULSADORES**
- 8. – EJEMPLOS DE AUTOMATISMOS CON CONTACTORES Y RELÉS**
- 9. – BIBLIOGRAFÍA**

APARAMENTA DE MANIOBRA, CONTROL Y PROTECCIÓN. AUTOMATISMOS

1. - INTRODUCCIÓN

Se denomina *aparamenta* al conjunto de aparatos de maniobra, de regulación y control, de medida y de canalización empleados en las instalaciones eléctricas.

Este capítulo comienza con el estudio de la aparamenta de protección contra corrientes de defecto y contra sobreintensidades en instalaciones de Baja Tensión.

Seguidamente se analiza la aparamenta de maniobra y de control en Baja Tensión mediante contactores y relés para conseguir automatismos. Este estudio se complementará con el siguiente capítulo dedicado a los autómatas programables.

2. - EFECTOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL CUERPO HUMANO

Uno de los pilares básicos de la utilización racional de la electricidad consiste en garantizar la seguridad de las personas ante los posibles riesgos que pudieran derivar del funcionamiento anómalo de las instalaciones y receptores eléctricos.

La intensidad de la corriente es básicamente el parámetro determinante de los efectos fisiológicos que produce el paso de la electricidad a través del cuerpo humano:

- 1º. - 0,5 mA: *Umbral de percepción*; que es el valor mínimo de la intensidad, a partir del cual un individuo es capaz de percibir el paso de corriente a su través.
- 2º. - 10 mA: *Tetanización muscular*; que consiste en la contracción involuntaria de los músculos de las extremidades. Esto impide al afectado soltar el elemento en tensión, pudiendo extenderse a los músculos de la caja torácica y llegar a provocar asfixia para valores crecientes de la intensidad (30 mA).

- 3°. - 40 mA: *Fibrilación ventricular* y que supone la supresión de la actividad normal del corazón y que, si es prolongado, produce lesiones cerebrales graves e incluso parada cardiorespiratoria. El valor de la corriente capaz de provocar este efecto depende del tiempo que esté actuando sobre la persona. Para duraciones de 10 milisegundos debe ser una corriente no inferior a 500 ms, pero para 3 segundos basta con una corriente de 40 mA (en el caso de corrientes alternas de 50 ó 60 Hz).

3. - PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Las protecciones diferenciales o *dispositivos de corriente residual (DDR)* protegen a los circuitos eléctricos de las corrientes de defecto a tierra.

Considérese el circuito de c.a. monofásica de la Fig. 3.1, donde A representa una carga cualquiera: un motor, una impedancia, etc. y FI representa a la protección diferencial. La línea entre el interruptor y el diferencial indica que el diferencial puede abrir el interruptor. Si el circuito no tiene corriente de defecto a tierra (ni corriente de fuga (ver más abajo)), en un instante dado la intensidad que entra al circuito (i_1) es igual a la intensidad que sale ($-i_2$). Por lo tanto, la suma de intensidades que entran al diferencial es cero ($i_1 = -i_2$; $i_1 + i_2 = 0$) y la protección diferencial no manda abrir el interruptor.

Si se supone ahora que una persona accidentalmente toca uno de los conductores que alimentan la carga A (véase la Fig. 3.2), se producirá una corriente de defecto a tierra i_d a través de ella. La persona actúa en éste caso como una impedancia conectada a la tensión que hay entre el conductor considerado y la tierra. De la Fig. 3.2 se deduce que:

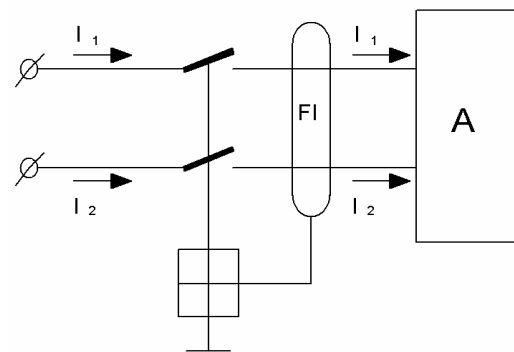


Fig. 3.1: Conexión de la protección diferencial

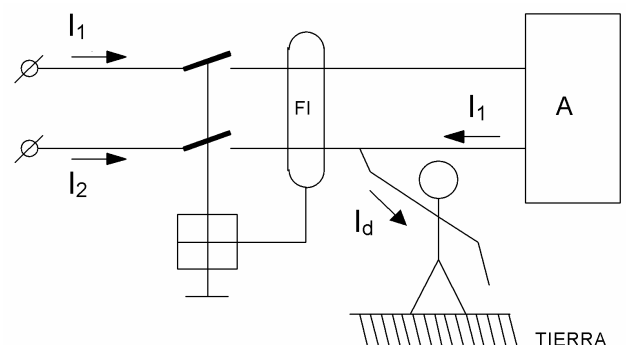


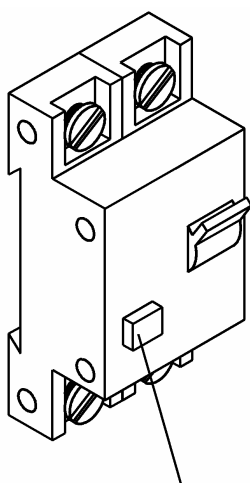
Fig. 3.2: Actuación de una protección diferencial cuando hay una corriente de defecto

$$i_1 + i_2 = i_d$$

Si i_d es mayor a la sensibilidad $I_{\Delta n}$ de la protección diferencial, ésta actuará abriendo el interruptor y protegiendo así a la persona que se estaba electrocutando.



Fig. 3.3: Interruptores diferenciales



BOTÓN DE PRUEBA

Fig. 3.4: Interruptor diferencial

Realmente lo que activa al diferencial es la *corriente diferencial residual* I_{Δ} , que es el valor eficaz de la suma vectorial de las corrientes de todos los conductores activos. I_{Δ} generalmente es superior a I_d debido a la *corriente de fuga* I_f que, en ausencia de defecto, puede circular a tierra a través de algunos elementos del circuito o de las capacidades que presentan sus aislantes con respecto a tierra. En las Figs. 3.1, 3.2 y 3.5 se ha considerado que la corriente de fuga es despreciable.

La protección diferencial protege también de electrocución cuando el contacto de una persona con una fase se produce de forma indirecta. En efecto, supóngase un aparato eléctrico de carcasa metálica (por ejemplo, una lavadora) en el cual ha fallado el aislamiento de una fase con el resultado de que un conductor a tensión ha quedado tocando la carcasa. En este caso una persona que toque la carcasa del aparato (lo que en condiciones normales no debería representar

ningún peligro) podría electrocutarse. Si la carcasa del aparato está conectada a tierra, bien directamente (lo que es recomendable) o bien por estar en contacto con el suelo, puede empezar a circular una corriente de defecto sin necesidad de que nadie la toque. Si esta corriente de defecto supera la sensibilidad de la protección la hará actuar, previniendo así el contacto de personas con elementos puestos a tensión accidentalmente, aún antes de que este contacto se produzca. De esta manera también se reduce el riesgo de incendio debido al efecto térmico de la corriente de defecto.

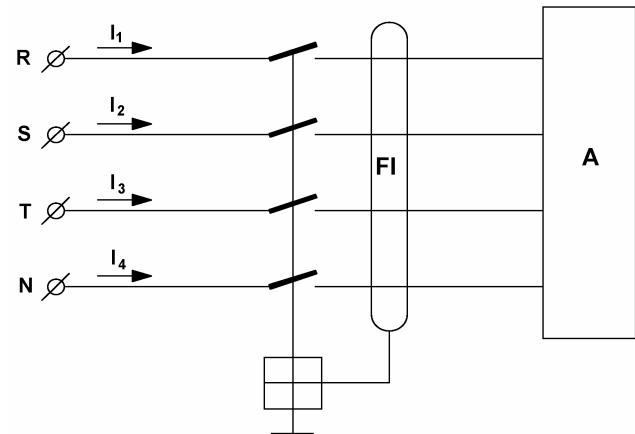


Fig. 3.5: Protección diferencial de un circuito trifásico

El mismo principio que se ha explicado para circuitos monofásicos se puede aplicar a circuitos trifásicos (con o

sin neutro). En la Fig. 3.5 se representa una protección diferencial de un circuito trifásico de 4 hilos (con neutro). Si las intensidades que entran a la protección diferencial suman cero ($i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$) ésta no actúa, pero si no es así esta protección abrirá el interruptor, cortando el suministro de energía eléctrica a la carga A.



Fig. 3.6: Transformador diferencial

Los interruptores diferenciales pueden contener todos sus elementos dentro del mismo aparato (Figs. 3.3 y 3.4) o utilizar un transformador diferencial externo (Fig. 3.6).

4. - PROTECCIÓN MAGNETOTÉRMICA

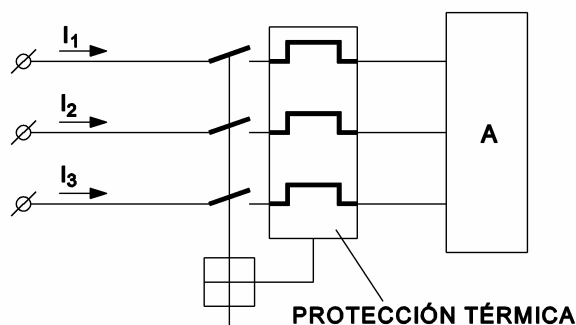


Fig. 3.7: Conexión de una protección térmica

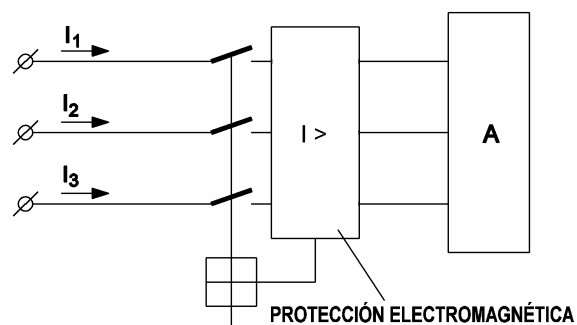


Fig. 3.8: Conexión de una protección electromagnética

Las protecciones magnetotérmicas sirven para proteger los circuitos contra las *sobreintensidades*, es decir contra corrientes superiores a su valor asignado. Las sobreintensidades pueden ser sobrecargas o cortocircuitos.

Si el aumento de la corriente es algo mayor que la asignada -por ejemplo, porque se obligue a un motor a proporcionar un par superior al asignado- se tiene una *sobrecarga*. Un circuito puede soportar una sobrecarga durante cierto tiempo sin sufrir daños y si ésta cesa antes de que pase este tiempo, no es preciso que actúe ninguna protección.

Si el aumento de la corriente es debido al contacto entre dos partes a distinta tensión o entre partes activas y masa o tierra se tiene un *cortocircuito*. Normalmente un cortocircuito produce una intensidad muy elevada que hay que interrumpir lo más rápidamente posible.

La *protección térmica* (Fig. 3.7) protege a los circuitos de sobrecargas. Esta protección abre el interruptor cuando la intensidad absorbida por la carga A es superior a la intensidad para la que está calibrada la protección. El tiempo que transcurre entre que se produce la sobreintensidad y el instante en que la protección actúa es mayor cuanto menor es la sobreintensidad. Si la sobreintensidad cesa antes de que haya actuado la protección, ésta ya no abrirá el interruptor.

La *protección electromagnética* (Fig. 3.8) protege a los circuitos de los cortocircuitos. Esta protección abre instantáneamente (sin ningún retraso introducido adrede) el interruptor en el momento que la intensidad supere el valor a la que está calibrada la protección.

Es frecuente que ambas protecciones estén agrupadas formando un único aparato de *protección magnetotérmica*. Para sobreintensidades moderadas actúa la protección térmica y para sobreintensidades elevadas actúa la protección electromagnética. Si además de la protección el mismo aparato incorpora también el interruptor que abre el circuito, se tendrá un *interruptor automático magnetotérmico*.

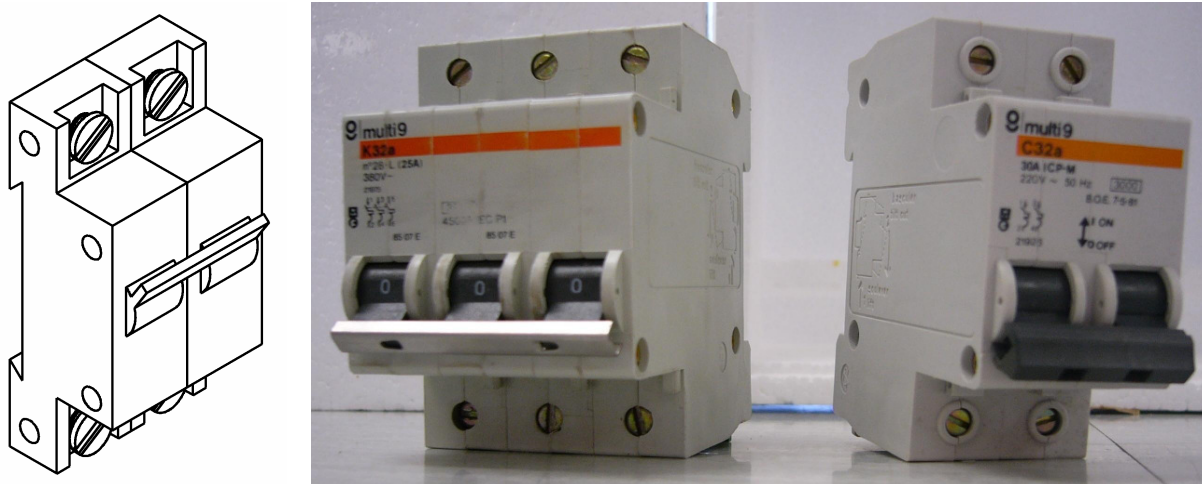


Fig. 3.9: Interruptores automáticos de B.T. modulares

En baja tensión y para intensidades nominales no superiores a 125 A se suelen utilizar interruptores automáticos *modulares* (Fig. 3.9), los cuáles se colocan sobre carril DIN y tienen una anchura múltiplo de 9 mm. Estas protecciones se denominan *PIAs (Pequeños Interruptores Automáticos)*. Cuando uno de estos interruptores se utiliza para limitar la máxima potencia (limitando la máxima corriente) que puede consumir una instalación de acuerdo con el contrato establecido con la compañía eléctrica, se lo denomina *ICP (Interruptor de Control de Potencia)*.

También existen interruptores automáticos de *caja moldeada* (Fig. 3.10) que se suelen utilizar para intensidades superiores a 125 A.

En la Fig. 3.11 se muestran dos símbolos utilizados para representar un interruptor automático tetrapolar.



Fig. 3.10: Interrupor automático de B.T. tetrapolar en caja moldeada

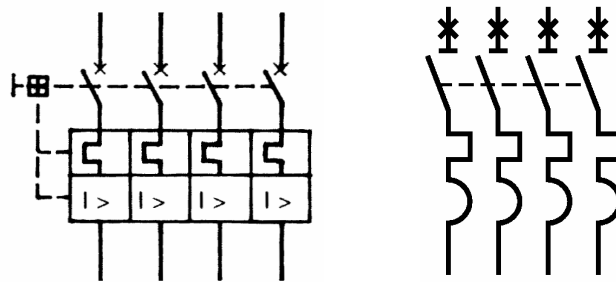


Fig. 3.11: Símbolos de un interruptor automático tetrapolar

5. - FUSIBLES

Un cortacircuitos fusible es otra protección contra sobrecorrientes basada en la fusión de un conductor cuando la corriente que lo recorre es superior a un cierto valor.

Según la norma UNE-EN 60617-7, el símbolo general para un fusible es el indicado en la Fig. 3.12.



Fig. 3.12: Símbolo general de un cortacircuitos fusible.

Actualmente los fusibles se presentan en forma de cartuchos que se colocan sobre una base soporte adecuada y que deben ser sustituidos tras su fusión. Suelen disponer de un elemento indicador de su estado (si están fundidos o no).



Fig. 3.13: Fusibles de cuchillas (NH).

- a) Cartucho fusible.
- b) Base portafusibles con el cartucho fusible fundido, lo cual queda señalizado mediante un indicador de color.



Fig. 3.14: Diversos tipos de cartucho fusible:

- En el centro se muestra un cartucho cilíndrico roto con el hilo fusible. Su interior está relleno de arena, la cual ayuda a la extinción del arco que se forma cuando se produce su fusión.
- En los cartuchos laterales (del tipo D) se puede apreciar como en el centro de la base hay un botón de color que se caerá cuando el fusible se funda.

6. - CONTACTORES Y RELÉS

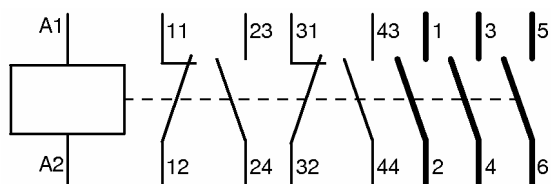


Fig. 3.15: *Contactor tripolar*

En la Fig. 3.15 aparece el símbolo de un *contactor*. Entre los bornes A1 y A2, está conectada la bobina de un electroimán. Entre los bornes 11 y 12 hay un contacto *normalmente cerrado (n.c.)*, es decir, que cuando el contactor está en reposo (es el estado

en que se presenta a un contactor en todos los planos) los bornes 11 y 12 están conectados. Entre los bornes 23 y 24 hay un contacto *normalmente abierto (n.a.)*, es decir los bornes 23 y 24 están desconectados cuando el contactor está en reposo. También hay un contacto n.c. entre los bornes 31 y 32 y contactos n.a. entre los pares de bornes 43-44, 1-2, 3-4 y 5-6.

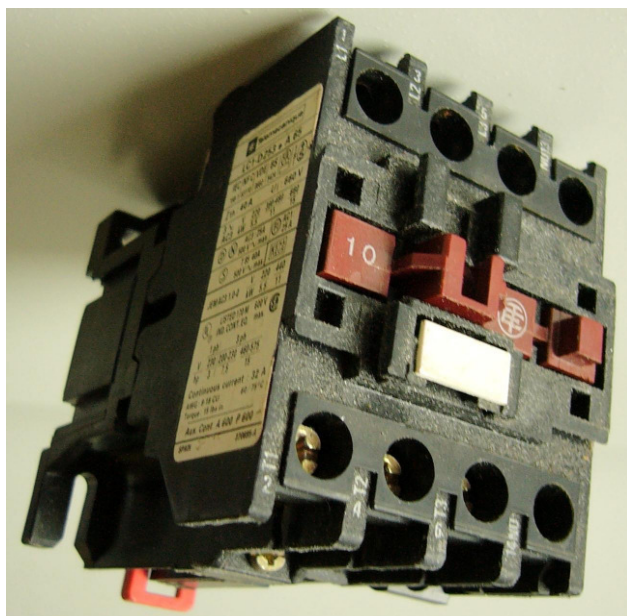


Fig. 3.16: *Contactor*

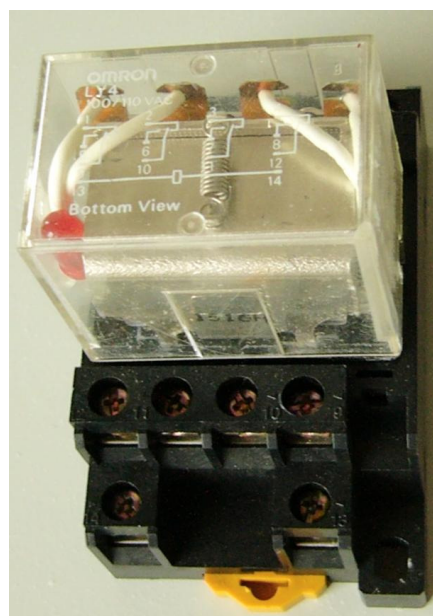


Fig. 3.17: *Relé auxiliar*

Un contactor actúa como un interruptor gobernado por la tensión aplicada a un electroimán, cuya bobina tiene los bornes A1 y A2. Si la bobina no tiene tensión, el contactor está en reposo y los contactos están como el la Fig. 3.15. Si entre A1 y A2 se aplica la tensión adecuada, el electroimán del contactor desplaza los contactos de tal forma que se desconectan los bornes de los contactos n.c. y se conectan los bornes de los contactos n.a. Al cesar la tensión entre los bornes A1 y A2, el electroimán deja de actuar y los contactos vuelven a su posición de reposo merced a la acción de un resorte.

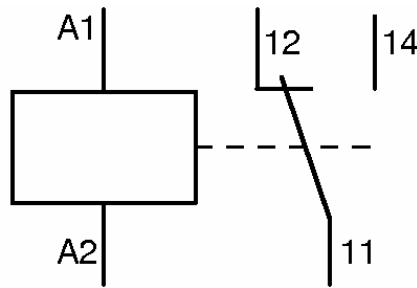


Fig. 3.18: Contacto conmutado

En la Fig. 3.18 se ha representado un contactor con un *contacto conmutado*. Es decir, cuando el contactor está en reposo los bornes 11 y 12 están conectados y los bornes 11 y 14 están desconectados. Cuando se dé tensión a la bobina del contactor los bornes 11 y 14 quedarán conectados y los bornes 11 y 12 se desconectarán.

Si la bobina del contactor está alimentada con corriente alterna la fuerza con que el electroimán atrae a los contactos es variable con el tiempo, habiendo momentos en los que no puede vencer a la fuerza del resorte, con lo que su funcionamiento es inadecuado (con fallos en los contactos, vibraciones, etc.). Para evitar esto, los contactores de c.a. poseen unas *espiras de sombra* (Figs. 3.19 y 3.20), las cuales son unas espiras en cortocircuito que se montan sobre las superficies de contacto del núcleo magnético del contactor. El flujo magnético alterno Φ generado por la bobina se divide en Φ_1 , en el interior de la espira de sombra, y Φ_2 , en el exterior. El flujo Φ_1 induce f.e.m. sobre la espira de sombra y, al estar ésta en cortocircuito, esto provoca que circule una corriente por ella. Esta corriente da lugar a un flujo magnético adicional Φ'_1 en el interior de la espira de sombra el cual está desfasado en el tiempo con respecto al flujo Φ . Al final se tiene un flujo total $\Phi''_1 = \Phi_1 + \Phi'_1$ en el interior de la espira, que está desfasado en el tiempo con el flujo en el exterior. De esta forma, en ningún momento existe un flujo nulo (no se anulan a la vez el flujo en el interior y en el exterior de la espira de sombra, pues ambos están desfasados en el tiempo) y la fuerza magnética es siempre superior a la del resorte.

El contactor de la Fig. 3.15 es tripolar pues posee tres contactos n.a. *principales* (de trazo grueso) que pueden cortar intensidades altas y son los que abren y cierran el circuito gobernado por el contactor (*circuito de potencia o circuito de fuerza*). Los demás contactos son *auxiliares* (de trazo fino) (ver las Figs. 3.21 y 3.22b) y sólo pueden cortar intensidades moderadas. Los contactos auxiliares se utilizan en el *circuito de mando* (o *circuito de control*) del contactor; es decir, el circuito que regula si el contactor está excitado o en reposo.

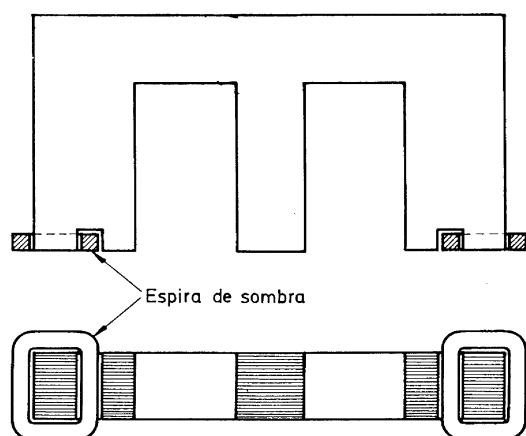


Fig. 3.19: Espiras de sombra

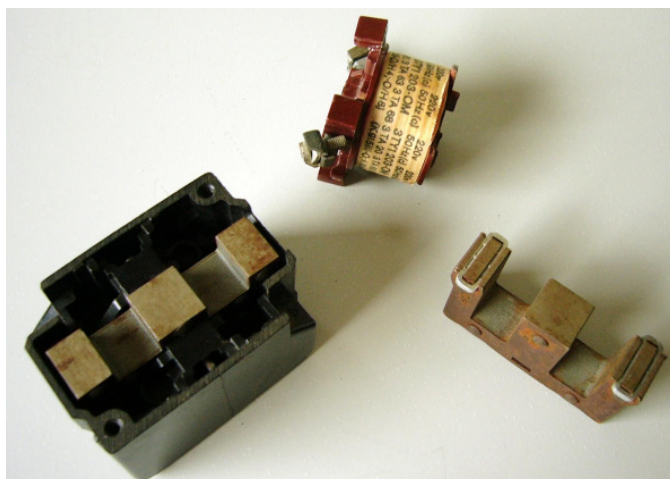


Fig. 3.20: Despiece de un contactor de c.a. con espiras de sombra

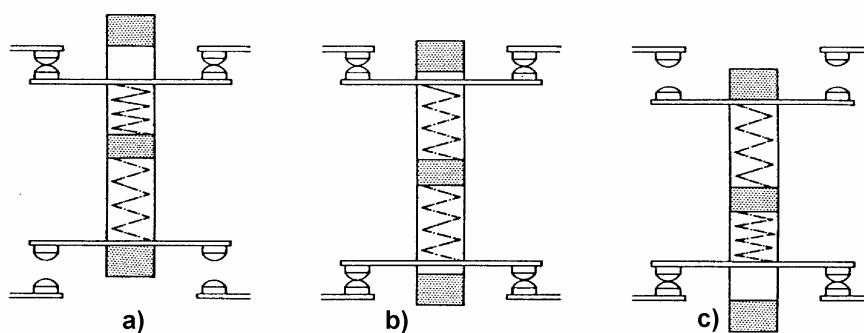


Fig. 3.21: Contactos auxiliares:

a) Posición de reposo. b) Posición intermedia. c) Posición de trabajo.

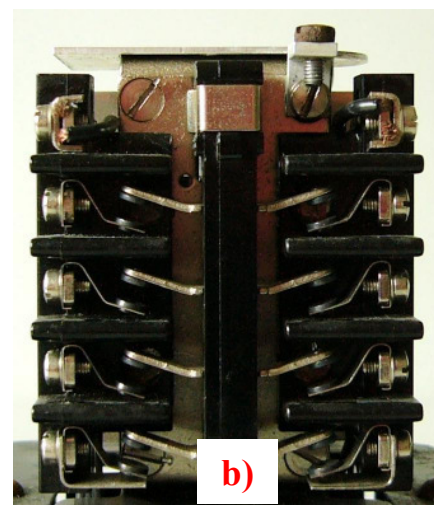
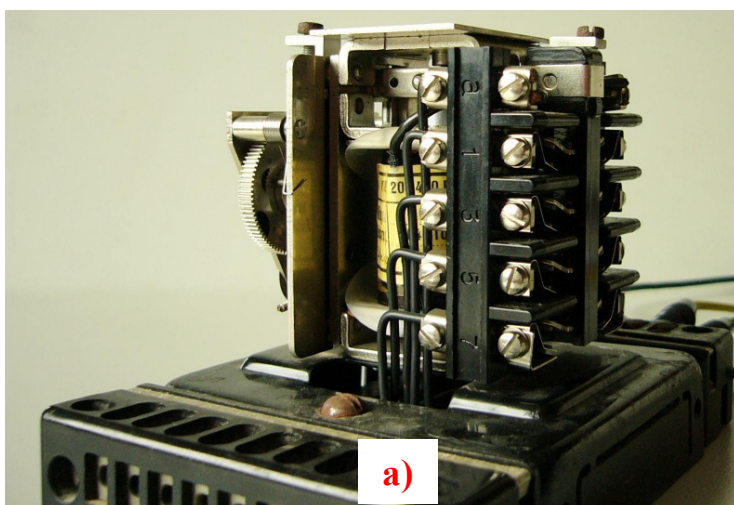


Fig. 3.22: a) Relé de tiempo a la conexión mecánico; b) Detalle de sus cuatro contactos n.a.

Un *relé de mando* o *relé auxiliar* (Fig. 3.17) posee un electroimán que mueve unos contactos al igual que un contactor. La diferencia estriba en que los contactos de un relé sólo sirven para cortar intensidades pequeñas y, por lo tanto, todos sus contactos se utilizan únicamente en el circuito de mando, pero no en el de potencia.

Un *relé de tiempo a la conexión o al cierre* (Figs. 3.22 y 3.23a) es un relé en el que transcurre un cierto tiempo desde que le llega la tensión a su bobina hasta que mueve sus contactos. Análogamente, un *relé de tiempo a la desconexión o a la apertura* (Fig. 3.23b) es aquel en el que se produce un retraso entre el momento en que su bobina se queda sin tensión hasta que sus contactos se mueven. Existen también *relés temporizados a la conexión y a la desconexión* (Fig. 3.23c). En algunos modelos el/los tiempo/s de retraso del relé puede/n graduarse entre ciertos límites mediante un mando.

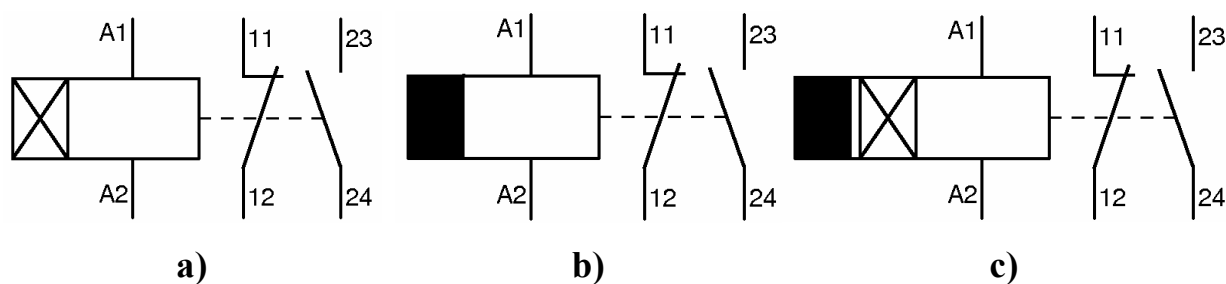


Fig. 3.23: Relés de tiempo:

a) A la conexión; b) a la desconexión; c) a la conexión y a la desconexión

En los planos eléctricos es frecuente dibujar separados los contactos y las bobinas de los relés y de los contactores para simplificar los dibujos. En estos planos todos los elementos se representan en su posición de reposos (cuando las bobinas de los relés y contactores no están excitadas, las protecciones no detectan fallos, los pulsadores no están pulsados, etc.).

Más adelante, dentro de este capítulo, se mostrarán algunos ejemplos de circuitos de potencia y de mando mediante contactores y relés.

7. - PULSADORES

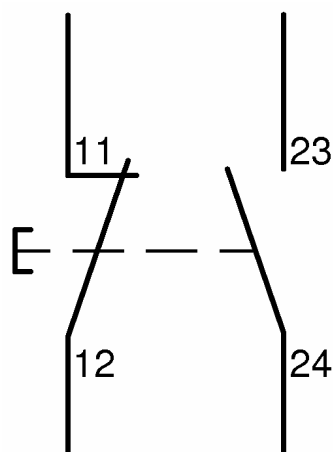
Un *pulsador* es un interruptor accionado manualmente con retorno automático. Esto significa que sus contactos cambian de estado mientras se mantiene pulsado y vuelven a su estado inicial (gracias a un resorte) cuando se dejan de pulsar.

Un pulsador puede tener uno o más contactos, los cuáles pueden ser normalmente abiertos (n.a.), normalmente cerrados (n.c.) o conmutados.

En la Fig. 3.24 se muestran varios pulsadores y en la Fig. 3.25 se indica el símbolo normalizado para un pulsador.



Fig. 3.24: Pulsadores

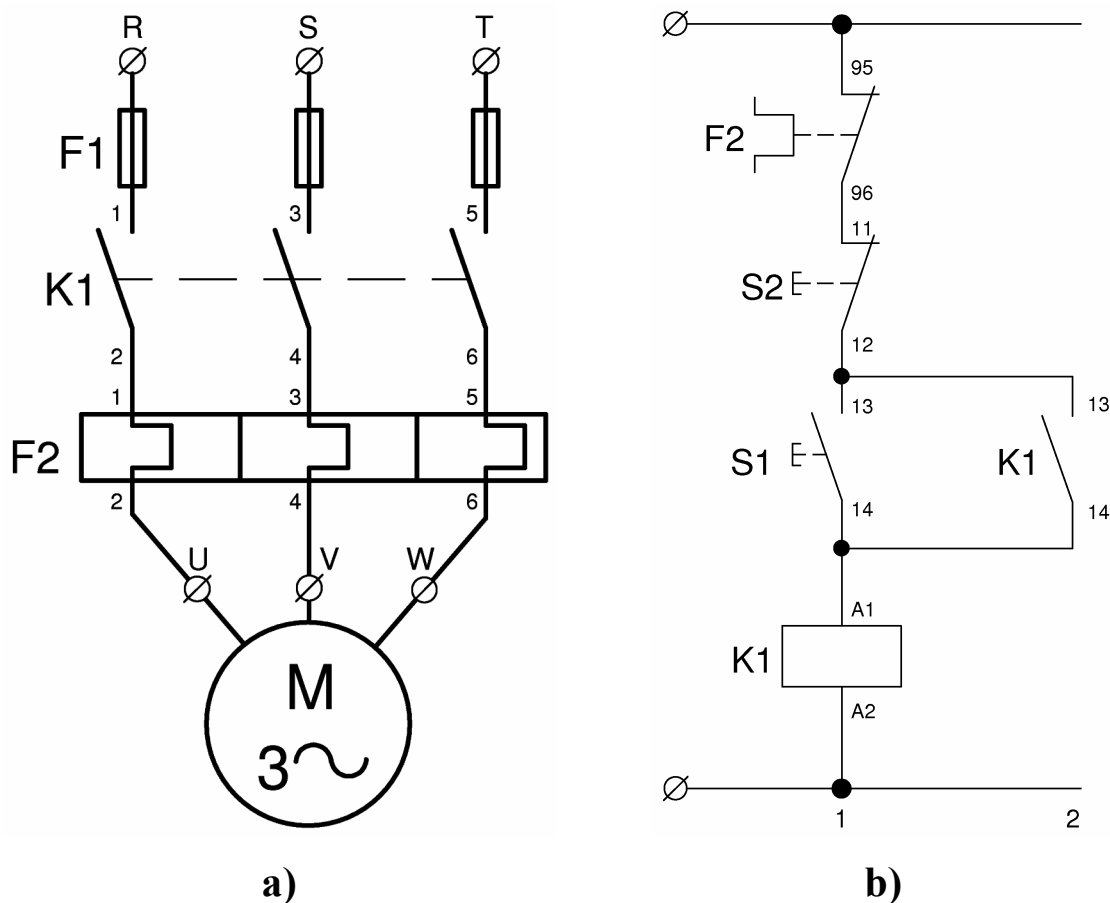


*Fig. 3.25: Símbolo de un pulsador
con dos contactos:
uno n.c. y otro n.a.*

8. – EJEMPLOS DE AUTOMATISMOS CON CONTACTORES Y RELÉS

8.1. - Guardamotor

Un contactor guardamotor sirve para conectar y desconectar un motor eléctrico. Consta de un contactor y de una protección térmica y se conecta según se representa en las Figs. 3.26 a y b.



Figs. 3.26: Contactor guardamotor:

a) Circuito de fuerza

b) Circuito de mando

En estas figuras se han dibujado todos los elementos en su posición de reposo, es decir, los contactos tendrán la posición de la figura cuando el contactor no está excitado y cuando la protección térmica no detecte sobrecargas.

Se debe distinguir el *circuito de fuerza*, (Fig. 3.26a) que es el circuito que alimenta a la carga, en este caso el motor, y el *circuito de mando* (Fig. 3.26b) que es el que controla la bobina del contactor. El circuito de fuerza se dibuja de trazo más grueso que el de mando.

En el circuito de fuerza (Fig. 3.26a) se aprecia que el contactor K1 actúa como interruptor del motor eléctrico y es el que se usará para arrancar o desconectar el motor. La protección del motor contra cortocircuitos se realiza mediante los fusibles F1, mientras que la protección contra las sobrecargas está encomendada a la protección térmica F2.

Supongamos que el contactor K1 está activado y, por lo tanto, están cerrados sus contactos principales (1-2, 3-4 y 5-6 en la Fig. 3.26a) y el motor gira. Si se produce una sobrecarga en, al menos, una de las fases del motor, al cabo de cierto tiempo actuará la protección térmica F2. Al actuar la protección térmica su contacto n.c. 95-96 (Fig. 3.26b) se abrirá, dejando desconectada la bobina del contactor. Esto provocará que el contactor abra sus contactos principales y el motor se quede sin tensión y, por lo tanto, protegido de la sobrecarga. Es decir, la protección térmica actúa sobre el contactor usando éste como el interruptor que se abre para proteger el motor.

El pulsador S1 es el de puesta en marcha del motor. Como se aprecia en la Fig. 3.26b, al pulsar S1 se cierra su contacto n.a. 13-14, con lo que (si el pulsador S2 y la protección F2 están en sus posiciones de reposo) la bobina del contactor K1 recibe tensión y cierra sus contactos principales n.a. (1-2, 3-4 y 5-6), poniendo en marcha al motor. Ahora bien, en principio parecería que sería necesario mantener S1 pulsado continuamente para evitar que la bobina de K1 deje de recibir tensión y el motor se detenga. Para que una vez pulsado S1 el motor siga girando, aunque se deje de oprimir dicho pulsador, en el circuito de mando (Fig. 3.26b) se ha colocado un contacto n.a (13-14) del contactor K1 en paralelo con el contacto n.a del pulsador S1. Así, al pulsar S1 y dar tensión a la bobina de K1, no sólo se cierran sus contactos principales (1-2, 3-4 y 5-6), sino también su contacto auxiliar n.a 13-14. Este contacto auxiliar n.a. mantiene con tensión a la bobina del contactor K1 aunque se deje de pulsar S1. Un contactor o un relé que, como el de las Figs. 3.26, una vez excitado se mantiene alimentado a través de uno de sus propios contactos se dice que está *realimentado*, *autoalimentado* o *automantenido*.

Para parar el motor se utiliza el pulsador S2. Al pulsar S2 se abre su contacto n.c. 11-12, lo cual hace que la bobina del contactor K1 se quede sin tensión. Esto, a su vez, provoca que los contactos de K1 (1-2, 3-4, 5-6 y 13-14) vuelvan a la posición de reposo y el motor quede desconectado de la red.

Nótese que los contactos principales (1-2, 3-4 y 5-6) del contactor K1 (dibujados en la Fig. 3.26a), su bobina (conectada entre los bornes A1 y A2 en la Fig. 3.26b) y su contacto auxiliar n.a (13-14 en la Fig. 3.26b) están dibujados separados en las Figs. 3.26, aunque físicamente son elementos que pertenecen al mismo aparato (el contactor K1). Análogamente,

también se han dibujado separados los elementos de la protección térmica F2. Al representar los circuitos así queda más claramente indicada su forma de actuación.

La intensidad de arranque del motor es mayor que la intensidad a la cual está calibrada la protección térmica F2. Si esta protección actuara instantáneamente el motor no podría ponerse en marcha, pues cada vez que se intentase arrancarlo actuaría la protección.

Para que pudiera arrancar un motor protegido por una protección de sobreintensidad que actuara instantáneamente, sería preciso calibrar dicha protección a un valor superior a la intensidad de arranque. Sin embargo, en este caso, el motor no estaría protegido contra sobreintensidades moderadas (sobrecargas) que podrían dañarlo si duraran un tiempo suficientemente largo.

Se aprecia, pues, la conveniencia de usar una protección térmica para proteger a un motor. Este tipo de protección presenta las siguientes ventajas:

- a)** Permite poner en marcha al motor aunque su protección esté calibrada a un valor inferior a la intensidad de arranque, ya que ésta dura muy poco tiempo y la protección térmica no llega a actuar.
- b)** Permite que se produzcan sobreintensidades moderadas que no duren mucho tiempo sin desconectar el motor, ya que éste las soporta sin peligro y así se evitan paradas intempestivas.
- c)** Protege el motor de sobreintensidades peligrosas, bien por ser moderadas pero durar bastante tiempo, o bien o por alcanzar un valor elevado, aunque sea por poco tiempo.

Para corrientes muy elevadas (cortocircuitos), la protección térmica sería demasiado lenta. Por esta razón se colocan los fusibles F1, los cuáles están calibrados para una intensidad superior a la de arranque del motor. Para sobrecargas comprendidas entre las corrientes a las que están calibrados la protección térmica F2 y los fusibles F1, actúa la protección térmica con cierto retraso (inversamente proporcional al valor eficaz de la corriente). Para intensidades superiores a la cual están calibrados los fusibles F1, son éstos los que protegen al motor de una forma prácticamente instantánea.

8.2. - Inversor

Para invertir el sentido de un giro de un motor trifásico hay que cambiar el orden de fases en la alimentación del motor. Para ello basta con permutar dos de las tres fases, según se puede apreciar en la Fig. 3.27:

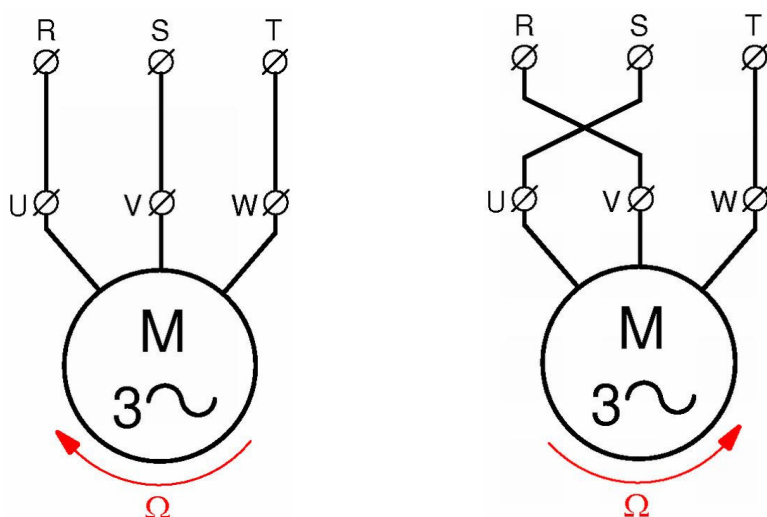
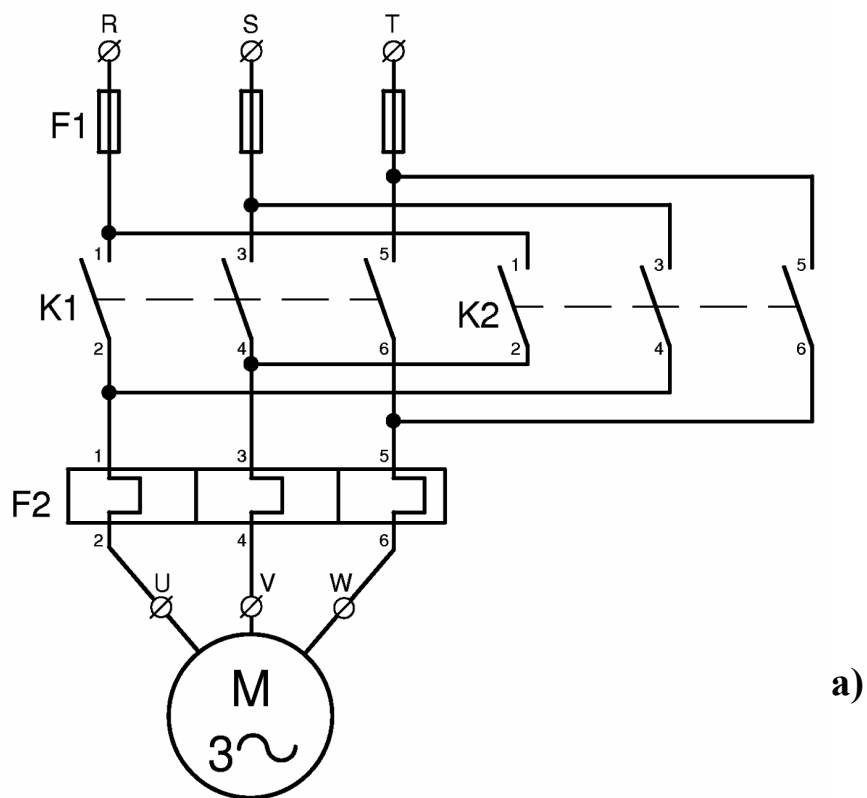


Fig. 3.27: Cambio de sentido de giro de un motor trifásico

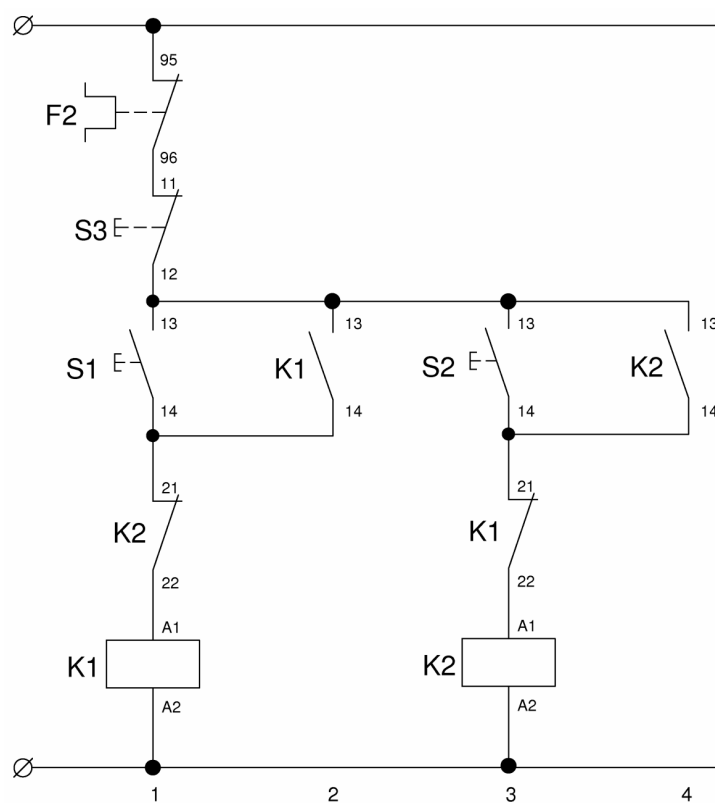
En las Figs. 3.28 se muestran unos circuitos de fuerza y de mando que permiten la inversión del sentido de giro de un motor trifásico mediante contactores.

En el circuito de fuerza (Fig. 3.28a) se aprecia que el contactor K1 suministra al motor las tensiones con un orden de fases que lo hace girar en sentido horario y el contactor K2 con el orden que lo hace girar en sentido antihorario. En ambos casos las corrientes que van al motor circulan a través de los fusibles F1 y de la protección térmica F2. En consecuencia, estas dos protecciones funcionan tanto cuando el motor está alimentado por el contactor K1 como cuando lo está a través del contactor K2.

En el circuito de mando (Fig. 3.28b) se aprecia que el contacto n.c. (95-96) de F2 desconectará la bobina del contactor que esté funcionando (K1 o K2) si esta protección detecta una sobrecarga. De esta manera, al igual como se explicó para el contactor guardamotor, la protección térmica utiliza los contactores K1 y K2 para desconectar el motor y protegerlo de las sobrecargas.



a)



b)

Fig. 3.28: Inversor del sentido de giro de un motor trifásico:

a) Circuito de fuerza

b) Circuito de mando

Los pulsadores S1 y S2 son los de puesta en marcha del motor. El pulsador S1 activa la bobina del contactor K1, con lo que el motor empezará a girar en sentido horario. El pulsador S2 da tensión a la bobina del contactor K2, con lo que el motor empezará a girar en sentido antihorario. De manera similar a como se indicó para el contactor guardamotor, ambos contactores, K1 y K2, están autoalimentados mediante contactos auxiliares n.a. puestos en paralelo con el pulsador correspondiente (Fig. 3.28b). De esta manera no es preciso mantener presionado permanentemente un pulsador, S1 o S2, para conseguir que el motor siga girando en el sentido deseado.

El pulsador S3 es el de parada. Al pulsarlo se abre su contacto n.c. (11-12) y se quita la tensión a las bobinas de los contactores, lo cual desconecta el motor.

En el circuito de fuerza (Fig. 3.28a) se aprecia que se debe evitar que los dos contactores K1 y K2 estén conectados simultáneamente, ya que en ese caso se produciría un cortocircuito. Esto significa que estos contactores deben estar *enclavados*; es decir, no se debe permitir que ambos funcionen a la vez.

Este enclavamiento se puede conseguir de varias maneras:

- *Mecánicamente*: Por ejemplo, mediante una barra que impida el movimiento de un contactor cuando el otro esté activado.
- *Por cerradura*: Para conectar los contactores se utilizan interruptores con cerradura que utilizan la misma llave y sólo existe una llave. Para conectar un contactor hay que utilizar la llave y ésta sólo se puede sacar del mando del otro contactor cuando éste ha sido desactivado.
- *Eléctricamente*: Mediante una lógica de contactos, como la representada en la Fig. 3.28b y que se explica seguidamente.
- Etc.

En la Fig. 3.28b el enclavamiento entre los contactores K1 y K2 se consigue mediante los contactos auxiliares normalmente cerrados (21-22) puestos en serie con la bobina del otro contactor. Así, si la bobina del contactor K1 está con tensión (y, por consiguiente, el motor gira en sentido horario), el contacto n.c. 21-22 del contactor K1 -colocado en serie con la bobina del contactor K2- se abrirá e impedirá que se pueda dar tensión a la bobina de K2. Análogamente, si la bobina de K2

está con tensión (luego, el motor gira en sentido antihorario), su contacto n.c. 21-22, -puesto en serie con la bobina de K1- se abrirá e impedirá que la bobina de K1 pueda ser activada.

Así pues, la forma de funcionar de este circuito es la siguiente:

- a) Pulsando el botón S1 el motor gira en sentido horario.
- b) Pulsando el botón S2 el motor gira en sentido antihorario.
- c) Pulsando el botón S3 el motor se desconecta.
- d) Para invertir el sentido del giro se debe desconectar primero el motor. Es decir, por ejemplo, para que el motor pase de girar en sentido horario a girar en sentido antihorario, se pulsará primero S3 y luego S2.

8.3. – Inversor con temporización

El circuito inversor descrito anteriormente tiene una pega. Si el motor está girando en un sentido, se lo desconecta mediante el pulsador S3 e inmediatamente, antes de que haya dejado de dar vueltas, se le vuelve a conectar para que gire en sentido contrario, se producirá la circulación de unas corrientes muy grandes que pueden dañarlo.

Es preciso esperar a que el motor haya dejado de girar o, al menos, que gire muy despacio, antes de conectarle para que gire en sentido opuesto.

Para prevenir que, por descuido, se pueda conectar el motor para que gire en un sentido cuando todavía está girando en el sentido opuesto, es mejor utilizar el circuito de mando indicado en la Fig. 3.29 (el circuito de fuerza sigue siendo el representado en la Fig. 3.28a). La idea de este circuito es la de que cuando se pulsa el botón de parada S3 quede bloqueada la acción de los pulsadores de puesta en marcha, S1 y S2, durante un tiempo. Este tiempo debe ser suficiente para que el motor se detenga o reduzca su velocidad lo bastante como para que no haya peligro si se le conecta para que gire en sentido contrario.

Si se comparan los circuitos de las Figs. 3.28b y 3.29 se comprueba que la actuación de la protección térmica F2 y de los pulsadores de marcha S1 y S2, así como el enclavamiento entre ambos contactores, son iguales en ambos. Lo que es diferente es la forma de actuación del pulsador de parada S3.

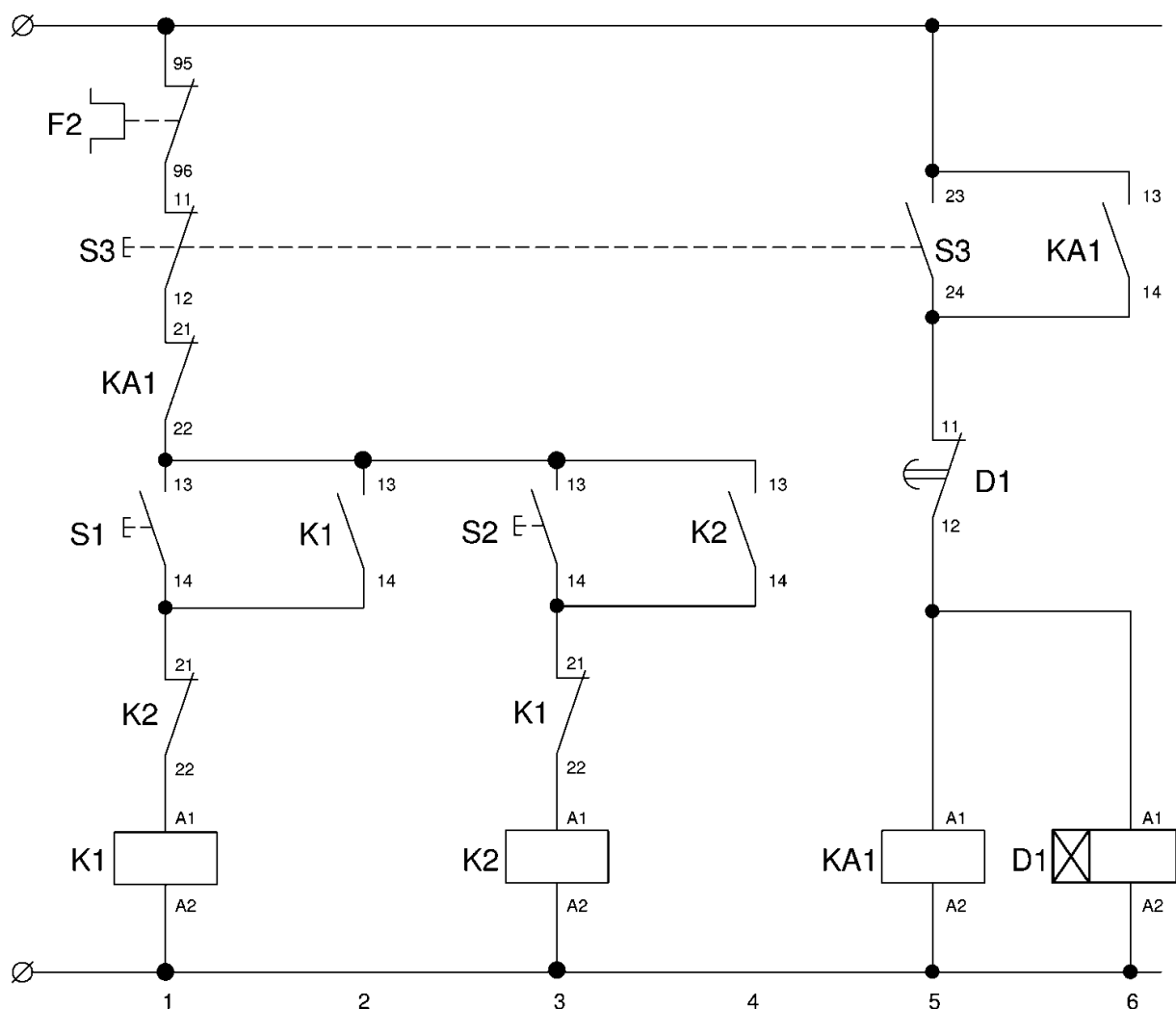


Fig. 3.29: Circuito de mando de un inversor del sentido de giro de un motor trifásico con temporización (el circuito de fuerza es el representado en la Fig. 3.28a)

Como se aprecia en la Fig. 3.29, el pulsador de parada S3 ahora tiene dos contactos, uno n.c. (11-12) y otro n.a. (23-24). Al pulsar S3, su contacto n.c. 11-12 se abre, quitando tensión a las bobinas de los contactores K1 y K2, y, en consecuencia, el motor se desconecta (lo mismo que en la Fig. 3.28b). Pero ahora, además, el contacto n.a. 23-24 de S3 se cierra y suministra tensión al relé auxiliar KA1 y al relé de tiempo a la conexión D1. El relé de tiempo todavía no mueve sus contactos, pero comienza a contar el tiempo para, más adelante, empezar a actuar. El relé auxiliar tiene dos contactos, uno n.a. 13-14 y otro n.c. 21-22. El contacto n.a. 13-14 de KA1 está conectado en paralelo con el contacto 23-24 del pulsador S3 y sirve para que la bobina de este relé y del relé de tiempo sigan con tensión cuando se deje pulsar S3 (luego KA1 está autoalimentado). Cuando el relé auxiliar KA1 está conectado, su contacto n.c. 21-22 se abre evitando así que se pueda dar tensión a las bobinas de los contactores K1 y K2.

Cuando pase el tiempo de temporización al que esté ajustado el relé de tiempo D1, su contacto n.c. 11-12 abrirá y se desconectarán las bobinas de KA1 y de D1. Esto hará que el contacto n.c. 21-22 de KA1 vuelva a su posición de reposo (cerrado) y ya se podrá dar tensión a las bobinas de K1 o de K2 mediante los pulsadores S1 y S2, respectivamente.

9. - BIBLIOGRAFÍA

- [1] CASTEJÓN, AGUSTÍN; SANTAMARÍA, GERMÁN. “Tecnología eléctrica”. Mc Graw Hill. Madrid. 1993.
- [2] CORTES CHERTA, MANUEL. “Curso de aparataje eléctrica”. Merlin Gerin. Barcelona. 1987.
- [3] DPTO. TÉCNICO DISTESA. “Manuales DISTESA: Medidas”. DISTESA. Madrid. 1976.
- [4] FRAILE y GARCÍA GUTIÉRREZ. “Prácticas de Electrotecnia”. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [5] KLÖCKNER MOELLER, S.A. “Automatización y distribución de energía. Manual de esquemas”. Alemania.
- [6] LLADONOSA, VICENTE. “Arranque de motores mediante contactores”. Marcombo Barcelona. 1988.
- [7] MERLIN GERIN - SCHNEIDER ELECTRIC. “Cuadernos técnicos y catálogos”. <http://www.schneiderelectric.es/>
- [8] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. “Guía Técnica de Aplicación del Reglamento Electrotécnico para B. T.”. www.ffii.nova.es/puntoinformcyt/guia_rbt.asp.
- [9] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. “Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias”. B.O.E. nº 224, 18 septiembre 2002.
- [10] MÜLLER, HÖRNEMANN, HÜBSCHER, JAGLA, LARICH y PAULI. “Electrotecnia de Potencia”. Reverté. Barcelona. 1985.

- [11] Norma UNE-EN 60617-7. “Símbolos gráficos para esquemas. Parte 7: Aparamenta y dispositivos de control y protección”. 1997.
- [12] RAMÍREZ VÁZQUEZ. “Enciclopedia CEAC de la Electricidad: Maniobra, Mando y Control eléctricos”. Ceac. Barcelona. 1976.
- [13] RAMÍREZ VÁZQUEZ. “Enciclopedia CEAC de la Electricidad: Estaciones de Transformación y Distribución. Protección de Sistemas Eléctricos”. Ceac. Barcelona. 1977.
- [14] RUIZ VASSALLO, FRANCISCO. “Esquemas eléctricos y electrónicos”. Creaciones Copyright, S.L. Madrid. 2005.
- [15] SPITTA. “Instalaciones Eléctricas (2 tomos)”. Dossat. Madrid. 1979.
- [16] SPRECHER+SCHUH. “Un criterio fácil para la elección de contactores”. Suiza. 1986.

Capítulo 4:

CONTROLADORES LÓGICOS Y **AUTÓMATAS PROGRAMABLES**

- 1. – INTRODUCCIÓN**
- 2. – MANDOS DE PROGRAMA CABLEADO Y DE MEMORIA**
- 3. – SEÑALES BINARIAS. ESTADOS DE SEÑAL**
- 4. – PROGRAMA DE MANDO. INSTRUCCIONES DE MANDO**
- 5. – MEMORIA DE PROGRAMA**
- 6. – ELABORACIÓN DE SEÑALES EN EL AUTÓMATA**
- 7. – LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN. FORMAS DE REPRESENTACIÓN**
- 8. – ESTRUCTURA O ARQUITECTURA INTERNA**
- 9. – FUNCIONES DE LOS AUTÓMATAS**
- 10. – EJEMPLOS DE PROGRAMACIÓN**
- 11. – BIBLIOGRAFÍA**

CONTROLADORES LÓGICOS Y

AUTÓMATAS PROGRAMABLES

1. – INTRODUCCIÓN

La automatización de una máquina o proceso productivo simple tiene como consecuencia la liberación física y mental de dicha labor. Se llama “*automatismo*” al dispositivo físico que se encarga de dicha función controlando su funcionamiento. (U.N.E 21-302-78 y 20-109-81).

Un sistema automatizado consta de dos partes principales:

La *Parte Operativa* es la parte que actúa directamente sobre la máquina. La constituyen los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Por lo tanto, la parte operativa incluye los accionadores de las máquinas (motores, cilindros, compresores, etc.) y los captadores (fotodiodos, finales de carrera, etc.).

La *Parte de Mando* suele ser un autómata programable (tecnología programada), aunque hasta hace bien poco se utilizaban relés electromagnéticos, tarjetas electrónicas o módulos lógicos neumáticos (tecnología cableada).

El *Controlador Lógico Programable (PLC)*, llamado también *Autómata Programable*, es un equipo para controlar en tiempo real procesos secuenciales industriales. En consecuencia, los equipos y sistemas de un automatismo eléctrico, que se hayan realizado o se puedan realizar mediante relés, temporizadores y demás elementos auxiliares, pueden ser sustituidos por un solo PLC.

En un sistema de fabricación automatizado el autómata programable está en el centro del sistema. Este debe ser capaz de comunicarse con todos los constituyentes del sistema automatizado.

Los autómatas programables se pueden dividir en tres grandes grupos, dependiendo de su número de entradas y salidas:

- Pequeños: Menos de 128 entradas/salidas
- Medianos: Entre 128 y 512 entradas/salidas
- Potentes: Más de 512 entradas/salidas

Hay diversos tipos de presentación, pero los más utilizados son:

- Caja compacta (Fig. 4.1)
- Caja compacta ampliable
- Caja modular (CPU en caja y E/S modulares)
- Rack modular (Fig. 4.2)
- Tarjeta electrónica

El autómatas programable se utilizó en un principio como sustituto de los relés electromagnéticos de procesos secuenciales. Hoy en día la utilización de los autómatas se ha extendido de tal forma que ya son imprescindibles en cualquier proceso industrial.

En la industria los autómatas pueden dialogar con la máquina y con otros autómatas, así como suministrar datos de la instalación y producción, controlar y regular cualquier proceso industrial (visualizar y modificar parámetros, señalar avisos de alarmas, etc.).

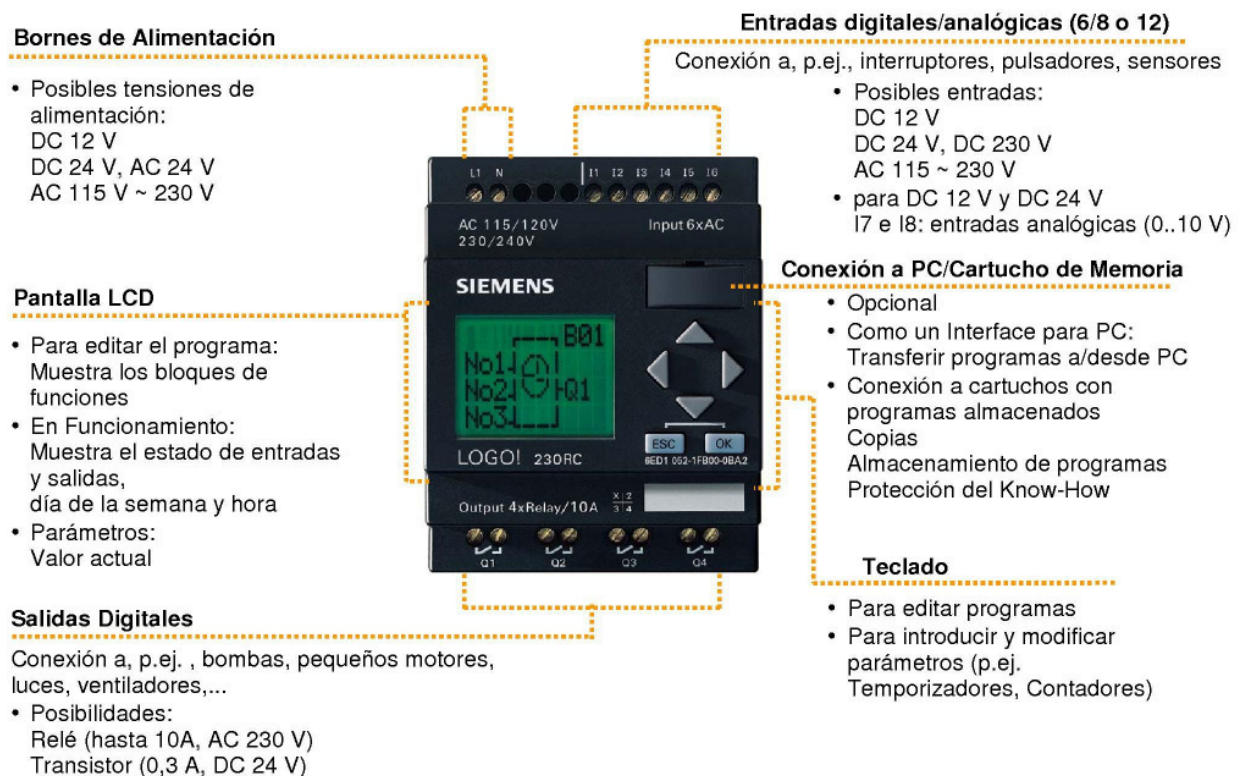


Fig. 4.1: PLC en caja compacta

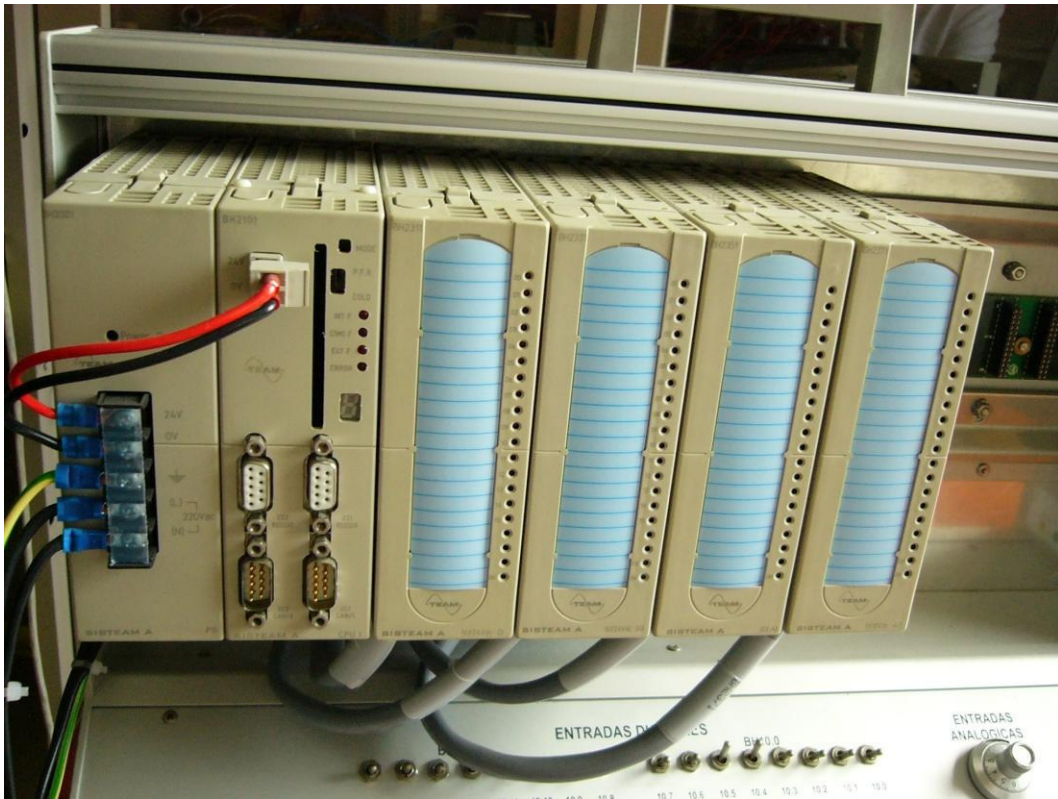


Fig. 4.2: PLC rack modular

Como inconvenientes podríamos hablar, en primer lugar, de que hace falta un programador, lo que obliga a adiestrar a uno de los técnicos en tal sentido. Pero hoy en día este inconveniente está solucionado porque las universidades ya se encargan de dicho adiestramiento.

El coste inicial también puede ser un inconveniente.

Ejemplos de aplicaciones generales de los autómatas programables:

- Maniobra de máquinas.
- Maquinaria industrial de plástico
- Máquinas transfer.
- Maquinaria de embalajes.
- Señalización del estado de procesos.

2. – MANDOS DE PROGRAMA CABLEADO Y DE MEMORIA

Se distingue entre mandos de programa cableado y mandos de memoria. Un mando con relés o contactores es un mando de programa cableado; un autómatas es un mando programable de memoria.

2.1. – Mandos de programa cableado

En este caso el programa queda determinado a través de la unión, mediante un cableado, entre los diferentes elementos, tales como: contactos, emisores, bobinas de relés y de contactores, temporizadores, etc.

Si una función “Y” (secuencia de contactos en serie) debe cambiarse por una función “O” (secuencia de contactos en paralelo), se necesita realizar un cambio en el cableado de la instalación. Un mando cableado sólo puede construirse cuando se conoce previamente el programa a realizar.

2.2. – Mandos de programa de memoria

En los mandos de programa de memoria la construcción del autómatas y el correspondiente cableado es independiente del programa deseado, por lo que pueden utilizarse aparatos estándar. El cableado consiste básicamente en conectar los contactos emisores correspondientes a la máquina y las bobinas de accionamiento a los bornes del autómatas.

Tabla 1.1: Comparación entre sistemas cableados y sistemas programables

CARACTERÍSTICA	SISTEMA CABLEADO	AUTÓMATAS PROGRAMABLE
Flexibilidad de adaptación al proceso	Baja	Alta
Hardware estándar para distintas aplicaciones	No	Sí
Posibilidades de ampliación	Bajas	Altas
Interconexiones y cableado exterior	Mucho	Poco
Tiempo de desarrollo del proyecto	Largo	Corto
Posibilidades de modificación	Difícil	Fácil
Mantenimiento	Difícil	Fácil
Herramientas para prueba	No	Sí
Stocks de mantenimiento	Medios	Bajos
Modificaciones sin parar el proceso («on line»)	No	Sí
Coste para pequeñas series	Alto	Bajo
Estructuración en bloques independientes	Difícil	Fácil

El programa según el cual debe trabajar el mando se escribe con un *aparato de programación* en la memoria de programa del autómat. En este programa queda fijada la secuencia en que deben ser consultados por el autómat los contactos emisores, la forma en que deben realizarse las operaciones “Y” u “O”, y la conexión de las bobinas de accionamiento. En el caso de que se precisase realizar una variación del programa no hay que cambiar el cableado del autómat sino solamente el contenido de la memoria del programa.

3. – SEÑALES BINARIAS. ESTADO DE SEÑAL

Las entradas de un autómat son fácilmente identificables, ya que se caracterizan físicamente por sus bornes de entrada o captadores y llevan, además, una indicación luminosa de activado por medio de diodos LED. Las señales de entrada pueden ser analógicas o digitales.

Las señales *analógicas* corresponden a la medida de una magnitud física y, por lo tanto, pueden tomar un valor cualquiera dentro un margen continuo.

Las señales *digitales* son las más utilizadas y corresponden a una señal de entrada todo o nada; esto es, a un nivel de tensión o a la ausencia de la misma.

La identificación de las salidas se realiza de manera similar a las entradas, siendo en éstas donde se conectan los dispositivos de salida o actuadores.

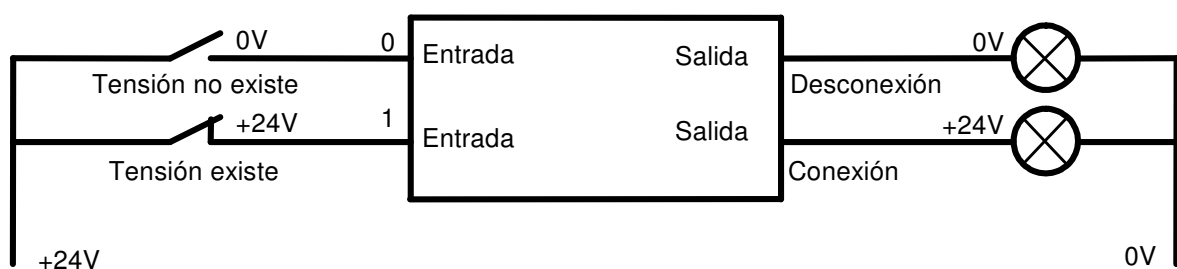


Fig. 4.3: Señales binarias de entrada y salida

En el control lógico programable la unidad de control del autómat consulta en las entradas digitales los dos estados: “tensión existe” y “tensión no existe”, y como consecuencia de la

ejecución del programa “conecta” o “desconecta” los dispositivos de salida (Fig. 4.3). En ambos casos se trata una de situación de estados clara y diferenciable que en la técnica electrónica de mandos se conoce bajo los conceptos de:

- Estado de señal 0 no existe, desconexión
- Estado de señal 1 existe, conexión

Estos dos estados de señal son los dos valores diferentes que puede tomar una *señal binaria* (señal de valor doble). El concepto de señal binaria no se utiliza solamente para la descripción de los estados de las entradas y salidas sino también para la descripción de los estados de los elementos que participan en la elaboración de señal en el interior del autómeta.

4. – PROGRAMA DE MANDO. INSTRUCCIONES DE MANDO

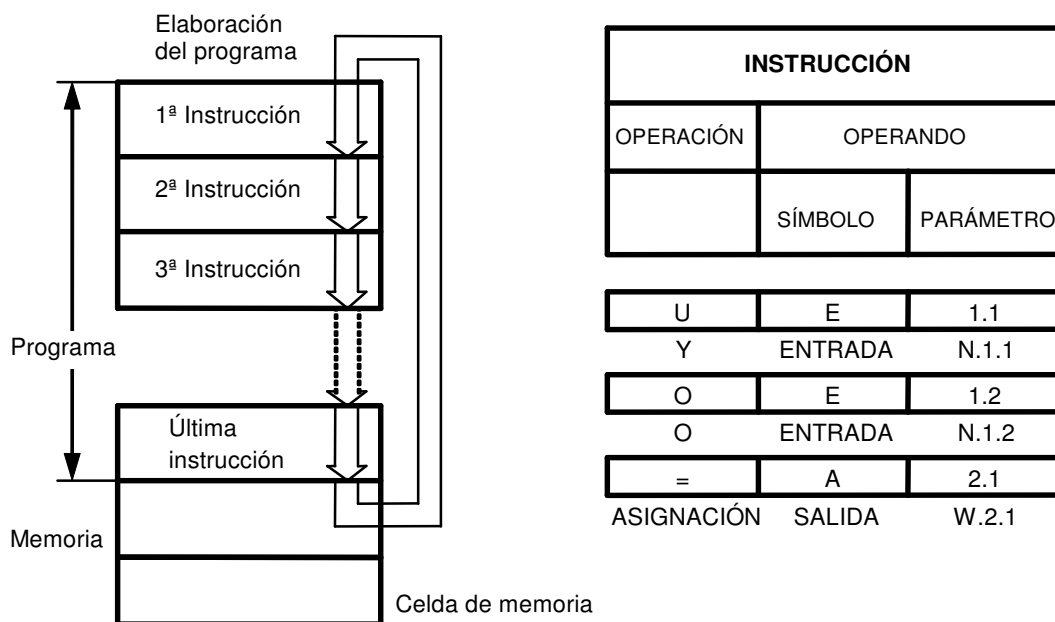


Fig. 4.4: Programa de mando

Para la elaboración del programa de memoria las tareas de mando se descomponen en instrucciones de mando, las cuales representan una prescripción de trabajo para la *unidad de control*.

Una instrucción de mando se escribe en una *celda de memoria*. Las instrucciones son ejecutadas por la unidad de control del autómeta independientemente y una detrás de otra. Después de elaborar o ejecutar la última instrucción, la unidad de control empieza nuevamente con la

primera (Fig. 4.4). Puesto que la elaboración de las instrucciones se repite continuamente, se habla de *elaboración cíclica*. El tiempo de ejecución de todas las instrucciones de un programa se llama *tiempo de ciclo*. La duración del tiempo de ciclo es vigilada por la unidad de control.

Si un ciclo de elaboración no termina en el transcurso de un tiempo determinado por el autómatas, éste se va a STOP, desconectando todas sus salidas. El tiempo de ciclo viene determinado por el fabricante.

Una instrucción de mando se compone de *operación* y *operando*.

La operación describe la función a ejecutar (¿Que hay que hacer?):

<u>Siemens</u>	<u>Omron</u>	
U	AND	Formar una función Y.
O	OR	Formar una función O.
=	OUT	Asignar a una salida el estado conectado.

El operando contiene la identificación adicional precisa para la ejecución (¿Dónde hay que hacerlo?). Se compone de *símbolos* y *parámetros*:

<u>Siemens</u>	<u>Omron</u>	
E 1.1	01	Consultar el estado de señal en la entrada 1.1.
E 1.2	02	Consultar el estado de señal en la entrada 1.2.
A 4.0	104	Conectar la salida número 4.0.

Según el fabricante e incluso el modelo se utiliza un código determinado para cada instrucción u operando. Así, en los ejemplos anteriores se han mostrado dos tipos de código entre los varios que existen.

5. – MEMORIA DE PROGRAMA

Se llamada también “*Memoria de Trabajo*” para diferenciarla de las memorias particulares del módulo central.

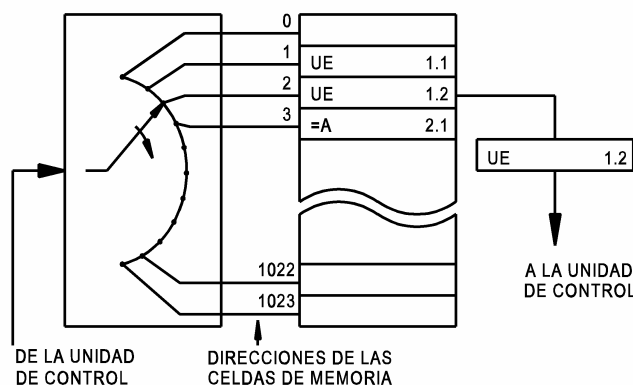


Fig. 4.5: Memoria de programa

La memoria de programa se compone de 1024, 2048, 4096, etc. celdas de memoria, cuyas direcciones son: 0 a 1023, 0 a 2047, 0 a 4095, etc. (Fig. 4.5). Es frecuente medir la capacidad de una memoria en “k”, es decir, en múltiplos de 1024 celdas.

En cada celda de memoria puede escribirse una instrucción de mando con ayuda del aparato de programación.

En la ejecución del programa por la unidad de control las direcciones de las diferentes celdas de memoria se seleccionan, una detrás de otra, por medio del *contador de direcciones*. La instrucción que se encuentra en la celda de memoria seleccionada aparece inmediatamente en la salida de la memoria, siendo trasladada desde allí a una memoria intermedia llamada *registro de instrucciones*. La instrucción existente en el registro de instrucciones es ejecutada por la unidad de control. A continuación el contador de direcciones selecciona la instrucción siguiente de la memoria, y así sucesivamente. En el autómata se utilizan memorias tipo RAM y EEPROM.

6. – ELABORACIÓN DE SEÑALES EN EL AUTÓMATA

El Autómata Programable (PLC) a cada inicio de ciclo ejecuta las subrutinas de autocomprobación, diálogo con periféricos, consola de programación, etc.

6.1. – Adquisición de entradas

En el autómata se realiza el intercambio de señales entre el módulo central (CPU) y los módulos de entrada y salida existentes por medio de los conductores de señal conjunta, es decir, conductores de *bus* (bus = línea conjunta a la que están conectadas varias unidades).

El registro de instrucciones conoce la dirección del operando (parámetro) por medio del *bus de direcciones*.

6.2. – Tratamiento del programa

En la elaboración de una instrucción de mando sólo se activa un módulo de entrada o salida. La información sobre el estado de la señal “0” o “1” de la correspondiente entrada se transmite a la unidad de control a través del *bus de datos*. Con esta información, la unidad de control forma el resultado de la operación.

6.3. – Actualización de las salidas

Como consecuencia del resultado de la operación la unidad de control elabora las salidas y envía, a través del bus de direcciones, las correspondientes señales de conexión y desconexión de las salidas.

7. – LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN. FORMAS DE REPRESENTACIÓN

La base para la representación de un programa es la *aclaración de tareas*, a partir de la cual se describen las funciones que se desarrollan en un programa.

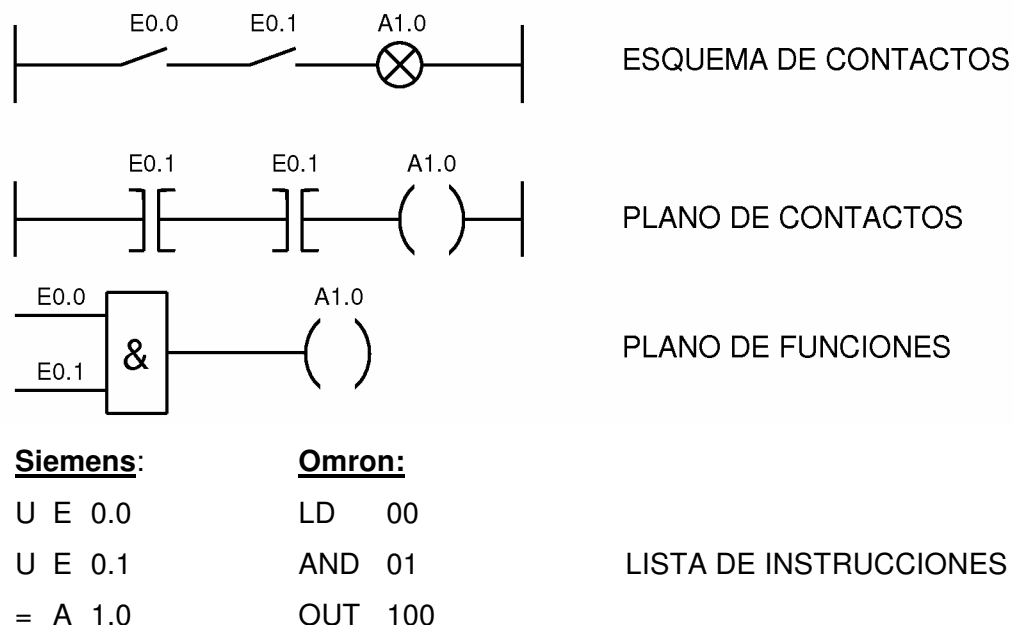


Fig. 4.6: Formas de representación de un programa

La aclaración de tareas se puede presentar en forma de:

- Plano de contactos (KOP)
- Plano de funciones (FUP)
- Lista de instrucciones (AWL)

La Fig. 4.6 muestra un segmento de un esquema de contactos de un mando por contactores que debe transformarse en el correspondiente programa.

PLANO DE CONTACTOS (KOP)

Es la representación gráfica de las tareas de automatización y presenta cierta analogía con el esquema de contactos correspondiente al circuito de mando si el automatismo se realizara mediante contactores y relés. Sin embargo, el esquema de contactos se suele dibujar con los contactos dispuestos en hileras verticales, mientras que en el plano de contactos los segmentos se disponen horizontalmente en su representación en la pantalla de la unidad de programación.

PLANO DE FUNCIONES (FUP)

Es la representación gráfica de las tareas de automatización utilizando los símbolos contenidos en las normas DIN. Las funciones individuales se representan con un símbolo. En su parte izquierda se ubican las entradas y en la derecha la salida de la función.

LISTA DE INSTRUCCIONES (AWL)

Puede programarse en todos los modelos. Las tareas de automatización se representan con abreviaturas nemotécnicas. El programa se almacena siempre en forma de lista de instrucciones en la memoria del autómatas programable. Esto quiere decir que el aparato de programación tiene que transferir el programa en lista de instrucciones al autómatas programable, aunque se programe en plano de contactos o plano de funciones.

En la Fig. 4.6 se muestra las listas de instrucciones para la misma aclaración de tareas en dos PLCs de distintos fabricantes que utilizan diferentes lenguajes de programación.

8. – ESTRUCTURA O ARQUITECTURA INTERNA

En el autómata existen dos sistemas. El *hardware* que es un sistema físico y el *software* que es un sistema programable.

El hardware se compone de tres bloques (Fig. 4.7):

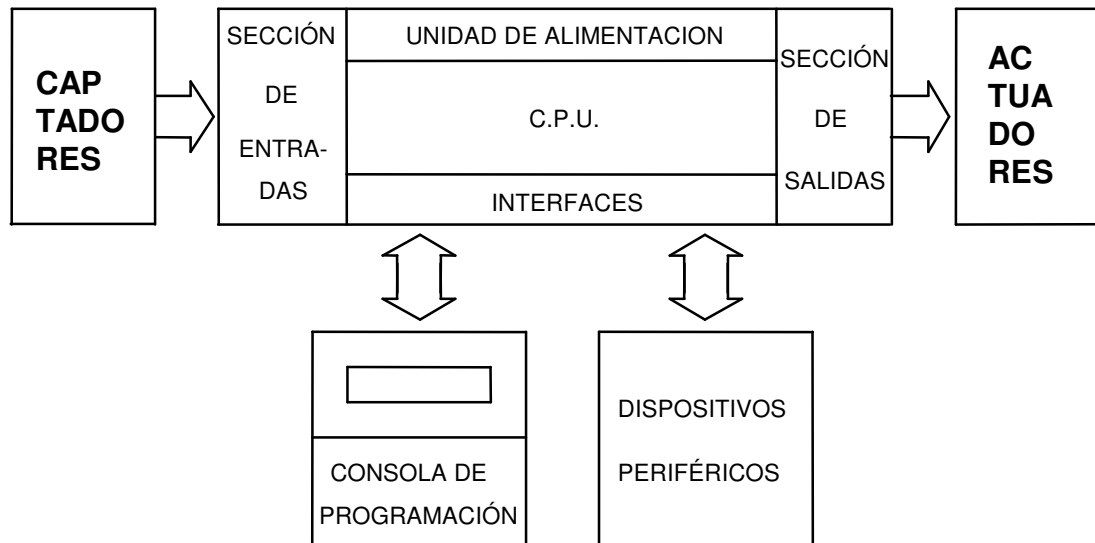


Fig. 4.7: Diagrama de bloques de un autómata programable

8.1. – Sección de entradas

Esta sección adapta y codifica de forma comprensible para la CPU las señales procedentes de los dispositivos de entrada o captadores. También tiene una misión de protección de los circuitos electrónicos internos del autómata.

8.2. – Unidad central de proceso (CPU)

Es la parte inteligente del autómata ya que, mediante la interpretación de las instrucciones del programa de usuario y en función de los valores de las entradas, activa las salidas deseadas.

Las CPU procesan las señales de entrada (procedentes de los pulsadores, sensores, interruptores, etc.) cuando detectan un cambio en una de ellas. Este proceso se realiza de acuerdo con el programa que esté funcionando en ese momento y da lugar a las señales de salida.

La CPU contiene la circuitería de control y también la memoria en la que se almacena el plan de control que guía la operación del equipo. Este es el corazón de autómatas programables y organiza toda la actividad a lo largo del programa de control, procesando las entradas y salidas y ejecutando comandos específicos para salidas específicas.

Desde mediados de los años 70 se usa el microprocesador como elemento principal de las CPU.

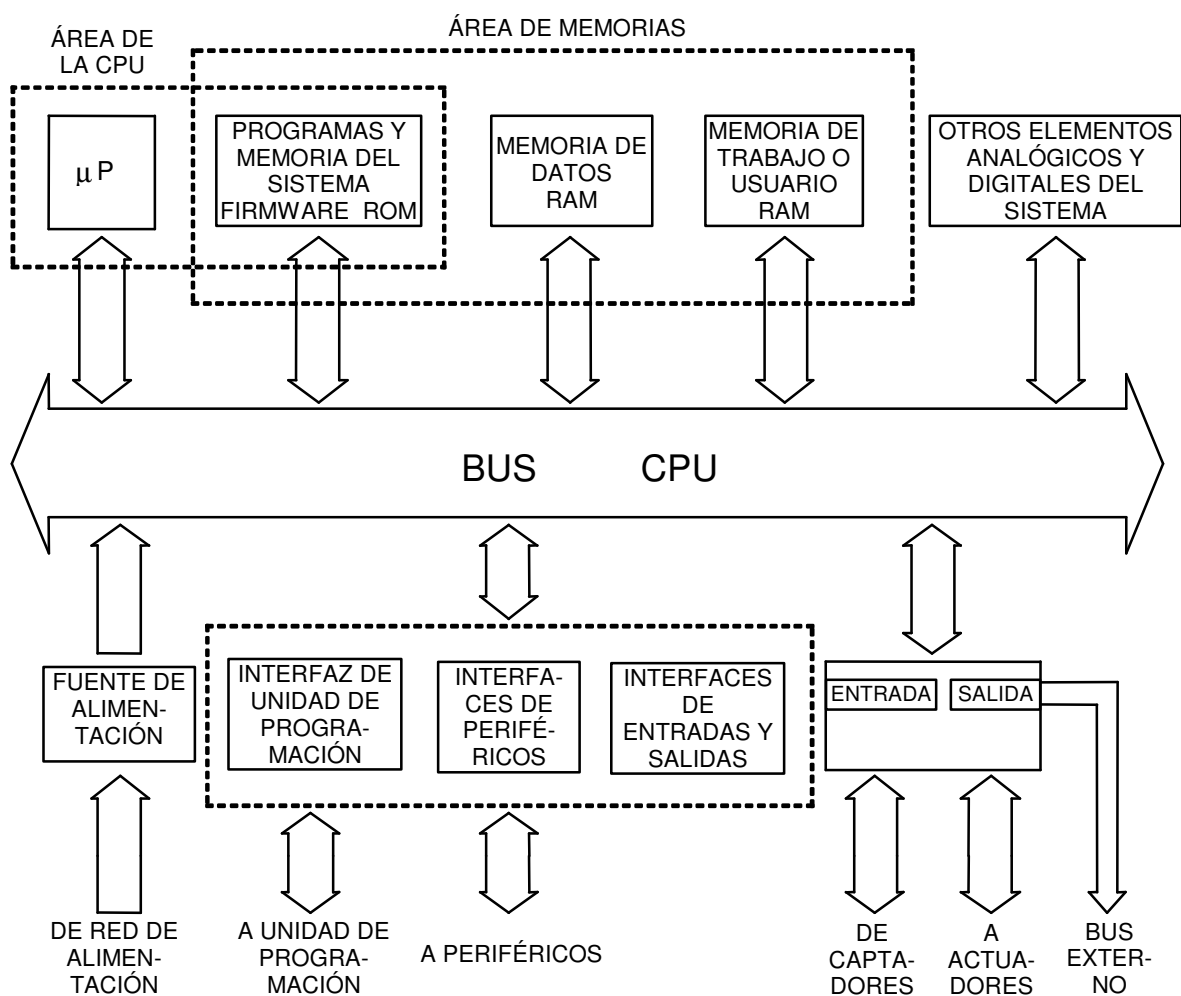


Fig. 4.8: Arquitectura de un autómata programable

8.3. – Sección de salidas

Esta sección, mediante el interface, decodifica las señales procedentes de la CPU, las amplifica y manda con ellas los dispositivos de salida o actuadores.

Para que un autómata sea operativo además debe tener otros elementos como (Fig. 4.8):

- Unidad de alimentación
- Interfaces
- Unidad o consola de programación
- Dispositivos periféricos

UNIDAD DE ALIMENTACIÓN

Adapta la tensión de red (230 V y 50 Hz) a la de funcionamiento de los circuitos electrónicos internos del autómata.

INTERFACES

Son aquellos circuitos que permiten la comunicación de la CPU con los elementos antes descritos.

UNIDAD DE PROGRAMACIÓN

La unidad de programación tiene un teclado y una pantalla (display) y se parece a una calculadora. Cuando se quiere cargar un programa en la CPU, se acopla la unidad de programación a ésta mediante un cable y un conector o bien se enchufa directamente a la CPU (Fig. 4.9a).

Algunos autómatas disponen del interfaz adecuado que permite programarlos desde un ordenador tipo PC (Fig. 4.9b).

PERIFÉRICOS

Son elementos auxiliares y físicamente independientes del autómata que se conectan a él para realizar funciones específicas. No intervienen ni en la elaboración ni en la ejecución del programa.



PLC S7-300. PROGRAMACIÓN EN KOP Y AWL.

Programación de autómatas programables de gama media en diagrama de contactos (KOP) y lista de instrucciones (AWL) mediante el software de programación STEP 7.

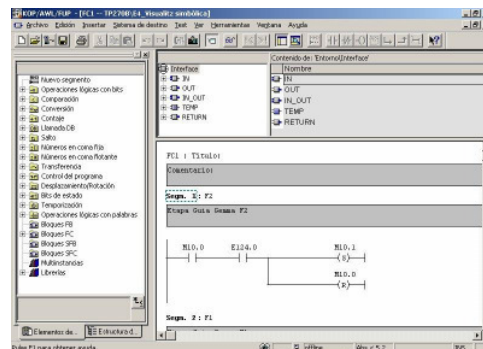
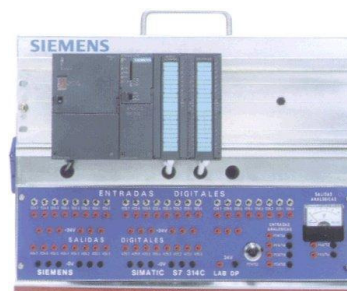


Fig. 4.9: Programación de PLCs:

- a) Mediante una unidad de programación acoplada a un PLC*
- b) Mediante un PC utilizando un software específico*

Algunos de los periféricos que se pueden conectar a un autómata son:

- Impresoras.
- Unidades de cinta o de memoria.
- Monitores.
- Displays (pantallas) y teclados alfanuméricos.
- Lectores de códigos de barras.
- Etcétera.

9. – FUNCIONES DE LOS AUTÓMATAS

9.1. – Funciones combinacionales (lógicas)

9.1.1. – Función serie (AND)

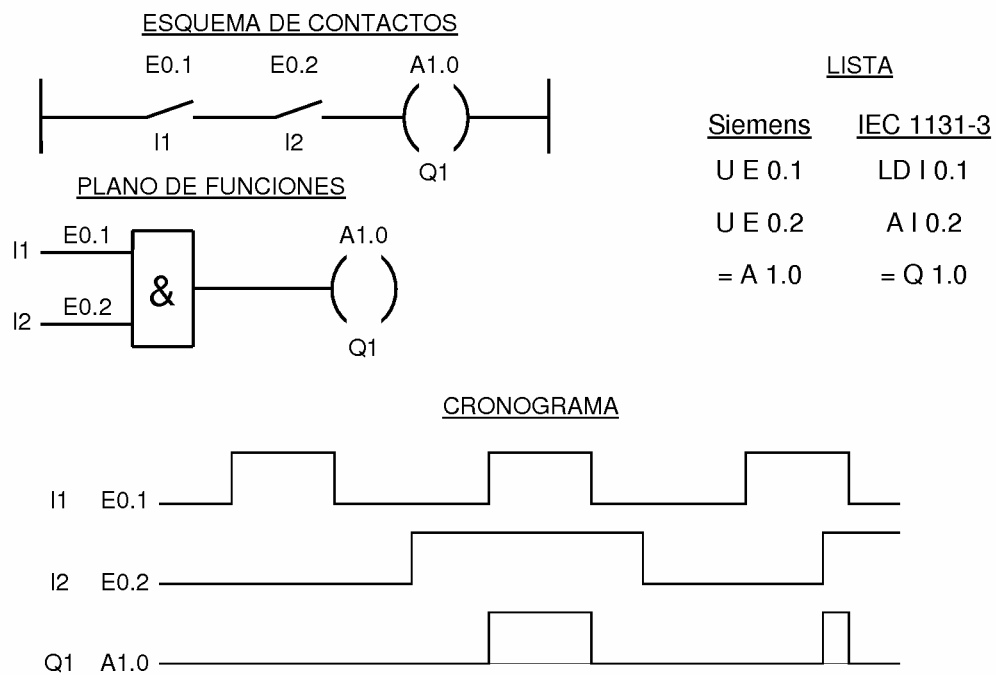


Fig. 4.10: Función AND

Esta función está representada en la Fig. 4.10. En dicha figura se han dibujado el esquema de contactos, el plano de funciones, la lista de instrucciones para un PLC Siemens y el *cronograma* que muestra como evolucionan en el tiempo los valores de las variables.

La salida toma el valor “1” sólo si las dos entradas tienen el valor alto (“1”). Si alguna de las entradas tiene el valor “0” la salida toma el valor bajo (“0”).

9.1.2. – Función paralelo (OR)

Esta función está representada en la Fig. 4.11. Si alguna de las entradas tiene el valor “1” la salida toma el valor alto (“1”). La salida toma el valor “0” sólo si las dos entradas tienen el valor bajo (“0”).

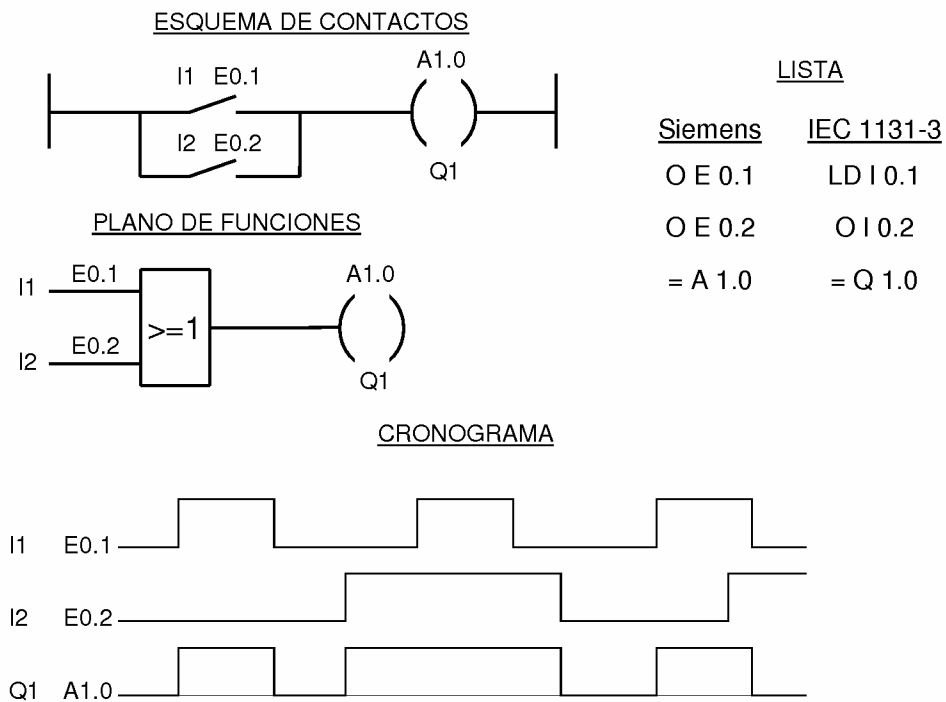


Fig. 4.11: Función OR

9.1.3. – Función negada (NOT)

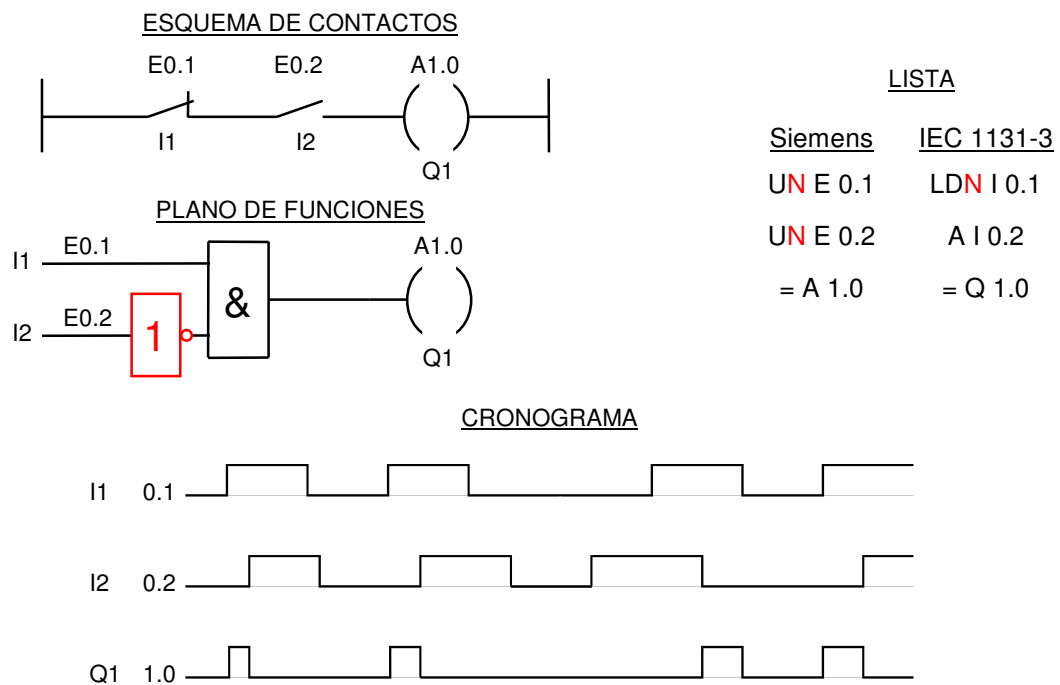


Fig. 4.12: Función AND entre una variable y la otra negada

La función negada (también denominada consulta de señal “0”) o inversión de una variable se representa generalmente mediante la letra N (NOT). Esta función sirve para realizar la inversión de las variables asociadas (señales de entrada, salidas internas y externas, temporizadores, contadores, etc.).

En el plano de funciones la negación se señala mediante un bloque con un circulito a la derecha.

En la Fig. 4.12 se muestra un ejemplo donde se ejecuta la operación AND entre una variable (“0.1”) y otra negada (“0.2”). El ejemplo permite observar que en la salida “1.0” aparecerá el estado de señal “1” activado solamente si la primera entrada “0.1” tiene estado de señal “1” activada y la entrada “0.2” tiene estado de señal “0”. En los demás casos la salida toma el valor “0”.

9.2. – Función memoria (guardamotor)

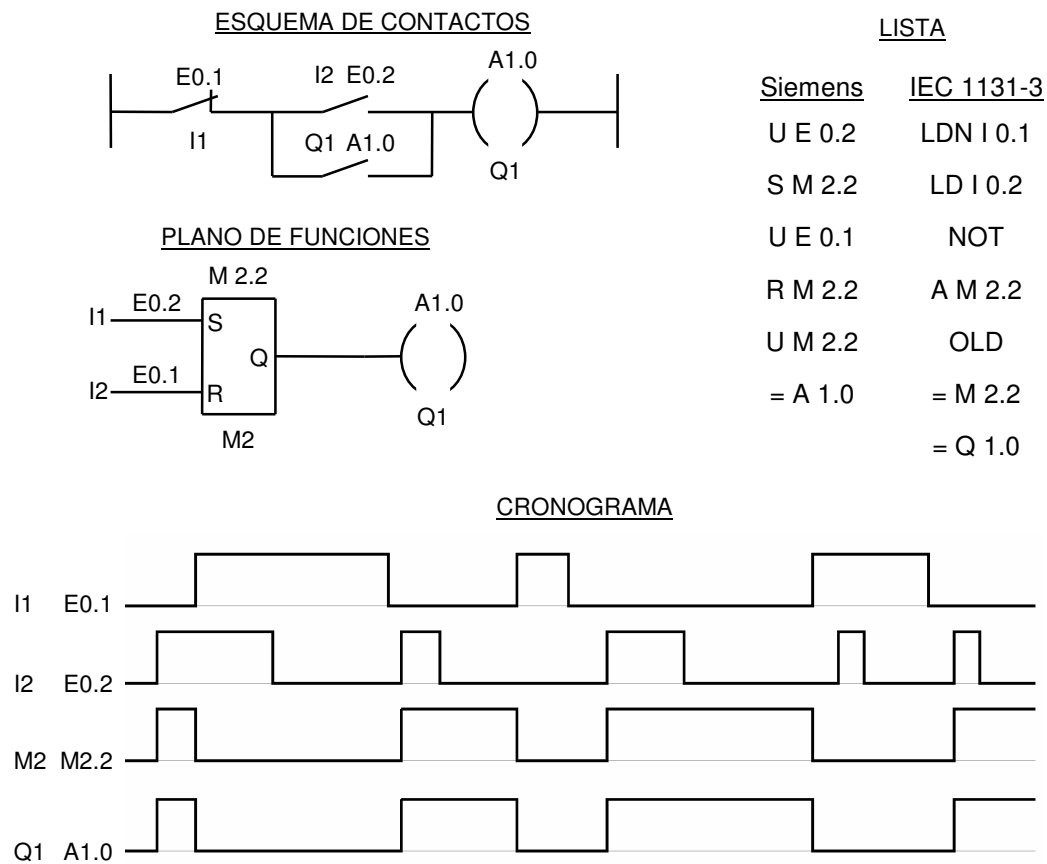
La función memoria funciona como un relé autoalimentado o biestable (Fig. 4.13. Compárese el esquema de contactos de esta figura con el de la Fig. 3.26b, correspondiente a un contactor guardamotor).

Los datos de la función memoria son:

- 1) Entrada del set o activación (“S”).
- 2) Entrada del reset, rearme o desactivación (“R”).
- 3) Salida cuyo estado se desea mantener (“Q”).

Estos datos se han de introducir en un determinado orden dependiendo del modelo de autómatas que se utilice.

Como se aprecia en el cronograma de la Fig. 4.13, el estado de señal “1” en la entrada del set (variable “0.2”) provoca la activación del elemento de memoria (memoria interna “2.2”). Si se cambia esta entrada al estado “0”, permanece el estado de la memoria. Una señal de valor “1” en la entrada del reset (variable “0.1”) provoca el borrado del elemento de memoria. El resultado que se ha almacenado en la memoria interna “2.2” se transfiere a la salida (variable “1.0”).



<u>Siemens</u>	<u>IEC 1131-3</u>
U E 0.2	LDN I 0.1
S M 2.2	LD I 0.2
U E 0.1	NOT
R M 2.2	A M 2.2
U M 2.2	OLD
= A 1.0	= M 2.2
	= Q 1.0

Relé autoenclavador



Breve descripción

Mediante la entrada S se activa la salida Q; Mediante otra entrada R, la salida Q se pone de nuevo a cero.

Conexión	Descripción
Entrada S	A través de la entrada S (Set) se ajusta la salida Q a 1.
Entrada R	A través de la entrada R (Reset) se pone a cero la salida Q. Si S y R son igual a 1 al mismo tiempo, la salida Q se pondrá a cero (la puesta a cero es anterior a la activación).
Parámetros	Remanencia activada (on) = el estado se guarda de forma remanente.
Salida Q	Q se activa con S y permanece conectada hasta que se activa la entrada R.

Fig. 4.13: Función memoria o relé autoalimentado

9.3. – Función de contador

Mediante las funciones de contador se realiza la cuenta directamente por el procesador central. Esta cuenta se puede efectuar tanto hacia adelante como hacia atrás. El campo del contador está limitado a tres décadas (000 a 999).

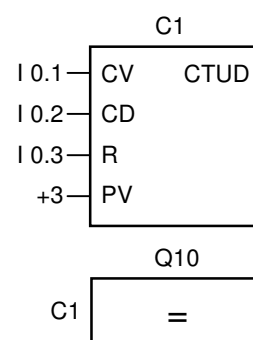
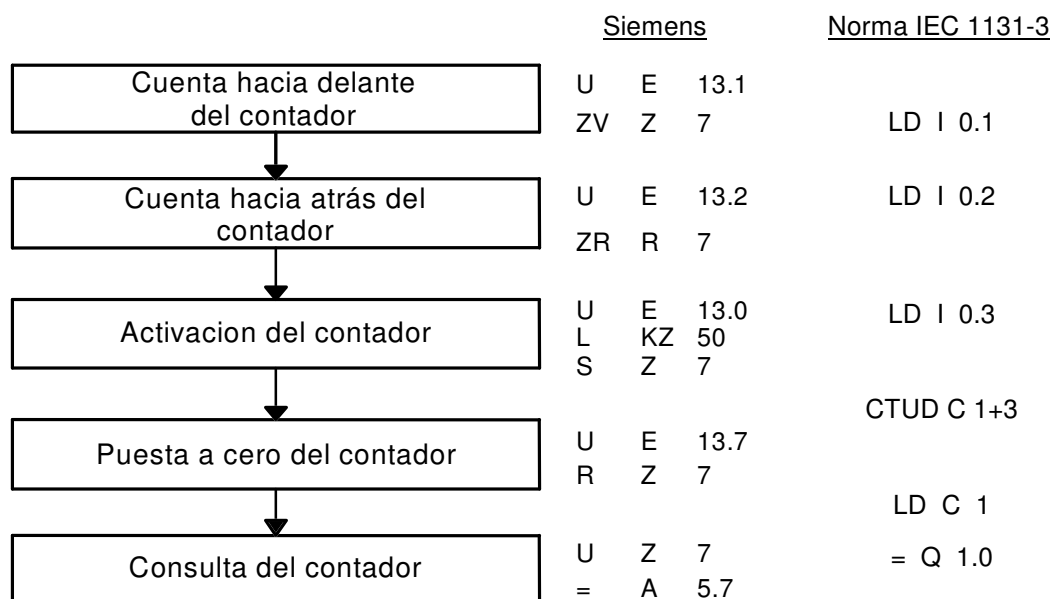


Fig. 4.14: Funciones de contador

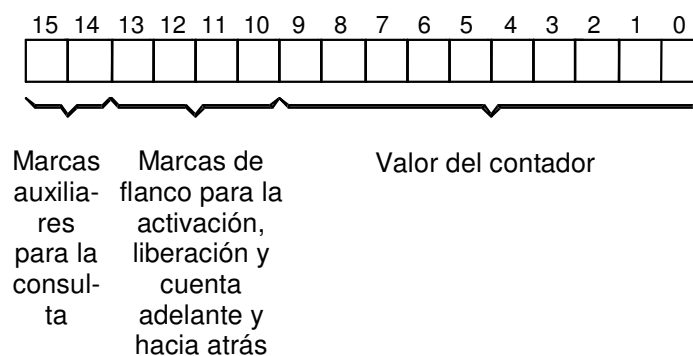
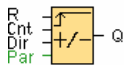


Fig. 4.15: Contador

Contador de avance/retroceso



Breve descripción

Según la parametrización, un impulso de entrada incrementa o decrementa un valor de cómputo interno. Cuando se alcanzan los valores umbral parametrizables, la salida se activa o se reinicia. La dirección de conteo puede cambiarse a través de la entrada Dir.

Conexión	Descripción
Entrada R	A través de la entrada R (Reset) se ponen a cero el valor de conteo interno.
Entrada Cnt	La función cuenta los cambios de estado 0 a 1 en la entrada Cnt. Un cambio de estado de 1 a 0 no se cuenta. Utilice • entradas I5/I6 para procesos de conteo rápidos (sólo en determinados módulos LOGO!, vea el manual de LOGO!); máx. 2 kHz. • cualquier otra entrada o pieza de conexión para frecuencias de conteo reducidas (tip.: 4 Hz).
Entrada Dir	A través de la entrada Dir (Direction) se define el sentido de conteo: Dir = 0: conteo de avance Dir = 1: conteo de retroceso
Parámetros	On: umbral de conexión Margen de valores: 0...999999 Off: umbral de desconexión Margen de valores: 0...999999 Remanencia activada (on) = el estado se guarda de forma remanente.
Salida Q	Q se activa o reinicia independientemente del valor actual Cnt y de los valores umbral ajustados.

Fig. 4.16: Descripción del bloque contador de un PLC Logo de Siemens

Un contador es un área de operandos que representa una palabra de 16 bits, entre los que están los *bits de estado* (necesarios para el funcionamiento del contador) y el *valor del contador*.

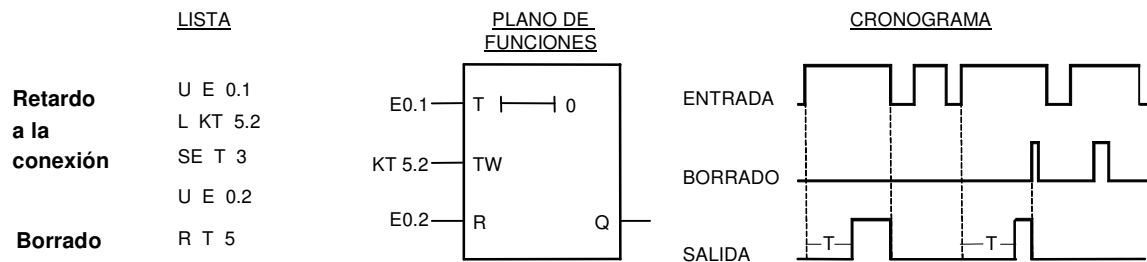
El valor del contador es el propio “contenido” del contador y se corresponde con el estado del contador.

9.4. – Funciones de temporización

Existen varios tipos de funciones de temporización que se describen seguidamente.

9.4.1. – Retardo a la conexión

Si el valor de la entrada (señal “0.1”) sube a “1” el temporizador se pone en marcha y empieza a contar el tiempo. Cuando la entrada tome un valor “0” el temporizador se borra. La salida (borne “Q”) inicialmente vale “0” y cambia a “1” sólo cuando el tiempo ha transcurrido y si todavía se mantiene en la entrada el valor “1”.



Retardo a la conexión



Breve descripción

Con el retardo a la conexión, la salida se activa una vez que ha transcurrido un periodo de tiempo parametrizable.

Conexión	Descripción
Entrada Trg	A través de la entrada Trg (Trigger) se inicia el tiempo para el retardo a la conexión.
Parámetros	T es el tiempo de retardo tras el que se activa la salida (la señal de salida pasa de 0 a 1). Remanencia activada (on) = el estado se guarda de forma remanente.
Salida Q	Q se activa una vez transcurrido el tiempo parametrizado T, si el parámetro Trg sigue activado.

Parámetro T

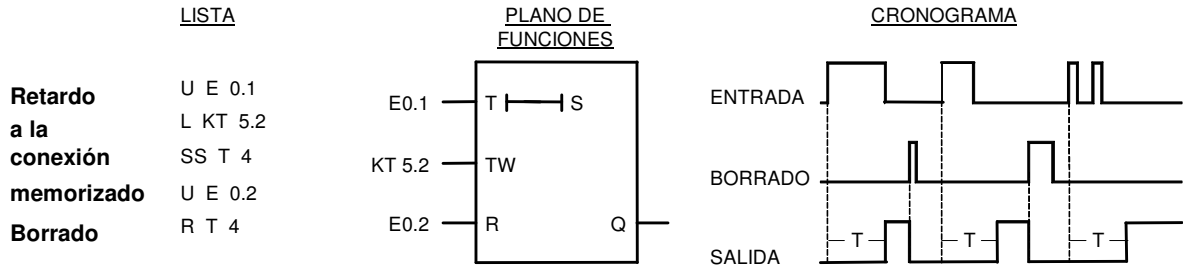
El tiempo predeterminado para el parámetro T también puede ser el valor actual de otra función ya programada. Puede utilizar los valores actuales de las siguientes funciones:

- Comparador analógico
- Conmutador analógico de valor umbral
- Amplificador analógico y

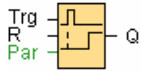
Fig. 4.17: Temporización con retardo a la conexión

9.4.2. – Retardo a la conexión memorizado y borrado

Si el valor de la entrada (señal “0.1”) sube a “1” el temporizador se pone en marcha y empieza a contar el tiempo. La salida (borne “Q”) proporciona un estado de señal “1” después de que haya transcurrido el tiempo, aunque en la entrada no se mantenga el valor “1”. El estado de la señal en la salida será “0” si se borra el temporizador introduciendo el valor “1” en el borne “R” de reset.



Retardo a la conexión memorizado

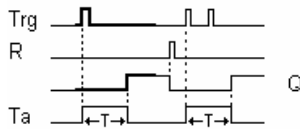


Breve descripción

Tras un impulso de entrada transcurre un tiempo parametrizable, después del cual se activa la salida.

Conexión	Descripción
Entrada Trg	A través de la entrada Trg (Trg significa Trigger) se inicia el tiempo para el retardo a la conexión.
Entrada R	A través de la entrada R (Reset), el tiempo para el retardo a la conexión y la salida se ponen a cero. (Reset tiene preferencia respecto a Trg)
Parámetros	T es el tiempo tras el cual se activa la salida (el estado de la salida pasa de 0 a 1). Remanencia activada (on) = el estado se guarda de forma remanente.
Salida Q	Q se conecta una vez que transcurre el tiempo T.

Cronograma



Descripción de la función

Si la entrada Trg pasa del estado 0 al 1, comienza a transcurrir el tiempo actual Ta. Una vez que el tiempo T alcanza el valor Ta, la salida Q pasa a estado 1. Una nueva conexión de la entrada Trg no tiene efecto sobre Ta.

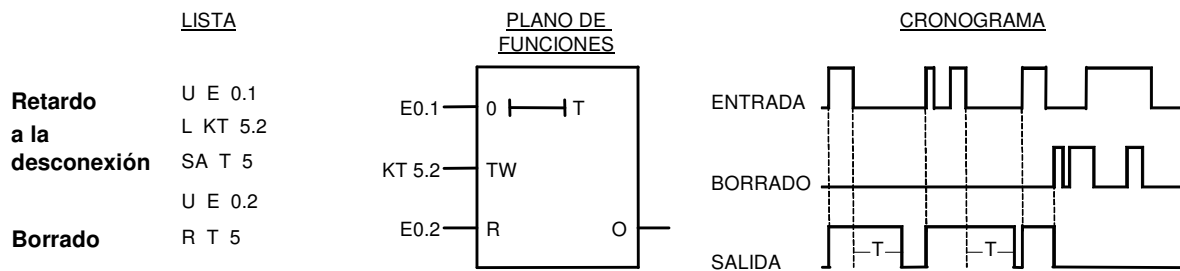
La salida y el tiempo Ta se restablecen nuevamente a 0 cuando la entrada R toma estado 1.

Si la remanencia no está activada, tras una caída de red se restablecerá la salida Q y el tiempo ya transcurrido.

Fig. 4.18: Temporización con retardo a la conexión memorizado y borrado

9.4.3. – Retardo a la desconexión

Si el valor de la entrada (señal “0.1”) baja a “0” el temporizador se pone en marcha y empieza a contar el tiempo. Si la entrada cambia a “1” se borra el temporizador. La salida (borne “Q”) proporciona el estado de la señal “1” mientras está corriendo el tiempo o la entrada es “1”. Después de transcurrido el tiempo la señal de salida valdrá “0”.



Retardo a la desconexión



Breve descripción

Con el retardo a la desconexión, la salida se pone a cero una vez transcurrido un periodo de tiempo parametrizable.

Conexión	Descripción
Entrada Trg	Con el flanco descendente (cambio de 1 a 0) de la entrada Trg (Trg significa Trigger), se inicia el tiempo para el retardo a la desconexión.
Entrada R	A través de la entrada R (Reset), el tiempo para el retardo a la desconexión se pone a cero y la salida se ajusta a 0 (esta entrada tiene preferencia sobre Trg).
Parámetros	T es el tiempo tras el que se desconecta la salida (la señal de salida pasa de 1 a 0). Remanencia activada (on) = el estado se guarda de forma remanente.
Salida Q	Q se conecta con Trg y se mantiene conectada hasta que T haya transcurrido completamente.

Parámetro T

El tiempo predeterminado para el parámetro T también puede ser el valor actual de otra función ya programada. Puede utilizar los valores actuales de las siguientes funciones:

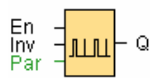
- Comparador analógico
- Conmutador analógico de valor umbral
- Amplificador analógico y
- Contador de retroceso/avance.

Fig. 4.19: Temporización con retardo a la desconexión

9.4.4. – Generador de impulsos

Esta función de tiempo puede ser realizada mediante dos temporizadores de retardo a la conexión y se describe en la Fig. 4.20.

Generador de impulsos asíncrono



Breve descripción

La forma del impulso de la salida se puede modificar a través de la relación parametrizable entre impulso y pausa.

Conexión	Descripción
Entrada En	Mediante la entrada En (Enable) se activa y se desactiva el generador de impulsos asíncrono.
Entrada Inv	La entrada Inv permite invertir la señal de salida del generador de impulsos asíncrono activo.
Parámetros	La duración de impulso T_H y la duración de impulso/pausa T_L se pueden ajustar. Remanencia activada (on) = el estado se guarda de forma remanente.
Salida Q	Q se activa y se desactiva cíclicamente con las cadencias T_H y T_L .

Cronograma



Descripción de la función

Mediante los parámetros (Time High) y TL (Time Low) se pueden ajustar la duración y la pausa de los impulsos.

La entrada INV permite una inversión de la salida. La entrada INV origina una negación de la salida sólo cuando el bloque se ha activado a través de EN.

Fig. 4.20: Generador de impulsos

9.5. – Funciones de comparación

Mediante las funciones de comparación se comparan entre sí los dos valores digitales contenidos en los acumuladores 1 y 2 -sin modificarlos- y el resultado binario de esta operación se traslada a la salida del comparador. La valoración se realiza con funciones binarias o mediante funciones de salto.

9.5.1. – Visión general

Las diferentes comparaciones que se pueden realizar son:

!	=	F	Comparación a igual
>	<	F	Comparación a distinto
>		F	Comparación a mayor
>	=	F	Comparación a mayor o igual
<		F	Comparación a menor
<	=	F	Comparación a menor o igual

Los valores que se encuentran en los acumuladores se interpretan como números de coma fija de 16 bits y se comparan entre sí de acuerdo con ello.



Fig. 4.21: Esquema general de una comparación

El resultado de las funciones de comparación es binario. El estado de señal “1” significa que la comparación se cumple; si la comparación no se cumple se obtiene en la salida el estado de señal “0”. El resultado binario obtenido queda disponible para utilizarlo posteriormente durante la ejecución del programa.

9.5.2. – Comparación a igual

La muestra de bits que se encuentra en el operando de la entrada Z1, se compara con la muestra de bits que se encuentra en el operando de la entrada Z2. Si ambas muestras de bits son iguales se presenta en la salida (borne “Q”) el estado de señal “1”.

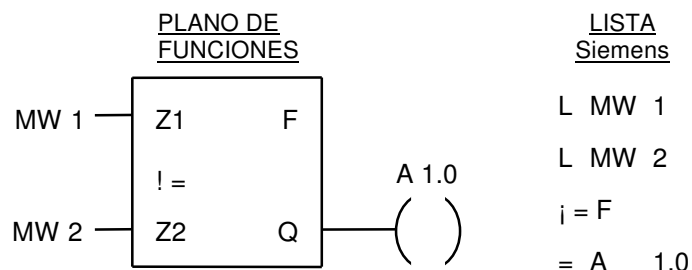


Fig. 4.22: Comparación a igual en PLCs Siemens

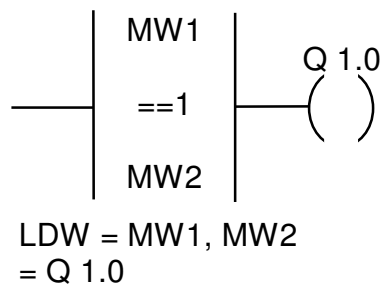


Fig. 4.23: Comparación a igual según la norma IEC 1131-3

9.5.3. – Comparación a distinto

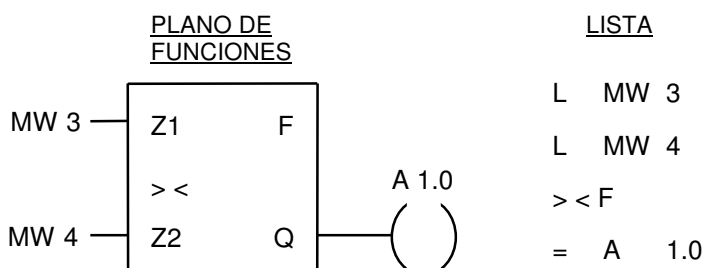


Fig. 4.24: Comparación a distinto en PLCs Siemens

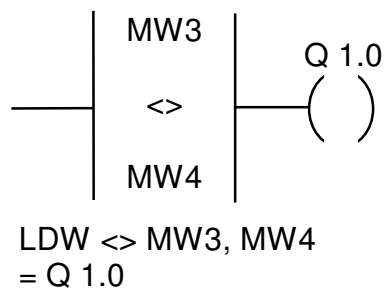


Fig. 4.25: Comparación a distinto según la norma IEC 1131-3

La muestra de bits que se encuentra en el operando de la entrada Z1, se compara con la muestra de bits que se encuentra en el operando de la entrada Z2. Si ambas muestras de bits son distintas se presenta en la salida (borne “Q”) el estado de señal “1”.

9.5.4. – Comparación a mayor

Los contenidos de ambos operandos (Z1 y Z2) se interpretan de acuerdo con la correspondiente representación numérica “coma fija” y se comparan entre sí. La salida (borne “Q”) presentara el estado de señal “1” cuando el contenido del operando Z1 sea mayor que el contenido del operando Z2.

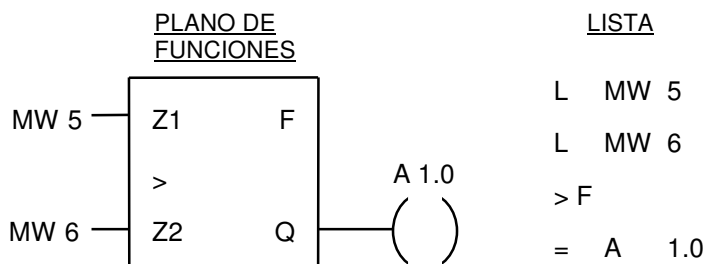


Fig. 4.26: Comparación a mayor en PLCs Siemens

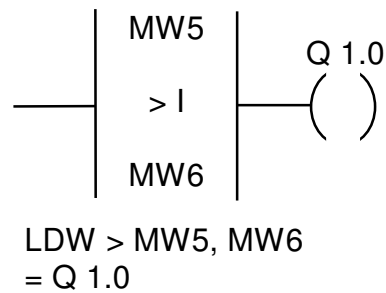
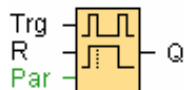


Fig. 4.27: Comparación a mayor según la norma IEC 1131-3



Breve descripción

Interruptor con dos funciones diferentes:

- Interruptor de impulsos con desconexión diferida
- Pulsador (alumbrado continuo)

Conexión	Descripción
Entrada Trg	A través de la entrada Trg (Trigger) se activa la salida Q (alumbrado continuo) o se desconecta con retardo a la desconexión. Si la salida Q está activada, se puede volver a poner a cero con Trg.
Entrada R	A través de la entrada R reinicia el tiempo actual (Ta) y la salida a 0.
Parámetros	T es el tiempo tras el cual la salida se desconecta (estado de la salida cambia de 1 a 0). T_L es el tiempo de duración que debe estar activada la entrada para activar la función de alumbrado continuo. T_i es el tiempo determinado para el inicio del tiempo de advertencia de desconexión. T_{IL} es la longitud del tiempo de advertencia de desconexión. Remanencia activada (on) = el estado se guarda de forma remanente.
Salida Q	La salida Q se activa con Trg y se vuelve a desactivar según la longitud del impulso en Trg después de un tiempo parametrizable o se pone a cero al accionarse de nuevo Trg.

Fig. 4.28: Ejemplo de telerruptor

9.6. – Telerruptor

Un telerruptor es un interruptor gobernado a distancia mediante impulsos. La salida cambia de estado cada vez que se produce un impulso en la entrada (Fig. 4.28).

10. – EJEMPLOS DE PROGRAMACIÓN

A continuación se presentan algunos ejemplos de circuitos cuyo mando se realiza mediante un autómeta.

10.1. – Guardamotor mediante funciones combinacionales

En este apartado se va a realizar, mediante un autómeta programable, el mando de un contactor guardamotor. Para ello se va a utilizar una lógica similar a la explicada con relés en el apartado 8.1 del capítulo 3.

El circuito de fuerza es el mismo que el del capítulo 3 (Fig. 3.26a) y la conexión del autómeta es la indicada en la Fig. 4.29.

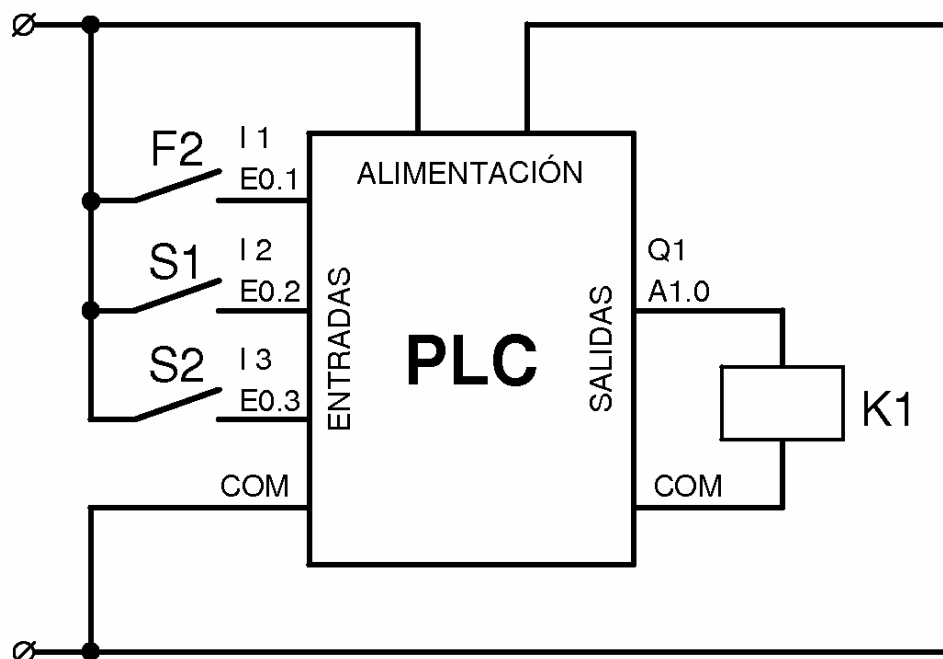


Fig. 4.29: Conexión de un PLC para el mando del contactor guardamotor de la Fig. 3.26a

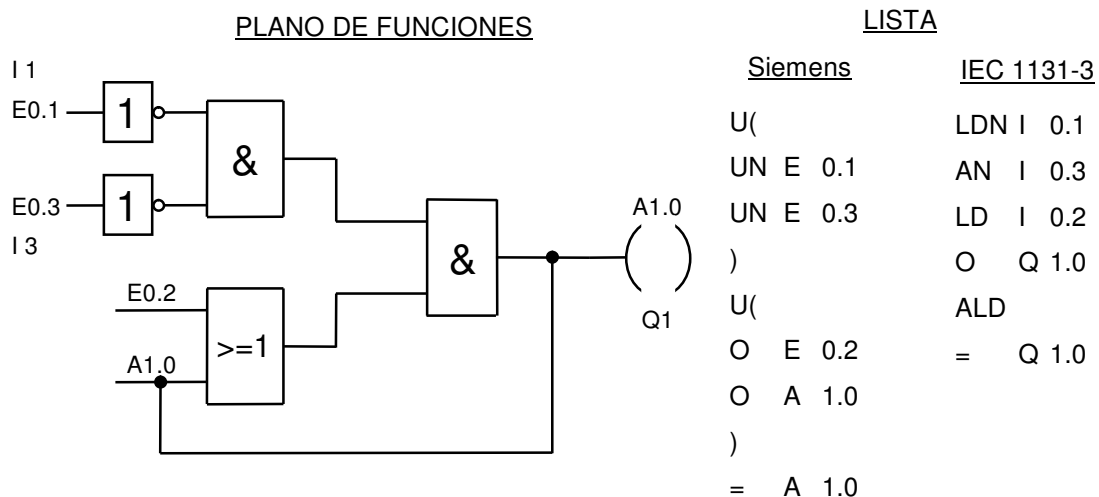


Fig. 4.30: Programa de un PLC para reproducir el circuito de mando de la Fig. 3.26b

Como se puede apreciar en la Fig. 4.29 se ha asociado un contacto n.a. de la protección térmica F2 a la entrada “0.1” del autómatas. Análogamente, los pulsadores de puesta en marcha S1 y de parada S2, se asocian a las entradas “0.2” y “0.3” del PLC, respectivamente. El contactor K1 se conecta a la salida “1.0” del autómatas.

Si se quiere reproducir el circuito de mando con relés de la Fig. 3.26b mediante un programa a base de funciones secuenciales se obtienen el plano de funciones y la lista de instrucciones (si se trata de un autómatas Siemens o según la norma IEC 1131-3) de la Fig. 4.30.

10.2. – Guardamotor utilizando funciones de memoria

Se puede aprovechar la potencia de las funciones avanzadas de un autómatas y mejorar el programa descrito en el apartado anterior. Así, con el autómatas conectado como se indicó en la Fig. 4.29 y el circuito de fuerza de la Fig. 3.26a se puede utilizar el programa descrito en la Fig. 4.31.

Supóngase que la protección térmica sólo posee un contacto nc., lo que obliga a conectar el autómatas según se indica en la Fig. 4.32.

Esta forma de conexión requiere que el programa sea modificado introduciendo la función NOT para la entrada asociada a la protección F2 (la entrada “0.1”). Así pues, el programa queda como se indica en la Fig. 4.33.

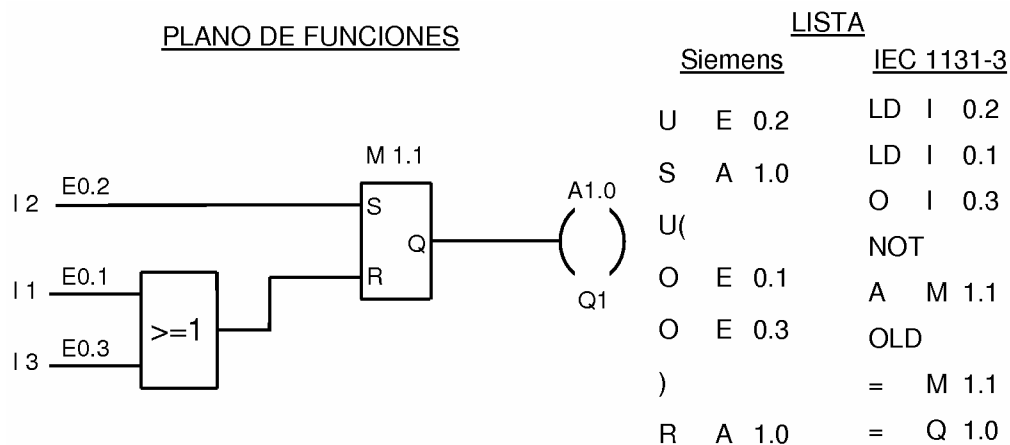


Fig. 4.31: Programa de un PLC para el mando de un contactor guardamotor

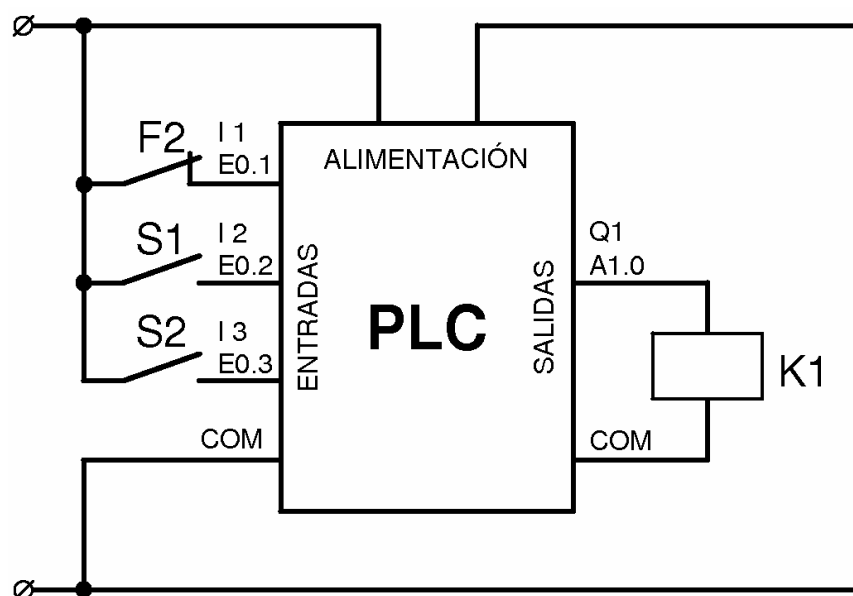


Fig. 4.32: Conexión de un PLC para el circuito de fuerza de la Fig. 3.26a cuando la protección térmica F2 sólo tiene un contacto n.c.

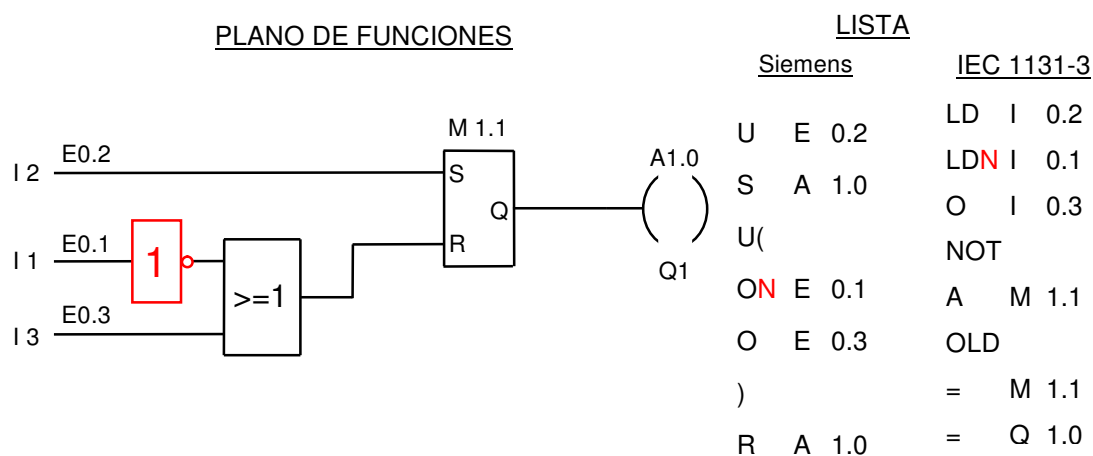


Fig. 4.33: Programa de un PLC conectado según la Fig. 4.32 para el mando de un contactor guardamotor

10.3. – Inversor

En este apartado se va a realizar, mediante un autómata programable, el mando de un inversor sin temporización. Para ello se va a utilizar una lógica similar a la explicada con relés en el apartado 8.2 del capítulo 3.

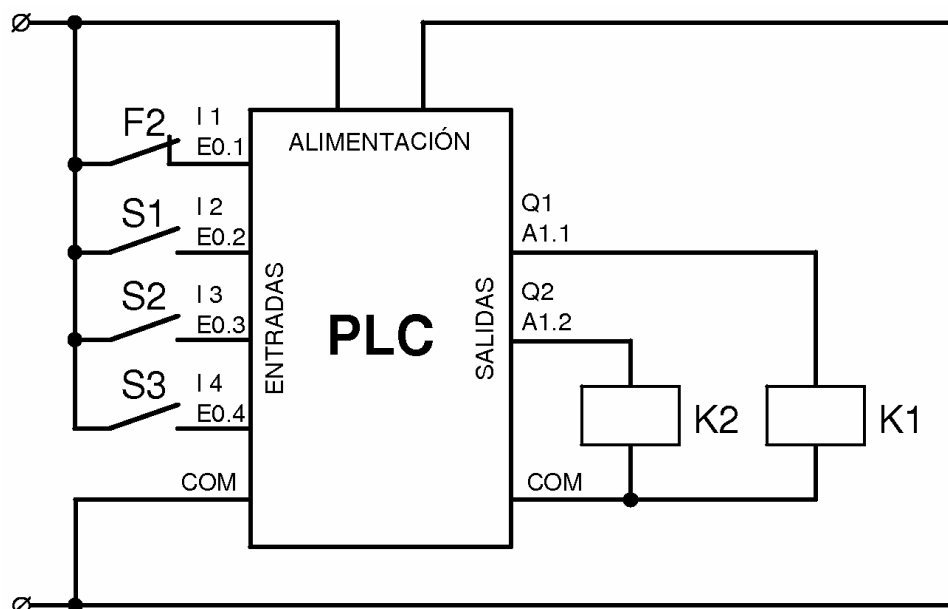


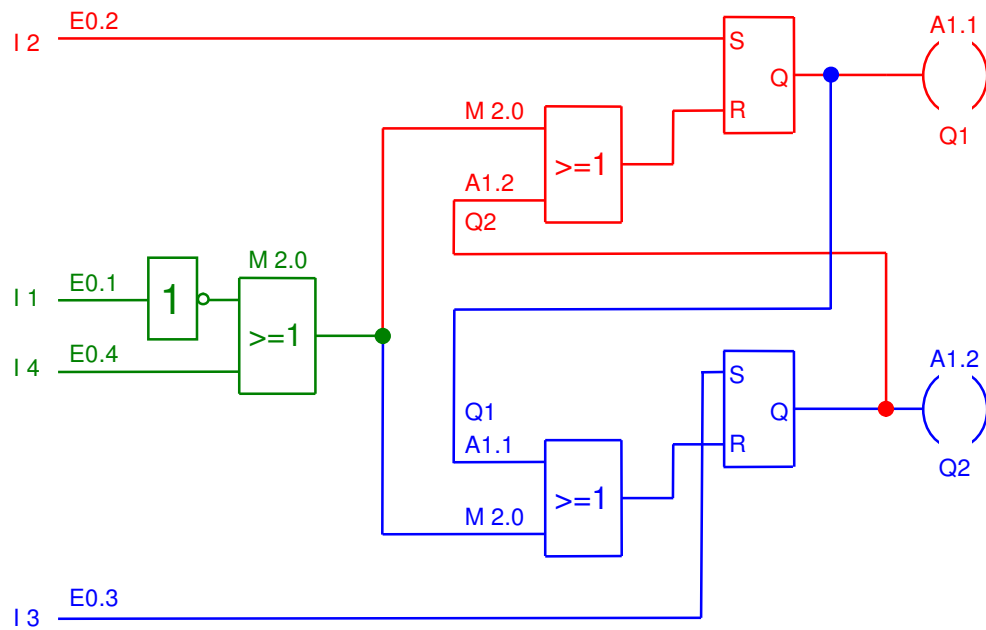
Fig. 4.34: Conexión de un PLC para el circuito de fuerza de la Fig. 3.28a cuando la protección térmica F2 sólo tiene un contacto n.c.

El circuito de fuerza es el mismo que el del capítulo 3 (Fig. 3.28a) y la conexión del autómata es la indicada en la Fig. 4.34.

Como se puede apreciar en la Fig. 4.34 se ha asociado un contacto n.c. de la protección térmica F2 a la entrada “0.1” del autómata, pues se supone que esta protección carece de contactos n.a. Las entradas “0.2”, “0.3” y “0.4” del autómata se asocian a contactos n.a de los pulsadores de giro en sentido horario S1, de giro en sentido antihorario S2, y de parada S3, respectivamente. El contactor de giro en sentido horario K1 se conecta a la salida “1.1” del autómata y el contactor de giro antihorario K2 se conecta a la salida “1.2”.

En la Fig. 4.35 se muestra el programa que se debe introducir en el PLC. Este programa se corresponde con el circuito de mando con relés de la Fig. 3.28b y, en consecuencia, incluye un enclavamiento entre las salidas “1.1” y “1.2” (asociadas a los contactores K1 y K2). Nótese que se ha utilizado la función negada con la entrada “0.1” y que se ha utilizado la variable interna “M 2.0” para almacenar la combinación OR de las entradas “0.1” negada y “0.4”.

PLANO DE FUNCIONES



LISTA

Siemens	IEC 1131-3
ON E 0.1	LDN I 0.1
O E 0.4	LD I 0.4
= M 2.0	= M 2.0
U E 0.2	LD I 0.2
S A 1.1	LD Q 1.2
U(	O M 2.0
O M 2.0	NOT
O A 1.2	A Q 1.1
)	OLD
R A 1.1	= Q 1.1
U E 0.3	LD I 0.3
S A 1.2	LD Q 1.1
U(	O M 2.0
O M 2.0	NOT
O A 1.1	A Q 1.2
)	OLD
R A 1.2	= Q 1.2

Fig. 4.35: Programa de un PLC conectado según la Fig. 4.34 para el mando de un inversor (Fig. 3.28a)

11. – BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAYOL I BADIA, ALBERT. “Autómatas programables”. Colección Productica. Marcombo, S.A. Barcelona.1988.
- [2] MANDADO, E.; MARCOS, J. y PÉREZ LÓPEZ, S. A. “Controladores lógicos y autómatas programables”. Marcombo. Barcelona. 1992.
- [3] OMRON. “SYSMAC C20K/C28K/C40K/C60K Manual técnico”.
- [4] PORRAS, A.; MONTANERO, A. P. “Autómatas programables”. Mc Graw-Hill/Interamericana de España, S.A. Madrid. 1990.
- [5] SIEMENS. “SIMATIC S5. Autómata programable S5-100U. Manual CPU 100/102/103”.
- [6] SIEMENS. “SIMATIC S5. S5-155U. CPU 948. Manual de programación”.
- [7] SIEMENS. “Ayuda del programa Logo Soft Comfort v5.0”.

Capítulo 5:

TRANSFORMADORES

- 1. – DESCRIPCIÓN DE UN TRANSFORMADOR**
- 2. – AUTOTRANSFORMADORES**
- 3. – VALORES ASIGNADOS O NOMINALES**
- 4. – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO**
- 5. – TRANSFORMADOR EN CARGA**
- 6. – ENSAYOS DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO**
- 7. – ENSAYOS DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**
- 8. – BIBLIOGRAFÍA**

TRANSFORMADORES

1. – DESCRIPCIÓN DE UN TRANSFORMADOR

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados¹ de corriente alterna arrollados sobre un núcleo magnético (Fig. 5.1). El devanado por donde entra energía al transformador se denomina *primario* y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina *secundario*. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí (véanse las Figs. 5.2 y 5.3). De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador.

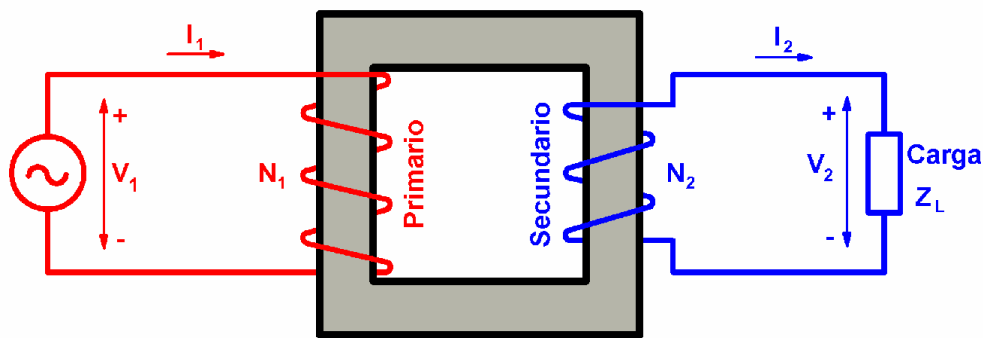


Fig. 5.1: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico

Al conectar una tensión alterna V_1 al primario, circula una corriente por él que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético, en virtud de la Ley de Faraday, induce en el secundario una fuerza electromotriz (f.e.m.) E_2 que da lugar a una tensión V_2 en bornes de este devanado. De esta manera se consigue transformar una tensión alterna de valor eficaz V_1 en otra de valor eficaz V_2 y de la misma frecuencia. Nótese que esta máquina sólo vale para transformar tensiones alternas, pero no sirve para tensiones continuas.

En las Figs. 5.2 se muestran dos transformadores *monofásicos*. El transformador de la Fig. 5.2a es un transformador monofásico de *columnas*. En este transformador el núcleo magnético tiene forma rectangular y consta de dos *columnas* (donde se arrollan los devanados) y

¹ Los términos *devanado*, *bobinado* y *arrollamiento* son sinónimos y en este texto se utilizarán indistintamente.

dos *yugos o culatas*, todos de igual sección. Aunque para facilitar el análisis teórico del transformador se suele dibujar con un devanado arrollado sobre una columna y el otro sobre la otra columna (Fig. 5.1), la realidad es que en un transformador de columnas se bobina primero el devanado de menor tensión (el devanado de *baja tensión* (B.T.)) repartido entre las dos columnas (mitad en una columna y mitad en la otra), se coloca una capa de material aislante sobre este primer devanado y se bobina ahora el devanado de mayor tensión (el devanado de *alta tensión* (A.T.)) sobre el anterior y también repartido mitad en una columna y mitad en la otra. De esta manera se reducen los flujos de dispersión (debidos a las líneas de campo magnético generadas por un devanado y que no llegan al otro). En la Fig. 5.2b se muestra un transformador monofásico *acorazado*, el cual tiene un núcleo magnético de tres columnas, teniendo la columna central doble sección que las otras columnas y que los yugos. Los dos devanados se bobinan sobre la columna central, uno sobre el otro y con una capa aislante intermedia.

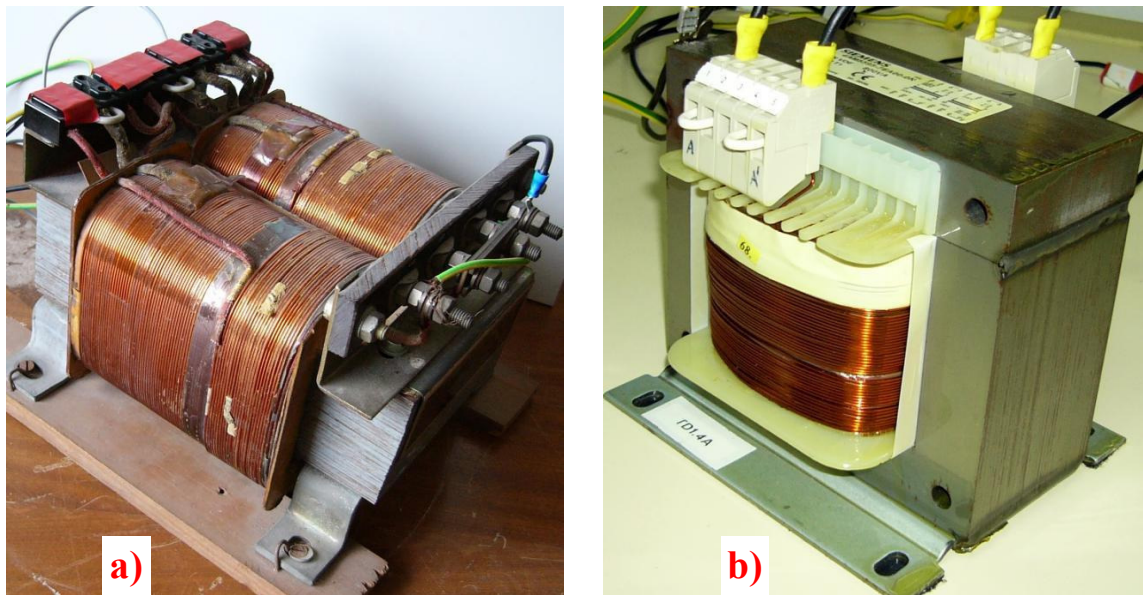


Fig. 5.2: Transformadores monofásicos: *a)* De columnas; *b)* Acorazado

Los transformadores *trifásicos* más habituales suelen ser *de tres columnas* (Fig. 5.3). El núcleo magnético de estos transformadores tiene tres columnas de igual sección e igual a la de los yugos. Sobre cada columna se bobinan (uno sobre el otro con una capa de aislamiento intermedia) los dos devanados (primario y secundario) de una de las fases. Las tres fases del primario se conectan entre sí en estrella, en triángulo o mediante una conexión especial denominada *zig-zag*. Análogamente sucede con las tres fases del secundario.

También existen otros tipos de transformadores trifásicos: *de cinco columnas* (con dos columnas adicionales sin devanados a ambos lados del núcleo magnético) y *acorazados*.

En una red trifásica, además de un transformador trifásico, también se puede utilizar un *banco de tres transformadores monofásicos*. Los primarios de los tres transformadores monofásicos se pueden conectar en estrella o en triángulo y lo mismo pasa con los secundarios.

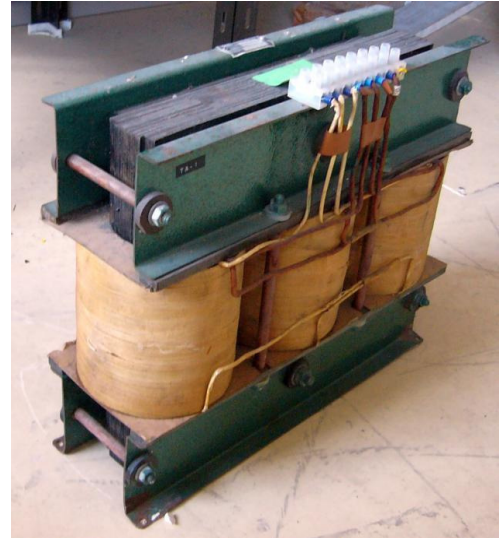
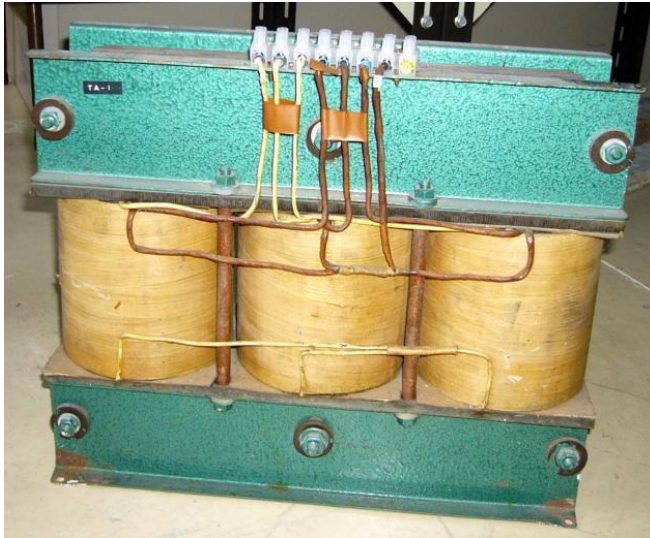


Fig. 5.3: Transformador trifásico de tres columnas



Fig. 5.4: Transformadores en baño de aceite

Las Figs. 5.2 y 5.3 muestran varios *transformadores secos*. En ellos el calor generado durante el funcionamiento de la máquina se evacua a través de su superficie externa. Para potencias superiores se suelen utilizar *transformadores en baño de aceite* (Fig. 5.4), los cuáles tienen su parte activa (núcleo magnético y devanados) en el interior de una cuba llena de aceite mineral o aceite de siliconas. En estos transformadores el aceite realiza una doble función: aislante y refrigerante. El calor generado por la parte activa del transformador se transmite al aceite y este evacua el calor al aire ambiente a través de la superficie externa de la cuba. Para facilitar la transmisión de calor a través de la cuba ésta posee aletas o radiadores que aumentan su superficie externa. En algunos casos el aceite es refrigerado por otro fluido (por ejemplo, agua) a través de un intercambiador de calor.

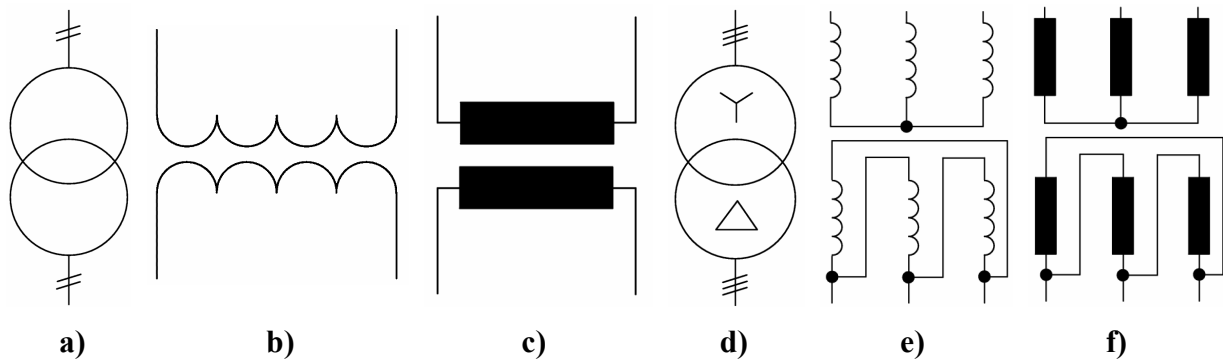


Fig. 5.5: *Símbolos de transformadores*

En la Fig. 5.5 se muestran algunos de los símbolos empleados para representar transformadores. Los tres primeros se refieren a transformadores monofásicos y los tres últimos son transformadores trifásicos.

2. – AUTOTRANSFORMADORES

Un autotransformador es un transformador especial que para cada fase tiene un único devanado que actúa a la vez de primario y de secundario (Fig. 5.6).

Al tener un solo devanado para el primario y el secundario un autotransformador es más barato que un transformador convencional y, además, tiene menos pérdidas, esto es, mejor rendimiento, y una caída de tensión menor.

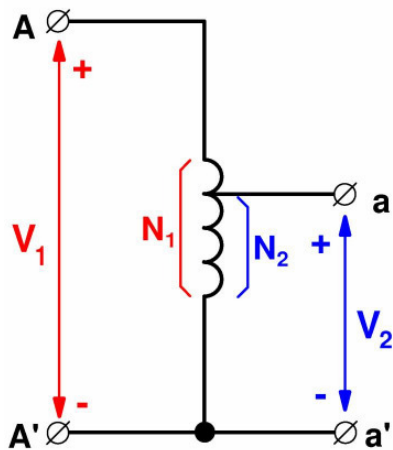


Fig. 5.6: Autotransformador monofásico

Un autotransformador frente a un transformador normal presenta el inconveniente de que en el caso de producirse un cortocircuito aparecen corrientes de falta muy elevadas.

Sin embargo, el principal inconveniente de un autotransformador es que no existe aislamiento entre los circuitos primario y secundario de cada fase. En un transformador normal los dos devanados de una fase están aislados entre sí. Son circuitos que están ligados a través de un campo magnético, pero eléctricamente están separados. Sin embargo, en un autotransformador este

aislamiento no existe; pues se trata del mismo devanado que actúa a la vez como primario y como secundario.

Así, tomando un caso extremo, si el autotransformador de la Fig. 5.6 tiene una relación de transformación de 10000/100 V sucede que entre los terminales A y A' hay 10000 V y entre los terminales a y a' hay 100 V, siendo A' = a' el borne común. Si el terminal A, por accidente, queda conectado a tierra sucede que, como entre A y A' hay 10000 V, el punto A' está a una tensión de 10000 V con respecto a tierra. Esto significa que el lado de B.T. entre a y a' hay 100 V, pero a' se encuentra a 10000 V con respecto a tierra. Es decir, en un circuito de B.T. pueden aparecer tensiones muy elevadas con respecto a tierra, lo cual resulta muy peligroso.

Para reducir este riesgo el punto común (A' = a') debe conectarse a tierra y las tensiones del primario y del secundario no deben ser muy diferentes entre sí. Sólo se admite que las tensiones de los circuitos primario y secundario sean muy diferentes si en ambos circuitos no hay ningún punto con una tensión superior a 250 V con respecto a tierra.

Hay autotransformadores en los que el terminal a no es fijo sino que se mueve mediante un cursor. Esto permite variar la relación de transformación del autotransformador y, por lo tanto, obtener una tensión secundaria variable a voluntad. Este tipo de autotransformadores se denomina *variac* y en ellos el núcleo magnético de cada fase suele tener forma de toro alrededor del cual se bobina el arrollamiento que hace de primario y de secundario a la vez (Figs. 5.7 y 5.8).



Fig. 5.7: Variac monofásico

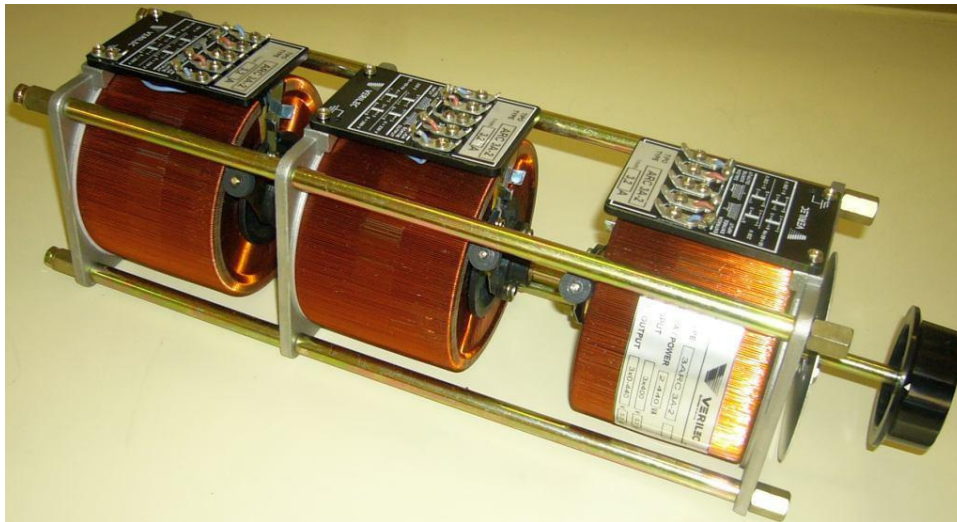


Fig. 5.8: Variac trifásico

3. – VALORES ASIGNADOS O NOMINALES

Las *tensiones asignadas o nominales* (V_{1N} , V_{2N}) son aquellas para las que se ha diseñado el transformador.

La *potencia asignada o nominal* (S_N) es la potencia aparente del transformador que el fabricante garantiza que no produce calentamientos peligrosos durante un funcionamiento continuo. Los dos devanados del transformador tienen la misma potencia asignada.

Las *corrientes nominales o asignadas* (I_{1N} , I_{2N}) se obtienen a partir de las tensiones asignadas y de la potencia asignada. Así, en un transformador monofásico se tiene que:

$$S_N = V_{1N} \cdot I_{1N} = V_{2N} \cdot I_{2N} \quad (5.1)$$

y en un transformador trifásico se verifica que:

$$S_N = \sqrt{3} V_{1NL} \cdot I_{1NL} = \sqrt{3} V_{2NL} \cdot I_{2NL} = 3 V_{1N} \cdot I_{1N} = 3 V_{2N} \cdot I_{2N} \quad (5.2)$$

La *relación de transformación* (m) es el cociente entre las tensiones asignadas del primario y del secundario. En un transformador monofásico este cociente es igual a la relación entre los números de espiras de los devanados primario (N_1) y secundario (N_2) y, además, las f.e.m.s (E_1 y E_2) inducidas por el flujo común sobre los devanados del transformador son proporcionales al número de espiras de cada devanado. Por lo tanto, teniendo en cuenta todo lo anterior y la relación (5.1) se deduce lo siguiente:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (5.3)$$

En un transformador trifásico funcionando con cargas equilibradas cada columna se comporta como un transformador monofásico. Así, cuando un banco o un transformador trifásico funciona con cargas equilibradas, todos los transformadores monofásicos del banco o todas las columnas del transformador están igualmente cargados y bastará con estudiar uno solo de ellos para conocer también el comportamiento de los otros dos. Hay que tener en cuenta, entonces, que las tensiones y corrientes a utilizar en dicho estudio deberán ser las de fase del primario y del secundario y que la potencia a emplear es la tercera parte de la total. De esta manera, todas las expresiones que se utilizan para el análisis del transformador monofásico se pueden adaptar para el estudio de las transformaciones trifásicas con cargas equilibradas.

Esto conduce a que en un transformador trifásico se distingan dos relaciones de transformación. La *relación de transformación* (m) es el cociente entre las tensiones asignadas de fase del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (5.4)$$

La *relación de transformación de tensiones* (m_T) es la que normalmente se da como dato y es el cociente entre las tensiones asignadas de línea del primario y del secundario. Por lo tanto, teniendo en cuenta la relación (5.2) se deduce lo siguiente:

$$m_T = \frac{V_{1NL}}{V_{2NL}} = \frac{I_{2NL}}{I_{1NL}} \quad (5.5)$$

Así pues, se utilizará la relación de transformación m_T para ligar tensiones e intensidades de línea del primario y del secundario y se usará m para relacionar tensiones e intensidades de fase del primario y del secundario.

La relación entre m y m_T depende de la forma de conexión de los dos devanados del transformador o del banco trifásico:

- Estrella - estrella: $m_T = m$
- Estrella - triángulo: $m_T = \sqrt{3} \ m$
- Triángulo - estrella: $m_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \ m$
- Triángulo - triángulo: $m_T = m$ (5.6)
- Estrella - zigzag: $m_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \ m$
- Triángulo - zigzag: $m_T = \frac{2}{3} \ m$

4. – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

El circuito equivalente de un transformador representa de una manera sencilla y bastante exacta el funcionamiento de un transformador real.

4.1. – Separación de los efectos de las resistencias y de los flujos de dispersión

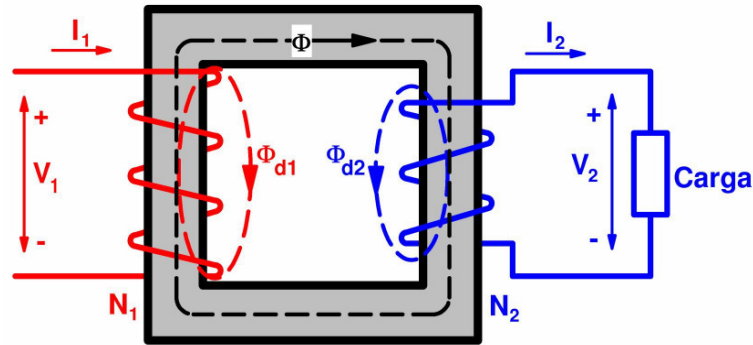


Fig. 5.9: Transformador en carga

En la Fig. 5.9 está representado un transformador real en carga. Para las corrientes y los flujos se ha adoptado un criterio de signos tal que cuando la corriente de primario, I_1 , es positiva crea un flujo común, Φ , positivo; pero una corriente secundaria, I_2 , positiva genera un flujo Φ negativo. Los devanados tienen unas resistencias R_1 y R_2 y en ellos se generan unos flujos de dispersión Φ_{d1} y Φ_{d2} , además del flujo común Φ . El flujo Φ_{d1} es la parte del flujo generado en el devanado primario que no es abrazada por el devanado secundario y el flujo Φ_{d2} es la parte del flujo creado en el devanado secundario que no es abrazada por el devanado primario. Las líneas de campo magnético correspondientes a los flujos de dispersión tienen un recorrido que incluye el núcleo magnético del transformador (de hierro), pero también el aire y/o el aceite que rodea al núcleo.

Los flujos Φ_{d1} y Φ_{d2} circulan en gran medida fuera del hierro y sólo son debidos a una de las corrientes I_1 e I_2 , respectivamente. Por consiguiente, su efecto equivale al de unas bobinas con coeficientes de autoinducción prácticamente constantes dados por estas relaciones:

$$L_{d1} = N_1 \frac{\Phi_{d1}}{I_1} \quad L_{d2} = N_2 \frac{\Phi_{d2}}{I_2} \quad (5.7)$$

que dan lugar a las reactancias de dispersión X_1 y X_2 en los devanados:

$$X_1 = 2 \pi f L_{d1} \quad X_2 = 2 \pi f L_{d2} \quad (5.8)$$

Por lo tanto, para facilitar su análisis, el transformador de la Fig. 5.9 se lo sustituye por otro ideal en el que los devanados carecen de resistencia y de flujo de dispersión, pero al que se han conectado en serie con cada devanado una resistencia y una autoinducción para que se comporte como el transformador real de la Fig. 5.9. Así se obtiene el transformador de la Fig. 5.10.

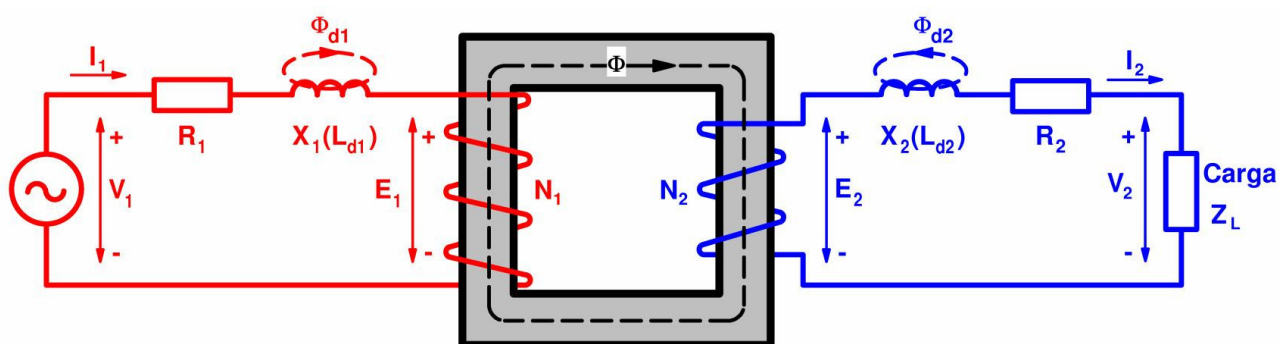


Fig. 5.10: Separación de las resistencias y de las reactancias de dispersión en el transformador de la Fig. 5.9.

En el transformador de la Fig. 5.10 se verifican las siguientes relaciones:

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_1 &= \bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_1 + j X_1 \bar{I}_1 \\ \bar{E}_2 &= \bar{V}_2 + R_2 \bar{I}_2 + j X_2 \bar{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

En estas expresiones las magnitudes E_1 y E_2 son las fuerzas electromotrices² (f.e.m.s) inducidas, en virtud a la Ley de Faraday, por el flujo común Φ sobre los devanados primario y secundario, respectivamente.

² En realidad, si se utiliza el convenio de signos representado en la Fig. 5.10, E_1 y E_2 son *fuerzas contraelectromotrices* (f.c.e.m.s).

4.2. – Marcha en vacío

Un transformador se dice que funciona *en vacío* (Fig. 5.11) cuando su primario se conecta a la tensión asignada (V_{1N}) y su secundario se deja en circuito abierto (luego, $I_2 = 0$). Cuando el transformador funciona en vacío se denominan I_0 , P_0 , $\cos \phi_0$ y V_{20} a la corriente primaria, a la potencia absorbida por el primario, al factor de potencia en el primario y a la tensión en bornes del secundario, respectivamente.

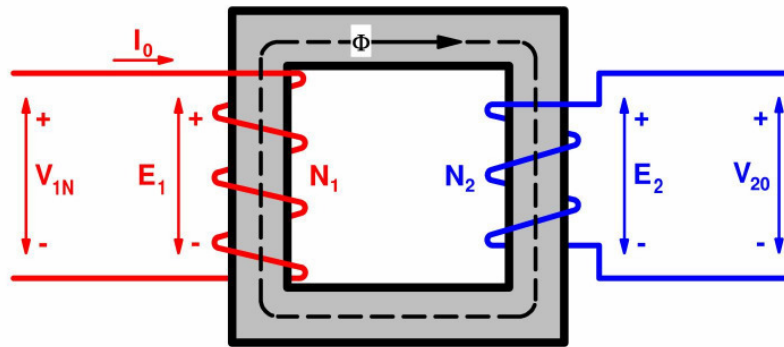


Fig. 5.11: Transformador en vacío

La corriente de vacío en régimen permanente es tan pequeña que se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario (caídas de tensión en la reactancia de dispersión X_1 y en la resistencia R_1 del devanado primario) y aceptar que:

$$I_0 \ll \rightarrow \bar{V}_1 = \bar{E}_1 \quad (5.10)$$

Por otra parte, en vacío la corriente del secundario es nula, luego

$$I_2 = 0 \rightarrow \bar{V}_{20} = \bar{E}_2 \quad (5.11)$$

Luego, teniendo en cuenta la relación (5.3) se deduce que

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_{1N}}{V_{20}} \quad V_{20} = V_{2N} \quad (5.12)$$

Un transformador en carga absorbe por el primario la potencia activa P_1 . Una pequeña parte de esta potencia se pierde en la propia máquina, provocando su calentamiento, y el resto es la potencia activa P_2 que el transformador suministra por el secundario a las cargas alimentadas por él. En los devanados de la máquina se producen las denominadas *pérdidas en el cobre* en el primario y en el secundario, P_{Cu1} y P_{Cu2} , que son las debidas al efecto Joule cuando circulan las corrientes I_1 e I_2 por las resistencias R_1 y R_2 , respectivamente, de estos devanados. La potencia de pérdidas en el cobre totales, P_{Cu} , es la suma de las pérdidas en el cobre del primario y del secundario ($P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2}$). Además, en el núcleo magnético del transformador se producen las denominadas *pérdidas en el hierro*, P_{Fe} , que son las pérdidas magnéticas debidas a los fenómenos de la histéresis magnética y de las corrientes de Foucault.

En vacío la potencia suministrada por el secundario (P_2) y las pérdidas en el cobre en el secundario (P_{Cu2}) son nulas (pues I_2 es nula) y las pérdidas en el cobre en el primario (P_{Cu1}) son muy pequeñas (pues I_0 es muy pequeña). Luego, en vacío la potencia activa consumida por el primario (P_0) prácticamente es igual a las pérdidas que se producen en el núcleo magnético o pérdidas en el hierro (P_{Fe}) de la máquina:

$$P_0 = P_{Fe} \quad (5.13)$$

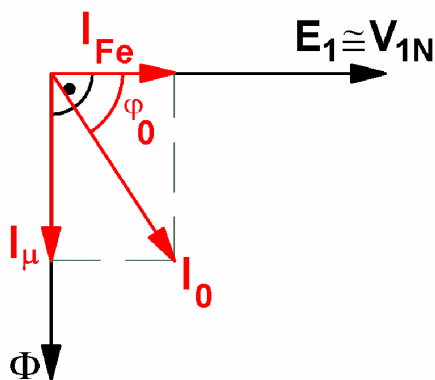


Fig. 5.12: Diagrama fasorial de un transformador en vacío

Por consiguiente, durante la marcha en vacío el diagrama fasorial del transformador es el representado en la Fig. 5.12. En esta figura se observa que la corriente de vacío $\bar{I}_0$ se puede separar en dos componentes perpendiculares entre sí: una, $\bar{I}_{Fe}$, está en fase con la tensión del primario y es debida a las pérdidas en el hierro, P_{Fe} , y la otra, $\bar{I}_\mu$, está en fase con el flujo común, $\bar{\Phi}$, y es la que genera dicho flujo. Luego, se tiene que:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_\mu \quad (5.14)$$

4.3. – Ecuación del circuito magnético

En vacío el flujo Φ es originado únicamente por la corriente I_0 , mientras que en carga es debido a la acción conjunta de las corrientes I_1 e I_2 . Si en ambos estados la tensión primaria es la misma (la tensión asignada V_{1N}), el flujo Φ prácticamente conserva el mismo valor y, en consecuencia, se verifica que:

$$N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_0 \rightarrow \bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \bar{I}_2 \quad (5.15)$$

En esta expresión el efecto de la corriente secundaria I_2 está afectado de un signo negativo debido al convenio de signos adoptado para las corrientes y los flujos.

4.4. – Reducción al primario

La reducción al primario consiste en un cambio de variable en las magnitudes del secundario. Las *magnitudes secundarias reducidas al primario* I'_2 , V'_2 , Z'_2 , R'_2 y X'_2 se obtienen mediante las relaciones (5.16).

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}'_2 &= m \bar{V}_2 \\ \bar{I}'_2 &= \frac{\bar{I}_2}{m} \\ Z'_L &= \frac{V'_2}{I'_2} = m^2 Z_L \\ R'_2 &= m^2 R_2 \\ X'_2 &= m^2 X_2 \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

En la reducción del primario al secundario se conservan los ángulos de fase y se puede comprobar que con la reducción del secundario al primario las potencias activa, reactiva y aparente del secundario no varían:

$$\left. \begin{aligned} S_2 &= V_2 I_2 = V_2 m \frac{I_2}{m} = V_2' I_2' \\ P_2 &= V_2 I_2 \cos \varphi_2 = V_2' I_2' \cos \varphi_2 \\ Q_2 &= V_2 I_2 \sin \varphi_2 = V_2' I_2' \sin \varphi_2 \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

En la reducción del secundario al primario también se conservan los valores del flujo común Φ y de las pérdidas en la máquina. Por consiguiente, el rendimiento no cambia.

De lo anterior se deduce que el comportamiento de un transformador se puede analizar utilizando los valores reales de las magnitudes del secundario o los valores reducidos al primario. Con los dos sistemas se obtienen los mismos resultados, pero resulta más cómodo trabajar con valores reducidos al primario.

4.5. – Circuito equivalente

Trabajando con las magnitudes del secundario reducidas al primario, las expresiones (5.9), (5.14) y (5.15) que representan el comportamiento del transformador se convierten en estas otras:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + \bar{I}'_2 \\ \bar{I}_0 &= \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_\mu \\ \bar{V}_1 &= \bar{E}_1 + \bar{I}_1 (R_1 + j X_1) \\ \bar{E}'_2 &= \bar{E}_1 = \bar{V}'_2 + \bar{I}'_2 (R'_2 + j X'_2) \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

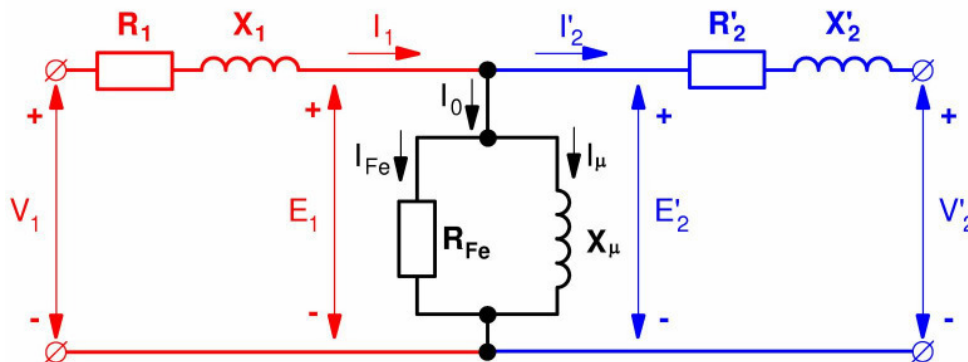


Fig. 5.13: Circuito equivalente de un transformador

El circuito equivalente de un transformador monofásico está representado en la Fig. 5.13. Se puede comprobar que este circuito equivalente verifica las relaciones (5.18) y, por lo tanto, refleja fielmente el funcionamiento del transformador.

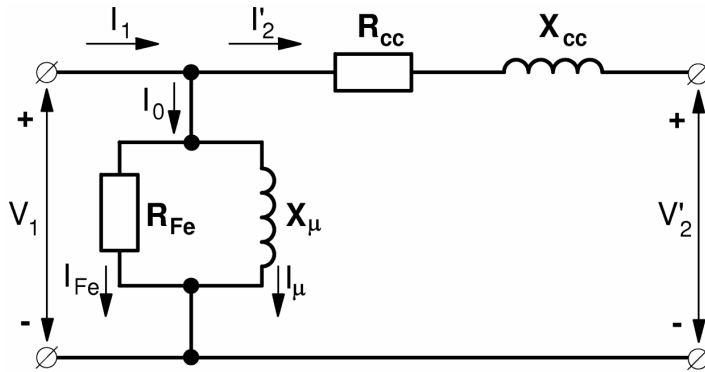
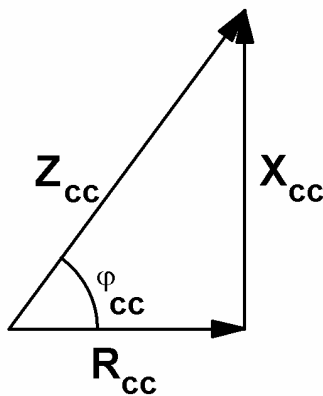


Fig. 5.14: Circuito equivalente aproximado de un transformador

Normalmente se utiliza el circuito equivalente aproximado de la Fig. 5.14 porque es más fácil de operar con él y el error que se comete es poco importante, dada la pequeñez de la intensidad de vacío, I_0 , comparada con la intensidad asignada, I_{1N} , del primario del transformador. En este circuito equivalente aproximado se utilizan estos parámetros:

$$R_{cc} = R_1 + R_2' \quad X_{cc} = X_1 + X_2' \quad (5.19)$$



Se denomina *impedancia de cortocircuito* $\bar{Z}_{cc}$ a:

$$\bar{Z}_{cc} = R_{cc} + j X_{cc}$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (5.20)$$

La *tensión relativa de cortocircuito* ϵ_{cc} se define así:

Fig. 5.15: Relación entre

R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc}

$$\epsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} 100 = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} 100 \quad (5.21)$$

V_{1cc} es la *tensión de cortocircuito* que se mide en el ensayo de cortocircuito (apartado 6.2).

5. – TRANSFORMADOR EN CARGA

Usualmente un transformador funciona a plena carga (suministrando la potencia asignada, S_N) o con una fracción de esta, con la consiguiente variación de sus características con respecto a la marcha de vacío. En este apartado se va a analizar el comportamiento de un transformador en carga y alimentado por el primario a la tensión asignada, V_{1N} .

Teniendo en cuenta las relaciones (5.3) y (5.15) se comprende que la existencia de la corriente de vacío, I_0 , hace que entre las corrientes secundaria, I_2 , y primaria, I_1 , no se guarde exactamente la relación de transformación m . Ahora bien, como ya se indicó en el apartado 4.2, la corriente I_0 es pequeña frente a la corriente asignada I_{1N} (el valor de I_0 no suele superar el 5% de I_{1N}) y, en consecuencia, la corriente de vacío se puede despreciar para cargas superiores a los $\frac{3}{4}$ de la asignada. Así pues, para estas cargas el cociente entre las corrientes I_2 e I_1 es igual a la relación de transformación m :

$$I_1 \geq 0,75 I_{1N} \rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (5.22)$$

Mediante el circuito equivalente aproximado de la Fig. 5.14 y la primera de las relaciones (5.16) se comprende que la caída de tensión que la corriente I'_2 origina en R_{cc} y X_{cc} provoca que en carga no se guarde exactamente la relación de transformación m entre las tensiones primaria, V_1 , y secundaria, V_2 . Esto no sucede en vacío donde, como ya se indicó en el apartado 4.2, sucede que

$$\text{Vacío: } I'_2 = 0 \rightarrow V'_{20} = m V_{20} = V_{1N} \rightarrow \frac{V_{1N}}{V_{20}} = m \rightarrow V_{20} = V_{2N} \quad (5.23)$$

En carga, la tensión secundaria V_2 se aparta del valor en vacío V_{20} . La diferencia entre ambas magnitudes depende de los parámetros del transformador, de la corriente I_2 y de su factor de potencia. Para cargas de tipo inductivo o resistivo, la tensión V_2 tiene un valor eficaz inferior a V_{20} , lo que significa que se produce una caída de tensión en el secundario cuando la máquina

pasa de estar en vacío a estar en carga. Sin embargo, con cargas capacitivas puede producirse (no siempre, depende de la carga) el denominado *efecto Ferranti* y la tensión secundaria en carga, V_2 , alcanza un valor eficaz superior al que tenía en vacío, V_{20} , y se produce, entonces, una subida de tensión secundaria cuando la máquina pasa de estar en vacío a estar en carga.

Como ya se indicó en el apartado 4.2, en un transformador en carga se absorbe la potencia activa P_1 por el primario, se suministra la potencia P_2 por el secundario y se producen las pérdidas en el cobre P_{Cu1} en el devanado primario y P_{Cu2} en el secundario y las pérdidas en el hierro P_{Fe} en el núcleo magnético. La suma de las pérdidas en el cobre del primario y del secundario es la potencia de pérdidas en el cobre totales, P_{Cu} . En consecuencia, se cumplen las siguientes relaciones:

$$P_1 = P_2 + P_{Cu} + P_{Fe} ; \quad P_2 = P_1 - P_{Cu} - P_{Fe} \quad (5.24)$$

$$\text{Transf. monofásico: } P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = R_1 I_1^2 + R'_2 I_2^2 \approx R_{cc} I_2^2 \approx R_{cc} I_1^2 \quad (5.25a)$$

$$\text{Transf. trifásico: } P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = 3 R_1 I_1^2 + 3 R'_2 I_2^2 \approx 3 R_{cc} I_2^2 \approx 3 R_{cc} I_1^2 \quad (5.25a)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \quad (5.26)$$

η es el *rendimiento* del transformador.

6. – ENSAYOS DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

6.1. – Ensayo de vacío

Este ensayo consiste en alimentar al transformador a la tensión asignada por uno de sus devanados, dejando el otro en circuito abierto, y medir la tensión que aparece en ambos devanados y la corriente y la potencia en el devanado por donde se alimenta a la máquina. De las medidas realizadas en este ensayo se pueden deducir la relación de transformación m y los parámetros R_{Fe} y X_μ del circuito equivalente del transformador.

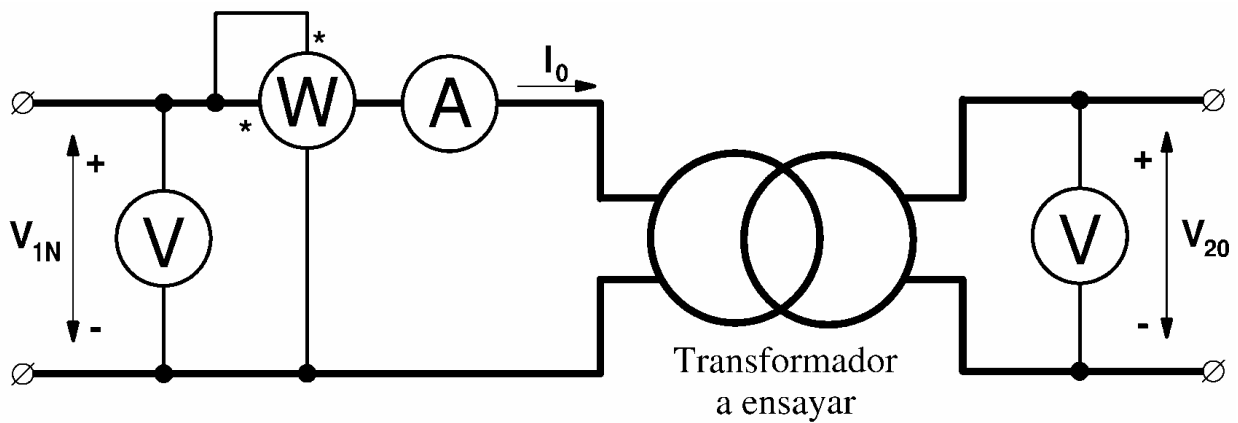


Fig. 5.16: Circuito para el ensayo de vacío

En la Fig. 5.16 se muestra el circuito que permite realizar el ensayo de vacío de un transformador monofásico cuando se lo alimenta por el primario. En algunos casos el amperímetro y el circuito amperimétrico del vatímetro se conectan al circuito a través de un transformador de intensidad. Análogamente, los voltímetros y el circuito voltimétrico del vatímetro se pueden conectar a través de transformadores de tensión.

Es evidente que si el ensayo se realiza alimentando al transformador por el primario (Fig. 5.16), la máquina se encuentra en el mismo estado de marcha en vacío descrito en el apartado 4.2. Por lo tanto, las magnitudes medidas durante este ensayo serán las siguientes:

$$V_{1N} \quad I_0 \quad P_0 \quad V_{20}$$

En consecuencia, la expresión (5.12) indica que mediante este ensayo se puede determinar la *relación de transformación* m de la máquina mediante este cociente:

$$\boxed{m = \frac{V_{1N}}{V_{20}}} \quad (5.27)$$

Durante la marcha en vacío el circuito equivalente aproximado del transformador (Fig. 5.14) se reduce al representado en la Fig. 5.17, pues la corriente en el secundario I_2 es nula. En la Fig. 5.18 se ha repetido el diagrama fasorial del transformador en vacío que se obtuvo previamente en el apartado 4.2.

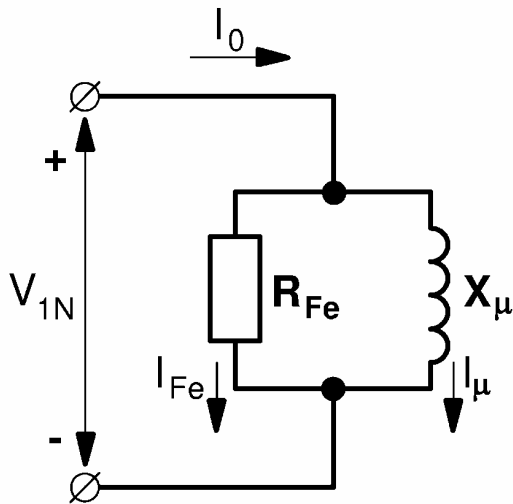


Fig. 5.17: Circuito equivalente durante el ensayo de vacío

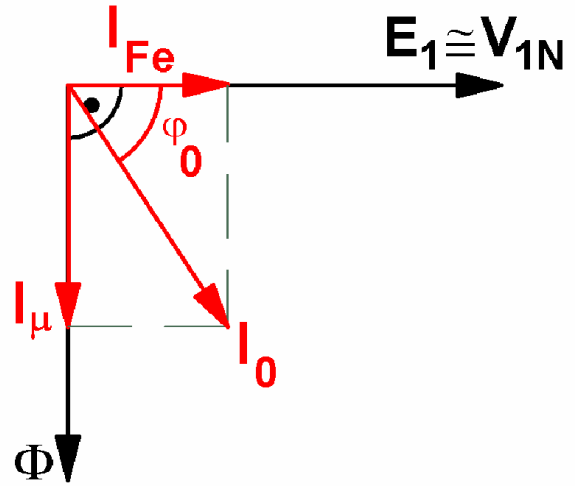


Fig. 5.18: Diagrama fasorial durante el ensayo de vacío

El factor de potencia, $\cos \varphi_0$, durante la marcha en vacío se puede obtener así:

$$P_0 = V_{1N} I_0 \cos \varphi_0 \quad \rightarrow \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_{1N} I_0} \quad (5.28)$$

Del diagrama fasorial de la Fig. 5.18 se deduce que:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 \quad (5.29a)$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 \quad (5.29b)$$

Finalmente, aplicando la Ley de Ohm en el circuito equivalente de la Fig. 5.17 se obtienen estas expresiones para calcular los parámetros de la rama en paralelo del circuito equivalente:

$$\boxed{R_{Fe} = \frac{V_{1N}}{I_{Fe}}} \quad (5.30a)$$

$$\boxed{X_{\mu} = \frac{V_{1N}}{I_{\mu}}} \quad (5.30b)$$

En el caso de que el ensayo se realice alimentando al transformador por el secundario y dejando abierto el bobinado primario, las magnitudes que se medirán serán

$$V_{20} \quad I_{20} \quad P_0 \quad V_{1N}$$

La potencia seguirá siendo la misma (e igual a las pérdidas en el hierro del transformador) que cuando se lo ensaya por el primario, pero la corriente es distinta. Se demuestra que

$$m = \frac{I_{20}}{I_0} \rightarrow I_0 = \frac{I_{20}}{m} \quad (5.31)$$

Luego, si el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el secundario, se calculará mediante la fórmula (5.26) la corriente I_0 que se hubiera obtenido de realizar el ensayo por el primario y, de esta manera, se podrán seguir empleando las relaciones (5.28) a (5.30).

6.2. – Ensayo de cortocircuito

Este ensayo consiste en cortocircuitar uno de los devanados del transformador y alimentarlo por el otro con una tensión reducida de forma que por él circule su corriente asignada. En este ensayo se miden la tensión, la corriente y la potencia en el devanado por donde se alimenta la máquina. De las medidas realizadas en este ensayo se pueden obtener los parámetros, R_{cc} y X_{cc} , de la rama en serie del circuito equivalente aproximado del transformador (Fig. 5.14).

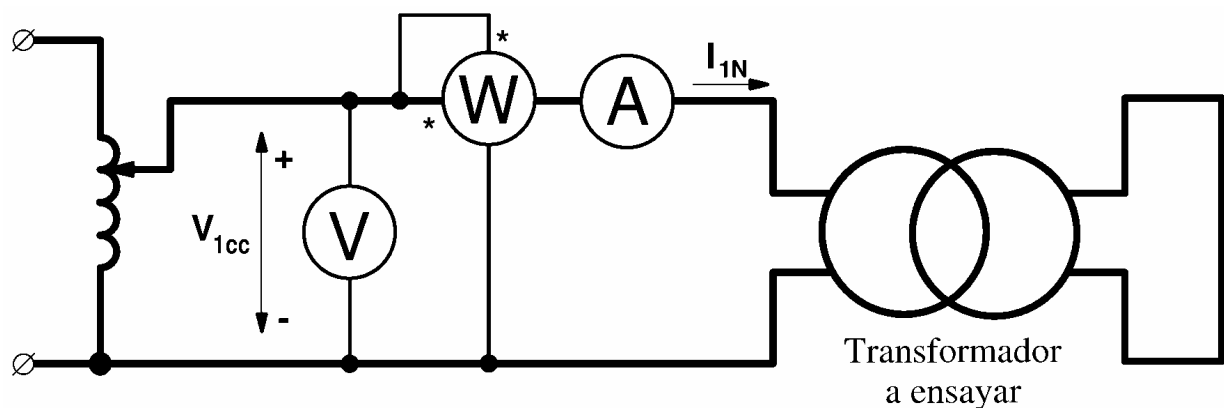


Fig. 5.19: Circuito para el ensayo de cortocircuito

En la Fig. 5.19 se muestra el circuito que permite realizar el ensayo de cortocircuito de un transformador monofásico cuando se lo alimenta por el primario. En algunos casos el amperímetro y el circuito amperimétrico del vatímetro se conectan al circuito a través de un transformador de intensidad. Análogamente, el voltímetro y el circuito voltimétrico del vatímetro se pueden conectar a través de un transformador de tensión.

En este ensayo se debe utilizar una fuente de tensión alterna variable, que en la Fig. 5.19 es un autotransformador tipo variac (como el de la Fig. 5.7). Habrá que ir variando la tensión suministrada por la fuente hasta conseguir que la corriente alcance su valor asignado. Es conveniente dejar al transformador funcionando de esta manera un cierto tiempo antes de realizar las medidas. De esta forma la máquina alcanza su temperatura de funcionamiento y las medidas no se realizan con la máquina en frío. Hay que tener en cuenta que la resistencia R_{cc} varía con la temperatura y conviene medirla a la temperatura a la que va a funcionar normalmente el transformador.

Las magnitudes medidas durante este ensayo serán las siguientes:

$$V_{1cc}$$

$$I_{1N}$$

$$P_{cc}$$

En el ensayo de cortocircuito la tensión del primario es pequeña (V_{1cc} raramente supera el 15% de la tensión asignada V_{1N}) por lo que la corriente de vacío es mucho más pequeña que cuando el transformador está conectado a su tensión asignada, la cual ya era de por sí bastante pequeña. Esto quiere decir que durante este ensayo se puede despreciar totalmente la corriente de vacío con lo que el circuito equivalente aproximado (Fig. 5.14) se reduce al representado en la Fig. 5.20. En la Fig. 5.21 se ha repetido el triángulo de impedancias que se obtuvo anteriormente en el apartado 4.5.

El hecho de que ahora la corriente de vacío se pueda despreciar significa que las corrientes secundaria y primaria guardan exactamente una proporción igual a la relación de transformación m . Como por el primario circula la corriente asignada, I_{1N} , esto conlleva (véase la relación (5.3)) el que también por el secundario circula su corriente asignada, I_{2N} .

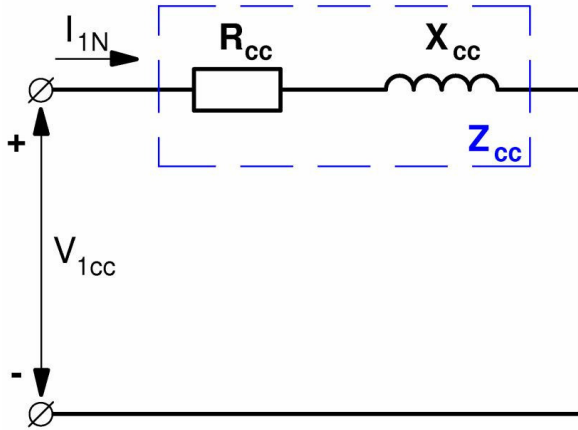


Fig. 5.20: Circuito equivalente durante el ensayo de cortocircuito

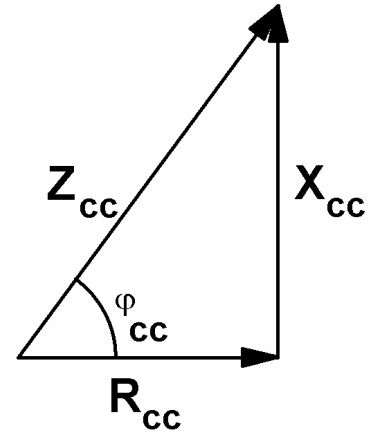


Fig. 5.21: Triángulo de impedancias de cortocircuito

Dada la pequeñez de la tensión primaria y de la corriente de vacío, durante el ensayo de cortocircuito se pueden despreciar totalmente las pérdidas en el hierro P_{Fe} . Como, además, la potencia P_2 es nula (por ser nula la tensión en el secundario V_2), resulta que la potencia medida en este ensayo es igual a las pérdidas en el cobre totales cuando circulan las corrientes asignadas por ambos devanados; es decir, las pérdidas en el cobre asignadas P_{CuN} :

$$P_{cc} = P_{CuN} \quad (5.32)$$

El factor de potencia, $\cos \varphi_{cc}$, durante este ensayo se puede obtener así:

$$P_{cc} = V_{1cc} I_{1N} \cos \varphi_{cc} \rightarrow \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{1cc} I_{1N}} \quad (5.33)$$

Aplicando la Ley de Ohm en el circuito equivalente de la Fig. 5.20 se deduce que:

$$Z_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1N}} \quad (5.34)$$

Finalmente, del triángulo de impedancias de la Fig. 5.21 se obtienen estas expresiones para calcular los parámetros de la rama en serie del circuito equivalente:

$$\boxed{R_{cc} = Z_{cc} \cos \phi_{cc}} \quad (5.35a)$$

$$\boxed{X_{cc} = Z_{cc} \sin \phi_{cc}} \quad (5.35b)$$

En el caso de que el ensayo se realice alimentando al transformador por el secundario y dejando cortocircuitado el devanado primario, las magnitudes que se medirán serán

$$V_{2cc} \qquad I_{2N} \qquad P_{cc}$$

La potencia seguirá siendo la misma que cuando se lo ensaya por el primario, pero la tensión y la corriente son distintas. Se demuestra que

$$m = \frac{V_{1cc}}{V_{2cc}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} \quad \rightarrow \quad V_{1cc} = m V_{2cc} ; \quad I_{1N} = \frac{I_{2N}}{m} \quad (5.36)$$

Luego, si el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el secundario, se calcularán mediante la fórmula (5.31) la tensión V_{1cc} y la corriente I_{1N} que se hubieran obtenido de realizar el ensayo por el primario y, de esta forma, se podrán seguir empleando las relaciones (5.33) a (5.35).

Hay ocasiones en las que el ensayo de cortocircuito no se realiza exactamente a la intensidad asignada. En este caso, si el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el primario, las magnitudes que se miden son:

$$V_{1corto} \qquad I_{1corto} \qquad P_{corto}$$

A partir de estas magnitudes se pueden calcular las que se hubieran obtenido de haber realizado el ensayo a la intensidad asignada, I_{1N} , mediante estas expresiones:

$$V_{1cc} = V_{1corto} \left(\frac{I_{1N}}{I_{1corto}} \right) \qquad P_{cc} = P_{corto} \left(\frac{I_{1N}}{I_{1corto}} \right)^2 \quad (5.37)$$

Calculando V_{1cc} y P_{cc} mediante las relaciones (5.37) y con la corriente asignada del transformador, I_{1N} , se pueden seguir empleando las relaciones (5.33) a (5.35) para calcular R_{cc} y X_{cc} .

No se debe confundir el ensayo de cortocircuito que se ha descrito en este apartado con el *fallo de cortocircuito*. Este es un accidente que se produce cuando el transformador tiene su primario a la tensión asignada y, de manera fortuita, su secundario queda cortocircuitado. La tensión ahora es mucho mayor que durante el ensayo y por los devanados de la máquina circularán unas corrientes mucho mayores que las asignadas, las cuales pueden resultar peligrosas para el transformador.

6.3. – Ensayo en carga

Este ensayo consiste en conectar al transformador varias cargas de diferentes amplitudes y factores de potencia y medir las tensiones primaria, V_1 , y secundaria, V_2 , así como la potencia, P_2 , y la corriente, I_2 , en el secundario. De esta manera se puede analizar como varía la tensión secundaria en función de la carga y de su factor de potencia.

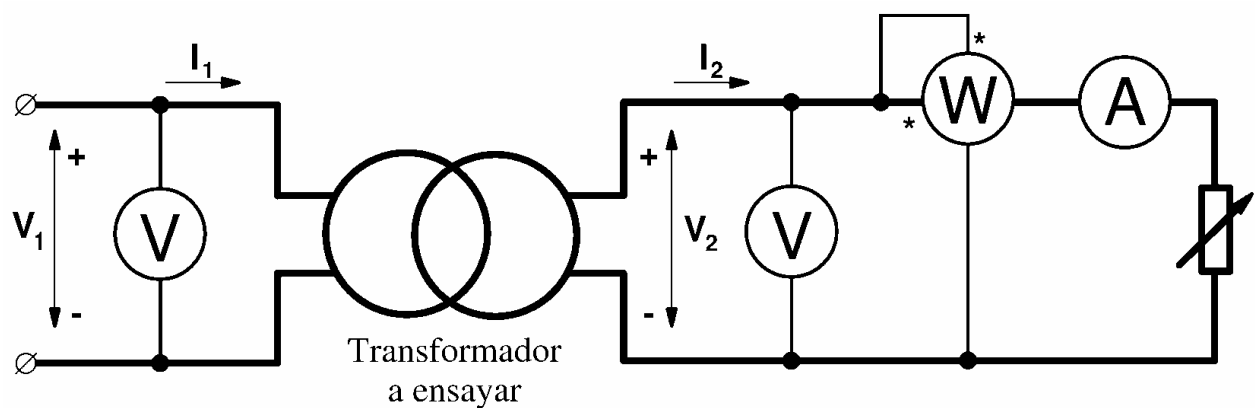


Fig. 5.22: Circuito para el ensayo en carga

En la Fig. 5.22 se muestra un circuito que permite realizar el ensayo en carga de un transformador monofásico. En algunos casos el amperímetro y el circuito amperimétrico del vatímetro se conectan al circuito a través de un transformador de intensidad. Análogamente, los voltímetros y el circuito voltimétrico del vatímetro se pueden conectar a través de transformadores de tensión.

En algunos casos también se mide la potencia activa, P_1 , absorbida por el primario. Esto permite analizar la variación del rendimiento de la máquina con la carga.

7. – ENSAYOS DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Los ensayos de un transformador trifásico se realizan de una forma similar a los del transformador monofásico.

En el *ensayo de vacío* (Fig. 5.23) se dejan las tres fases de uno de los devanados (primario o secundario) en circuito abierto y se alimenta el otro a su tensión asignada. En este ensayo se miden las tensiones en ambos devanados y la corriente y la potencia absorbidas. Durante este ensayo la potencia consumida por el transformador es igual a sus pérdidas en el hierro.

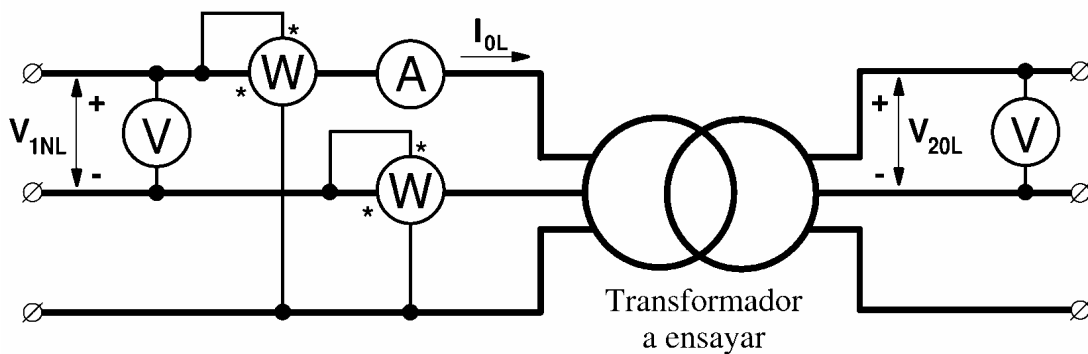


Fig. 5.23: Circuito para el ensayo de vacío de un transformador trifásico

En el *ensayo de cortocircuito* (Fig. 5.24) las tres fases de uno de los devanados (primario o secundario) se conectan formando un cortocircuito trifásico. El transformador se alimenta por el otro devanado con una tensión trifásica tal que hace circular la intensidad de ensayo que se desee (normalmente la intensidad asignada). En este ensayo se miden la tensión, la corriente y la potencia en el devanado no cortocircuitado. La potencia consumida es igual a las pérdidas en el cobre del transformador correspondientes a la intensidad del ensayo.

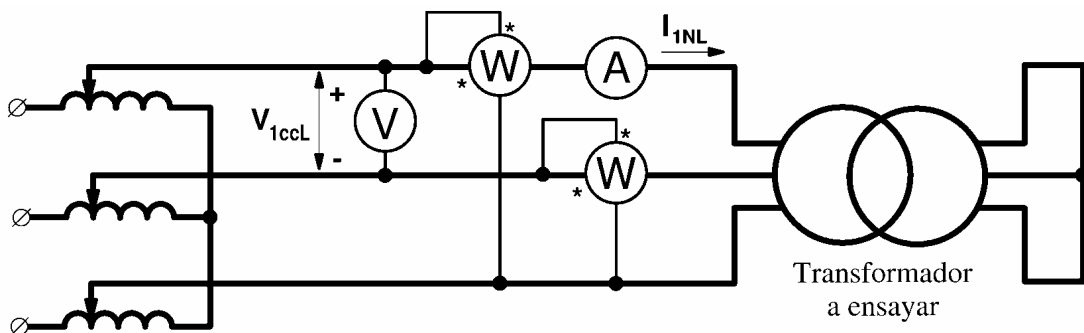


Fig. 5.24: Circuito para el ensayo de cortocircuito de un transformador trifásico

En el *ensayo de carga* (Fig. 5.25) se conectan varias cargas, de diferentes amplitudes y factores de potencia, al transformador y se analiza el efecto sobre la tensión secundaria de cada una de ellas.

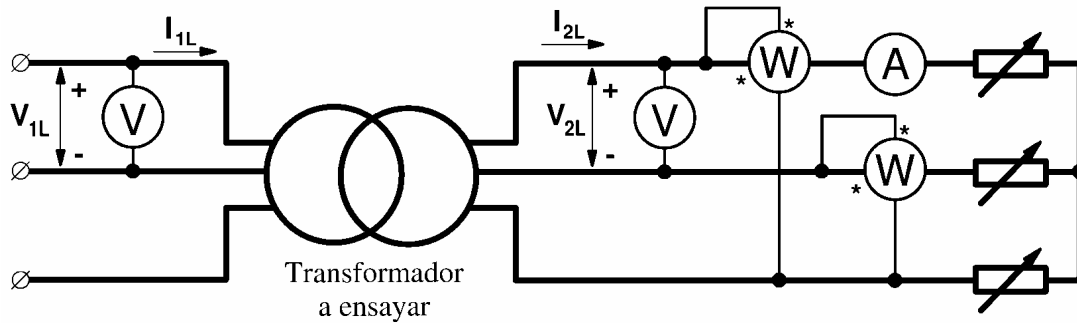


Fig. 5.25: Circuito para el ensayo en carga de un transformador trifásico

Dado de que se trata de circuitos trifásicos la potencia habrá que medirla mediante uno de los métodos citados en el capítulo 2; por ejemplo, el *método de los dos vatímetros o método Aron*, que es el que se ha utilizado en las figuras anteriores.

Las corrientes y tensiones que se miden en estos ensayos serán las de *línea* (I_L y V_L).

Para calcular los parámetros del circuito equivalente de un transformador trifásico, hay que tener en cuenta en (5.28) y (5.33) que el factor de potencia en trifásica se calcula a partir de la tensión I_L y de corriente de línea V_L así

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V_L I_L} \quad (5.38)$$

y que en (5.29), (5.30), (5.34) y (5.35) se deben usar las tensiones y corrientes de fase.

Así, en devanados conectados en *estrella*:

$$V = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad I = I_L \quad (5.39a)$$

y en devanados conectados en *triángulo*

$$V = V_L \quad I = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (5.39b)$$

8. – BIBLIOGRAFÍA

- [1] AVTGIS, COUGHLIN y LOOMOS. “Manual de laboratorio para circuitos eléctricos”. Marcombo. Barcelona. 1976.
- [2] CHAPMAN. “Máquinas eléctricas”. McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 2005.
- [3] CORRALES MARTIN. “Cálculo Industrial de máquinas eléctricas (2 tomos)”. Marcombo. Barcelona. 1982.
- [4] DPTO. TÉCNICO DISTESA. “Manuales Distesa: Máquinas II.” DISTESA. Madrid. 1976.
- [5] EQUIPO EPS ZARAGOZA. “Tecnología de Electricidad 4 instalaciones y líneas”. EDEBE. Barcelona. 1981.
- [6] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. “Prácticas de Electrotecnia”. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [7] FRAILE MORA. “Máquinas eléctricas”. McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 2008.
- [8] GURRUTXAGA. “El fenómeno electromagnético” Tomo IV. Las máquinas eléctricas II. Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander 1985.
- [9] PALACIOS BREGEL. “Prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas”. Paraninfo. Madrid. 1977.
- [10] RAS OLIVA. “Transformadores de potencia, de medida y protección”. Ed. Marcombo. Barcelona. 1998.
- [11] SALAZAR. “Ingeniería eléctrica experimental”. Ed. Marcombo. Barcelona. 1973.
- [12] SANZ FEITO. “Máquinas eléctricas”. Pearson Educación. Madrid. 2002.

Capítulo 6:

MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN

- 1. – DESCRIPCIÓN DE UNA MÁQUINA ASÍNCRONA TRIFÁSICA**
- 2. – PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**
- 3. – BALANCE DE POTENCIAS**
- 4. – VALORES ASIGNADOS**
- 5. – CIRCUITO EQUIVALENTE**
- 6. – PAR DE ROTACIÓN**
- 7. – ARRANQUE**
- 8. – REGULACIÓN DE VELOCIDAD**
- 9. – ENSAYOS DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO**
- 10. – BIBLIOGRAFÍA**

MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN

1. – DESCRIPCIÓN DE UNA MÁQUINA ASÍNCRONA TRIFÁSICA

Una máquina asíncrona trifásica 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 el órgano móvil. Entre el estator y el rotor existe un hueco denominado *entrehierro*. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.

Los núcleos magnéticos del estator y del rotor se construyen de material ferromagnético. Dado que van a estar sometidos a la acción de campos magnéticos giratorios (ver el apartado 6.2) -que darán lugar a pérdidas magnéticas- estos núcleos se realizan a base de apilar chapas de acero al silicio, reduciendo así las pérdidas en el hierro por histéresis y por corrientes de Foucault. Estas chapas tienen forma de disco y están aisladas entre sí mediante un barniz o un tratamiento químico. Pueden poseer un conjunto de orificios que permitan la circulación de aire u otro fluido refrigerante a través del núcleo magnético (Figs. 6.9 y 6.10)

En estos núcleos magnéticos la superficie enfrentada al entrehierro es cilíndrica y posee una serie de ranuras donde se alojan los devanados

El devanado del rotor forma un circuito cerrado por el que circulan corrientes inducidas por el campo magnético. El rotor puede ser de dos tipos: *de jaula de ardilla o en cortocircuito* (Figs. 6.3 y 6.4) y *de rotor bobinado o con anillos* (Fig. 6.5).

Una jaula de ardilla es un devanado formado por unas *barras* alojadas en las ranuras del rotor que quedan unidas entre sí por sus dos extremos mediante sendos *aros o anillos de cortocircuito*. El número de fases de este devanado depende de su número de barras. Muchas veces estos anillos poseen unas aletas (Fig. 6.4) que facilitan la evacuación del calor que se genera en la jaula durante el funcionamiento de la máquina.

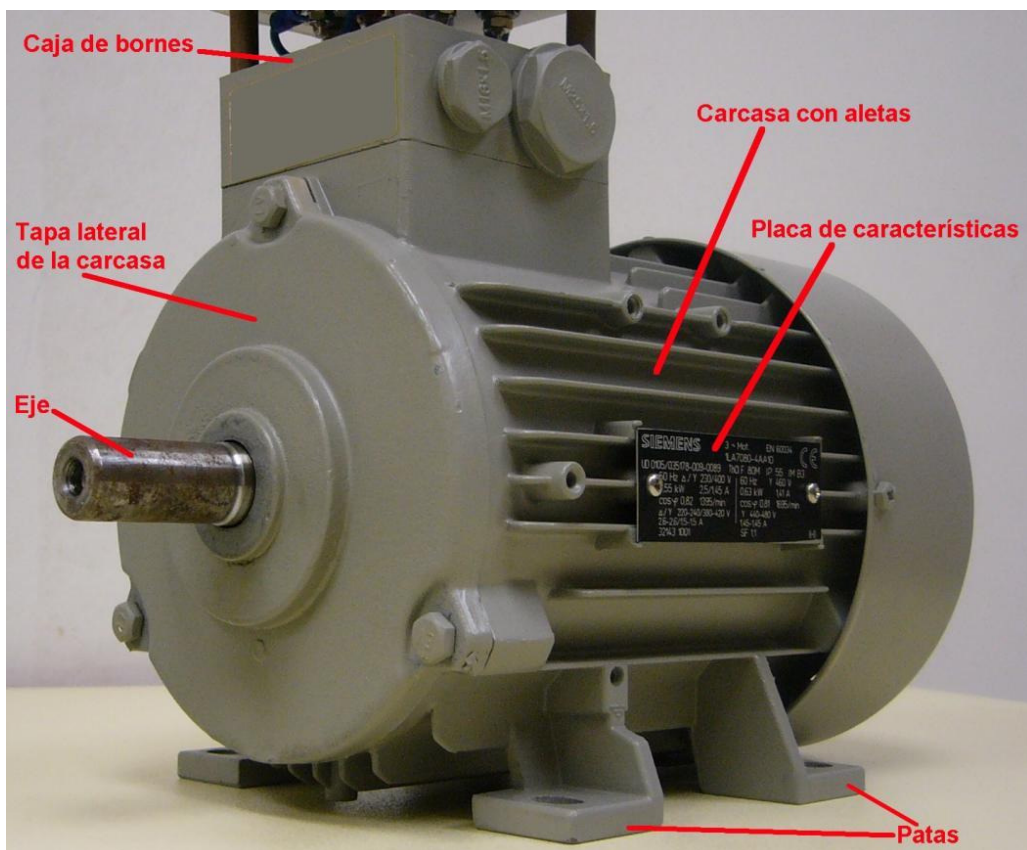


Fig. 6.1: Máquina asíncrona

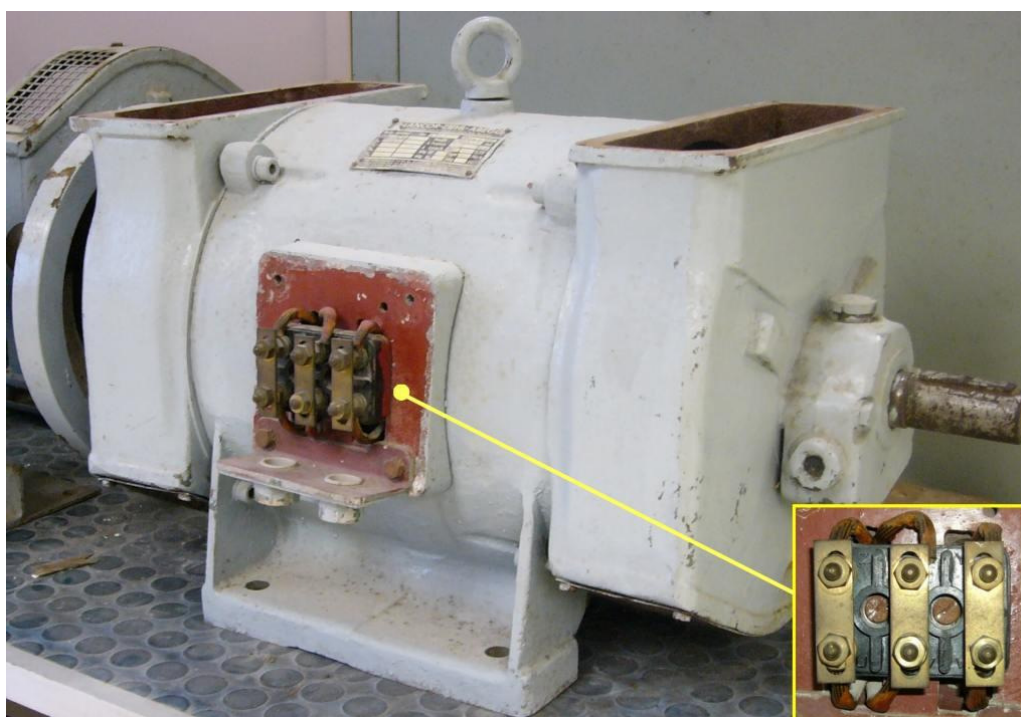


Fig. 6.2: Máquina asíncrona. Se ha ampliado la caja de bornes, a la cual se le ha quitado la tapa, para mostrar la conexión triángulo del estator (ver la Fig. 6.8)

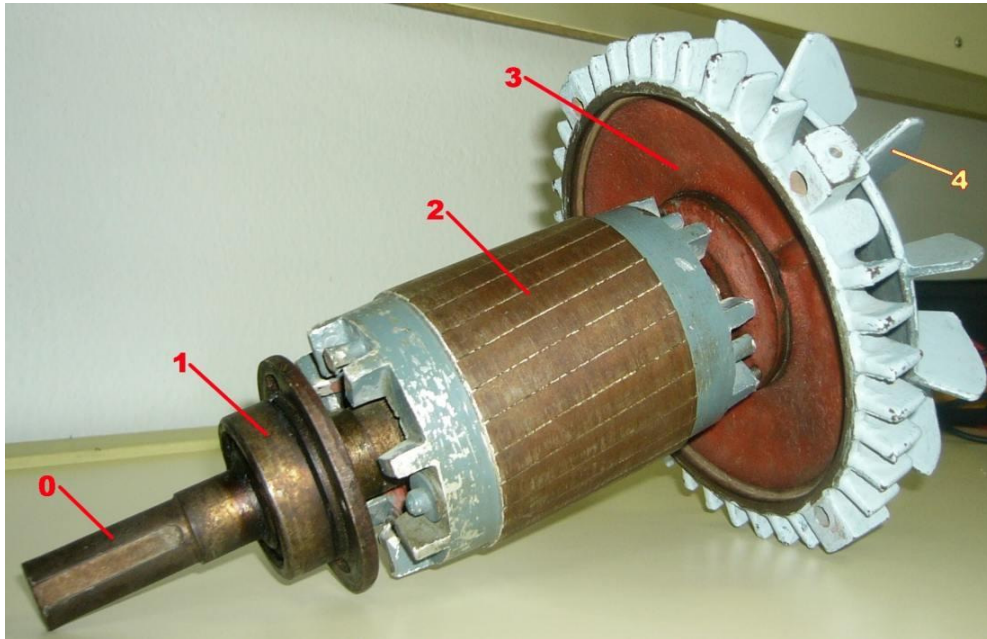


Fig. 6.3: Eje (0), Cojinete (1), rotor de jaula de ardilla (2), tapa lateral de la carcasa (3) y ventilador (4)



Fig. 6.4: Aletas en un rotor de jaula de ardilla



Fig. 6.5: Rotor bobinado o con anillos

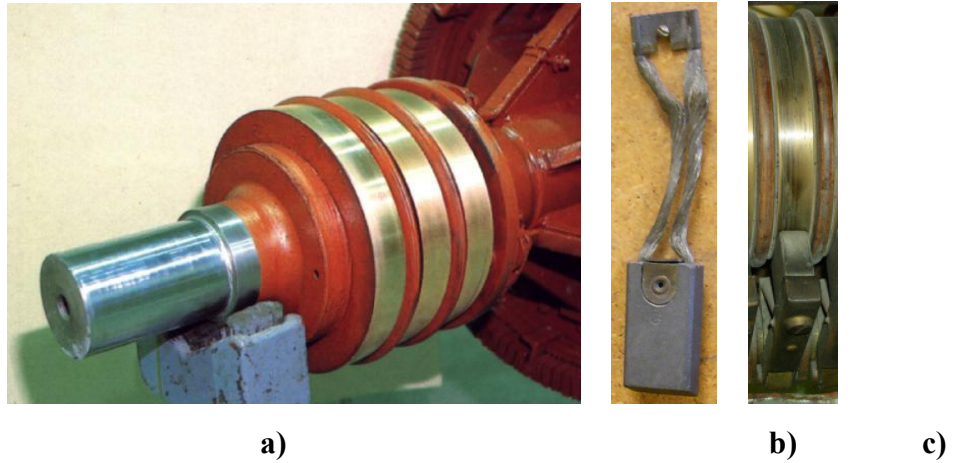


Fig. 6.6: a) Colector de 3 anillos; b) Escobilla; c) Anillo con escobilla

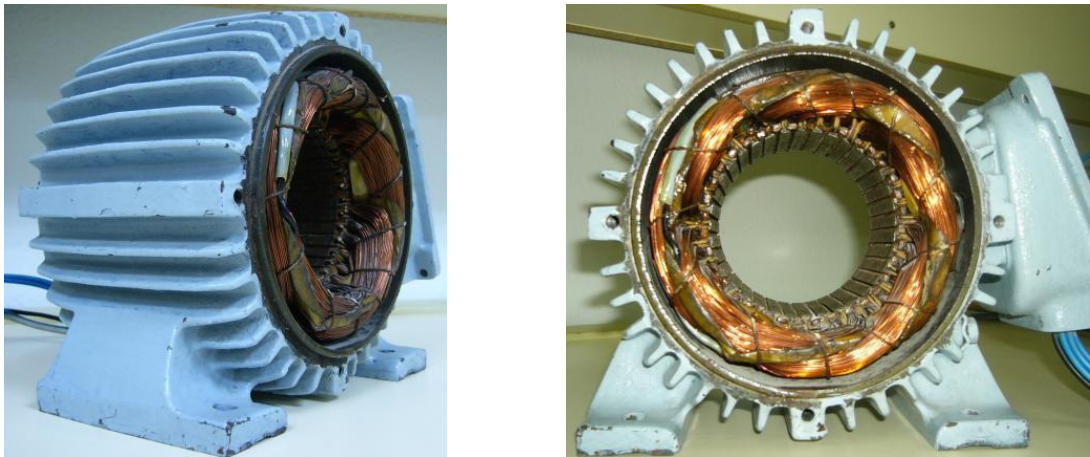


Fig. 6.7: Estator y carcasa

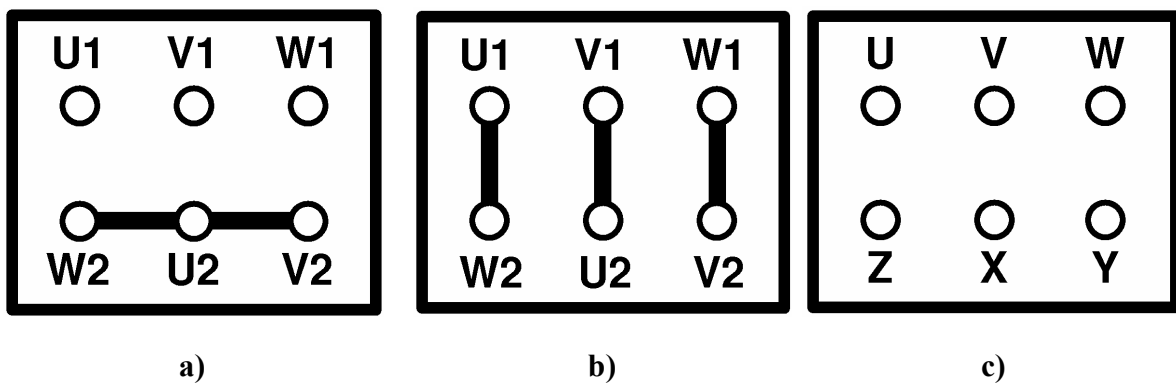


Fig. 6.8: Caja de bornes de una máquina asíncrona trifásica de jaula de ardilla:

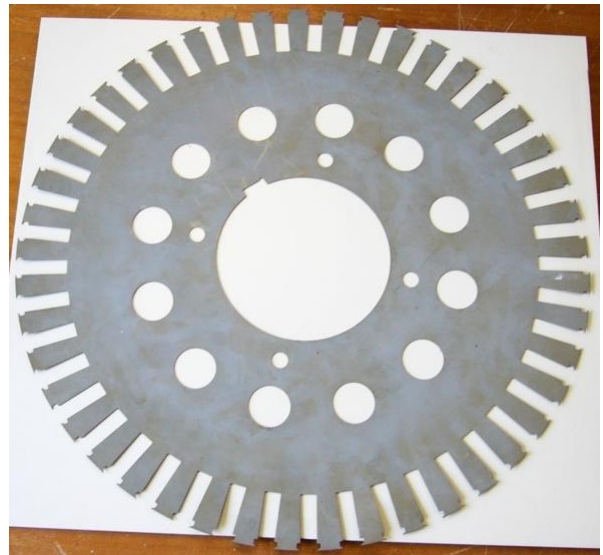
a) Conexión estrella; b) Conexión triángulo

(En ambos casos los terminales U1, V1 y W1 son los que se conectan a las fases de la red)

c) Antiguamente se utilizaban las letras U, V y W en lugar de U1, V1 y W1 y X, Y y Z en lugar de U2, V2 y W2.



a)



b)

Fig. 6.9: Chapas de: a) un rotor de doble jaula; b) De un rotor bobinado



Fig. 6.10: *Carcasa con aletas y núcleo magnético del estator construido apilando chapas magnéticas. En este circuito magnético obsérvense las ranuras donde se alojará el devanado del estator.*

El rotor bobinado tiene un devanado trifásico normal cuyas fases se conectan al exterior a través de un *colector* de tres anillos (Fig. 6.6). Este colector consiste en tres anillos de bronce colocados sobre el eje del rotor y aislados de éste y entre sí. Estos anillos están conectados a las bobinas del rotor y sobre ellos rozan unas escobillas de grafito situadas en el estator y conectadas al circuito exterior. Un resorte que presiona la escobilla contra el anillo garantiza un buen contacto entre ambos. En funcionamiento normal estos tres anillos están cortocircuitados (unidos entre sí).

En ambos tipos de rotor se suelen emplear ranuras ligeramente inclinadas con respecto al eje de la máquina (Fig. 6.3).

El devanado del estator es trifásico (Fig. 6.7) mientras que el devanado del rotor, cuando es de jaula de ardilla, puede tener un número de fases superior a tres. Ambos devanados tienen el mismo número de polos (2p). En este texto se denominará con subíndice 1 a las magnitudes del estator y con subíndice 2 a las del rotor.

El bloque de chapas que forma el circuito magnético del rotor tiene un agujero central (Fig. 6.9) donde se coloca el *eje* o *árbol* de la máquina. En muchas ocasiones se coloca un *ventilador* (Fig. 6.3) en este eje para facilitar la refrigeración de la máquina.

La *carcasa* (Figs. 6.7 y 6.10) es la envoltura de la máquina y tiene dos tapas laterales (Fig. 6.3) donde se colocan los *cojinetes* (Fig. 6.3) en los que se apoya el árbol. Esta carcasa suele disponer de aletas para mejorar la refrigeración de la máquina (Figs. 6.1, 6.7 y 6.10). Sujeta a la carcasa está la *placa de características* (Fig. 6.1) donde figuran las magnitudes más importantes de la máquina. En la carcasa se encuentra también la *caja de bornes* (Figs. 6.1 y 6.2) adonde van a parar los extremos de los bobinados. En una máquina asíncrona trifásica de jaula de ardilla la caja de bornes tiene seis terminales, correspondientes a los extremos de las tres fases del estator (dos extremos, principio y final, por cada fase), formando dos hileras de tres. De esta forma resulta fácil el conectar el devanado del estator en estrella (Fig. 6.8a) o en triángulo (Figs. 6.2 y 6.8b).

Dependiendo de si se conectan en estrella o en triángulo, los motores asíncronos trifásicos pueden funcionar con dos tensiones diferentes que guardan entre sí una relación de $\sqrt{3}$. Así, un motor de 400/230 V es un motor que está calculado para que sus fases funcionen alimentadas a 230 V. Si

el motor está conectado en triángulo deberá ser alimentado con una red cuya tensión de línea sea de 230 V. Si el motor está conectado en estrella, cada fase recibe una tensión $\sqrt{3}$ veces menor (la tensión fase-neutro) que la de línea; luego, para conseguir que esa tensión valga 230 V, el motor deberá ser alimentado desde una red cuya tensión de línea sea de 400 V.

En resumen, la posibilidad de cambiar la conexión del estator permite funcionar a la máquina asíncrona trifásica con dos tensiones asignadas de línea diferentes. La tensión menor corresponde a la conexión en triángulo y es también igual a la tensión asignada de fase. La tensión mayor corresponde a la conexión en estrella.

2. – PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En una máquina de inducción trifásica el bobinado del estator está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes que da lugar, en virtud del *Teorema de Ferraris*, a un campo magnético giratorio en el entrehierro. Es decir, en el entrehierro de esta máquina aparece un campo magnético que gira a una velocidad constante denominada *velocidad de sincronismo*. Cuando esta velocidad se mide en r.p.m. se la llama n_1 y se calcula a partir de la frecuencia f_1 de las corrientes del estator y del número de pares de polos p (luego, $2p$ es el número de polos) de la máquina mediante este cociente:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (6.1)$$

Como el rotor gira a una velocidad diferente de la del campo magnético del estator, sus bobinas están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen f.e.m.s en ellas. El devanado del rotor está en cortocircuito, luego estas f.e.m.s producen la circulación de corrientes en el rotor que, al interactuar con el campo magnético del estator, originan un par de rotación en el eje de la máquina. Por la Ley de Lenz, este par mecánico intentará reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor y, por lo tanto, tratará de hacerlo girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio (ya que las variaciones de flujo en las bobinas del rotor son debidas al movimiento relativo del campo giratorio con respecto al rotor),

pero sin conseguirlo nunca, ya que entonces no habría corrientes en el rotor ni, por consiguiente, par en el eje de la máquina.

La velocidad de estas máquinas es, pues, ligeramente distinta de la de sincronismo, de ahí su nombre de asíncronas. Por otra parte, las corrientes que circulan por el rotor aparecen por inducción electromagnética, de ahí su otro nombre de máquinas de inducción.

Cuando la máquina actúa como motor, su funcionamiento más habitual, la velocidad del rotor es inferior a la de sincronismo y se genera un par motor. Para que esta máquina actúe como generador es preciso moverla con una máquina motriz externa de forma que su velocidad supere a la de sincronismo. En este caso aparece un par de frenado en su eje.

Se denomina *deslizamiento* s a la siguiente relación:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \quad (6.2)$$

donde

- n_1 es la velocidad de sincronismo medida en r.p.m.
- Ω_1 es la velocidad de sincronismo medida en rad/s
- n es la velocidad de giro del rotor medida en r.p.m.
- Ω es la velocidad de giro del rotor medida en rad/s

Los conductores del devanado rotórico ven girar el campo originado por el bobinado del estator con una velocidad relativa n_2

$$n_2 = n_1 - n = s \cdot n_1 \quad (6.3)$$

Esto hace que en las fases del rotor se induzcan unas f.e.m.s cuya frecuencia es f_2 :

$$f_2 = s f_1 \quad (6.4)$$

El deslizamiento s de una máquina asíncrona en condiciones normales de funcionamiento es pequeño; esto significa que la frecuencia en el rotor f_2 es pequeña, muy inferior a la del estator f_1 .

Las f.e.m.s inducidas sobre las fases del rotor provocan la circulación de corrientes cuya frecuencia también es f_2 . Estas corrientes al circular por las fases del rotor originan, en virtud del Teorema de Ferraris, otro campo magnético giratorio cuya velocidad absoluta es la misma velocidad de sincronismo n_1 que la del campo originado por las corrientes del estator.

Al final, se obtiene que el campo magnético total en el entrehierro, debido al efecto conjunto de las corrientes del estator y del rotor, gira a la velocidad de sincronismo n_1 .

El hecho de que los campos magnéticos del estator y rotor giren a la misma velocidad es importante, porque así la posición relativa de ambos campos no varía con el tiempo y la máquina produce, entonces, un par constante en el eje (sin pulsaciones en cada vuelta). Esta igualdad de velocidades es debida a que ambos devanados, el del estator y el del rotor, tienen el mismo número de polos. El que los dos devanados puedan tener diferente número de fases no influye para que generen campos giratorios de igual velocidad.

3. – BALANCE DE POTENCIAS

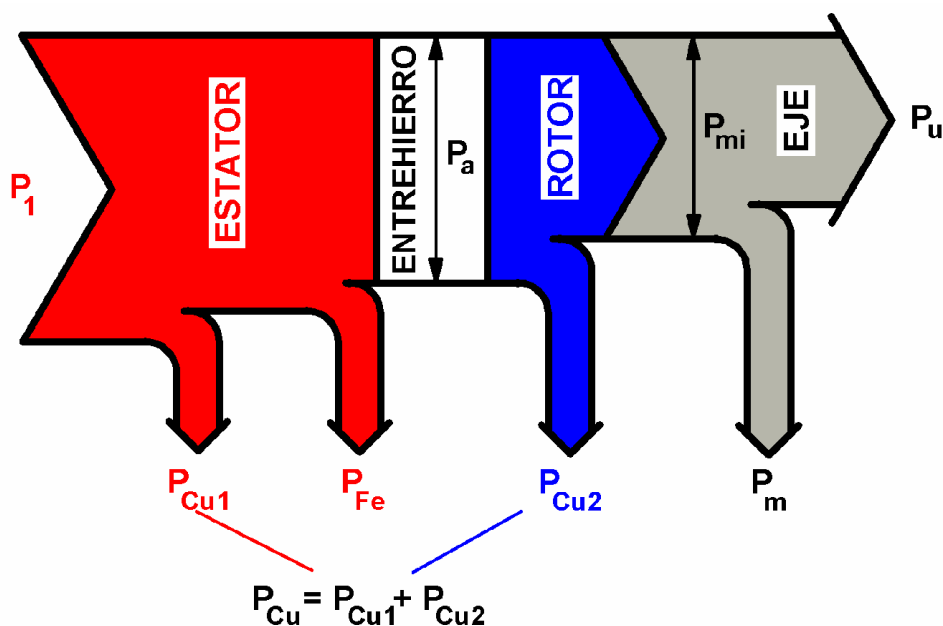


Fig. 6.11: Balance de potencias de un motor asíncrono

En este apartado se va a estudiar el balance de potencias de una máquina asíncrona trifásica actuando como motor. Se supondrá que la máquina está funcionando con un deslizamiento s pequeño.

En un motor la potencia fluye desde el estator hacia el rotor y el eje de la máquina (ver la Fig. 6.11), transformándose la energía eléctrica absorbida en el estator P_1 en potencia mecánica útil P_u en el eje.

Una vez en el estator, parte de la potencia absorbida P_1 se pierde en forma de calor por efecto Joule en la resistencia R_1 de las fases del estator dando lugar a las *pérdidas en el cobre del estator* P_{Cu1} :

$$P_{Cu1} = 3 R_1 I_1^2 \quad (6.5)$$

En la fórmula anterior I_1 es el valor eficaz de las corrientes de fase en el devanado del estator.

En el estator existen otras pérdidas que se producen en su circuito magnético. Estas pérdidas son debidas a los fenómenos de la histéresis y de las corrientes de Foucault y se denominan pérdidas magnéticas o *pérdidas en el hierro* P_{Fe} . En principio también existen pérdidas en el hierro en el rotor. Pero las pérdidas magnéticas dependen aproximadamente del cuadrado de la frecuencia y la frecuencia f_2 de las corrientes del rotor es mucho más pequeña que la frecuencia f_1 del estator en condiciones normales de funcionamiento (deslizamientos s pequeños). En consecuencia, las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables frente a las del estator. Por lo tanto, en este texto se aceptará que la totalidad de las pérdidas en el hierro se producen en el estator.

Después de haberse producido las pérdidas en el cobre del estator y las pérdidas en el hierro, la potencia restante se transfiere del estator hacia el rotor a través del entrehierro. Esta potencia se la denomina *potencia en el entrehierro* P_a (Fig. 6.11):

$$P_a = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} \quad (6.6)$$

De la potencia P_a que llega al rotor parte se pierde por efecto Joule en la resistencia R_2 de las fases del rotor dando lugar a las *pérdidas en el cobre del rotor* P_{Cu2} . La potencia restante es la potencia que se convierte de potencia electromagnética en potencia mecánica. Cuando esta potencia se ha convertido en mecánica se la denomina *potencia mecánica interna* P_{mi} y es la potencia que llega al eje de la máquina. Por lo tanto, se verifica que:

$$P_{mi} = P_a - P_{Cu2} \quad (6.7)$$

Una pequeña parte de la potencia interna se pierde por rozamientos y ventilación; es decir, por las *pérdidas mecánicas* P_m , las cuáles dependen de la velocidad de giro del eje. El resto es la *potencia útil* P_u del motor:

$$P_u = P_{mi} - P_m \quad (6.8)$$

Muchas veces se desprecian las pérdidas mecánicas P_m y se considera que la potencia mecánica interna P_{mi} es igual a la potencia útil P_u .

Si, como es habitual, el motor funciona conectado a su tensión y frecuencia del estator asignadas y con deslizamientos pequeños, se demuestra que tanto las pérdidas en el hierro P_{Fe} como las mecánicas P_m apenas varían con la potencia útil P_u que suministra el motor. Por lo tanto, al conjunto de estas dos pérdidas se lo *denomina pérdidas fijas* P_f :

$$P_f = P_{Fe} + P_m \quad (6.9)$$

El *rendimiento* η de un motor asíncrono es igual a este cociente

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_m} = \frac{P_u}{P_u + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_f} \quad (6.10)$$

4. – VALORES ASIGNADOS

Se denomina *servicio* de una máquina de inducción a una forma de funcionamiento de la misma la cual puede incluir períodos de funcionamiento con diferentes cargas, en vacío y en reposo. Al definir un servicio hay que especificar la duración y secuencia en el tiempo de estos períodos de funcionamiento.

Antiguamente se empleaban los valores *nominales* para definir una máquina. Así, la *potencia nominal* es la máxima potencia útil de la máquina que garantiza que en ningún órgano de la misma se alcanzan temperaturas peligrosas en régimen permanente o indefinido cuando las otras magnitudes de la máquina (tensión, frecuencia, velocidad, ...) tienen sus valores nominales, la máquina está al nivel del mar y la temperatura ambiente es de 40°C.

Actualmente el concepto de valor nominal ha sido sustituido por el de valor *asignado*. Así, la *potencia asignada* es la máxima potencia útil que el fabricante de la máquina garantiza que no da lugar a calentamientos peligrosos para una clase de servicio dada.

Nótese que la potencia asignada es un concepto más amplio que el de la potencia nominal. En la potencia nominal se considera sólo el caso en el que la máquina proporciona de forma permanente e ininterrumpida una potencia constante. La potencia asignada se corresponde con un servicio que habrá que definir previamente. De hecho una misma máquina puede tener diferentes potencias asignadas según de qué servicio se trate.

De todos modos, si no se especifica expresamente otro servicio, cuando un fabricante indica los valores asignados de las magnitudes de una máquina asíncrona éstos se refieren a un servicio ininterrumpido y con una carga constante, por lo que coinciden con los valores nominales.

5. – CIRCUITO EQUIVALENTE

De forma similar a lo que sucede con un transformador, el circuito equivalente de una máquina asíncrona representa de una manera sencilla y bastante exacta su funcionamiento.

5.1. – Separación de los efectos de las resistencias y de los flujos de dispersión

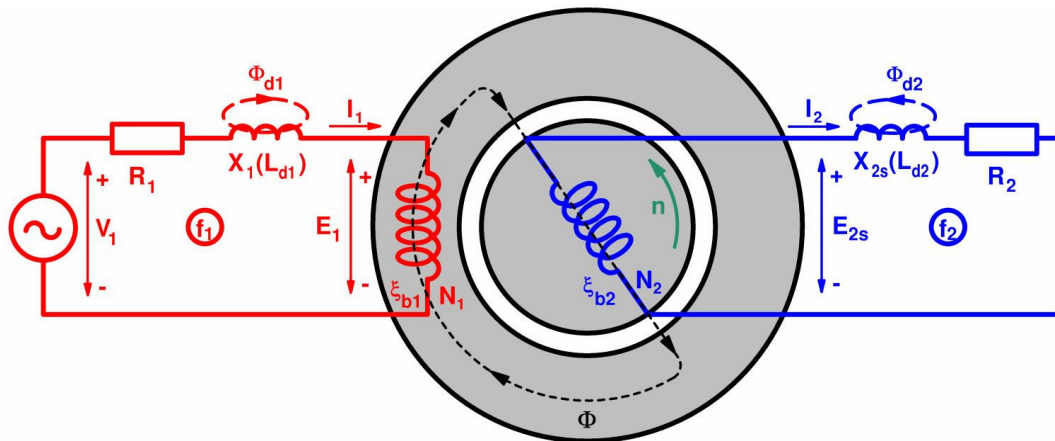


Fig. 6.12: Esquema por fase de una máquina asíncrona trifásica

Análogamente a como se hizo con el transformador en el apartado 4 del capítulo 5, se puede suponer que la máquina es ideal (es decir, sus devanados carecen de resistencia y de flujos de dispersión) si se conectan en serie con cada fase una resistencia y una bobina.

En base a esta idea se ha dibujado la Fig. 6.12. En ella se representan una de las fases del estator y una de las fases del rotor. La máquina ideal tiene un flujo común Φ originado por la acción conjunta de las corrientes de todas las fases del estator y del rotor. Este flujo induce las f.e.m.s de fase E_1 y E_{2s} en el estator y el rotor, respectivamente. En esta figura se han adoptado los mismos convenios de signos que con el transformador (Fig. 5.10).

La f.e.m.s E_{2s} y la reactancia de dispersión X_{2s} del rotor dependen del valor de la frecuencia rotórica f_2 y, en consecuencia, son funciones del deslizamiento s , o lo que es equivalente, de la velocidad de giro n (véanse las relaciones (6.2) y (6.4)).

Un caso particular es cuando el *rotor está parado*. Entonces sucede que:

$$\text{Rotor parado: } n = 0 \rightarrow s = 1 \rightarrow f_2 = f_1 \quad (6.11)$$

Se denominarán E_2 y X_2 a la f.e.m. y la reactancia de dispersión de cada fase del rotor en el caso particular de que esté parado.

Se llama *relación de transformación de tensiones* m_v a este cociente:

$$m_v = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\xi_{b1} N_1}{\xi_{b2} N_2} \quad (6.12)$$

En esta expresión N_1 y N_2 son los números de espiras de una fase del estator y del rotor, respectivamente. ξ_{b1} y ξ_{b2} son los factores de bobinado del estator y del rotor. El factor de bobinado es un coeficiente ligeramente inferior a la unidad que depende de la geometría de cada devanado.

Existe otro coeficiente denominado *relación de transformación de corrientes* m_i que se calcula así

$$m_i = \frac{m_1 N_1 \xi_{b1}}{m_2 N_2 \xi_{b2}} = \frac{m_1}{m_2} m_v \quad (6.13)$$

En esta expresión m_1 y m_2 son los números de fases del estator y del rotor, respectivamente. Evidentemente, en una máquina trifásica m_1 vale 3. En las máquinas de rotor bobinado son trifásicos tanto los bobinados del estator como del rotor ($m_1 = m_2 = 3$) y, por lo tanto, según la relación (6.13) en estas máquinas estas dos relaciones de transformación son iguales ($m_v = m_i$).

5.2. – Marcha en vacío

La marcha en vacío se produce cuando una máquina asíncrona actúa como motor alimentado por el estator a su tensión y frecuencia asignadas y sin tener carga mecánica alguna acoplada a su eje. De forma similar a como se hace con el transformador, se denominan I_0 , $\cos \varphi_0$ y P_0 , respectivamente, a las siguientes magnitudes del estator: corriente de fase, factor de potencia y potencia total absorbida cuando la máquina está en vacío.

En esta marcha la potencia útil P_u es nula, lo que significa que la potencia interna P_{mi} es muy pequeña -casi nula- pues es igual a las pérdidas mecánicas P_m . De esto se deduce que la

corriente en las fases del secundario I_2 es minúscula y se pueden despreciar las pérdidas en el cobre del rotor P_{Cu2} :

$$\text{Vacío: } P_u = 0 \rightarrow P_{mi} = P_m \approx 0 \rightarrow I_2 \approx 0 \rightarrow P_{Cu2} \approx 0 \quad (6.14)$$

Además, puesto que en vacío la potencia interna P_{mi} es pequeña, es en esta marcha cuando la velocidad n de la máquina actuando como motor más se acerca a la velocidad de sincronismo n_1 .

La corriente de vacío I_0 de una máquina de inducción es proporcionalmente mayor que en un transformador debido a que ahora el circuito magnético tiene entrehierros. Esto hace que tenga mayor reluctancia magnética y se necesite una corriente mayor para producir el campo magnético de la máquina. En las máquinas asíncronas I_0 tiene un valor superior al 30% de la corriente asignada I_{1N} . Por lo tanto, ahora ya no son tan despreciables las pérdidas en el cobre en el estator P_{Cu1} .

De acuerdo con lo explicado en el apartado 3, en la marcha en vacío se obtienen las siguientes relaciones:

$$P_0 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_m = P_{Cu1} + P_f \quad (6.15)$$

$$P_{Cu1} = 3 R_1 I_0^2 \quad (6.16)$$

$$\boxed{P_f = P_{Fe} + P_m = P_0 - 3 R_1 I_0^2} \quad (6.17)$$

5.3. – Reducción del rotor al estator

De forma similar a la reducción del secundario al primario de un transformador (apartado 4.4 del capítulo 5), la reducción del rotor al estator de una máquina asíncrona es un cambio de variable que permite trabajar de forma más sencilla, pero que no modifica ni las magnitudes del estator, ni el campo magnético en el entrehierro ni el rendimiento de la máquina. Las magnitudes del rotor se reducen al estator empleando las siguiente relaciones:

$$\left. \begin{aligned} E'_2 &= m_v E_2 \\ I'_2 &= \frac{I_2}{m_i} \\ R'_2 &= m_v m_i R_2 \\ X'_2 &= m_v m_i X_2 \\ m'_2 &= m_1 \\ f'_2 &= f_1 \end{aligned} \right\} \quad (6.18)$$

5.4. – Circuito equivalente

Se puede demostrar que trabajando con las magnitudes del rotor reducidas al estator el comportamiento de una máquina de inducción se corresponde con el de este circuito equivalente:

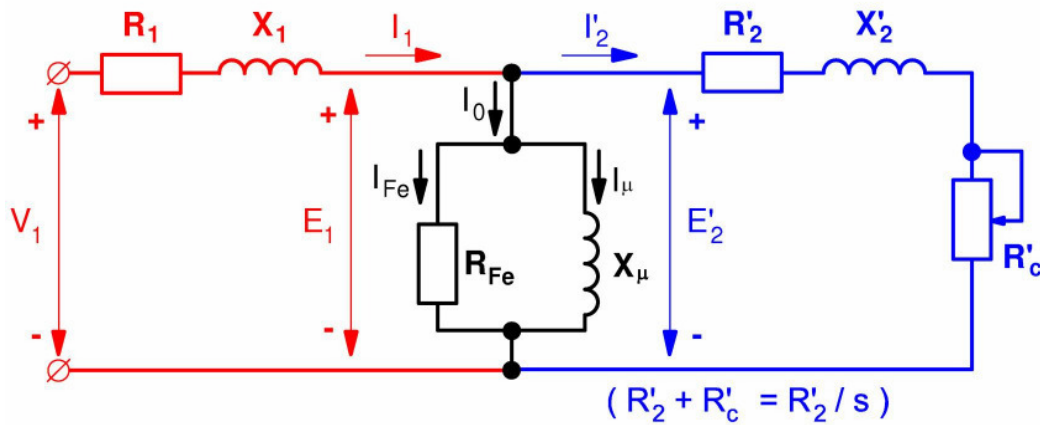


Fig. 6.13: Circuito equivalente de una máquina asíncrona trifásica

En el circuito equivalente de la Fig. 6.13 aparece la *resistencia de carga reducida al estator* R'_c cuyo valor es

$$\boxed{R'_c = R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right)} \quad (6.19)$$

La potencia gastada en esta resistencia R'_c es igual a la potencia interna P_{mi} de la máquina:

$$P_{mi} = 3 R'_c I_2'^2 = 3 R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2 \quad (6.20)$$

Al igual que se hizo con los transformadores se pueden simplificar los cálculos si se utiliza el circuito equivalente aproximado de la Fig. 6.14. Los parámetros de este circuito equivalente se pueden obtener experimentalmente mediante los ensayos de vacío y de cortocircuito.

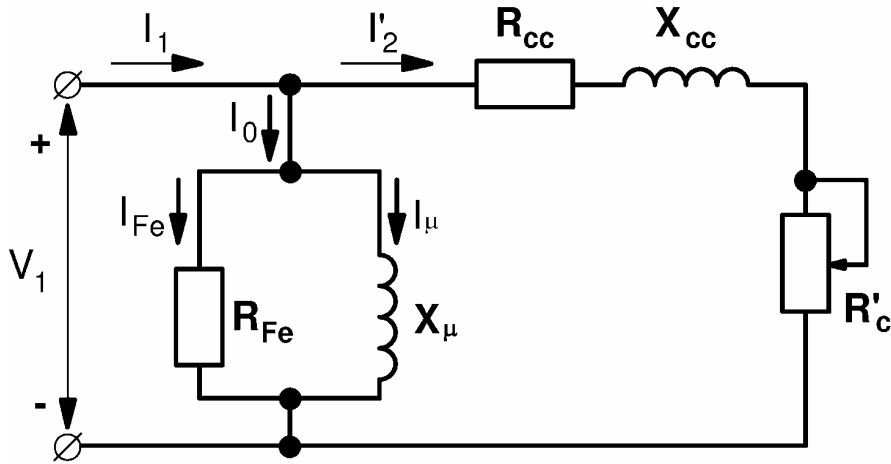


Fig. 6.14: Circuito equivalente aproximado de una máquina asíncrona trifásica

La resistencia y la reactancia de cortocircuito, R_{cc} y X_{cc} , que aparecen en la Fig. 6.14 son

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 ; \quad X_{cc} = X_1 + X'_2 \quad (6.21)$$

El error cometido al utilizar el circuito equivalente aproximado de la Fig. 6.14 en lugar del circuito equivalente exacto de la Fig. 6.13 es apreciablemente mayor que en un transformador debido al mayor valor que alcanza ahora la corriente de vacío I_0 . Sin embargo, esta aproximación da resultados suficientemente exactos en máquinas de más de 10 kW.

6. – PAR DE ROTACIÓN

6.1. – Obtención del par

Teniendo en cuenta que la constante $2\pi/60$ es el factor de conversión de r.p.m. a rad/s, el *par útil* M_u de una máquina asíncrona se puede obtener aplicando los fundamentos de la mecánica del movimiento de rotación así:

$$M_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_u}{\frac{2\pi}{60} n} \quad (6.22)$$

El *par interno* M se obtiene de la potencia mecánica interna

$$M = \frac{P_{mi}}{\Omega} = \frac{P_{mi}}{\frac{2\pi}{60} n} \quad (6.23a)$$

Se puede demostrar que el par interno también puede calcularse así:

$$M = \frac{P_a}{\Omega_1} = \frac{P_a}{\frac{2\pi}{60} n_1} \quad (6.23b)$$

Si se desprecian las pérdidas mecánicas se tiene que:

$$P_m \approx 0 \rightarrow P_u \approx P_{mi} \rightarrow M_u \approx M \quad (6.24)$$

Por lo tanto, en lo que sigue se va a analizar el par interno M que se supondrá prácticamente igual al par útil M_u .

Del circuito equivalente aproximado de la Fig. 6.14 y de la relación (6.23b) se obtiene la siguiente expresión del par de una máquina asíncrona trifásica

$$M = \frac{3 \frac{R'_2}{s}}{\frac{2\pi}{60} n_1} \frac{V_1^2}{\left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right)} \quad (6.25)$$

Esta expresión indica que, cuando la máquina funciona a tensión y frecuencia en el estator constantes, el par sólo varía en función del deslizamiento s ; es decir, el par varía solamente con la velocidad de giro del rotor.

6.2. – Curva par-velocidad

En la Fig. 6.15 se representa la curva par-velocidad de una máquina asíncrona funcionando a tensión y frecuencia estatóricas constantes. En el eje de abscisas se ha colocado una doble escala: por un lado se indica la velocidad y por el otro el deslizamiento correspondiente.

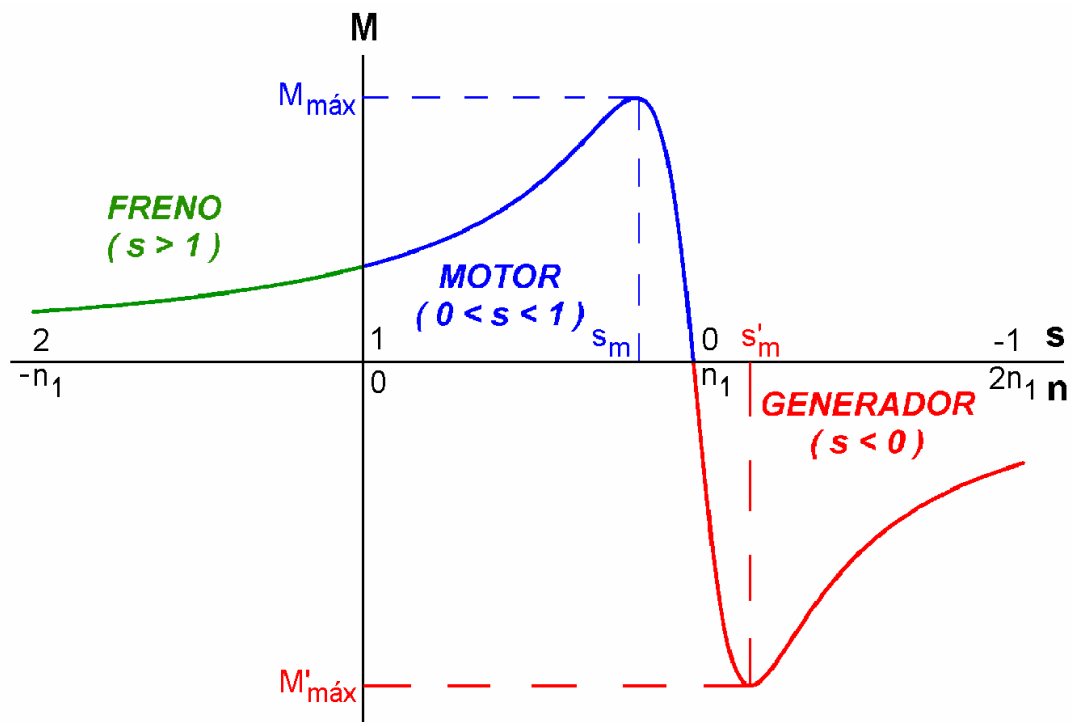


Fig. 6.15: Curva par-velocidad de una máquina asíncrona trifásica a V_1 y f_1 constantes

Los valores máximos de esta curva par-velocidad se obtienen igualando a cero la derivada de la expresión (42) con respecto al deslizamiento s . Se obtiene que los pares máximos se producen para estos valores de deslizamiento

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}} \quad (6.26)$$

El valor positivo de la fórmula (6.26) corresponde a la máquina actuando como motor (s_m en la Fig. 6.15), mientras que el valor negativo corresponde a funcionamiento como generador (s'_m en la Fig. 6.15).

En esta curva se pueden distinguir tres modos de funcionamiento: motor, generador y freno a contracorriente (Fig. 6.15). A partir de ahora se tratará de la máquina actuando como motor, su forma de funcionamiento más habitual.

6.3. – Puntos notables

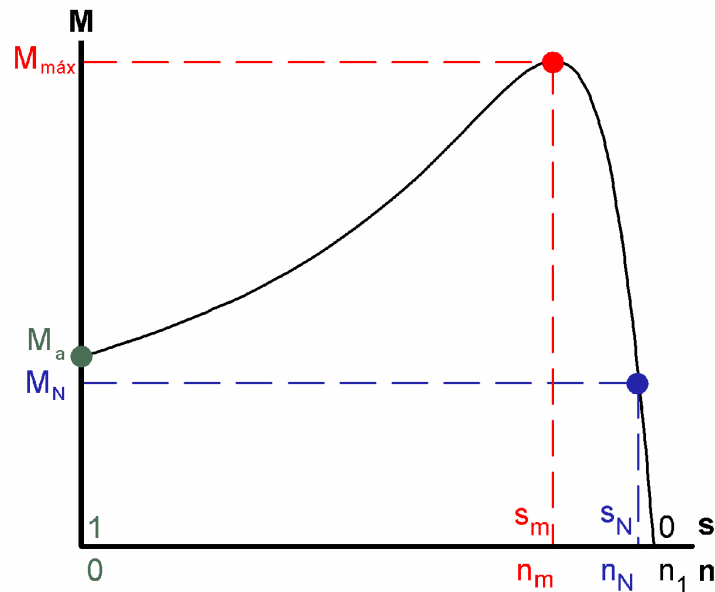


Fig. 6.16: Curva par-velocidad de un motor asíncrono trifásico a V_l y f_l constantes

En la Fig. 6.16 se muestra la zona de la curva par-velocidad de una máquina de inducción (Fig. 6.15) correspondiente al funcionamiento como motor.

En esta curva se aprecia que el punto de par nulo se produce a la velocidad de sincronismo (deslizamiento nulo). Esto es así porque esta curva se refiere al par interno. El par útil nulo se produce para una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo porque entonces el par interno no es exactamente nulo, sino muy pequeño pues debe vencer el par debido a rozamientos y ventilación.

En el momento de arrancar un motor su velocidad todavía es nula y su deslizamiento es, pues, igual a 1. Por lo tanto, en la Fig. 6.16 el punto de corte de la curva con el eje de ordenadas corresponde al *par de arranque* M_a . Este par se puede calcular mediante la expresión general del par (6.25) dándole al deslizamiento s el valor 1.

En la Fig. 6.16 se han representado también los puntos correspondientes al *par máximo* $M_{m\acute{a}x}$ y al *par asignado* M_N . El par máximo se puede calcular mediante la expresión general del par (6.25) dándole al deslizamiento s el valor s_m que, a su vez, se calcula mediante la fórmula (6.26). s_m suele tomar valores entre el 15% y el 30%. El par asignado se puede calcular mediante (6.25) dando al deslizamiento el valor s_N de la marcha asignada. s_N suele tomar valores entre el 3% y el 8%.

6.4. – Punto de funcionamiento

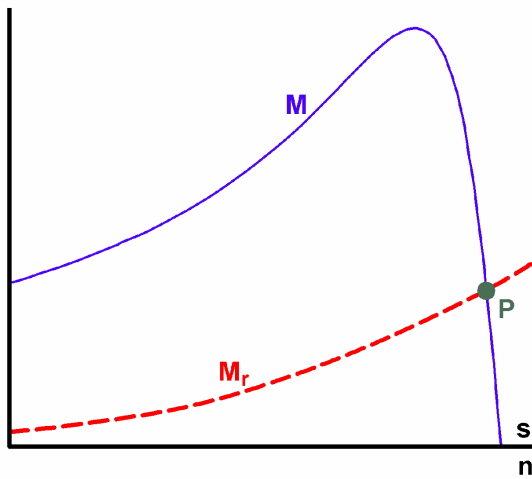


Fig. 6.17: Punto de funcionamiento

Cuando un motor asíncrono mueve una carga mecánica en régimen permanente se establece un equilibrio entre el par motor M proporcionado por la máquina asíncrona y el par resistente M_r de la carga. Por lo tanto, el sistema motor-carga funciona en un punto en el que se verifica la siguiente igualdad

$$\text{Punto de funcionamiento: } M = M_r \quad (6.27)$$

En la Fig. 6.17 se ha representado sobre los mismos ejes de coordenadas las curvas par-velocidad del motor y de la carga. El punto de funcionamiento del sistema (P en la Fig. 6.17) será el punto de corte de ambas curvas.

En general, salvo casos excepcionales, un motor asíncrono funciona en la zona de la curva par-velocidad con deslizamientos pequeños, inferiores a s_m . Realmente, lo normal es que no se

sobrepase el par asignado con lo que se funciona con deslizamientos aún más pequeños, iguales o inferiores al deslizamiento asignado s_N .

La curva par-velocidad para deslizamientos pequeños es dura o rígida, lo que quiere decir que la velocidad varía muy poco con el par. Esta zona de la curva prácticamente es lineal variando el par M del motor proporcionalmente al deslizamiento s .

6.5. – Efectos de variar V_1 y de introducir resistencias en serie con el rotor

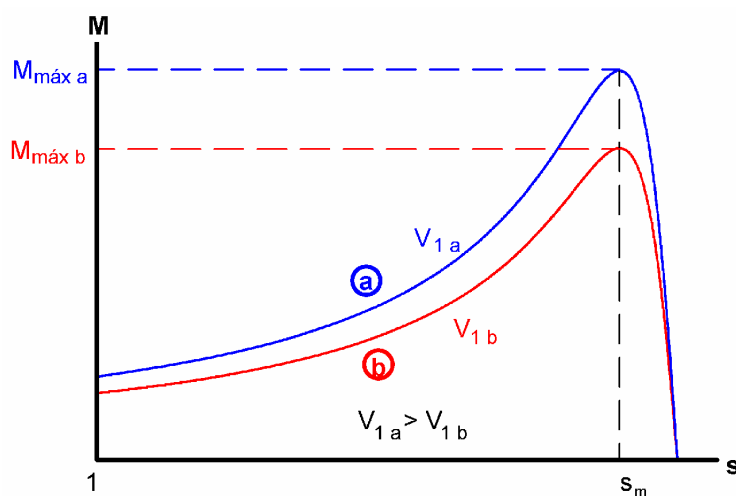


Fig. 6.18: Efectos de variar V_1

Cuando se modifica el valor eficaz de la tensión del estator V_1 sin variar la frecuencia f_1 , el valor del deslizamiento de par máximo s_m no cambia pero el par de la máquina queda modificado en función del cuadrado de V_1 .

En la Fig. 6.18 se muestra como se modifica la curva par-velocidad de un motor cuando la tensión del estator se reduce de V_{1a} a V_{1b} . Para ambas tensiones el punto de par máximo se produce con el mismo deslizamiento s_m pero el par máximo varía con el cuadrado de la tensión.

El efecto de añadir en serie con cada fase del rotor una resistencia R_x es equivalente a considerar en los cálculos que la resistencia R_2 ha aumentado. Evidentemente, sólo es posible añadir resistencias en serie con el rotor en los motores de anillos, ya que en los de jaula de ardilla no es posible acceder al devanado del rotor para conectarle resistencias.

El par máximo no se ve modificado por añadir resistencias en serie con el rotor. Por el contrario, la expresión (6.26) señala que el añadir resistencias en serie con el rotor; o lo que es equivalente, el aumentar la resistencia R'_2 , aumenta el deslizamiento de par máximo s_m .

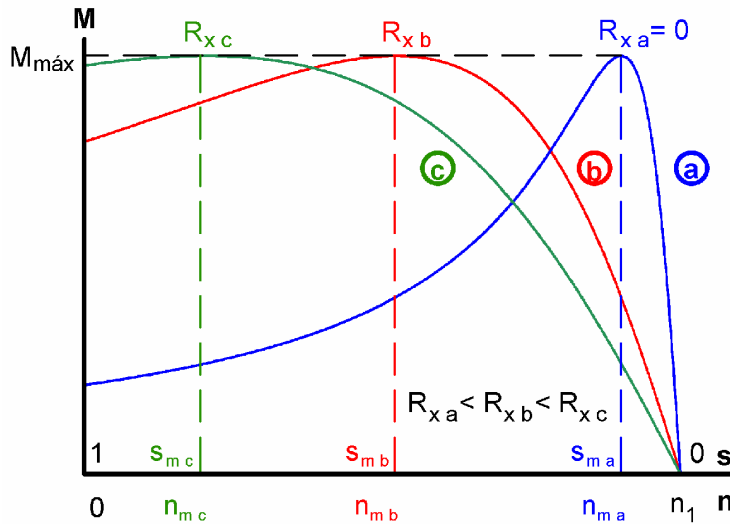


Fig. 6.19: Efectos de introducir resistencias en serie con las fases del rotor

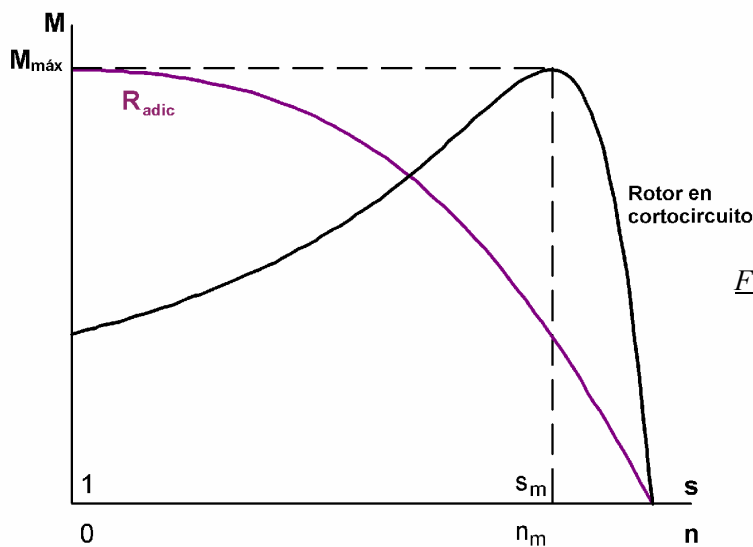


Fig. 6.20: Obtención del par máximo en el arranque mediante resistencias en serie con el rotor

En la Fig. 6.19 se muestra el efecto que sobre la curva par-velocidad tiene el introducir resistencias en serie con el rotor. La curva (a) corresponde al funcionamiento con el rotor en cortocircuito ($R_{xa} = 0$) y las curvas (b) y (c) corresponden al funcionamiento cuando se han introducido resistencias en serie con las fases del rotor ($R_{xc} > R_{xb}$). En esta figura se aprecia como el par máximo es el mismo en todas las curvas, pero el deslizamiento de par máximo va aumentando (luego la velocidad de par máximo va disminuyendo) a medida que aumenta el valor de las resistencias puestas en serie con las fases del rotor.

La Fig. 6.20 muestra que existe un valor especial R_{adic} de las resistencias R_x puestas en serie con las fases del rotor que consigue que el par máximo se produzca en el arranque.

Para calcular el valor de R_{adic} se tiene en cuenta que con ella el deslizamiento de par máximo s_m pasa a ser 1. Se deduce la siguiente expresión:

$$R_{adic} = \frac{R'_{adic}}{m_v m_i} = \frac{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} - R'_2}{m_v m_i} \quad (6.28)$$

7. – ARRANQUE

El arranque es el proceso de puesta en marcha de un motor que lo lleva desde una velocidad nula a la del punto de funcionamiento estable que corresponda al par resistente de la carga que tiene que mover.

Para que pueda realizarse esta maniobra debe cumplirse la *condición de arranque*: durante el arranque el par del motor debe ser superior al par resistente. De no cumplirse esta condición, el par motor es insuficiente para mover la carga mecánica que tiene acoplada y no se puede producir el arranque.

En el instante de iniciar el arranque, cuando la velocidad todavía es nula y el deslizamiento entonces vale 1, la corriente que demanda el motor es elevada, varias veces superior a la asignada.

Esta corriente elevada puede provocar caídas de tensión en la instalación eléctrica a la que está conectado el motor afectando a otros aparatos conectados a ella. Por esta razón existen normas que establecen las máximas corrientes de arranque permitidas (en Baja Tensión estos límites vienen fijados en función de la potencia útil del motor en la instrucción ITC-BT-47 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión).

Esto obliga a utilizar en muchas ocasiones procedimientos que reduzcan la corriente de arranque con respecto a la del arranque directo.

Varios de estos procedimientos de arranque consisten en alimentar al motor con una tensión inferior a la asignada en el momento del arranque para después, cuando el rotor ya está girando, ir la aumentando hasta alcanzar su valor asignado.

De esta manera, al tener en el arranque una tensión inferior a la asignada la corriente de arranque disminuye, pero también el par de arranque como se puede apreciar en la Fig. 6.18. Esto hay que tenerlo en cuenta y comprobar que el par de arranque del motor a tensión reducida es suficientemente grande como para que se cumpla la condición de arranque. Por esta razón, estos procedimientos de arranque sólo se pueden utilizar si el motor se arranca sin carga o con cargas mecánicas que no ejerzan un par resistente elevado a bajas velocidades.

Para conseguir reducir la tensión durante el arranque se pueden emplear varios métodos: un autotransformador, un arrancador electrónico, conectar impedancias en serie con el estator, ... En los motores trifásicos uno de los más empleados es el *arranque estrella-triángulo*.

El arranque estrella-triángulo sólo se puede utilizar si el motor está conectado a una red eléctrica cuya tensión obligue a que para que el motor funcione a su tensión asignada deba conectarse en triángulo. El arranque se realiza con el motor conectado en estrella. Cuando el motor ha adquirido cierta velocidad se conmutan las conexiones y se lo conecta en triángulo para que pase a funcionar con su tensión asignada. Se demuestra que en este arranque los valores del par de arranque y de la corriente de línea se reducen a la tercera parte de los correspondientes valores en el arranque directo.

En motores de rotor bobinado se utiliza otro procedimiento de arranque que consiste en conectar una resistencia en serie con cada fase del rotor. Una vez arrancado el motor, se van disminuyendo progresivamente estas resistencias hasta que el rotor queda cortocircuitado.

Con este sistema se reduce la intensidad de arranque y se aumenta el deslizamiento en el que se produce el par máximo, pero sin que éste varíe (Figs. 6.19 y 6.20); lo que origina el aumento del par de arranque con respecto al del arranque directo. Incluso se puede obtener el par máximo en el arranque para la resistencia R_{adic} conectada en serie con el rotor, cuyo valor viene dado por la expresión (6.28).

8. – REGULACIÓN DE VELOCIDAD

De las fórmulas de la velocidad de sincronismo (6.1) y del deslizamiento (6.2) se deduce que:

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s) \quad (6.29)$$

Esto indica que se puede regular la velocidad de un motor asíncrono modificando su número de polos ($2p$), el deslizamiento (s) o la frecuencia del estator (f_1).

La *regulación por variación del número de polos* únicamente permite alcanzar unos pocos valores de velocidad diferentes, ya que el número de pares de polos p sólo puede adoptar valores enteros y, en consecuencia, no se puede variar de forma continua. Se utiliza en máquinas de jaula de ardilla que en el estator disponen, bien de dos devanados independientes, cada uno de ellos con un número de polos diferente; o bien de un devanado especial que admite diferentes formas de conexión para modificar su número de polos.

La *regulación por variación del deslizamiento* se puede realizar variando la tensión de alimentación, introduciendo resistencias en serie con las fases del rotor o conectando el rotor a un variador o convertidor de frecuencias (es decir, a una fuente de tensión que permite variar electrónicamente el valor eficaz y la frecuencia de las tensiones que suministra). Los dos últimos procedimientos sólo se pueden utilizar en máquinas de rotor bobinado.



Fig. 6.21: Variador o convertidor de frecuencias

La *regulación por variación de la frecuencia* consiste en variar la frecuencia f_1 de las corrientes del estator con lo que se modifica la velocidad de sincronismo n_1 de la máquina. Para ello se alimenta el estator a través de un variador de frecuencias (Fig. 6.21). Este sistema permite variar la velocidad de forma continua entre un amplio margen de velocidades.

El variador que alimenta al motor se diseña para que modifique el valor eficaz de la tensión V_1 que proporciona al estator a la vez que varía la frecuencia f_1 , de forma que consiga que el campo magnético de la máquina sea siempre el mismo para todas las frecuencias. Interesa que esto sea así porque de esta manera las curvas de par-velocidad a diferentes frecuencias son como las representadas en la Fig. 6.22 en las que el par máximo no varía. Así se consigue que el motor conserve a todas las frecuencias la misma capacidad de suministrar par que tiene a la frecuencia asignada (f_{1N}).

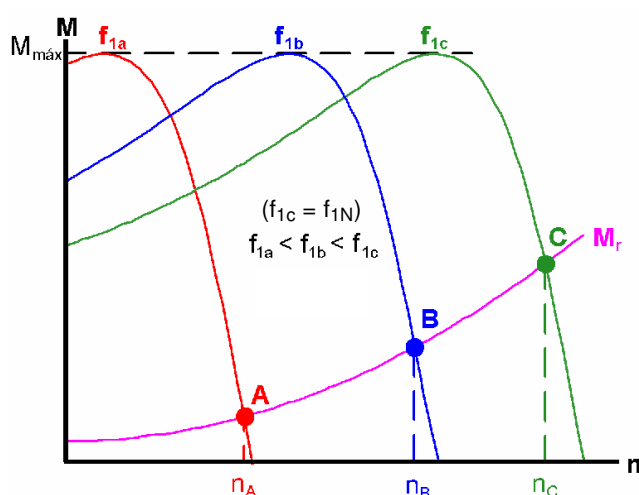


Fig. 6.22: Regulación de la velocidad por variación de la frecuencia f_1 manteniendo el campo magnético constante

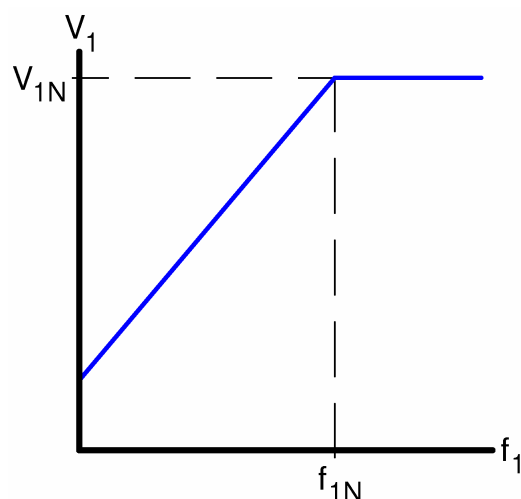


Fig. 6.23: Variación de la tensión con la frecuencia en un variador para controlar la velocidad de un motor de inducción.

Sin embargo, esta estrategia de mantener constante el campo magnético mientras se varía la frecuencia no se puede mantener cuando la frecuencia toma valores superiores al asignado f_{1N} , ya que esto daría lugar a que la tensión V_1 alcanzara valores peligrosos, superiores al valor asignado V_{1N} . Por lo tanto, para frecuencias superiores a la asignada lo que se hace es mantener el valor eficaz V_1 de las tensiones del estator constante e igual al valor asignado V_{1N} . La curva de la Fig. 6.23 muestra la forma típica de como varía la tensión V_1 con la frecuencia f_1 que proporciona un variador que controla la velocidad de un motor asíncrono.

9. – ENSAYOS DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

9.1. – Conexión eléctrica

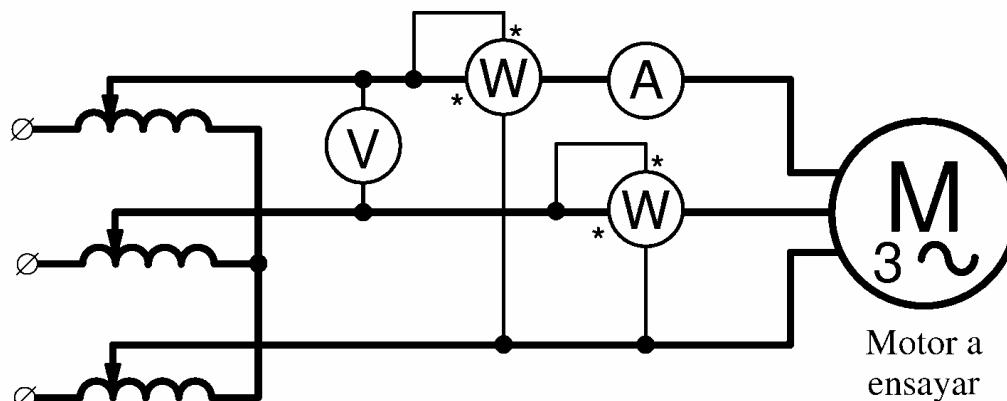


Fig. 6.24: Conexionado eléctrico de un motor asíncrono para ser ensayado

En este apartado se van a describir varios ensayos de una máquina de inducción actuando como motor. En todos ellos la conexión eléctrica es la misma, lo que varía es la carga mecánica acoplada al rotor y el procedimiento de ensayo.

En la Fig. 6.24 se muestra un circuito eléctrico para el ensayo de un motor trifásico. Se necesita una fuente de tensión alterna trifásica variable, que en la figura consiste en autotransformador trifásico tipo variac. La tensión y la corriente de línea se miden con un voltímetro y un amperímetro, respectivamente. También hay que medir la potencia total consumida por el motor mediante alguno de los procedimientos para medir potencia activa en trifásica descritos en el capítulo 2. En la Fig. 6.24 se ha elegido el método de los dos vatímetros o conexión Aron.

En algunos casos el amperímetro y los circuitos amperimétricos de los vatímetros se conectan al circuito a través de transformadores de intensidad. Análogamente, el voltímetro y los circuitos voltimétricos de los vatímetros se pueden conectar a través de transformadores de tensión.

En los ensayos se miden tensiones y corrientes de línea, pero en los cálculos hay que utilizar tensiones e intensidades de fase.

Así, en devanados conectados en *estrella*:

$$V = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad I = I_L \quad (6.30a)$$

y en devanados conectados en *triángulo*

$$V = V_L \quad I = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (6.30b)$$

Recuérdese que el factor de potencia $\cos \varphi$ en trifásica se calcula a partir de la potencia activa P , de la tensión I_L y de corriente de línea V_L de esta manera

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V_L I_L} \quad (6.31)$$

9.2. – Ensayo de vacío a tensión variable

El ensayo de vacío a tensión variable se utiliza para obtener las pérdidas mecánicas P_m de la máquina.

Previamente a este ensayo se habrá medido, mediante alguno de los procedimientos descritos en el capítulo 1, la resistencia de las tres fases del estator. La media aritmética de estas tres medidas será el valor que se tome para el parámetro R_1 en los cálculos siguientes.

En este ensayo el motor está en vacío; es decir, sin ninguna carga mecánica acoplada a su eje. El ensayo se realiza a diferentes tensiones, empezando por el valor asignado V_{IN} o ligeramente superior y reduciendo la tensión hasta un valor (entre el 30 y el 50% de V_{IN}) en el que la velocidad n todavía no se haya reducido de forma apreciable con respecto a la que gira a la tensión asignada.

Para todas estas tensiones se miden las siguientes magnitudes:

$$V_{1L}$$

$$I_{0L}$$

$$P_0$$

y se calcula la suma de las pérdidas en el hierro y mecánicas siguiendo el proceso descrito en el apartado 5.2:

$$P_{Fe} + P_m = P_0 - 3 R_1 I_0^2 \quad (6.32)$$

Ahora se dibuja una gráfica (Fig. 6.25) donde se colocan en el eje vertical los valores de las pérdidas $P_{Fe} + P_m$ -calculados mediante la fórmula (6.32)- y en el eje horizontal los valores del cuadrado de la tensión (V_1^2). Se aprecia que esta curva es prácticamente una línea recta. A continuación se extrapolará esta recta hasta que corte el eje vertical. El punto de corte dará el valor de $P_{Fe} + P_m$ cuando la tensión es nula y, por consiguiente, el campo magnético y las pérdidas en el hierro P_{Fe} son también nulos. En resumen, el corte de la recta extrapolada con el eje vertical da el valor de las pérdidas mecánicas P_m del motor.

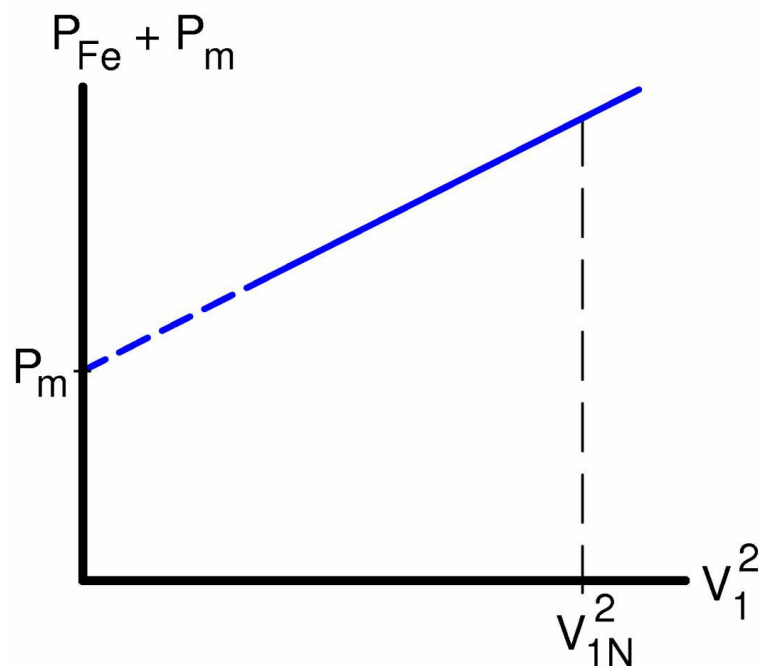


Fig. 6.25: Separación de las pérdidas mecánicas P_m

9.3. – Ensayo de vacío a la tensión asignada

El ensayo de vacío a la tensión asignada permite determinar los parámetros R_{Fe} y X_{μ} del circuito equivalente aproximado representado en la Fig. 6.14.

Antes de realizar este ensayo se habrán obtenido los valores de la resistencia R_1 de una fase del estator y de las pérdidas mecánicas P_m mediante el ensayo de vacío a tensión variable descrito anteriormente.

Se deja el motor sin carga mecánica, se lo alimenta a su tensión asignada y se miden las siguientes magnitudes

$$V_{1NL} \qquad I_{0L} \qquad P_0$$

y se calcula la suma de las pérdidas en el hierro y mecánicas a la tensión asignada mediante la expresión (6.32). Como ya se han obtenido previamente las pérdidas mecánicas P_m , se puede obtener el valor de las pérdidas en el hierro P_{Fe} a la tensión asignada:

$$P_{Fe} = (P_{Fe} + P_m) - P_m \qquad (6.33)$$

Se calcula el factor de potencia $\cos \varphi_0$ de esta manera:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{\sqrt{3} V_{1NL} I_{0L}} \qquad (6.34)$$

El resto de los cálculos son similares a los del ensayo en vacío de un transformador:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 \qquad I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 \qquad (6.35)$$

$$\boxed{R_{Fe} = \frac{V_{1N}}{I_{Fe}}} \qquad \boxed{X_{\mu} = \frac{V_{1N}}{I_{\mu}}} \qquad (6.36)$$

9.4. – Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

El ensayo de cortocircuito permite determinar los parámetros R_{cc} y X_{cc} del circuito equivalente aproximado representado en la Fig. 6.14.

En este ensayo el rotor está bloqueado impidiéndole su giro. Se alimenta al motor con una tensión reducida que se va aumentando paulatinamente hasta conseguir que circule su corriente asignada. A continuación se miden las siguientes magnitudes

$$V_{1ccL}$$

$$I_{1NL}$$

$$P_{cc}$$

En este ensayo la velocidad de la máquina es nula. Luego, teniendo presente la relación (6.19):

$$n = 0 \rightarrow s = 1 \rightarrow R'_c = 0 \quad (6.37)$$

Al realizarse este ensayo a tensión reducida, ahora sí se puede despreciar la corriente de vacío (que será menor que la corriente de vacío a tensión asignada) frente a la corriente asignada. Así pues, en este ensayo el circuito equivalente aproximado de la Fig. 6.14 se reduce al representado en la Fig.6.26.

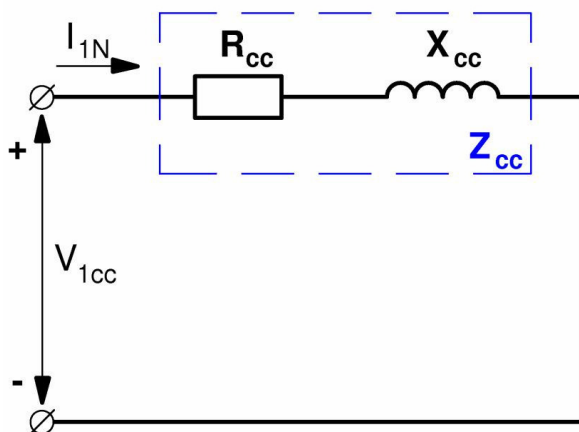


Fig. 6.26: Circuito equivalente de una fase del motor durante el ensayo de cortocircuito.

El procedimiento para calcular R_{cc} y X_{cc} es similar al utilizado en el ensayo de cortocircuito de un transformador:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{1ccL} I_{1NL}} \quad (6.38)$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1N}} \quad (6.39)$$

$$\boxed{R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc}} \quad \boxed{X_{cc} = Z_{cc} \sin \varphi_{cc}} \quad (6.40)$$

9.5. – Ensayo en carga

El ensayo en carga consiste en acoplar un freno al motor y medir su comportamiento con diferentes cargas mecánicas. En este ensayo no sólo se miden las magnitudes eléctricas del estator, sino que también es preciso medir la velocidad de giro n (o, alternativamente el deslizamiento s) y el par útil M_u en el eje (o, alternativamente, la potencia útil P_u). Téngase en cuenta que conocida la velocidad n se puede obtener el par M_u a partir de la potencia útil P_u mediante la relación (6.22). Del mismo modo, conocida la velocidad n se puede calcular s mediante la fórmula (6.1).

Luego, las magnitudes que se miden en este ensayo son estas:

$$V_{1L} \quad I_{1L} \quad P_1 \quad n \text{ (ó } s) \quad M_u \text{ (ó } P_u)$$

Mediante este ensayo se pueden obtener varias curvas que describen el comportamiento del motor: $I_1 - s$, $\cos \varphi_1 - s$, $\eta - s$, $P_1 - s$, $M_u - s$ y $P_u - s$.

Para ello téngase presente que el factor de potencia $\cos \varphi_1$ y el rendimiento η se pueden obtener mediante estas fórmulas:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} V_{1NL} I_{1L}} \quad (6.41)$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} \quad (6.42)$$

En este ensayo las magnitudes de tipo mecánico se miden como se indica seguidamente.

Medida de la velocidad

Normalmente, la velocidad n se mide para determinar después el deslizamiento s mediante la relación (6.1). Por esta razón esta medida debe ser precisa. En efecto, el deslizamiento suele ser pequeño, lo que significa que la diferencia entre los valores de las velocidades de sincronismo n_1 y de giro n es pequeña y un pequeño error en la velocidad n afecta en gran medida al valor del deslizamiento s .

Aquí se van a describir los siguientes métodos de medida de la velocidad: tacómetros mecánicos y ópticos, generadores tacométricos y encoders. Existen también procedimientos para medir directamente el deslizamiento s (métodos estroboscópicos, medida de la frecuencia rotórica, ...) pero su descripción se sale de los límites de este texto.

Un *tacómetro mecánico* tiene la forma representada en la Fig. 6.27. Básicamente está compuesto por una escala graduada circular C , con su aguja indicadora A correspondiente, un eje giratorio E terminado en un apéndice de goma G , que se pone en contacto con el órgano cuya velocidad se mide y un pulsador P que permite bloquear la aguja indicadora para poder realizar la lectura sin necesidad de seguir manteniendo en contacto el tacómetro con el órgano móvil. A veces también incluye un selector de escalas.

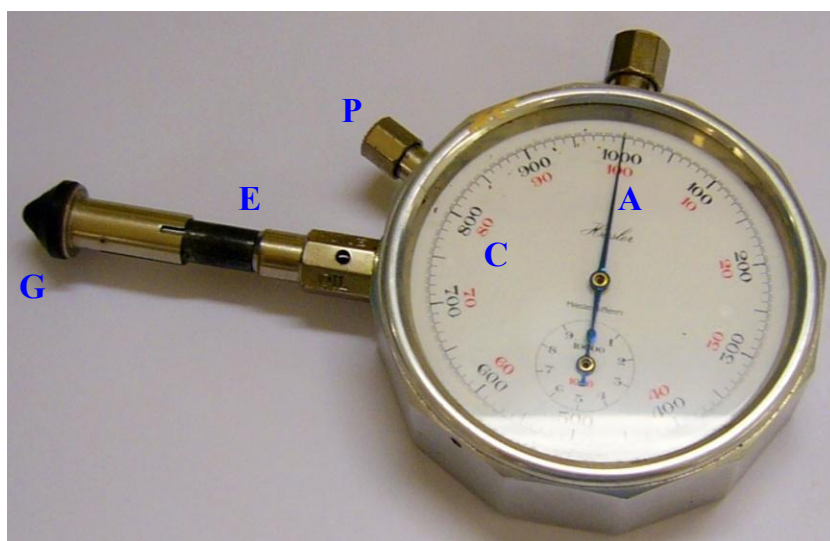


Fig. 6.27: Tacómetro mecánico



Fig. 6.28: Tacómetro óptico



Fig. 6.29: Cinta adhesiva reflectante para un tacómetro óptico

En la Fig. 6.28 se muestra un *tacómetro óptico*. Para utilizarlo se coloca una cinta adhesiva reflectante sobre el eje cuya velocidad se desea medir (Fig. 6.29). El tacómetro emite un haz de luz láser que hay que enfocar hacia la cinta reflectante y tiene un sensor capaz de detectar la luz reflejada por ésta. El aparato dispone de un sistema electrónico que cuenta el tiempo y la cantidad de destellos de luz reflejada e indica en una pantalla la velocidad.

Los *generadores tacométricos* son generadores que suministran una señal eléctrica proporcional a su velocidad. Los más sencillos son las *tacodinamos o dinamos tacométricas*.

Una tacodinamo es un generador de c.c. cuyo inductor es de imanes permanentes y que funciona prácticamente en vacío porque en su inducido sólo está conectado un voltímetro. En estas condiciones la tensión que suministra el generador es proporcional a la velocidad de giro de la máquina. Usualmente el voltímetro que mide esta tensión tiene su escala calibrada para que indique directamente la velocidad.

Los **encoders** (Fig. 6.31) proporcionan una señal digital en función de su velocidad de giro. Pueden ser *absolutos* o *incrementales*. Los encoders absolutos miden también la posición angular del rotor en cada momento. Aquí se va a tratar sólo de los encoders incrementales.

Como ejemplo de encoder incremental se va a describir un encoder óptico. Este posee un disco de material transparente que tiene en su periferia una serie de divisiones negras (y, por lo tanto, opacas) uniformemente distribuidas, por ejemplo 100 divisiones. Este disco gira a la velocidad que se desea medir y está colocado entre una célula fotoeléctrica y una lámpara, ambas enfrentadas y situadas cerca del borde del disco.

El giro del disco hace que la célula fotoeléctrica reciba luz cuando pase frente a ella una zona transparente de la periferia del disco y deje de recibirla cuando entre la célula y la lámpara pase una de las divisiones negras del disco. En consecuencia, en nuestro ejemplo, al cabo de una vuelta del disco la célula habrá recibido 100 impulsos de luz y habrá originado, por lo tanto, 100 impulsos de tensión eléctrica que son enviados a un medidor digital que también dispone de un cronómetro. Este medidor cuenta el número de impulsos por minuto y los divide por las 100 divisiones que tiene el disco, con lo que obtiene la velocidad en r.p.m. cuyo valor representa en una pantalla.

Frenos

Los frenos se utilizan para cargar mecánicamente a los motores eléctricos y poderlos ensayar en carga. Los frenos, por lo tanto, ejercen un par resistente M_r opuesto al par del motor, que cuando el sistema motor-freno alcance un equilibrio estable será del mismo valor que el par útil M_u desarrollado por el motor ensayado (véase el apartado 6.4).

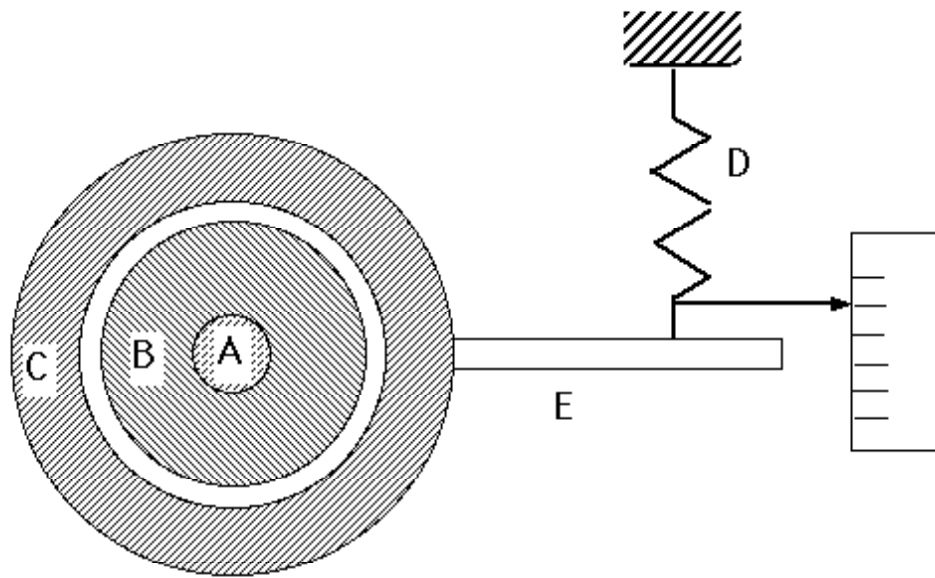
Existen **frenos mecánicos** (como, por ejemplo, el *Freno de Prony*) donde el par resistente M_r se produce por rozamiento mecánico. Pero resulta más eficaz el utilizar una máquina eléctrica que actúe como generador. En efecto, un generador eléctrico ejerce un par de frenado que le permite “robar” potencia mecánica al motor para convertirla en potencia eléctrica. Esta potencia no se transforma en calor en la propia máquina sino que se gasta fuera de la misma, bien

disipándola en unas resistencias o bien aprovechándola al reinyectarla a la red. Por esta razón, el generador no se calienta excesivamente y se puede utilizar para ensayar máquinas de gran potencia. Actuando sobre la potencia eléctrica que se demanda al generador se controla su par de frenado.

La máquina utilizada tradicionalmente como freno ha sido la **dinamo-freno**, es decir un generador de c.c. de excitación independiente. No obstante se puede utilizar como freno cualquier tipo de máquina eléctrica rotativa haciéndola actuar como generador. Además, dado que todas las máquinas eléctricas son reversibles, tienen la ventaja de que también se puede hacerlas funcionar como motores para ensayar una máquina que actúe como generador.

Medida del par

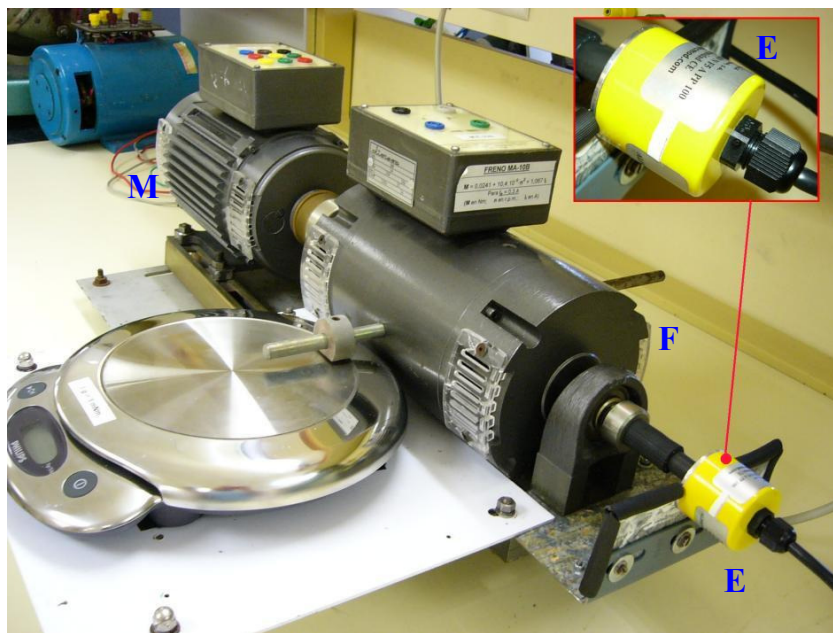
Una máquina eléctrica diseñada para actuar como **generador dinamométrico** tiene una carcasa especial que no es fija, como en las máquinas normales, sino que es basculante (véanse las Figs. 6.30 y 6.31) y puede girar. Esto le permite no sólo crear un par de frenado, sino también el medirlo.



A: Eje B: Rotor C: Carcasa
D: Dinamómetro E: Brazo unido a la carcasa

Fig. 6.30: Generador dinamométrico

El par de frenado que el generador dinamométrico ejerce sobre su eje da lugar a un par de reacción de igual valor y signo contrario que tiende a hacer girar su carcasa **C** (Fig. 6.30). Un dinamómetro **D** sujeto a un brazo **E** fijo a la carcasa basculante **C** del freno impide que ésta gire y sirve para medir el par. La escala de este dinamómetro está graduada de tal manera que indica directamente el valor del momento del par. En la actualidad la fuerza que se ejerce sobre el extremo del brazo **E** no se mide con un dinamómetro de resorte, como se indica por sencillez en la Fig. 6.30, sino mediante galgas extensiométricas (las galgas extensiométricas son sensores de fuerza cuya resistencia eléctrica varía con la fuerza a la que son sometidas).



- M:** Motor a ensayar*
***F:** Freno con carcasa basculante para medir el par*
***E:** Encoder*

Fig. 6.31: Equipo para el ensayo en carga de un motor

Si se utiliza como freno un **generador tarado** se puede determinar el par M_u midiendo la potencia útil P_u y aplicando la relación (6.22). En este caso se conocen con mucha exactitud las pérdidas de la máquina que actúa como freno. Por esta razón, midiendo la potencia eléctrica (con vatímetros) que el freno proporciona y su velocidad se puede obtener su potencia de frenado P_r , igual a la potencia útil P_u del motor cuando se establece el equilibrio.

En este ensayo no hace falta, pues, el disponer de un sistema de medida de par; por lo que la máquina tarada puede ser cualquier tipo de máquina eléctrica -sin necesidad de que tenga carcasa basculante- que se la hace funcionar como generador y cuyas pérdidas sean conocidas con gran precisión.

10. – BIBLIOGRAFÍA

- [1] CORTES. “Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo 3: Máquinas de c.a. asíncronas”. Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 1977.
- [2] DPTO. TÉCNICO DISTESA. “Manuales Distesa: Máquinas Ila”. DISTESA. Madrid. 1976.
- [3] FAURE BENITO. “Máquinas y accionamientos eléctricos”. Colegio oficial de ingenieros navales y oceánicos. Madrid. 2000.
- [4] FERNÁNDEZ FLÓREZ, FRAILE MORA y MOLINA MARTÍN URDA. “Prácticas de Laboratorio I”. Sección de Publicaciones de la E.T.S.I.I. de Madrid. 1977.
- [5] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. “Prácticas de Electrotecnia”. Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [6] FRAILE MORA. “Máquinas eléctricas”. McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 2008.
- [7] GURRUTXAGA. “El fenómeno electromagnético. Tomo VI: Las máquinas eléctricas II”. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander. 1985.
- [8] LAFOSSE. “Manual práctico de medidas eléctricas y de ensayos de máquinas”. Urmo. Bilbao. 1978.
- [9] SANZ FEITO. “Máquinas eléctricas”. Pearson Educación. Madrid. 2002.

2ª Parte:

PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Práctica 0: PRESENTACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

Práctica 1: MEDIDAS ELÉCTRICAS

Práctica 2: AUTOMATIZACIÓN

Práctica 3: ENSAYO DE TRANSFORMADORES

**Práctica 4: ANÁLISIS DE CONVERTIDORES DE FRECUENCIA Y DE
MOTORES ASÍNCRONOS**

Práctica 0:

PRESENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

1. - PRESENTACIÓN
2. - DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO
3. - DESARROLLO DE CADA PRÁCTICA
4. - BIBLIOGRAFÍA

Práctica 0:

PRESENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

1. - PRESENTACIÓN

El objetivo de estas clases de laboratorio se encamina, en primer lugar, a la formación práctica de los alumnos de las Ingenierías de Caminos Canales y Puerto y la Técnica de Obras Públicas. Entendemos que dicha formación consiste no sólo en el hecho material de manipular con máquinas y aparatos (realizando los diversos circuitos y controlando la marcha de los equipos, así como la obtención de datos), sino también en una forma de hacer más inteligibles las descripciones y demostraciones y que, sobre todo, ayude a superar las grandes o pequeñas dificultades que se le presenten en su relación con instrumentos, máquinas y circuitos eléctricos.

2. – DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO

El laboratorio dispone de un *cuadro eléctrico* que controla el suministro de las siguientes tensiones a todos los puestos de trabajo:

1. Tensión alterna trifásica con neutro a 230/132 V
2. Tensión alterna trifásica variable con neutro. Suministra tensiones cuyo valor eficaz entre fases se puede variar entre 0 y 230 V.
3. Tensión continua variable entre 0 y 300 V.

La tensión alterna variable la proporciona un autotransformador trifásico cuya tensión de salida se controla de forma manual. La tensión continua se obtiene rectificando mediante un puente de diodos la tensión alterna de salida de este autotransformador.

El Laboratorio consta de *seis puestos de trabajo para los alumnos* (Fig. P0.1) divididos en dos bloques de dos y de cuatro puestos, respectivamente. Además existen también *dos bastidores* que se utilizan principalmente en los montajes realizados por el profesor para hacer demostraciones a los alumnos.



Fig. P0.1: Puesto de trabajo para alumnos:

1: Mesa ; 2: Regleta ; 3: Portamódulos; 4: Seta de parada de emergencia

Cada puesto de trabajo consta de una *mesa* con un *frontal* (Fig. P0.1). El frontal tiene una *regleta* con interruptores, protecciones, bornes y pilotos para maniobrar y utilizar las diferentes fuentes de tensión del laboratorio. Encima de la regleta hay un *portamódulos* donde se pueden colocar módulos con material electrotécnico.



Fig. P0.2: Seta de parada de emergencia y bornes de puesta a tierra de una regleta.

En el lado derecho de cada regleta existe una *seta de parada de emergencia* (Figs. P0.1 y P0.2). Como su propio nombre indica esta seta constituye un sistema de emergencia que desconecta todo el laboratorio cuando es pulsada. Por lo tanto, sólo debe usarse cuando sea estrictamente necesario, esto es, en un caso de emergencia. Una vez pulsada esta seta permanece hundida y bloquea la conexión de todos los circuitos del laboratorio. Habrá que desbloquear la seta, girándola en sentido de las agujas del reloj, para poder volver a utilizar las tensiones del laboratorio.

En la regleta, además de los bornes que proporcionan las tensiones del laboratorio, existen otros para la *conexión a tierra* (Fig. P0.2) de los conductores de protección de los circuitos que se monten durante cada práctica.

Muchos de los equipos que se utilizan en el laboratorio –resistencias, interruptores, aparatos de medida, protecciones, ...- están dispuestos en *módulos* (Fig. P0.3), los cuáles se colocan en el portamódulos del frontal. El resto de los equipos –máquinas eléctricas, aparatos de medida de sobremesa, ...- (Figs. P0.4 y P0.5) se colocan encima de la mesa de cada puesto de trabajo.



Fig. P0.3: Módulos con material electrotécnico



Fig. P0.4: Grupo de máquinas eléctricas sobre una bancada



Fig. P0.5: Aparatos de medida de sobremesa analógicos y digitales

3. - ORGANIZACIÓN Y DESARROLLO DE CADA PRÁCTICA

Una medida en un laboratorio, tanto eléctrico como de otro tipo, ha de efectuarse con orden y método, debiéndose elaborar un informe pormenorizado con todos sus detalles. De esta manera, alguien ajeno a la medición podrá ser capaz de juzgar la validez de los resultados obtenidos y repetir, si es preciso, la experiencia en las mismas condiciones. La realización de una experiencia en el laboratorio seguirá, pues, los pasos siguientes.

3.1. - Preparación de la práctica

3.1.1. - Elección del método a utilizar en la medida

Para esta elección habrá que considerar la exactitud que se desea obtener en la medida, el orden de valor de la magnitud a medir y los medios de que se dispone en el laboratorio.

Normalmente, en cada práctica será el profesor encargado de laboratorio el que indicará a los alumnos el proceso de medida que se seguirá.

3.1.2. - Elección de los aparatos de medida a utilizar

En función del método de medida a seguir se escogen los aparatos a utilizar. Las características de los aparatos de medida que hay que considerar en esta elección son las siguientes:

- *Clase de precisión* adecuada a la exactitud que se desea obtener.
- *Sensibilidad* que permita apreciar las medidas con el grado de finura requerido.
- *Alcance o calibre*, de tal manera que la magnitud a medir tenga un valor comprendido entre el 30 y el 90% del alcance del aparato de medida. Si no se tiene una idea del valor de la magnitud a medir, habrá que prever el iniciar la medida con un aparato cuyo calibre sea grande. Esta medida inicial permitirá escoger posteriormente el aparato cuyo alcance se adecue mejor al valor de la magnitud a medir.
- *Apantallamiento* frente a campos eléctricos y/o magnéticos externos, cuando sea preciso.
- *Formas de la corriente eléctrica* (continua, pulsatoria, alterna sinusoidal, alterna no perfectamente sinusoidal, alterna monofásica, alterna trifásica, ...) y su frecuencia -cuando es alterna- que el aparato de medida puede medir con suficiente exactitud.
- *Impedancia de entrada*, ya que la corriente o la caída de tensión en el aparato de medida debe ser despreciable frente a las del circuito que se mide. De tal manera que la introducción del aparato de medida en el circuito no debe alterar apreciablemente los valores de las magnitudes a medir.

En cada práctica será el profesor el que suministre el material necesario para su montaje.

3.1.3. - Dibujo del esquema de conexiones

Siempre se debe realizar, aunque el esquema sea muy sencillo. Este esquema debe dibujarse utilizando símbolos convencionales, incluyendo todos los aparatos a utilizar y pensando en las normas de seguridad a tener en cuenta.

En algunas prácticas será el profesor el que suministrará el esquema y, en otras, serán los alumnos los que lo dibujarán. En este último caso, el esquema deberá ser aprobado por el profesor antes de proceder a su montaje.

3.1.4. - Preparación de las Hojas de Prácticas

Se preparan unas hojas en las que, de forma ordenada y cómoda, puedan quedar recogidos todos los valores que se van a medir; así como, los cálculos a realizar y los resultados que se obtendrán de estas medidas.

También se anotarán en estas hojas las características más importantes de las máquinas y de los aparatos de medida utilizados.

3.2. - Montaje y realización de la práctica

Una vez que ya se tiene preparada totalmente la práctica y se conoce todo el proceso a seguir (y no antes) se procede a realizar la medición.

3.2.1. - Montaje del circuito

- Se distribuirán los aparatos de medida de manera que las lecturas se puedan realizar de forma cómoda.
- Se usarán conductores de una sección adecuada a la corriente que va a circular por ellos.
- Las conexiones deben ser lo más cortas posible. Los cables largos tienen una impedancia mayor y pueden captar campos electromagnéticos externos, lo cual falsea la medida. Además, si al montar el circuito se usan cables demasiado largos, los alumnos pronto se encuentran con un lío de cables que origina errores en las conexiones.
- Las conexiones deben ser firmes. Una conexión floja puede provocar daños a aparatos y ser peligrosa.
- Si es posible, se usarán cables de diferentes colores para diferenciar los circuitos. Sobre todo es preciso distinguir bien el circuito de protección (que sirve para la puesta a tierra de los aparatos y equipos) de los demás. Los colores normalizados para el conductor de protección son el verde y amarillo a franjas.

- Comprobar la correcta posición de la aguja indicadora de los aparatos de medida sobre el cero. Si es preciso, realizar los ajustes correspondientes.
- En el montaje de los circuitos se respetarán estas normas de seguridad:
 - Antes de empezar a trabajar asegurarse de que el puesto de trabajo está sin tensión.
 - Se descargarán los condensadores antes de trabajar con ellos.
 - Cerciorarse de que los aparatos de medida con varios alcances están conectados en el calibre adecuado. En los polímetros, sobre todo, es fácil equivocarse y conectarlos en un alcance erróneo. De todos modos, es conveniente empezar la experiencia con el aparato en el alcance máximo, para pasar después al más adecuado.
 - Todos los aparatos con envoltura metálica se conectarán a tierra.
 - En los circuitos en los que intervienen elementos móviles (motores), se colocarán de tal manera que ni los conductores eléctricos ni nuestra ropa ni nuestros cabellos puedan engancharse en ellos.
 - Asegurarse de que el secundario de los transformadores de intensidad no ha quedado en circuito abierto.
 - Si se necesita un cable largo, no empalmar dos más cortos enchufándolos y dejando colgando al aire el grupo de dos bananas enchufadas.
 - Si se utiliza un freno en la experiencia, dejarlo colocado inicialmente de manera que su par resistente sea mínimo.

Una vez que los alumnos han montado una práctica, ésta será examinada por el profesor y, si está bien, permitirá que se dé tensión al circuito.

3.2.2. - Realización de la práctica

- Efectuar las lecturas de los aparatos de medida utilizando las escalas adecuadas y procurando evitar los errores de paralaje.
- Apuntar en las Hojas de Prácticas los valores leídos, tal cual aparecen en la escala de los aparatos de medida. Si es preciso multiplicar la lectura por una constante, ya se hará más tarde. El hacer cálculos de memoria durante la medida da lugar a errores.
- En algunas experiencias los valores de las magnitudes a medir van variando durante cierto tiempo desde que se conecta la tensión hasta alcanzar un valor constante. Así, al efectuar el ensayo de cortocircuito de un transformador, la intensidad que consume varía ligeramente mientras sus devanados se van calentando (y, por tanto, variando su

resistencia) por el paso de dicha corriente, hasta alcanzar la temperatura correspondiente a la carga nominal.

Esto habrá que tenerlo en cuenta para elegir el momento en el que se lean las indicaciones de los aparatos de medida.

- En las Hojas de Prácticas se deben anotar todas las condiciones ambientales en las que se ha realizado la experiencia y que puedan influir sobre los resultados obtenidos.
- Cuando un circuito está con tensión hay que tener cuidado y respetar varias normas de seguridad:
 - No se fumará.
 - Se estará de pie frente al puesto de trabajo para poder apartarse rápidamente en caso de peligro.
 - Se conocerá perfectamente la situación del interruptor del circuito para poderlo desconectar rápidamente si fuera preciso.
 - No se manipulará en los aparatos eléctricos con las manos húmedas.
 - Se evitará siempre el contacto con partes que puedan estar sometidas a tensión.
 - Tener cuidado con las mediciones que exijan que el elemento a medir esté sin tensión, tales como la medida de resistencias con puentes o con óhmetros.
 - Vigilar que el consumo de ningún aparato sea excesivamente grande, lo que podría dañarlo.

3.2.3. - Desconexión del circuito

Una vez realizada la práctica y previa indicación del profesor, se procederá a desmontar el circuito teniendo en cuenta las siguientes normas de seguridad:

- Desconectar la tensión del circuito.
- Descargar todos los condensadores.
- Esperar a que los motores dejen de girar antes de empezar a manipular en el circuito.
- Los aparatos de medida con varios alcances se dejarán dispuestos en el calibre más elevado. En el caso de polímetros se dejarán preparados en el alcance de tensión alterna más alto.
- Tener cuidado de no tocar los elementos que puedan haber quedado con una temperatura alta al finalizar la experiencia.

- No tirar de los conductores para deshacer las conexiones, sino aflojar los terminales y tirar de las clavijas.

3.3. - Preparación del informe

Una vez terminada una práctica, cada alumno realizará en las Hojas de Prácticas los cálculos necesarios para obtener las magnitudes buscadas y efectuará las observaciones que considere pertinentes.

El apartado de cálculos de las Hojas de Prácticas conviene que comience con la determinación de los valores de las magnitudes medidas. Estos valores se obtienen multiplicando las lecturas de los aparatos de medida por sus constantes y, si procede, por las relaciones de transformación de los transformadores de medida a los que estén conectados.

A continuación, en las Hojas de Prácticas se apuntarán los valores de los resultados obtenidos por cálculo a partir de los valores de las magnitudes medidas.

En las Hojas de Prácticas conviene anotar no sólo los resultados obtenidos, sino también los cálculos efectuados.

4. - BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHACÓN. “Medidas eléctricas para ingenieros”. Publicaciones de la Universidad Pontificia de Comillas. Madrid. 2000.
- [2] DPTO. TÉCNICO DISTESA. “Manuales de Laboratorio. Sistema Electrodidac.” (varios tomos)". Distesa. Madrid. 1976.
- [3] FRAILE y GARCIA GUTIÉRREZ. “Prácticas de Electrotecnia”. Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [4] KARCZ. “Fundamentos de la metrología eléctrica (3 tomos)”. Marcombo. Barcelona. 1976.
- [5] WOLF. “Guía para Mediciones Eléctricas y Prácticas de Laboratorio”. Prentice Hall Hispanoamericana. Méjico. 1988.

Práctica 1:

MEDIDAS ELÉCTRICAS

- 1. - INTRODUCCIÓN**
- 2. - OBJETIVOS**
- 3.- PRÁCTICA DE LABORATORIO**
- 4. - ESQUEMA ELÉCTRICO**
- 5. - MATERIALES Y EQUIPOS**
- 6. - DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**
- 7. - INFORME DE LA PRÁCTICA**

Práctica 1:

MEDIDAS ELÉCTRICAS

1. - INTRODUCCIÓN

En un laboratorio existen una serie de aparatos e instrumentos que se emplean para la medida y realización de diferentes trabajos. En esta primera práctica se van a describir los aparatos de medida convencionales, *analógicos* (en los que una aguja se mueve sobre una escala graduada) y *digitales* (en los que el resultado de la medida se puede leer como una cifra numérica en una pantalla) utilizados más frecuentemente y su forma de conexión.

Se trata de que el alumno se familiarice con los instrumentos de medida eléctricos de una forma progresiva, comprendiendo y siendo capaz de utilizar adecuadamente los equipos, conectándolos correctamente y sabiendo interpretar el resultado de las medidas.

Los fundamentos teóricos en los que se basa esta práctica de laboratorio son los que se exponen en los capítulos 1 y 2 de la primera parte de este libro.

2. - OBJETIVOS

Con esta práctica se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

1. Conocer los siguientes aparatos de medida: voltímetro, amperímetro, vatímetro y polímetro.
2. Aprender las técnicas de medida empleadas en la determinación de magnitudes eléctricas básicas.
3. Conectar aparatos de medida sobre un circuito eléctrico.
4. Medir tensiones, intensidades y potencias en un circuito.
5. Comprobar teóricamente los resultados obtenidos.

3. - PRÁCTICA DE LABORATORIO

Esta práctica consistirá en hacer unas medidas con los aparatos explicados y seguidamente realizar un montaje a partir de un esquema eléctrico donde se incluyan estos aparatos de medida.

Concretamente, las medidas y el montaje a efectuar en el laboratorio son los siguientes:

- a. Medir tensiones en aparatos analógicos y digitales
- b. Medir intensidades en aparatos analógicos y digitales.
- c. Medir potencias en aparatos analógicos.
- d. Montar un circuito para medida de tensiones intensidades y potencia.

4. - ESQUEMA ELÉCTRICO

En esta práctica el circuito habrá sido montado previamente por el profesor.

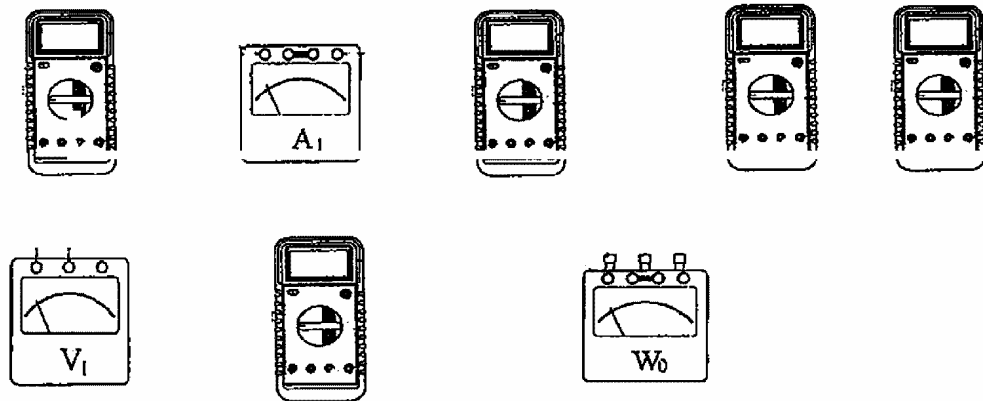
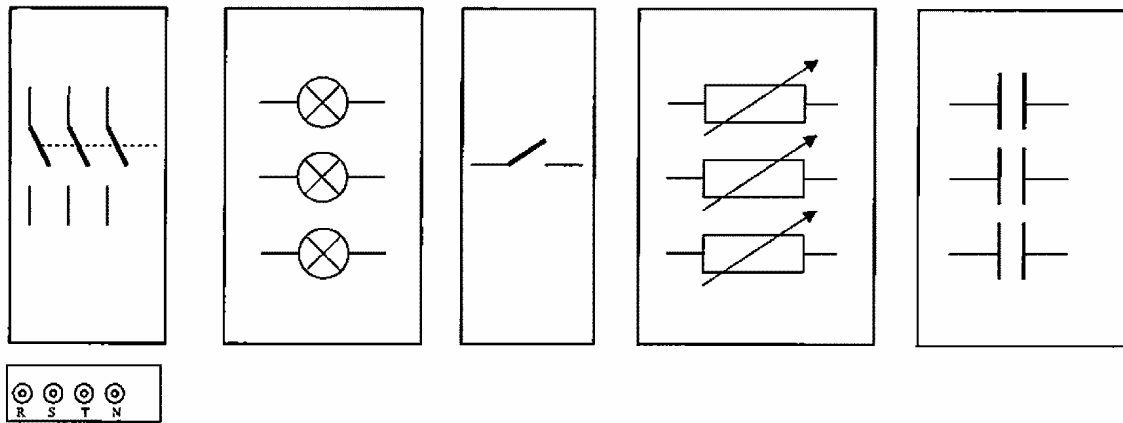
El alumno deberá dibujar tanto un esquema topográfico del montaje del circuito como su esquema eléctrico. Para ello deberá seguir las indicaciones del profesor y puede utilizar la Fig. P1.1 como plantilla para dichos esquemas.

5. - MATERIALES Y EQUIPOS

Los elementos que se utilizarán en esta práctica son los siguientes:

- 1 Voltímetro analógico.
- 1 Amperímetro analógico.
- 5 Polímetros.
- 1 Vatímetro.
- 1 Módulo de tres resistencias.
- 1 Módulo de tres condensadores.
- 1 Módulo de tres lámparas.
- 1 Módulo de interruptor automático de protección magnetotérmico.
- 1 Módulo de interruptor.

ESQUEMA TOPOGRÁFICO DEL MONTAJE



ESQUEMA ELÉCTRICO

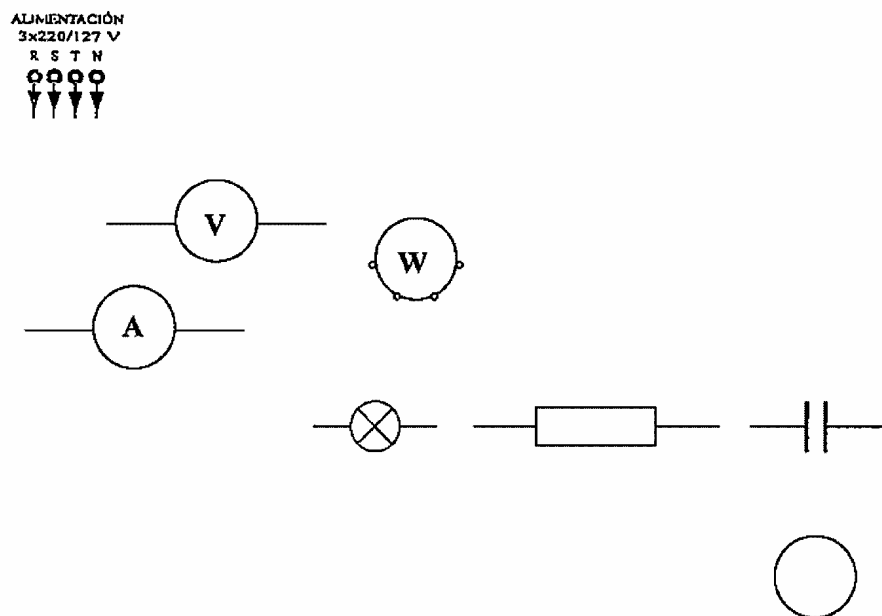


Fig. P1.1: Plantillas para los esquemas topográfico de montaje y eléctrico

6. - DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

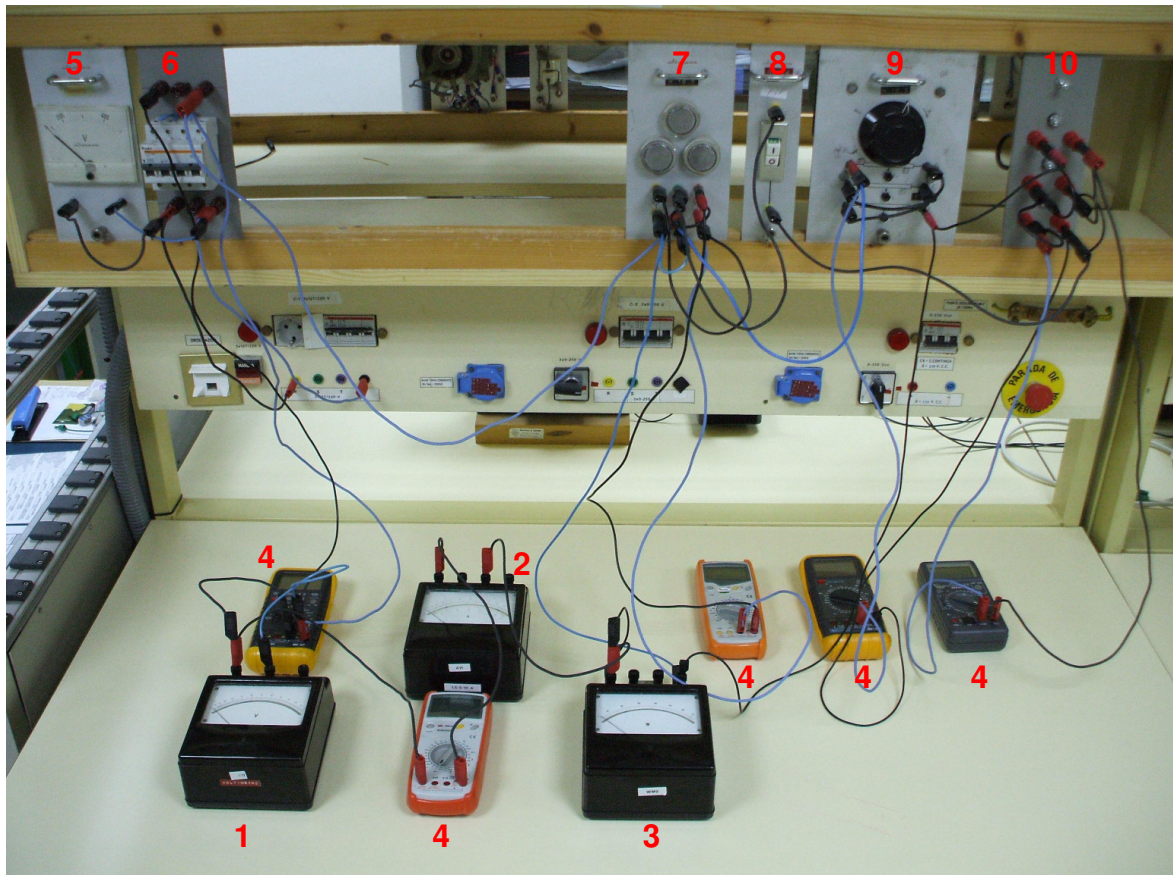


Fig. P.1.1: Montaje de la práctica de laboratorio:

- | | |
|------------------------------|---|
| 1: Voltímetro analógico | 2: Amperímetro analógico |
| 3: Vatímetro analógico | 4: Polímetro digital |
| 5: Módulo con voltímetro | 6: Módulo con interruptor magnetotérmico |
| 7: Módulo con 3 lámparas | 8: Módulo con interruptor de las lámparas |
| 9: Módulo con 3 resistencias | 10: Módulo con 3 condensadores |

Al empezar la práctica el profesor de laboratorio entregará unas *Hojas de Prácticas* preparadas para recoger las medidas que ve van a efectuar y los cálculos posteriores.

El proceso a seguir para la realización de esta práctica de laboratorio es el siguiente:

- 1) Encender los equipos de medida digitales y seguidamente dar tensión al circuito; para ello cerrar el interruptor magnetotérmico trifásico.
- 2) Anotar las lecturas de todos los aparatos de medida.
- 3) Desconectar el interruptor de las lámparas y efectuar una nueva lectura de los aparatos de medida.

- 4) Desconectar el interruptor magnetotérmico y cambiar el cable de conexión de neutro a la fase T. Cerrar de nuevo el interruptor magnetotérmico.
- 5) Anotar de nuevo los valores que indican todos los aparatos de medida.
- 6) Con las últimas medidas efectuar los cálculos que permitan determinar la impedancia, la potencia aparente, el coseno de ϕ , la potencia reactiva, el valor de la resistencia del circuito y la capacidad de los condensadores.
- 7) Dibujar los triángulos de impedancias y de potencias.
- 8) Quitar tensión al circuito y observar la forma de conexión de los conductores.
- 9) Desmontar el circuito.
- 10) Volver a montar el circuito siguiendo las normas de colores de los cables conductores (negro para la fase y azul para el neutro).
- 11) Comprobar la correcta conexión y el funcionamiento del circuito.
- 12) Quitar tensión al circuito.

7. - INFORME DE LA PRÁCTICA

Una vez terminada la práctica de laboratorio, el alumno deberá preparar un informe escrito que entregará al profesor en la fecha que éste indique. Este informe deberá incluir los siguientes apartados:

- Unos comentarios sobre los aparatos de medida utilizados.
- El esquema topográfico del montaje.
- El esquema eléctrico del circuito.
- Los cálculos sobre las medidas efectuadas.

Práctica 2:

AUTOMATIZACIÓN

1. - INTRODUCCIÓN
2. - OBJETIVOS
- 3.- PRÁCTICA DE LABORATORIO
4. - MATERIALES Y EQUIPOS
5. - DESARROLLO DE LA PRÁCTICA
6. - INFORME DE LA PRÁCTICA

Práctica 2:

AUTOMATIZACIÓN

1. - INTRODUCCIÓN

Mediante esta práctica se pretende iniciar al alumno en la automatización tal como se ejecuta en la actualidad, aunque teniendo en cuenta que anteriormente se utilizaba otro tipo de control, llamado *control electromagnético o mando cableado*. El control electromagnético se define como el gobierno de un determinado sistema mediante relés, contactores, temporizadores, etc. De todos estos elementos, el más empleado en la maniobra de motores es el *contactor*.

Los controladores lógicos programables, conocidos como *PLCs* o *autómatas programables* son elementos que hoy en día se utilizan para la resolución de los problemas de automatización. El desarrollo de los autómatas programables ha sido espectacular en los últimos años y su utilización en aplicaciones industriales ha adquirido carta de naturaleza. Dicho desarrollo ha sido debido al progreso de la microelectrónica por un lado y de las técnicas de programación por otro.

El objetivo es, pues, que el alumno adquiriera los conocimientos básicos sobre la utilidad, el desarrollo y la utilización de estos elementos aplicados al control de procesos industriales.

Los fundamentos teóricos en los que se basa esta práctica de laboratorio son los que están expuestos en los capítulos 3 y 4 de la primera parte de este libro.

2. - OBJETIVOS

Con esta práctica se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

1. Diferenciar entre mando de programa cableado y mando de programa de memoria.
2. Programar funciones combinacionales básicas y de temporización.
3. Programar funciones especiales.
4. Diseñar una aplicación sencilla.

3. - PRÁCTICA DE LABORATORIO

En esta práctica de laboratorio se programarán aplicaciones mediante autómatas programables. Para ello el alumno deberá realizar las siguientes operaciones:

- a. Manejar las funciones serie, paralelo y función negada.
- b. Emplear funciones mixtas y memoria.
- c. Utilizar funciones de temporización y de cómputo.
- d. Introducir el programa que se facilita y razonar su funcionamiento.
- e. Diseñar la aplicación que se propone.

4. - MATERIALES Y EQUIPOS

Los elementos que se utilizarán en esta práctica son los siguientes:

- 1 Módulo de voltímetro analógico.
- 1 Módulo de interruptor magnetotérmico de protección trifásico.
- 1 Módulo con pulsadores.
- 1 Módulo de interruptor monofásico.
- 1 Módulo con controlador lógico programable (PLC)
- 1 Módulo de tres lámparas.
- 1 Módulo de contactor y relé térmico.
- 1 Motor de inducción asíncrono.

5. - DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

El circuito que se va a utilizar en esta práctica habrá sido montado previamente por el profesor del laboratorio y se muestra en la Fig. P2.1.

En esta práctica se va a controlar un motor de inducción trifásico mediante un autómata programable (PLC). El alumno, siguiendo las indicaciones del profesor, deberá realizar la

programación de dicho autómatas para conseguir el automatismo deseado. A continuación dará tensión al circuito y comprobará su funcionamiento.

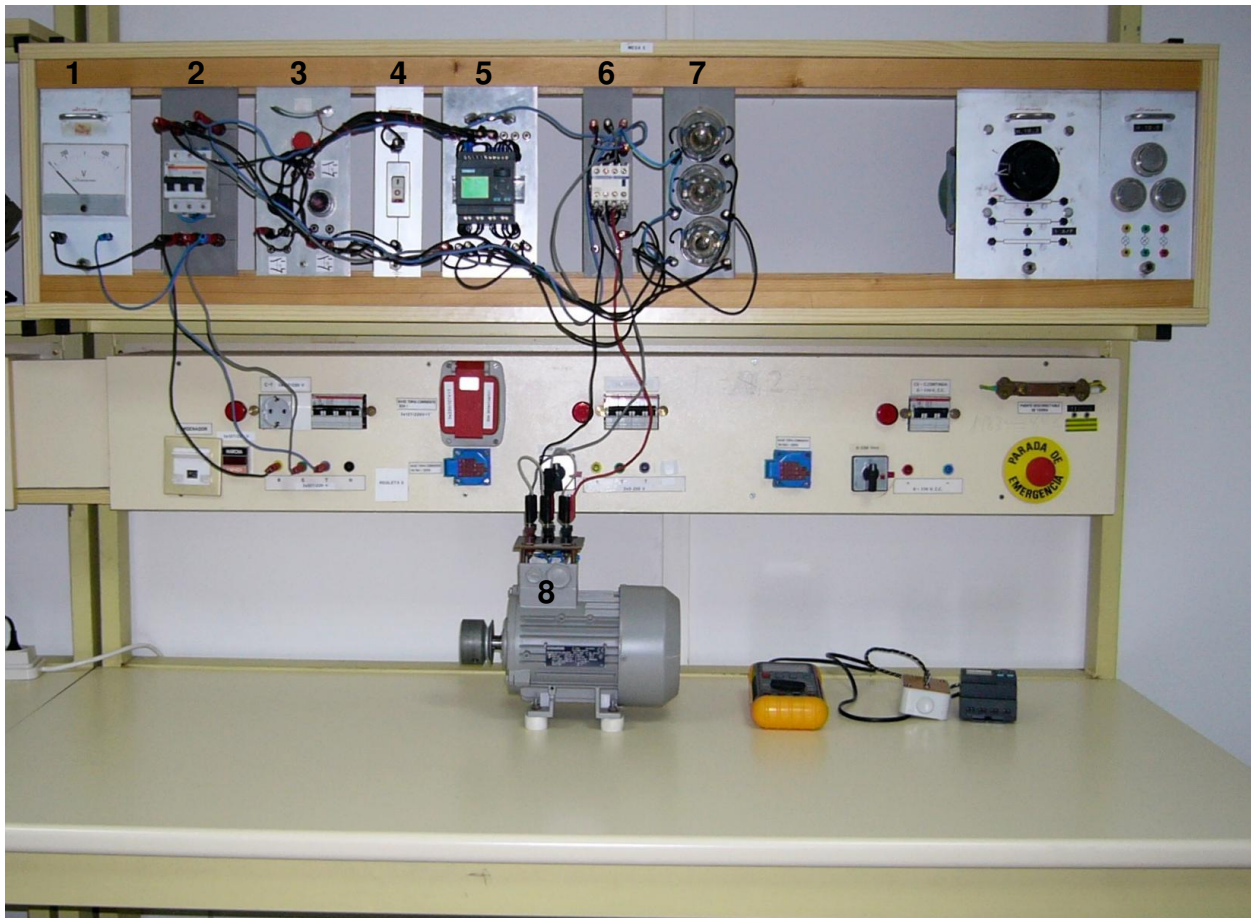


Fig. P.2.1: Montaje de la práctica de laboratorio:

- | | |
|---|---|
| <i>1: Módulo con voltímetro analógico</i> | <i>2: Módulo con interruptor magnetotérmico</i> |
| <i>3: Módulo con 3 pulsadores</i> | <i>4: Módulo con interruptor</i> |
| <i>5: Módulo con PLC</i> | <i>6: Módulo con contactor</i> |
| <i>7: Módulo con 3 lámparas</i> | <i>8: Motor de inducción trifásico</i> |

6. - INFORME DE LA PRÁCTICA

Una vez terminada la práctica de laboratorio, el alumno deberá preparar un informe escrito que entregará al profesor en la fecha que éste indique. Este informe deberá incluir estos apartados:

- Unos comentarios sobre los aparatos y equipos utilizados.
- Descripción de las funciones de programación empleadas.
- La programación que se ha realizado.

Práctica 3:

ENSAYO DE TRANSFORMADORES

1. - INTRODUCCIÓN
2. - OBJETIVOS
- 3.- PRÁCTICA DE LABORATORIO
4. - ESQUEMA ELÉCTRICO
5. - MATERIALES Y EQUIPOS
6. - DESARROLLO DE LA PRÁCTICA
7. - INFORME DE LA PRÁCTICA

Práctica 3:

ENSAYO DE TRASFORMADORES

1. - INTRODUCCIÓN

El transformador está basado en que la energía se puede transportar eficazmente por inducción electromagnética desde una bobina a otra por medio de un flujo variable que circula a través de un circuito magnético común. En ambas bobinas hay tensiones alternas de la misma frecuencia.

Ninguna máquina trabaja sin producir pérdidas de potencia, ya sea estática o dinámica. Ahora bien las pérdidas en las máquinas estáticas son muy pequeñas, como sucede en los transformadores. Una parte de estas pérdidas se producen ya en vacío y se mantienen constantes e invariables en carga. El ensayo de vacío proporciona, a través de las medidas de tensión, intensidad y potencia en el bobinado primario, los valores de la potencia perdida en el hierro, la relación de transformación y los parámetros de la rama en paralelo del circuito equivalente. La otra parte de las pérdidas de potencia se produce en los conductores de los bobinados primario y secundario y se le llama pérdidas en el cobre. En el ensayo en cortocircuito se consigue la circulación de las intensidades asignadas (o nominales) en los bobinados aplicando una pequeña tensión al primario y cortocircuitando el secundario con un amperímetro. En este ensayo se determinan las pérdidas en el cobre asignadas mediante el vatímetro conectado al primario. En este ensayo también se obtiene la tensión de cortocircuito, que oscila entre un 4% y un 10% de la tensión asignada, y los parámetros de la rama en serie del circuito equivalente aproximado.

Los fundamentos teóricos en los que se basa esta práctica de laboratorio son los que están expuestos en el capítulo 5 de la primera parte de este libro.

2. - OBJETIVOS

Con esta práctica se pretenden obtener los parámetros de un transformador monofásico mediante los ensayos de vacío, cortocircuito y carga descritos en el apartado 6 del capítulo 5.

Así, mediante el *ensayo de vacío* se pueden determinar:

- La relación de transformación (m).
- La corriente de vacío (I_0).
- Las pérdidas en el hierro (P_{Fe}).
- Los parámetros R_{Fe} y X_μ del circuito equivalente.

Mediante el *ensayo en cortocircuito a intensidad asignada* es posible determinar:

- La tensión de cortocircuito (V_{1cc}) y la tensión relativa de cortocircuito (ϵ_{cc}).
- Las pérdidas en el cobre asignadas (P_{CuN}).
- Los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} del circuito equivalente aproximado.

Mediante el *ensayo en carga* se obtienen la tensión secundaria y el rendimiento para diferentes estados de carga. Esto permite apreciar como varían estas magnitudes con la carga.

Debe tenerse en cuenta que las hipótesis empleadas para obtener el circuito equivalente aproximado de un transformador (Fig. 5.14), son tanto más correctas cuanto mayor es la potencia del transformador ensayado y cuanto más se acerca su régimen de trabajo a la potencia asignada (o nominal) de la máquina.

3. - PRÁCTICA DE LABORATORIO

Esta práctica consistirá en realizar ensayos en un transformador monofásico y calcular sus parámetros a partir de los datos obtenidos en dichos ensayos.

Concretamente, los ensayos del transformador a efectuar en el laboratorio son los siguientes:

- Ensayo de vacío
- Ensayo de cortocircuito a la intensidad nominal.
- Ensayo en carga.

4. – ESQUEMA ELÉCTRICO

Para los ensayos se utilizarán los circuitos mostrados en las Figs. P3.1 y P3.2.

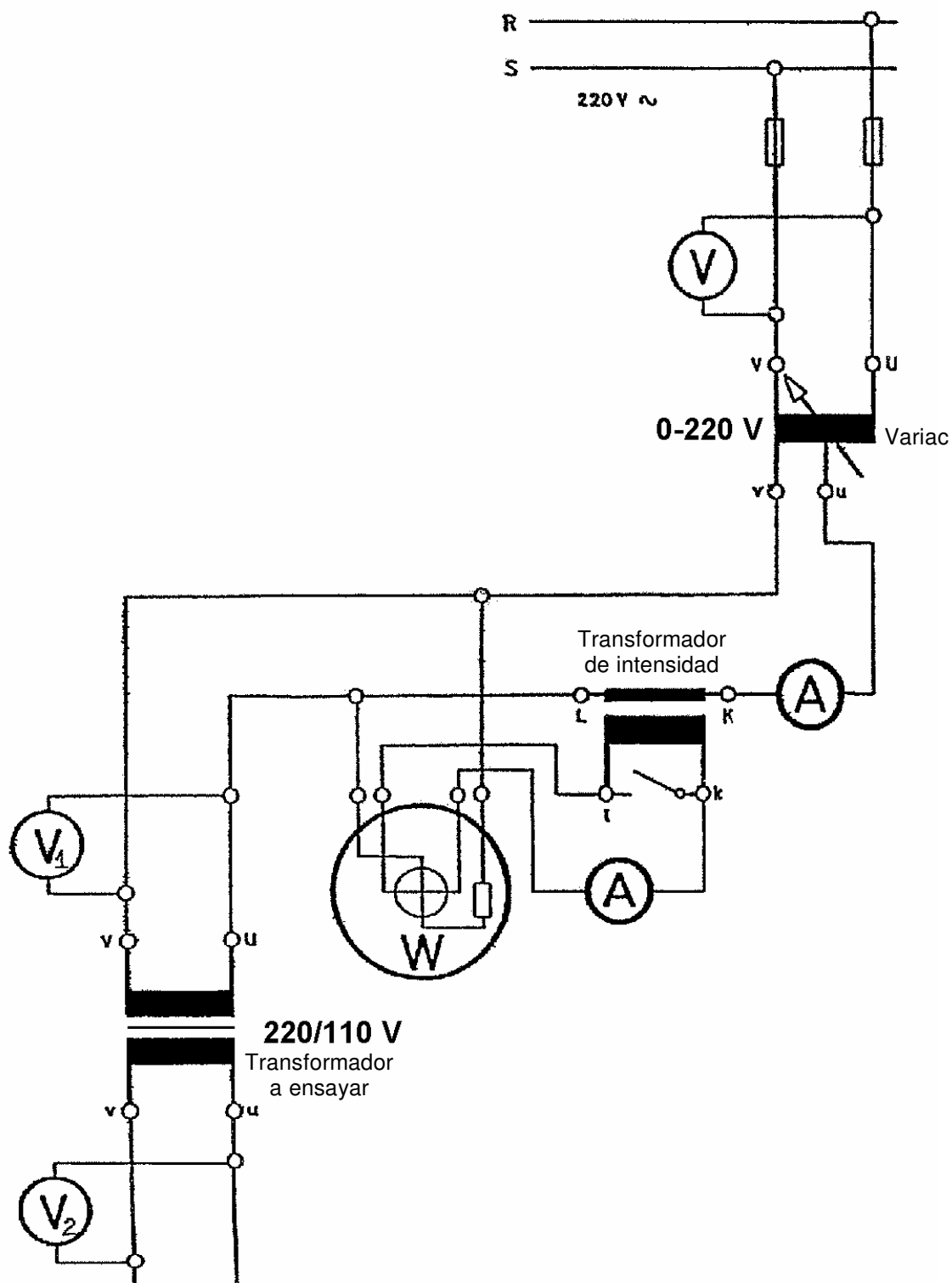


Fig. P3.1: Circuito para los ensayos de vacío y carga del transformador

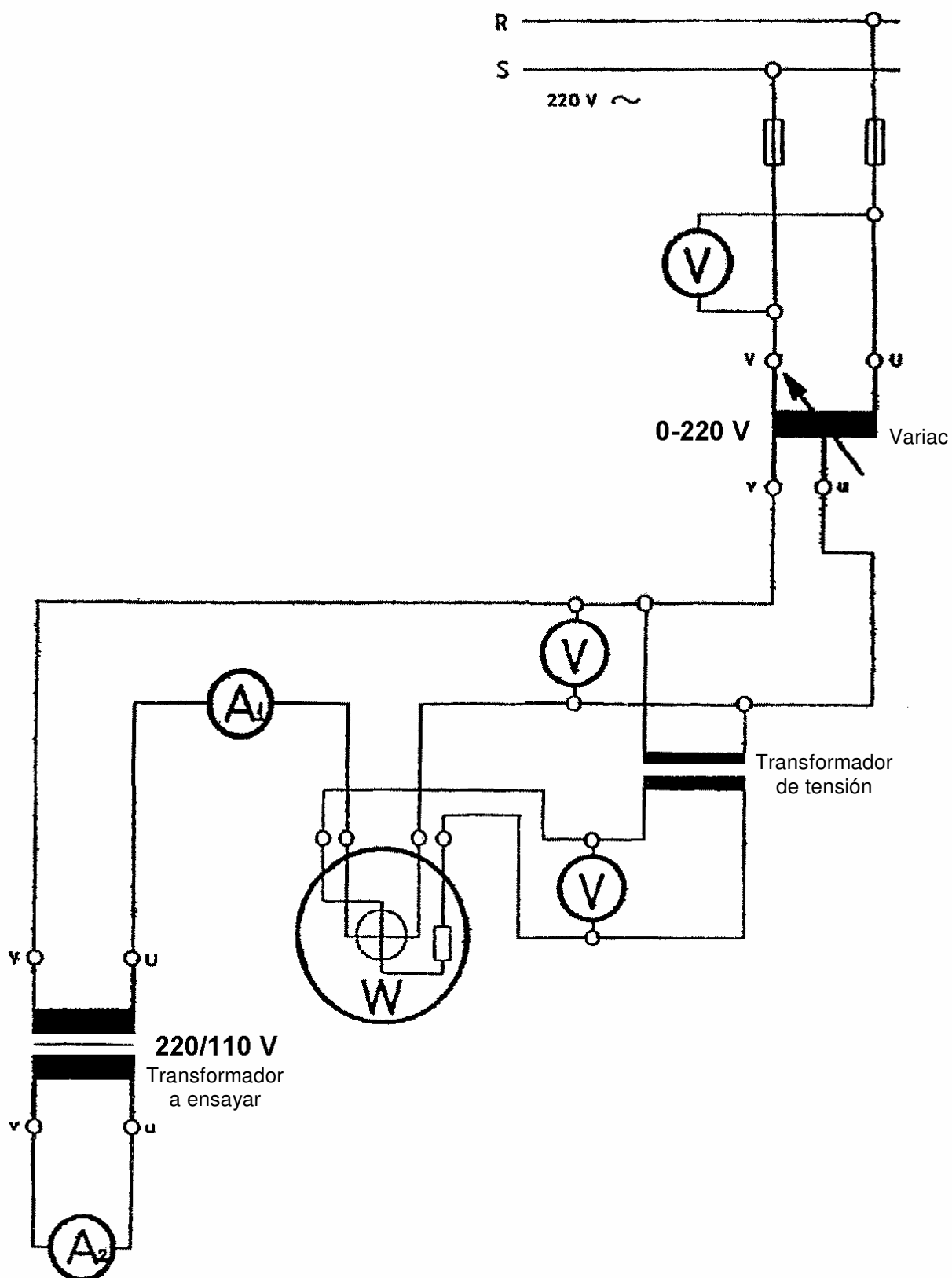


Fig. P3.2: Circuito para el ensayo de cortocircuito del transformador

5. – MATERIALES Y EQUIPOS

En esta práctica de laboratorio se utilizarán los siguientes aparatos:

- 4 Polímetros (se utilizarán como voltímetros y amperímetros).
- 1 Vatímetro monofásico.
- 1 Transformador monofásico de 220/110 V (transformador a ensayar) (En la Fig. P3.2b se muestra uno de los varios modelos de transformador disponibles).
- 1 Transformador de intensidad (En la Fig. P3.2c se muestra uno de los varios modelos de transformador de intensidad disponibles).
- 1 Transformador de tensión.
- 1 Módulo con voltímetro analógico.
- 1 Módulo con un autotransformador monofásico tipo variac (En la Fig. P3.3a se muestra uno de los varios modelos de este módulos disponibles).
- 1 Módulo de tres resistencias.
- 1 Módulo de tres lámparas.
- 1 Módulo de interruptor de protección.
- 1 Módulo de interruptor.



a)



b)



c)

Fig. P3.3: Algunos elementos a utilizar en la práctica de laboratorio:

a) Variac monofásico

b) Transformador monofásico a ensayar

c) Transformador de intensidad

6. – DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

El montaje del circuito para el ensayo de vacío queda como se muestra en la Fig. P3.4, mientras que el montaje del ensayo de cortocircuito se muestra en la Fig. 3.5.

Al empezar la práctica el profesor de laboratorio entregará unas *Hojas de Prácticas* preparadas para recoger las medidas que se van a efectuar durante los ensayos y los cálculos posteriores.

El desarrollo de la práctica es de la siguiente manera:

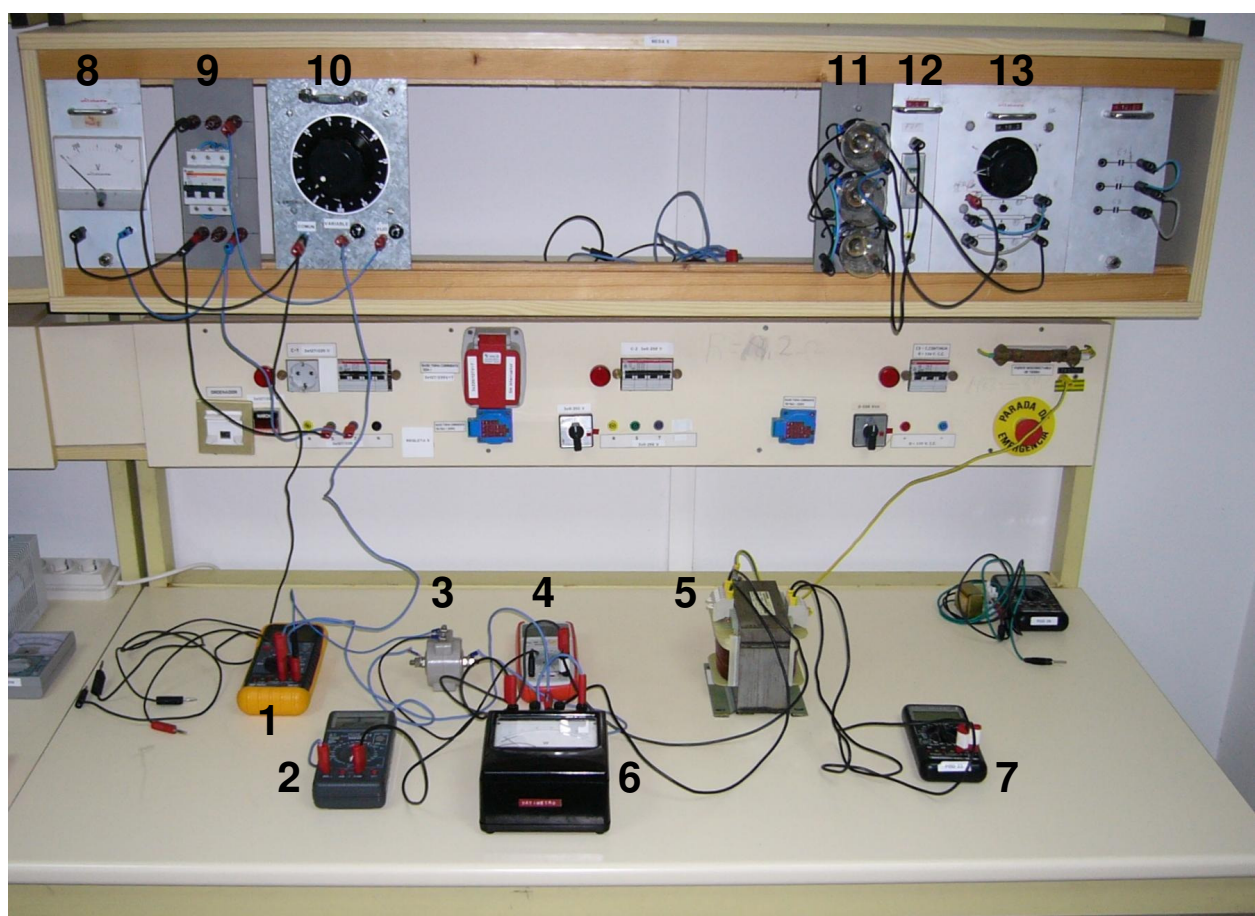


Fig. P3.4: Vista del montaje del circuito para el ensayo de vacío:

- | | |
|--|----------------------------|
| 1: Voltímetro 1 | 2: Amperímetro 1 |
| 3: Transformador de intensidad | 4: Amperímetro 2 |
| 5: Transformador a ensayar | 6: Vatímetro |
| 7: Voltímetro 2 | 8: Módulo con voltímetro |
| 9: Módulo con interruptor de protección (magnetotérmico) | 11: Módulo con 3 lámparas |
| 10: Módulo con variac | 12: Módulo con interruptor |
| 13: Módulo con 3 resistencias | |

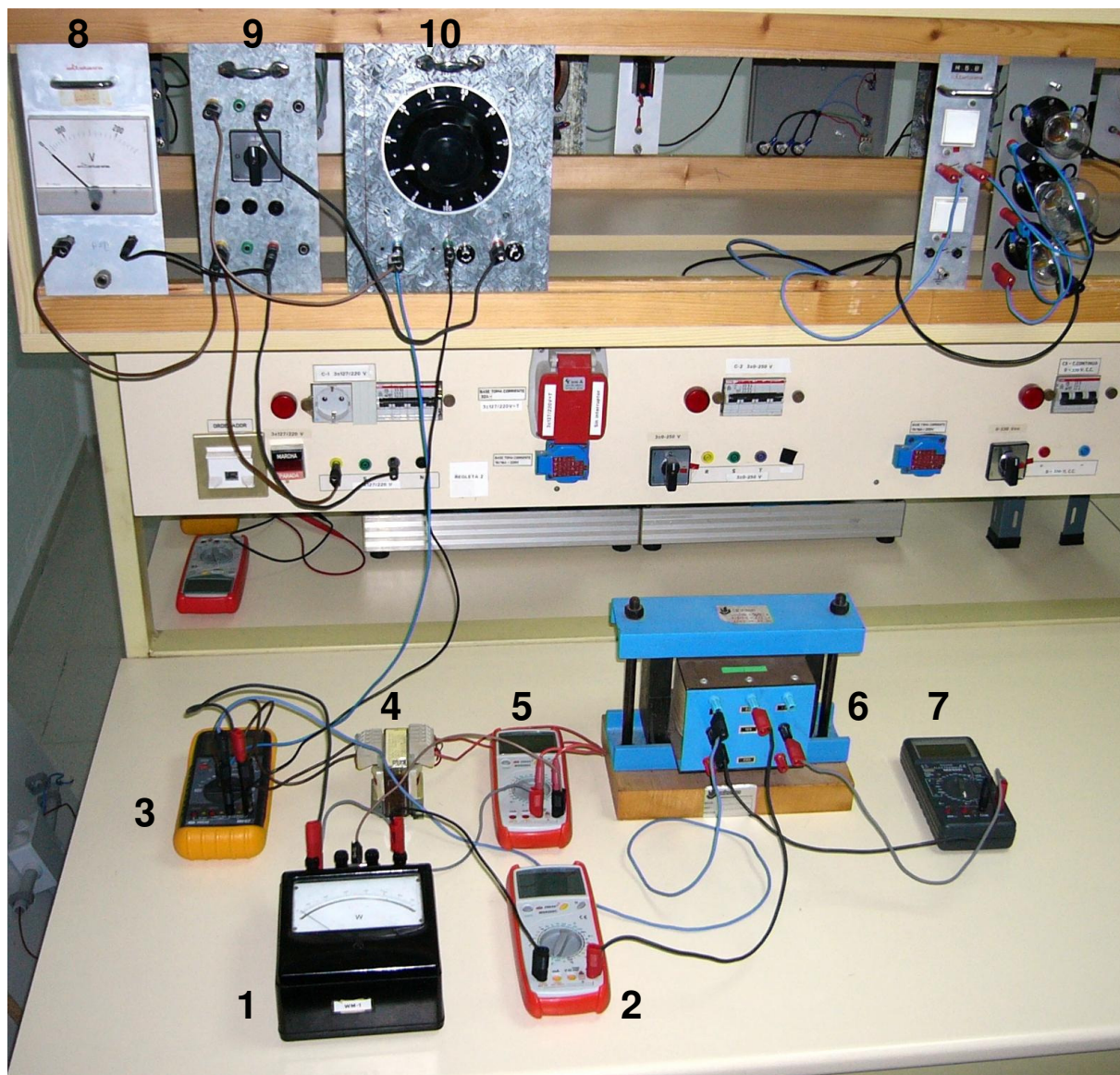


Fig. P3.5: Vista del montaje del circuito para el ensayo de cortocircuito:

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1: Watímetro | 2: Amperímetro 1 |
| 3: Voltímetro 2 | 4: Transformador de tensión |
| 5: Voltímetro 3 | 6: Transformador a ensayar |
| 7: Amperímetro 2 | 8: Módulo con voltímetro 1 |
| 9: Módulo con interruptor de protección (mediante fusibles) | |
| 10: Módulo con variac | |

- 1) Partiendo del montaje del ensayo en vacío, realizar las medidas en dos ensayos en vacío y anotarlas en la tabla correspondiente en las Hojas de Prácticas:
 - i. Primera lectura: alimentando el primario a una tensión inferior a la asignada.
 - ii. Segunda lectura (alimentando a tensión asignada): ensayo de vacío.

- 2) Desconectar el circuito.
- 3) Realizar el montaje que permita efectuar el ensayo de cortocircuito.
- 4) Asegurarse de la correcta conexión de los equipos de acuerdo al esquema del circuito y de que la tensión de salida del autotransformador es de 0 voltios.
- 5) Efectuar las medidas en los dos ensayos de cortocircuito y anotarlas en la tabla correspondiente en las Hojas de Prácticas:
 - i. Primera lectura: para una intensidad del primario inferior a la asignada.
 - ii. Segunda lectura: para el ensayo de cortocircuito a intensidad asignada (durante la prueba mover muy lentamente el cursor del autotransformador hasta conseguir que circule la corriente asignada en cada devanado del transformador a ensayar).
- 6) Desconectar el circuito.
- 7) Volver a montar el circuito para el ensayo de vacío.
- 8) Efectuar la conexión de un amperímetro y de una carga en el secundario del transformador.
- 9) Dar tensión al circuito y efectuar las lecturas de los aparatos de medida para completar la tabla del ensayo en carga en las Hojas de Prácticas.
- 10) Quitar tensión al circuito y desconectar la carga para poder iniciar el ensayo en vacío cuando se vuelva a realizar esta práctica.
- 11) Con las medidas efectuadas y las fórmulas proporcionadas en el capítulo 5 de la primera parte, realizar los cálculos del circuito equivalente del transformador ensayado según se indican en las Hojas de Prácticas. Para ello se debe comenzar por calcular los valores de las magnitudes medidas a partir de las lecturas de los aparatos de medida, sus constantes de medida y la relación de transformación de los transformadores de tensión y de intensidad (véanse los capítulos 1 y 2 de la primera parte de este libro).

7. – INFORME DE LA PRÁCTICA

Una vez terminada la práctica de laboratorio, el alumno deberá preparar un informe escrito que entregará al profesor en la fecha que éste indique. Este informe deberá incluir como mínimo los siguientes apartados:

- Unos comentarios sobre los aparatos y equipos utilizados.
- Los cálculos sobre las medidas efectuadas que se indican en las Hojas de Prácticas.

Práctica 4:

ANÁLISIS DE MOTORES Y CONVERTIDORES

- 1. - INTRODUCCIÓN**
- 2. - OBJETIVOS**
- 3.- PRÁCTICA DE LABORATORIO**
- 4. - ESQUEMA ELÉCTRICO**
- 5. - MATERIALES Y EQUIPOS**
- 6. - DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**
- 7. - INFORME DE LA PRÁCTICA**

Práctica 4:

ANÁLISIS DE MOTORES Y CONVERTIDORES

1. - INTRODUCCIÓN

En esta práctica se va a analizar el comportamiento de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito funcionando en vacío, en carga y alimentado mediante un variador de frecuencia.

Así, en esta práctica se apreciarán las variaciones de la corriente, del factor de potencia, de la velocidad, de la potencia y del par del motor asíncrono con la carga que debe mover. Se utilizará como carga mecánica una máquina de corriente continua a la que se le hará actuar como generador (dinamo) disipando su energía sobre unas resistencias y sobre unas lámparas.

Además, mediante el ensayo de vacío de un motor trifásico *asíncrono o de inducción* se pueden determinar algunos parámetros de esta máquina.

Por otra parte, alimentando el motor con un convertidor de frecuencia se podrá comprobar cómo actúa este equipo y cómo afecta la variación de la frecuencia al comportamiento del motor.

Los fundamentos teóricos en los que se basa esta práctica de laboratorio son los que se exponen en el capítulo 6 de la primera parte de este libro.

2. - OBJETIVOS

Con esta práctica se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

1. Observar las variaciones del coseno de “ ϕ ” (o factor de potencia), de la corriente, de la potencia y del par con la carga y con la frecuencia con que se alimenta al motor.
2. Obtener el deslizamiento del motor asíncrono conocido el número de polos de la máquina, su frecuencia de alimentación y su velocidad de giro. Esta se mide mediante un *tacómetro*.
3. Aprender a determinar el par útil del motor teniendo en cuenta la potencia generada por la máquina de c.c. que actúa como freno.
4. Obtener el rendimiento del motor.

3. - PRÁCTICA DE LABORATORIO

El ensayo de vacío de un motor trifásico asíncrono de rotor en cortocircuito permite determinar algunos de los parámetros más significativos de esta máquina.

Para no provocar una elevada intensidad en el momento de arranque se alimentará el motor con tensión reducida al principio, pero seguidamente se aumentará ésta de forma continua (con un autotransformador trifásico) y rápida hasta alcanzar la nominal. Así se puede observar la sobrecorriente durante el arranque de estos motores.

Manteniendo la tensión nominal se van a realizar las lecturas de los aparatos de medida en vacío y en carga. La carga se logra acoplando al motor una dinamo que disipa su energía en unas resistencias y unas lámparas. Se realizan distintos ensayos para distintos valores porcentuales de la intensidad nominal.

El análisis de los *variadores o convertidores de frecuencia* permiten observar las modificaciones de los valores de tensión, intensidad, potencia y velocidad a medida que se modifica la frecuencia de alimentación del motor.

4. - ESQUEMA ELÉCTRICO

Para los ensayos se utilizará el circuito mostrado en las Fig. P4.1.

Obsérvese que en este circuito existe un *conmutador trifásico* que permite alimentar el motor asíncrono a través de un *autotransformador trifásico* (con lo que se lo puede hacer funcionar a varias tensiones diferentes, pero siempre a la frecuencia nominal) o a través de un *variador o convertidor de frecuencia* (lo que permite hacerlo funcionar a varias frecuencias diferentes, proporcionando el variador una tensión también variable en función de la frecuencia). El conmutador tiene una posición 0 en la que deja sin tensión al motor.

Nótese también que acoplado al mismo eje que el motor asíncrono hay un generador de corriente continua. Esta máquina actuará como freno, es decir, como carga mecánica del motor.

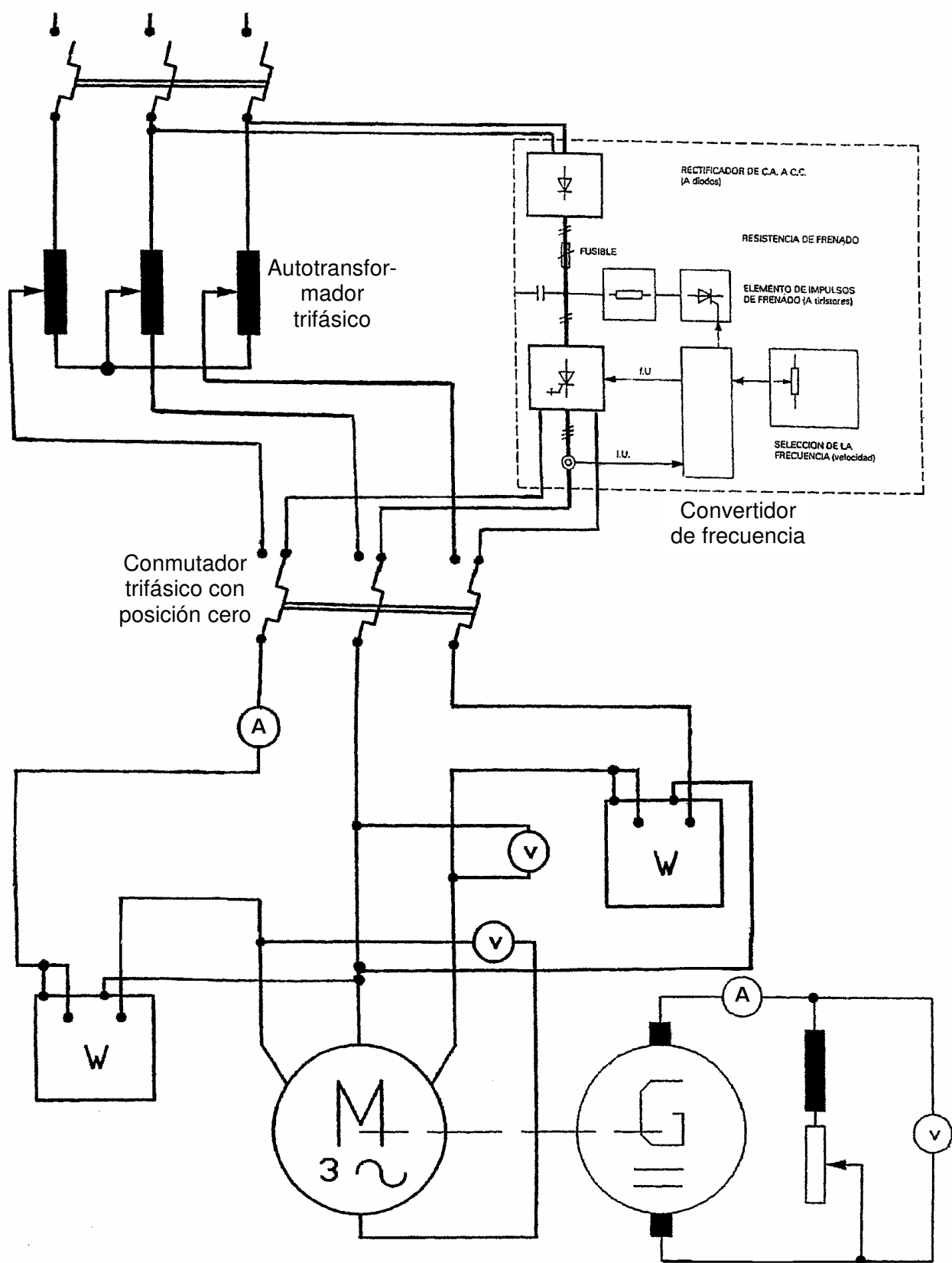


Fig. P4.1: Circuito para el ensayo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito

5. - MATERIALES Y EQUIPOS

Los elementos que se utilizarán en esta práctica son los siguientes:

- 1 Voltímetro analógico.
- 1 Amperímetro analógico.
- 2 Vatímetros.
- 3 Polímetros (usados como voltímetros o amperímetros).
- 1 Módulo con resistencias.
- 1 Módulo con tres lámparas.
- 1 Módulo con un interruptor unipolar.
- 1 Módulo con un interruptor trifásico de protección (magnetotérmico).
- 1 Módulo con un conmutador trifásico.
- 1 Módulo con un voltímetro analógico.
- 1 Módulo con un convertidor de frecuencia
- 1 Motor de corriente alterna trifásico de rotor en cortocircuito.
- 1 Máquina de corriente continua (dinamo).
- 1 Tacómetro (En la Fig. P4.2 se muestra uno de los varios modelos de tacómetro disponibles).



Fig. P4.2: Tacómetro óptico

6. - DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

El montaje del circuito para el ensayo del motor queda como se muestra en la Fig. P4.2.

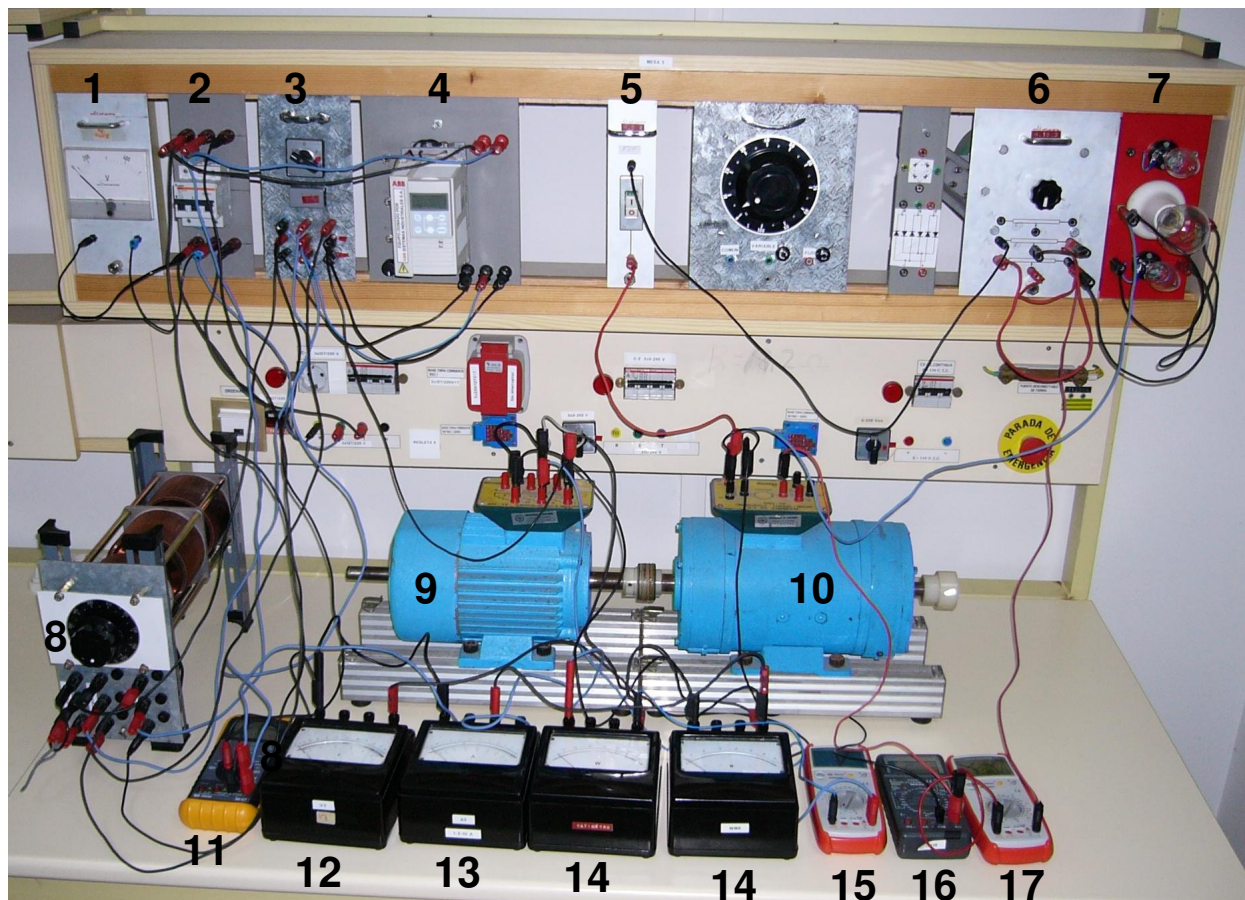


Fig. P4.2: Vista del montaje del circuito para el ensayo de un motor asíncrono:

- 1: Módulo con voltímetro analógico
- 2: Módulo con interruptor de protección (magnetotérmico)
- 3: Módulo con conmutador trifásico
- 4: Módulo con convertidor de frecuencia (o variador de frecuencia)
- 5: Módulo con interruptor
- 6: Módulo con 3 resistencias
- 7: Módulo con 3 lámparas
- 8: Autotransformador trifásico
- 9: Motor asíncrono trifásico
- 10: Máquina de c.c.
- 11: Polímetro digital utilizado como voltímetro
- 12: Voltímetro analógico
- 13: Amperímetro analógico
- 14: Vatímetro analógico
- 15: Polímetro digital utilizado como amperímetro
- 16: Polímetro digital utilizado como voltímetro de c.c.
- 17: Polímetro digital utilizado como amperímetro de c.c.

Al empezar la práctica el profesor de laboratorio entregará unas *Hojas de Prácticas* preparadas para recoger las medidas que se van a efectuar durante los ensayos y los cálculos posteriores.

La práctica incluye dos ensayos cuyo desarrollo se describe a continuación:

6.1. - Ensayo del motor en vacío y en carga

- 1) Cerciorarse que el conmutador trifásico está en la posición central (0); que el autotransformador trifásico (variac) esta en cero (0) % y que el convertidor de frecuencia se encuentra a cero Hz.
- 2) Conectar los equipos de medida digitales y posteriormente alimentar el circuito mediante el autotransformador trifásico. Para ello cerrar el interruptor magnetotérmico trifásico y posteriormente girar el conmutador trifásico a la posición 1.
- 3) Mover el cursor del autotransformador lentamente hasta que el voltímetro digital marque la tensión asignada del motor asíncrono.
- 4) Anotar las lecturas de todos los aparatos de medida.
- 5) Cerrar el interruptor de excitación de la maquina de corriente continua y girar el cursor del reóstato hasta que la intensidad aumente un 20% del valor inicial.
- 6) Tomar de nuevo los valores que indican todos los aparatos de medida.
- 7) Girar nuevamente el cursor del reóstato hasta que el vatímetro 2 indique cero (0).
- 8) Anotar las nuevas medidas.
- 9) Girar el cursor del reóstato por ultima vez y observar que la aguja del vatímetro 2 se desvía en sentido negativo (izquierda del cero); intercambiar las conexiones de la parte amperimétrica, la aguja se desviará ahora en sentido positivo.
- 10) Anotar de nuevo las medidas, girar el reóstato en sentido contrario hasta la posición inicial, abrir el interruptor de excitación y, por ultimo, disminuir la tensión de alimentación al motor. Para ello girar el cursor del autotransformador en sentido contrario al inicial hasta llegar a cero. Finalmente poner el conmutador trifásico en la posición 0.

6.2. - Ensayo del convertidor de frecuencia

- 1) Cerciorarse que el conmutador trifásico está en la posición central (0); que el autotransformador trifásico (variac) esta en cero (0) % y que el convertidor de frecuencia se encuentra a cero Hz.

- 2) Alimentar el circuito a través del convertidor de frecuencia. Para ello cerrar el interruptor magnetotérmico trifásico y posteriormente girar el conmutador trifásico a la posición 2.
- 3) Mover el potenciómetro del convertidor de frecuencia lentamente hasta que señale 10 Hercios (Hz).
- 4) Anotar las lecturas de todos los aparatos de medida.
- 5) Mover nuevamente el potenciómetro del convertidor hasta 20 Hz y anotar las nuevas lecturas de los aparatos de medida. Continuar haciendo lo mismo a 30, 40, 50 y 60 Hz.
- 6) Retornar el potenciómetro a su posición inicial (0 Hz).
- 7) Poner el conmutador trifásico en la posición 0 y quitar la alimentación al circuito.
- 8) Con las medidas efectuadas y las fórmulas proporcionadas en el capítulo 6 de la primera parte, realizar los cálculos que se indican en las Hojas de Prácticas. Para ello se deben tener en cuenta lo indicado sobre los aparatos de medida en los capítulos 1 y 2 de la primera parte de este libro.

7. - INFORME DE LA PRÁCTICA

Una vez terminada la práctica de laboratorio, el alumno deberá preparar un informe escrito que entregará al profesor en la fecha que éste indique. Este informe deberá incluir como mínimo los siguientes apartados:

- Unos comentarios sobre los aparatos y equipos utilizados.
- Los cálculos sobre las medidas efectuadas que se indican en las Hojas de Prácticas.