

# **Mantenimiento de máquinas eléctricas**

# SUMARIO

## Unidad 1

### Introducción al taller de máquinas eléctricas

1.1. Introducción	7
1.2. Mantenimiento	7
1.3. Equipamiento	7
1.4. Entrenador para ensayo de máquinas eléctricas	11
1.5. Máquinas, herramientas y elementos para bobinar	12
1.6. Metrología	13
1.7. Clases de aislamientos	15
1.8. Normas de seguridad	21
Conceptos básicos	21
Actividades	22

## Unidad 2

### Transformadores. Clasificación y constitución

2.1. Definición y función de los transformadores	25
2.2. Principio de funcionamiento de los transformadores	25
2.3. Tipos de transformadores. Clasificación	26
2.4. Construcción magnética de los transformadores	27
2.5. Transformador trifásico	30
2.6. Transformadores de medidas	33
2.7. Transformadores especiales	35
2.8. Transformadores de potencia	35
2.9. Transformadores de pequeña potencia	36
2.10. Autotransformadores	39
2.11. Simbología de los transformadores	40
Conceptos básicos	40
Actividades	41

## Unidad 3

### Transformadores monofásicos de pequeña potencia

3.1. Sistema de unidades de medida	45
3.2. Proceso de cálculo teórico de un transformador	45
3.3. Cálculo de un transformador de pequeña potencia por ábacos	55
3.4. Normas de seguridad en el taller	56
Conceptos básicos	57
Ábacos	58
Actividades	61

## Unidad 4

### Ensayo de transformadores

4.1. Transformador en vacío	65
4.2. Ensayo en vacío	68
4.3. Transformador en cortocircuito	70
4.4. Ensayo en cortocircuito	72

4.5. Rendimiento del transformador	73
4.6. Refrigeración	73
4.7. Medida de temperatura	74
4.8. Medida de aislamiento	75
4.9. Medida de rigidez dieléctrica	75
4.10. Acoplamiento en paralelo de transformadores monofásicos	76
4.11. Normas de seguridad en el taller de ensayos	76
Conceptos básicos	76
Actividades	77

## Unidad 5

### Bobinados de máquinas de corriente continua

5.1. Introducción a las máquinas de corriente continua (CC)	81
5.2. Análisis del circuito inductor de las máquinas de corriente continua	81
5.3. Excitación de las máquinas de corriente continua	84
5.4. Análisis del circuito inducido de una máquina de corriente continua	86
5.5. Elementos relativos a los bobinados del rotor	87
5.6. Condiciones del bobinado inducido	88
5.7. Clasificación y características de los bobinados imbricados simples	90
5.8. Aplicación de los bobinados múltiples. Características	92
5.9. Análisis del proceso de cálculo de un bobinado imbricado	92
5.10. Diseño de un bobinado imbricado simple	93
5.11. Clasificación y características de los bobinados ondulados serie	96
5.12. Bobinados ondulados múltiples o serie-paralelas	98
5.13. Proceso de cálculo de un bobinado ondulado en serie	98
5.14. Diseño del esquema de un bobinado en serie	99
Conceptos básicos	102
Actividades	103

## Unidad 6

### Mantenimiento de máquinas de corriente continua

6.1. Programas de mantenimiento preventivo de máquinas de corriente continua	107
6.2. Procesos y elementos del mantenimiento preventivo	107
6.3. Análisis secuencial del mantenimiento preventivo	111
6.4. Pruebas para la localización de averías. Sistemas de reparación	113
6.5. Procedimiento para la reposición del bobinado inducido	119
6.6. Normas de seguridad en el mantenimiento de máquinas	124
Conceptos básicos	124
Actividades	125

## Unidad 7

### Ensayo de máquinas de corriente continua

7.1. Generadores de CC. Tipos y clasificación por su excitación . . . . .	129
7.2. Generador de excitación independiente . . . . .	129
7.3. Generador autoexcitado . . . . .	130
7.4. Curvas de características del generador de CC . . . . .	133
7.5. Interpretación de las curvas de características del generador de excitación independiente . . . . .	134
7.6. Curvas de características del generador autoexcitado . . . . .	136
7.7. Curvas de características del generador compund . . . . .	138
7.8. Características fundamentales del motor de CC . . . . .	139
7.9. El motor de corriente continua en servicio . . . . .	140
7.10. Características generales aplicadas en los motores de CC . . . . .	140
7.11. Componentes necesarios para el ensayo de la máquina . . . . .	144
7.12. Ensayo de aislamiento . . . . .	145
7.13. Medición de temperaturas de funcionamiento . . . . .	145
7.14. Ensayo en los generadores de CC . . . . .	146
7.15. Ensayo de las características de regulación . . . . .	148
7.16. Ensayo de las características exterior e interior . . . . .	149
7.17. Determinación del rendimiento . . . . .	149
7.18. Planificación de los ensayos de motores de CC . . . . .	150
7.19. Normas de seguridad en los ensayos de máquinas de CC . . . . .	152
Conceptos básicos . . . . .	153
Actividades . . . . .	154

## Unidad 8

### Bobinados eléctricos de corriente alterna

8.1. Introducción a las máquinas de corriente alterna (CA) . . . . .	157
8.2. Clasificación de los motores asíncronos de corriente alterna . . . . .	157
8.3. Análisis de los bobinados de una máquina de corriente alterna . . . . .	158
8.4. Sistemas de conexión de los bobinados concéntricos trifásicos . . . . .	160
8.5. Proceso de cálculo de los bobinados concéntricos de CA . . . . .	162
8.6. Determinación de los principios de las fases ( $Y_{120}$ ) . . . . .	164
8.7. Proceso de elaboración del esquema de un motor trifásico . . . . .	165
8.8. Realización del esquema de un bobinado concéntrico . . . . .	167
8.9. Bobinados concéntricos enteros y fraccionados . . . . .	170
8.10. Esquema de un motor monofásico concéntrico . . . . .	170

8.11. Diferencias entre los bobinados excéntricos y los concéntricos . . . . .	174
8.12. Bobinados excéntricos enteros y fraccionados . . . . .	174
8.13. Cálculo de los bobinados imbricados de una capa . . . . .	175
8.14. Esquema de un bobinado imbricado de una capa . . . . .	177
8.15. Cálculo de los bobinados imbricados de dos capas . . . . .	177
8.16. Esquema de un bobinado imbricado de dos capas . . . . .	178
8.17. Bobinados de dos velocidades. Conexión Dahlander . . . . .	179
8.18. Cálculo de los bobinados imbricados de dos velocidades . . . . .	180
8.19. Esquema de un bobinado imbricado de dos velocidades . . . . .	181
8.20. Características diferenciadoras de los bobinados excéntricos fraccionarios . . . . .	183
Conceptos básicos . . . . .	183
Actividades . . . . .	184

## Unidad 9


### Mantenimiento de máquinas de corriente alterna

9.1. Mantenimiento preventivo para máquinas de corriente alterna . . . . .	187
9.2. Elementos que intervienen en el mantenimiento preventivo . . . . .	187
9.3. Análisis secuencial del mantenimiento preventivo . . . . .	191
9.4. Localización y sistemas de reparación . . . . .	193
9.5. Reposición total del bobinado estatórico . . . . .	198
9.6. Cambio de tensión de un motor de corriente alterna . . . . .	206
9.7. Normas de seguridad en operaciones de mantenimiento . . . . .	208
Conceptos básicos . . . . .	208
Actividades . . . . .	209

## Unidad 10

### Ensayo de máquinas de corriente alterna

10.1. Pruebas de funcionamiento. Historial de un motor de CA . . . . .	213
10.2. Adaptación de un motor trifásico de CA a una red monofásica . . . . .	221
10.3. Diferencias entre alternadores y generadores de CC . . . . .	222
10.4. Características eléctricas de un alternador . . . . .	223
10.5. Motor síncrono: fundamento y aplicación . . . . .	223
10.6. Características de los motores asíncronos trifásicos . . . . .	224
10.7. Arranque de los motores asíncronos . . . . .	225
10.8. Aplicaciones del motor monofásico . . . . .	226
10.9. Normas de seguridad en ensayos de máquinas de CA . . . . .	228
Conceptos básicos . . . . .	228
Actividades . . . . .	229
Anexo . . . . .	232



Introducción al taller  
de máquinas eléctricas

1



## 1.1 Introducción

Si partimos del principio de que *toda máquina es susceptible de fallar*, todo futuro Técnico en Equipos e Instalaciones Electrotécnicas debe conocer los aparatos, útiles y herramientas que va a utilizar a lo largo de su formación.

En el campo del mantenimiento de las máquinas eléctricas, la utilización de herramientas y útiles es más específica, por lo que, a la hora de introducirnos en el taller, iremos conociendo cada uno de estos elementos como parte esencial para la manipulación de las diferentes máquinas que vamos a emplear.

En esta unidad, vamos a estudiar la necesidad del **mantenimiento preventivo** y elaboraremos un plan que servirá como base principal para el mantenimiento correctivo.

## 1.2 Mantenimiento

Las máquinas eléctricas, por su construcción robusta y su buen resultado en cuanto a funcionamiento y rendimiento, se han considerado tradicionalmente instrumentos eficaces y de bajo índice de averías (sobre todo aquellas máquinas que, durante su funcionamiento, no tienen contacto eléctrico entre sus elementos, como por ejemplo los motores con rotor de jaula de ardilla).

Ahora bien, factores como el **elevado número de horas** de funcionamiento continuado de las máquinas, el diseño de máquinas de **bajo coste** y las repercusiones que puede producir el hecho de que toda una planta industrial se pare por **avería** en una de sus máquinas, hacen que la atención al mantenimiento de éstas sea una necesidad. Para ello se aplican unos criterios que analizaremos a continuación.

Los tipos de mantenimiento se pueden clasificar en función de las características de funcionamiento, de los criterios empleados para su mantenimiento, de su ejecución para paliar o solucionar posibles problemas, etc. En el siguiente epígrafe vamos a conocer los tipos de mantenimiento que podemos aplicar con nuestros recursos en el taller.

### A. Tipos de mantenimiento

Aunque existen diversos tipos de mantenimiento y no descartamos la aplicación de cualquier otro, nosotros nos centraremos en los que citamos a continuación: el **mante-**

**nimiento correctivo**, el **mantenimiento preventivo** y el **mantenimiento planificado**.

#### Mantenimiento correctivo

Es el que **se realiza en el momento** indicado para corregir y resolver las averías surgidas, ya sea por una actuación derivada del mantenimiento preventivo, del mantenimiento planificado o de la propia actuación inmediata por necesidades perentorias.

Este tipo de mantenimiento es el que se emplea habitualmente en las pequeñas y medianas empresas, aunque gradualmente se están imponiendo planes de mantenimiento que demuestran a medio plazo una mayor eficacia en cuanto a economía, rendimiento e imprevisiones.

#### Mantenimiento preventivo

Es aquel que se aplica para **reducir la frecuencia de averías y acortar el tiempo de parada** por las mismas, es decir, surge de la necesidad de restringir paradas inesperadas en la producción. El mantenimiento preventivo, por su eficacia, requiere una actuación que en parte está relacionada con otro tipo de mantenimiento y que hace que su aplicación evite paradas innecesarias o que éstas se limiten al tiempo necesario para la sustitución de la máquina en cuestión.

#### Mantenimiento planificado

Surge la necesidad de efectuar revisiones planificadas de la máquina. Para ello se establece un **plan de actuación** en el que existan unas operaciones que hay que efectuar periódicamente para cada una de los elementos de cada máquina, en función del tiempo de trabajo y del deterioro que se produce en cada una de ellas. Para ello elaboraremos un plan de mantenimiento en el que se establezca como actuación de control la **frecuencia de inspección**.

Para un buen control de las inspecciones y de las reparaciones efectuadas a cada máquina, es conveniente diseñar una **ficha** que incluya todos los elementos que se han de inspeccionar y el tiempo empleado para su comprobación, sustitución o reparación si el momento y las circunstancias lo requieren.

## 1.3 Equipamiento

El equipamiento del taller de máquinas eléctricas debe constar de materiales, herramientas, aparatos de medidas y

**Plazos de revisión**

- Semanal
- Mensual
- Trimestral
- Anual

Identificación de la máquina.....  
 Características de la máquina.....  
 Última revisión.....  
 Persona que hizo la revisión.....  
 Otros aspectos de la revisión.....

Fecha	Cojinetes			Escobillas		Anillos		Trabajos especiales	Observaciones
	Engrase	Limpieza	Sustitución	Comprobación	Sustitución	Comprobación	Sustitución		

Fig. 1.1. Ficha de un plan de mantenimiento de un motor de inducción.

máquinas mínimas para poder realizar los trabajos necesarios para la detección de averías, reparación y ensayo o prueba de la máquina para su funcionamiento habitual. Por ello vamos a recordar algunas herramientas conocidas en el taller y otras que son específicas del mantenimiento.

### A. Herramientas de mano

Como sabemos, las herramientas de mano no deben faltar en el taller; para ello debemos tener, en lugares accesibles del mismo, suficientes armarios de panoplia equipados con las herramientas básicas de uso común, además de herramientas y accesorios de uso específico para un taller de mantenimiento de máquinas eléctricas.

El equipo mínimo de herramientas de mano estará compuesto por:

- Armario mural de panoplia.
- Juego de destornilladores planos.
- Juego de destornilladores *Philips*.
- Juego de destornilladores *Stecker*.
- Alicates de boca plana, de boca redonda y universal.
- Juego de llaves fijas.
- Juego de llaves *Allen*.

- Alicates de punta aguja larga.
- Alicates pelacables.
- Tijeras de electricista.
- Soldador eléctrico.
- Detector de tensión (buscapolos).

#### Alicates universal

Una de las herramientas más utilizadas son los alicates universales. Se emplean para sujetar, doblar, cortar, etc. Es una de las herramientas más útiles tanto para instalaciones como para reparación de máquinas eléctricas.



Fig. 1.2. Alicates universal (cortesía de STAHLWILLE).

#### Llaves

Las llaves son herramientas muy utilizadas en el montaje y desmontaje de máquinas. Según su utilización, presentan diferentes formas y aplicaciones. La principal función de las

Las llaves se utilizan para apretar y aflojar las tuercas de los tornillos que unen las diferentes partes de una máquina eléctrica. Por su aplicación, función, etc., las hay de diferentes tipos. Las más usuales son:

- Llaves fijas dobles.
- Llaves ajustables.
- Llaves de tubo.
- Llaves acodadas.

Las **llaves fijas** están construidas para que sólo se puedan utilizar en una única medida para tuercas; generalmente son de dos bocas, una por cada lado, con una cifra indicativa para la medida. El material con el que están construidas es acero al cromo-vanadio, material muy resistente, y sus medidas en las bocas están normalizadas en milímetros.

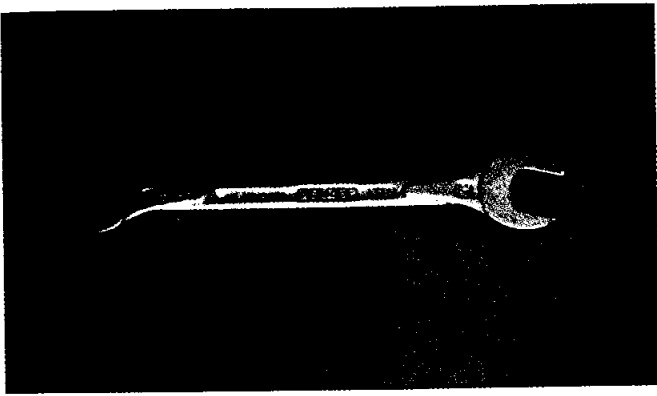


Fig. 1.3. Llave fija doble.

La **llave ajustable** consta de un mango en cuya cabeza está colocada una mordaza fija y otra móvil cuya apertura está limitada y se ajusta a la medida que queramos dentro de las posibilidades de apertura de las mordazas. La mordaza móvil se desplaza mediante el **tornillo sinfín**, ajuste en el que hay que evitar que haya holguras para no redondear las tuercas.

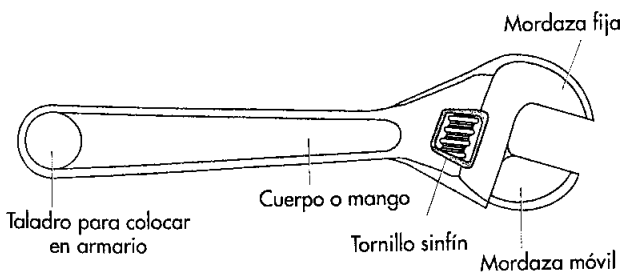


Fig. 1.4. Llave ajustable.

La **llave de tubo** se utiliza cuando la llave fija no puede maniobrar debido al poco espacio. Por su forma puede operar en espacios cilíndricos abiertos.

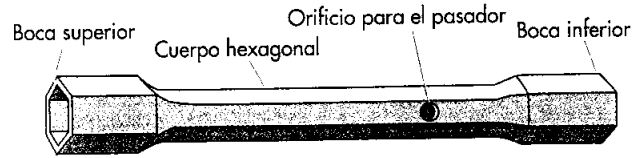


Fig. 1.5. Llave de tubo de dos bocas.

## 5. Tornillo sinfín y mordaza

### Tornillo sinfín

Es una herramienta que va colocada en el banco de trabajo y cuya función es sujetar la pieza que vamos a reparar. La paloma de giro desplaza un tornillo sinfín que aprieta la mordaza móvil, hasta sujetar la pieza por presión.

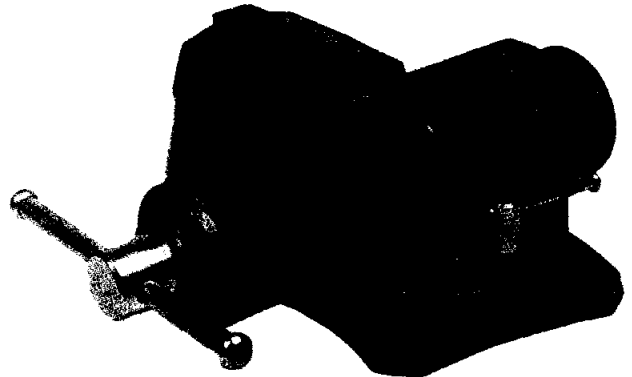


Fig. 1.6. Tornillo de banco (cortesía de Imporhesur).

### Llaves de carraca

En determinadas ocasiones, disponer de un juego de llaves de carraca soluciona satisfactoriamente y con rapidez ciertas tareas, como, por ejemplo, la operación de desmontaje y montaje de la carcasa de un motor.



Fig. 1.7. Llave de carraca (cortesía de STAHLWILLE).

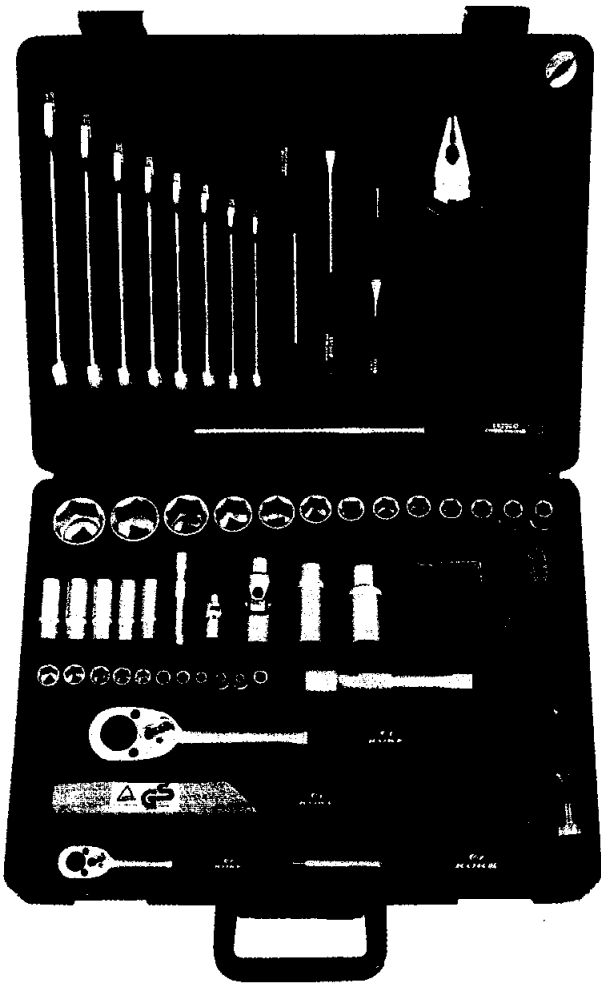


Fig. 1.8. Kit de herramientas (cortesía de Imporhesur).

### Machos de roscar

El **roscado interior** es una operación que en el taller de máquinas se emplea con más frecuencia de la deseable, ya que, en muchos casos y en máquinas muy deterioradas, hay que realizar roscados en cogidas de tornillos rotos o cortar los tornillos oxidados para efectuar un nuevo roscado. Viene bien recordar esta operación del curso anterior, al menos en lo que a útiles se refiere.

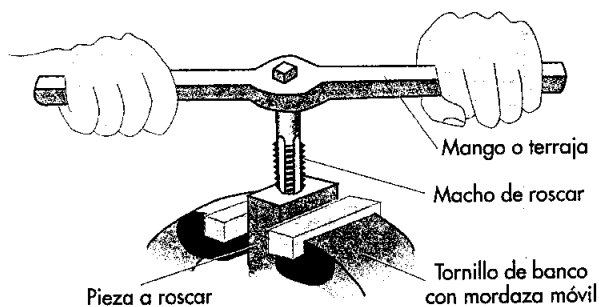


Fig. 1.9a. Bandeador de roscado.

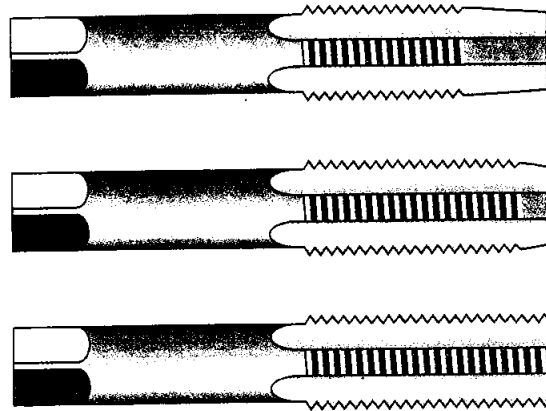


Fig. 1.9b. Juego de machos de roscar.

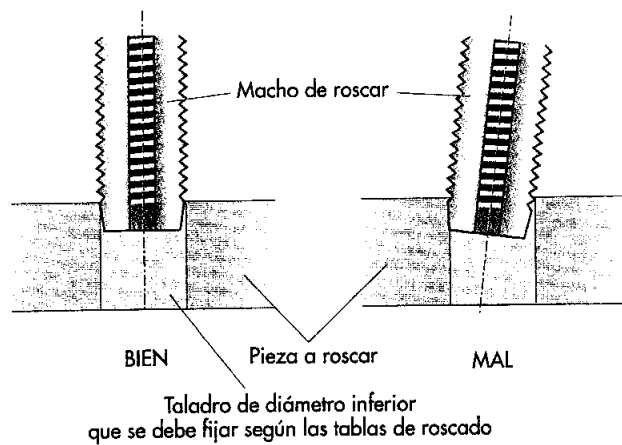


Fig. 1.9c. Formas correcta e incorrecta de roscar.

### C. Equipo de instrumentación para medidas eléctricas

El equipo está compuesto por:

- Amperímetro portátil para medidas en corriente continua.
- Amperímetro portátil para medidas en corriente alterna.
- Voltímetro portátil para medidas en corriente continua.
- Vatímetro portátil I.
- Vatímetro portátil III.
- Óhmetro portátil para medidas en corriente continua.
- Fasímetro monofásico portátil.
- Tacómetro digital.
- Medidor digital de aislamiento.
- Medidor de rigidez dieléctrica.

- Polímetro analógico portátil.
- Polímetro digital portátil.
- Pinza amperimétrica digital.
- Termómetro digital.
- Indicador de fases (trifásica).

#### Polímetro

La diversidad de medidas del polímetro y la operatividad con que obtiene los resultados hacen que su utilización sea muy necesaria, tanto en el taller como en la localización de averías en la propia ubicación de la máquina.

Los polímetros digitales, que están dotados incluso de una memoria que les permite almacenar lecturas, están sustituyendo progresivamente a los analógicos.

A la hora de trabajar con ellos, la elección del polímetro analógico o digital depende de la característica de la medición. En algunos casos importa más la rapidez y el orden de la magnitud (medición analógica), y en otros casos se requiere más precisión (medición digital). En muchos casos, el polímetro, además de la señalización visual, puede emitir una señal acústica para la comprobación de continuidad en los circuitos.

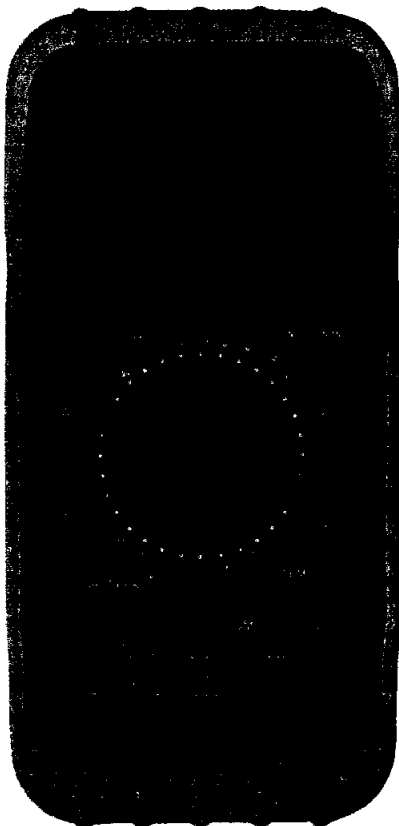


Fig. 1.10. Polímetro digital (cortesía de Imporhesur).

#### Pinza amperimétrica

Es un tipo de amperímetro muy utilizado en la detección de averías de máquinas eléctricas. Su funcionamiento está basado en el transformador de intensidad, que estudiaremos en la Unidad 2.

Dispone de un núcleo magnético de forma circular que se puede abrir por medio de un resorte, de manera que, cuando pasa intensidad por el conductor, éste se puede alojar en su interior sin tener que interrumpir el circuito.

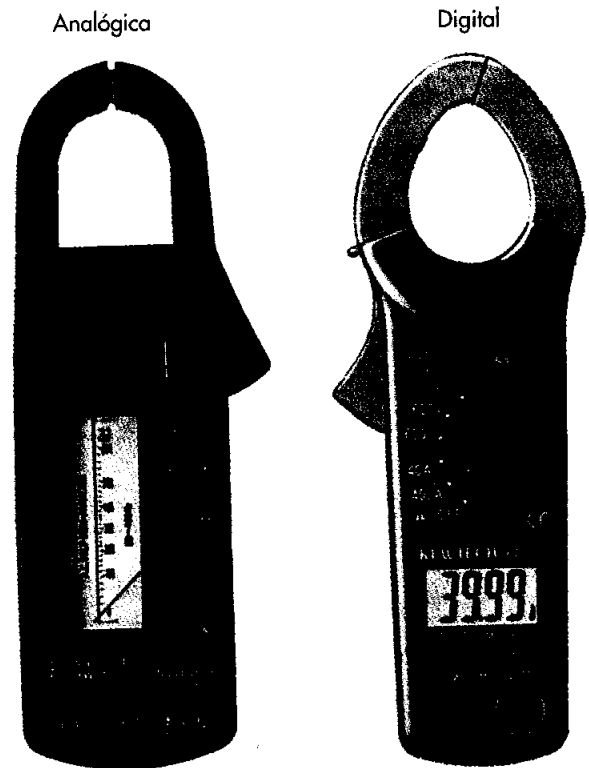


Fig. 1.11. Pinza amperimétrica (cortesía de Imporhesur).

## 1.4 Entrenador para ensayo de máquinas eléctricas

Se trata de un banco para mediciones y máquinas eléctricas compuesto, al menos por los siguientes elementos:

- Voltímetro de hierro móvil.
- Amperímetro de hierro móvil de 2-4 A.
- Vatímetros electrodinámicos.
- Frecuencímetro de lengüetas de 48 a 62 Hz.
- Fasímetro trifásico electrodinámico, escala 0,5-1-0,5.

- Fasímetro monofásico electrodinámico, escala 0,4-1-0,4.
- Miliamperímetro de hierro móvil 250-500 mA.
- Voltímetro de hierro móvil de 25 a 50 V.
- Amperímetro de hierro móvil de 10 a 20 A.
- Voltímetro taquimétrico, escalas 1 000/2 000/4 000 rpm.
- Generador/motor de CC con excitación separada/compuesta.
- Motor de corriente continua con excitación en serie.
- Generador síncrono trifásico de inductor rotante de 2 polos.
- Motor asíncrono trifásico de jaula de 2 polos.
- Motor asíncrono trifásico de anillos rozantes de 2 polos.
- Motor asíncrono trifásico de jaula, de doble polaridad (*Dahlander*).
- Motor asíncrono monofásico con condensador de marcha de 2 polos.
- Motor universal de CC/CA.
- Transformador monofásico.
- Transformador trifásico.
- Reostatos para diferentes ensayos.

### Banco de ensayos

La necesidad de realizar el ensayo en las máquinas rotativas, hace imprescindible disponer de un **banco de ensayos**, tanto de corriente alterna como de corriente continua. En la Figura 1.12 podemos observar un banco de ensayo de máquinas eléctricas.

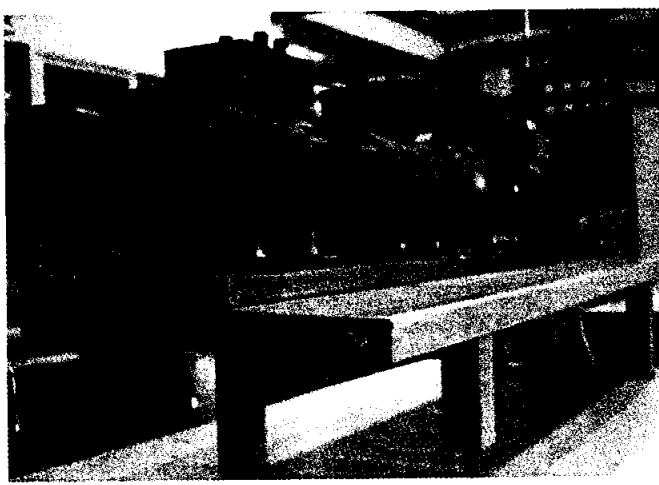


Fig. 1.12. Banco de ensayos de máquinas.

### Herramientas especiales

La singularidad de las herramientas de un taller de bobinado obliga, en algunos casos, a fabricar la herramienta necesaria para una reparación determinada o una operación específica.

## 1.5 Máquinas, herramientas y elementos para bobinar

Existen varios tipos: bobinadora eléctrica, bobinadora manual, devanador estático, juego de moldes, comprobador digital de inducidos, comprobador integral de motores eléctricos, taladradora portátil, taladro sensitivo, esmeriladora, etc.

### A. Bobinadora

Las bobinadoras son útiles o máquinas de un taller de reparaciones; su utilización reduce bastante los tiempos de reparación o rebobinado. Tanto las bobinadoras eléctricas como las manuales tienen su función específica.

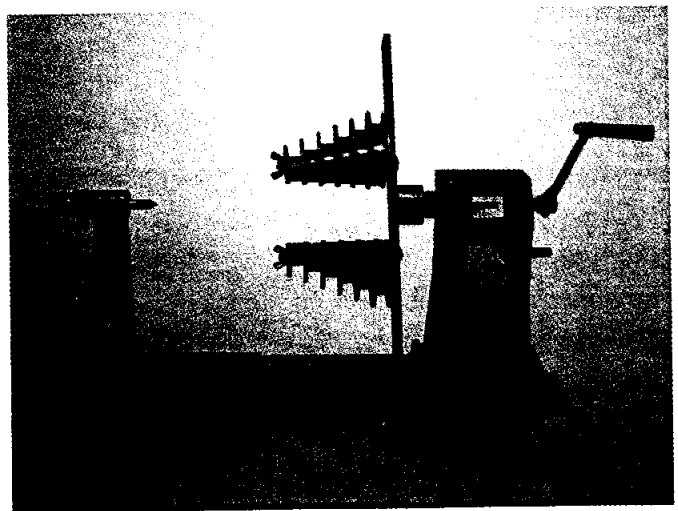


Fig. 1.13. Bobinadora manual.

### B. Taladro portátil eléctrico

Es una herramienta que presenta múltiples aplicaciones en los talleres de reparación. De hecho, no sólo se utiliza como taladro, sino que tiene otras utilidades en función de las necesidades y de los accesorios utilizados.

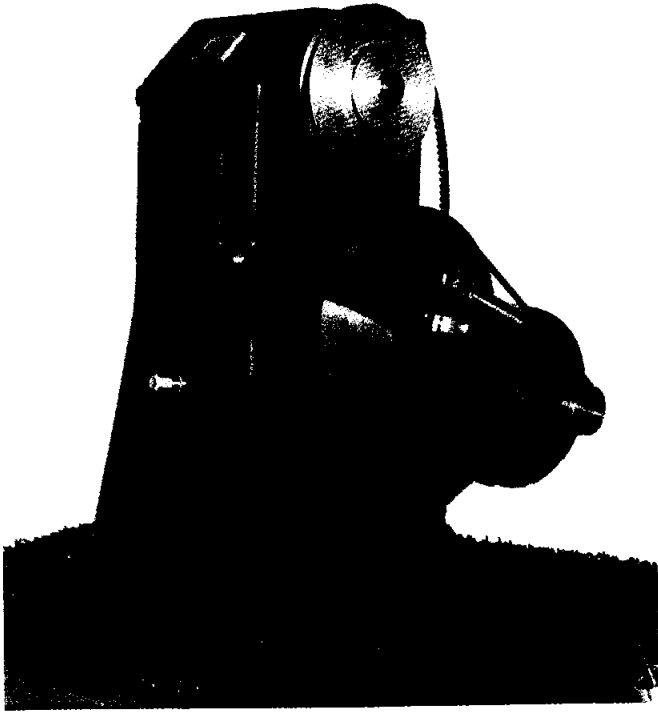


Fig. 1.14. Bobinadora automática (cortesía de Taller Electromecánico Piculi).

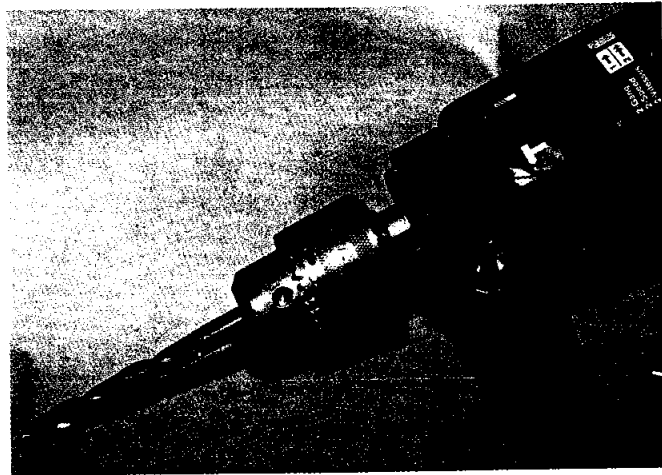


Fig. 1.15. Taladro portátil eléctrico.

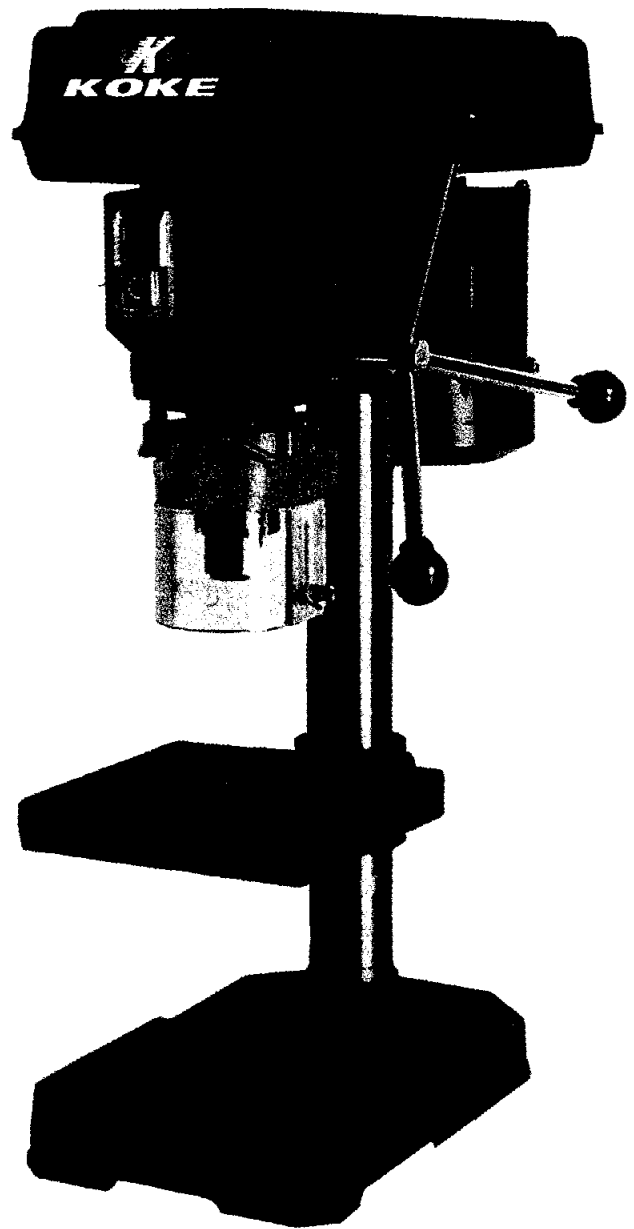


Fig. 1.16. Taladro sensitivo (cortesía de Imporhesur).

### 1.6.1. Taladro sensitivo

Suele ser de sobremesa o de columna. Se trata de una herramienta clásica en los talleres de mantenimiento de máquinas; tiene varias velocidades, por medio de varias poleas de diferentes tamaños. Se le denomina «sensitivo» debido a su manejo, puesto que la presión que se le da al taladro se va notando con respecto a la introducción en el material taladrado. Así, el operario puede determinar la presión que se debe ejercer.

## 1.6 Metrología

Las operaciones de medición consisten en la comparación de unos valores con otros con base en un valor conocido que tomamos como unidad. En un taller de máquinas, la medida más utilizada es la de longitud, pero no se descartan en ningún momento las medidas de superficie, las de volumen o las de ángulos.

Si queremos que una medida sea objetiva y muy precisa, es importante saber cómo se producen los errores de

medición. Si realizamos varias veces una medición, observaremos que en cada una de ellas obtendremos unos valores muy parecidos cuando se trata de medidas muy pequeñas. Para obtener el valor medio de la medida que hemos efectuado, sumaremos todos los valores y los dividiremos por el número de veces que hemos realizado las medidas, con lo que obtendremos el **valor medio de la medida**.

### Caso práctico 1

Se han realizado cinco mediciones del diámetro de un rotor bobinado de una máquina. Los resultados de éstas han sido los siguientes:

14,224 mm, 14,228 mm, 14,2230 mm, 14,225 mm y 14,226 mm.

Teniendo los valores de las mediciones, realizaremos las siguientes operaciones:

- Sumaremos los resultados de las cinco medidas.
- Dividiremos la suma total entre cinco y nos dará el resultado del valor medio.

$$\begin{aligned} \text{Valor medio} &= \\ &= \frac{14,224 + 14,228 + 14,223 + 14,225 + 14,226}{5} = \\ &= 14,2252 \text{ mm} \end{aligned}$$

Los aparatos de medidas que vamos a estudiar en este apartado son los más usados en el taller de máquinas: el **calibre** o «pie de rey» y el **tornillo micrométrico** o «pálmer».

#### A. Calibre o pie de rey

Por su fácil manejo y su precisión es el instrumento de medida más utilizado en el taller para medidas de precisión. Con él se pueden medir exteriores, interiores y profundidades que no superen la longitud de su regla graduada.

El calibre está compuesto fundamentalmente por una parte fija, que corresponde a la regla graduada, y otra móvil, donde se encuentra el **nonio** o **reglilla**, que es lo que determina la medida en la regla graduada, como podemos ver en la Figura 1.17.

Por su aspecto podemos ver que mide interiores con las orejillas superiores; una de ellas, fija con la regla graduada, y otra, móvil con el nonio. Con las patas inferiores se realizan las medidas exteriores, y la varilla en la parte derecha del calibre realiza las medidas de profundidades.

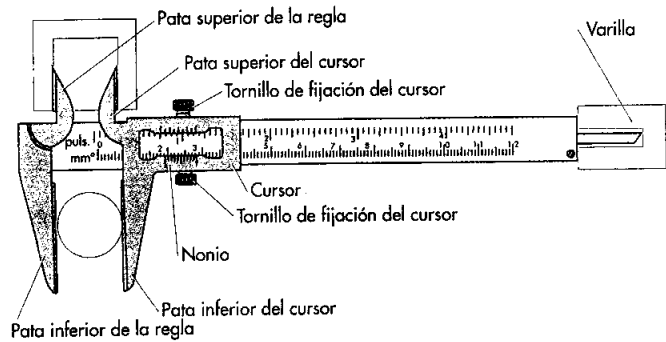


Fig. 1.17. Calibre o pie de rey.

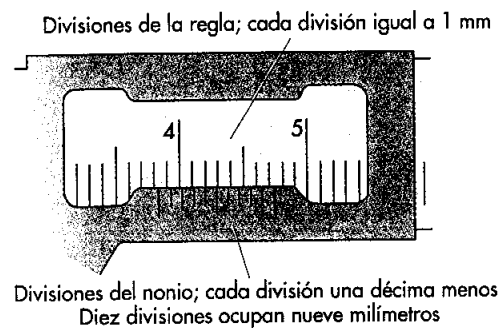


Fig. 1.18. Medida del nonio.

Cuando el calibre efectúa una medición, el cero del nonio indica la medida en milímetros exactos o no. El **nonio** es una reglilla dividida en diez partes, pero su longitud es de nueve milímetros. La división del nonio que coincida con cualquiera de las divisiones de la regla graduada del calibre indicará las décimas; si el nonio está dividido en veinte partes, podrá medir hasta media décima o cinco centésimas.

#### B. Tornillo micrométrico o pálmer

Es un aparato de medida de longitud con mayor precisión aún que el calibre, pero más limitado en sus posibilidades. Su precisión es de centésimas de milímetros. El **pálmer**, al igual que el calibre, tiene una parte fija y otra móvil. Las partes que lo componen son: regla graduada, tambor graduado, tope fijo, tope móvil y un tambor moleteado de precisión, que sirve para unir los topes y ajustarlos a la presión del material que se está midiendo sin llegar a oprimirlo.



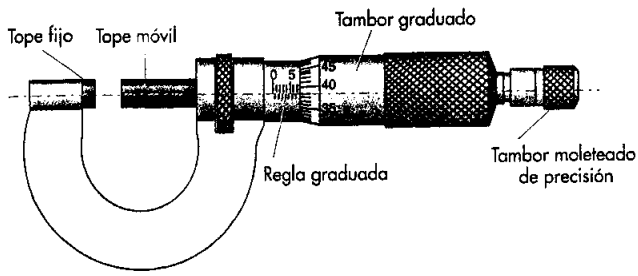


Fig. 1.19. Tornillo micrométrico o pálmer.

Su funcionamiento se basa en su tambor, graduado de 0 a 50 divisiones. Cada vez que el tambor gira una vuelta completa, los topes se desplazan 0,5 mm de longitud; por lo tanto, el 0 del tambor indica los milímetros enteros o los medios milímetros, según coincida el 0 del tambor.

Si el tambor coincide con una división de arriba, indicará los milímetros enteros, y con una división de abajo indicará medios milímetros.

Si la medida realizada superara la división de los milímetros en la regla, como indica la Figura 1.20a, y coincide con cualquiera de las divisiones del tambor, el valor de la medida corresponderá a los milímetros de la regla más las divisiones correspondientes del tambor graduado; en este caso, 7 mm y 25 centésimas de mm.

Si el tambor supera la división de medio milímetro, el valor de la medida corresponderá a los milímetros indicados más el medio milímetro que supera el tambor graduado, más las divisiones correspondientes al tambor que sobrepasen el medio milímetro (es decir, 7 mm más 0,5 mm más 34 partes del tambor, por lo que obtendríamos definitivamente 7 mm más 0,50 mm más 34 centésimas de milímetro: 7,84 mm). En la Figura 1.20b se puede apreciar la medida expuesta.

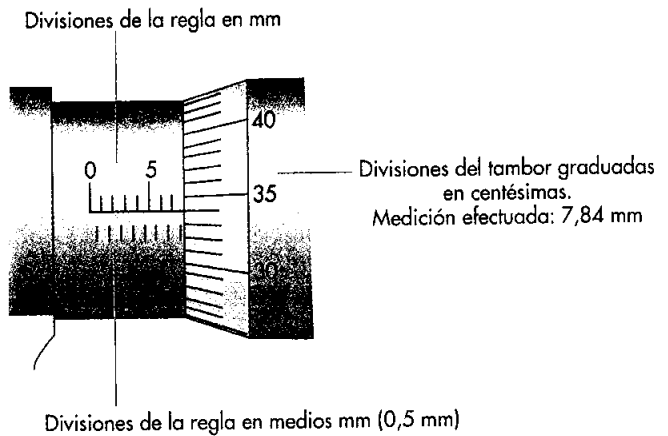


Fig. 1.20b. Medida del tornillo micrométrico o pálmer.

## 1.7 Clases de aislamientos

La calidad de los aislantes garantiza la fiabilidad de las máquinas.

Los materiales aislantes que se utilizan en las máquinas eléctricas y equipos electrotécnicos se clasifican según la temperatura máxima de funcionamiento; superada esta temperatura, el aislamiento va perdiendo sus cualidades dieléctricas e inicia un deterioro progresivo.

Cada clase de aislamiento se identifica con una letra mayúscula, como se indica en la Tabla 1.1.

	Y	A	E	B	F	H	C
	90	105	120	130	155	180	>180

Tabla 1.1. Temperatura máxima para cada clase de aislantes.

Los materiales con clase de aislante, según la Tabla 1.1, se han clasificado en unos límites de temperatura que permitirán una vida razonablemente larga para una máquina eléctrica. La vida del aislamiento de una máquina también depende de las condiciones medioambientales, de los ciclos de funcionamiento, de las condiciones de trabajo (vibraciones) y del mantenimiento.

Como complemento a la Tabla 1.1, se exponen las temperaturas máximas admisibles según las clases de aislamiento, suponiendo una temperatura ambiente de 40 °C, tal como se indica en la Tabla 1.2.

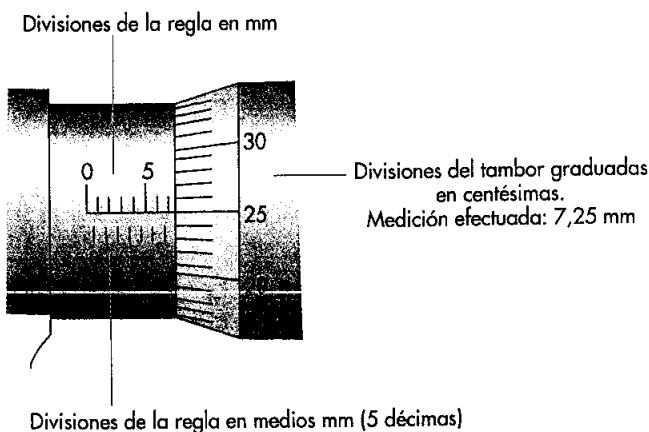


Fig. 1.20a. Medida del tornillo micrométrico o pálmer.

Clase de aislamiento	Temp. ambiente max. en °C	Aumento medio de temp. sobre el ambiente en °C	Temp. media admisible en servicio (°C)	Temp. admisible en el punto más caliente en °C
Y (90 °C)	40	45	85	90
A (105 °C)	40	60	100	105
E (120 °C)	40	75	115	120
B (130 °C)	40	80	120	130
F (155 °C)	40	100	140	155
H (180 °C)	40	125	165	180
C (>180 °C)	40	-	-	-

Tabla 1.2. Temperatura admisible según la clase de aislamiento.

Clase de aislamiento	Aumento de temperatura media admisible (°C)	Temperatura media límite (°C)	Resistividad ( $\rho$ ) $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Conductividad ( $\sigma$ ) $\frac{\text{S} \cdot \text{mm}}{\text{m}}$	Pérdida específica (P) $\frac{\text{W}}{\text{kg}}$
-	-	20	0,0179	56	$2,01 \cdot d^2$
-	-	75	0,0217	46	$2,44 \cdot d^2$
Y	45	85	0,0224	44,6	$2,48 \cdot d^2$
A	60	100	0,0234	42,6	$2,64 \cdot d^2$
E	75	115	0,0245	40,8	$2,75 \cdot d^2$
B	80	120	0,0248	40,2	$2,80 \cdot d^2$
F	100	140	0,0262	38,1	$2,95 \cdot d^2$
H	125	165	0,0280	35,7	$3,15 \cdot d^2$

$d^2 = \text{Densidad de corriente en A/mm}^2$

Tabla 1.3. Características del cobre a la temperatura admisible en las diferentes clases de aislamientos.

La Tabla 1.3 indica los valores de las características del cobre a la temperatura admitida por las distintas clases de materiales aislantes.

Para interpretar los esquemas y montajes que se realizan en las máquinas e instalaciones eléctricas, es necesaria una simbología que nos permita comprender todos y cada uno de los elementos del montaje que vayamos a llevar a cabo.

En este sentido, debido a la importancia que tiene la simbología en las representaciones esquemáticas, los organismos internacionales competentes trabajan en la elaboración de un cuerpo de normas de simbología unificado que facilite el entendimiento entre los profesionales del sector.

Por este motivo, incluimos en esta Unidad un espacio dedicado a mostrar gráficamente la simbología normalizada más utilizada en el ámbito internacional (Tablas 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8).

# Simbología normalizada

Denominación	IEC	UNE	DIN	BS	ANSI
Pulsador con accionamiento manual por empuje (NA)					
Contacto con enclavamiento rotativo, accionamiento manual					
Conmutador con dos posiciones y cero, con retorno a cero al cesar la fuerza de accionamiento (NA)		=			
Conmutador con dos posiciones y cero, con enclavamiento en las dos posiciones		=			
Mando con pulsador					
Interruptor manual (auxiliar de mando)		=			
Sistema de accionamiento con retroceso automático, al cesar la fuerza de accionamiento, para contactores y similares		=	=	=	
Relé con un devanado activo					
Relé con dos devanados activos en el mismo sentido		=	 Representación posible  		
Relé o disparador de medida con indicación de la magnitud medida; por ejemplo, mínima tensión		=			
Retraso para sistemas de accionamiento electromecánicos; retraso magnético a la caída	 Muy retardado	=		 Muy retardado	 

Tabla 1.4. Simbología de aparatos de maniobra según distintas normas.

## Simbología normalizada

Denominación	IEC	UNE	DIN	BS	ANSI
<b>Máquinas</b>					
Motor trifásico con rotor de anillos rozantes		=			
Motor trifásico con rotor de jaula		=			
Motor trifásico con rotor de jaula, con seis finales de bobinas		=			
<b>Transformadores, bobinas, transformadores de medida</b>					
Transformador con dos devanados separados		=			
Transformador con tres devanados separados		=			
Autotransformador		=			
Bobina		=			
Transformador de intensidad		=			
Transformador de tensión		=			

Tabla 1.5. Simbología de máquinas eléctricas de CA y transformadores según distintas normas.

En las tablas de simbología normalizada se incluyen representaciones de la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), de la norma española (UNE), de las normas alemanas para la industria (DIN), de la norma

inglesa (BS) y del Instituto de Normalización estadounidense (ANSI).

El signo «=» indica que, en ese caso, el símbolo correspondiente es igual al que aparece a su izquierda.

## Simbología normalizada

Denominación	IEC	UNE	DIN	BS	ANSI
Retraso a la conexión magnético	 Muy retardado	=		 Muy retardado	
Retraso a la conexión y a la desconexión magnético		=	=		= 
Relé polarizado		=			
Relé de remanencia		=			
Dispositivo de enchufe				=	
Fusible		=		= =	=
Seccionador fusible tripolar					
Barrera de seccionamiento reversible		=			
Seccionador tripolar		=			
Seccionador en carga tripolar					
<b>Aparatos de señalización</b>					
Bocina		=			
Timbre		=			
Sirena		=			
Lamparita		=			
Interruptores de señal					

Tabla 1.6. Simbología de aparatos de maniobra según distintas normas.

## Simbología normalizada

Símbolo	Denominación	Símbolo	Denominación
	Instrumento de bobina móvil con imán permanente, en general		Convertidor termoeléctrico, aislado
	Medidor de cocientes de carrete móvil		Convertidor termoeléctrico con instrumento de bobina móvil
	Instrumento de imán móvil		Rectificador
	Instrumento de imán móvil medidor de cocientes		Rectificador con instrumento de bobina móvil
	Instrumento de hierro móvil		Símbolo indicador de blindaje de hierro
	Instrumento de hierro móvil medidor de cocientes		Símbolo indicador de pantalla electrostática
	Instrumento electrodinámico, sin hierro	ast	Instrumento estático
	Instrumento electrodinámico medidor de cocientes, sin hierro	—	Corriente continua
	Instrumento electrodinámico con circuito magnético de hierro		Corriente alterna
	Instrumento electrodinámico medidor de cocientes, con circuito magnético de hierro		Corrientes continua y alterna
	Instrumento de inducción		Instrumento de corriente trifásica con un circuito medidor
	Instrumento de inducción medidor de cocientes		Instrumento de corriente trifásica con dos circuitos medidores
	Instrumento térmico de alambre dilatante		Instrumento de corriente trifásica con tres circuitos medidores
	Instrumento bimetaléico		Posición de empleo vertical
	Instrumento electrostático		Posición de empleo horizontal
	Instrumento de vibración		Posición de empleo con un determinado ángulo de inclinación
	Convertidor termoeléctrico, en general		Dispositivo de ajuste del cero
			Signo de la tensión de prueba (estrella de contorno negro)

Tabla 1.7. Simbología de tipos de instrumentos en aparatos de medida.

Símbolo	Aparato	Símbolo	Aparato
	Amperímetro		Fasímetro
	Óhmetro		Sincronoscopio
	Voltímetro		Contador kW · h
	Watímetro		
	Varímetro		Contador kVAr · h
	Frecuencímetro		

Tabla 1.3. Simbología de aparatos de medida.

## 1.8 Normas de seguridad

- Utilizar siempre, para cada tarea, las herramientas más adecuadas respetando las instrucciones del fabricante.
- Utilizar las herramientas sólo para las aplicaciones para las que han sido diseñadas.
- Para la manipulación de las máquinas bajo tensión, deben utilizarse herramientas con mango aislante.
- Los alicates no deben utilizarse nunca para aflojar o apretar tuercas; se corre el riesgo de dañarlas o redondearlas complicando en muchas ocasiones el desmontaje.
- Se deberá utilizar el destornillador adecuado a la cabeza que requiera del tornillo, así como emplear el tamaño adecuado y la fuerza necesaria para evitar que se salga de la muesca del tornillo o que éste se descabece.
- No se debe utilizar nunca el destornillador para hacer palanca.
- No utilizar el destornillador como cortafrío, ni el mango para golpear.
- Las llaves fijas y las ajustables se emplean para apretar o aflojar tuercas. Su longitud está equilibrada para que la fuerza que se ejerza manualmente pueda ser soportada

por la propia llave, por lo que nunca se debe utilizar ningún accesorio para aumentar la palanca si se quiere aplicar mayor fuerza.

- Para el buen uso de las llaves ajustables, la fuerza que se aplique deberá ser sobre la mandíbula fija.
- Ni las llaves fijas ni las ajustables se deben utilizar nunca para golpear ni hacer palanca con ellas.
- Protegerse los ojos de las posibles lascas al utilizar el taladro.



Fig. 1.21. Gafas de seguridad y auriculares insonorizados.

## Conceptos básicos

**Equipamiento:** cada uno de los materiales, herramientas, aparatos de medidas y máquinas con los que se realizan los trabajos necesarios para la detección de averías, reparación y ensayo o prueba de las máquinas para su funcionamiento habitual.

**Machos de roscar:** son cilindros de acero al carbono o acero rápido que, en su parte exterior, están fileteados en sentido longitudinal con tres o cuatro ranuras que forman las aristas de corte.

**Mantenimiento correctivo:** es el que se realiza para corregir y resolver las averías surgidas, ya sea por una actuación derivada del mantenimiento preventivo, del mantenimiento planificado o de la propia actuación inmediata por necesidades perentorias.

**Mantenimiento planificado:** son revisiones planificadas de la máquina, según un plan de actuación en el que existen unas instrucciones periódicas para cada uno de sus componentes. Para su seguimiento se elabora un plan de mantenimiento, en el que se establece la actuación de control y la frecuencia de inspección.

**Mantenimiento preventivo:** es aquél que está dirigido a reducir la frecuencia de las averías y acortar el tiempo de parada de las máquinas. Este mantenimiento surge de la necesidad de restringir interrupciones inesperadas de la producción.

**Tambor graduado:** es el cilindro del tornillo métrico (pálmer) que lleva divisiones para leer las fracciones de vuelta.

## Autoevaluación

1. Realiza un inventario de los aparatos de medidas de que dispones en el taller, y anota las escalas de cada uno.
2. Realiza el inventario de las herramientas específicas de que dispones en el taller.
3. Realiza el inventario de máquinas para ensayos, indicadas por el profesor.
4. Localiza en el taller un tornillo micrométrico y realiza la medida del diámetro de varios hilos esmaltados.

## Actividades de enseñanza - aprendizaje

### 5. Analiza los elementos de un taller de máquinas eléctricas.

#### • Objetivos:

- Familiarizarse con el puesto de trabajo en el taller de máquinas.
- Identificar los nombres de las herramientas y los útiles que va a utilizar próximamente.

#### • Medios didácticos:

- Herramientas específicas del taller de máquinas.
- Aparatos de medidas.
- Máquinas para el ensayo.
- Máquinas para rebobinar.
- Hilo esmaltado.
- Cualquier otro elemento que no conociera en las asignaturas o módulos del curso anterior.

#### • Procedimiento:

- Identificar los elementos que el profesor le vaya indicando a lo largo de cada una de las estanterías del taller.

#### • Contesta:

- a) Realiza el inventario de los útiles, herramientas y máquinas eléctricas de que dispones en el aula específica para mantenimiento de máquinas eléctricas.
- b) Describe la aplicación de cada útil y herramienta.
- c) Explica cuáles han sido las dificultades para la realización de este ejercicio.

- d) Indica los medios didácticos inventariados, en el aula específica de Mantenimiento de Máquinas Eléctricas, que te eran desconocidos.

### 6. Realiza diferentes mediciones con polímetros.

#### • Objetivos:

- Identificar las diferentes mediciones que se pueden realizar con el polímetro.
- Conocer las diferentes conexiones para la ejecución de las medidas a realizar.
- Interpretar las lecturas de las medidas y sus escalas.

#### • Medios didácticos:

- Polímetro analógico.
- Polímetro digital.

#### • Procedimiento:

- 1.º Medida de tensión en corriente continua.
- 2.º Medida de tensión en corriente alterna.
- 3.º Medida de resistencia.
- 4.º Medida de intensidad en corriente continua.
- 5.º Medida de intensidad en corriente alterna.
- 6.º Comprobación de transistores.
- 7.º Medida de temperatura.

#### • Contesta:

- a) ¿Un polímetro es un instrumento de medida portátil?
- b) Explica cómo conectarías un polímetro cuando actúa como amperímetro.
- c) Explica cómo conectarías un polímetro cuando actúa como voltímetro.
- d) ¿Qué debes comprobar cuando la aguja de un polímetro tiende a desviarse al revés de una medición?
- e) Realiza mediciones de las magnitudes con las que se pueda utilizar un polímetro digital.
- f) Realiza las mediciones anteriores con un polímetro analógico. Contrasta las mediciones indicando el polímetro de mayor precisión.



## 7. Realiza diferentes medidas con el calibre o pie de rey.

### • Objetivos:

- Realizar mediciones exteriores.
- Realizar mediciones interiores.
- Realizar mediciones de profundidad.

### • Medios didácticos:

- Calibre o pie de rey con 10 divisiones en el nonio.
- Calibre o pie de rey con 20 divisiones en el nonio.

### • Procedimiento:

- 1.º Elegir objetos para medir exteriores, interiores y profundidades.
- 2.º Realizar tres mediciones exteriores, tres interiores y tres de profundidad.
- 3.º Anotar cada una de las mediciones.
- 4.º Calcular el valor medio de cada medición.

### • Contesta:

- a) ¿Qué diferencias encuentras entre la utilización de un calibre de 10 divisiones y otro que tiene 20 divisiones en el nonio?
- b) Enumera las partes de un calibre.
- c) Indica qué función tiene cada una de las partes del calibre.
- d) ¿Qué precisión en fracciones de milímetro tiene el calibre que has utilizado?

## 8. Realiza diferentes medidas con el tornillo micrométrico (pálmer).

### • Objetivos:

- Familiarizarse con el tornillo micrométrico (pálmer).

- Identificar las partes de un tornillo micrométrico.
- Realizar medidas de precisión.

### • Medios didácticos:


- Diferentes tipos de tornillo micrométrico con la regla, en la parte superior, graduada en milímetros.
- Diferentes tipos de tornillo micrométrico con la regla, en la parte inferior, graduada en milímetros.

### • Procedimiento:

- 1.º Elegir tres diámetros diferentes de hilo esmaltado.
- 2.º Realizar las mediciones de los diámetros de los hilos con esmalte.
- 3.º Realizar las mediciones de los diámetros de los hilos sin esmalte.
- 4.º Realizar cuatro mediciones por cada diámetro.
- 5.º Anotar los valores obtenidos en las mediciones.
- 6.º Calcular el valor medio de cada diámetro, mediante los valores obtenidos en las distintas mediciones.

### • Contesta:

- a) ¿Qué diferencia has encontrado en el tornillo micrométrico con los milímetros de la regla graduada en la parte superior? ¿Y con los milímetros de la regla graduada en la parte inferior?
- b) Enumera las partes del tornillo micrométrico.
- c) Indica las funciones de cada una de las partes del tornillo micrométrico.
- d) ¿Qué precisión en fracción de milímetro tiene el tornillo micrométrico utilizado (décima, centésima, milésima de milímetro)?



Transformadores.  
Clasificación y constitución

2

## 2.1

# ORIGEN Y FUNCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES

El **transformador eléctrico** es una máquina estática que transforma, elevando o reduciendo, los valores de la tensión ( $U$ ) y de la intensidad ( $I$ ) de entrada de una potencia dada ( $S$ ), y devuelve en la salida unos valores distintos. Todo ello ocurre sin que se modifique la frecuencia de las magnitudes aplicadas.

El transformador, al igual que eleva la tensión, también la reduce, y es, por tanto, una **máquina reversible**. Por ende, un mismo transformador puede ser elevador o reductor.

La transformación tiene lugar sin ningún tipo de movimiento mecánico y casi sin pérdida de rendimiento: esto hace del transformador una máquina de gran utilidad y rentabilidad.

Por su función, los transformadores pueden utilizarse en transporte de energía, en medidas eléctricas, en seguridad de instalaciones, en aparatos de medicina, en juguetes, etc.

Como podemos observar en la Figura 2.1, el **transporte**, la **distribución** y los puntos de utilización de la energía son sectores muy importantes, donde la aplicación del transformador es indispensable.

Los transformadores de gran potencia se emplean como elemento para elevar altas tensiones y poder así transportar la energía eléctrica. La elevación de la tensión hace reducir la sección de los conductores, facilitando el transporte y mejorando costes.

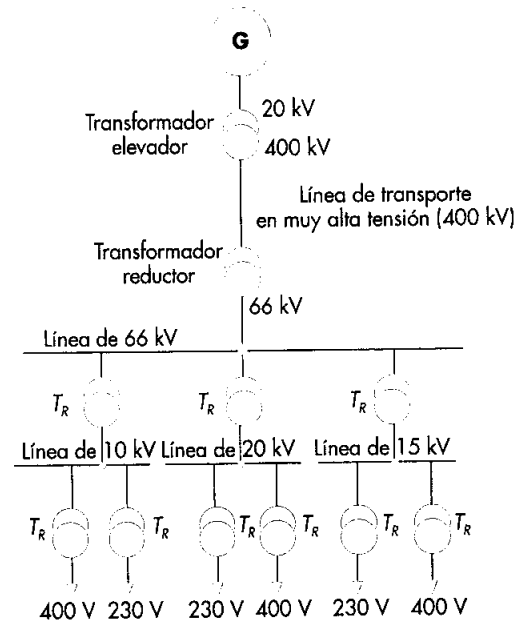


Fig. 2.1. Esquema de generación de energía. Transformación/elevación. Transporte. Transformación/reducción. Usuario.

El circuito que recibe la tensión que queremos transformar será el circuito primario, mientras que el que proporciona la tensión ya transformada (elevada o reducida) será el circuito secundario.

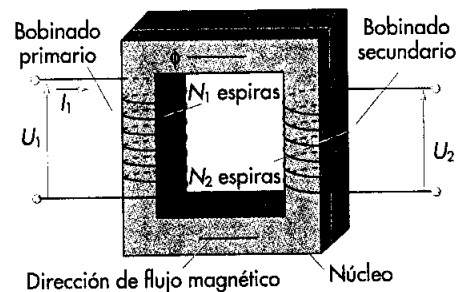


Fig. 2.2. Dibujo del circuito magnético y de los circuitos eléctricos de un transformador de columnas.

## 2.2

# Principio de funcionamiento de los transformadores

Un transformador, en su forma más sencilla, está constituido por un circuito magnético y dos circuitos eléctricos.

El **circuito magnético** está formado por chapas de material ferromagnético (generalmente, aleación de hierro-silicio), apiladas y aisladas entre ellas para reducir las corrientes inducidas, llamadas de Foucault, que estudiaremos más adelante.

Sobre el núcleo magnético, se encuentran enrollados los **circuitos eléctricos primario y secundario**, cada uno con un número determinado de espiras o vueltas.

Como se puede ver en la Figura 2.2, si se conecta la bobina primaria a una tensión de entrada ( $U_1$ ) y la bobina secundaria a un receptor, la tensión de entrada produce en el bobinado primario una corriente eléctrica ( $I_1$ ) que, a su vez, inducirá un **flujo magnético alterno** ( $\Phi$ ).

Este flujo circula a través del circuito magnético y, al llegar al bobinado secundario, induce en éste otra tensión eléctrica alterna de diferente valor ( $U_2$ ) pero con la misma frecuencia. Como veremos, esta variación depende fundamentalmente del número de espiras de las bobinas ( $N_1$  y  $N_2$ ).

Es importante puntualizar que un transformador sólo se puede utilizar en corriente alterna, porque su principio de funcionamiento se basa en los fenómenos de inducción y autoinducción electromagnética, y sólo hay inducción si existe una variación de flujo. En este caso, la variación de flujo se obtiene por las características propias de la corriente alterna.

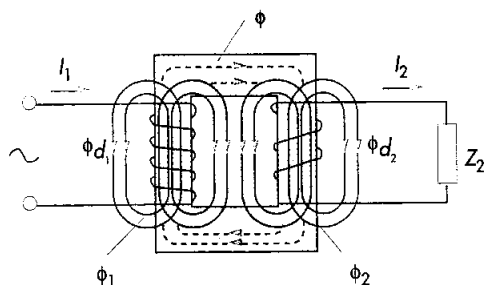


Fig. 2.3. Circulación de los flujos magnético y de dispersión.

En el dibujo de la Figura 2.3, es posible apreciar que el bobinado primario se encuentra conectado a la red eléctrica alterna (~), mientras que el secundario está conectado a una carga. Parte del flujo magnético ( $\Phi$ ) creado por la corriente de la bobina primaria se cierra a través del aire, es decir, que se pierde parte del flujo por la dispersión del mismo. Éste se denomina flujo de dispersión ( $\Phi_{d1} - \Phi_{d2}$ ).

### Recuerda

El **flujo magnético** es el número total de líneas de fuerza que existen en un circuito magnético y se representa por la letra griega « $\Phi$ », que se lee «fi», y su unidad es el **weber** (Wb).

Para entender su funcionamiento, es importante considerar que entre los valores del bobinado primario y los del bobinado secundario (y, por consiguiente, entre las tensiones o intensidades presentes en estos bobinados) hay una relación constante que se denomina **relación de transformación** ( $m$ ), por la cual:

### Fórmula 2.1

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

En ella,  $U_1$  y  $U_2$  son, respectivamente, las tensiones de entrada y de salida, y  $N_1$  y  $N_2$  son, respectivamente, el número de espiras del primario y el número de espiras del secundario.

## 2.3 Tipos de transformadores. Clasificación

Los transformadores se pueden clasificar por diferentes aspectos. En el Esquema 2.1 éstos se dividen en **transformadores de potencia** y **transformadores de medidas**.

### A. Transformadores de potencia

Estos transformadores son los más utilizados en la industria, en transporte y distribución de energía, en puntos de utilización y abastecimiento de energía eléctrica a los núcleos urbanos, en máquinas, etc.

Este tipo de transformador se analizará más adelante, por ser el que más emplearemos para el estudio de los materiales, cálculo, construcción y ensayo.

Los transformadores se pueden clasificar por diversos aspectos:

**Por su función.** Elevador, estabilizador y reductor. Estos transformadores elevan o reducen la tensión que se le aplica en el bobinado primario.

Los transformadores estabilizadores no varían los valores de la tensión, y se utilizan para estabilizar la tensión de salida con respecto a la de entrada, reduciendo los picos de tensión que se puedan producir en los puntos de utilización de la energía eléctrica.

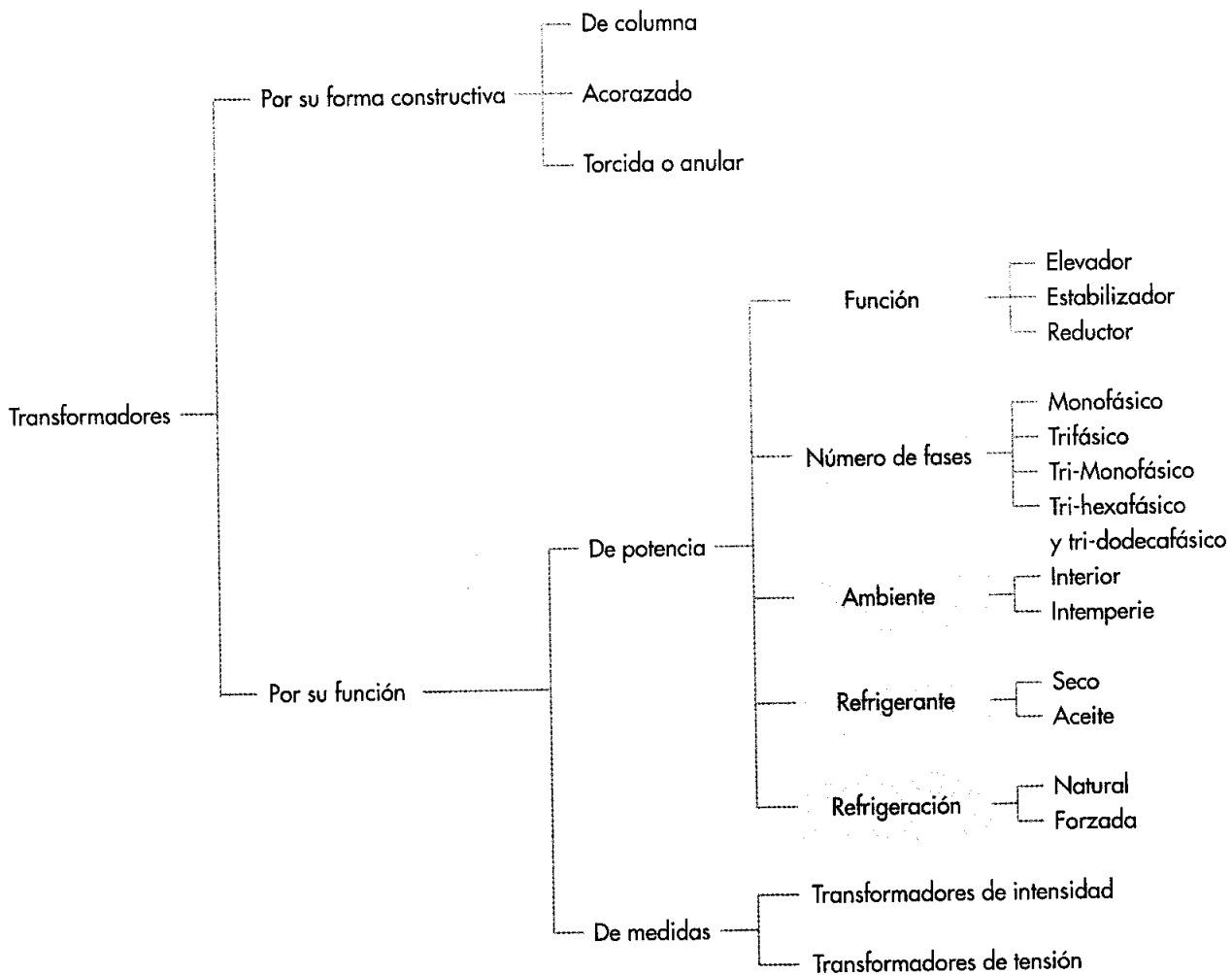
Los centros de control informático y centros de telecomunicaciones son ejemplos de la utilidad de estos transformadores.

**Por el número de fases.** Monofásico, trifásico, tri-monofásico, tri-hexafásico y tri-dodecafásico. Se utilizan en las diferentes líneas de la red eléctrica y para cualquier número de fases.

**Por el ambiente donde están ubicados.** Interior, intemperie. Los de interior se encuentran en casetas de transformación, en cuadros eléctricos para máquinas, en aparatos de protección, etc.

Son de intemperie los de las centrales de transformación, los ubicados en postes metálicos, generalmente en zonas rurales y los de las subestaciones.

**Por refrigerante.** Seco y aceite. Los transformadores de mediana y gran potencia se refrigeran por aceite, además de por un sistema de aletas de radiación.



Esquema 2.1. Clasificación de los transformadores.

**Por el tipo de refrigeración.** Natural o forzada. La refrigeración puede ser por circulación normal del aceite o aire, o por circulación proporcionada por otro elemento exterior.

### B. Transformadores de medidas

Se clasifican por la magnitud eléctrica que vayan a medir.

**Transformador de tensión.** Generalmente se utiliza para reducir la tensión de la línea y poderla medir con volímetros de pequeño tamaño y sin riesgo de accidentes.

**Transformador de intensidad.** Se utiliza para reducir altas intensidades y que así puedan ser medidas por aparatos de pequeño tamaño y escala.

Estos transformadores se estudiarán detenidamente más adelante.

## 2.4 Construcción magnética de los transformadores

Los transformadores se pueden construir con diferentes tipos de circuito magnético, en función de la aplicación que se les vaya a dar.

Por su circuito magnético, éstos pueden ser de **columnas, acorazados y toroidales.**

### A. Transformadores de columnas

Los **transformadores monofásicos** están constituidos por dos columnas verticales de igual sección, como podemos ver en la Figura 2.4, unidas entre sí por dos **culatas** o yugos horizontales que permiten el cierre del flujo magnético.

Los **transformadores trifásicos** de columnas se componen de tres columnas, también verticales, y dos culatas horizontales, para permitir que el flujo magnético inducido en las columnas se pueda cerrar a través de las culatas, como indica la Figura 2.5.

El flujo magnético que se induce en el bobinado recorre todo el circuito magnético; por lo tanto, deberá ser de igual sección en todo su recorrido, como podemos ver en la Figura 2.4 (núcleo magnético monofásico) y 2.5 (núcleo magnético trifásico). Por ello, el núcleo de un transformador de columna monofásico constituye un circuito magnético serie.

Los transformadores de columnas trifásicos se construyen para grandes potencias; los monofásicos se construyen para equipos de soldadura eléctrica en ambientes húmedos y equipos de mucha seguridad, como son los aparatos de electromedicina que llevan **transformadores de aislamiento**, es decir, de bobinados separados.

La altura de estos transformadores es, en muchos casos, un inconveniente; por tanto, en espacios limitados de altura no se recomienda la utilización de este tipo de transformador.

La forma circular en que se montan los bobinados proporciona una buena resistencia mecánica a las vibraciones electrodinámicas que se producen sobre todo a plena carga. Por otra parte, para una sección de núcleo dada, el círculo es el que menor perímetro tiene, por lo que optimiza la longitud de los bobinados.

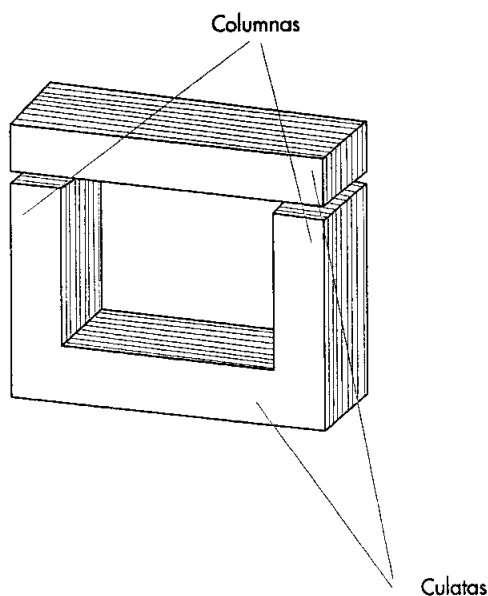


Fig. 2.4. Núcleo magnético de un transformador monofásico de columnas.

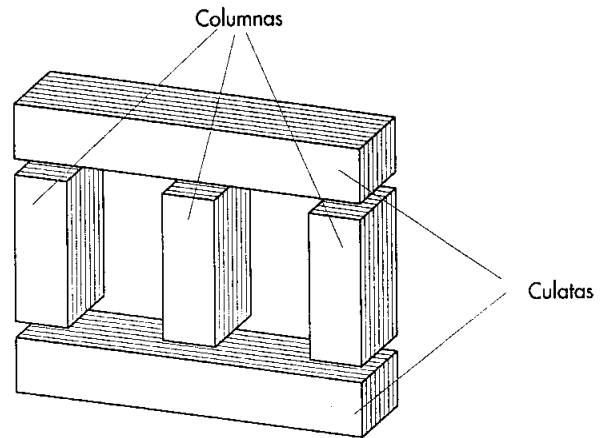


Fig. 2.5. Núcleo de un transformador de columnas trifásico.

## B. Transformadores acorazados

Se caracterizan por tener dos columnas exteriores por las cuales se cierra el circuito magnético y una columna central donde se colocan los dos circuitos eléctricos.

La columna central deberá tener el doble de sección que las columnas exteriores, ya que los flujos que se distribuyen por la columnas laterales convergen en la columna central, como podemos ver en la Figura 2.6.

El núcleo de un transformador de columna constituye un circuito magnético en derivación.

Estos transformadores se utilizan para pequeñas potencias, en cuadros eléctricos, en aparatos con circuitos electrónicos, en máquinas herramientas, en aparatos de televisión, etc.

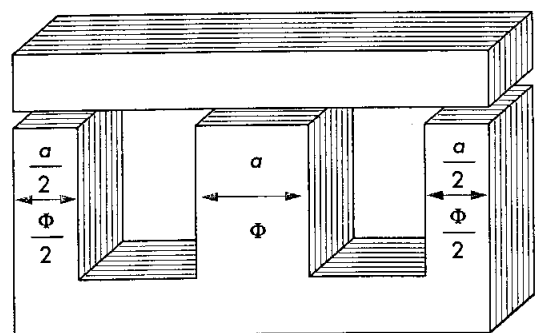


Fig. 2.6. Núcleo magnético de un transformador monofásico acorazado.

En los montajes de los núcleos magnéticos, tanto de los transformadores de columnas como de los acorazados, la unión entre las columnas y las culatas se puede realizar por dos procedimientos:

- a) Por **junta lisa**, en la que la unión entre las columnas y las culatas se hace simplemente por contacto. Se suele utilizar en transformadores de gran potencia.
- b) Por **junta ensamblada**, en la que la unión entre las columnas y las culatas se realiza por ensamble. Es el procedimiento más utilizado en los transformadores de pequeña y mediana potencia.

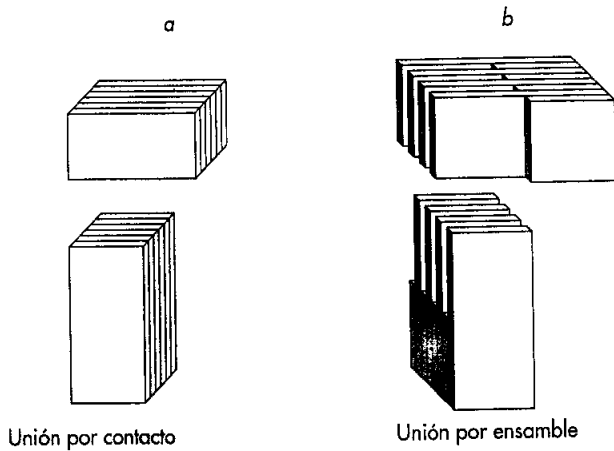


Fig. 2.7. Diferentes tipos de uniones entre columnas y culatas.

Los transformadores de columna requieren mayor cantidad de bobinado pero menor cantidad de hierro que los transformadores acorazados de las mismas características de funcionamiento.

### C. Transformadores toroidales

En estos transformadores, el **núcleo magnético** tiene forma de **anillo cerrado**. Esto facilita la obtención de bobinados equilibrados con relación al circuito en el que está inmerso, sin afectar a otras bobinas adyacentes debido al cierre del campo magnético.

Se utiliza en espacios donde coincide con otros aparatos eléctricos, como pueden ser aparatos de medidas, interruptores diferenciales, circuitos electrónicos, etc., para evitar alteraciones que pudiera producir la dispersión de flujo.

En la Figura 2.8 podemos ver un núcleo magnético toroidal, y un núcleo magnético con los bobinados primario y el secundario montados.

Este tipo de transformador se utiliza en los interruptores diferenciales, en transformadores de intensidad y, en menor

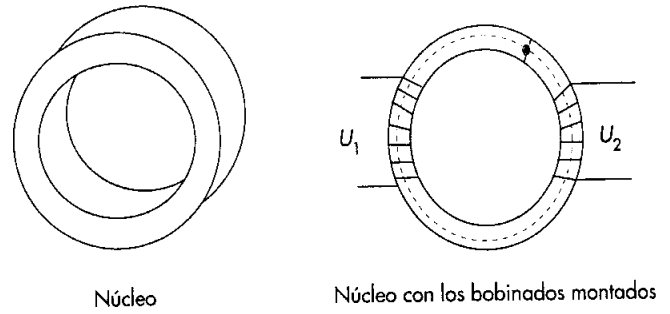


Fig. 2.8. Núcleo de un transformador toroidal.

medida, en autotransformadores regulables de fabricación manual.

Los **autotransformadores regulables** se construyen tanto monofásicos como trifásicos, y se usan en la regulación y control de máquinas eléctricas, en instalaciones de climatización, en la regulación de alumbrado, etc. En las Figuras 2.9 y 2.10 podemos ver, respectivamente, un autotransformador monofásico y un autotransformador trifásico, ambos regulables manualmente.



Fig. 2.9. Autotransformador monofásico regulable con núcleo toroidal.

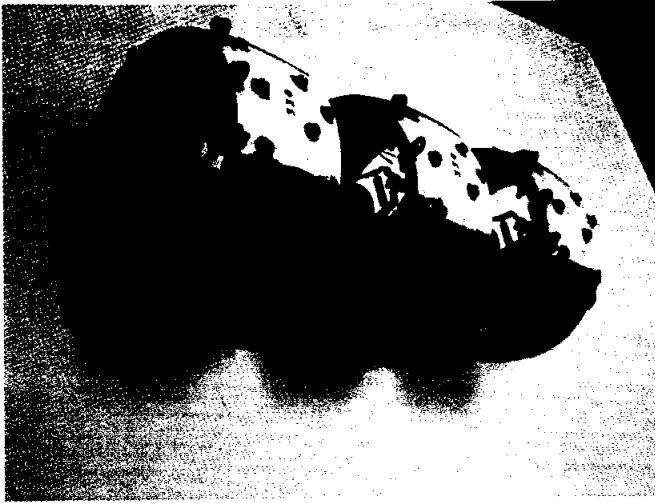


Fig. 2.10. Foto de un autotransformador regulable trifásico con núcleo toroidal.

## 2.5 Transformador trifásico

El sistema de producción y transporte de energía eléctrica se realiza mediante un sistema eléctrico trifásico; esto permite la utilización de transformadores trifásicos como elemento necesario en las **funciones de transporte y distribución** de la energía.

Un transformador trifásico se consigue mediante el montaje de tres transformadores monofásicos conectados cada uno a una fase de la red trifásica equilibrada. Este montaje se llama **banco trifásico**, lo que indica que un transformador trifásico tiene el mismo comportamiento electromagnético que un transformador monofásico.

Vamos a realizar el proceso para obtener y comprender el funcionamiento de un transformador trifásico partiendo de tres monofásicos.

Los transformadores que componen el banco trifásico son completamente independientes entre sí, al igual que los circuitos magnéticos. Entre ellos no existe ningún tipo de interferencia que pueda provocar alguna alteración de los flujos que se producen.

Si disponemos los tres transformadores monofásicos como indica la Figura 2.11, apreciaremos que los flujos en las columnas coincidentes se anulan.

Podemos observar cómo los tres transformadores monofásicos están unidos por las tres columnas, y que los flujos  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  y  $\Phi_3$  son iguales.

Al ser los tres flujos iguales y desfasados entre sí  $120^\circ$ , la suma vectorial resultante de los tres flujos creados es cero. Podemos comprobar en el diagrama de vectores de la misma Figura 2.11 que la suma de los flujos es nula.

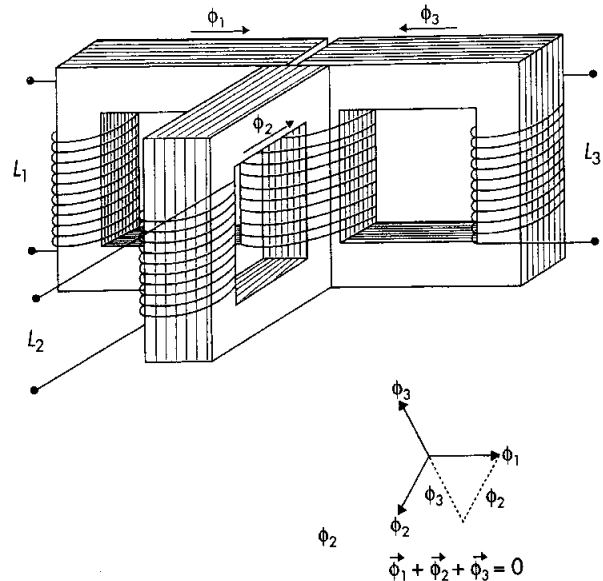


Fig. 2.11. Banco trifásico formado por tres transformadores monofásicos.

Por lo tanto, al quedar la columna central anulada, podemos suprimirla. En la Figura 2.12 se aprecia cómo quedaría el núcleo del transformador.

La construcción real, derivada del montaje de un banco de tres transformadores monofásicos, es el núcleo trifásico que se indica en la Figura 2.13, empleado en casi todos los transformadores trifásicos.

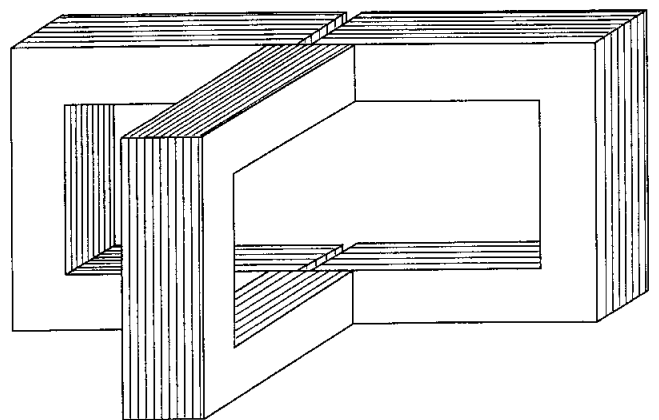


Fig. 2.12. Núcleo del banco trifásico sin las columnas coincidentes.



La utilización del banco trifásico cuenta con el inconveniente de tener mayor volumen y peso debido a que dispone de tres núcleos magnéticos. El coste es mayor, aunque en caso de avería resulta más rentable.

Un ejemplo de aplicación sería que, por razones de seguridad en el servicio, fuera necesario disponer de unidades de reserva. Con un transformador monofásico y con el tercio de la potencia total bastaría; en cambio, un transformador trifásico debería tener otro transformador trifásico de reserva.

Para evitar los inconvenientes de tres transformadores monofásicos, se dispone de un transformador de tres columnas y dos culatas (Figura 2.13), resultante de la modificación necesaria para su rentabilidad y menor volumen.

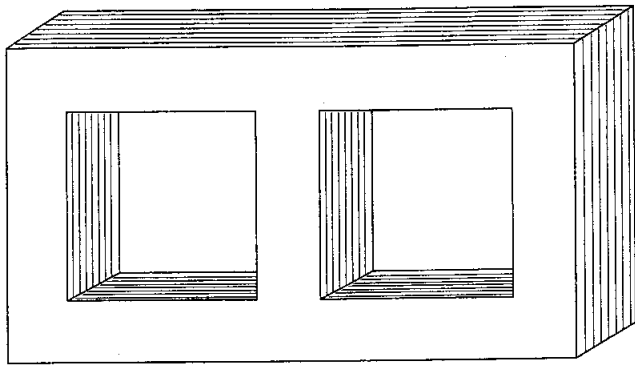


Fig. 2.13. Núcleo de un transformador trifásico.

Lo más común en transformadores trifásicos, tanto en circuito magnético como eléctrico, es lo que se indica en la Figura 2.14, en donde los tres bobinados primarios  $N1U$ ,  $N1V$  y  $N1W$  corresponden a las fases  $L1$ ,  $L2$  y  $L3$  respectivamente, así como los tres bobinados secundarios  $N2U$ ,  $N2V$  y  $N2W$  corresponden a las fases  $L1'$ ,  $L2'$  y  $L3'$ .

Los elementos esenciales que constituyen un transformador eléctrico son:

- Tres bobinados primarios:  $N1U$ ,  $N1V$ ,  $N1W$ .
- Tres bobinados secundarios:  $N2U$ ,  $N2V$ ,  $N2W$ .
- Un circuito magnético de tres columnas y dos culatas o yugos.
- Una cuba.

En la Figura 2.15 podemos observar los elementos básicos que componen un transformador de potencia y su montaje.

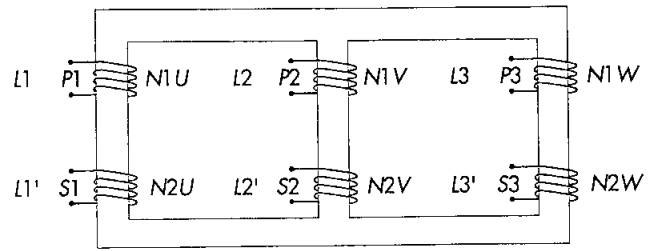


Fig. 2.14. Transformador trifásico.

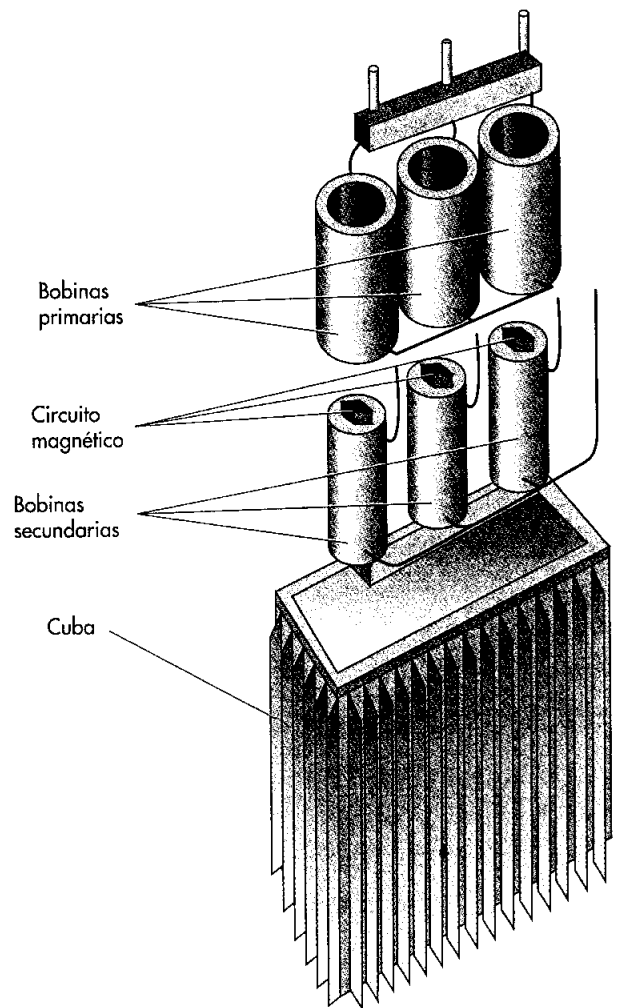


Fig. 2.15. Elementos que componen un transformador trifásico.

Los **tipos de conexiones** más frecuentes que pueden realizarse en los transformadores trifásicos son los indicados en la Tabla 2.1.

Las expresiones  $D$ ,  $Y$ ,  $Z$  son las indicaciones de las tensiones mayores;  $d$ ,  $y$ ,  $z$  son las indicaciones de las tensiones menores.

Conexión primaria	Conexión secundaria	Grupo
Triángulo «D»	Triángulo «d»	Dd
Estrella «Y»	Estrella «y»	Yy
Triángulo «D»	Estrella «y»	Dy
Estrella «Y»	Triángulo «d»	Yd
Estrella «Y»	Zigzag «z»	Yz

Tabla 2.1. Conexiones más frecuentes del transformador.

### A. Triángulo-triángulo (Dd)

En esta conexión, tanto los bobinados primarios como los secundarios están conectados en triángulo (Figura 2.16). Estas conexiones se representan indicando «D» para la conexión del bobinado primario en triángulo, y «d» para la conexión del bobinado secundario, también en triángulo.

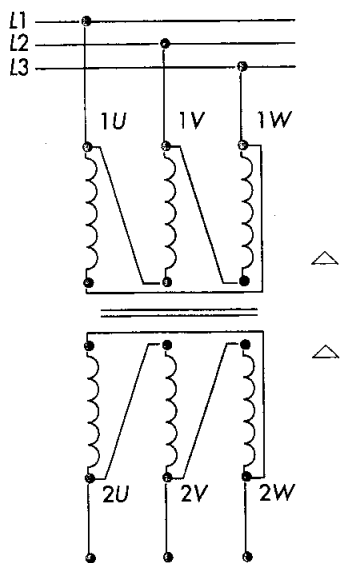


Fig. 2.16. Transformador trifásico triángulo-triángulo. «D-d».

### B. Estrella-estrella (Yy)

En esta conexión, tanto los bobinados primarios como los bobinados secundarios están conectados en estrella (Figura 2.17). Estas conexiones se representan indicando «Y» para la conexión del bobinado primario en estrella y «y» para la conexión del bobinado secundario, también en estrella.

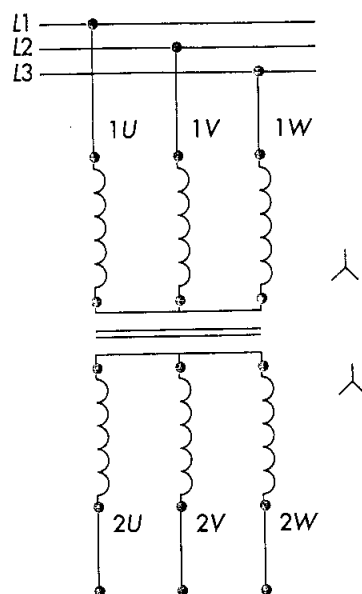


Fig. 2.17. Transformador trifásico estrella-estrella. «Y-y».

### C. Triángulo-estrella (Dy)

En esta conexión, los bobinados primarios están conectados en triángulo y los bobinados secundarios están conectados en estrella (Figura 2.18). Estas conexiones se representan indicando «D» para la conexión del bobinado primario en triángulo e «y» para la conexión del bobinado secundario en estrella.

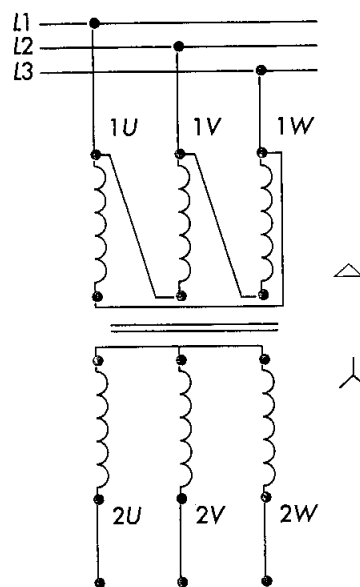


Fig. 2.18. Transformador trifásico triángulo-estrella. «D-y».

#### D. Estrella-triángulo (Yd)

En esta conexión, los bobinados primarios están conectados en estrella, y los bobinados secundarios, en triángulo (Figura 2.19). Estas conexiones se representan indicando «Y» para la conexión del bobinado primario en estrella y «d» para la conexión del bobinado secundario en triángulo.

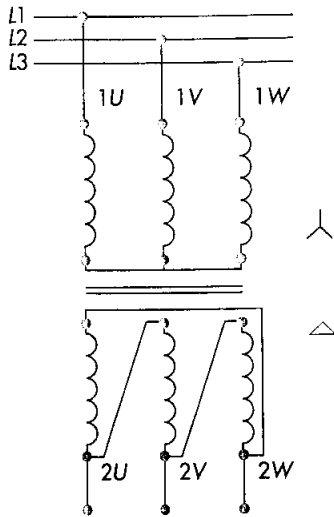


Fig. 2.19. Transformador trifásico estrella-triángulo. «Y-d».

#### E. Estrella-zigzag

En esta conexión, los bobinados primarios están conectados en estrella y los bobinados secundarios se consiguen descomponiendo cada uno de ellos en dos mitades, pasando a ser seis bobinas que se conectan como indica la Figura 2.20. Estas conexiones se representan indicando «Y» para la conexión del

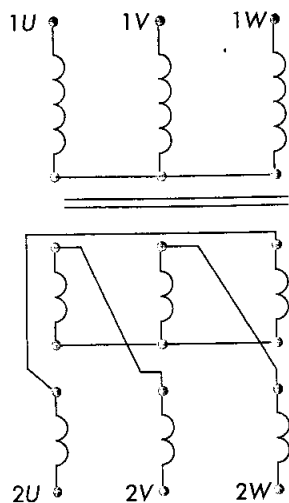


Fig. 2.20. Transformador trifásico estrella-zigzag. «Y-z».

bobinado primario en estrella y «z» para la conexión del bobinado secundario en zigzag.

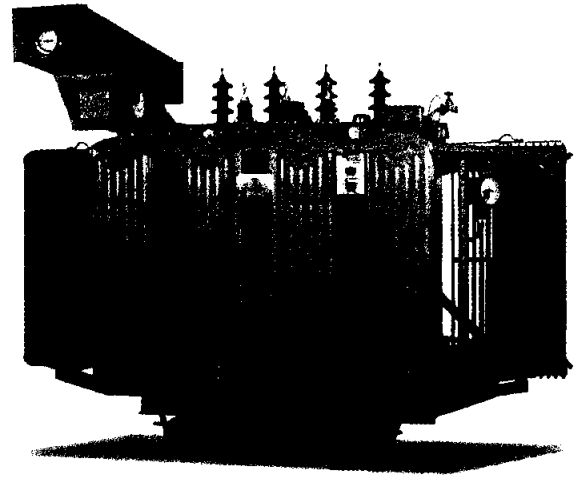


Fig. 2.21. Transformador trifásico de potencia.

La Tabla 2.2 agrupa diferentes conexiones de los transformadores trifásicos más utilizados, indicando conexión y relación de transformación correspondiente.

## 2.6 Transformadores de medidas

Los transformadores de medidas son aquellos que, por su particular construcción y su específica función, sólo se utilizan para modificar las características de algunas magnitudes eléctricas y adaptarlas a los aparatos de medidas convencionales. Consisten, principalmente, en **transformadores de intensidad** y **transformadores de tensión**.

Por seguridad, los bobinados secundarios de estos transformadores deberán estar conectados a tierra.

#### A. Transformador de intensidad

Son aparatos que se utilizan para reducir una elevada intensidad que recorre un circuito a una menor intensidad y, por lo tanto, con menor sección de los hilos. Esto nos facilita la manipulación de los conductores en las instalaciones y el correspondiente ahorro por la diferencia de sección del cable.

Una gran ventaja que tiene este transformador es que conseguimos utilizar amperímetros menos voluminosos que nos permiten colocarlos en espacios limitados, como pueden ser cuadros de protección, control, de automatismo, etc.

0	A1	Dd0					$\frac{n_1}{n_2}$
	A2	Yy0					$\frac{n_1}{n_2}$
	A3	Dz0					$\frac{2}{3} \times \frac{n_1}{n_2}$
6	B1	Dd6					$\frac{n_1}{n_2}$
	B2	Yy6					$\frac{n_1}{n_2}$
	B3	Dz6					$\frac{2}{3} \times \frac{n_1}{n_2}$
5	C1	Dy5					$\frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$
	C2	Yd5					$\sqrt{3} \times \frac{n_1}{n_2}$
	C3	Yz5					$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$
11	D1	Dy11					$\frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$
	D2	Yd11					$\sqrt{3} \times \frac{n_1}{n_2}$
	D3	Yz11					$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$

Tabla 2.2. Grupo de conexiones de los transformadores trifásicos más utilizados.

El transformador de intensidad no puede funcionar en vacío con el secundario a circuito abierto. Esto quiere decir que el secundario debe estar siempre conectado a un amperímetro o, en ausencia de éste, se debe cortocircuitar.

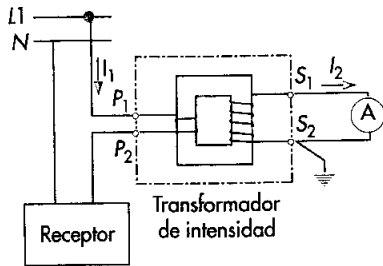


Fig. 2.22. Esquema del circuito eléctrico de un transformador de intensidad.

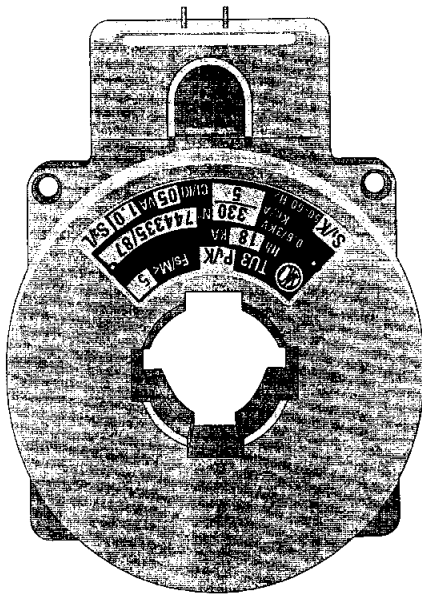


Fig. 2.23. Dibujo de un transformador de intensidad.

## B. Transformador de tensión

Son aparatos que se utilizan para reducir una elevada tensión eléctrica para poder, de esta manera, manipular la instalación a baja tensión y con menos riesgos.

Una gran ventaja que tiene este transformador es que, en función de la relación de transformación del mismo, se pueden instalar los aparatos de medidas en cualquier cuadro eléctrico, lo que evita tener que utilizar enormes voltímetros. Los transformadores de tensión tienen su estructura interna igual que el transformador monofásico de potencia.

Estos transformadores se utilizan en:

- Equipos de medidas de alta tensión, como voltímetros convencionales, contadores de energía, etc.
- En reducciones de tensiones en muy baja potencia, como equipos de radio, equipos de vídeo, equipos informáticos, etc.

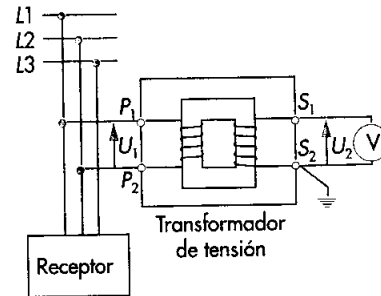


Fig. 2.24. Esquema del circuito eléctrico de un transformador de tensión.

El transformador de tensión, al contrario de lo que sucede con el de intensidad, sí puede funcionar en vacío, y, por tanto, su secundario nunca debe cortocircuitarse.

## 2.1 Transformadores especiales

Entre los transformadores especiales se encuentra el **transformador de seguridad**, que debe estar a prueba de cortocircuitos o ser relativamente resistente a ellos.

Los bobinados deberán estar separados entre sí mediante capas aislantes o columnas diferentes, para que no pueda producirse, en ningún caso, un contacto entre los bobinados primario y secundario.

Estos transformadores pueden suministrar hasta 42 voltios en el bobinado secundario, mientras que en la tensión de entrada al bobinado primario no puede superar los 500 voltios.

## 2.8 Transformadores de potencia

Se trata de un transformador que, además de realizar un cambio de valores en la tensión de salida con respecto a la tensión de entrada, debe soportar una determinada potencia, que será aquella que se demande en uno o varios puntos determinados de la red eléctrica.

Cuando se cita la potencia aparente ( $S$ ) de un transformador, su denominación se da en VA (voltio-amperios) o kVA (kilovoltio-amperios) cuando es múltiplo.

Los transformadores más usuales son los transformadores elevadores y los reductores.

### A. Transformador elevador

Si suministramos una tensión al bobinado primario de un transformador, en el secundario se producirá una elevación de tensión que irá en función a la relación de transformación que tenga el transformador.

Si un transformador tiene una relación de transformación de 1/100, quiere decir que cuando se le aplique un voltio de tensión al primario, por el secundario dispondremos de 100 voltios de tensión.

En un transformador elevador la relación de transformación será siempre menor que uno. Esto puede parecer confuso, pero si nos remitimos a la Fórmula 2.2, podemos comprobar cómo al ser la tensión del primario  $U_1$  menor que la tensión del secundario  $U_2$  (el numerador es menor que el denominador), el cociente resulta menor que 1; por lo tanto  $m < 1$ .

#### Fórmula 2.2

$$m = \frac{U_1}{U_2}$$

Donde:

$m$  = relación de transformación

$U_1$  = tensión del primario

$U_2$  = tensión del secundario

Siendo:

- $m < 1$  para transformadores elevadores.
- $m > 1$  para transformadores reductores.

### B. Transformador reductor

Si suministramos una tensión al bobinado primario del transformador, en el secundario se producirá una reducción de tensión que irá en función de la relación de transformación que tenga el transformador.

Si un transformador tiene una relación de transformación de 100/10, quiere decir que cuando la tensión de entrada en el primario es de 100 voltios, la tensión de salida en el secundario es de 10 voltios.

En un transformador reductor, la relación de transformación es siempre mayor que uno. Puesto que la tensión del bobinado primario  $U_1$  es mayor que la del secundario  $U_2$  (el numerador mayor que el denominador), el cociente resulta mayor que 1, por lo que en este caso  $m > 1$ .

### Recuerda

Un mismo transformador puede ser elevador y reductor, ya que su funcionamiento es reversible. Se puede alimentar por un bobinado o por otro, siempre respetando la tensión que corresponde a cada bobinado.

## 2.9 Transformadores de pequeña potencia

Un transformador de pequeña potencia está constituido por los elementos básicos que se citan a continuación:

#### • Elementos magnéticos:

- Núcleos.
- Columnas y culatas.

#### • Elementos eléctricos:

- Bobinado primario.
- Bobinado secundario.

#### • Elementos dieléctricos o aislantes:

- Aislamiento del núcleo magnético o carrete.
- Aislamiento entre capas.
- Aislamiento entre bobinados.
- Barnices.

### A. Circuito magnético

Consta de chapas ferromagnéticas de hierro-silicio en una proporción del 3 al 3,5%.

En la actualidad se han mejorado considerablemente las pérdidas en el hierro. Se utiliza casi exclusivamente hierro de grano orientado de 0,35 mm y de 0,5 mm de espesor, cuyas pérdidas oscilan entre 0,4 y 0,6 W/kg. Todas las cha-

pas magnéticas van aisladas a ambos lados por medio de barniz, para reducir las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault.

La construcción de los transformadores se realiza con núcleos magnéticos de columnas y acorazados. Los primeros se usan generalmente en grandes potencias, y están formados por dos o tres columnas según sean monofásicos o trifásicos con chapas, como la de la Figura 2.25a, para los transformadores de columnas monofásico, y 2.25b, para los transformadores trifásicos.

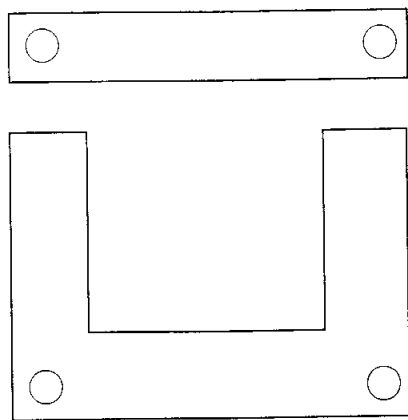


Fig. 2.25a. Chapa magnética para un transformador monofásico de columna.

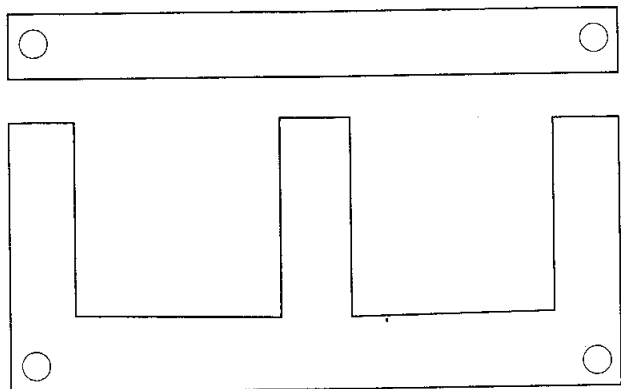


Fig. 2.25b. Chapa magnética para un transformador trifásico.

Los **núcleos acorazados** se utilizan generalmente en transformadores monofásicos de poca potencia, con chapas como la de la Figura 2.25c.

En esta figura se aprecia que la columna central es el doble de ancha que las columnas laterales. Recuerda que el flujo que recorre las columnas laterales converge en la columna central, que asume todo el flujo.

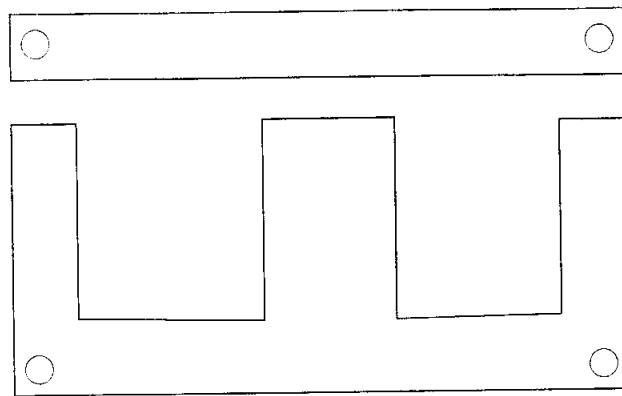


Fig. 2.25c. Chapa magnética para un transformador monofásico acorazado.

En la Figura 2.26 podemos ver algunos tipos de chapas normalizadas para los transformadores, tanto de columnas como acorazados. Las formas de chapas de la figura son los tipos M, E/I y U/I.

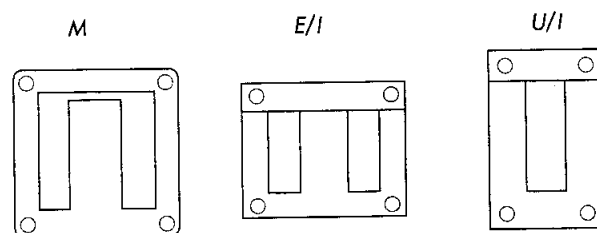


Fig. 2.26. Tipos de chapas normalizadas.

## B. Circuito eléctrico

El transformador se compone de dos circuitos eléctricos, uno primario, que va conectado a la red, y otro secundario, que va conectado al circuito de salida o carga.

Se denomina **bobinado de alta tensión** a aquel que trabaja a la tensión mayor, y **bobinado de baja tensión** al que trabaja a menor tensión, independientemente de si el transformador es elevador o reductor, y de si es primario o secundario.

El circuito eléctrico está constituido por hilo, generalmente de cobre, tipo recocado e industrial. El cobre recocado tiene grandes cualidades para ser aplicado en la construcción de los bobinados de los transformadores.

Su apariencia es la de un hilo cilíndrico de cobre, recubierto con un esmalte para los transformadores de pequeña y mediana potencia.

Se calcula y comercializa por el diámetro, a diferencia de los utilizados en las instalaciones eléctricas, que se calculan y comercializan por su sección.

El hilo esmaltado, como todos los materiales, está sometido a medidas normalizadas y comerciales. En la Tabla 2.3 podemos constatar los diámetros normalizados y comerciales existentes en el mercado.

También se emplea el aluminio, pero su uso es muy restringido debido a su menor conductividad con respecto al cobre; además, la sección del conductor de aluminio es mayor con respecto al cobre, por lo que la estructura será más voluminosa.

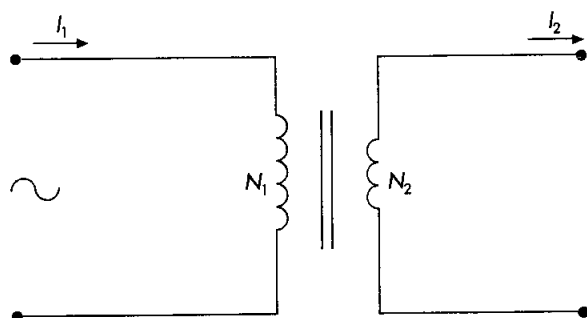


Fig. 2.27. Dibujo del circuito eléctrico de un transformador.

0,050	0,200	0,710	1,500
0,056	0,224	0,750	1,600
0,060	0,250	0,800	1,700
0,063	0,280	0,850	1,800
0,071	0,300	0,900	1,900
0,080	0,315	0,950	2,000
0,090	0,355	1,000	2,120
0,100	0,400	1,060	2,240
0,125	0,450	1,120	2,360
0,140	0,500	1,180	2,500
0,150	0,560	1,250	2,650
0,160	0,600	1,320	2,800
0,180	0,630	1,400	3,000

Tabla 2.3. Diámetros normalizados y comerciales de los hilos esmaltados.

## C. Aislantes y barnices

Los aislantes y barnices que se utilizan en la construcción de transformadores deben ser de materiales con muy buena rigidez dieléctrica, ya que tienen que soportar grandes diferencias de tensiones.

### Carrete

Los bobinados eléctricos se realizan sobre carretes confeccionados con material aislante, o aislando directamente el núcleo magnético enrollándole papel aislante.

Los carretes están destinados a soportar el bobinado eléctrico e insertar en él las chapas magnéticas. El carrete debe tener unos taladros en las solapas para que el principio y final de cada bobinado pueda tener su salida a la placa de bornes del transformador.

En la Figura 2.28 podemos comprobar el aspecto de un carrete aislante para el núcleo de un transformador.

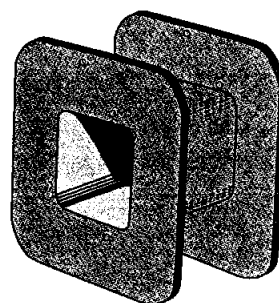


Fig. 2.28. Carrete aislante de un transformador.

### Barnices

Son aislantes líquidos viscosos, de materias resinosas naturales o artificiales disueltas en aceite, alcohol, etc.; al expandirse por el bobinado, se secan por evaporación, creando una cubierta resistente a la humedad y a los contactos con las carcasas de protección.

Las propiedades que debe tener un buen barniz, son: poder de penetración, elasticidad, resistencia al aceite, rigidez dieléctrica, resistencia al calor, higroscopicidad y secado uniforme.

### Entrecapas

Para aislar una capa de otra en el mismo bobinado, se coloca una fina capa de papel aislante, que puede ser de *presspan*, poliéster, etc., de un espesor muy fino. Este ais-



lamiento se coloca para evitar que las espiras se puedan poner en cortocircuito entre ellas y pueda alterar las características del transformador.

Separando los bobinados primarios y secundarios, se debe colocar una capa de papel aislante (*presspan*, poliéster). Este aislante debe tener un espesor adecuado y una rigidez dieléctrica suficiente como para soportar la diferencia de tensiones entre los bobinados.

### Tubos aislantes

Para el aislamiento del conductor y las conexiones, se utilizan unos tubos aislantes, que pueden ser de fibra de vidrio o de poliéster, con diámetros de diferentes medidas para cada uno de los arrollamientos. Estos tubos van colocados desde la última espira de cada uno de los conductores hasta la placa de bornes, protegiendo el conductor esmaltado y, al mismo tiempo, aislándolo de cualquier contacto que pudiera tener la parte metálica del transformador.

En la Figura 2.29 podemos ver los diferentes aislantes que se utilizan en la construcción y reparación de transformadores eléctricos de pequeña potencia.

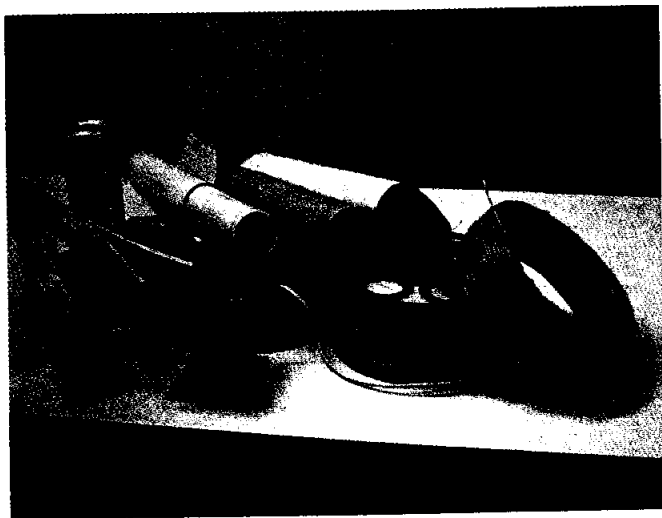


Fig. 2.29. Diferentes tipos de aislantes.

## 2.10 Autotransformadores

Se define el **autotransformador** como el transformador cuyos bobinados primarios y secundarios tienen partes comunes. El autotransformador sólo tiene un bobinado, que comparte sus espiras en proporción a las tensiones de entrada y salida.

Al no ser independientes los circuitos primario y secundario, se evita su utilización para reducir las altas tensiones de las líneas de transportes.

Los autotransformadores no se pueden utilizar como transformador de aislamiento o de separación de circuitos.

Si aplicamos una tensión en los extremos de un bobinado arrollado a un núcleo magnético, con un diámetro igual en todo el circuito, y extraemos una salida en el punto medio del bobinado, entre el principio y el punto medio, tendremos la mitad de la tensión aplicada en los dos extremos del bobinado.

Un autotransformador se consigue extrayendo una salida desde cualquier punto de un bobinado arrollado a un núcleo magnético y al principio de éste. Si aplicamos una tensión al principio y final del bobinado, obtendremos una tensión diferente entre el principio y el punto extraído, como podemos ver en la Figura 2.30.

#### • Ventajas:

- Menor tamaño.
- Menor coste.
- Mejor rendimiento.
- Mejor factor de potencia.
- Mejor regulación de tensión.

#### • Inconvenientes:

- Conexión común entre los circuitos de alta y baja tensión. No sirve como transformador de aislamiento ni de separación de circuitos.
- Más elevadas corrientes de cortocircuito.

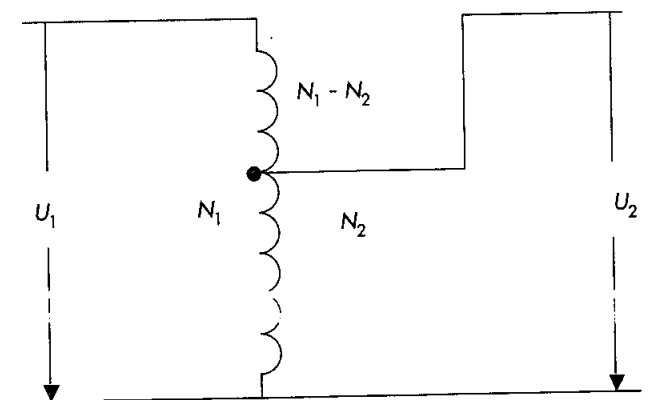


Fig. 2.30. Esquema eléctrico de un autotransformador.

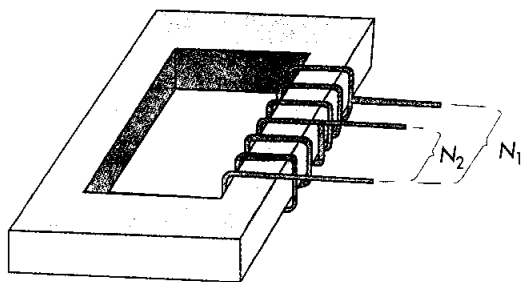


Fig. 2.31. Esquema eléctrico de un autotransformador montado en un núcleo magnético.

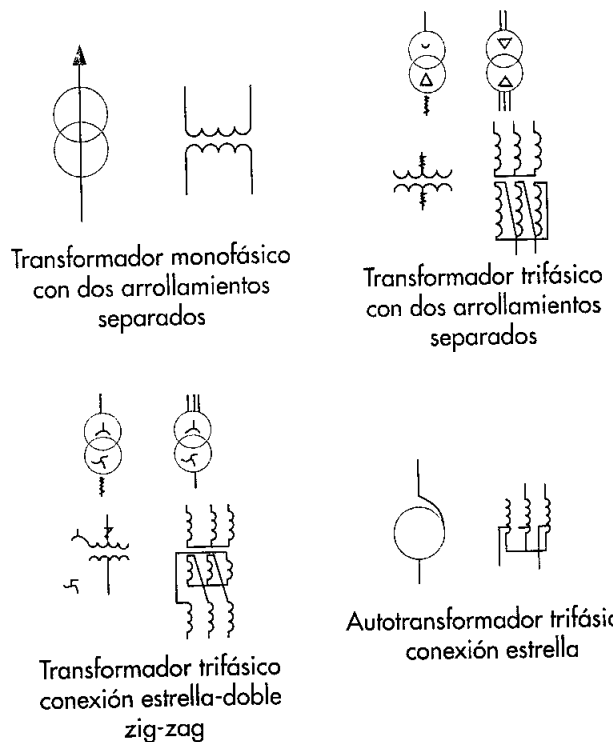


Fig. 2.32. Símbolos de transformador monofásico, trifásico y autotransformador en normas UNE.

## Simbología de los transformadores

En la representación de los transformadores, podemos recurrir a cualquiera de las normas establecidas a escala nacional e internacional, que están representadas en la Unidad 1 de este libro; para ello se deberá utilizar siempre la misma norma para un mismo proyecto. Los siguientes esquemas corresponden a la representación de los transformadores en norma UNE (norma española).

### Conceptos básicos

**Autotransformador:** transformador cuyos bobinados primarios y secundarios tienen partes comunes, un único bobinado que comparte sus espiras en proporción a las tensiones de entrada y salida.

**Banco trifásico:** montaje de tres transformadores monofásicos conectados cada uno a una fase de la red trifásica equilibrada. Este conjunto indica que un transformador trifásico tiene el mismo comportamiento electromagnético que un transformador monofásico.

**Circuito magnético:** sistema formado por chapas de material ferromagnético (generalmente, aleación de hierro-silicio), apiladas y aisladas entre ellas para reducir el flujo de dispersión.

**Transformador acorazado:** también llamado de circuito magnético doble, es el formado por dos culatas y tres columnas. La columna central tiene el doble de sección de hierro que las dos laterales, para soportar la totalidad del flujo de las columnas laterales.

**Transformadores de columnas:** sirven para trabajar con grandes potencias. También se utilizan para

equipos de soldadura eléctrica en ambientes húmedos y equipos de mucha seguridad.

**Transformador de medida:** es el que se emplea para alimentar aparatos de medidas (voltímetros, amperímetros, etc.) y aparatos de protección (relés, contadores, etc.), cuando los conductores pertenecen a redes de alta tensión o son recorridos por corrientes de elevada intensidad.

**Transformador eléctrico:** máquina estática que eleva o reduce los valores de una tensión ( $U$ ) y de una intensidad ( $I$ ) de entrada de una potencia dada ( $S$ ), devolviendo en la salida unos valores distintos sin modificar la frecuencia de las magnitudes aplicadas.

**Transformador elevador:** es el que en los bornes de salida suministra mayor tensión de la que recibe en los bornes de entrada, siendo la relación de transformación ( $m$ ) menor que 1.

**Transformador reductor:** es el que en los bornes de salida suministra menor tensión de la que recibe en los bornes de entrada, siendo la relación de transformación ( $m$ ) mayor que 1.

## Autoevaluación

1. Define qué es un transformador.
2. ¿Con qué tipo de corriente trabajan los transformadores eléctricos? Razona tu respuesta.
3. Clasifica los transformadores por su circuito magnético.
4. En un transformador acorazado, ¿la columna central debe tener la misma sección de núcleo que las laterales? Razona tu respuesta.
5. ¿De qué dos formas se pueden unir las columnas y las culatas?
6. ¿Cuándo se dice que un transformador es elevador? Demuéstralo mediante fórmula.
7. ¿Puede un mismo transformador funcionar como elevador y como reductor? Razona tu respuesta.
8. ¿A qué se le llama transformador de medidas?
9. Dibuja el esquema del circuito eléctrico de un transformador de intensidad.
10. Dibuja el esquema del circuito eléctrico de un transformador de tensión.
11. Cita los elementos que configuran un transformador.
12. ¿A qué se le llama circuito magnético?
13. Cita al menos dos tipos de chapas normalizadas.
14. ¿Qué materiales se emplean para la construcción de los circuitos magnéticos?
15. ¿Cuántos circuitos eléctricos componen un transformador?
16. ¿A qué se le llama bobinado de alta tensión de un transformador?
17. ¿Cuáles son los materiales que se emplean para la construcción de los circuitos eléctricos de los transformadores?
18. ¿Qué material se emplea generalmente para la construcción de los circuitos eléctricos de un transformador?
19. ¿El hilo esmaltado se comercializa y se calcula por la sección del conductor o por su diámetro?

20. Cita algunas ventajas e inconvenientes de los auto-transformadores.

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

### 21. Comprueba el tipo de transformador por su núcleo magnético.

#### • Objetivo:

- Observar e identificar el tipo de núcleos magnéticos.

#### • Medios didácticos:

- Transformador de pequeña potencia de núcleo acorazado.
- Transformador de pequeña potencia de núcleo de columnas.
- Destornilladores, llaves hexagonales fijas, alicates universales, martillo de fibra.
- Tornillo micrométrico o pálmer.

#### • Procedimiento:

- 1.º Desmontar la carcasa del transformador acorazado.
- 2.º Desconectar los bobinados de la placa de conexiones.
- 3.º Desmontar los tornillos de apriete de las chapas magnéticas.
- 4.º Desmontar las chapas magnéticas que están introducidas en el carrete de los bobinados.
- 5.º Verificar con el comprobador de continuidad el aislamiento de las chapas.
- 6.º Volver a montar el transformador.
- 7.º Repetir la práctica con un transformador de columnas.

#### • Contesta:

- a) Verifica el tipo de chapa.
- b) Mide el espesor de la chapa.
- c) Determina el número de chapas.
- d) Identifica cada una de las partes que componen un transformador.

- e) ¿Encuentras diferencias en los tipos de chapas de cada transformador?
- f) ¿Puedes comparar físicamente los tipos de chapas?
- g) ¿Sabías cómo estaban montados los transformadores?
- h) ¿Qué conclusiones sacas de los montajes de cada uno de los transformadores?

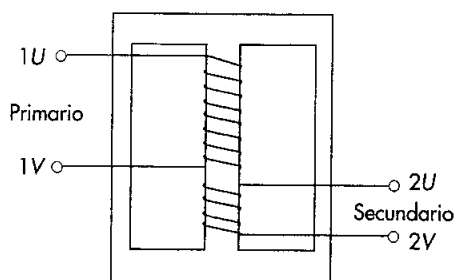


Fig. 2.33. Dibujo de un transformador acorazado.

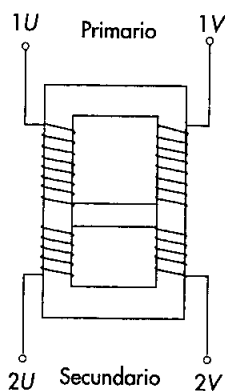


Fig. 2.34. Dibujo de un Transformador de columnas.

## 22. Observa la constitución y montaje de un transformador de intensidad.

### • Objetivos:

- Identificar un transformador de intensidad por la forma de su núcleo magnético.
- Observar la disposición del circuito primario.

### • Medios didácticos:

- Transformador de intensidad de barra pasante.
- Transformador de intensidad con primario bobinado.

— Destornillador, llaves hexagonales.

### • Procedimiento:

- 1.º Desconectar la placa de conexión en baja intensidad.
- 2.º Desatornillar o despegar las tapas del transformador.
- 3.º Verificar con el comprobador de continuidad el aislamiento de las chapas.
- 4.º Volver a montar el transformador.

### • Contesta:

- a) Verifica el montaje de los bobinados.
- b) Comprueba el tipo de núcleo magnético.
- c) Identifica cada una de las partes que componen un transformador de intensidad.
- d) ¿Qué diferencias encuentras entre el transformador de intensidad de barra pasante y el transformador de intensidad de primario bobinado?
- e) ¿Cómo están montados los transformadores?
- f) ¿Qué conclusiones sacas de los montajes de cada uno de los transformadores?

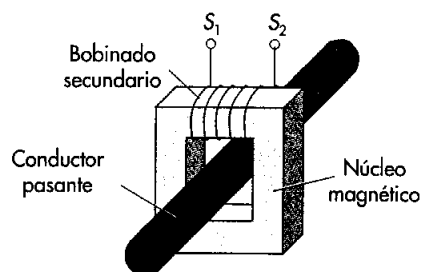


Fig. 2.35. Transformador de intensidad de barra pasante.

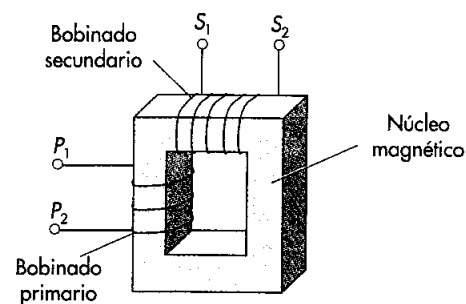


Fig. 2.36. Transformador de intensidad de primario bobinado.

### 23. Observa la constitución y montaje de un autotransformador.

#### • Objetivos:

- Identificar y dibujar las partes de que consta un autotransformador.
- Verificar las diferentes salidas del autotransformador.
- Comprobar los tipos de autotransformadores.

#### • Medios didácticos:

- Autotransformador de pequeña potencia.
- Autotransformador regulable de pequeña potencia.
- Llaves hexagonales, destornilladores y martillo de fibra.

#### • Procedimiento:

- 1.º Desmontar la carcasa del autotransformador.
- 2.º Desconectar los bobinados de la placa de conexiones.
- 3.º Desmontar los tornillos de apriete de las chapas magnéticas.
- 4.º Desmontar las chapas magnéticas introducidas en el carrete de los bobinados.
- 5.º Verificar, con el comprobador de continuidad, el aislamiento de las chapas.
- 6.º Observar y comprobar el funcionamiento del autotransformador regulable.

#### • Contesta:

- a) Verifica el montaje del bobinado.
- b) Determina el tipo de núcleo magnético.
- c) Comprueba las diferentes salidas del autotransformador.
- d) Identifica cada una de las partes que componen un autotransformador.
- e) ¿Qué diferencias encuentras entre un transformador de potencia y un autotransformador?
- f) ¿Sabías cómo estaban montados los autotransformadores?

g) Cita las ventajas y los inconvenientes de un autotransformador.

h) ¿Qué conclusiones sacas de los autotransformadores?

### 24. Identifica, en pequeños transformadores, el bobinado de mayor tensión y el de menor tensión por sus resistencias óhmicas.

#### • Objetivos:

- Identificar, mediante los valores de las resistencias de los bobinados, el de mayor y el de menor tensión.
- Identificar físicamente los diferentes bobinados en función de su tensión.

#### • Medios didácticos:


- Transformador de pequeña potencia de núcleo acorazado.
- Transformador de pequeña potencia de núcleo de columnas.
- Comprobador acústico de continuidad.
- Polímetro digital.
- Óhmetro o puente de resistencias.
- Pinzas de cocodrilo.

#### • Procedimiento:

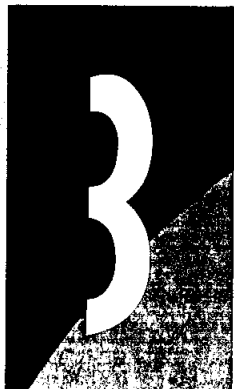
- 1.º Medir la resistencia óhmica de uno de los bobinados del transformador acorazado.
- 2.º Medir la resistencia óhmica del otro bobinado del transformador acorazado.
- 3.º Anotación de las mediciones.
- 4.º Realizar las mismas mediciones con un transformador de columnas.

#### • Contesta:

- a) Determina, teniendo en cuenta la resistencia óhmica, el bobinado de mayor y de menor tensión.
- b) Indica el número de chapas.
- c) ¿Puedes identificar físicamente el bobinado de mayor y de menor tensión? Explica por qué.
- d) ¿Qué conclusiones sacas de las diferentes resistencias de los bobinados de un transformador?



**Transformadores monofásicos  
de pequeña potencia**



## 3.1 Sistema de unidades de medida

Tradicionalmente, en el campo del electromagnetismo se ha venido utilizando el *sistema de unidades cegesimal (CGS)*. Este sistema reconoce como unidades básicas el **centímetro**, el **gramo** y el **segundo**; de ahí el nombre de **Sistema CeGeSimal**.

En el campo del electromagnetismo, y como unidades relacionadas con éste, tradicionalmente se han ido utilizando las unidades **Gauss**, para la inducción magnética, el **Maxwell**, como unidad de flujo magnético, y el **centímetro**, como unidad de longitud.

Sin embargo, en el año 1989 se aprobó en España (Real Decreto 1317/1989) otro sistema de medidas llamado **Sistema Internacional (SI)**.

Hay que decir a este respecto que pese a la implantación del Sistema Internacional, en el campo de las máquinas eléctricas muchos profesionales han seguido utilizando el viejo sistema de medidas.

Por ello, en la Tabla 3.1 se presentan las unidades relacionadas con el electromagnetismo y sus equivalencias.

### Recuerda

En los cálculos que se realicen en esta unidad y en las posteriores, se relacionarán los sistemas entre sí, para terminar utilizando el Sistema Internacional (SI).

Concepto	Sistema Internacional (SI)	Sistema cegesimal (CGS)	Equivalencias entre sistemas
Inducción magnética ( $\beta$ )	Tesla (T)	Gauss (G)	$1T = 10^4$ Gauss
Flujo magnético ( $\Phi$ )	Weber (Wb)	Maxwell ( $M_x$ )	$1Wb = 10^8$ Maxwell
Tensión eléctrica (U)	Voltio (V)	Voltio absoluto ( $V_{ab}$ )	$1V = 10^8 V_{ab}$
Intensidad eléctrica (I)	Amperio (A)	Amperio absoluto ( $A_{ab}$ )	$1A = 10^{-1} A_{ab}$
Longitud (L)	Metro (m)	Centímetro (cm)	$1m = 10^2$ cm

Tabla 3.1. Equivalencia de las unidades básicas utilizadas en magnetismo y electricidad.

## 3.2 Proceso de cálculo teórico de un transformador

Para proceder al cálculo de un transformador, debemos saber las necesidades que tenemos, es decir, debemos conocer la potencia que vamos a necesitar y la tensión a la que tenemos que conectar los receptores y la línea. Tendremos que empezar el cálculo conociendo la **potencia nominal** del transformador y las **tensiones de entrada** y de **salida** de éste.

### A. Potencia del transformador (S)

Se denomina **potencia del transformador** a la potencia que el transformador puede soportar en su **bobinado secundario**, ya que se ha construido teniendo en cuenta la carga que va a soportar en su bobinado de salida.



Fig. 3.1. Transformador de potencia (cortesía de La Eléctrica Utrerana).

En un transformador ideal, tanto el bobinado primario como el secundario soportan la misma potencia, lo que quiere decir que la potencia del primario ( $S_1$ ) y la del secundario ( $S_2$ ) son iguales; en este caso no se tienen en cuenta los diferentes tipos de potencias que se pierden.

### Fórmula 3.1

$$S_1 = S_2$$

La potencia del primario es igual a la tensión de éste por la intensidad del mismo:

### Fórmula 3.2

$$S_1 = U_1 \cdot I_1$$

Por la misma razón, la potencia del secundario será igual a la tensión de éste por la intensidad del mismo.

### Fórmula 3.3

$$S_2 = U_2 \cdot I_2$$

#### Caso práctico 1

Tenemos un transformador con una tensión en el primario de 220 V, y circula por éste una intensidad de 2,5 A.

El secundario dispone de una tensión de 48 V. ¿Cual será la intensidad que circula por éste?

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = 220 \cdot 2,5 = 550 \text{ VA}$$

Como el transformador ideal es  $S_1 = S_2$ , resulta que:

$$S_2 = 550 \text{ VA}$$

Si consideramos la Fórmula 3.2:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{550}{48} = 11,45 \text{ A}$$

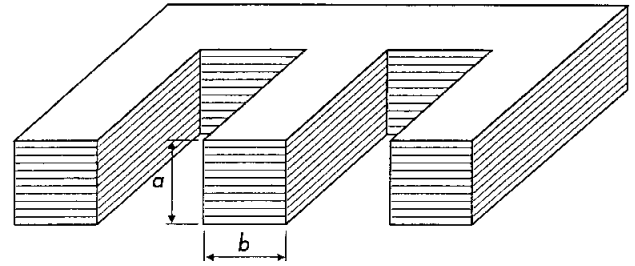


Fig. 3.2. Sección del núcleo de un transformador.

### Fórmula 3.4

$$A_n = L \cdot L$$

Donde:

$A_n$  = sección del núcleo

$L$  = lado del cuadrado del núcleo magnético

Partiendo de estos datos, procederemos al cálculo de la sección de núcleo magnético donde deberán alojarse los bobinados.

#### Caso práctico 2

Si tenemos un transformador con un núcleo magnético de tipo cuadrado, de 8 cm de lado, la sección del núcleo será:

$$A_n = L \cdot L = 8 \cdot 8 = 64 \text{ cm}^2$$

En la actualidad se ha mejorado bastante el rendimiento de las chapas magnéticas, por lo que los transformadores se construyen casi exclusivamente de **chapa de grano orientado**. Ésta es una chapa que tiene una **pérdida de potencia mínima**, de entre 0,4 y 0,6 W/kg, lo que hace casi inapreciables las pérdidas en el hierro.

Por lo tanto la sección del núcleo magnético de un transformador **acorazado**, se calculará empleando la siguiente fórmula:

### B. Sección del núcleo ( $A_n$ )

La **sección del núcleo** corresponde al área ( $A_n$ ) transversal que tiene el núcleo magnético, en la cual va ubicado el bobinado.

Es importante señalar que la sección del núcleo está directamente relacionada con la **potencia** del transformador.

De hecho, cuanto mayor sea la potencia del transformador, mayor será la sección requerida en el núcleo magnético; por lo tanto, la sección del núcleo magnético está en función de la potencia del transformador.

Podemos calcular la potencia del transformador conociendo la **sección geométrica del núcleo**, que es la que hallamos a través del cálculo del área del propio núcleo, lo que podemos conseguir midiendo los lados del mismo, como indica la Figura 3.2.

Una manera rápida para la medición de la sección del núcleo es hacerlo a través del interior del carrete aislante donde van alojados los bobinados, ya que dicho carrete deberá estar completamente relleno de chapas magnéticas.



### Fórmula 3.5

$$A_n \approx \sqrt{S_2}$$

Donde:

$A_n$  = sección del núcleo en  $\text{cm}^2$

$S_2$  = potencia del bobinado secundario en VA

Esta expresión indica que la sección del núcleo es la raíz cuadrada de la potencia del transformador en centímetros cuadrados ( $\text{cm}^2$ ), despreciando las pérdidas.

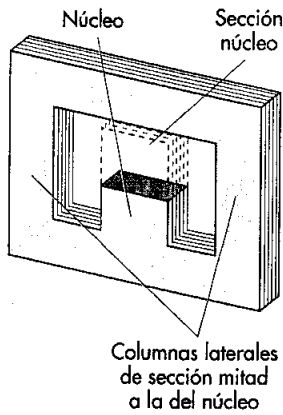


Fig. 3.3. Sección de un núcleo acorazado.

La sección del núcleo de un transformador **sin acorazar** o de dos columnas se calculará mediante la Fórmula 3.6, que dice que la sección del núcleo es la raíz cuadrada de la mitad de la potencia del transformador.

### Fórmula 3.6

$$A_n = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{S_2} \text{ cm}^2$$

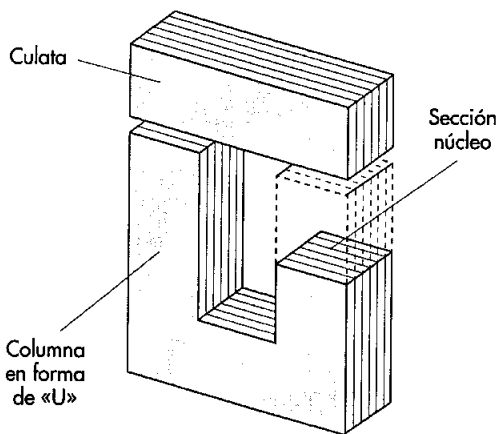


Fig. 3.4. Sección del núcleo de un transformador de columnas.

### C. Número de chapas

En función de la sección del núcleo, el ancho y el espesor de la chapa, se calculará el **número de chapas** de que constará el núcleo magnético.

### Fórmula 3.7

$$\text{N.º de chapas} = 10 \times \frac{A_n}{a \cdot \Delta}$$

Donde:

$A_n$  = sección del núcleo en  $\text{cm}^2$

$a$  = ancho de chapa en cm

$\Delta$  = espesor de la chapa en mm

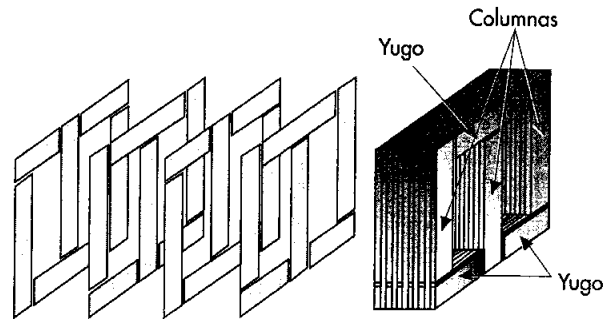


Fig. 3.5. Chapas magnéticas de un transformador.

### Caso práctico 3

Si tenemos la sección de un núcleo acorazado de  $16 \text{ cm}^2$ , la anchura de la chapa es de 4 cm y el espesor de 0,5 mm, el número de chapas del núcleo se calculará de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{N.º de chapas} &= 10 \times \frac{A_n}{a \cdot \Delta} = \\ &= 10 \times \frac{16}{4 \cdot 0,5} = 80 \text{ chapas} \end{aligned}$$

### D. Montaje de los bobinados

Los **bobinados** son espiras arrolladas al núcleo que crean un campo magnético que está en función del número de espiras.

Los bobinados se construyen sobre un **carrete aislante**, con un hueco central para que se puedan introducir las chapas

que conforman el núcleo magnético del transformador, como se puede ver en la Figura 3.6. Para el montaje de los bobinados, colocamos un **taco** de madera con un taladro que nos permita introducirlo y sujetarlo en el eje de la bobinadora.

El taco evita que el tensado del hilo, al arrollarlo, presione el carrete y se pueda producir un hundimiento en el mismo, impidiendo que puedan colocarse la totalidad de las chapas magnéticas que necesita el transformador.

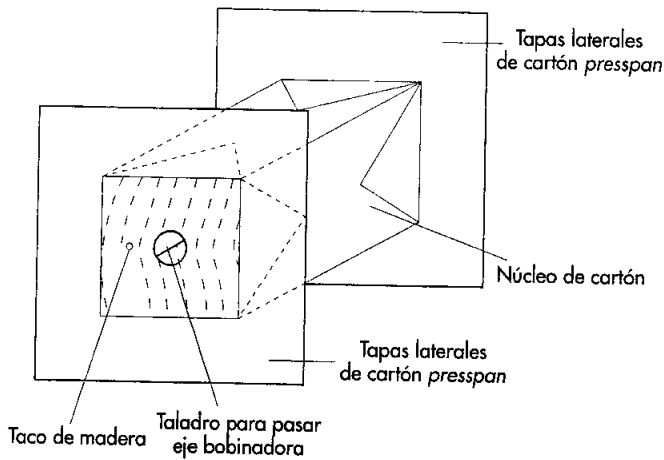


Fig. 3.6. Carrete con taco de madera taladrado.

Las **bobinas** se construyen con hilo de **cobre esmaltado** de sección circular; excepcionalmente, con hilo de aluminio esmaltado (véase la Figura 3.7).

El **esmalte** o **barniz** de los hilos de bobinar tiene la función de aislar las espiras entre sí y soportar altas temperaturas, como consecuencia del calentamiento que se produce en los transformadores debido a las pérdidas, como veremos más adelante.

El **calentamiento** de los bobinados de un transformador, según las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional, no debe exceder de 65 °C de la temperatura del aire ambiente, que deberá ser, como máximo, de 40 °C.

En cuanto a las **conexiones** entre hilos esmaltados o hilos de bobinar, debe retirarse el barniz (pelar) antes de cualquier conexión, ya que si no le quitamos el esmalte, no tendremos continuidad en el circuito, motivado por la mala conexión.

En el **montaje** de los bobinados, unas capas van separadas de otras por un papel aislante para mejorar el aislamiento y aumentar la rigidez dieléctrica entre espiras. Este papel puede ser de **presspan** o poliéster.

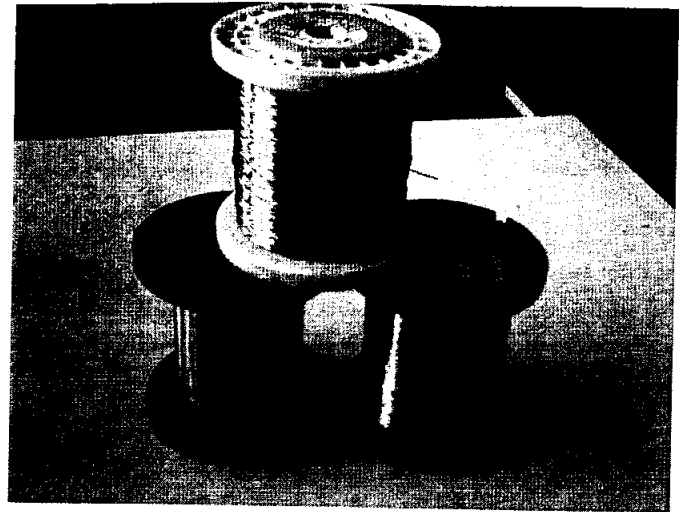


Fig. 3.7. Hilo de cobre esmaltado.

Los bobinados primarios y secundarios se montan de modo que queden uno encima del otro. El bobinado que se debe colocar más cerca del núcleo es el de menor tensión, por dos razones:

- Al ser la tensión menor, la sección del hilo es mayor, por lo que la robustez y la fuerza del ajuste al núcleo del hilo nos dan mayor resistencia mecánica.
- Al ser menor la tensión del bobinado más cercano al núcleo, la rigidez dieléctrica del aislante del núcleo soportará mejor la tensión más baja que la más alta.

### 3.1. E. Relación de transformación

En un transformador ideal (con pérdida igual a cero y rendimiento del 100%) se verifica que:

$$\text{Energía de entrada} = \text{Energía de salida}$$

Como la potencia es la energía en la unidad de tiempo, en un transformador la potencia del bobinado primario es igual que la del bobinado secundario, como se indica en la Fórmula 3.1, donde  $S_1 = S_2$ .

Si el transformador es **monofásico**, y resolvemos la potencia como el producto de la tensión por la intensidad, en la igualdad anterior, podemos afirmar que el producto de la tensión del primario por la intensidad del primario es igual al producto de la tensión del secundario por la intensidad del secundario, expresión recogida en la siguiente fórmula:

### Fórmula 3.8

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

Y si es trifásico, habrá que añadirle  $\sqrt{3}$  a cada uno de los términos, como se indica a continuación:

**Fórmula 3.9**

$$\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2$$

En ambos casos podemos deducir que el cociente de las tensiones del primario y secundario será igual al cociente que resulta entre las intensidades secundaria y primaria, respectivamente, tal y como se muestra en la fórmula 3.10

**Fórmula 3.10**

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Los valores de las fuerzas electromotrices primaria ( $E_1$ ) y secundaria ( $E_2$ ) corresponden a las tensiones inducidas en los respectivos bobinados, es decir,  $E_1 = U_1$  y  $E_2 = U_2$ .

Como se ha expuesto anteriormente, el sistema de unidades que utilizaremos será el Sistema Internacional de unidades de medidas (SI), por lo que si representamos con el símbolo «E» a la fuerza electromotriz en este sistema, ésta será la indicada por las fórmulas 3.11 y 3.12, respectivamente.

**Fórmula 3.11**

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{max}$$

Por lo tanto:

**Fórmula 3.12**

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_{max}$$

Donde:

$N_1$  = número de espiras del bobinado primario

$N_2$  = número de espiras del bobinado secundario

$f$  = frecuencia de la corriente alterna en Hz

$\phi_{max}$  = valor máximo del flujo en Weber

No obstante, las siguientes definiciones nos van a servir para aclarar someramente los fundamentos en que se basa el circuito magnético.

El **flujo magnético** es el número total de líneas de fuerza que existen en un circuito magnético; se representa con

la letra griega  $\phi$ , que se lee «fi», y su unidad es el Weber ( $W_b$ ). En el sistema CGS es el Maxwell ( $M_x$ ).

La **inducción magnética** es la cantidad de líneas de fuerza en la misma dirección que atraviesa una unidad de superficie; se representa con la letra griega  $\beta$ , que se lee «beta», y su unidad es el Tesla (T). En el sistema CGS, es el Gauss (G).

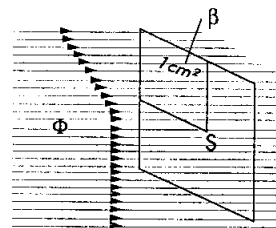


Fig. 3.8. Relación entre el flujo y la inducción.

La inducción magnética se representará por:

**Fórmula 3.13**

$$\beta_{max} = \frac{\phi_{max}}{A_n}$$

Donde:

$\beta_{max}$  = valor máximo de la inducción en T

$\phi_{max}$  = valor máximo del flujo magnético en  $W_b$

$A_n$  = sección del núcleo en  $m^2$

Si se dividen miembro a miembro las ecuaciones según las Fórmulas 3.12 y 3.13, obtenemos la siguiente fórmula:

**Fórmula 3.14**

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

También se puede expresar como:

**Fórmula 3.15**

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Según la Fórmula 3.10 y la Fórmula 3.14, vemos que la relación de transformación se puede obtener así:

**Fórmula 3.16**

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

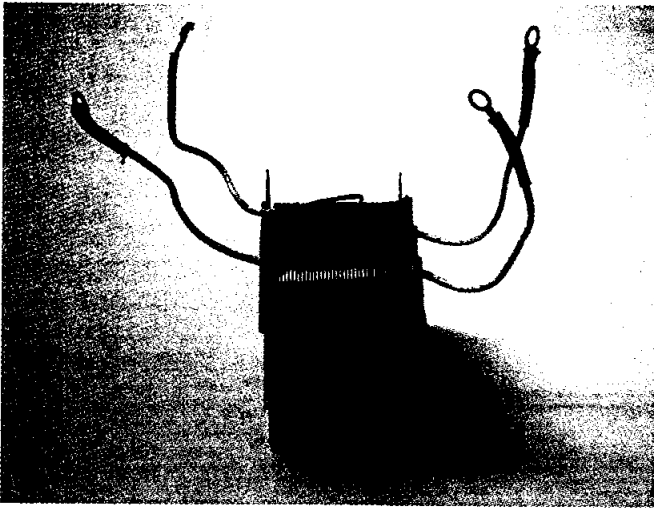


Fig. 3.9. Carrete de transformador bobinado.

### Caso práctico 4

El primario de un transformador tiene 1 820 espiras para una tensión de entrada de 220 V. ¿Cuál será la tensión en el secundario en vacío si éste tiene 550 espiras?

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1820}{550} = \frac{220}{U_2}$$

Despejando  $U_2$ , resultará:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 220 \cdot \frac{550}{1820} = 66\text{V}$$

### F. Número de espiras (N)

Para realizar el cálculo del número de espiras de cada uno de los bobinados, tendremos que recurrir a despejar  $N_1$  y  $N_2$  en las Fórmulas 3.11 y 3.12, respectivamente, es decir:

$$N_1 = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot \phi_{max}}$$

Por lo tanto:

$$N_2 = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot \phi_{max}}$$

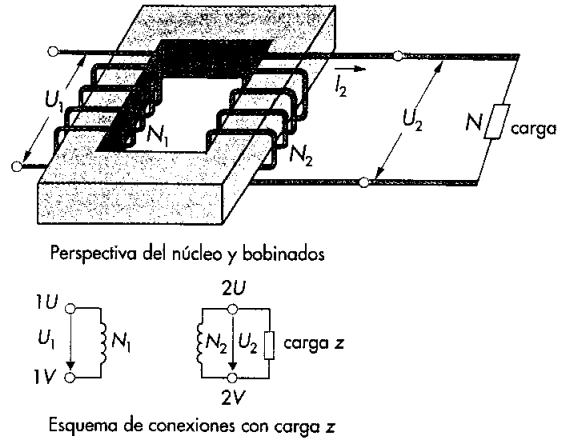


Fig. 3.10. Transformador de columnas con dos bobinados.

### G. Espiras por voltio (N/V)

Si partimos de la Fórmula 3.14 y despejamos  $N/E$ , llegamos a la conclusión de que **espiras por voltio** es el resultado de dividir el número de espiras del bobinado por la tensión; por lo tanto:

#### Fórmula 3.17

$$\text{Espiras por voltio} = \frac{N}{U}$$

$$\frac{N_1}{U_1} = \frac{N_2}{U_2} = \frac{1}{4,44 \cdot \phi_{max} \cdot f}$$

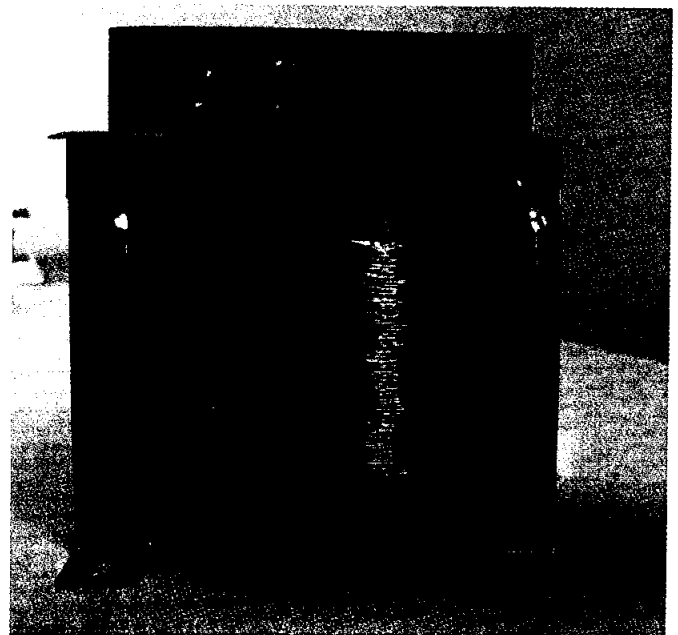


Fig. 3.11. Transformador acorazado con los dos bobinados.

## Caso práctico 5

Tenemos un transformador de 10 kVA a 50 Hz de frecuencia, con una tensión de 1 000 V en el primario y 220 V en el secundario.

Calculamos la sección del núcleo aplicando la Fórmula 3.5 y obtenemos:

$$A_n \approx \sqrt{S_2} = \sqrt{10000} = 100 \text{ cm}^2$$

A la chapa del transformador le corresponde una inducción de 12 000 Gauss (1,2 T), por lo que el valor del flujo máximo será:

$$\begin{aligned} \phi_{\max} &= A_n \cdot \beta_{\max} = 100 \cdot 12000 = \\ &= 12 \cdot 10^5 \text{ maxvelios } (1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}) \end{aligned}$$

Por lo tanto el valor las espiras por voltio será:

$$\begin{aligned} \frac{N}{V} &= \frac{10^8}{4,44 \cdot \phi_{\max} \cdot f} = \frac{10^8}{4,44 \cdot 12 \cdot 10^5 \cdot 50} = \\ &= 0,3753 \text{ espiras por V} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que  $\frac{N}{V} = \frac{N_1}{U_1}$

Despejando las espiras ( $N$ ) de cada uno de los bobinados será:

$$N_1 = \frac{N}{V} \cdot U_1 = 1000 \cdot 0,3753 = 375 \text{ espiras}$$

$$N_2 = \frac{N}{V} \cdot U_2 = 220 \cdot 0,3753 = 83 \text{ espiras}$$

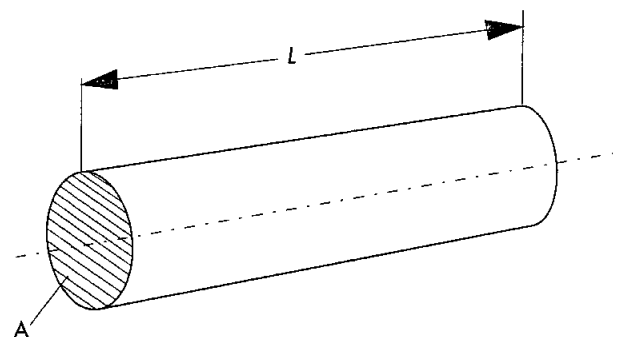
$$I_2 = \frac{S}{U_2}$$

Esto nos proporciona el cálculo de las intensidades de ambos bobinados.

### 1. Sección de los conductores eléctricos ( $S_{cu}$ )

Como se ha expuesto anteriormente, el conductor utilizado en los bobinados eléctricos se comercializa según su diámetro, pero su cálculo se puede hacer teniendo en cuenta el diámetro o la **sección** del conductor.

Para calcular la sección del conductor, deberemos tener en cuenta la relación que hay entre la intensidad y la densidad de la corriente ( $\delta$  en  $\text{mm}^2$ ) con respecto a cada conductor. Para ello vamos a utilizar la Tabla 3.2, que relaciona la densidad de corriente con la potencia del transformador.



$L$  = longitud del conductor  
 $A$  = área o sección transversal

Fig. 3.12. Sección de un conductor.

### Fórmula 3.18

$$S_{cu} = \frac{I}{\delta} \text{ en mm}^2$$

Donde:

$S_{cu}$  = sección del conductor de cobre en  $\text{mm}^2$

$I$  = intensidad de corriente en A

$\delta$  = densidad de corriente eléctrica en  $\text{A/mm}^2$

### 1. H. Intensidad de los circuitos eléctricos

Conociendo la potencia nominal del transformador, la Fórmula 3.2 expone que la potencia del primario es igual a la tensión de éste por la intensidad del mismo, y que la potencia del secundario es igual a la tensión de éste por la intensidad del mismo.

Podemos despejar la intensidad del primario en función de la del secundario, exponiendo lo siguiente:

$$I_1 = \frac{S}{U_1}$$

Potencia (VA)	Densidad máxima de los conductores (mm <sup>2</sup> /VA)
De 10 a 50 VA	4
De 51 a 100 VA	3,5
De 101 a 200 VA	3
De 201 a 500 VA	2,5
De 501 a 1 000 VA	2
De 1 001 a 2 500 VA	1,5
De 2 501 a 10 000 VA	1,2
A partir de 10 000 VA	0,75

Tabla 3.2. Densidad máxima de los conductores en relación con la potencia.

### Caso práctico 6

Tenemos un transformador con una potencia en el secundario de 550 VA, con tensiones de 250 V y 150 V en el primario y secundario, respectivamente. Queremos saber qué diámetro de hilo será necesario para los devanados primario y secundario.

Si la potencia es  $S = U \cdot I$  para los dos bobinados, despejando la intensidad tenemos:

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{550}{220} = 2,5 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{S}{U_2} = \frac{550}{125} = 4,4 \text{ A}$$

Atendiendo a la Fórmula 21 y aplicando la densidad de corriente que le corresponde a 550 VA de potencia obtenemos:

$$S_{cu1} = \frac{I_1}{\delta} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \text{ mm}^2$$

$$S_{cu2} = \frac{I_2}{\delta} = \frac{4,4}{2} = 2,2 \text{ mm}^2$$

### Caso práctico 6 (continuación)

Para calcular el diámetro utilizaremos la fórmula del área del círculo es decir:

$$A = \pi \cdot r^2$$

Que en función del diámetro es:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

Por eso, siendo:

$$\frac{\pi}{4} = 0,785$$

$$A = 0,785 \cdot d^2$$

$$d = \sqrt{\frac{A}{0,785}}$$

Si despejamos el diámetro ( $d$ ) del primario, obtendremos la siguiente expresión:

$$d_1 = \sqrt{\frac{S_{cu1}}{0,785}} = \sqrt{\frac{1,25}{0,785}} = 1,26 \text{ mm}$$

El diámetro del secundario será:

$$d_2 = \sqrt{\frac{S_{cu2}}{0,785}} = \sqrt{\frac{2,2}{0,785}} = 1,67 \text{ mm}$$

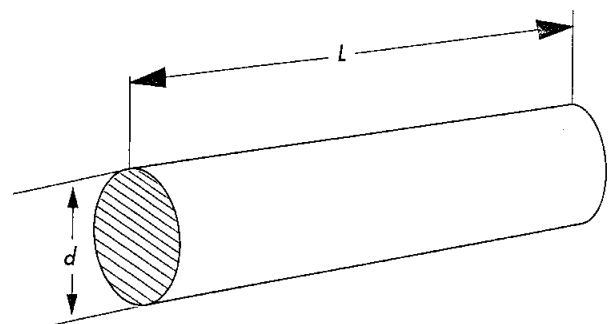


Fig. 3.13. Diámetro del conductor.

## Caso práctico 7

Necesitamos un transformador para alimentar un circuito que deberá soportar una intensidad en la salida de 5 amperios.

La tensión que tenemos en la red es de 220 V y la tensión del circuito que debemos abastecer es de 24 V.

La inducción magnética de la chapa que vamos a utilizar es de 11 000 Gauss = 1,1 Tesla.

Conociendo los datos del transformador, los pasos que seguiremos para el cálculo serán los siguientes:

### Potencia del secundario

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 = 24 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 120 \text{ VA}$$

### Sección del núcleo

$$A_n = \sqrt{S_2} = \sqrt{120} = 10,95 \text{ cm}^2 = 10,95 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

### Flujo magnético máximo $\Phi_{max}$

$$\begin{aligned} \Phi_{max} &= \beta_{max} \cdot A_n = 11\,000 \cdot 10,95 = \\ &= 120\,450 \text{ Maxvelios} = 12,045 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

### Número de espiras del primario

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{max}} = \frac{220 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 120\,450} = \\ &= 823 \text{ espiras} \end{aligned}$$

### Número de espiras del secundario

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{U_2 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{max}} = \frac{24 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{max}} \\ &= \frac{24 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 120\,450} = 90 \text{ espiras} \end{aligned}$$

### Intensidad del primario

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{120}{220} = 0,545 \text{ A}$$

### Densidad en función de la Tabla 3.2

Densidad para la potencia de 120 VA:

$$\delta = 3 \text{ A/mm}^2$$

### Sección del conductor del bobinado primario

$$S_{cu1} = \frac{I_1}{\delta} = \frac{0,545}{3} = 0,181 \text{ mm}^2$$

### Sección del conductor del bobinado secundario

$$S_{cu2} = \frac{I_2}{\delta} = \frac{5}{3} = 1,666 \text{ mm}^2$$

### Diámetro del bobinado primario ( $d_1$ )

$$d_1 = \sqrt{\frac{S_{cu1}}{0,785}} = \sqrt{\frac{0,181}{0,785}} = 0,48 \text{ mm}$$

(Una vez obtenido el valor del diámetro, hay que recurrir a una aproximación, ya que, en este caso, el diámetro que se encuentra en comercio es de 0,50 mm.)

### Diámetro del bobinado secundario ( $d_2$ )

$$d_2 = \sqrt{\frac{S_{cu2}}{0,785}} = \sqrt{\frac{1,67}{0,785}} = 1,45 \text{ mm}$$

(El diámetro que se puede encontrar comercializado es de 1,50 mm.)

Con el cálculo del transformador realizado podemos comenzar el montaje del transformador, siguiendo los pasos que a continuación se citan:

- 1.º Construir o adquirir el carrete para alojar el núcleo magnético en su interior.

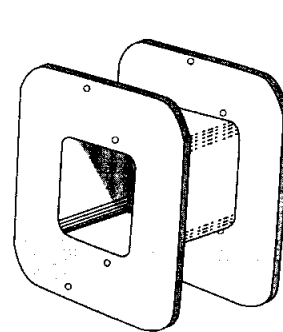


Fig. 3.14. Carrete para transformador.

- 2.º Colocar el taco de madera en el interior del carrete para cogerlo con la bobinadora.

Caso práctico 7 (continuación)

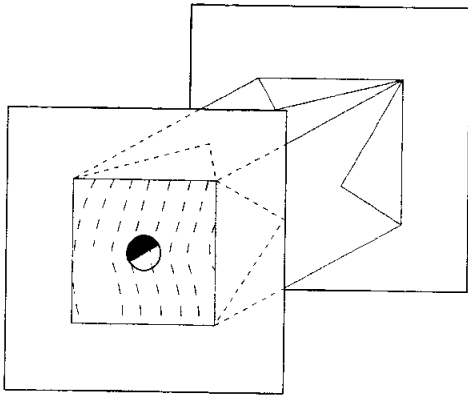


Fig. 3.15. Carrete con taco de madera.

- 3.º Montar el carrete en la bobinadora con hilo en la devanadora.
- 4.º Montar el primario capa por capa; éstas deben aislarse entre sí por medio de una lámina fina de papel de poliéster. Las espiras de cada capa deben ir ordenadas o peinadas para que ocupen el menor espacio posible.
- 5.º Una vez terminado el bobinado primario, ha de envolverse con una capa de papel *presspan* de un espesor en función de la suma de tensiones. Cuanto mayor sea la suma de tensiones entre los dos bobinados, mayor espesor deberá tener el papel aislante para soportar la rigidez dieléctrica.

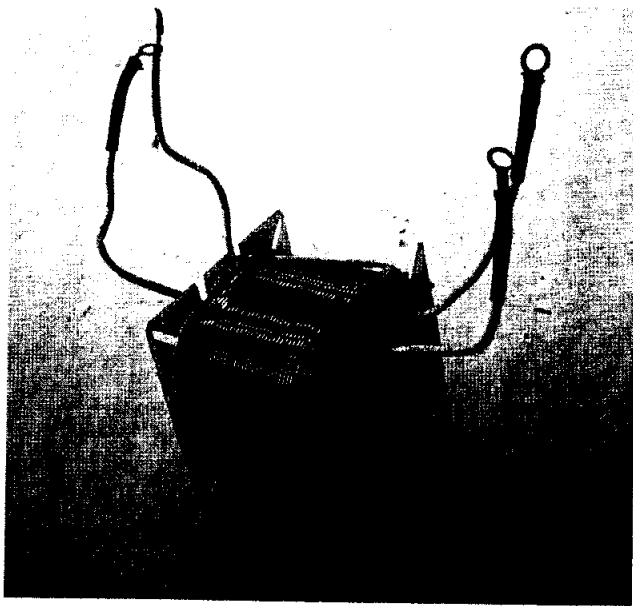


Fig. 3.16. Carrete con bobinados primario y secundario.

- 6.º Montar el bobinado secundario y envolverlo de nuevo con papel *presspan*; después, sacar las puntas aisladas con macarrón aislante de fibra de vidrio para llevar a la placa de conexiones.
- 7.º Comprobar la continuidad de cada bobinado.

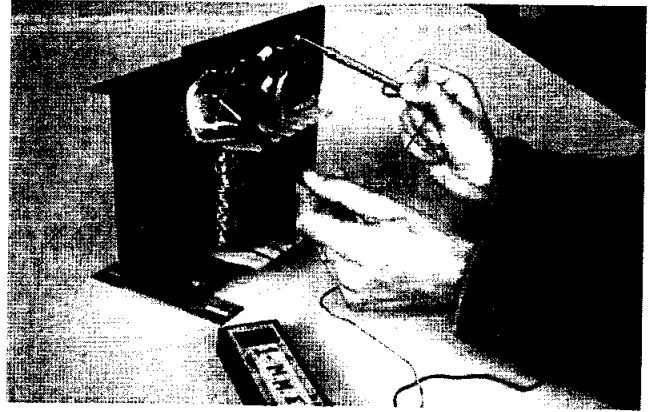


Fig. 3.17. Prueba de continuidad.

- 8.º Montar las chapas magnéticas y prensarlas con los tornillos de cada esquina. Estos tornillos deberán aislarse cuando se introduzcan en los taladros de las chapas.

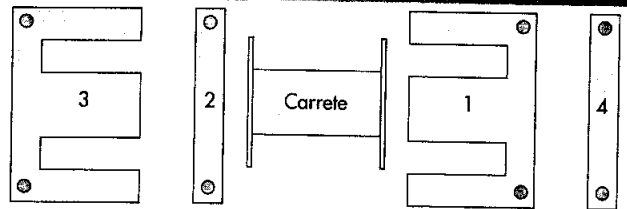
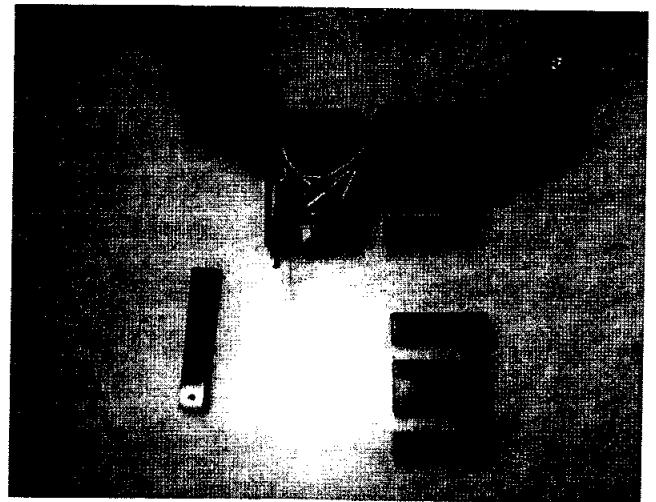


Fig. 3.18. Proceso de montaje de chapas. Esquema.



- 9.º Colocar las conexiones.
- 10.º Comprobar de nuevo la continuidad de los bobinados, por si al introducir las chapas éstas han podido perforar el carrete aislante y cortar los hilos.
- 11.º Una vez realizados todos los ensayos pertinentes, se procede al barnizado, impregnando todo el bobinado, y posteriormente al secado.

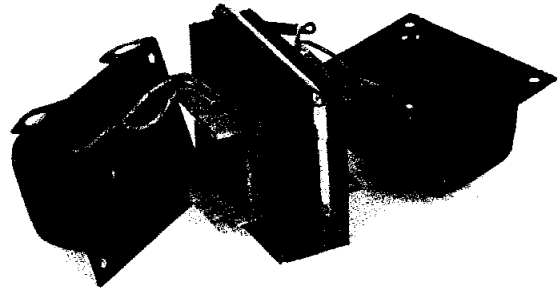


Fig. 3.19. Transformador terminado.

### 3.3 Cálculo de un transformador de pequeña potencia por ábacos

Un procedimiento rápido y bastante fiable para la construcción de transformadores de hasta 3 000 VA aproximadamente es el que se realiza mediante **tablas gráficas** o **ábacos**.

Un ábaco es una tabla de cálculo que nos permite ahorrar tiempo en los cálculos necesarios para la construcción de un transformador. Existen tres tipos de ábacos:

- Ábaco para el cálculo de la sección del núcleo.
- Ábaco para el cálculo de las espiras por voltio.
- Ábaco para el cálculo del diámetro del hilo.

Relacionando unos datos con otros podemos realizar todos los cálculos necesarios sin utilizar ninguna fórmula y proceder a su construcción tal y como se ha expuesto en las páginas anteriores. También se puede realizar el cálculo combinando fórmulas con ábacos. Ésta es la forma más usual de utilizarlos, ya que muchos datos del transformador se pueden calcular sin ninguna complicación.

Para ver su uso, vamos a realizar un ejemplo de cálculo de un transformador combinando fórmulas y ábacos.

En las páginas 58, 59 y 60 se reproducen los tres ábacos necesarios para el cálculo.

#### 1. A. Uso del ábaco

Supongamos que necesitamos un transformador con las siguientes características:

- 120 VA de potencia.
- Alimentación de red: 220 V con una frecuencia de 50 Hz.
- Tensión de salida: 100 V.

El cálculo del transformador se puede realizar por ábacos tanto con núcleo acorazado como con núcleo de columnas.

En nuestro caso, los cálculos que vamos a realizar se corresponderán a los necesarios para la realización de un transformador de núcleo acorazado, porque, como vimos anteriormente, los transformadores acorazados son los más rentables para las potencias pequeñas.  $\text{z}$

#### Sección del núcleo

Con los datos que tenemos, y utilizando el **Ábaco I**, que relaciona la potencia del transformador con la sección del núcleo, podemos obtener el resultado de la **sección del núcleo**.

Sobre el Ábaco I se observa que en el eje vertical (de coordenadas) izquierdo se encuentran los valores de las potencias en VA. En la primera línea horizontal (eje de las abscisas) se encuentran los valores de la sección del núcleo.

Trazamos una línea horizontal desde el valor de 120 VA de la columna de la potencia que coincida con la diagonal de la frecuencia de 50 Hz. En ese punto de intersección, trazamos

una línea vertical y hacia abajo, que, a su vez, hará intersección con el eje de las abscisas, donde aparecen los valores de la sección del núcleo. El punto de corte coincidirá con el valor de la sección del núcleo en centímetros cuadrados (cm<sup>2</sup>).

Como podemos observar, la sección del núcleo que se ha obtenido es  $A_n = 11 \text{ cm}^2$ .

### Espiras por voltios

Con una sección del núcleo de  $11 \text{ cm}^2$  y con una inducción magnética de la chapa fijada de 12 000 Gauss (1,2 T), con el **Ábaco II** podremos obtener las **espiras por voltio** que tendrá cada bobinado.

Sobre el Ábaco II se puede observar, al igual que en el anterior cálculo, que el eje de la izquierda indica, en este caso, los valores de la sección del núcleo.

Desde el valor  $11 \text{ cm}^2$  del núcleo magnético que anteriormente hemos calculado, trazamos una línea horizontal que coincida con la diagonal de la inducción de 12 000 Gauss (1,2 T); en ese punto trazamos una línea vertical que coincide con la línea horizontal (abscisas) de los valores de las espiras por voltios. El resultado es igual a: **espiras por voltio = 3,4 N/V**.

### Espiras de los bobinados

Si aplicamos la Fórmula 3.17, donde se relaciona la fuerza electromotriz con el número de espiras, obtendremos:

$$N_1 = \frac{N}{V} \cdot U_1 = 3,4 \cdot 220 = 748 \text{ espiras}$$

$$N_2 = \frac{N}{V} \cdot U_2 = 340 \text{ espiras}$$

### Diámetro de los hilos

Sobre el **Ábaco III**, se observa que en el eje de la izquierda se encuentran los valores de los diámetros de los hilos desde 0,05 mm hasta 1 mm. Estos valores de la columna izquierda se relacionarán con el eje horizontal superior, donde están las intensidades desde 8 mA hasta 800 mA.

En el eje de la derecha se encuentran los valores de los diámetros desde 0,5 mm hasta 10 mm. Estos valores se relacionarán con el eje horizontal inferior, donde se encuentran los valores de la intensidad desde 0,8 A hasta 80 A.

Conociendo los datos de potencia y tensión, podemos calcular **intensidad del primario**:

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{120}{220} = 0,545 \text{ A}$$

De la misma forma obtendremos la **intensidad del secundario**:

$$I_2 = \frac{S}{U_2} = \frac{120}{100} = 1,2 \text{ A}$$

Para calcular el **diámetro del primario** por medio del Ábaco III, relacionaremos el eje horizontal superior (valores de intensidad de 8 mA a 800 mA) con la línea diagonal de la densidad de corriente, utilizando la densidad que corresponda con la potencia del transformador. Si queremos obtener una potencia de 120 VA, tendremos, según la Tabla 3.2, una densidad de  $3 \text{ A/mm}^2$ .

Si utilizamos el Ábaco III para determinar el diámetro del bobinado primario, con una intensidad de 0,545 A, obtendremos:

$$d_1 = 0,45 \text{ mm}$$

De la misma manera y utilizando el eje horizontal de intensidades comprendidas entre 0,8 A y 80 A, y la misma densidad de  $3 \text{ A/mm}^2$ , a una intensidad del secundario de 1,2 A le corresponderá:

$$d_2 = 0,7 \text{ mm}$$

Resumiendo, tenemos un transformador monofásico acorazado con las siguientes características:

- $U_1 = 220 \text{ V}$
- $U_2 = 100 \text{ V}$
- $A_n = 11 \text{ cm}^2$
- $N_1 = 748 \text{ espiras}$
- $N_2 = 340 \text{ espiras}$
- $d_1 = 0,45 \text{ mm}$
- $d_2 = 0,7 \text{ mm}$

## 34 Normas de seguridad en el taller

En un taller de máquinas eléctricas es importantísimo seguir algunas sencillas normas de seguridad e higiene. Aquí espondremos las más importantes:

- Hay que mantener el puesto de trabajo ordenado y limpio: el desorden y la suciedad pueden provocar serios accidentes.
- Las herramientas eléctricas portátiles deben mantenerse debidamente protegidas y aisladas.
- Las herramientas portátiles con motor eléctrico no deben superar la tensión de 250 V en ningún caso, y habrán de estar provistas de un conductor de protección.
- Los cables de alimentación de las herramientas eléctricas portátiles deberán estar protegidos por un material resistente que evite deterioros por roces, presiones y torsiones no forzadas.
- Los cables de alimentación de las herramientas eléctricas portátiles no deberán tener excesiva longitud. Es impres-

cindible colocar bases de enchufes en lugar cercano al de uso habitual.

- Es obligatorio proteger las máquinas herramientas fijas de contactos indirectos.
- Es importantísimo proteger las manos y la cara de herramientas cortantes y punzantes.
- Se debe utilizar una indumentaria de trabajo cómoda y adecuada para la tarea que se vaya a realizar.
- Hay que tener mucha precaución durante el manejo de productos químicos, como barnices o pinturas.
- Una vez terminada la jornada de trabajo, se dejará el puesto de trabajo preparado para continuar la jornada siguiente.

## Conceptos básicos

**Abaco:** es una tabla de cálculo que nos permite ahorrar tiempo en los cálculos necesarios para la construcción de un transformador. Existen tres tipos diferentes de abacos:

- Abaco para el cálculo de la sección del núcleo
- Abaco para el cálculo de las espiras por voltio
- Abaco para el cálculo del diámetro del hilo

Con estas tablas gráficas, podemos relacionar datos y realizar los cálculos sin utilizar ninguna fórmula. También se pueden realizar operaciones combinando fórmulas y abacos, que es la forma más habitual.

**Bobinados:** son espiras arrolladas al núcleo que crean un campo magnético que está en función del número de éstas ( $N$ ).

**Carrete aislante:** elemento sobre el que se construyen los bobinados. Tiene un hueco central para que se puedan introducir las chapas que conforman el núcleo magnético del transformador.

**Densidad de corriente ( $\delta$ ):** es la relación que existe entre la intensidad de corriente que recorre un conductor y la sección geométrica del mismo, se expresa como el número de amperios por  $\text{mm}^2$  ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ).

**Espiras por voltio:** se puede definir como el número de espiras que le corresponde a cada voltio en una bobina sometida a tensión.

**Flujo magnético:** es el número total de líneas de fuerza que existen en un circuito magnético; se representa con la letra griega  $\Phi$ , que se lee «fi», y su unidad es el Weber ( $W_b$ ). En el sistema CGS es el Maxwell ( $M_x$ ).

**Inducción magnética:** es la cantidad de líneas de fuerza en la misma dirección que atraviesan perpendicularmente la unidad de superficie; se representa con la letra griega  $\beta$ , que se lee «beta», y su unidad es el Tesla (T). En el sistema CGS es el Gauss (G).

**Potencia del transformador:** es la potencia que el transformador puede soportar en su bobinado secundario (VA).

**Relación de transformación ( $m$ ):** es el cociente que resulta de dividir el número de espiras del primario por el del secundario, designados por  $n_1$  y  $n_2$ , respectivamente.

**Sección del núcleo:** se corresponde con el área ( $A_c$ ) transversal que tiene el núcleo magnético, en la cual está situado el bobinado.

**Sistema Internacional (SI):** es el sistema de medidas adoptado por la comunidad científica internacional para regular, en el ámbito de la física, la representación de expresiones y valores de medida. En España, su implantación se aprobó en el año 1989.

# Ábaco I

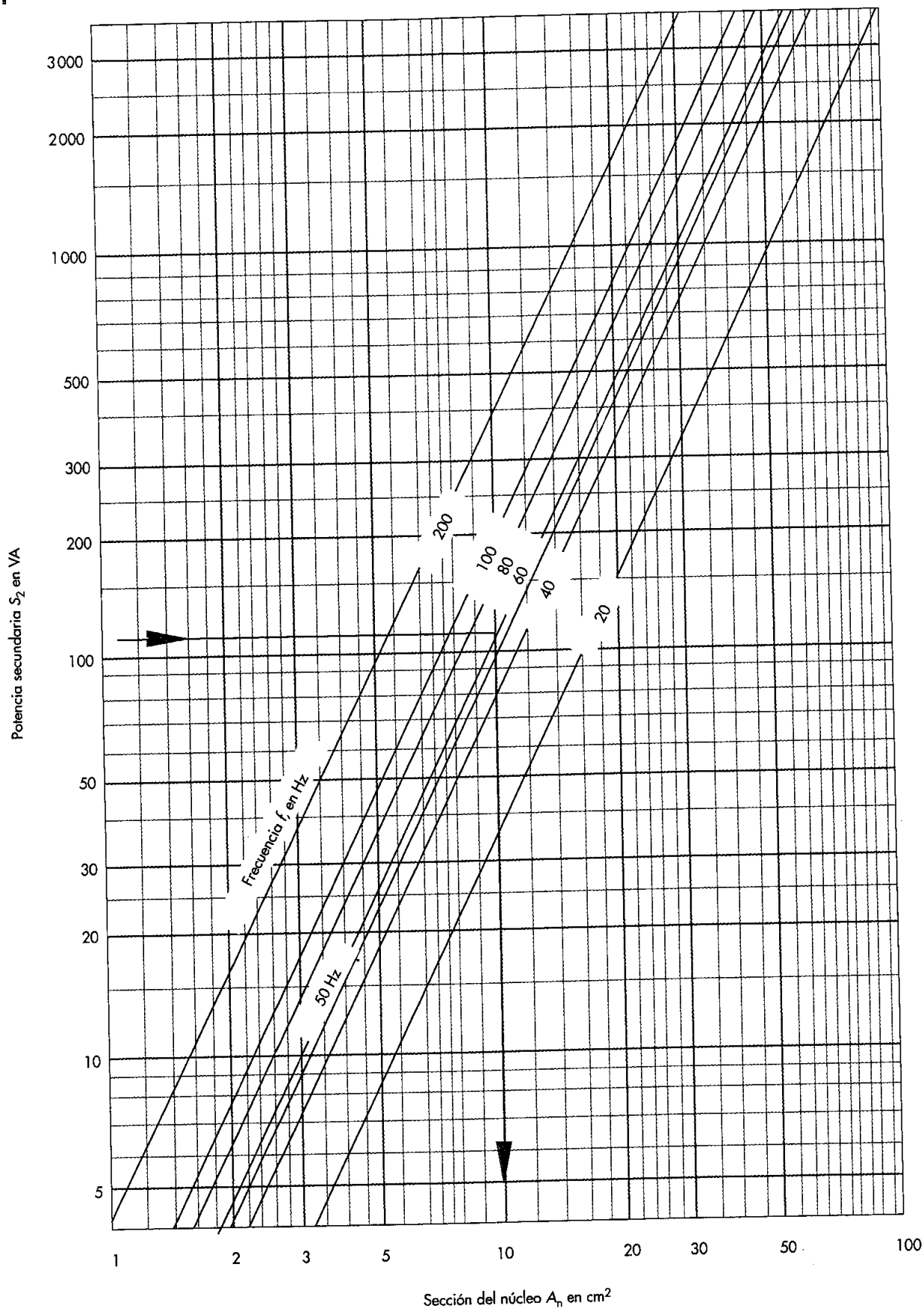


Fig. 3.20. Determinación de la sección del núcleo (transformadores acorazados) en función de la potencia secundaria y a diversas frecuencias.

# Ábaco II

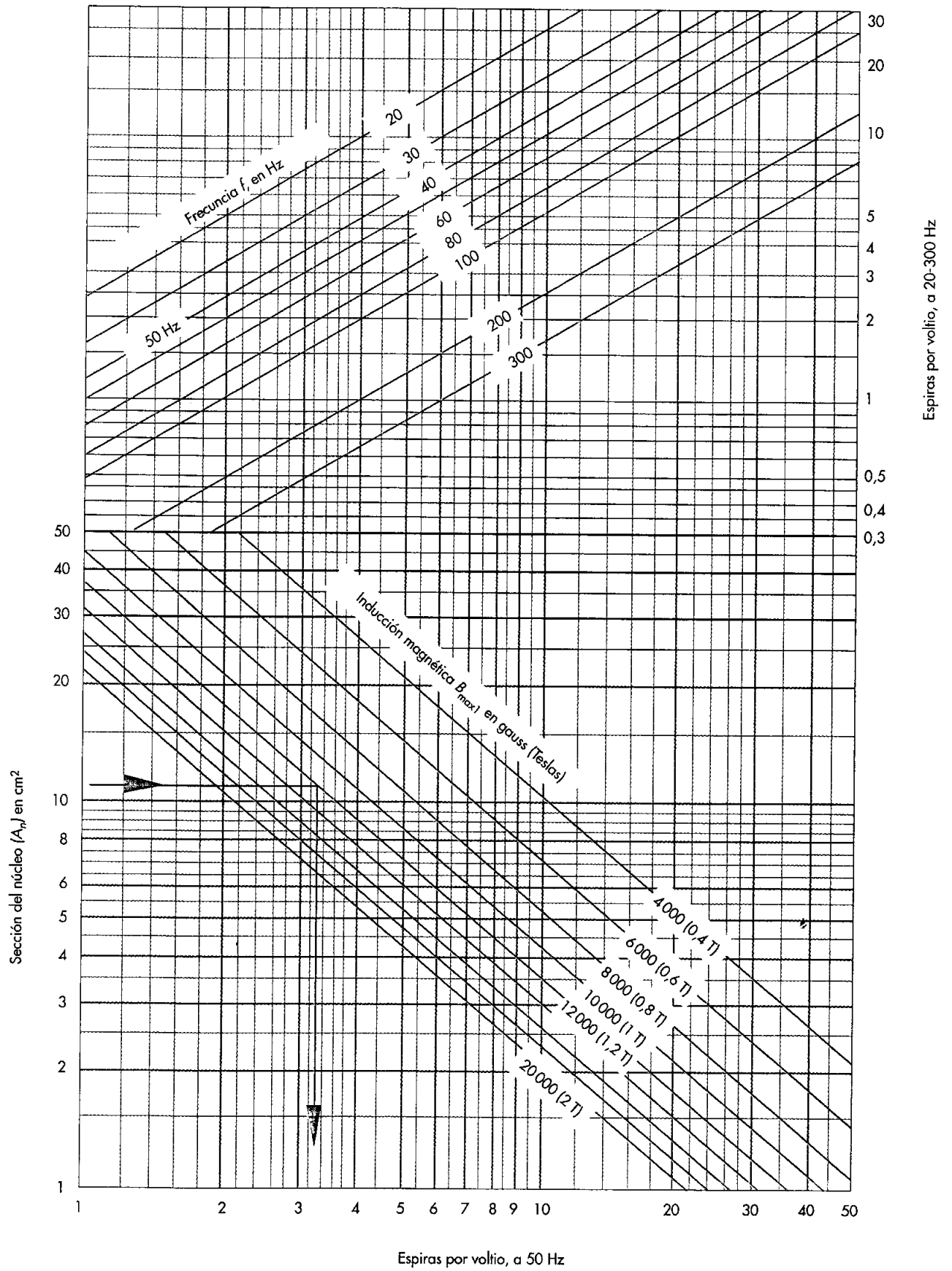


Fig. 3.21. Determinación del número de espiras por voltio, conociendo la sección del núcleo y en función de la inducción magnética, a diversas frecuencias.

# Ábaco III

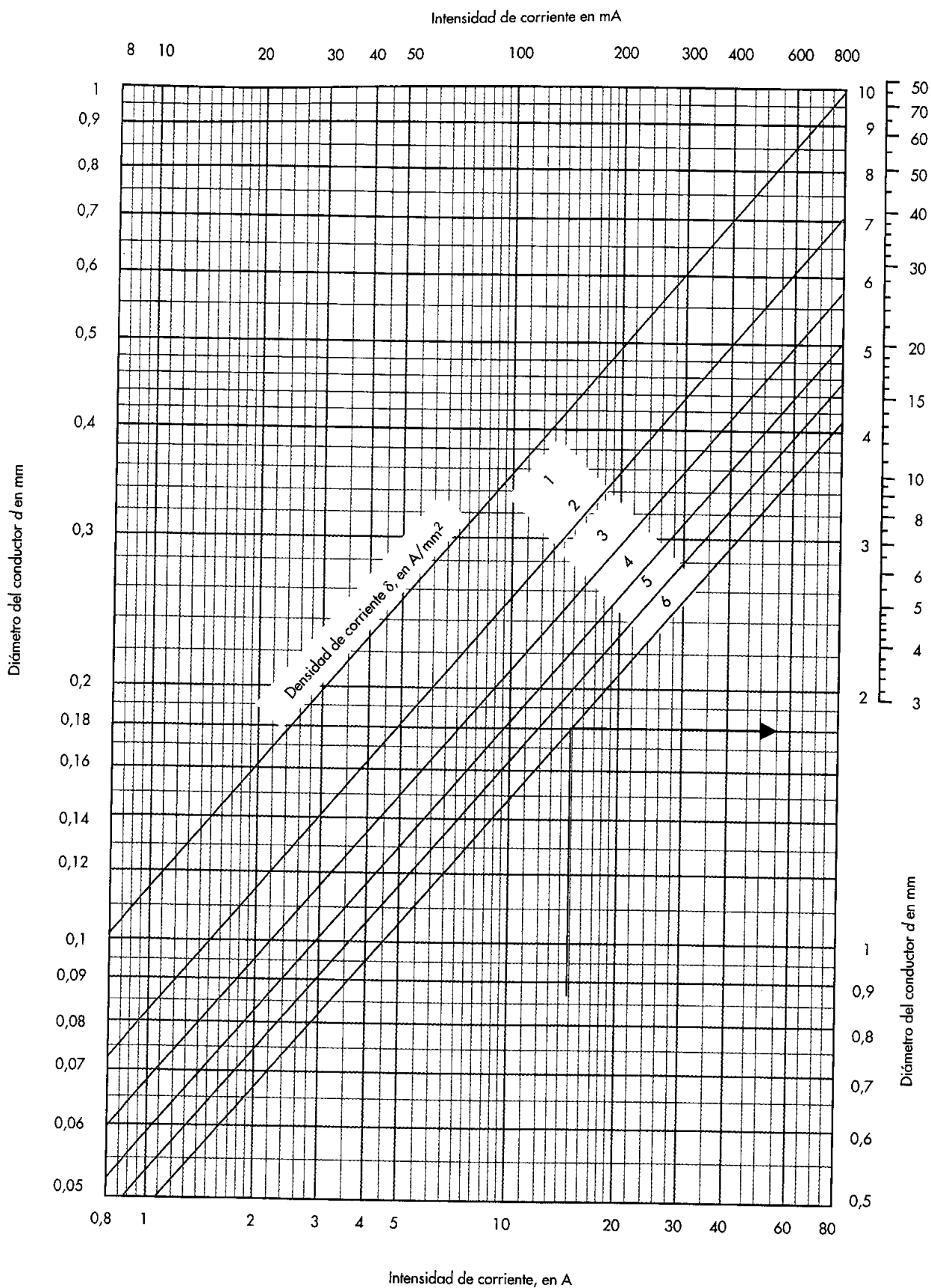


Fig. 3.22. Determinación del diámetro del conductor en función de la intensidad de corriente, a diversas densidades de corriente.

## Autoevaluación

1. ¿Cuál será el valor de la intensidad que circulará por el primario de un transformador, cuya tensión en el mismo bobinado primario es de 220 V, si la tensión del secundario es de 12 V y circula por éste una intensidad de 4 A?
2. ¿Cómo variará la tensión del secundario de un transformador si se triplica el número de espiras del secundario y se mantiene constante la tensión del primario?
3. ¿Cómo variará la tensión del secundario de un transformador si se duplica el número de espiras del primario manteniendo constante su tensión?
4. Queremos estudiar la relación que existe entre las tensiones de los bobinados con respecto a los diámetros de los hilos. Para ello vamos a calcular los siguientes transformadores:
  - a) Tenemos un transformador de 220 V en el bobinado primario y de 125 V en el secundario. La intensidad del secundario es 4 A.  
Calcula los diámetros de los hilos.
  - b) Tenemos un transformador de 220 V en el bobinado primario y de 48 V en el secundario. La intensidad del secundario es de 4 A.  
Calcula los diámetros de los hilos.
  - c) Tenemos un transformador de 125 V en el primario y 220 V en el secundario. La intensidad del secundario es de 4 A.  
Calcula los diámetros de los hilos.
5. ¿A qué se denomina «sección del núcleo»?
6. ¿De qué material están construidas actualmente las chapas magnéticas de los transformadores?
7. ¿Qué separa un bobinado de otro colocados en un mismo núcleo en un transformador?
8. ¿Qué es el «flujo magnético»? ¿Cuál es la unidad en el Sistema Internacional? ¿Cuál es la unidad en el Sistema Cegesimal (CGS)?
9. ¿Qué es la «inducción magnética»? ¿Cuál es la unidad en el Sistema Internacional? ¿Cuál es la unidad en el Sistema Cegesimal (CGS)?

10. ¿A qué se llama espiras por voltio N/V?
11. ¿Cómo definirías los ábacos que estamos utilizando?
12. ¿Puede un mismo transformador funcionar como elevador y como reductor? Razona la respuesta.
13. Investiga por qué se utiliza la chapa magnética de grano orientado para los núcleos de los transformadores en relación con otro tipo de material.

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

### 14. Comprueba si se trata de un transformador elevador o reductor.

#### • Objetivos:

- Comprobar –por medio de la medida de la resistencia óhmica de los circuitos eléctricos– cuál es el bobinado de mayor tensión y cuál el bobinado de menor tensión.

#### • Medios didácticos:

- Pequeño transformador de potencia o tensión.
- Óhmetro o polímetro digital.

#### • Procedimiento:

- 1.º Medir la resistencia óhmica de un bobinado.
- 2.º Medir la resistencia óhmica del otro bobinado.

Medidas de los bobinados del transformador	
Elementos a medir	Resultados
Resistencia óhmica del bobinado 1	
Resistencia óhmica del bobinado 2	

#### • Contesta:

- a) Explica tu punto de vista en cuanto a los resultados de las medidas de resistencias óhmicas.
- b) Por el resultado de la medida de las resistencias óhmicas, indica el bobinado de mayor diámetro del hilo y el de menor diámetro del hilo.
- c) Por el resultado de la medida de las resistencias óhmicas, indica el bobinado de menor tensión y el de mayor tensión.

## 15. Comprueba el tipo de transformador por su núcleo magnético.

### • Objetivo:

- Identificar de forma práctica el tipo de núcleos magnéticos.

### • Medios didácticos:

- Transformador de pequeña potencia de núcleo acorazado.
- Transformador de pequeña potencia de núcleo de columnas.
- Destornilladores, llaves hexagonales fijas, alicates universales, martillo de fibra.

### • Procedimiento:

- 1.º Desmontar los tornillos de la carcasa del transformador acorazado.
- 2.º Desconectar los bobinados de la placa de conexiones.
- 3.º Desmontar los tornillos de apriete de las chapas magnéticas.
- 4.º Desmontar las chapas que están introducidas en el carrete de los bobinados.
- 5.º Volver a montar el transformador.
- 6.º Repetir la práctica con un transformador de columnas.

### • Contesta:

- a) Comprueba el tipo de chapa, su espesor y el número de chapas.
- b) Explica qué diferencias encuentras entre los tipos de chapas de cada transformador.
- c) Compara físicamente los tipos de chapas.
- d) Explica cómo creías que estaban montados los transformadores.
- e) ¿Qué conclusiones sacas de los montajes de cada uno de los transformadores?

## 16. Montaje de los bobinados de un transformador.

### • Objetivos:

- Conocer físicamente la colocación de los bobinados.

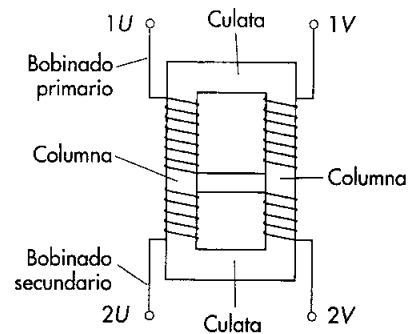
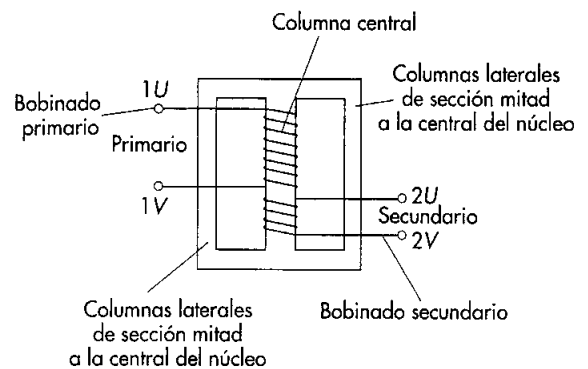


Fig. 3.23. Transformador acorazado y transformador de columnas.

- Manejar la bobinadora y la devanadora.
- Analizar cómo van colocados los aislantes entre capas, entre bobinados y conductores a placa de conexiones.

### • Medios didácticos:

- Carrete del núcleo.
- Bobinadora manual o automática.
- Devanadora.
- Bobinas de hilo esmaltado de diámetros en función de los cálculos realizados.
- Papel *presspan* y papel de poliéster.

### • Procedimiento:

- 1.º Colocar un carrete en la bobinadora, con un taco de madera taladrado para el paso del eje de la bobinadora en el interior.
- 2.º Colocar una bobina en la devanadora y pasar el hilo por los rodillos tensores de ésta.



- 3.º Colocar la devanadora frente al carrete para iniciar las vueltas de la primera capa.
- 4.º Entre capas, colocar una banda separadora de papel aislante fino (0,1 mm).
- 5.º Colocar una banda separadora de papel aislante entre el bobinado primario y el secundario, y otra en el cierre del bobinado secundario.

• **Contesta:**

- a) ¿Cuáles son las dificultades encontradas en el bobinado del transformador?
- b) ¿Por qué se coloca aislante entre capas?
- c) ¿Por qué se coloca aislante entre bobinados?

**17. Cálculo de un transformador monofásico de forma teórica.**

• **Objetivos:**

- Calcular un transformador monofásico de pequeña potencia mediante fórmulas.
- Manejar con soltura los ábacos estudiados.
- Desarrollar los conocimientos adquiridos en esta unidad.
- Percibir la posibilidad de calcular y construir un transformador en tu vida profesional.

• **Datos:**

- $U_1 = 220 \text{ V}$  (tensión del devanado primario).
- $U_2 = 125 \text{ V}$  (tensión del devanado secundario).
- $\beta = 11\,000 \text{ Gauss}$  (1,1 Tesla).
- Sección del núcleo cuadrado ( $A_n$ ).
- $L = 4 \text{ cm}$  (lado del cuadrado).
- $f = 50 \text{ Hz}$  (frecuencia).

- $\delta = 2,5 \text{ A/mm}^2$  (densidad de corriente).

• **Procedimiento:**

- 1.º Se calculará la sección del núcleo cuadrado una vez conocido un lado.
- 2.º Se calculará la potencia del transformador una vez conocida la sección del núcleo.
- 3.º Se calculará el número de espiras del primario y del secundario una vez conocida la inducción y los datos calculados.
- 4.º Se calcularán las intensidades una vez conocida la potencia y las tensiones del primario y del secundario.
- 5.º Se calcularán las secciones de los hilos de cobre de los bobinados primario y secundario una vez conocidas las intensidades respectivas y la densidad, que la conocemos para la potencia calculada.

• **Contesta:**

- a) Explica qué ventajas y qué inconvenientes tiene el cálculo de transformadores mediante fórmulas.
- b) ¿Qué conclusiones sacas de la realización del cálculo del transformador mediante fórmulas?
- c) Comprueba qué diámetros comerciales debes poner en cada bobinado.

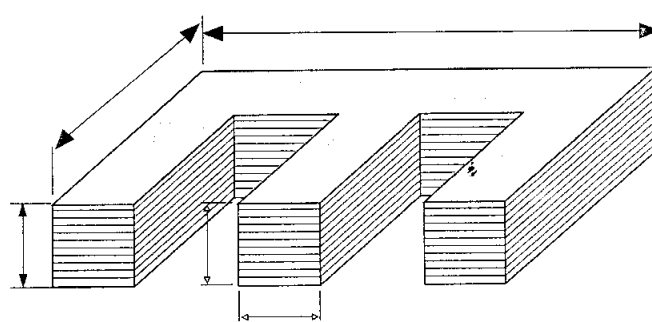



Fig. 3.24. Sección del núcleo a medir.



Ensayo de  
transformadores

4

## 4.1 Transformador en vacío

Como hemos visto anteriormente, 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, con un mismo circuito magnético y a la misma frecuencia.

La potencia nominal o aparente de un transformador es la potencia máxima que puede proporcionar sin que se produzca un calentamiento en régimen de trabajo.

Debido a las pérdidas que se producen en los bobinados por el efecto Joule y en el hierro por histéresis y por corrientes de Foucault, el transformador deberá soportar todas las pérdidas más la potencia nominal para la que ha sido proyectado.

Un transformador podrá entonces trabajar permanentemente y en condiciones nominales de potencia, tensión, corriente y frecuencia, sin peligro de deterioro por sobrecalentamiento o de envejecimiento de conductores y aislantes.

### A. Definición

Se puede considerar un **transformador ideal** aquel en el que no existe ningún tipo de pérdida, ni magnética ni eléctrica.

La ausencia de pérdidas supone la inexistencia de resistencia e inductancia en los bobinados.

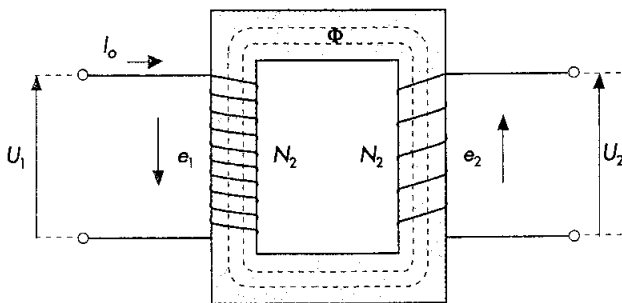


Fig. 4.1. Transformador ideal en vacío.

Como podemos observar en la Figura 4.1, en el transformador ideal no hay dispersión de flujo magnético, por lo que el flujo se cierra íntegramente sin ningún tipo de dificultad. Las tensiones cambian de valor sin producirse ninguna caída de tensión, puesto que no se producen resistencias en los bobinados primario y secundario.

En la práctica, en un transformador en vacío conectado a una red eléctrica esto no es así. Las bobinas ofrecen una determinada resistencia al paso de la corriente eléctrica, provocando una caída de tensión que se deberá tener en cuenta en ambos bobinados ( $R_1$  y  $R_2$ ).

Igualmente, el flujo magnético que se origina en el bobinado primario no se cierra en su totalidad con el secundario a través del núcleo magnético, sino que una parte de este flujo atraviesa el aislante y se cierra a través del aire.

Ambas bobinas no se enlazan por el mismo flujo, la pérdida de flujo magnético se traduce en la llamada **inductancia de dispersión** ( $X_{d1}$ ); por lo tanto, a la hora de analizar las pérdidas del transformador se han de tener en cuenta estas particularidades (véase la Figura 4.2).

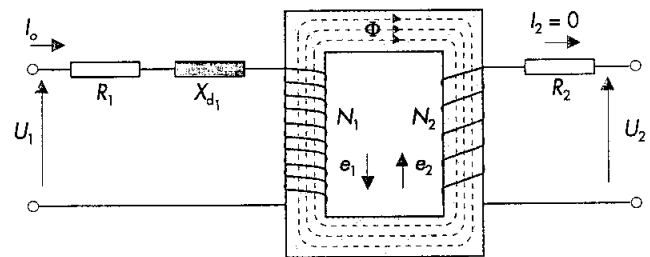


Fig. 4.2. Esquema del transformador real en vacío.

### B. Pérdidas en transformación

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 le sucede a los transformadores.

En un transformador se producen las siguientes pérdidas:

- Pérdidas por corriente de Foucault ( $P_F$ ).
- Pérdidas por histéresis ( $P_H$ ).
- Pérdidas en el cobre del bobinado ( $P_{cu}$ ).

Las pérdidas por corriente de Foucault ( $P_F$ ) y por histéresis ( $P_H$ ) son las llamadas **pérdidas en el hierro** ( $P_{Fe}$ ).

Cuando un transformador está en vacío, la potencia que medimos en un transformador con el circuito abierto se compone de la potencia perdida en el circuito magnético y la pérdida en el cobre de los bobinados.

Al ser nula la intensidad en el secundario ( $I_2 = 0$ ), no aparece en él pérdida de potencia; por otra parte, al ser muy pequeña la intensidad del primario en vacío ( $I_0$ ) con res-

pecto a la intensidad en carga  $I_{2n}$ , las pérdidas que se originan en el cobre del bobinado primario resultan prácticamente insignificantes.

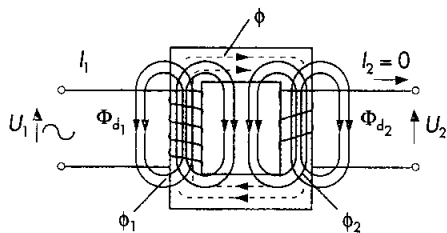


Fig. 4.3. Flujo principal y de dispersión de un transformador en vacío.

### 1 C. Pérdidas en el hierro ( $P_{Fe}$ )

Las pérdidas de potencia en el hierro ( $P_{Fe}$ ) en un transformador en vacío se producen por las corrientes de Foucault ( $P_F$ ) y por el fenómeno de histéresis ( $P_H$ ).

Para reducir la pérdida de energía, y la consiguiente pérdida de potencia, es necesario que los núcleos que están bajo un flujo variable no sean macizos; deberán estar contruidos con chapas magnéticas de espesores mínimos, apiladas y aisladas entre sí.

La corriente eléctrica, al no poder circular de unas chapas a otras, tiene que hacerlo independientemente en cada una de ellas, con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia perdida por corrientes de Foucault. En la Figura 4.4 podemos observar cómo circula la corriente por ambos núcleos magnéticos.

Las **corrientes de Foucault** se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético.

Como los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos magnéticos de los transformadores se genera una fuerza electromotriz inducida que origina corriente de circulación en los mismos, lo que da lugar a pérdidas de energía por efecto Joule.

Las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético.

Para el tipo de chapa magnética de una inducción de 1 Tesla o 10 000 Gauss, trabajando a una frecuencia de 50 Hz de laminado en frío de grano orientado, las pérdidas en el núcleo se estiman entre 0,3 W/kg y 0,5 W/kg, mientras que las pérdidas de la chapa de laminado en caliente para

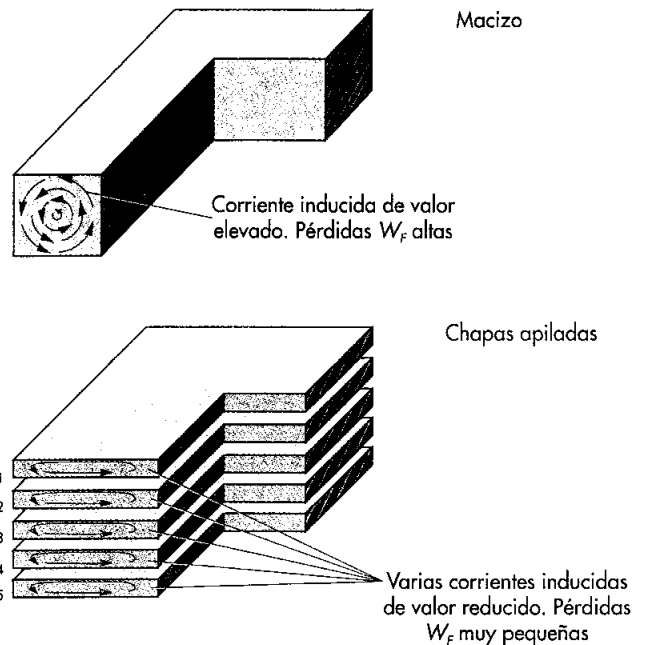


Fig. 4.4. Núcleos magnéticos.

la misma inducción y la misma frecuencia oscilan entre 0,8 y 1,4 W/kg.

La Tabla 4.1 indica las características de construcción, los valores magnéticos y la composición química para la determinación de las pérdidas de potencia en el hierro en función del espesor, la aleación y la inducción.

				Tesla $10^4$ Gauss W/kg
0,5	0,10	0,5 - 1	2,9	7,40
0,5	0,10	2,5	2,3	5,6
0,35	0,10	2,5	1,7	4
0,35	0,10	4	1,3	3,25
0,35	0,10	4,5	1,2	3
0,35	0,10	4,5	0,9	2,1

Tabla 4.1. Características para la determinación de las pérdidas de potencia (W/kg).

Para el cálculo de las pérdidas en el hierro por las corrientes de Foucault recurriremos a la Fórmula 4.1, que indica que las pérdidas en el hierro son proporcionales al cuadrado de la inducción y al cuadrado de la frecuencia.

### Fórmula 4.1

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}}$$

Donde:

$P_F$  = pérdidas por corrientes de Foucault en W/kg

$f$  = frecuencia en Hz

$\beta_{max}$  = inducción máxima en Gauss

$\Delta$  = espesor de la chapa magnética en mm

De la fórmula anterior se deduce que el cambio de frecuencia de 50 a 60 Hz, por ejemplo, hace que aumenten las pérdidas en el transformador.

### Caso práctico 1

Tenemos un transformador que trabaja a una frecuencia de 50 Hz, con una chapa magnética que tiene un espesor de 0,35 mm y una inducción magnética de 1 Tesla o 10 000 Gauss. Lo vamos a conectar a una red de 60 Hz de frecuencia. ¿Cuáles serán las pérdidas en el hierro conectado a la red de 50 Hz? ¿Cuáles serán las pérdidas en el hierro conectado a la red de 60 Hz?

Si aplicamos la Fórmula 4.1, para una frecuencia de 50 Hz serán:

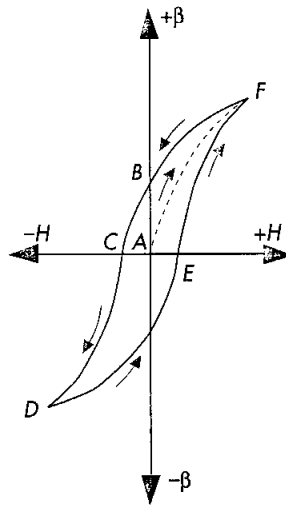
$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}} = \frac{2,2 \cdot 50^2 \cdot 10\,000^2}{10^{11}} = \frac{2,2 \cdot 2\,500 \cdot 10^8 \cdot 0,122}{10^{11}} = 0,673 \text{ W/kg}$$

Para una frecuencia de 60 Hz, será:

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}} = \frac{2,2 \cdot 60^2 \cdot 10\,000^2 \cdot 0,35}{10^{11}} = \frac{2,2 \cdot 3\,600 \cdot 10^8 \cdot 0,122}{10^{11}} = 0,970 \text{ W/kg}$$

Esto indica que cuanto mayor sea la frecuencia, mayores serán las pérdidas por corrientes de Foucault.

La **histéresis magnética** es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no sólo depende del valor del flujo, sino también de los estados magnéticos anteriores. En el caso de los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable se produce una imantación que se mantiene al cesar el flujo variable, lo que provoca una pérdida de energía que se justifica en forma de calor.



- A Comienzo del ciclo de imanación que, al aumentar la intensidad, llega a F
- D Extremo del ciclo a máxima intensidad negativa
- CFEDC Área de histéresis
- AC = Hc Fuerza campo coercitiva
- AB = Br Magnetismo remanente

Fig. 4.5. Ciclo de histéresis.

La potencia perdida por histéresis depende esencialmente del tipo de material; también puede depender de la frecuencia, pero como la frecuencia en una misma zona o país siempre es la misma, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa. A través de la **fórmula de Steinmetz** (Fórmula 4.2) se determinarán las pérdidas por histéresis.

El coeficiente de chapa oscila entre 0,0015 y 0,003, aunque baja hasta 0,007 en hierro de muy buena calidad.

### Fórmula 4.2

$$P_H = K_h \cdot f \cdot \beta_{max}^n$$

Donde:

$K_h$  = coeficiente de cada material

$f$  = frecuencia en Hz

$\beta_{max}$  = inducción máxima en Tesla

$P_H$  = pérdida por histéresis en W/kg

$n$   $\begin{cases} = 1,6 \text{ para } \beta < 1 \text{ Tesla (} 10^4 \text{ Gauss)} \\ = 2 \text{ para } \beta > 1 \text{ Tesla (} 10^4 \text{ Gauss)} \end{cases}$

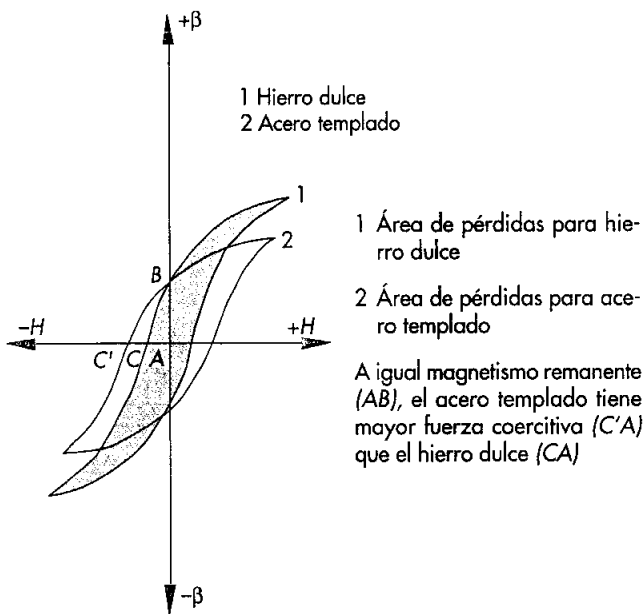


Fig. 4.6. Ciclo de histéresis de dos materiales diferentes.

### Caso práctico 2

Tenemos un transformador que trabaja a una frecuencia de 50 Hz, con una chapa magnética de una inducción de 1,2 Tesla (12 000 Gauss), conectado a una red de 50 Hz de frecuencia. El peso del núcleo del transformador es de 3 kg. ¿Cuáles serán las pérdidas por histéresis del núcleo magnético?

Si aplicamos la Fórmula 4.2 de Steinmetz y el coeficiente de histéresis tiene un valor de 0,002, la potencia perdida en el núcleo por histéresis será:

$$P_H = K_h \cdot f \cdot \beta_{max}^n = 0,002 \cdot 50 \cdot 1,2^2 = 0,144 \text{ W/kg}$$

Por lo tanto, la pérdida por histéresis del núcleo será:

$$P_{HT} = P_H \cdot \text{peso del hierro} = 0,144 \cdot 3 = 0,432 \text{ W}$$

Las pérdidas de potencia en el hierro ( $P_{Fe}$ ) o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault ( $P_F$ ) y por histéresis ( $P_H$ ), como indica la siguiente fórmula:

#### Fórmula 4.3

$$P_F + P_H = P_{Fe}$$

### Caso práctico 3

Tenemos un transformador conectado a una red de 50 Hz de frecuencia con una chapa magnética de 0,9 Tesla (9 000 Gauss) de inducción. El peso del núcleo del transformador es de 12 kg. El espesor de la chapa del núcleo es de 0,35 mm y el coeficiente de histéresis es 0,002.

Calcula la potencia perdida en el hierro.

Comenzaremos calculando la potencia perdida por Foucault.

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta^2 \cdot e^2}{10^3} = \frac{2,2 \cdot 50^2 \cdot 0,9^2 \cdot 0,35^2}{10^3} =$$

$$= \frac{2,2 \cdot 2\,500 \cdot 0,81 \cdot 0,122}{10^3} = 0,545 \text{ W/kg}$$

Las pérdidas totales por Foucault serán:

$$P_{FT} = P_F \cdot \text{peso del núcleo} =$$

$$= 0,545 \cdot 12 = 6,54 \text{ W}$$

Las pérdidas por histéresis serán:

$$P_H = K_h \cdot f \cdot \beta^n = 0,002 \cdot 50 \cdot 0,9^{1,6} =$$

$$= 0,002 \cdot 50 \cdot 0,844866 = 0,0844 \text{ W/kg}$$

Las pérdidas totales por histéresis serán:

$$P_{HT} = P_H \cdot \text{peso del hierro} = 0,084 \cdot 12 = 1,01 \text{ W}$$

Para las pérdidas totales en el núcleo magnético, recurriremos a la Fórmula 4.3:

$$P_{Fe} = P_F + P_H = 6,54 + 1,01 = 7,55 \text{ W}$$

No obstante, las pérdidas en el hierro se pueden determinar midiendo la potencia consumida por el transformador en vacío mediante vatímetro, como podremos comprobar en el ensayo correspondiente, que recibe el nombre de ensayo en vacío.

## 4.2 Ensayo en vacío

El ensayo en vacío proporciona, a través de las medidas de tensión, intensidad y potencia en el bobinado primario, los

valores directos de la potencia perdida en el hierro, y deja abierto el bobinado secundario. Por lo tanto, este bobinado no será recorrido por ninguna intensidad, y no se tendrán en cuenta los ínfimos valores de las pérdidas en el cobre para este ensayo.

Los principales datos que hay que determinar en el ensayo en vacío son:

- Las **pérdidas en el hierro** a través de la lectura del vatímetro ( $W_1$ ) en el bobinado primario, entendiéndose que la  $P_{10}$  es la potencia medida en el vatímetro ( $W_1$ ).

$$(P_{Fe} = P_{10})$$

- La **intensidad** en vacío del primario a través del amperímetro ( $A_1$ ).
- La **relación de transformación** ( $m$ ):

$$m = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$$

También podemos calcular, con la ayuda de los resultados:

- La **impedancia** ( $Z$ ):

$$Z = \frac{U_{1n}}{I_{10}}$$

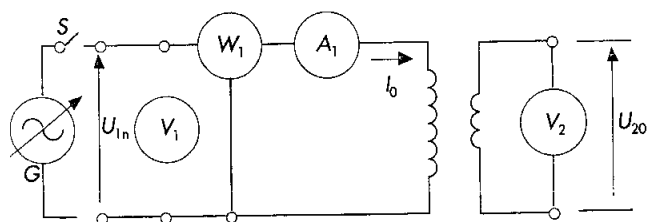
- La **potencia aparente** en vacío ( $S_{sap}$ ):

$$S_{sap} = U_{1n} \cdot I_{10}$$

- El **ángulo de desfase** ( $\varphi$ ) o factor de potencia de vacío:

$$\cos \varphi = \frac{P_{10}}{S_{sap}}$$

En vacío, el coseno de  $\varphi_{10}$  coincide aproximadamente con el  $\cos \varphi_{20}$  ( $\cos \varphi_{10} \cong \cos \varphi_{20}$ ).



G Fuente de alimentación de corriente alterna regulable (autotransformador regulable)

Fig. 4.7. Esquema eléctrico del ensayo de un transformador en vacío.

## Caso práctico 4

Calcula la potencia aparente y el factor de potencia en vacío de un transformador partiendo de los siguientes datos:

Tensión del primario	$U_{1n}$	380 V
Intensidad del primario	$I_{10}$	0,081 A
Tensión del secundario	$U_{2n}$	125 V
Potencia medida con vatímetro	$P_{10}$	2,2 W
Resistencia del cobre	$R_{cu}$	2,4 $\Omega$

Con los resultados obtenidos podemos calcular:

- La relación de transformación ( $m$ ).
- La potencia activa en vacío ( $P_{10}$ ).
- La impedancia ( $Z$ ).
- La potencia aparente ( $S_{sap}$ ).
- El ángulo de desfase  $\varphi$  entre la tensión y la intensidad de corriente.

En el ensayo en vacío, al estar abierto el bobinado secundario, no circula ninguna intensidad por éste, lo que permite que las tensiones primarias y secundarias sean exactas a las previstas en cada bobinado. Por lo tanto:

$$m = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{380}{125} = 3,04$$

La potencia perdida que hemos medido con el vatímetro en el bobinado primario del transformador en vacío corresponde a las pérdidas en el hierro y en el cobre.

$$P_{10} = 2,2 \text{ W}$$

La potencia perdida en el cobre se puede calcular mediante la resistencia del bobinado y el cuadrado de la intensidad del primario ( $I_{10}$ )<sup>2</sup>.

La resistencia del cobre medido con un óhmetro nos da 2,4  $\Omega$ ; la potencia del cobre será:

$$P_{cu} = R_{cu} \cdot (I_{10})^2 = 2,4 \cdot 0,081^2 = 0,0015 \text{ W}$$

Este resultado indica que la potencia que se pierde por el cobre del bobinado se puede despreciar con respecto a las pérdidas en el núcleo por las corrientes de Foucault y por el fenómeno de histéresis, en cualquier ensayo en vacío.





**PROTOKOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES**

Tipo de ensayo	ENSAYO EN VACÍO																																																
Características del transformador	$S_1$ _____ (VA)	$U_2$ _____ (V)	$f$ _____ (Hz)																																														
	$S_2$ _____ (VA)	$I_1$ _____ (A)																																															
	$U_1$ _____ (V)	$I_2$ _____ (A)																																															
Objetivos del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro																																																
Esquema de montaje																																																	
Instrumentos de medidas y regulación a utilizar																																																	
Tabla de valores de las medidas realizadas a diferentes valores de la tensión	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="363 1272 523 1346"><math>U_1</math> (voltios)</th> <th data-bbox="523 1272 667 1346"><math>U_2</math> (voltios)</th> <th data-bbox="667 1272 826 1346"><math>I_1</math> (amperios)</th> <th data-bbox="826 1272 986 1346"><math>I_2</math> (amperios)</th> <th data-bbox="986 1272 1129 1346"><math>W_1</math> (vatios)</th> <th data-bbox="1129 1272 1273 1346"><math>W_2</math> (vatios)</th> <th data-bbox="1273 1272 1453 1346"><math>(m)</math> Relación de transformación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>							$U_1$ (voltios)	$U_2$ (voltios)	$I_1$ (amperios)	$I_2$ (amperios)	$W_1$ (vatios)	$W_2$ (vatios)	$(m)$ Relación de transformación																																			
	$U_1$ (voltios)	$U_2$ (voltios)	$I_1$ (amperios)	$I_2$ (amperios)	$W_1$ (vatios)	$W_2$ (vatios)	$(m)$ Relación de transformación																																										
Cálculos definitivos de la potencia perdida en el hierro																																																	

Tabla 4.3. Ficha para el protocolo de ensayo de un transformador.

La otra parte de las pérdidas de potencia se producen en los conductores de los bobinados primario y secundario, sometidos a la intensidad nominal. Se denominan pérdidas  $R^2$  debidas al cobre ( $P_{cu}$ ).

Las pérdidas de potencia en el cobre ( $P_{cu}$ ) se determinan mediante el ensayo en cortocircuito.

## 4.4 Ensayo en cortocircuito

Con el ensayo en cortocircuito, conseguimos las intensidades nominales en los dos bobinados, aplicando una pequeña tensión al primario y cortocircuitando el secundario con un amperímetro (el amperímetro tiene una resistencia prácticamente nula), como se muestra en las figuras 4.9 y 4.10.

En muchos ensayos en vacío, la  $I_{cc}$  supera el 25% de la intensidad nominal ( $I_n$ ).

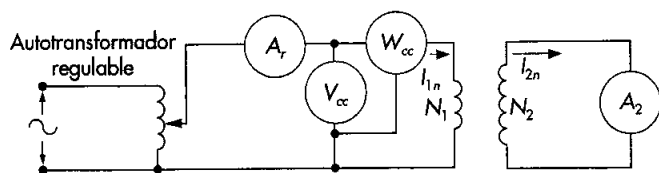


Fig. 4.9. Esquema de montaje de un transformador en cortocircuito.

El procedimiento es el siguiente:

Con un autotransformador regulable y comenzando desde cero, aplicamos progresivamente la tensión, que se incrementa voltio a voltio, hasta conseguir las intensidades nominales en los dos bobinados.

La tensión aplicada, una vez alcanzada la intensidad nominal en el secundario, recibe el nombre de tensión de cortocircuito ( $U_{cc}$ ). Esta tensión supone un valor bajo con respecto a la tensión nominal aplicada al transformador cuando está en carga.

En la práctica, la  $U_{cc}$  se da en valores porcentuales oscila entre un 4% y un 10% de la tensión nominal  $U_{1n}$ . En transformadores de distribución, la tensión nominal se representa con la letra  $u$  minúscula seguida de  $cc$ , que indica el valor en cortocircuito ( $U_{cc}$ ), así como en las demás magnitudes, como son las impedancias, las inductancias, etc.

$$u_{cc} = U_{cc} \cdot \frac{100}{U_{1n}} \text{ (en \%)}$$

En el ensayo en cortocircuito, como las intensidades son nominales, se producen pérdidas en el cobre por efecto Joule similares a las que se dan cuando el transformador está en carga; se diferencian en el rendimiento cuando el índice de carga es menor que la unidad.

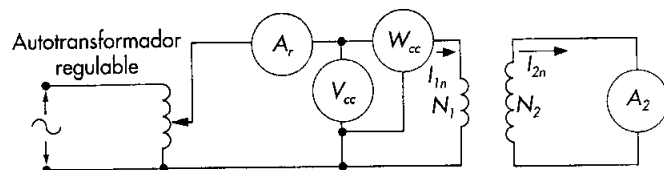


Fig. 4.10. Esquema de montaje para el ensayo en cortocircuito de un transformador.

Las pérdidas en el cobre se calculan mediante:

$$P_{cu} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2$$

### A. Pérdidas en cortocircuito

Estas pérdidas se determinan directamente con el vatímetro conectado en el primario, que corresponde a la potencia en cortocircuito ( $P_{cc}$ ) (véase la Figura 4.9).

$$P_{cc} = P_{cu}$$

### Caso práctico 5

Queremos conocer las pérdidas de potencia en los bobinados primario y secundario de un transformador. Para ello conectamos el secundario en cortocircuito; el amperímetro del secundario nos mide una intensidad de 6 A y 2 A en el amperímetro del primario. Midiendo las resistencias de los bobinados con un polímetro digital, tenemos como  $R_1$  una resistencia de 0,85  $\Omega$ , y  $R_2$ , una resistencia de 1,4  $\Omega$ .

$$P_{cu} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 = 0,85 \cdot 6 + 1,4 \cdot 2 = 5,1 + 2,8 = 7,9 \text{ W}$$


Tabla 4.4. Tabla de valores para el ensayo en cortocircuito de un transformador.

## B. Resistencias, inductancias e impedancias en cortocircuito

Los valores de la resistencia ( $R_{cc}$ ), de la inductancia ( $X_{cc}$ ), y de la impedancia ( $Z_{cc}$ ) de los circuitos en el ensayo en cortocircuito se obtendrán mediante:

- **Resistencia:**

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

- **Inductancia:**

$$X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2}$$

- **Impedancia:**

$$Z_{cc}^2 = R_{cc}^2 + X_{cc}^2$$

Donde:

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

También:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_1}$$

Por lo tanto la corriente de cortocircuito siempre dependerá de las resistencias de sus bobinados y de las inductancias de dispersión provocadas por los mismos.

## C. La intensidad de cortocircuito

La intensidad en cortocircuito ( $I_{cc}$ ) se obtiene así:

$$I_{cc} = \frac{U_2}{Z_{cc}}$$

Dado que no se conoce la tensión del secundario, se obtiene sustituyendo la tensión del secundario ( $U_2$ ) por su valor en la expresión de la relación de transformación, siendo:

$$I_{cc} = \frac{U_1}{m \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}}$$

## D. El factor de potencia de cortocircuito

Una vez obtenidos los datos en el ensayo (la potencia y la tensión de cortocircuito), el coseno de  $\varphi$  será:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} \cdot I_{1n}}$$

## 4.5 Rendimiento del transformador

El **rendimiento del transformador** se define como la relación entre la potencia cedida al exterior de la máquina por el bobinado secundario y la potencia absorbida por el bobinado primario:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Para determinar el rendimiento de un transformador, podemos seguir el **método directo**, es decir, medir la potencia del primario con un vatímetro y la del secundario con otro, de forma que el rendimiento vendrá determinado por el cociente que resulta entre ellos, como se expone en la fórmula anterior, en tanto por uno y en tanto por cien, como se indica a continuación:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \cdot 100 \text{ (en \%)}$$

Este resultado puede impedirnos calcular el rendimiento, debido a que el error de medida de los voltímetros es mayor que la pequeña diferencia entre  $P_2$  y  $P_1$ .

Con el **método indirecto** podemos determinar el rendimiento a través del cociente que resulta de la potencia que el transformador cede al exterior y la potencia absorbida por el transformador, sumándole las pérdidas en el cobre y las pérdidas en el hierro.

$$\eta = \frac{P_u}{(P_u + P_{cu} + P_{fe})}$$

## 4.6 Refrigeración

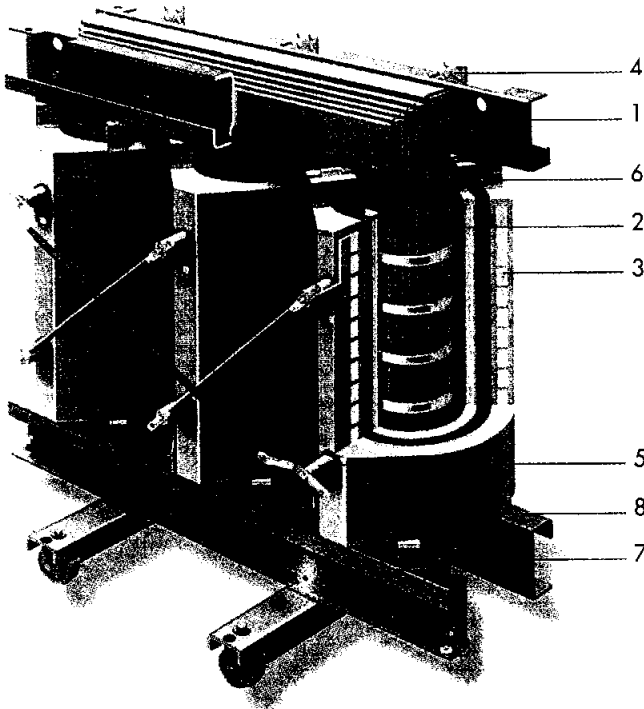
La refrigeración en los transformadores se produce de diferentes maneras debido al tipo de construcción, a la potencia, al medio ambiente donde se encuentre, etc.

Los transformadores de pequeña potencia se suelen refrigerar mediante la expulsión del aire caliente directamente a la atmósfera. El calentamiento en el transformador se produce por las pérdidas de energía eléctrica.

En los transformadores secos, el escaso efecto refrigerante del aire no es suficiente para su refrigeración natural, por

lo que son construidos con gran superficie de evacuación de aire.

Está normalizado que los transformadores trabajen de forma permanente en régimen nominal y a una altitud de 1 000 metros; el calentamiento medio no debe superar los 65°C a temperatura ambiente, admitiendo 40°C como temperatura máxima del ambiente.



- 1 Núcleo de tres columnas construido a base de chapas magnéticas de grano orientado de bajas pérdidas aisladas por ambos lados.
- 2 Arrollamiento de baja tensión construido con banda de aluminio; las espiras están fijamente pegadas entre sí mediante material aislante laminado.
- 3 Arrollamiento de alta tensión a base de bobinas individuales de aluminio, bobinados en fleje; la resina se trata en vado.
- 4 Terminales de baja tensión; arriba, por el lado posterior, y abajo, mediante consulta.
- 5 Terminales de alta tensión: disposición variable para optimizar el diseño del C.T.
- 6 Separadores elásticos: eliminación de vibraciones entre núcleo y devanados, lo que reduce el ruido.
- 7 Armazón y chasis con ruedas orientables para desplazamiento longitudinal y transversal.
- 8 Aislamiento de resina epoxy/cuarzo molido exento de mantenimiento, seguro contra la humedad y tropicalizado, de difícil combustión y autoextinguible.

Fig. 4.11. Transformador trifásico seco.

## 4.7 Medida de temperatura

Se utilizan varios métodos para medir la temperatura en el transformador:

- Método por termómetro.
- Método por variación de resistencias de los bobinados.
- Método por detectores internos de temperatura.

### A. El método por termómetro

Consiste en tomar la temperatura en el aceite refrigerante y sobre el núcleo a aquellos transformadores que tienen cuba de aceite.

A los transformadores secos se les toma en el núcleo, en otras partes metálicas y en el bobinado, si se tiene acceso a él, mediante unas sondas específicas para cada punto de contacto que se introducen en la parte del transformador que vamos a medir, y se conecta a un termómetro digital, como el de la Figura 4.12.

### B. El método por variación de resistencias

Consiste en medir las resistencias en frío, y después de un tiempo estipulado de aproximadamente cuatro horas, una vez que el transformador está funcionando en régimen nominal, volver a medir las resistencias de los bobinados y calcular la variación de temperatura en función de la diferencia de resistencias en los mismos.

### C. El método por detectores internos de temperatura

Consiste en introducir, durante la construcción del transformador, unos sensores de temperatura (termorresistores) que actúan en forma de señal al detectar la temperatura que se les ha marcado.



Fig. 4.12. Termómetro digital con sonda de temperatura.

## 4.8 Medida de aislamiento

La medida de aislamiento consiste en verificar el total aislamiento de los circuitos eléctricos del transformador entre sí, y entre éstos y las partes metálicas del transformador.

Un aislamiento defectuoso no detectado por el comprobador de continuidad puede provocar cortocircuito en el transformador y generar mayores problemas en el funcionamiento, además de poner en peligro a las personas que estén cerca de éstos. Para ello se utiliza un aparato de medida llamado «medidor de aislamiento» o **megóhmetro**.

El ensayo consiste en medir entre masas y los bobinados una tensión entre 500 y 1 000 voltios en corriente continua suministrada por el medidor de aislamiento (*megger*).

Para que la resistencia de aislamiento cumpla los límites establecidos por el Comité Electrotécnico Internacional, el valor mínimo será:

$$R_{ais} = U \cdot 1\,000$$

Donde:

$R_{ais}$  = resistencia de aislamiento en  $M \Omega$  con un mínimo de  $250\,000 M \Omega$

$U$  = tensión más elevada de la máquina en voltios

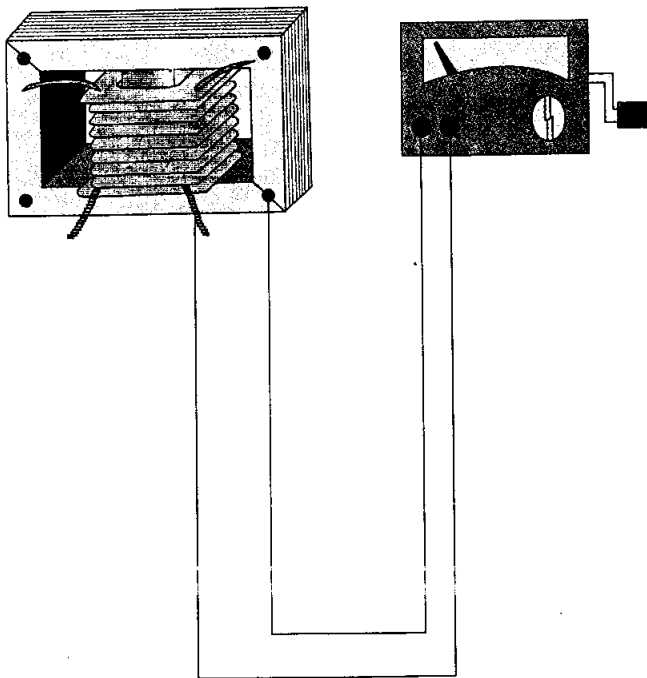


Fig. 4.13. Medidor de aislamiento con megóhmetro.

Transformador monofásico	entre 500 y 1 000	primario y masa		
	entre 500 y 1 000	secundario y masa		
	entre 500 y 1 000	primario y secundario		

Tabla 4.5. Medida de aislamiento en una máquina eléctrica.

## 4.9 Medida de rigidez dieléctrica

La rigidez dieléctrica es la tensión por unidad de espesor que aguanta el aislante sin perforarse. Se expresa en  $kV/cm$ .

Esto no es suficiente para que el aislante sea adecuado a la tensión de funcionamiento, ya que existen muchos factores que pueden complicar el aislamiento, como, por ejemplo, la humedad, el envejecimiento, el calentamiento excesivo, etc. Para ello se establecen unas normas que deben respetarse para el buen funcionamiento de la máquina.

La rigidez dieléctrica depende de la naturaleza del aislante, y la tensión que éste puede soportar es el producto de la rigidez dieléctrica por el espesor.

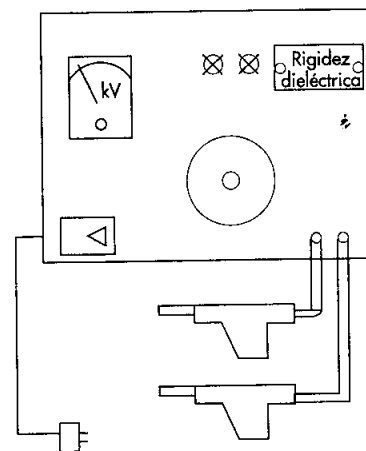


Fig. 4.14. Dibujo del medidor de rigidez dieléctrica.

La medida se realiza entre cada uno de los bobinados y masa, y entre los bobinados. Se le irá sometiendo pro-

gresivamente durante un minuto a una tensión igual a  $2 U_n + 1\,000 \text{ V}$  a 50 Hz, sin superar la tensión máxima de 1 500 V.

Transformador monofásico	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	primario y masa		
	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	secundario y masa		
	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	primario y secundario		

Tabla 4.6. Medida de rigidez dieléctrica en una máquina eléctrica.

## 4.10 Acoplamiento en paralelo de transformadores monofásicos

Cuando tenemos una demanda de potencia mayor que la que podemos suministrar mediante un transformador, cabe

la posibilidad de cubrir esa necesidad acoplando dos o más transformadores en paralelo.

Para que esto sea posible, deben darse las siguientes condiciones:

- Igual relación de transformación.
- Iguales tensiones de cortocircuito.
- Misma conexión a la red.

La potencia nominal no debe ser superior al doble de la potencia del otro transformador.

## 4.11 Normas de seguridad en el taller de ensayos

- Conectar siempre a tierra la estructura metálica del transformador que se vaya a ensayar.
- En el ensayo en cortocircuito, poner mucha atención a la tensión que se le proporciona progresivamente al bobinado primario, y no exceder nunca la intensidad nominal del primario o del secundario.
- En el ensayo de aislamiento, comprobar que los bornes del transformador están desconectados de la red eléctrica.

## Conceptos básicos

**Corrientes de Foucault:** corrientes producidas en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético. Como los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos magnéticos de los transformadores se genera una fuerza inducida que origina una corriente de circulación.

**Histéresis magnética:** fenómeno que se produce cuando la imanación de los materiales ferromagnéticos no sólo depende del valor del flujo, sino también de los estados magnéticos anteriores. En los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable, se produce una imanación que se mantiene cuando este cesa, lo que provoca una pérdida de energía.

**Protocolo de ensayo:** documento que recoge los datos del proceso de ensayo de un transformador: características del transformador, objetivos del ensayo, diseño del esquema de montaje del ensayo, detalle de los aparatos necesarios para realizar todas las medidas, relación de los valores obtenidos y los cálculos definitivos.

**Rendimiento del transformador:** relación entre la potencia cedida al exterior de la máquina por el bobinado secundario y la potencia absorbida por el bobinado primario.

**Transformador ideal:** transformador en el que no existen ningún tipo de pérdidas, ni magnéticas ni eléctricas. La inexistencia de pérdidas supone la ausencia de resistencia e inductancia en los bobinados.

## Autoevaluación

- ¿Cómo se expresaría que un transformador se encuentra en vacío?
- ¿Qué se determina con el ensayo de un transformador en vacío?
- ¿Qué son pérdidas en el hierro?
- ¿Cuál será la potencia perdida en el hierro por Foucault en un transformador con una inducción de 1 Tesla (10000 Gauss) y un espesor de la chapa magnética de 0,35 mm, conectada a una red con una frecuencia de 50 Hz?
- ¿Qué son pérdidas en el cobre?
- ¿Qué se determina con el ensayo en cortocircuito?
- ¿Cuál será la potencia perdida en el cobre?
- Define y demuestra el rendimiento de un transformador.
- Calcula la resistencia de aislamiento de un transformador de 380 V en el primario y 220 V en el secundario. La potencia es de 30 kVA.
- Cita y explica los métodos para el cálculo del rendimiento de un transformador.

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

### 11. Ensayo de un transformador en vacío.

#### • Objetivos:

- Determinar las pérdidas de un transformador en vacío.
- Efectuar el montaje real de un ensayo en vacío.

#### • Datos:

- Calcular la potencia en vacío de un transformador conectado a una red de 220 V. Para ello procederemos a realizar las medidas necesarias con los aparatos correspondientes.

#### • Medios didácticos:

- Un transformador monofásico de pequeña potencia.
- Un autotransformador regulable de tensión.
- Dos voltímetros.

- Un vatímetro.
- Un amperímetro.

#### • Procedimiento:

- Mediremos la tensión del bobinado primario  $U_1$  con el voltímetro  $V_1$ .
- Mediremos la intensidad de corriente del bobinado primario  $I_{10}$  con el amperímetro  $A_1$ .
- Mediremos la potencia activa  $P_{10}$  con el vatímetro conectado al bobinado primario.

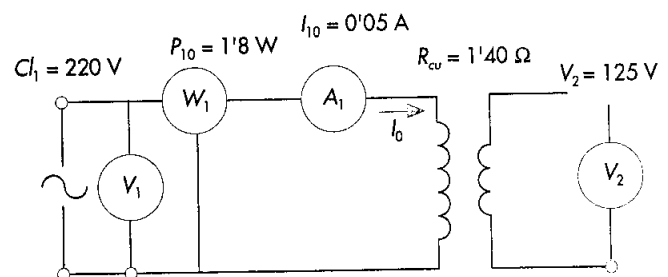


Fig. 4.15. Esquema del transformador en vacío.

#### Resultados de las medidas:

$U_{10}$	220 V
$I_{10}$	0,05 A
$U_{20}$	125 V
$R_{cu}$	1,4 Ω
$P_{10}$	1,8 W

#### • Contesta:

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las mediciones, calcula: la relación de transformación, la potencia activa en vacío (potencia perdida), la impedancia ( $Z$ ) y la potencia aparente ( $S_{app}$ ).
- Determina el ángulo de desfase  $\varphi$  entre la tensión y la intensidad de corriente.
- Contrasta las pérdidas de potencia por Foucault y por histéresis.
- Comprueba las pérdidas totales en el hierro.

## 12. Ensayo de un transformador en cortocircuito.

### • Objetivos:

- Conocer las conclusiones del ensayo de transformador en cortocircuito.
- Conocer el montaje real de un ensayo en cortocircuito.
- Conocer la tensión de cortocircuito (en %).

### • Medios didácticos:

- Un transformador monofásico de pequeña potencia.
- Un autotransformador regulable de tensión.
- Un voltímetro.
- Dos amperímetros.
- Un vatímetro.

### • Datos:

- Tenemos un transformador de tensión nominal en el primario de 220 V y queremos conocer la tensión en cortocircuito (en %), por lo que hemos de realizar el montaje requerido como indica la Figura 4.16.

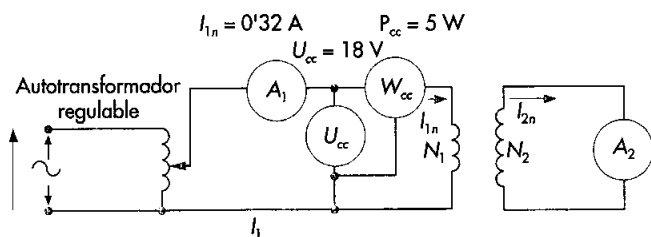


Fig. 4.16. Esquema del transformador en cortocircuito.

### • Procedimiento:

- 1.º Aplicaremos tensión de forma progresiva y de voltio en voltio hasta conseguir en el bobinado primario o en el secundario la intensidad nominal medida por los amperímetros correspondientes.

2.º Tomaremos los datos de la medida de los amperímetros del primario  $A_1$  y del secundario  $A_2$ .

3.º Tomaremos los datos de la potencia activa con el vatímetro conectado al bobinado primario.

$I_{1n}$	$U_{cc}$	$P_{cc}$

4.º En el transformador ensayado, obtenemos el resultado para la tensión en cortocircuito. La tensión en cortocircuito es de gran importancia para el cálculo de la impedancia interna  $Z$  del transformador, de la potencia perdida en el cobre  $P_{cu}$ , de los bobinados, del factor de potencia  $\varphi$  y de la intensidad en cortocircuito  $I_{cc}$ . Por lo tanto, a partir de estos valores podríamos determinar el  $\cos \varphi_{cc}$ .

### • Contesta:

- a) Determina las pérdidas en el cobre.
- b) Determina la tensión de cortocircuito de un transformador.

## 13. Medida de aislamiento del transformador.

### • Objetivo:

- Verificar si el transformador cumple la normativa sobre aislamiento.
- Manejar el medidor de aislamiento o megohmetro (*megger*).

### • Medios didácticos:

- Transformador monofásico.
- Medidor de aislamiento.

### • Procedimiento:

- 1.º Desconectamos los bobinados primario y secundario de la red y de la carga, respectivamente.
- 2.º Conectamos el megóhmetro entre el bobinado primario y la carcasa metálica del transformador.



- 3.º Conectamos el megohmetro entre el bobinado secundario y la carcasa metálica del transformador.
- 4.º Conectamos el megohmetro entre el bobinado primario y el secundario.

• **Datos:**

Máquina	Tensión de prueba en V	Medida de rigidez dieléctrica	Resultado de la medida	Resistencia de fallo
Transformador monofásico	entre 500 y 1 000	primario y masa	Infinito ( $\infty$ )	
	entre 500 y 1 000	secundario y masa	Infinito ( $\infty$ )	
	entre 500 y 1 000	primario y secundario	Infinito ( $\infty$ )	

Tabla 4.7. Medida de medidas de aislamiento en una máquina eléctrica.

El resultado obtenido en la medida de aislamiento por el medidor de aislamiento es infinito en cada una de las medidas, como indica el cuadro anterior.

• **Contesta:**

- a) Comprobar mediante fórmula si el resultado está dentro de los límites normalizados.

**14. Medida de rigidez dieléctrica en sólido.**

• **Objetivos:**

- Comprobar la posibilidad de perforación de un aislante.
- Estudiar el concepto de «rigidez dieléctrica».

• **Medios didácticos:**

- Transformador monofásico.
- Medidor de rigidez dieléctrica (chispómetro).

• **Procedimiento:**

- 1.º Identificar la tensión mayor a la que trabaja el transformador.
- 2.º Conectar el medidor de rigidez dieléctrica a un borne del primario y a la carcasa metálica del transformador; aumentar progresivamente el valor de la tensión de rigidez dieléctrica hasta llegar a 1 500 voltios durante un minuto.
- 3.º Conectar el medidor de rigidez dieléctrica a un borne del secundario y a la carcasa metálica del transformador; aumentar progresivamente el valor de la tensión de rigidez dieléctrica hasta llegar a 1 500 voltios durante un minuto.
- 4.º Conectar el medidor de rigidez dieléctrica a un borne del primario y a otro borne del secundario del transformador; aumentar progresivamente el valor de la tensión de rigidez dieléctrica hasta llegar a 1 500 voltios durante un minuto.

Máquina	Tensión de prueba en V	Medida de rigidez dieléctrica	Resultado de la medida	Resistencia de fallo
Transformador monofásico	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	primario y masa	*	
	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	secundario y masa	*	
	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	primario y secundario	*	

(\*) No se ha disparado el medidor de rigidez dieléctrica.

Tabla 4.8. Medida de rigidez dieléctrica en una máquina eléctrica.

• **Contesta:**

- a) Comprueba mediante fórmula si el resultado de la medida está dentro de lo normalizado.
- b) Identifica una perforación provocada.



Bobinados de máquinas  
de corriente continua



## 5.1 Introducción a las máquinas de corriente continua (CC)

Las **máquinas rotativas** de corriente continua se clasifican en generadores (dinamos) y en motores eléctricos de CC. Son **máquinas reversibles**, es decir:

- El motor convierte la energía eléctrica en mecánica.
- El generador o dinamo convierte la energía mecánica en energía eléctrica en forma de corriente continua.

Su movimiento es rotativo, por lo que su principio de funcionamiento está basado en los principios de inducción y par electromagnético.

En el generador, el **movimiento giratorio** es suministrado por una fuente de energía mecánica exterior aplicada al eje; de esta forma conseguimos en el interior de la máquina un movimiento entre los conductores y el campo magnético de la misma, produciéndose una energía eléctrica que obtenemos de los bornes.

En el motor, al contrario que en el generador, se suministra en bornes la energía eléctrica a los conductores y al campo magnético de la máquina, con el fin de provocar un movimiento giratorio y, por lo tanto, producir una energía mecánica.

Tanto en el caso del generador como del motor, la relación entre un campo magnético y los conductores de la máquina nos lleva al punto de partida del principio de funcionamiento de una máquina eléctrica de corriente continua, basado en la **inducción electromagnética**.

Podemos observar en la perspectiva de la máquina de la Figura 5.1 las partes detalladas de una máquina de corriente continua. En estas máquinas, el circuito inductor y el circuito inducido están muy diferenciados tanto en la ubicación dentro de la máquina como en las funciones de cada una de las partes.

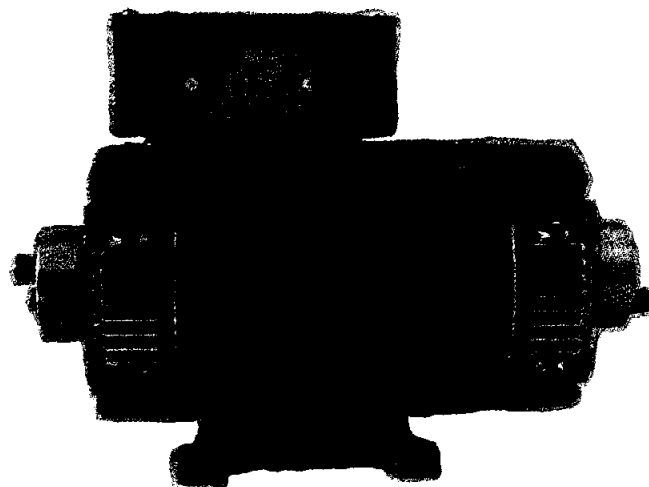


Fig. 5.2. Aspecto exterior de una máquina de corriente continua.

## 5.2 Análisis del circuito inductor de las máquinas de corriente continua

Las partes de una máquina eléctrica (bobinados, masas polares, etc.) cuya función es producir la corriente de excitación, y por lo tanto el campo magnético del inductor, se llaman generalmente **polo inductor** o **de excitación**, desde el punto de vista eléctrico.

En el desarrollo del apartado vamos a ir conociendo cada una de las partes que configuran tanto el circuito magnético como el circuito eléctrico del inductor o estator.

### A. Circuito magnético: polos, bobinados polares, circuito inductor y polaridad

Las partes de la máquina que corresponde al circuito inductor son aquellas que se encuentran en la parte fija de la misma; reciben el nombre de **estator** desde el punto de vista mecánico.

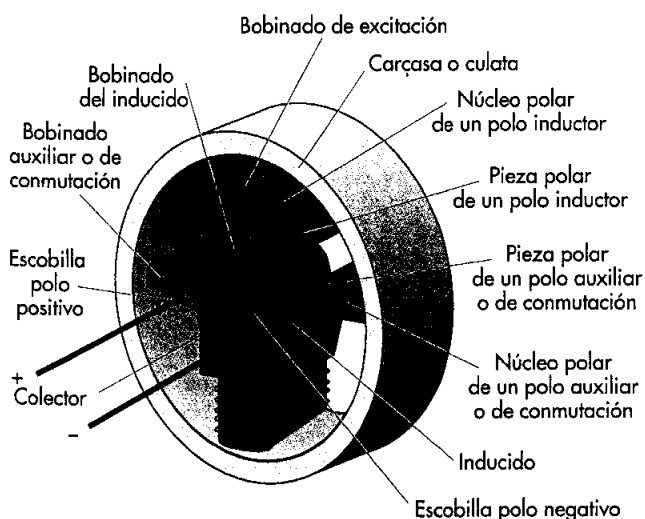


Fig. 5.1. Partes esenciales de una máquina de corriente continua.

El inductor o estator está constituido por los elementos que se indican a continuación, que aparecen representados en parte en la Figura 5.1.

### Carcasa o culata

No sólo es soporte de todos los elementos de la máquina, sino que sirve de retorno a los flujos creados por los bobinados auxiliares o de excitación. La carcasa o culata está fabricada en acero fundido o laminado (Fig. 5.1).

### Núcleo polar de un polo inductor

Son masas magnéticas donde va alojado el bobinado de excitación; son, preferentemente, chapa de acero dulce, y se unen a la carcasa mediante pernos con posibilidad de poderse desmontar (Fig. 5.1).

### Pieza polar de un polo inductor

Llamada también **expansión polar**, es la parte más cercana al inducido que rodea en parte a éste (Fig. 5.3), e impide su contacto por medio del entrehierro.

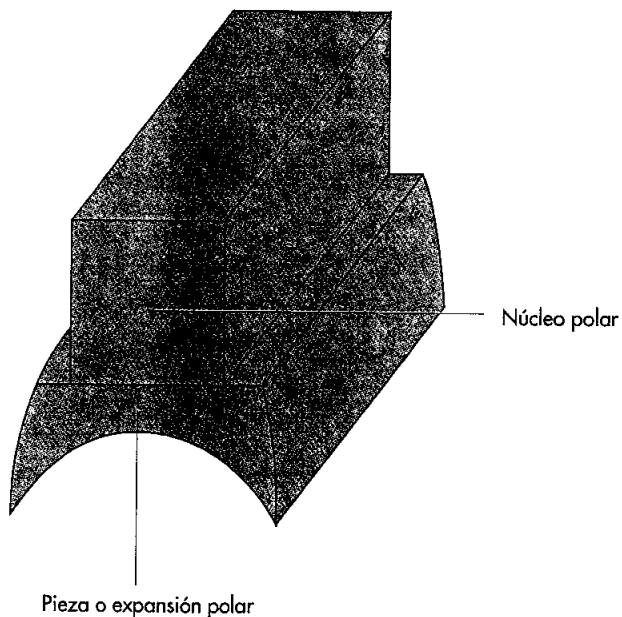


Fig. 5.3. Núcleo y pieza polar de un polo inductor de una máquina de corriente continua.

Esta pieza aprovecha mejor el paso del flujo magnético que llega desde el inductor al inducido, como se puede apreciar en la Figura 5.4.

Mediante la expansión polar se reduce considerablemente la reluctancia magnética y, por consiguiente, el flujo de dispersión y las pérdidas magnéticas.

### Recuerda

Tanto en el caso del generador como del motor, la relación entre un campo magnético y los conductores de la máquina hace que se produzca un movimiento circular, basado en la inducción electromagnética.

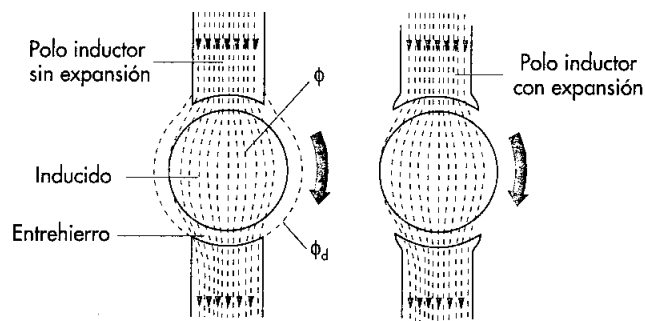


Fig. 5.4. Mejora del flujo inductor.

### Núcleo polar de un polo auxiliar o de conmutación

Es el núcleo magnético donde va situado el bobinado auxiliar. Está constituido por chapa de acero dulce y, como el núcleo polar, está unido a la carcasa mediante pernos desmontables; su colocación en la máquina eléctrica está entre los polos inductores.

### Pieza polar de un polo auxiliar o de conmutación

Al igual que la pieza polar de un polo de excitación, éste es para el polo auxiliar, pero con dimensiones más reducidas, como se puede comprobar en la Figura 5.3.

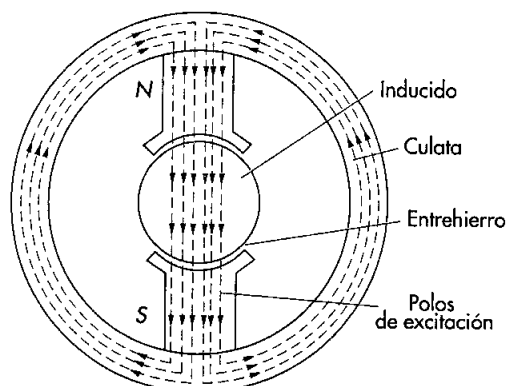


Fig. 5.5. Circuito magnético de una máquina.

### Entrehierro

El entrehierro es el espacio de aire que existe entre el circuito magnético del bobinado inductor y el circuito magnético del bobinado inducido. Este espacio deberá ser lo más pequeño posible para impedir la dispersión de flujo y mejorar el rendimiento de la máquina (véase Figura 5.5).

### Bobinados de excitación o bobinado inductor

El bobinado de excitación es el que produce en el estator el campo magnético cuyo flujo crea las **corrientes inducidas** en el inducido o rotor. En las Figuras 5.7 y 5.8 podemos observar cómo están conectadas las bobinas de excitación interiormente en una máquina bipolar y tetrapolar, respectivamente.

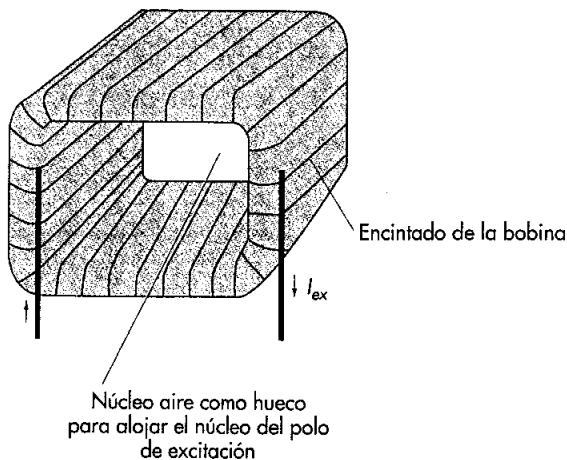


Fig. 5.6. Bobina de excitación o inductora.

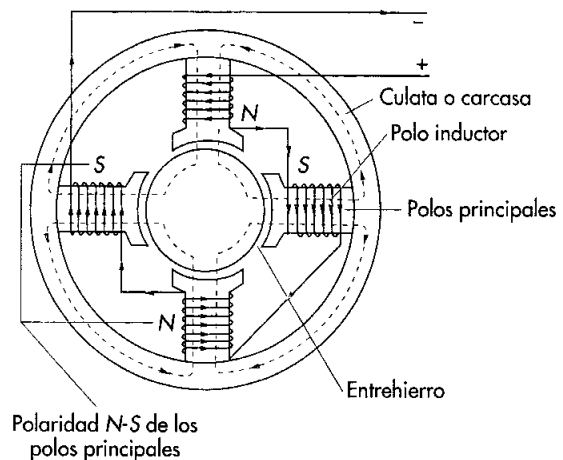


Fig. 5.8. Conexión interna de las bobinas de excitación de una máquina tetrapolar.

### Bobinados auxiliar o de conmutación

El bobinado auxiliar va conectado en serie con el bobinado inducido, que es un polo magnético suplementario y destinado a mejorar la conmutación.

Estos bobinados realizan una función muy importante para el buen funcionamiento de la máquina, ya que las chispas provocadas en el colector en el momento de la conmutación de delgas, debido a la fuerza electromotriz de autoinducción, se pueden evitar produciendo otra fuerza electromotriz igual pero de sentido contrario, que se induce desde el exterior, en la bobina, durante el proceso de conmutación.

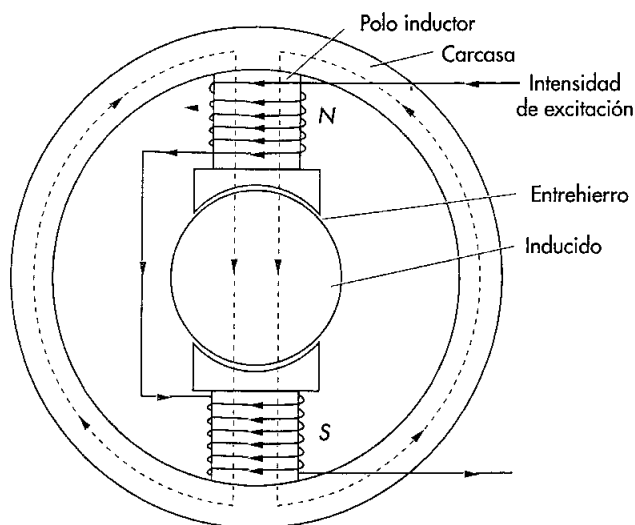


Fig. 5.7. Bobina de excitación o inductora.

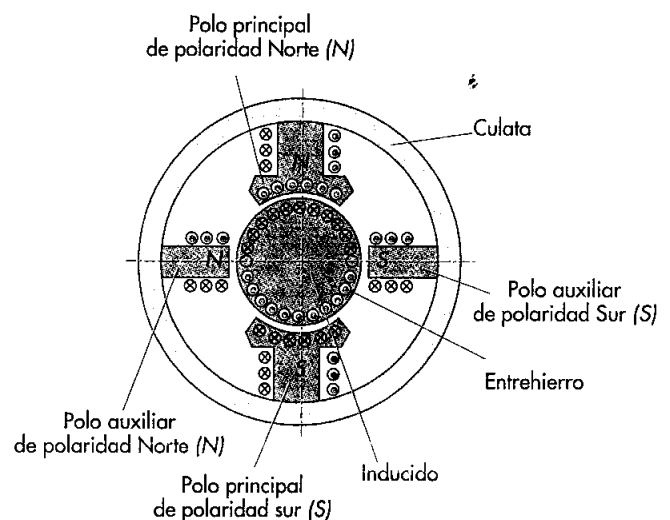


Fig. 5.9. Máquina bipolar con polos auxiliares o de conmutación (polos auxiliares en horizontal).

## 5.3 Excitación de las máquinas de corriente continua

Los diferentes métodos de conectar los bobinados de excitación con el bobinado del inducido de una máquina de corriente continua nos permiten modificar las formas de funcionamiento, ya sean las conexiones a modo de motores o de generadores. Estudiaremos, por su forma de excitación, los más utilizados en la práctica:

- Excitación independiente.
- Autoexcitadas:
  - Excitación en serie.
  - Excitación *shunt*.
  - Excitación *compund*.

### A. Máquinas de excitación independiente

Son máquinas que, a través de una fuente de energía eléctrica de corriente continua exterior, alimentan el bobinado de excitación, produciendo en él el campo magnético necesario para inducir corriente al rotor y producir los efectos que la máquina deberá realizar, bien sea a modo de motor o de generador. El inconveniente de esta máquina es que necesita una fuente exterior para su excitación, lo que hace que su utilización sea limitada.

### B. Máquinas autoexcitadas

Son máquinas cuya fuente de alimentación al bobinado de excitación llega a través del inducido; de ahí el nombre de «autoexcitadas».

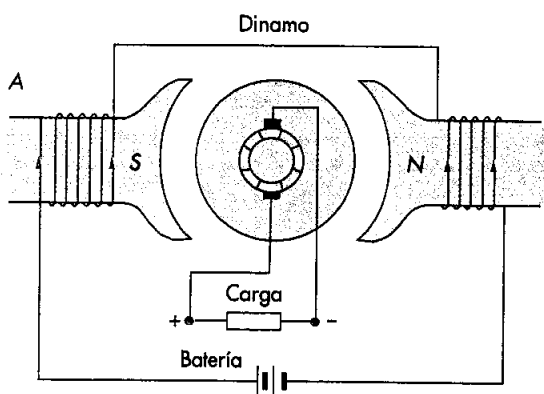


Fig. 5.10. Esquema de un generador de CC de excitación independiente.

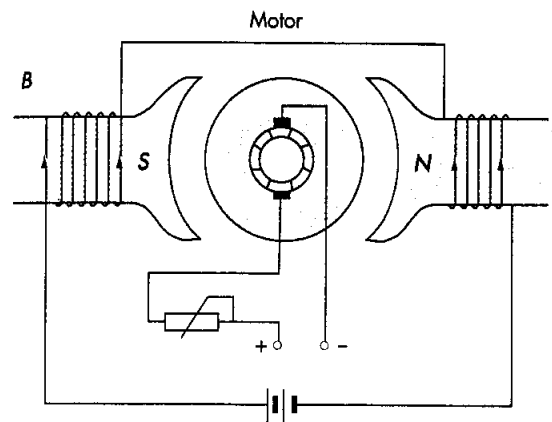


Fig. 5.11. Esquema de un motor de CC de excitación independiente.

En los generadores, el flujo inicial de excitación se produce por el fenómeno de la **histéresis**, es decir, que al quedar magnetismo remanente retenido en las masas polares de la máquina, se crea un flujo magnético que hace que el inducido pueda moverse dentro del campo magnético, generando así la fuerza electromotriz necesaria.

En el caso de los motores, el bobinado de excitación se alimenta a través de la red de corriente continua, fuente habitual para su funcionamiento.

### Máquina de excitación en serie

La característica exterior de la máquina de excitación en serie como generador es su elevada inestabilidad, pues varía considerablemente la tensión cuando se altera la carga. No se emplea como generador de tensión constante, sino como máquina adicional para mantener constante la tensión al final de la línea. La conexión del bobinado inductor está en serie con el bobinado inducido.

Como motor no tiene estabilidad; se embala en vacío y puede producir destrozos mecánicos en la propia máquina. En cuanto a la carga, llega a pararse al sobrepasar la plena carga.

El motor de excitación en serie tiene un buen par de arranque y se suele utilizar en grúas, montacargas, etc.

En las Figuras 5.11 y 5.12, podemos ver los esquemas de montaje de un generador y un motor de excitación en serie.

### Máquina de excitación shunt o derivación

Es una máquina que, trabajando como generador, tiene la característica exterior de ser bastante estable en el suministro de la energía, aunque no tanto como las de excitación independiente. En esta máquina, el bobinado in-

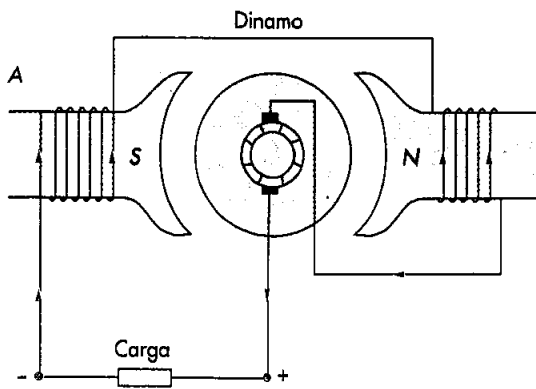


Fig. 5.12. Esquema de un generador de CC de excitación en serie.

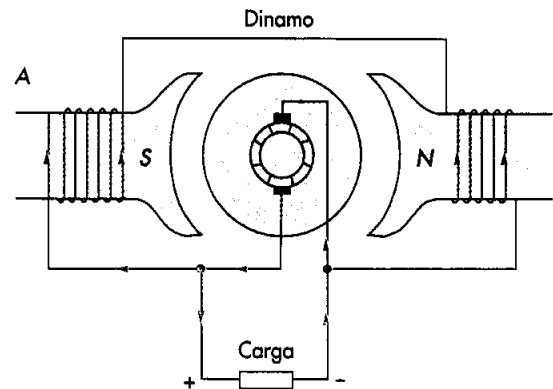


Fig. 5.14. Esquema de un generador de CC de excitación shunt.

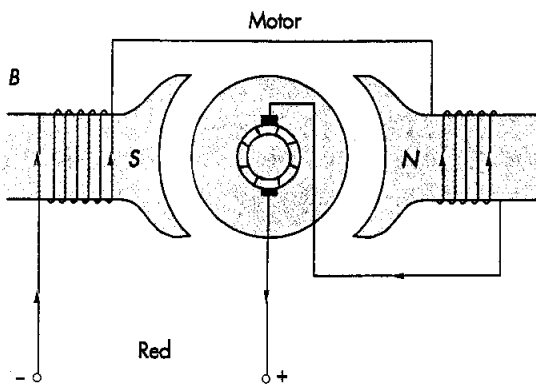


Fig. 5.13. Esquema de un motor de CC de excitación en serie.

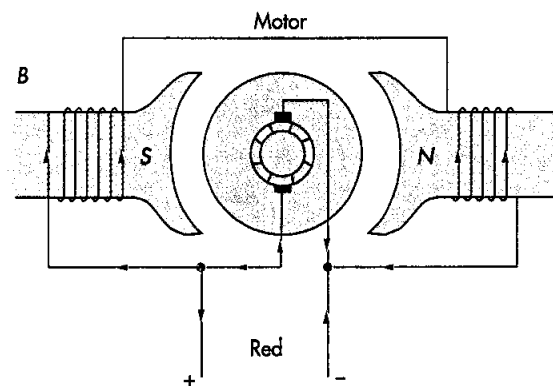


Fig. 5.15. Esquema de un motor de CC de excitación shunt.

ductor va conectado en derivación con los bornes del inducido.

Es el generador más utilizado, por ser constante su tensión en bornes y porque soporta bastante bien los cortocircuitos de la línea. Se utiliza como cargador de batería de acumuladores, como generador auxiliar, etc.

Como motor tiene la característica de ser bastante estable a cualquier carga, ya que el motor *shunt* está alimentado por tensión constante. En las Figuras 5.14 y 5.15, podemos ver los esquemas de montaje de un generador y un motor de excitación *shunt*.

### Máquina excitación compund

Este generador consta de dos bobinados inductores, uno en serie y otro en derivación con el inducido; de ahí también el nombre de máquina *compund* (compuesta) o mixta. En las Figuras 5.16 y 5.17, podemos ver los esquemas de montaje de un generador y de un motor de excitación *compund*.

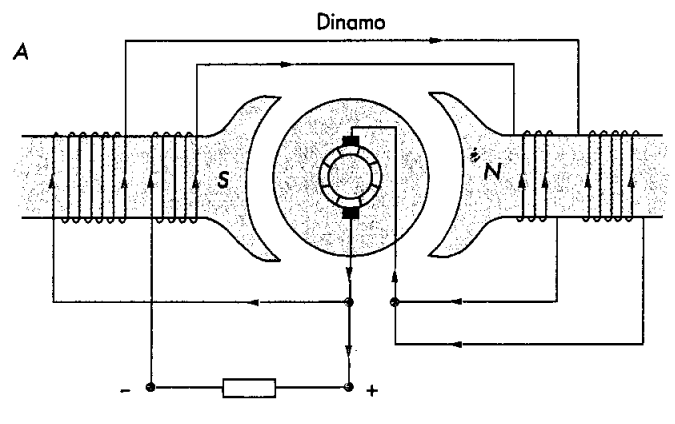


Fig. 5.16. Esquema de un generador de CC de excitación compund.

Esta máquina reúne las características de la conexión serie y las de conexión *shunt*, por lo que mejora bastante las deficiencias de las anteriores.

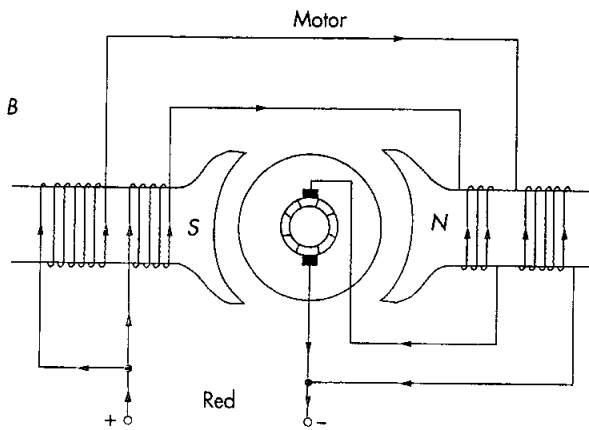


Fig. 5.17. Esquema de motor de CC de excitación compund.

## 5.4 Análisis del circuito inducido de una máquina de corriente continua

El circuito inducido lleva consigo una serie de elementos conectados entre sí que hacen posible que la máquina realice su función. A continuación se cita cada uno de estos elementos y la función que desempeñan.

### A. Inducido

El inducido, también llamado **rotor**, es la parte de la máquina que gira y donde va colocado el bobinado inducido. Está formado por chapas magnéticas aisladas entre sí por un barniz. Su eje está introducido en unos cojinetes que le sirven de soporte.

Existen tres tipos de inducidos: el **de anillo**, el **de disco** y el **de tambor**. El que vamos a estudiar es el que se utiliza generalmente, el inducido o rotor de tambor, que aloja unos huecos llamados ranuras (*K*) donde se coloca el bobinado que se conectará con el colector.

### B. Colector

Es un cilindro adherido al eje del inducido donde va conectado el bobinado inducido por medio de unas pletinas de cobre aisladas entre ellas por una capa de mica.

En las delgas se conectan los principios y finales de cada espira del bobinado inducido. Su material es el cobre.

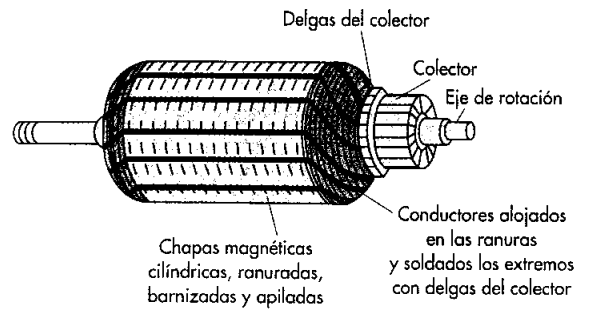


Fig. 5.18. Inducido de tambor montado completo.

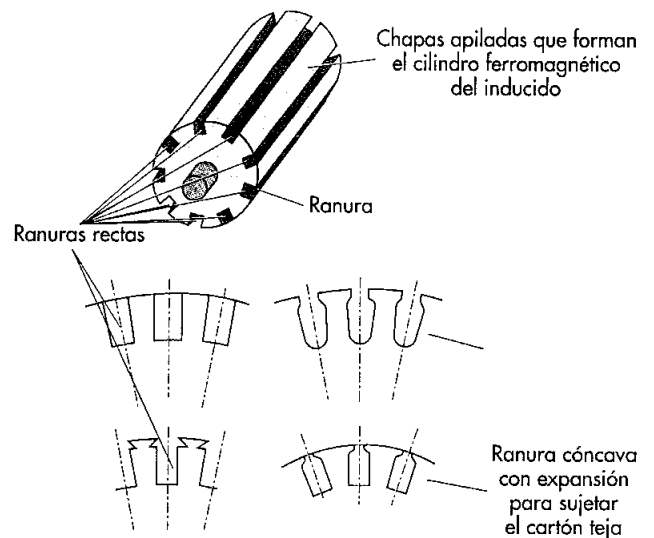


Fig. 5.19. Núcleo magnético del rotor y diferentes tipos de ranuras del inducido.

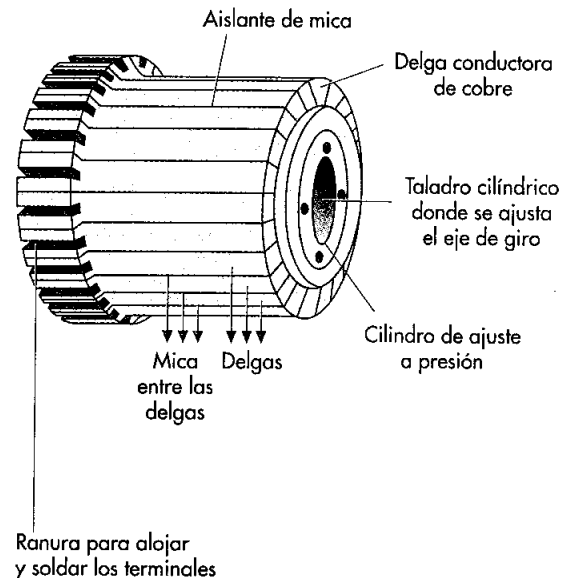


Fig. 5.20. Colector de delgas.



## C. Escobillas

Las escobillas son piezas fijas compuestas por mezcla de diferentes tipos de carbón. Esta mezcla las hace especialmente resistentes para que puedan soportar el rozamiento con el colector pero sin llegar a dañarlo. Como conexión entre el circuito inductor y el circuito inducido está el punto de acoplamiento entre la parte móvil y la parte fija de la máquina.

Van alojadas en un **portaescobilla** que las mantiene por medio de un resorte, bien por muelle o por otro mecanismo con la presión necesaria para que se realice el contacto satisfactoriamente.

Las escobillas pueden ser de diferentes formas y tamaños en función del tipo de portaescobilla que tenga la máquina y la potencia de la misma.

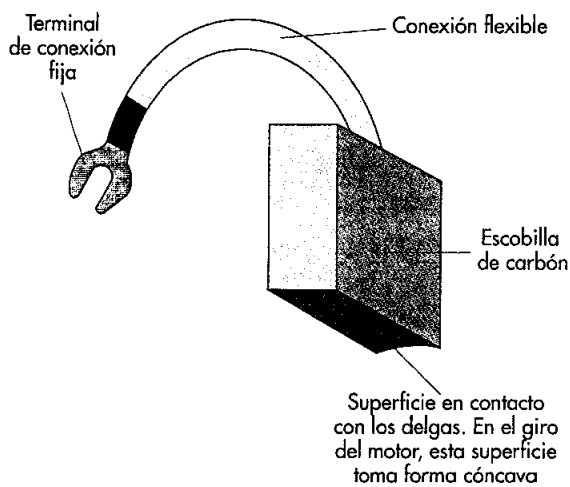


Fig. 5.21. Escobilla de carbón.

## 5.5 Elementos relativos a los bobinados del rotor

El rotor, como parte móvil de la máquina eléctrica, es el elemento que sostiene el bobinado inducido entre sus ranuras, además del colector de delgas. Ambos elementos están contruidos en cobre. En la Figura 5.20 se puede observar el colector y las partes que lo componen.

### Bobina

La bobina es un número determinado de espiras conectadas entre sí que forman en torno al núcleo magnético el circuito inducido de la máquina.

La bobina consta de una parte activa que se encuentra en el interior de la ranura y que se llama **sección inducida (S)**; la parte que se encuentra en el exterior de la ranura y en los lados activos se llama **cabeza de bobina**. Las bobinas suelen construirse con uno o varios hilos de cobre, y en algunos casos con pletinas.

Pueden concurrir en una misma ranura dos o tres secciones inducidas; esto supone tantos finales de bobina como secciones inducidas coincidan en una misma ranura, y tantos principios como secciones inducidas tenga la máquina; es decir, que si una bobina tiene cuatro extremos libres, deberá tener dos secciones inducidas.

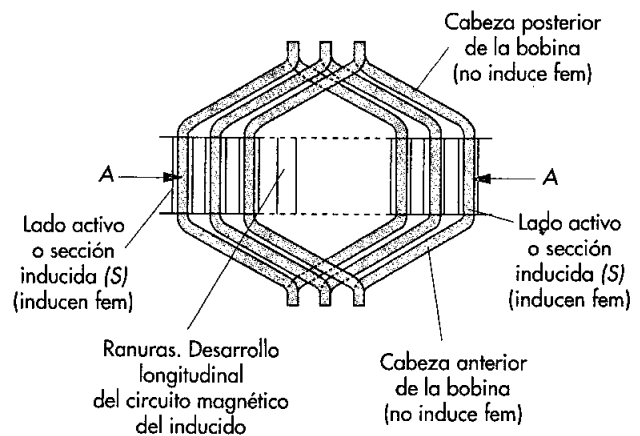


Fig. 5.22. Grupo de bobinas del inducido.

Los inducidos se construyen generalmente de dos capas, es decir, dos secciones por ranura; por lo tanto, en cada ranura deberán entrar dos haces activos de bobina, que se colocarán de manera que un lado de la bobina quede en la parte interior de la ranura, y el otro lado, en la parte superior de la ranura que le corresponda (véase Figura 5.23).

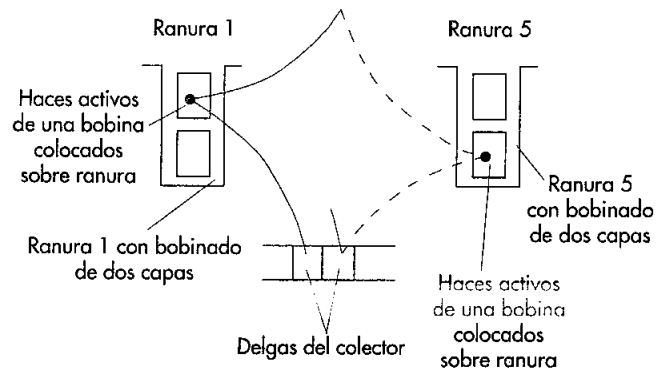


Fig. 5.23. Colocación de las bobinas en las ranuras en bobinado de dos capas.

## 5.6 Condiciones del bobinado inducido

En este apartado vamos a ver cada uno de los conceptos necesarios para poder elaborar los diferentes tipos de esquemas de bobinados inducidos.

### A. Paso polar. Ancho de bobina. Características

El **paso polar** es la distancia que hay entre los ejes de dos polos contiguos y, por lo tanto, de diferente polaridad. El paso polar se obtiene mediante la siguiente fórmula:

#### Fórmula 5.1

$$Y_p = \frac{K}{2p}$$

Donde:

$Y_p$  = paso polar

$K$  = número de ranuras del inducido

$2p$  = número de polos de la máquina

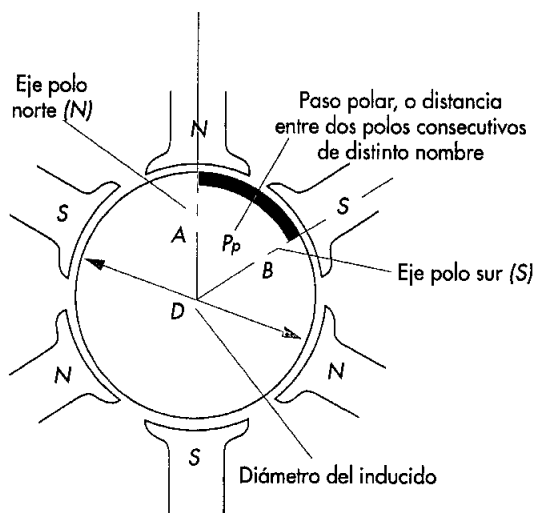


Fig. 5.24. Determinación del paso polar ( $P_p$ ) de una máquina hexapolar.

El **ancho de bobina** ( $Y_k$ ), como su nombre indica, es la anchura que tiene la bobina calculada en ranuras. Determinaremos el ancho de bobina contando desde la ranura posterior a donde se encuentra introducido el primer lado activo hasta donde se encuentra introducido el segundo

lado activo de la bobina, incluido éste. En la Figura 5.25 podemos observar el ancho de bobina.

Un lado activo de la bobina se encuentra en un polo, y el otro lado activo en el polo siguiente de signo contrario. El ancho polar será aproximadamente igual al paso polar.

#### Fórmula 5.2

$$Y_k \cong Y_p$$

Donde:

$Y_k$  = ancho de bobina

En el caso de la Figura 5.25, el ancho de bobina o paso polar será:  $Y_k \cong Y_p = 6$

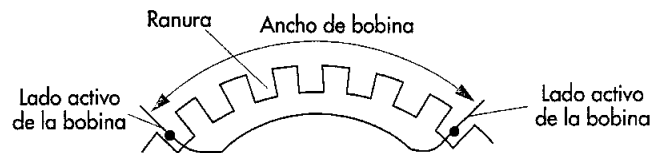


Fig. 5.25. Ancho de bobina.

El **paso de ranura** no se debe de cambiar salvo cuando se den los casos siguientes:

- El ancho de bobina se podrá alargar o acortar en las máquinas que tengan polos auxiliares si el paso polar es fraccionario; se alargará o acortará la parte complementaria que necesite para que el valor sea un número entero.
- Cuando la máquina no tiene polos auxiliares, sólo se puede alargar hasta completar el valor entero del ancho de bobina, es decir, la parte de la fracción hasta completar el valor entero del ancho polar.

### B. Ancho de sección

Como podemos comprobar en la Figura 5.26, el **ancho de sección** es la distancia medida en secciones inducidas entre dos lados activos de una misma sección. En la Fórmula 5.3 podemos calcular el ancho de sección.

#### Fórmula 5.3

$$Y_1 = Y_k \cdot U$$

Si  $U$  es el número de secciones inducidas:

El ancho de sección de la Figura 5.26 (a), con un ancho polar de 4, será de:

$$Y_1 = Y_k \cdot U = 4 \cdot 2 = 8$$

El ancho de sección de la Fig. 5.26 (b), con el mismo ancho polar, será de:

$$Y_1 = Y_k \cdot U = 4 \cdot 3 = 12$$

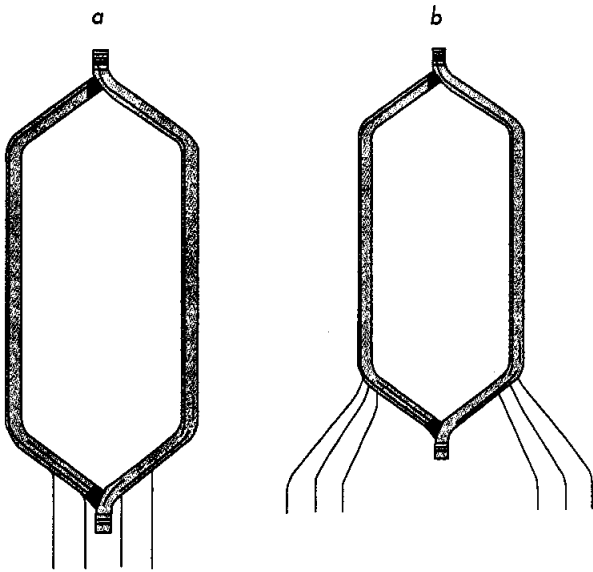


Fig. 5.26. Bobina de bobinado imbricado de dos secciones inducidas (a). Bobina de bobinado ondulado con tres secciones inducidas (b).

### C. Bobinados imbricados y ondulados

El bobinado imbricado se caracteriza por hacer retroceder la parte final de la bobina una vez que entra en la ranura y buscar la delga siguiente a la que se conectó la anterior bobina (véase Figura 5.27). El paso de colector en este tipo de bobinado será de  $\pm 1$ ;  $+1$  será el avance progresivo, y  $-1$  el regresivo.

### D. Conexión de las bobinas. Bobinados cerrados

El paso de conexión es el número de ranuras que hay que saltar desde el haz activo final de una bobina y el principio del haz activo de la bobina a la que se conectará por medio del colector; se representa por la letra  $Y_2$  (véanse las Figuras 5.27 y 5.28).

Todos los bobinados de corriente continua son cerrados, por lo que no deberá quedar ningún extremo libre.

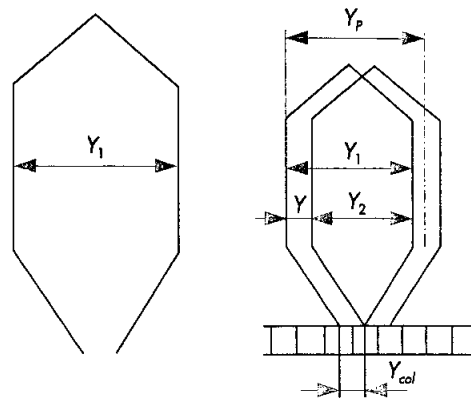


Fig. 5.27. Paso de conexión de un bobinado imbricado.

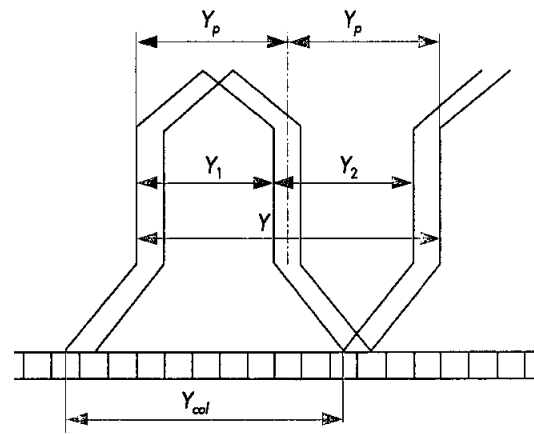


Fig. 5.28. Paso de conexión de un bobinado ondulado.

### E. Paso resultante

El paso resultante es la suma resultante del ancho de sección y del paso de conexión.

Se puede expresar también como la distancia que hay entre principios de dos haces activos consecutivos. Se indica con la letra  $Y$ . Se puede observar en la Figura 5.27 para un bobinado imbricado, y en la Figura 5.28, para un bobinado ondulado.

### F. Paso de colector

El paso de colector es la distancia en delgas que existe entre las delgas donde está conectada el principio de una sección inducida y la delga donde se conecta el final de la misma (véase la Figura 5.27 para un bobinado imbricado y la Figura 5.28 para un bobinado ondulado).

El paso de colector tiene el mismo valor que el paso resultante.

**Fórmula 5.4**

$$Y_{col} = Y$$

Siendo  $Y = Y_1 - Y_2$

**5.1 Clasificación y características de los bobinados imbricados simples**

El bobinado imbricado es el más antiguo de los bobinados inducidos utilizados en las máquinas de corriente continua; es el más usado y también el más didáctico por su comprensión y disposición de las bobinas.

El bobinado imbricado se caracteriza por hacer retroceder la parte final de la bobina una vez que entra en la ranura para buscar la delga siguiente a la que se conectó la anterior bobina, formando de esta manera **bucles**.

Como podemos comprobar en la Figura 5.29, en un bobinado imbricado los terminales de una misma bobina convergen por estar conectados en delgas contiguas.

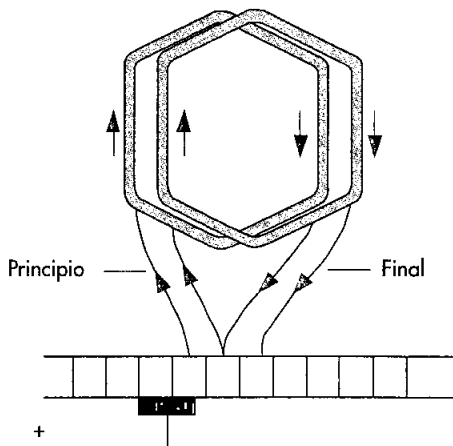


Fig. 5.29. Disposición de las bobinas en un bobinado imbricado.

derecha, y la corriente circula por él en el sentido de las agujas del reloj.

El bobinado imbricado regresivo o cruzado se caracteriza por que su desplazamiento es hacia la izquierda; esto hace que el haz activo que termina su recorrido se cruce con el principio del haz activo de su propia bobina, puesto que va buscando la delga anterior (véanse las Figuras 5.30 y 5.31).

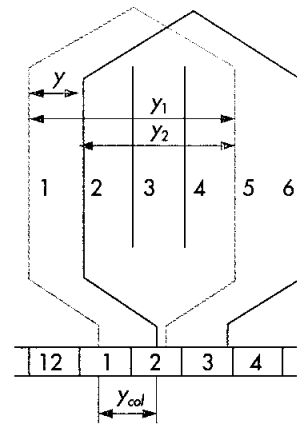


Fig. 5.30. Esquema simplificado de un bobinado imbricado progresivo.

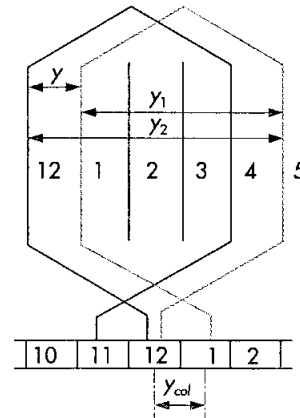


Fig. 5.31. Esquema simplificado de un bobinado imbricado regresivo.

**A. Tipos. Progresivos y regresivos**

Estos tipos de bobinados, también llamados «sin cruzar» y «cruzados», respectivamente, se diferencian en que el bobinado imbricado progresivo va desplazándose hacia la

**B. Número de ramas en paralelo. Condiciones**

Como hemos estudiado anteriormente, el número de escobillas que tiene una máquina de corriente continua es igual al número de polos de que dispone. Pues bien, el bobinado del inducido formará tantas ramas en paralelo como polos tenga la máquina.

### Fórmula 5.5

$$2a = 2p$$

Donde:

$2a$  = número de ramas en paralelo

$2p$  = número de polos

### C. Número de delgas del colector

Sabemos que en una delga llega un final de una sección inducida y un principio de otra sección inducida. Por cada bobina, sabemos que puede haber una, dos o tres secciones inducidas; por tanto, por cada sección inducida deberá haber una delga. El número de delgas del colector también deberá ser múltiplo del número de pares de polos.

### Fórmula 5.6

$$D = S = K \cdot U$$

Donde:

$D$  = número de delgas

$S$  = número total de secciones inducidas

$K$  = número de ranuras

$U$  = número de secciones inducidas por cada bobina

### D. Paso de escobillas

El número de escobillas que deberá tener una máquina de corriente continua coincidirá con el número de polos del bobinado. Teniendo en cuenta las delgas del colector, podremos calcular el número de escobillas, como nos indica la siguiente fórmula:

### Fórmula 5.7

$$N_{esc} = \frac{D}{2p}$$

En una máquina que tenga cuatro polos, el número de escobillas será de cuatro, dos de una polaridad y dos de otra, y se conectarán entre sí las escobillas de la misma polaridad, como podemos ver en la Figura 5.32.

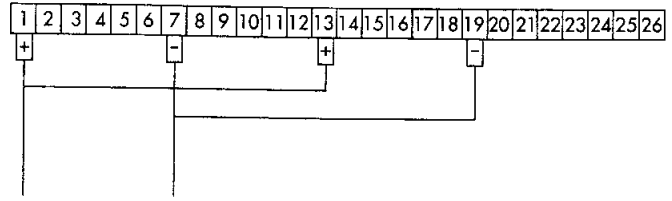


Fig. 5.32. Distribución y conexión de las escobillas en el colector de delgas.

### E. Conexiones equipotenciales

Se ha observado en las máquinas de bobinados imbricados que cuando los flujos que recorren los distintos circuitos magnéticos son muy diferentes, las causas que fomentan esta alteración son:

- **Diferencia en el entrehierro** en determinados puntos, al recorrer el rotor los diferentes polos de la máquina; esto puede ser debido al rozamiento del rotor por una mala mecanización, al desgaste excesivo de los cojinetes, a un mal montaje del rotor, etc.
- Diferentes materiales o secciones en el circuito magnético, que producen una **descompensación** tanto magnética como física.
- **Diferentes flujos magnéticos** producidos por bobinas que, aun con un número de espiras iguales, tengan un diámetro de hilo diferente en algunas bobinas, pero tan aproximado que no se note la diferencia (defecto de fábrica o rebobinado).

En los bobinados imbricados, al conectar las escobillas del mismo signo entre sí, al existir desequilibrio en los flujos de las bobinas, pueden producirse extracorrientes o corrientes de compensación en los contactos con las escobillas y, por tanto, causar averías. Esto obliga a utilizar conexiones equipotenciales, que consisten en pequeñas resistencias que producen corriente de compensación entre ellas sin pasar por las escobillas. En caso de que la máquina no tuviera ninguna descompensación, el efecto de las conexiones equipotenciales sería nulo.

El número de conexiones equipotenciales ( $N_{eq}$ ) corresponde al cociente que resulta entre el número de ranuras ( $K$ ) y el número de pares de polos de la máquina; viene expresado por la siguiente fórmula:

### Fórmula 5.8

$$N_{eq} = \frac{K}{p}$$

Por esto, el número de bobinas equipotenciales ( $B_{eq}$ ) será:

**Fórmula 5.9**

$$B_{eq} = K$$

Y el paso equipotencial ( $Y_{eq}$ ) deberá ser igual al cociente que resulta entre el número de ranuras y el número de pares de polos.

**Fórmula 5.10**

$$Y_{eq} = \frac{K}{p}$$

### 5.8 Aplicación de los bobinados múltiples. Características

Los bobinados imbricados múltiples se utilizan en máquinas de gran potencia que superan los 400 amperios; esto supone en una máquina de bobinado simple de reducido número de polos, que deberá tener unos conductores excesivamente grandes y un número de delgas muy pequeño, y si la velocidad es alta al ser reducido en número de polos, la tensión en las delgas puede alcanzar valores inadmisibles.

Para evitar estos inconvenientes sin necesidad de aumentar el número de polos, se aumenta el número de pares de derivaciones en el inducido mediante el empleo de varios bobinados imbricados sencillos.

### 5.9 Análisis del proceso de cálculo de un bobinado imbricado

El siguiente cálculo de los bobinados será sobre los bobinados imbricados simples de tipo progresivo o no cruzado, que son los más utilizados generalmente.

#### A. Datos necesarios para el cálculo

El proceso para realizar el cálculo de los bobinados de corriente continua ha de ser ordenado, como sigue:

• **Datos necesarios:**

- Número de ranuras ( $K$ ).
- Número de polos ( $2p$ ).
- Número de secciones por bobinas ( $U$ ).
- Progresivo o regresivo.
- Con conexiones equipotenciales o sin conexiones equipotenciales.

• **Posibilidad de ejecución:**

El cociente que resulte entre el número de ranuras y el número de pares de polos deberá ser número entero para que se pueda realizar.

$$\frac{K}{p} = N.^\circ \text{ entero}$$

• **Paso de ranuras:**

Deberá ser como se indicó anteriormente: el paso de ranura  $Y_k$  igual al paso polar  $Y_p$ , alargándose o acortándose si existen polos auxiliares.

$$Y_k = Y_p \text{ (aproximadamente)}$$

• **Número de delgas del colector:**

Este tipo de bobinado se construye generalmente de dos capas, siendo  $B = K$ . Sabiendo que el número de delgas ( $D$ ) son las mismas que el número de secciones inducidas ( $S$ ), si cada bobina tiene un número ( $U$ ) de secciones, el número de delgas valdrá:

$$D = S = U \cdot K$$

• **Al ser un bobinado progresivo, el paso de colector será:**

$$Y_{col} = +1$$

En caso de ser regresivo, el paso de colector será:

$$Y_{col} = -1$$

• **Ancho de sección:**

$$Y_1 = Y_k \cdot U$$

• **Paso de sección:**

$$Y_2 = Y_1 - Y_{col}$$

• **Paso de escobilla:**

$$Y_{esc} = \frac{D}{2p}$$

Con los datos obtenidos y calculado, se confeccionará el esquema.

## 10 Diseño de un bobinado imbricado simple

A la hora de realizar el bobinado o rebobinado de una máquina, tenemos que partir del diseño del esquema para realizar el montaje de cada una de las bobinas.

A continuación vamos a diseñar varios esquemas de bobinados imbricados simples con diferentes tipos de representación esquemática.

### A. Representación circular, rectangular y simplificada

Los esquemas de los bobinados se representan de varias maneras. Vamos a realizar sobre un mismo bobinado las representaciones para que se pueda entender e interpretar y más tarde poderlo ejecutar.

En los esquemas de las Figuras 5.33 y 5.34, se puede ver un sistema de representación no ortodoxo pero que clarifica bastante la distribución y las conexiones del bobinado.

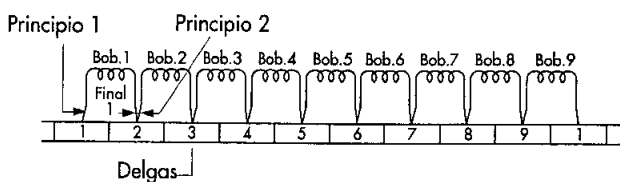


Fig. 5.33. Esquema lineal de un bobinado simple.

Como podemos ver, tenemos un bobinado simple de nueve bobinas y un colector con nueve delgas. El final de cada bobina y el principio de la siguiente van conectados a la misma delga. El final de la última bobina va conectado con el principio de la primera en la misma delga.

Los siguientes esquemas están representados de la manera convencional.

Vamos a representar los diferentes esquemas del bobinado de un inducido de 12 bobinas; por lo tanto, de 12 delgas. El número de ranuras es de 12 y su polaridad es de 4 polos.

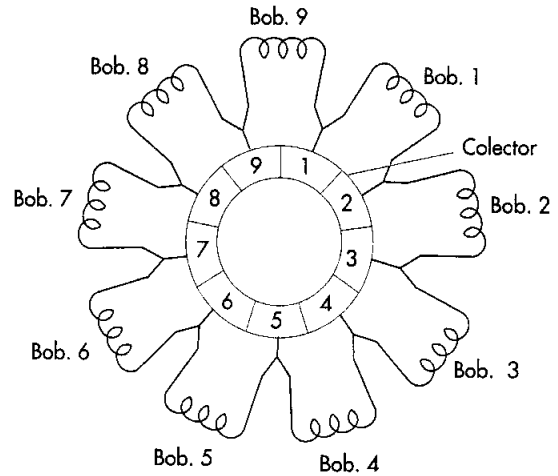


Fig. 5.34. Esquema circular de un bobinado simple.

El trazado del esquema se puede realizar perfectamente del modo circular, como vemos en la Figura 5.35; las secciones inducidas están representadas en su posición real por puntos a igual distancia distribuidos por todo el contorno del inducido.

Los hilos del bobinado que salen del colector se dibujan con líneas continuas, mientras que los que vuelven hacia la delga siguiente se pueden dibujar con líneas de trazos; no es éste el caso, pero está bastante extendido. El sistema de representación de la Figura 5.35 es muy complejo de realizar, pero bastante eficaz para su interpretación.

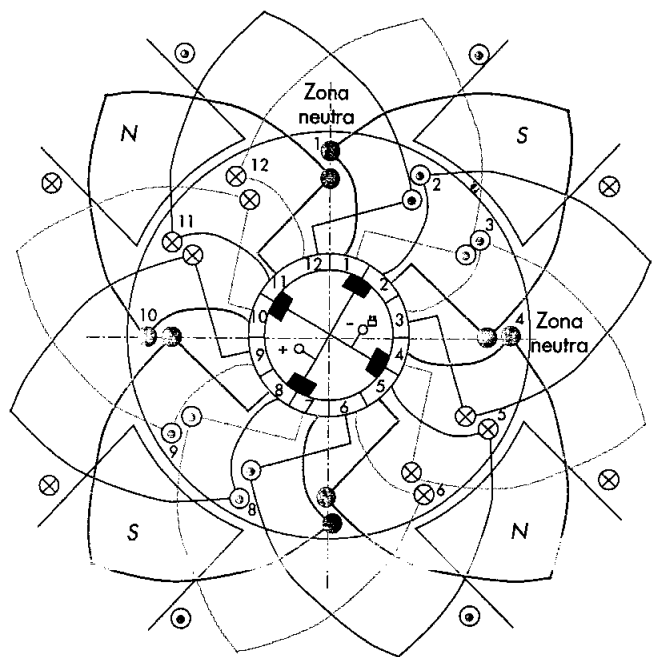


Fig. 5.35. Representación circular del bobinado de un inducido.

Este mismo bobinado puede representarse de manera lineal o rectangular. Esta representación parte del seccionamiento del inducido que se despliega haciendo la parte circular de manera alargada; se observa por ejemplo que las secciones inducidas van paralelas al eje del inducido.

La parte de las bobinas que van en la parte superior de la ranura se representan con líneas continuas; en cambio la parte de las bobinas que van en la parte inferior de la ranura se representan con líneas de trazos, como podemos ver en la Figura 5.36. Este sistema de representación es el más utilizado por la facilidad en cuanto a trazado e interpretación.

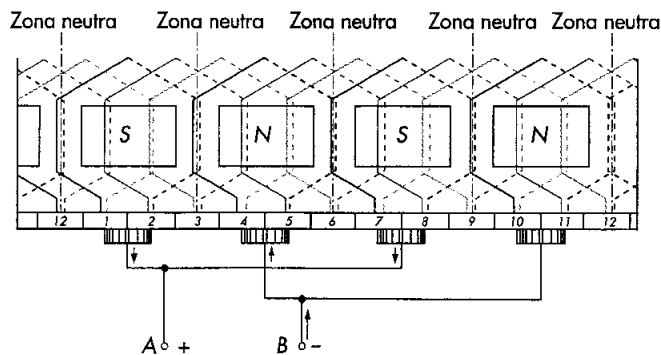


Fig. 5.36. Representación lineal o rectangular del bobinado de un inducido.

La representación de forma simplificada corresponde al trazado de una parte del bobinado, ya que se supone que el resto se conecta de igual manera.

Esta representación generalmente se realiza con una sola bobina montada sobre el colector o bien un grupo de bobinas (véase la Figura 5.37).

Las principales normas, necesarias en cada tipo de bobinado, se pueden resumir de esta manera:

- Cuando la máquina tiene que suministrar fuertes intensidades, se construyen bobinados imbricados simples o dobles.
- Las máquinas destinadas a funcionar con tensiones elevadas estarán dotadas de bobinados ondulados.
- En máquinas de potencia media se emplearán tanto bobinados ondulados como imbricados.

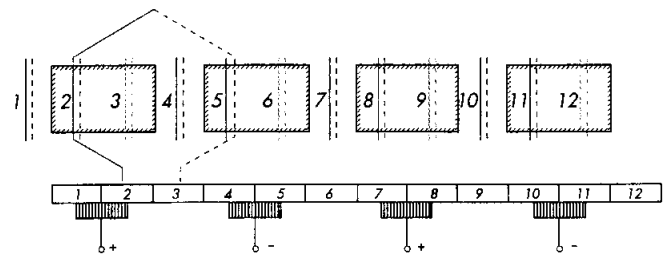


Fig. 5.37. Representación simplificada de un bobinado imbricado.

## B. Indicación de los polos, líneas neutras y escobillas

Como podemos observar en las Figuras 5.35 y 5.36, la indicación de los polos que constituyen la máquina corresponde a cuatro polos, señalizados en la Figura 5.35 en el exterior del inducido por las letras N - S - N - S (norte - sur - norte - sur), así como también podemos ver señalizados los polos con las mismas letras en la Fig. 5.36, en la parte superior del colector.

En el caso de las líneas o zonas neutras, existirán tantas líneas neutras como polos tiene la máquina, ya que cada línea o zona neutra se encuentra entre dos polos de distinto signo.

Las líneas neutras, o zona neutra, están señalizadas por líneas de trazos y puntos, que en este caso, por ser el bobinado tetrapolar, son cuatro y se encuentran entre los polos, como podemos ver también en el esquema lineal o rectangular.

Las escobillas, como se indicó con anterioridad, son tantas como polos tiene la máquina; en este caso por ser la máquina tetrapolar se montarán cuatro escobillas, conectadas entre sí y en paralelo de dos en dos entre signos iguales, como podemos ver en la Figura 5.36.

La representación de los polos se realiza haciendo el seguimiento del recorrido de la intensidad y agrupando las ranuras con el mismo sentido de corriente.

Cada grupo que lleva el mismo sentido de corriente forma un polo, y serán tantos polos como grupos se forman.

En el esquema del Caso práctico 1 (Esquema 5.1) se puede ver el sentido de la corriente y la formación de los polos.

Los polos se forman alternativamente con distinto signo, coincidiendo con el número de polos que tiene la máquina.



## Caso práctico 1

Calcular el bobinado imbricado simple progresivo y dibujar el esquema del inducido de un generador de corriente continua con los siguientes datos:

N.º de ranuras:  $K = 16$

N.º de polos:  $2p = 4$

N.º de secciones inducidas:  $U = 1$

N.º de bobinas:  $B = \frac{K}{2}$

### Cálculo

Posibilidad de ejecución:

$$\frac{K}{P} = \frac{16}{2} = 8$$

(es posible por ser número entero)

Paso de ranuras:

$$Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$

Acortado en una unidad para que se pueda ejecutar.

Paso de bobina:  $1 - 4$

Paso de colector:  $Y_{col} = +1$

N.º de delgas del colector:  $D = S = B \cdot U = 8 \cdot 1 = 8$

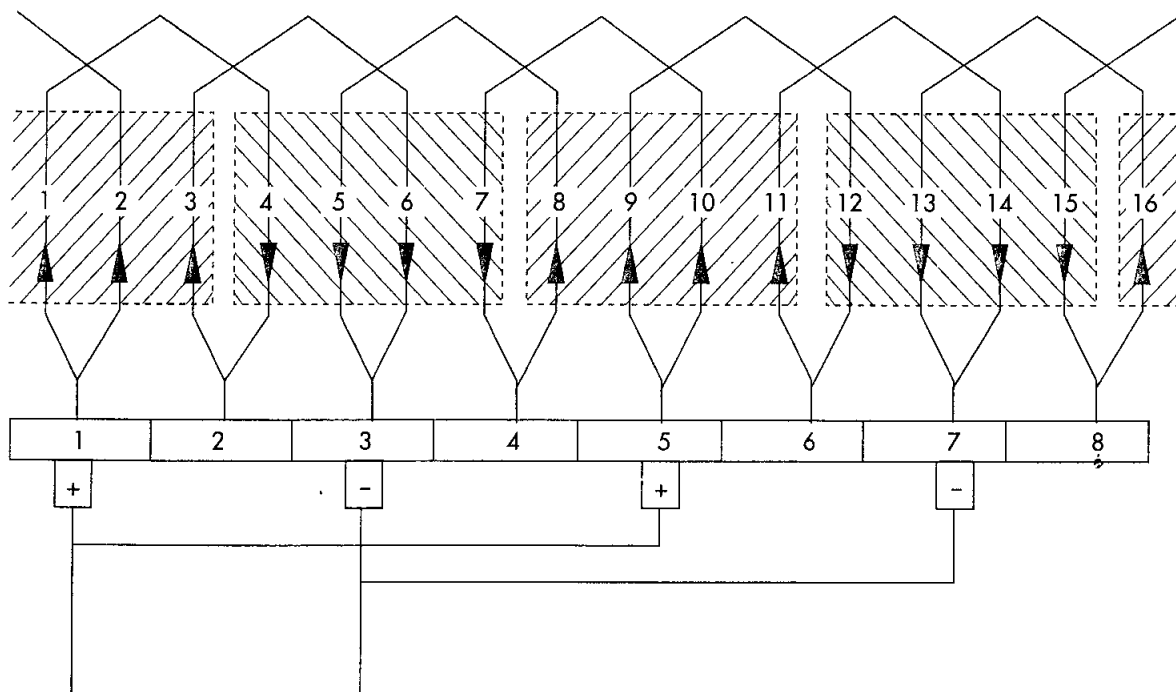
Ancho de sección:  $Y_1 = Y_k \cdot U = 4 \cdot 1 = 4$

Paso de conexión:  $Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 4 - 1 = 3$

Paso de escobillas:

$$Y_{esc} = \frac{D}{2p} = \frac{8}{4} = 2$$

En este esquema se han colocado las escobillas y se han marcado los sentidos de las corrientes y los polos.



Esquema 5.1

Como se puede ver en el Esquema 5.1, cada polo está formado por cuatro ranuras y los polos consecutivos cambian de

polaridad alternativamente. Mediante este esquema se puede comprobar el resultado de cada uno de los datos calculados.

## Caso práctico 2

Este caso práctico se realizará con los mismos datos que el caso práctico anterior, con la diferencia del número de bobinas, para apreciar la diferencia entre ambos.

Calcular el bobinado imbricado simple progresivo y dibujar el esquema del inducido de un generador de corriente continua con los siguientes datos:

N.º de ranuras:  $K = 16$

N.º de polos:  $2p = 4$

N.º de secciones inducidas:  $U = 1$

N.º de bobinas:  $B = K$  (dato diferente)

### Cálculo

Posibilidad de ejecución:

$$\frac{K}{P} = \frac{16}{2} = 8$$

$$Y_{esc} = \frac{D}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$

Paso de ranuras:

$$Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$

En este caso se puede ejecutar sin acortar el paso de ranura.

Paso de bobina:  $1 - 5$

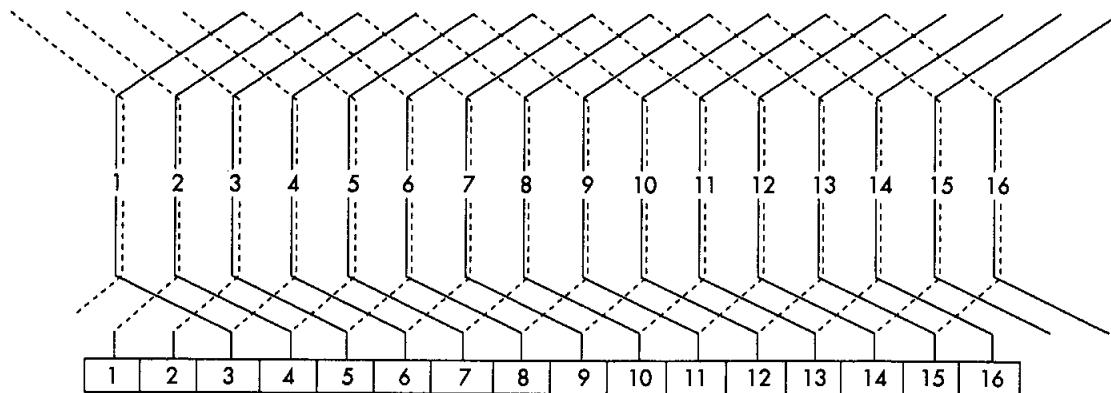
Paso de colector:  $Y_{col} = +1$

N.º de delgas del colector:  $D = S = B \cdot U = 16 \cdot 1 = 16$

Ancho de sección:  $Y_1 = Y_k \cdot U = 4 \cdot 1 = 4$

Paso de conexión:  $Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 4 - 1 = 3$

Paso de escobillas:



Esquema 5.2

## 5.11 Clasificación y características de los bobinados ondulados serie

Quando en una máquina de corriente continua resultan elevadas tanto la tensión en bornes como la velocidad con respecto a la potencia de la misma, es conveniente poner en serie el mayor número de bobinas posibles, ya que todos los bobinados de inducidos forman dos circuitos en paralelo.

Para ser simétricos, todos los circuitos deben ser iguales; llegamos a la conclusión de que la mitad de los grupos del bobinado inducido se pueden conectar en serie.

A los bobinados ondulados también se les llama **bobinados en serie**; poseen dos circuitos en paralelo, es decir, que la mitad de las bobinas se conectan en serie, y éstos entre sí en paralelo.

Estos bobinados son recorridos por la corriente eléctrica a todo lo largo de la periferia del inducido, para lo cual se conectan dos bobinas en serie. Los bobinados ondulados simples no precisan de conexiones equipotenciales.

Las aplicaciones de los bobinados ondulados son muy limitadas.

### A. Tipos progresivos y regresivos

Estos tipos de bobinados, también llamados «cruzados» y «sin cruzar», se diferencian en que el bobinado ondulado progresivo va desplazándose hacia la derecha una vez que ha recorrido toda la periferia del inducido, conectándose en la siguiente delga y circulando la corriente por él en sentido de las agujas del reloj.

El bobinado ondulado regresivo o cruzado se caracteriza por que su desplazamiento es hacia la izquierda, es decir, que una vez que recorre toda la periferia del inducido, se conecta en la delga anterior de la primera conexión (véanse las Figuras 5.38 y 5.39).

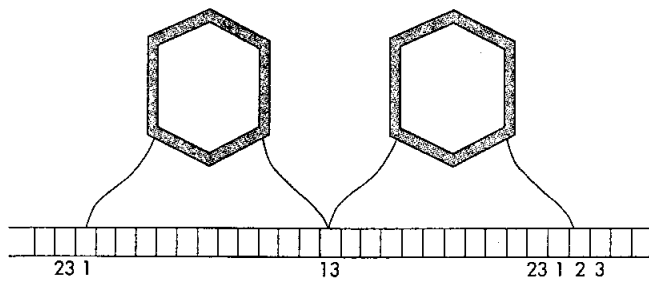


Fig. 5.38. Bobinado ondulado no cruzado.

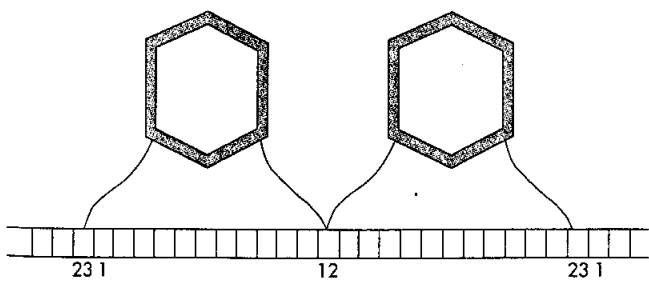


Fig. 5.39. Bobinado ondulado cruzado.

### B. Número de ramas en derivación

En los bobinados ondulados tan sólo se conectan dos ramas en paralelo ( $\alpha = 2$ ), con independencia del número de polos que tenga la máquina. Las conexiones internas del bobinado propician la conexión en paralelo de grupos de bobina, lo que hace innecesarias las conexiones a través de las escobillas, de forma que de salida queda tan sólo una

escobilla para todos los polos del mismo signo, y otra para todos los polos de signo contrario.

### C. Número de escobillas

Sabemos que en cada línea o zona neutra se requiere una línea de escobillas. Dicho esto, cabe añadir que las líneas de escobillas necesarias para un bobinado ondulado simple son dos, y puede poner una por cada polo.

Si queremos saber la distancia en delgas a la que deben estar las líneas de escobillas, aplicaremos la fórmula siguiente:

#### Fórmula 5.11

$$Y_{esc} = \frac{D}{2p}$$

### D. Condiciones del paso del colector

El paso de colector impone unas condiciones que revisaremos partiendo de la fórmula general de los bobinados ondulados.

#### Fórmula 5.12

$$Y_{col} = D \pm \frac{1}{p}$$

Esto exige que el número de delgas y de pares de polos sea primo. Esta condición nos demuestra que los bobinados ondulados simples en serie no se pueden ejecutar completos o normales para cualquier número de secciones:

$$D = S = K \cdot U$$

Por lo tanto, las condiciones que deben cumplir los bobinados ondulados normales serán:

- El número de ranuras del inducido y el número de pares de polos de la máquina serán número primo.
- El número de pares de polos por bobina y el número de secciones inducidas deberán ser número primo.

Para que una máquina, por ejemplo, hexapolar cumpla esta última condición, deben construirse bobinas de 1, 2, 4 y 5 secciones inducidas.

## 5.12 Bobinados ondulados múltiples o serie-paralelas

Si realizamos un bobinado ondulado simple, los diámetros de los conductores que debemos utilizar son excesivos; para evitarlo dispondremos de varios bobinados ondulados simples, con lo que conseguiremos un devanado ondulado múltiple, llamado también serie-paralela.

Sabemos que en un bobinado ondulado simple, la sección inducida que cierra el contorno del inducido se coloca en la delga siguiente a aquella de donde partió la primera sección inducida.

Si una vez completada la vuelta con la sección inducida la conectamos dos delgas más adelante, en la siguiente vuelta del bobinado las conexiones se desplazarán también dos delgas. En la tercera vuelta, conectaremos las secciones inducidas desplazándolas dos delgas más, y así hasta completar el bobinado simple.

En las delgas que se han quedado sin conectar, distribuiremos bobinados ondulados simples, tantos como delgas hayamos desplazado, por lo que se constituirá un bobinado ondulado múltiple.

Las condiciones que estos bobinados deben cumplir son:

- Las fuerzas electromotrices (fem) deberán ser iguales en las distintas ramas en paralelo para evitar corriente de circulación. Para que esta condición se pueda cumplir, el cociente entre el número de pares de polos y el número de bobinados ondulados independientes deberá ser número entero.

### Fórmula 5.13

$$m = \frac{p}{a}$$

Donde:

$m$  = relación de pares de polos y bobinados independientes

$a$  = bobinados independientes

- Las fuerzas electromotrices generadas por los distintos bobinados independientes producen retrasos de unas con respecto a otras; esto nos obliga a colocar conexiones equipotenciales de segunda clase entre los diferentes bobinados.

Para colocar estas conexiones, se deberán disponer distintos puntos en el campo magnético. Esto obliga a que el número de ranuras sea múltiplo exacto del número de bobinados independientes, tal y como se expone en la siguiente fórmula:

### Fórmula 5.14

$$n = \frac{K}{a} = \text{número entero}$$

Donde:

$n$  = relación entre el n.º de ranuras ( $K$ ) y el n.º de bobinados independientes ( $a$ )

- El número de secciones inducidas ( $U$ ) por bobina deberá ser número primo con ( $m$ ) la relación existente entre los pares de polos con el número de bobinados independientes.

### Fórmula 5.15

$$U = m$$

## 5.13 Proceso de cálculo de un bobinado ondulado en serie

A la hora de realizar el bobinado o rebobinado de una máquina, al igual que en los bobinados imbricados, en los ondulados también tenemos que partir del diseño del esquema para realizar el montaje de cada una de las bobinas.

A continuación vamos a diseñar varios esquemas de bobinados ondulados simples con diferentes tipos de representación esquemática.

### A. Datos necesarios para el cálculo

Para el cálculo de un bobinado ondulado simple progresivo o regresivo, el proceso es similar al de los bobinados imbricados. Existen diferencias, que citaremos en la parte de la confección, que sí deberán tenerse en cuenta en el momento de conocer los datos del bobinado que se va a diseñar:

- Los **datos** que debemos conocer para el diseño son:
  - Número de ranuras ( $K$ ).

- Número de polos ( $2p$ ).
- Número de secciones por bobina ( $U$ ).
- Indicar bobinado progresivo o regresivo.
- Conexiones equipotenciales, si las hay.
- Si no se puede realizar de forma normal, indicar si el bobinado es de una sección muerta o tiene cierre artificial.

• **Posibilidad de ejecución.**

Para que un bobinado ondulado se pueda realizar, debemos tener en cuenta las condiciones que se citaron anteriormente y que debemos aplicar.

Sabemos que el cociente entre el número de ranuras y el número de secciones inducidas deberá ser número primo del número de pares de polos:

$$\frac{K}{U} = p$$

En caso de no cumplirse la condición anterior, se realizará el bobinado con una sección muerta o con cierre artificial.

• **Paso de ranuras.**

El paso de ranura deberá ser el mismo que el paso polar, o lo más próximo a él:

$$Y_k \equiv Y_p = \frac{K}{2p}$$

• **Número de delgas del colector.**

Para el bobinado ondulado progresivo o regresivo, el paso de colector será:

$$D = S = K \cdot U$$

También se utiliza esta fórmula cuando el bobinado tiene cierre artificial. Cuando el bobinado tenga una sección muerta, será:

$$D = S = (K \cdot U) - 1$$

• **Paso de colector.**

Para el bobinado ondulado simple y con una sección muerta, el paso de colector será:

$$Y_{col} = \frac{D \pm 1}{p}$$

Para el mismo bobinado pero con cierre artificial, será:

$$Y_{col} = \frac{(D - 1) - 1}{p}$$

• **Ancho de sección.**

$$Y_1 = Y_k \cdot U$$

• **Paso de sección.**

$$Y_2 = Y_1 \cdot Y_{col}$$

• **Paso de escobillas.**

$$Y_{esc} = \frac{D}{2p}$$

## 5.14 Diseño del esquema de un bobinado en serie

A la hora de realizar el bobinado o rebobinado de una máquina, tenemos que partir del diseño del esquema para proceder al montaje de cada una de las bobinas.

A continuación vamos a diseñar varios esquemas de bobinados ondulados con diferentes tipos de representación esquemática.

### A. Representación circular, rectangular y simplificada

Los esquemas de los bobinados ondulados se representan de varias maneras diferentes. Vamos a realizar las representaciones sobre un mismo bobinado para que se pueda entender e interpretar, para después poderlo ejecutar.

Los siguientes esquemas están representados de la manera convencional.

Vamos a representar los diferentes esquemas del bobinado ondulado de un inducido de 13 bobinas y, por lo tanto, de 13 delgas. El número de ranuras es de 13 y su polaridad es de 4 polos.

El trazado del esquema se puede realizar perfectamente de modo circular, como vemos en la Figura 5.40; las secciones inducidas están representadas en su posición real, por puntos a igual distancia, distribuidos por todo el contorno del inducido.

Los hilos del bobinado que salen del colector se dibujan con líneas continuas, mientras que los que vuelven hacia la delga siguiente se suelen dibujar con líneas de trazos.

El sistema de representación de la Figura 5.40, al igual que los bobinados imbricados, es muy complejo de realizar, pero bastante eficaz para su interpretación.

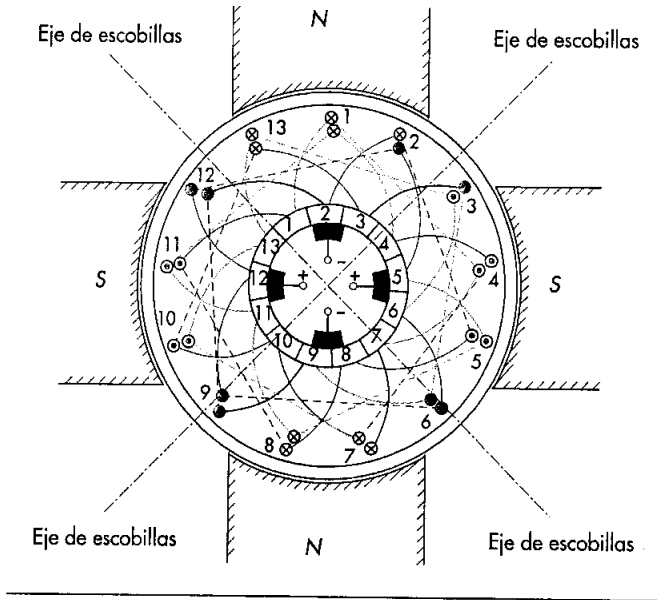


Fig. 5.40. Esquema de un bobinado ondulado circular.

Este mismo bobinado puede representarse de manera lineal o rectangular. Esta representación parte del seccionamiento del inducido, que se despliega haciendo la parte circular de manera alargada; se observa, por ejemplo, que las secciones inducidas van paralelas al eje del inducido.

La parte de las bobinas que va en la zona superior de la ranura se representa con líneas continuas; en cambio, la parte de las bobinas que va en la parte inferior de la ranura se representa con líneas de trazos, como podemos ver en la Figura 5.41. Este sistema de representación es el más utilizado por la facilidad en cuanto a trazado.

Del inducido que se despliega haciendo la zona circular de manera alargada, se observa, por ejemplo, que las secciones inducidas van paralelas al eje del inducido.

La representación de forma simplificada corresponde al trazado de una parte del bobinado; el resto se estructura o se conecta de igual manera; esta representación se realiza generalmente con una sola bobina montada

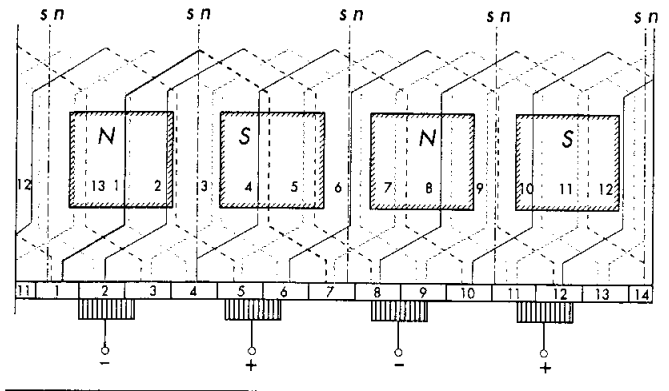


Fig. 5.41. Esquema lineal o rectangular de un bobinado ondulado.

sobre el colector, o bien con un grupo de bobinas (véase la Figura 5.42).

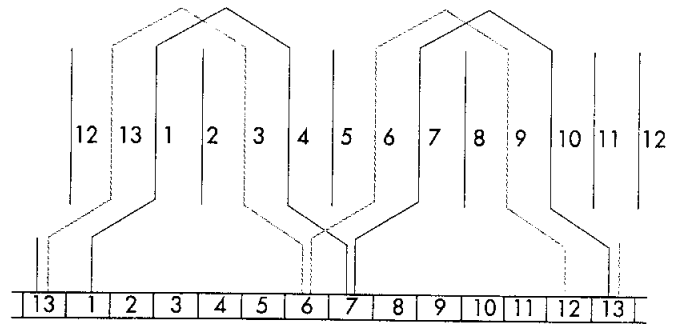


Fig. 5.42. Representación simplificada del bobinado ondulado sin cruzar.

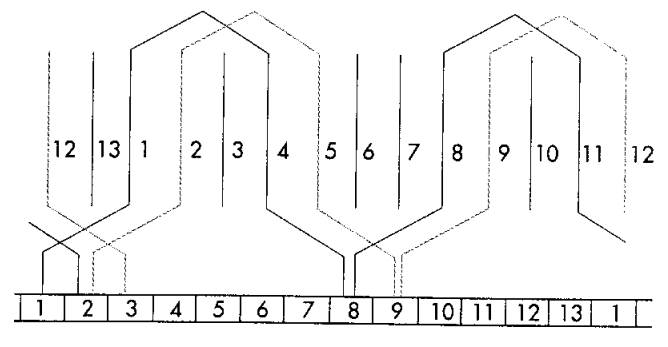


Fig. 5.43. Representación simplificada del bobinado ondulado cruzado.

## B. Indicación de los polos, líneas neutras y escobillas

Como podemos observar en las Figuras 5.40 y 5.41, las indicaciones de los polos que constituyen la máquina se corresponden con cuatro polos, señalizados en la Figura 5.40 en el exterior del inducido por las letras N-S-N-S,

mientras que en la Fig. 5.41 podemos ver señalizados los polos, con las mismas letras en la parte superior del colector.

En el caso de las líneas o zonas neutras, existirán tantas líneas neutras como polos tenga la máquina, ya que cada línea o zona neutra se encuentra entre dos polos de distinto signo. Las líneas neutras, o zona neutra, están señalizadas por líneas de trazos y puntos, que en este caso y por ser el bobinado tetrapolar, son cuatro y se encuentran entre los polos, como podemos ver también en el esquema lineal o rectangular.

Las escobillas, como se indicó con anterioridad, son tantas como polos tiene la máquina; en este caso, por ser la máquina tetrapolar, se montarán cuatro escobillas, conectadas entre sí y en paralelo de dos en dos entre signos iguales, como podemos ver en la Figura 5.41. Las escobillas se pueden reducir a dos en los bobinados ondulado simples, como se ha expuesto anteriormente.

En el siguiente caso práctico, se puede observar cómo van distribuidas las bobinas en el bobinado ondulado de un inducido. En él también se puede señalar el sentido de la corriente para la formación de los polos.

### Caso práctico 3

Calcular el bobinado ondulado simple progresivo y dibujar el esquema del inducido de un generador de corriente continua con los siguientes datos:

N.º de ranuras:  $K = 13$

N.º de polos:  $2p = 6$

N.º de secciones inducidas:  $U = 2$

#### Cálculo

$K = 13 \rightarrow$  número primo de  $p = 3$

$U = 2$

Paso de ranuras:

$$Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{13}{6} \cong 2$$

Paso de bobina:  $1 - 3$

Paso de colector:

$$Y_{col} = \frac{D+1}{p} = \frac{26+1}{3} = 9$$

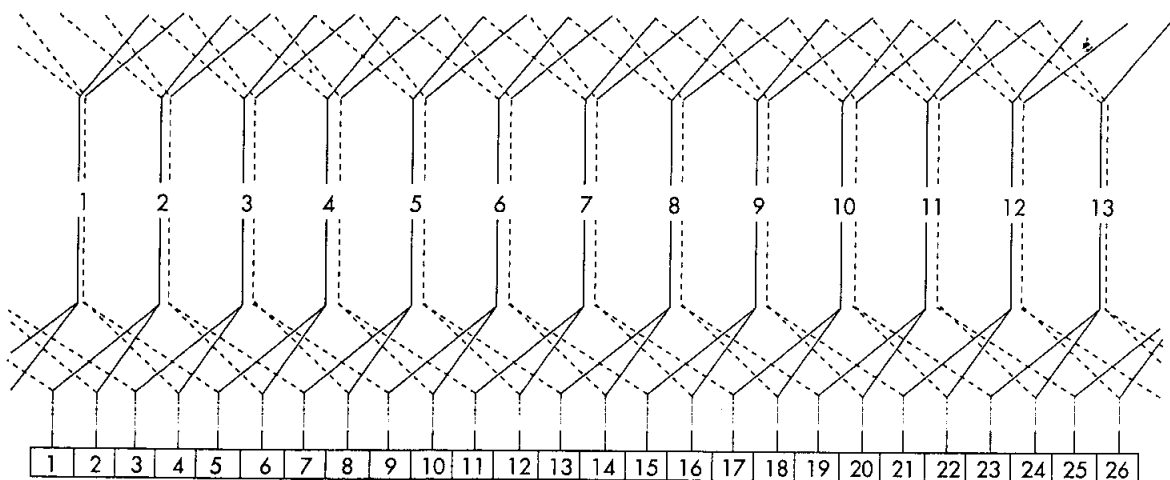
N.º de delgas del colector:  $D = K \cdot U = 13 \cdot 2 = 26$

Ancho de sección:  $Y_1 = Y_k \cdot U = 2 \cdot 2 = 4$

Paso de conexión:  $Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 9 - 4 = 5$

Paso de escobillas:

$$Y_{esc} = \frac{D}{2p} = \frac{26}{6} \cong 5$$



Esquema 5.3

## Caso práctico 4

Calcular el bobinado ondulado simple progresivo y dibujar el esquema del inducido de un generador de corriente continua con los siguientes datos:

N.º de ranuras:  $K = 18$

N.º de polos:  $2p = 6$

N.º de secciones inducidas:  $U = 2$

Una sección muerta.

### Cálculo

$K = 18$  y  $p = 3 \rightarrow$  no son números primos

$U = 2$

Puesto que el número de ranuras y los pares de polos no son números primos, la ejecución del bobinado será con una sección muerta.

Paso de ranuras:

$$Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{18}{6} = 3$$

Número de delgas del colector:

$$D = (K \cdot U) - 1 = (18 \cdot 2) - 1 = 36 - 1 = 35$$

Paso de colector:

$$Y_{col} = \frac{D + 1}{p} = \frac{35 + 1}{3} = \frac{36}{3} = 12$$

Ancho de sección:

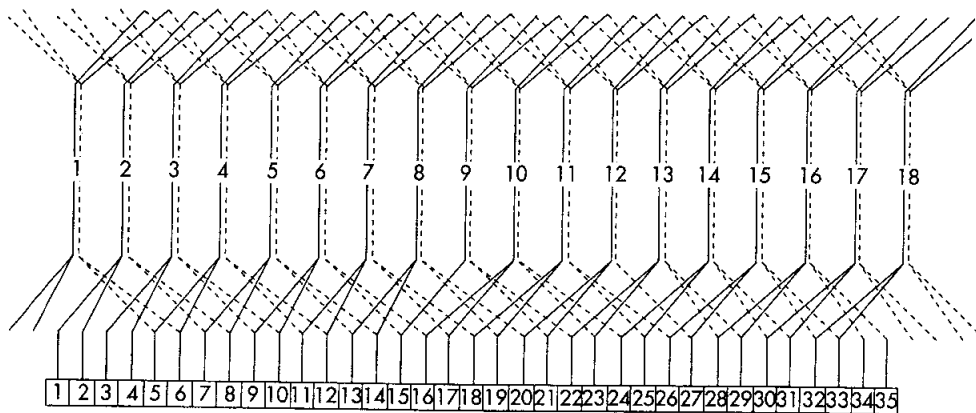
$$Y_1 = Y_k \cdot U = 3 \cdot 2 = 6$$

Paso de sección:

$$Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 12 - 6 = 6$$

Paso de escobillas:

$$Y_{esc} = \frac{D}{2p} = \frac{35}{6} \cong 6$$



Esquema 5.4

## Conceptos básicos

**Bobina:** es un número determinado de espiras conectadas entre sí y que forman, en torno al núcleo magnético, el circuito inducido de la máquina.

**Colector:** es el cilindro adherido al eje del inducido, donde va conectado el bobinado inducido por medio de unas pletinas (delgas) de cobre aisladas entre ellas por una capa de mica.

**Entrehierro:** es el espacio de aire que existe entre el circuito magnético del bobinado inductor y el circuito magnético del bobinado inducido.

**Estator:** desde el punto de vista mecánico, son los componentes que forman la parte fija de la máquina que corresponde al circuito inductor.

**Máquinas autoexcitadas:** son aquellas cuya fuente de alimentación al bobinado de excitación llega a través del inducido; de ahí el nombre de autoexcitadas.

**Polo inductor o de excitación:** desde el punto de vista eléctrico, es la denominación que reciben las partes de una máquina eléctrica (bobinados, masas polares, etc.) cuya función es producir la corriente de excitación y, por lo tanto, el campo magnético del inductor.



**Autoevaluación**

1. ¿En qué parte o partes de la máquina de corriente continua se emplea la chapa magnética?
2. ¿Se puede distinguir entre un generador y un motor de corriente continua a simple vista, sin placa de características? ¿Por qué?
3. Cita tres tipos básicos de generadores de corriente continua que utilicen la constitución de la máquina eléctrica de corriente continua.
4. Define:
  - a) «Autoexcitada».
  - b) «Excitación independiente».
5. Con respecto a la máquina de corriente continua, indica:
  - a) Cuatro partes distintas del rotor.
  - b) Cuatro partes distintas del estator.
6. Explica como se produce la autoexcitación en una dinamo serie, *shunt* y *compund*.
7. ¿Qué función tiene la carcasa de una máquina de corriente continua? ¿Podría funcionar sin ella? ¿Por qué?
8. Explica qué función tienen las escobillas en una máquina de corriente continua.
9. ¿Qué son polos auxiliares y qué función tienen en un generador de corriente continua?
10. ¿Qué dos tipos de bobinados de inducidos se fabrican? ¿Qué diferencias hay entre ellos?

- Identificar el circuito magnético y el circuito eléctrico.
- Describir la aplicación de cada una de las partes de la máquina de corriente continua.
- Identificar, por el tipo de bobinado, si es autoexcitada o de excitación independiente.

• **Medios didácticos:**

- Una máquina de corriente continua de excitación independiente.
- Una máquina de CC de excitación serie.
- Una máquina de CC excitación *shunt*.
- Una máquina de CC excitación *compund*.

• **Procedimiento:**

- 1.º Elección de cualquier máquina de los medios que hay.
- 2.º Desmontar cada uno de los elementos que la constituye.

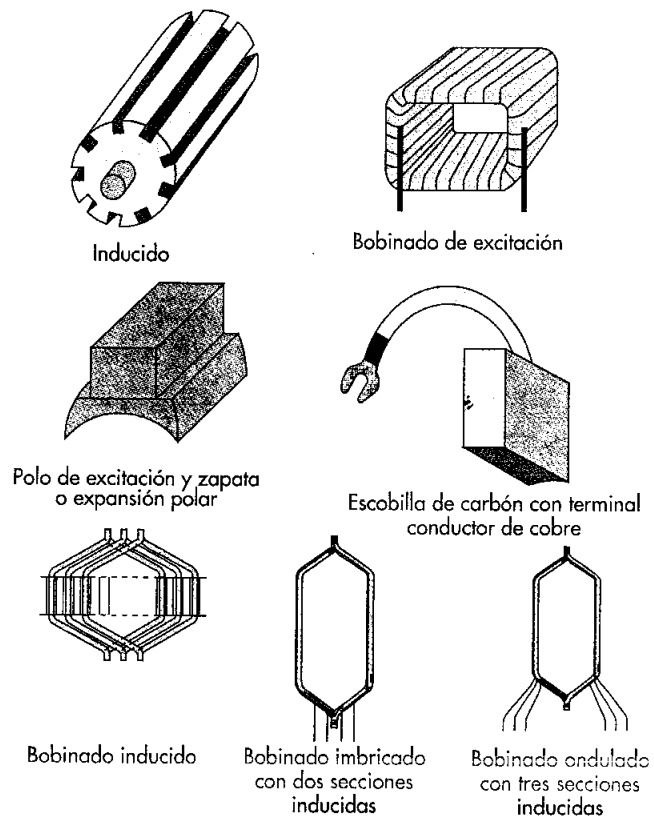


Fig. 5.44. Diferentes elementos de una máquina eléctrica de corriente continua.

**Actividades de enseñanza - aprendizaje**

**11. Definición y características de los elementos que constituyen el circuito inducido de la máquina eléctrica de corriente continua.**

- a) Tipos de rotor, características de las ranuras y necesidad del colector. Relación entre el número de ranuras y de delgas, secciones inducidas.
- b) Características de las bobinas de rotor. Tipos de bobinados.

• **Objetivos:**

- Identificar directamente cada una de las partes de una máquina de corriente continua.

• **Resultados:**

- Se identifica la máquina que se escogió como una máquina de excitación *shunt*.
- Se desmonta el bobinado inductor de la carcasa, el bobinado *shunt* y las escobillas.
- Se identifica las partes del inducido sin desmontar puesto que está hecho un bloque.
- Se estudia la aplicación de cada uno de los elementos de la máquina consultando el texto.

• **Contesta:**

- a) Cita cada una de los elementos de la máquina de corriente continua de la Figura 5.44.
- b) Identifica los elementos que constituyen el circuito magnético.
- c) Identifica los elementos del circuito eléctrico.
- d) Identifica los elementos del circuito inductor.
- e) Identifica los elementos del circuito inducido.
- f) Explica la función de cada una de los elementos citados anteriormente.

**12. Resolución y definición a partir del número de polos, ranuras y secciones inducidas los pasos del bobinado.**

• **Objetivo:**

- Identificar si el bobinado es simple o múltiple, cruzado o sin cruzar.

• **Medios didácticos:**

- Una máquina de corriente continua de excitación independiente.
- Una máquina de CC de excitación serie.
- Una máquina de CC excitación *shunt*.
- Una máquina de CC excitación *compund*.

• **Procedimiento:**

- 1.º Se desmonta cada una de las máquinas de las expuestas en los medios didácticos.
- 2.º Se seleccionan los diferentes inducidos para su observación.
- 3.º Se examina el tipo de bobinado que tiene el inducido por medio de los datos que se pueden obtener tras su estudio.
- 4.º Tras los resultados que se obtienen del estudio de cada uno de los inducidos se realizan los correspondientes esquemas, obtenidos en esquemas que se indican en las Figuras 5.45, 5.46 y 5.47.

• **Contesta:**

- a) ¿Cuáles de los inducidos estudiados son imbricados y cuáles son ondulados?
- b) ¿Hay algún bobinado inducido alargado?, ¿y acortado?, ¿y cruzado?, ¿y no cruzado? Identifícalo y explica por qué.

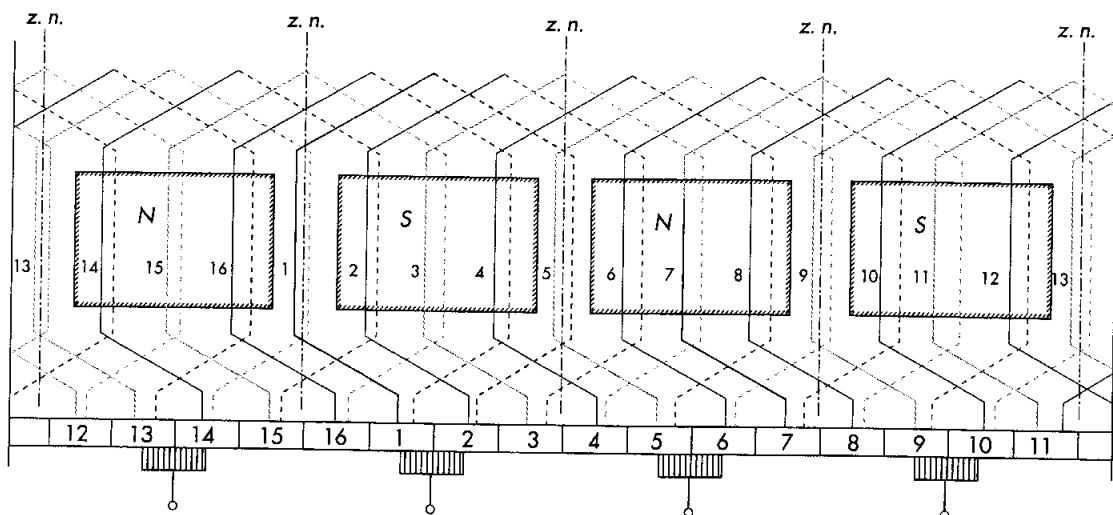


Fig. 5.45. Esquema bobinado del inducido de una máquina de CC.

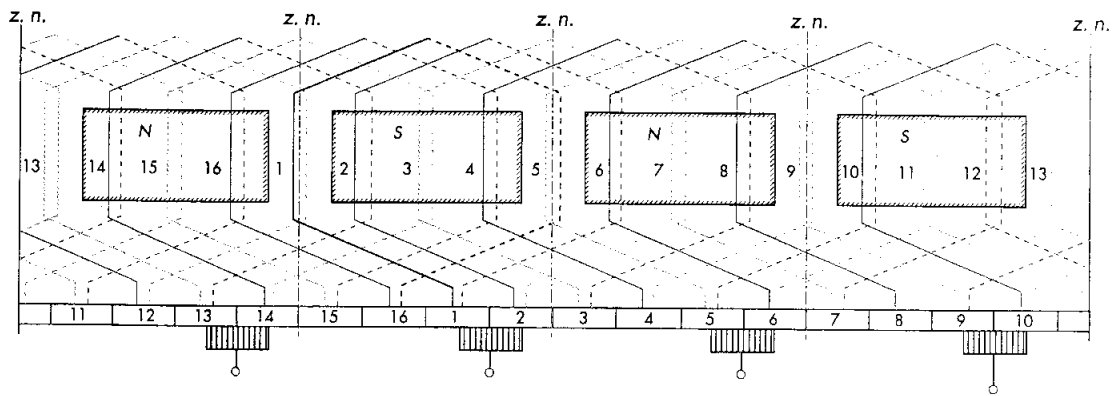


Fig. 5.46. Bobinado inducido de una máquina de CC.

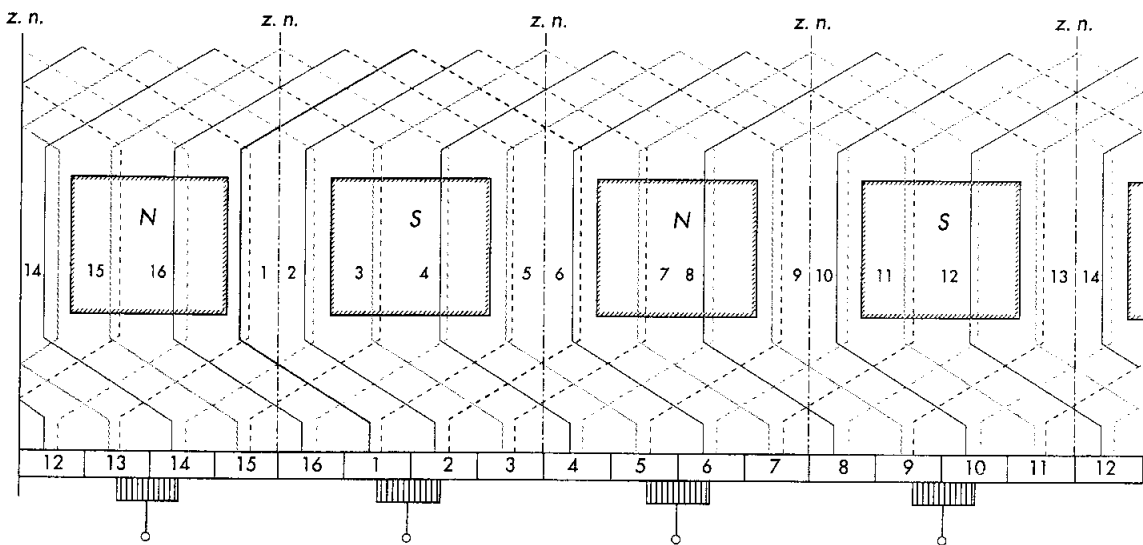


Fig. 5.47. Esquema bobinado del inducido de una máquina de CC.

- c) Según el esquema representado en la Figura 5.47, ¿cómo se identifica el número de polos que tiene un inducido?
- d) Explica las diferencias esquemáticas entre un bobinado imbricado y un bobinado ondulado.
- e) Explica las diferencias entre las aplicaciones de un bobinado imbricado y un bobinado ondulado.
- f) ¿Qué datos son necesarios para el cálculo del bobinado de un inducido?
- g) Según los esquemas de las Figuras 5.45, 5.46 y 5.47, señala los inducidos con bobinado imbricado simple.
- h) ¿Qué es preferible, montar una línea de escobillas o escobillas individuales?



**Mantenimiento de máquinas  
de corriente continua**

**6**



Cada máquina debe contar, además de con un historial de averías, con un plan de mantenimiento preventivo específico.

### A. Procesos utilizados en el mantenimiento preventivo

Los procesos para intervenir en una máquina deberán contar al menos con las siguientes líneas de actuación:

- Planificación.
- Observación.
- Actuación.
- Comprobación.
- Puesta en funcionamiento.

En el mantenimiento preventivo es esencial no realizar paradas de la máquina prolongadas; para ello se realizan comprobaciones específicas.

En los procesos que se han de seguir, hay que diferenciar las actuaciones de mantenimiento con la máquina en funcionamiento y con la máquina parada.

Las intervenciones que se tienen que realizar **con la máquina parada** son las siguientes:

- Limpieza con aspirador o aire seco en las partes internas de la máquina.
- Comprobación de escobillas y portaescobillas.
- Comprobación de la superficie del colector y el contacto con las escobillas.
- Comprobación visual de la uniformidad del entrehierro.
- Comprobación visual del equilibrado del rotor.
- Comprobación de holguras y ajustes en el rotor.
- Comprobación de la placa de bornes, de las conexiones visibles y de la sujeción de las bobinas.
- Medición de puesta a tierra y de resistencias de aislamiento.
- Examen del estado de los aislantes. En caso de estar resquebrajados, se limpiarán, se secarán y se rebarnizarán.
- Comprobación de la maniobra de arranque.
- Comprobación del engrase de los elementos mecánicos.

- Limpieza de los conductos de ventilación.

Las actuaciones que se pueden realizar **con la máquina en funcionamiento**, al no suponer ningún riesgo, son las siguientes:

- Limpieza exterior.
- Comprobación de la ventilación adecuada.
- Comprobación de la temperatura de funcionamiento.
- Observación de ruidos, vibraciones y roces.
- Medición de la tensión de alimentación y la intensidad de funcionamiento, que se contrastarán con las características correspondientes de la máquina.

En la Tabla 6.2, podemos observar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo de un ciclo anual.

### B. Útiles empleados en el mantenimiento de máquinas eléctricas

Son muchos los útiles que se emplean en el mantenimiento de máquinas de corriente continua, pero lo particular de estos útiles es que son en su mayoría confeccionados por el propio equipo de mantenimiento, en función de las necesidades que van surgiendo.

Estos útiles pueden ser: **destornilladores** adaptados a las ranuras del rotor, hojas de sierra preparadas para extraer las cuñas de aislamiento de las ranuras, **hojas de sierra** para cortar los aislamientos, **máquina para decapar** hilo esmaltado, **baquetas** con cerdas de acero para la limpieza de ranuras, **espadines** de nylon para adaptar el hilo esmaltado en la ranura, **maza** de cuero natural que permite golpear y moldear las bobinas, **anillos fijadores** de plástico para agrupar los hilos de las bobinas, etc.

En la Figura 6.1, podemos ver varios útiles fabricados por el mismo equipo de mantenimiento; en muchos casos pueden tener aplicaciones diversas, ya que en el mercado no existen este tipo de útiles.

Para la detección de vibraciones y ruidos, se emplea el **estetoscopio**, aparato que se coloca sobre la carcasa de la máquina y, a través de un conducto, transmite el ruido a los acoples del oído.

Para la medición del calentamiento de la máquina, se utiliza el **termómetro**, al que se le acoplan unas sondas para llegar a diferentes puntos de la máquina. Podemos ver cómo es un termómetro en la Figura 4.12.



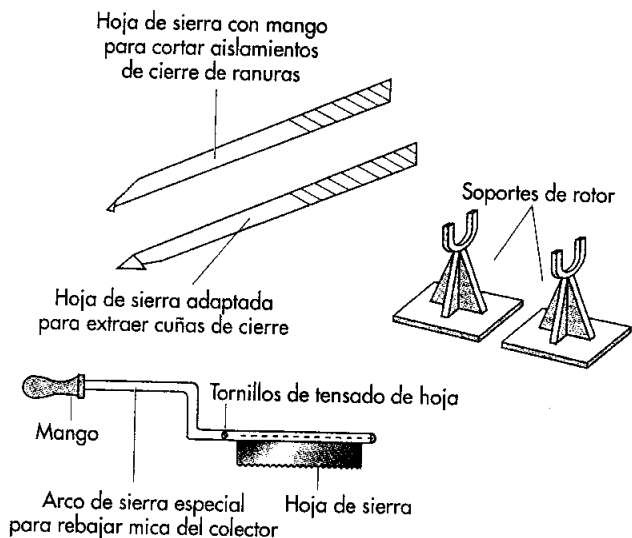


Fig. 6.1. Diferentes útiles empleados en el mantenimiento de máquinas.

### Nivelador

Cuando se acoplan dos máquinas, se utiliza un **nivelador** para la nivelación de los ejes. Se ajustan las varillas del nivelador a los ejes, y cuando sus puntas están alineadas, significa que la nivelación es correcta. En la Figura 6.2 podemos ver como actúa un nivelador.

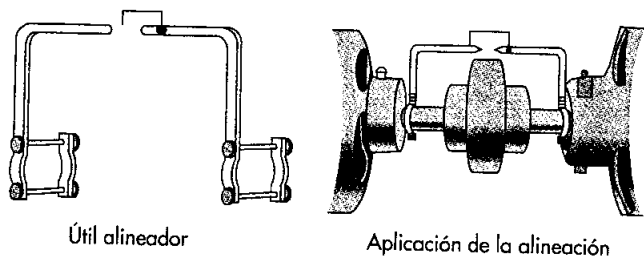


Fig. 6.2. Alineación de máquinas.

Si es necesario detectar la polaridad de los bobinados se emplea la **brújula**, que, colocada cerca del bobinado, capta el campo magnético de la parte del bobinado que se quiere comprobar.

### Extractor de poleas

Es un útil eficaz para la extracción de poleas, cojinetes y tapas de carcasas. Su funcionamiento consiste en acoplar al eje de la máquina el eje del extractor. Con las palas del extractor colocadas en el cojinete, giramos el eje del extrac-

tor provocando la salida de éste del eje de la máquina, como podemos ver en la Figura 6.3.

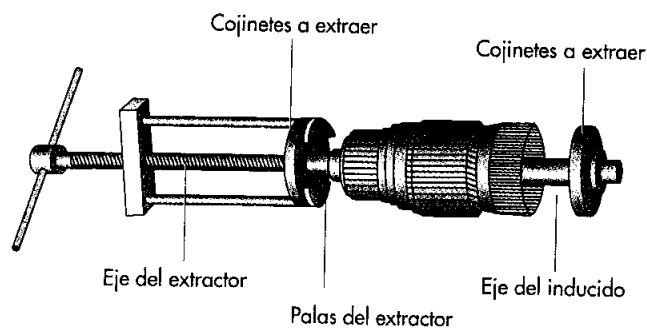


Fig. 6.3. Extracción del cojinete del rotor de una máquina.

### Nivel de burbuja

Es una herramienta utilizada para equilibrar las máquinas en la superficie de trabajo; se emplea para el nivelado tanto horizontal como vertical.

Consiste en una regla que tiene una pequeña ampolla de agua en la que se encuentra una burbuja de aire. Para la correcta alineación, la burbuja de aire deberá estar en el centro de la parte superior del nivel.

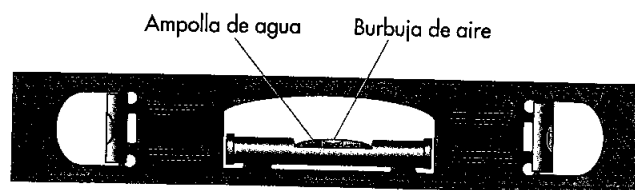


Fig. 6.4. Nivel de burbuja para plano horizontal y vertical.

### Galgas de espesores

Es un conjunto de **pletinas** con espesores exactos para ajustar las uniones de poleas o medir el entrehierro de la máquina. Podemos ver el juego de galgas en la Figura 6.5.

### Molde para ranuras

Es un útil que se emplea para dar al aislante la misma forma de la ranura en la que se aplica. Como podemos ver en la Figura 6.6, una vez confeccionado el aislante que rodea a la ranura, éste se amolda para que ocupe todo el volumen de la misma; de esta forma el hilo entrará en ella con más facilidad.



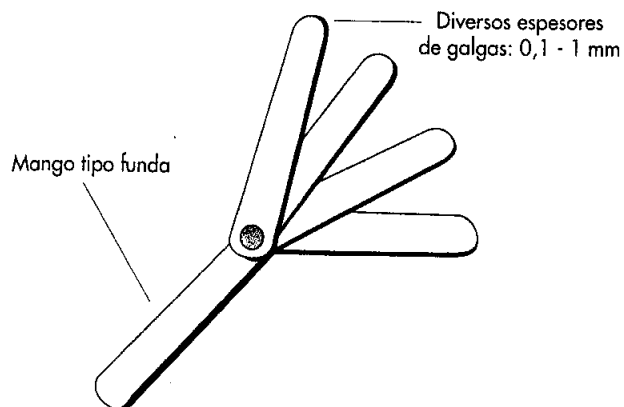


Fig. 6.5. Juego de galgas de espesores.

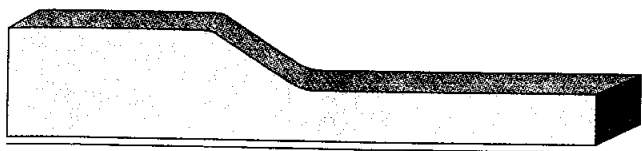


Fig. 6.6. Molde de aislante de ranura.

### C. Máquinas y herramientas empleadas en el mantenimiento de una máquina

Como se ha podido comprobar en la Unidad 1, las herramientas y máquinas utilizadas en el mantenimiento de máquinas son muy específicas: bobinadora eléctrica, bobinadora manual, devanador estático, juego de moldes, comprobador de inducidos o zumbador, comprobador integral de motores eléctricos, bobina taladradora portátil, taladro sensitivo, esmeriladora, etc. En algunos talleres tienen fresadora para la rectificación de inducidos.

En cuanto a **herramientas generales**, no deben faltar:

- Armario mural de panoplia.
- Juego de destornilladores planos.
- Juego de destornilladores Phillips.
- Juego de destornilladores Stecker.
- Alicata de boca plana.
- Alicata de boca redonda.
- Alicata universal.
- Alicata de punta.
- Aguja larga.
- Mordazas.

- Tijeras de electricista.
- Soldador eléctrico.
- Comprobador de continuidad acústico.
- Detector de tensión (buscapolos).

Las **llaves** son esenciales en el desmontaje y montaje de máquinas. Por este motivo no pueden faltar:

- Llaves fijas dobles.
- Llaves ajustables.
- Llaves de tubo.
- Llaves acodadas.
- Llaves de vaso.

## 6.3 Análisis secuencial del mantenimiento preventivo

Como se ha podido ver en la Tabla 6.2, la secuenciación del plan de mantenimiento preventivo de una máquina es variable.

Los elementos que conforman una máquina eléctrica no tienen la misma actividad funcional, es decir, no tienen el mismo grado de deterioro. Por ejemplo, una escobilla que está en rozamiento constante con el colector tiene mayor desgaste que las conexiones de la placa de bornes.

Esto nos indica que la secuenciación en un mantenimiento preventivo sólo se realiza con el factor tiempo y por cada elemento.

### A. Comprobación de los anclajes. Eliminación de vibraciones y ruidos

Una de las causas que puede producir desequilibrios y vibraciones en una máquina es la desnivelación de la propia máquina. Por este motivo es importante la colocación nivelada y ajustada de sus anclajes.

La **nivelación** se puede realizar colocando la máquina en una cimentación adecuada o en carril nivelado. Una vez colocada la máquina en su sitio, terminaremos de nivelar con cuñas preparadas para tal fin, situadas de manera que la burbuja de aire quede en la parte superior del nivel, como muestra la Figura 6.7.

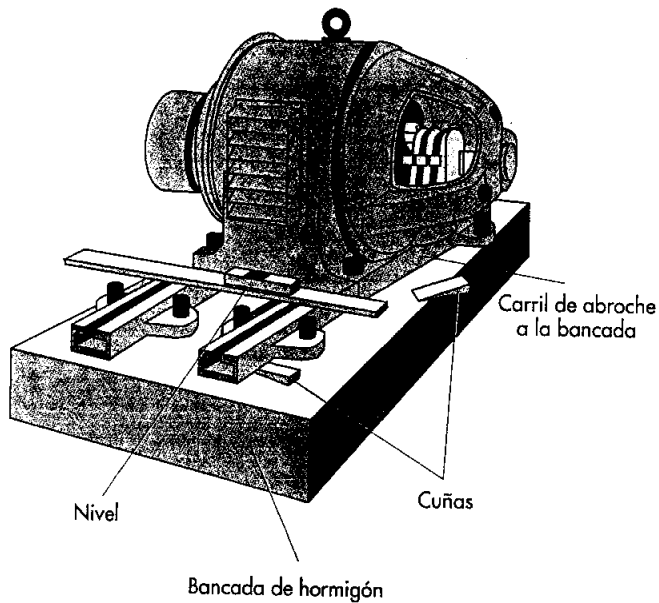


Fig. 6.7. Nivelación de una máquina eléctrica.

### B. Limpieza de los aislamientos. Secado y rebarnizado

Se dan casos en que los aislamientos están recubiertos de una película de aceite o de suciedad adherida. Deben limpiarse con un paño humedecido en petróleo para, rápidamente, pasarles un paño limpio y seco.

En la actualidad, existen pulverizadores para la limpieza de grasas, aceites, etc., que facilitan considerablemente la limpieza de las máquinas, al proyectar el líquido pulverizado incluso en partes de la máquina donde no se puede acceder.

Una vez limpia la máquina, se reparará el bobinado, aplicándole barniz con una brocha.

La forma más rápida para secar el rebarnizado es emplear el horno de secado por resistencias, aunque también se utilizan resistencias calefactoras con difusor de calor y al aire (termoventiladores).

### C. Prueba de aislamiento y continuidad del circuito

La prueba de aislamiento se debe realizar durante la operación de secado, cada cuatro horas y durante un minuto en cada prueba.

Los bobinados con una resistencia óhmica superior a los 50 000 ohmios pueden secarse con el propio calor interno.

En el caso de las máquinas de corriente continua, se deberá desconectar el inductor serie.

La prueba de continuidad se realiza antes de la limpieza, y una vez rebarnizado y secado, se vuelve a comprobar la continuidad y la derivación a masa. En la Figura 6.8 se puede apreciar cómo se realiza la prueba de continuidad.

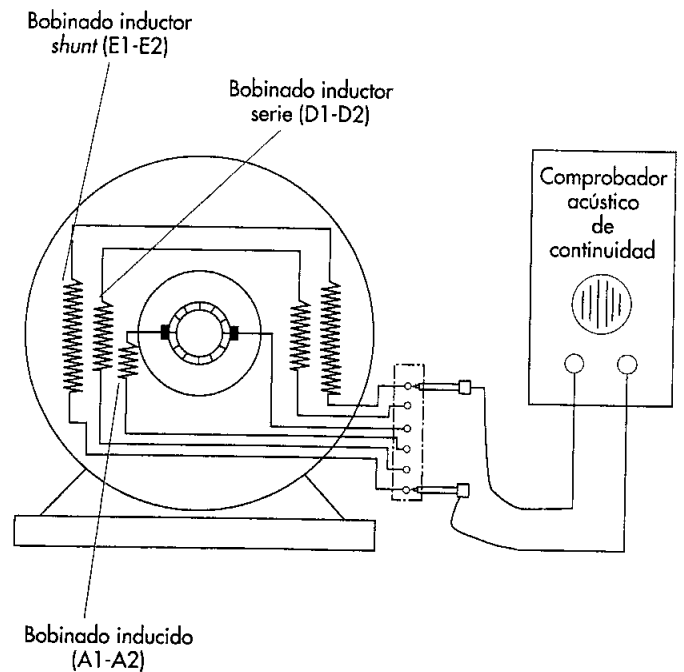


Fig. 6.8. Comprobación de continuidad de una máquina de corriente continua.

### D. Limpieza del colector. Estado y presión de las escobillas

El colector se debe limpiar periódicamente del polvo y la suciedad que normalmente se produce en los ambientes de trabajo con máquinas. Para ello se puede frotar con un paño sobre las delgas.

También se puede limpiar el colector frotando las zonas sucias, con movimientos circulares, con una lija muy fina o con un paño impregnado en petróleo.

### E. Revisión de los bornes y conexiones interiores

Las conexiones de una máquina de corriente continua se realizan en su placa de bornes, componente de fácil acceso para la revisión de sus contactos con los bobinados. La comprobación de continuidad es una operación que clarifica bastante el estado de las conexiones.

Si la comprobación se realiza con un aparato sonoro de continuidad, al agitar levemente las conexiones, se pueden detectar por el sonido las defectuosas.

Mediante la resistencia de los bobinados se puede comprobar de forma exacta si existe una mala conexión, por la resistencia de contacto que se produce.

### 1 F. Conservación de los cojinetes. Comprobación de la regularidad del entrehierro

Los cojinetes son elementos esenciales para el buen funcionamiento de todos los demás elementos. Un cojinete gastado produce un movimiento descentrado en el inducido y, por tanto, un entrehierro desigual; asimismo puede ocasionar un rozamiento entre el estator y el rotor, y provocar una rotura de las chapas magnéticas tanto del estator como del rotor.

Conviene comprobar la holgura de los cojinetes moviendo el eje verticalmente, como se puede observar en la Figura 6.9.

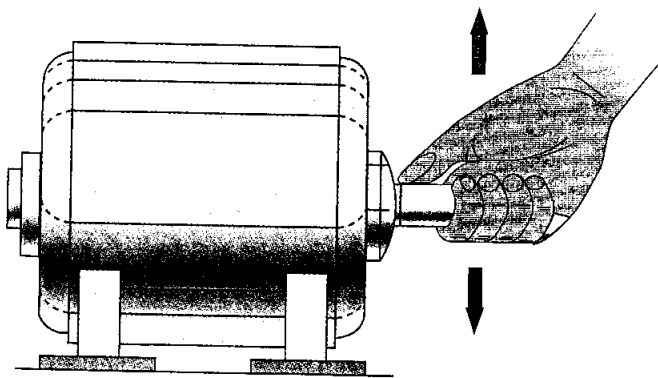


Fig. 6.9. Movimiento vertical comprobando el desgaste de los cojinetes.

## 6.4 Pruebas para la localización de averías. Sistemas de reparación

En todo taller de reparación y mantenimiento de máquinas eléctricas y en toda actuación del equipo de mantenimiento, la propia empresa realiza una prueba de recepción de la máquina.

Las pruebas de recepción se centran en:

- Detección de contactos a masa en los circuitos del inducido y del inductor.
- Detección de interrupciones en los circuitos del inducido y del inductor.
- Detección de cortocircuitos en los circuitos del inducido y del inductor.

También se determina la colocación correcta de las escobillas y la polaridad de los circuitos inductores e inducidos.

Para ello se utilizan útiles y aparatos que permitan obtener, de manera rápida, una valoración inicial para la detección de la avería y para realizar seguidamente su reparación.

Los aparatos de medida son los instrumentos que generalmente se utilizan en la detección de averías, además del comprobador de continuidad, el zumbador para los inducidos y la brújula.

Una vez hechas las comprobaciones pertinentes y antes de desmontar la máquina, se procede a identificar las posiciones que la carcasa y las tapas de la máquina tienen al ser recepcionadas.

Para que el montaje de las tapas se realice en la misma posición en la que se desmontó, éstas se señalan con un punzón. En la Figura 6.10 se pueden observar las marcas en la carcasa y las tapas de la máquina.

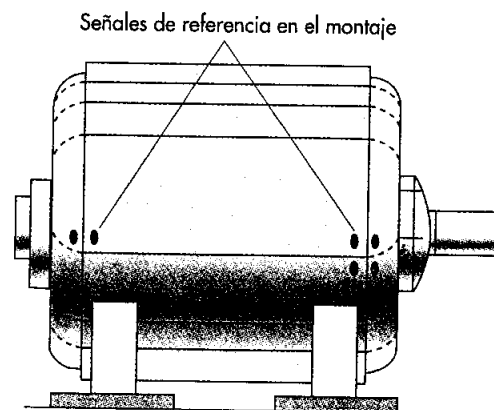


Fig. 6.10. Marcas de identificación de la posición de la carcasa y las tapas.

### 1 A. Averías del circuito inductor: descebado, aislamiento defectuoso y conexiones incorrectas

El inductor es la parte de la máquina de corriente continua que menos mantenimiento tiene, debido a la nula exposición a movimientos mecánicos, lo que permite un rápido y eficaz mantenimiento.

Las averías más comunes del bobinado inductor son:

- Descebado del circuito magnético.
- Aislamientos defectuosos.
- Contactos a masa.
- Bobinas con espiras cortocircuitadas.
- Interrupciones espontáneas del circuito.

### Descebado

En un generador de corriente continua, es la pérdida del magnetismo remanente del circuito magnético.

El **descebado** no es una avería ni mecánica ni eléctrica; si se considera una avería, se puede tipificar como una avería magnética, ya que el descebado de una máquina se produce por aportar corriente que provoca un flujo opuesto al flujo remanente del circuito magnético.

Este flujo anula completamente el flujo remanente, lo que hace que el generador no produzca corriente. Para volver a crear el magnetismo remanente, se deberá aplicar al bobinado *shunt* una fuente de corriente continua durante dos o tres minutos.

### Aislamiento defectuoso

En una máquina eléctrica, el aislamiento defectuoso puede producir múltiples averías. En el caso del bobinado inductor o de excitación, las averías más frecuentes son las producidas por el deterioro del aislamiento que cubre la bobina inductora, y el deterioro del aislamiento del propio hilo esmaltado.

Estos desperfectos se producen por vibraciones y por sobrecalentamiento, que ocasionan derivaciones a masa y cortocircuitos en espiras, lo que provoca el funcionamiento defectuoso de la máquina.

En la Figura 6.11, se pueden observar los puntos donde, con más frecuencia, se producen los contactos a masa. En la Figura 6.12 se puede observar cómo se localizan las interrupciones o contactos defectuosos mediante un comprobador de continuidad.

### Conexiones incorrectas

En muchos casos, en las conexiones se producen averías que son fáciles de prevenir.

Las conexiones que se realizan en la **caja de conexiones** y las que se establecen a lo largo del circuito inductor

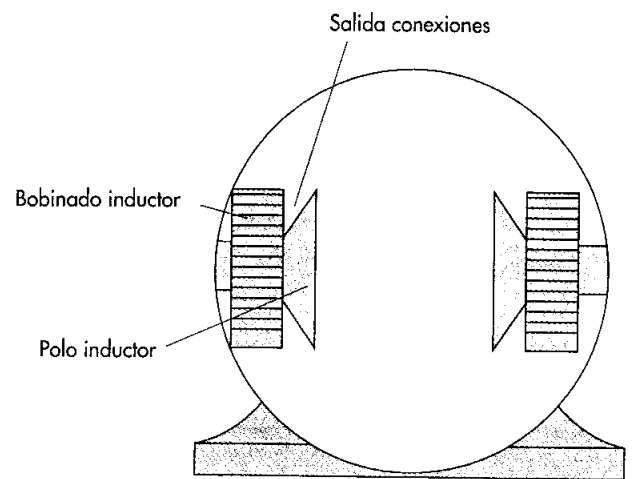


Fig. 6.11. Puntos frecuentes de contactos a masa del bobinado inductor.

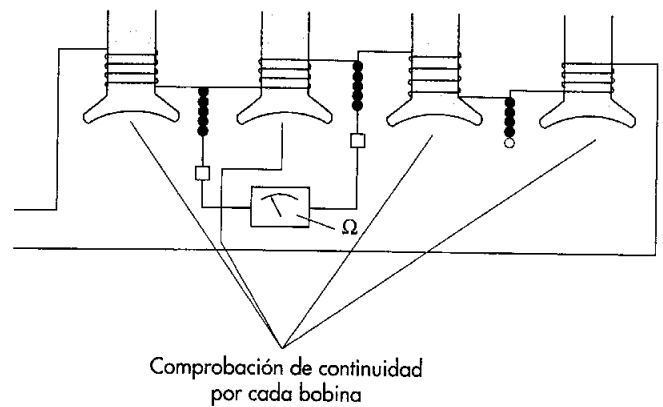


Fig. 6.12. Localización de averías en un bobinado inductor.

e inducido deben ser conexiones sólidas y compactas, para evitar que se aflojen por vibraciones o por calentamiento y produzcan averías.

La mayoría de las conexiones incorrectas son **contactos a masa**, bobinas con espiras cortocircuitadas o interrupciones espontáneas del circuito.

En la Figura 6.13, se observan diferentes averías que se pueden producir por una mala conexión, como son conexiones flojas, terminal roto, etc.

### B. Pérdidas del entrehierro: sustitución de cojinetes. Equilibrado del rotor

Como es sabido, el entrehierro es el espacio libre que separa el rotor del estator. El entrehierro debe ser siempre uniforme en toda la circunferencia de la máquina, es decir, que

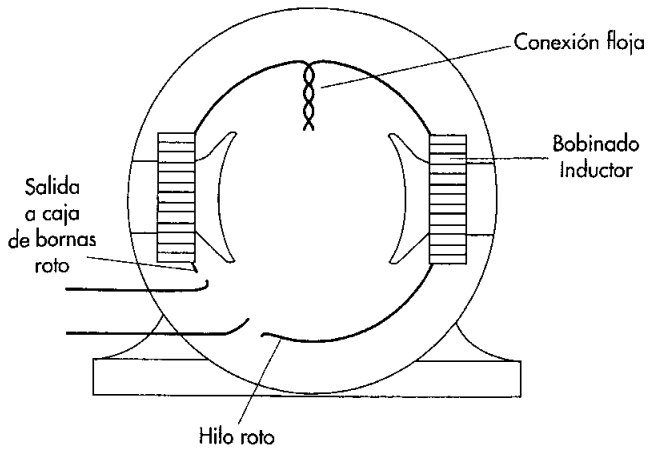


Fig. 6.13. Averías que se pueden producir por deterioro de las conexiones.

la distancia entre el rotor y el estator deberá ser siempre la misma en toda la longitud de la circunferencia.

### Pérdidas del entrehierro

En algunos casos se producen alteraciones de este espacio que llegan a ocasionar averías que, en muchos casos, son complicadas de reparar. En la Figura 6.14, se puede observar el entrehierro.

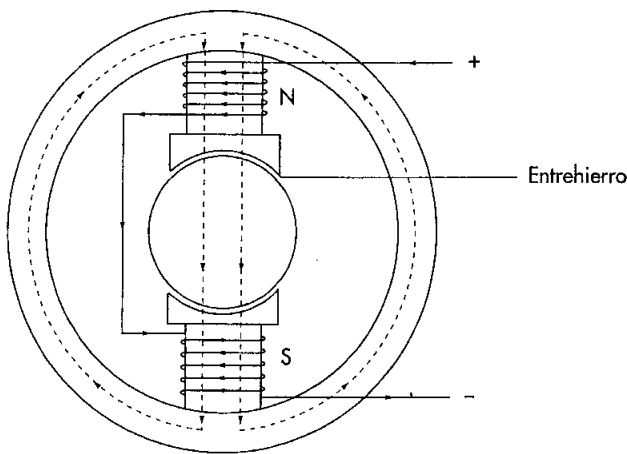


Fig. 6.14. Entrehierro existente entre el rotor y el estator de una máquina eléctrica.

Las causas que producen el desajuste del entrehierro son diversas; entre otras, el desequilibrio eléctrico y mecánico del rotor.

### Sustitución de cojinetes

No cabe duda de que la causa más generalizada del desajuste del entrehierro es el uso de la máquina, que produce desgaste en los soportes del eje (cojinetes) que están si-

tuados en las tapas de la carcasa de la máquina. En la Figura 6.15, se pueden apreciar las bolas del cojinete donde se produce el desgaste.

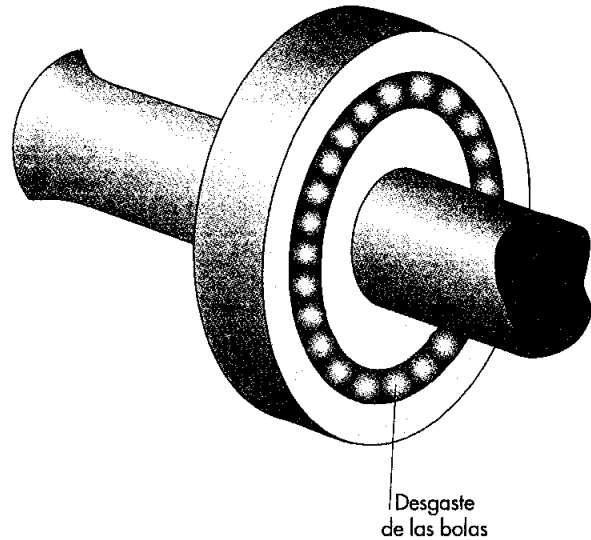


Fig. 6.15. Indicación del desgaste de los rodamientos.

El cojinete se sustituye mediante un **extractor de cojinetes** y, como indica la Figura 6.3, las palas del extractor siempre se deben colocar en el anillo interno del cojinete aplicándole la fuerza correcta.

Una fuerza excesiva aplicada al extractor en el desmontaje del cojinete puede producir daños en el eje y en el propio extractor.

### Equilibrado del rotor

La maniobra de equilibrado de un rotor se realiza cuando se observan ruidos extraños y vibraciones que no se han suprimido con el cambio de cojinetes.

Esta operación se realiza colocando el rotor sobre un caballote especial con ruedas giratorias; haciéndolo girar suavemente con un impulso, se observará que si se para en la misma posición después de varias veces, la parte más pesada será la que quede en la parte inferior del rotor.

El equilibrado se realiza colocando tiras de metal (plomo, latón o cobre) entre las cuñas y el aislante de las ranuras opuestas a la parte más pesada del rotor.

También se equilibra haciendo la operación contraria, es decir, limando o taladrando la parte del rotor más pesada con la finalidad de reducir el peso en esta zona. En la Figura 6.16 se puede apreciar el punto de desequilibrio de un rotor.

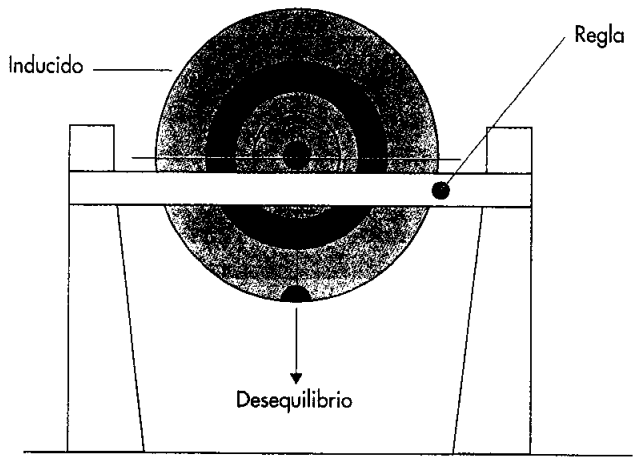


Fig. 6.16. Detección del desequilibrio de un rotor.

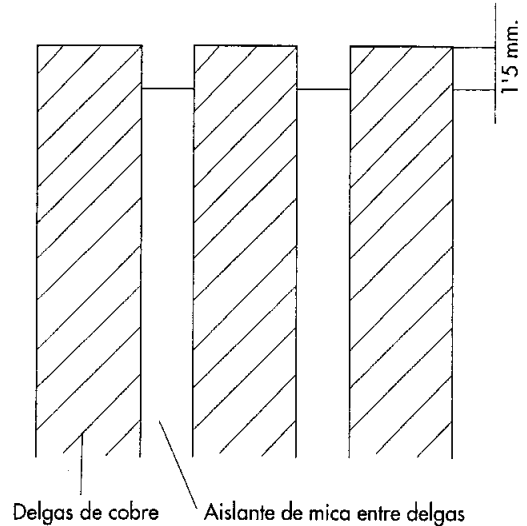


Fig. 6.17. Separación de aislantes entre delgas.

### C. Mal estado del colector

El colector, cuando está en mal estado, produce ruidos, chisporroteos, frenado de la máquina, bajo rendimiento, etc. Los colectores, cuando no giran perfectamente o tienen la superficie irregular debido a la presión desigual de las escobillas, se deben alinear manualmente por medio de lijas, rascadores y otros elementos que puedan servir para minimizar los efectos que se han citado.

Cuando una parte importante de la superficie del colector está defectuosa, se procederá al alineamiento mediante el rectificado y el torneado. Para el pulido se utiliza lija fina.

Una de las causas que propician averías en el inducido es el deterioro del aislamiento entre delgas. Si el aislamiento no está suficientemente bajo con respecto a las delgas, será necesario bajar el aislamiento (láminas de mica).

Para bajar el aislamiento se utiliza una hoja de sierra con espesor adecuado, o bien fresas especiales para esta operación. El aislante de mica debe quedar al menos 1,5 mm por debajo de las delgas, como indica la Figura 6.17.

En la Figura 6.18 se puede observar el portaescobillas con la escobilla incorporada, y la distancia que sobresale la escobilla del portaescobillas hasta reposar en el colector.

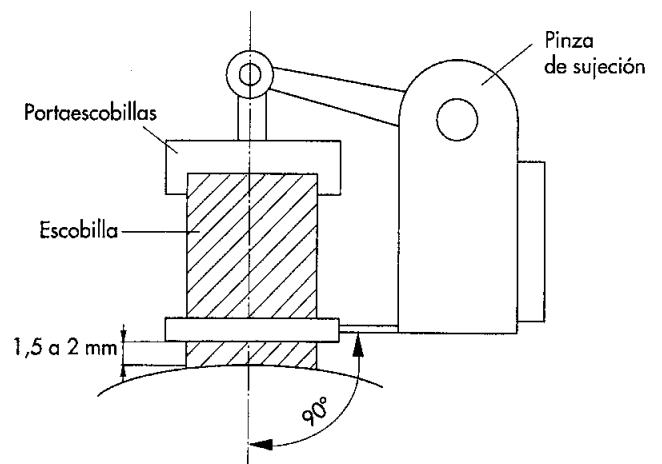


Fig. 6.18. Portaescobillas.

### D. Escobillas gastadas: reposición.

#### Ajuste del portaescobillas

Como sabemos, las escobillas son elementos de carbón especial que conectan eléctricamente el inducido con el circuito exterior. Los soportes o portaescobillas llevan un muelle que aprieta la escobilla sobre el colector.

Las escobillas deben cambiarse antes de que la pinza de sujeción repose sobre el portaescobillas; de esta manera, conseguiremos una buena presión en el contacto con el colector.

Las escobillas deben apoyarse en el colector en toda su superficie. Cuando se procede al cambio de escobillas, éstas se deben colocar de manera que la curvatura del colector coincida con la curvatura de la escobilla.

Entre las escobillas y el colector, se colocará un papel de lija fina para que éstas se adapten a la curvatura del colector. En la Figura 6.19, se puede observar la forma correcta de lijar las escobillas para adaptarlas mejor a la curvatura del colector.

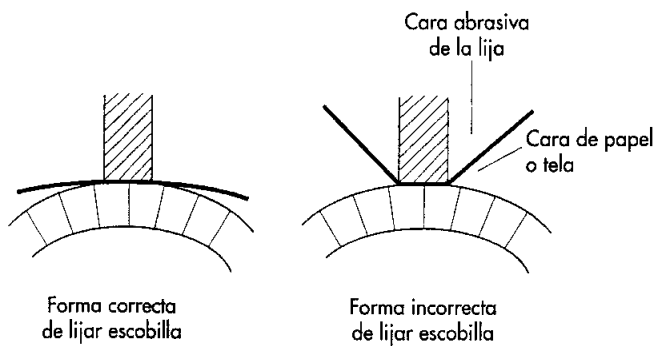


Fig. 6.19. Adaptación de las escobillas al colector.

### E. Bobina del inducido abierta: inspección del colector. Sistemas de reparación

Las causas que pueden provocar interrupción en el circuito del inducido son diversas. Entre ellas, las que se citan a continuación son las más comunes:

- Mal contacto entre escobillas y colector.
- Cable de escobilla roto.
- Conexión entre los circuitos inductor e inducido defectuosa.
- Hilo de polos auxiliares cortado.
- Bobina del inducido cortado.
- Soldadura en colector defectuosa.

En la mayoría de los casos, la inspección visual de los puntos de conexión y contacto es suficiente para detectar la interrupción de cualquiera de los circuitos de la máquina.

En el caso de no ser detectada la interrupción del circuito, se procederá a la localización mediante **comprobador de continuidad** u óhmetro, para verificar si el circuito se encuentra abierto o cerrado.

En la Figura 6.20 se puede apreciar cómo se localiza la posible interrupción en el bobinado inducido.

También se puede localizar la interrupción del bobinado inducido mediante el **zumbador electromagnético**. Una vez conectado el zumbador a la red, se unen las delgas contiguas que se encuentran en la parte superior del rotor.

Si las bobinas que se conectan a esas delgas no están interrumpidas, deberán saltar pequeñas chispas en las conexiones con las delgas. En el caso de no saltar chispas, la bobina conectada a esas delgas está interrumpida o mal conectada.

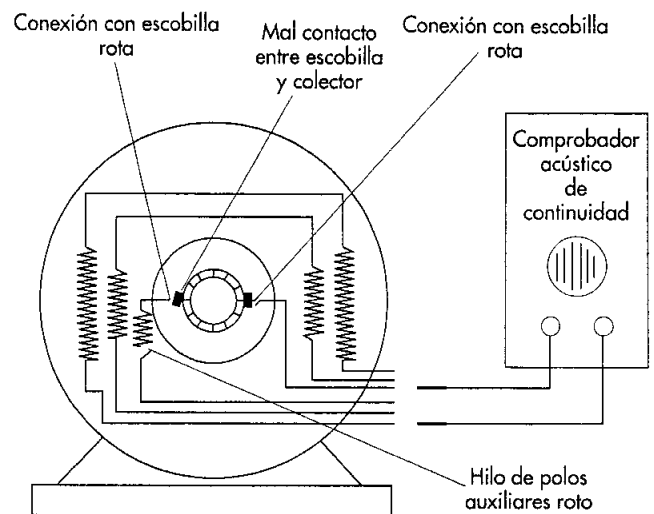


Fig. 6.20. Procedimiento para poder detectar interrupciones en el circuito inducido.

El rotor se va girando mientras se comprueban las delgas contiguas superiores hasta detectar la bobina que está interrumpida.

En la Figura 6.21, se puede observar cómo se comprueba la interrupción de una bobina en el inducido.

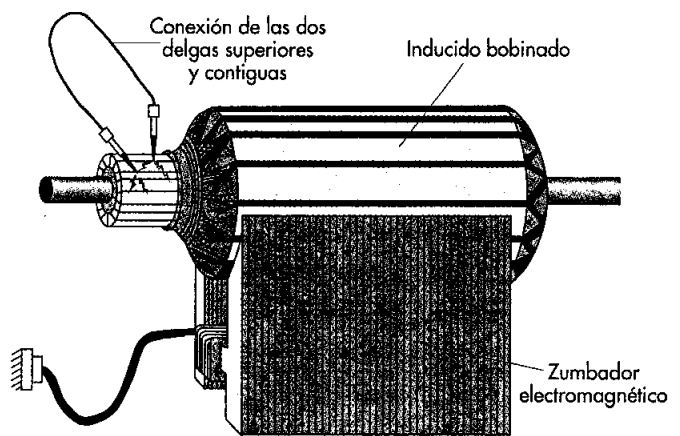


Fig. 6.21. Procedimiento para poder detectar interrupciones en bobinas de un inducido.

### F. Bobina del inducido en cortocircuito. Localización del zumbador. Reparación

El cortocircuito en el bobinado inducido se produce en el momento en que:

- Dos espiras de una misma bobina se encuentran en contacto eléctrico y se ha perdido el aislamiento en ese punto.

- Entre dos bobinas contiguas se produce el contacto eléctrico y se ha perdido el aislamiento en ese punto.
- Dos bobinas ocupan una misma ranura, se produce el contacto eléctrico y se ha perdido el aislamiento en ese punto.

Cuando una bobina del inducido se encuentra en cortocircuito, el calentamiento que se produce en ella es fácilmente localizable, siempre que se tenga acceso inmediato al inducido.

En el caso de tener que desmontar la máquina para la detección de la avería, el procedimiento para la localización de la bobina en cortocircuito será utilizando el zumbador electromagnético.

El procedimiento habitual para la localización de un cortocircuito en el inducido con bobinado imbricado es utilizar el zumbador electromagnético y una hoja de sierra, como se puede ver en la Figura 6.22.

El procedimiento que se ha de seguir para la localización del cortocircuito mediante el zumbador es colocar la hoja de sierra longitudinalmente sobre la ranura superior del inducido.

El inducido se va girando de forma que se mantenga la hoja de sierra en la ranura superior. Cuando la hoja de sierra vibra, produciendo al mismo tiempo un zumbido, la ranura en la que se produce la vibración y el zumbido es la que aloja una bobina en cortocircuito.

La hoja de sierra vibrará en las dos ranuras donde se encuentre la bobina, por lo que no será complicado localizar la bobina averiada.

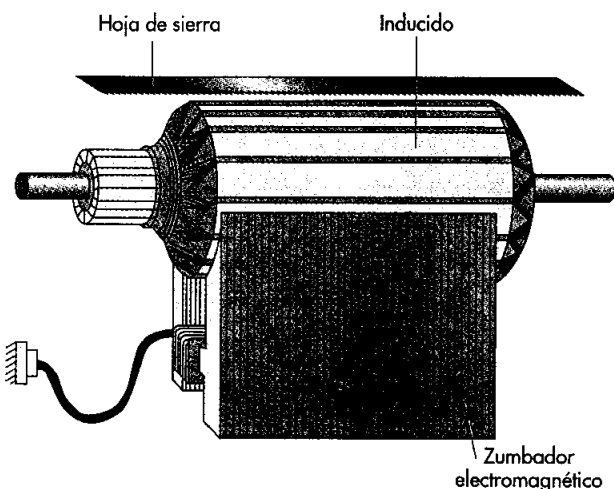


Fig. 6.22. Localización de cortocircuito en un inducido.

En los inducidos con el bobinado ondulado, la localización del cortocircuito será algo más complicada. El inducido se colocará de la misma manera en el zumbador, pero se comprobará entre delgas contiguas, con un **milivoltímetro**; la delga en la que el milivoltímetro detecte menor tensión será en la que se encuentre la bobina en cortocircuito.

### G. Bobina del inducido derivada a masa

En muchas ocasiones nos encontramos con una derivación a masa que nos obliga a desconectar todos los circuitos por las interconexiones existentes.

La **localización de un contacto a masa** en una máquina de corriente continua requiere revisar todos los circuitos eléctricos. Una vez localizada la derivación a masa y en el caso de ser en el circuito inducido, se procederá al desmontaje del mismo para su comprobación.

Se puede detectar la derivación a masa mediante dos procedimientos:

- Mediante comprobador de continuidad acústico.
- Mediante zumbador electromagnético.

### Localización con comprobador de continuidad acústico

La localización de derivación a masa se realiza conectando un terminal del comprobador de continuidad en el eje del inducido, y el otro terminal, en cada una de las delgas del inducido.

En el caso de que el comprobador de continuidad suene entre el eje y una delga, la derivación a masa se encontrará en la delga o en la bobina conectada a esa delga. En la Figura 6.23 se puede apreciar este procedimiento.

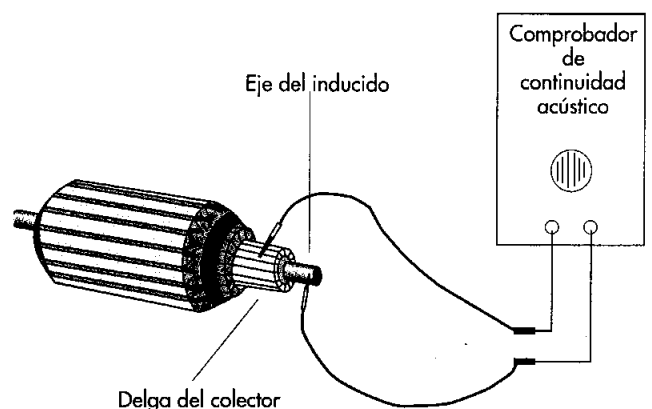


Fig. 6.23. Localización de contacto a masa mediante comprobador de continuidad acústico.



## Localización con zumbador electromagnético y milivoltímetro

La localización de derivación a masa se realiza colocando el inducido en el zumbador y conectándolo a la red eléctrica. Conectando un terminal de prueba en la delga superior y el otro en el eje del inducido, el milivoltímetro deberá desviar la aguja detectando tensión.

El inducido se va girando; si comprobamos siempre el procedimiento anterior en la delga superior, en el momento en el que en una delga no se detecte movimiento en la aguja del milivoltímetro, habremos encontrado la bobina derivada a masa, que será la conectada a esa delga.

En la Figura 6.24 se puede apreciar cómo se realiza la localización de derivación a masa de un bobinado inducido.

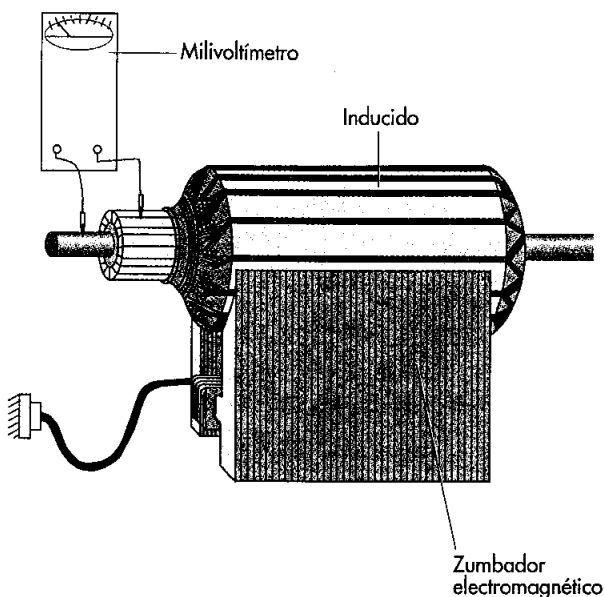


Fig. 6.24. Localización de derivación a masa mediante milivoltímetro.

## 6.5 Procedimiento para la reposición del bobinado inducido

Para la confección del bobinado de un inducido, se recurre a varios métodos. Aunque todos se realizan a mano, algunos de ellos requieren útiles y herramientas diferentes.

Los métodos para la realización de los bobinados son:

- **A mano.** Confección de las bobinas directamente sobre el inducido.

- **Semimoldeados.** Confección de las bobinas mediante moldes, y colocación y ajuste en las ranuras a mano.

- **Moldeados.** Confección de las bobinas mediante moldes, pero, a diferencia del método anterior, la colocación se hace directamente desde el molde diseñado para tal fin.

- **Con pletinas.** La confección de las bobinas con pletinas o barras se emplea en inducidos de gran tamaño; es un procedimiento que requiere útiles y herramientas muy específicas.

Por los tipos de inducidos que se manipulan en los talleres y aulas específicas de los Ciclos Formativos, estudiaremos los bobinados de inducidos confeccionados a mano.

### A. Análisis de las características constructivas del rotor y del tipo de bobinado

En la reparación de una máquina eléctrica de corriente continua se han de tener en cuenta, antes de comenzar la reparación y después de localizar la avería, las características mecánicas y eléctricas de la parte de la máquina que se va a reparar.

La manera lógica de proceder es anotando esas características en una ficha donde se recopilen todos los datos que se deben tener en cuenta, incluso para facilitar otras posibles reparaciones posteriores.

### B. Recogida de datos en el documento apropiado

La confección de un modelo de ficha para la recopilación de datos de la máquina facilita en gran medida el proceso de la reparación y, sobre todo, la comprobación posterior de la máquina.

La Tabla 6.3 recoge un modelo de documento para la recopilación de datos de un inducido.

### C. Operación de desbobinado y preparación de los elementos mecánicos

En la operación de desbobinado hay que evaluar el estado de la chapa del núcleo y tener especial cuidado con las arandelas de fibra de sus extremos.

Para poder desbobinar el inducido, procederemos a la desoldadura de las bobinas con las delgas; a continuación,

Fabricante			Tipo		
Modelo			Número de serie		
Potencia (w)	Tensión (V)	Intensidad (A)			
Frecuencia (Hz)			Factor de sobrecarga		
Número de ranuras			Número de fases		
Número de delgas			Calentamiento admitido (°C)		
Velocidad (rpm)			Paso de bobina		
Diámetro del conductor (mm)			Distancia entre centro de ranura y centro de mica		
Distancia entre centro de ranura y centro de delga			Número de espiras por bobina		
Paso de colector			Bobinas por ranuras		
Grado de dificultad			Observaciones		
Esquema simplificado de un inducido de 14 delgas imbricado K=18					
<p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8</p> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">2</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">3</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">4</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">5</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">6</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">7</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">8</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">9</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">2</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">3</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">4</div> </div>					
Delgas					

Tabla 6.3. Modelo de ficha de datos para un inducido.

para proceder a retirar el bobinado, se extraerán las cuñas y otros aislamientos.

En la Figura 6.25, se puede apreciar cómo se extraen las cuñas de sujeción, para después quitar todo el bobinado.

En la operación de desmontaje, el aislamiento de las ranuras se retira totalmente para colocar aislantes nuevos.

El desmontaje del bobinado puede resultar bastante complicado. Al estar el bobinado barnizado y muy compacto, ofrece bastante dificultad; en estos casos, una vez extraído el colector del eje, se somete el inducido al calor del horno de secado para aflojar el barnizado y facilitar de esta manera el desmontaje.

También se puede desmontar cortando los hilos por la salida de las ranuras, bien con un alicate de corte o con la he-

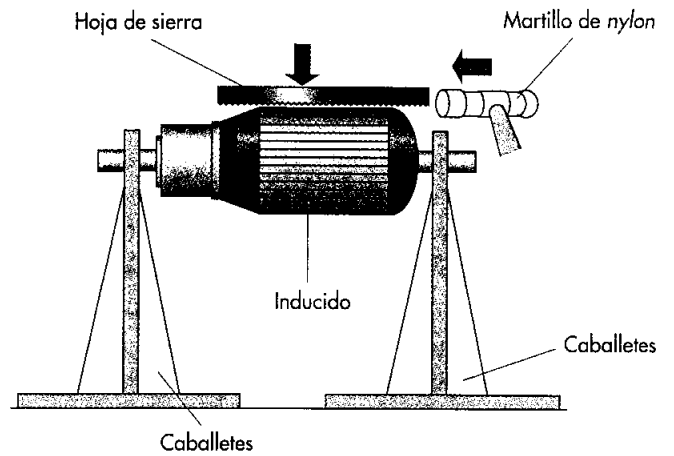


Fig. 6.25. Desmontaje de las cuñas de cierre.

rramienta que se puede observar en la Figura 6.26. Esta herramienta contiene en la punta un elemento cortante que permite que, una vez cortadas las bobinas, se puedan extraer por la parte opuesta del colector.

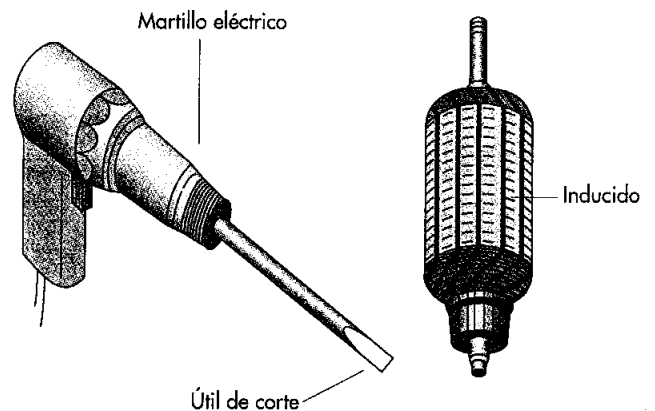


Fig. 6.26. Corte de las bobinas del inducido.

Para la colocación de los hilos en las ranuras, debemos colocar un aislamiento. Éste se confecciona con papel *presspan* o poliéster.

El aislamiento de la ranura del inducido (cajetín) exige preparar previamente el laminado aislante, cortándolo, doblándolo, etc., trabajo que siempre resulta minucioso. Para reducir el tiempo en la construcción del cajetín aislante, en el mercado se pueden encontrar estos cajetines ya confeccionados.

En la Figura 6.27 se puede observar un cajetín ya elaborado, y en la Figura 6.28, los cajetines de las ranuras en el propio inducido.

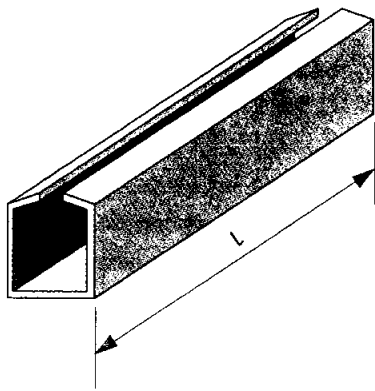


Fig. 6.27. Cajetín aislante de la ranura de un inducido.

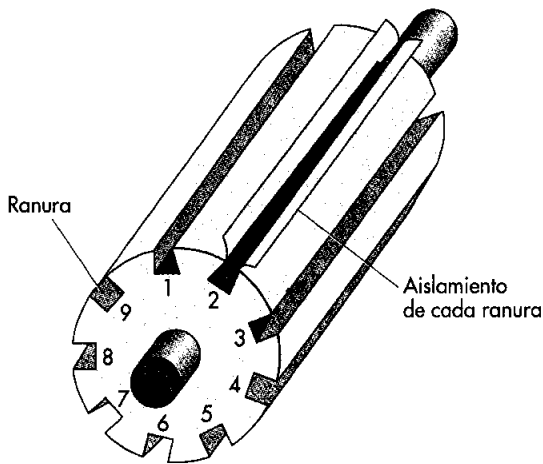


Fig. 6.28. Cajetines de ranuras en el inducido completo.

Las **cuñas de cierre** de las ranuras se construyen de madera, de poliéster, de fibra de vidrio, etc., y son de diferentes tamaños para diferentes potencias. En la Figura 6.29, se pueden observar diferentes tipos de cierre de ranuras de diferentes materiales.

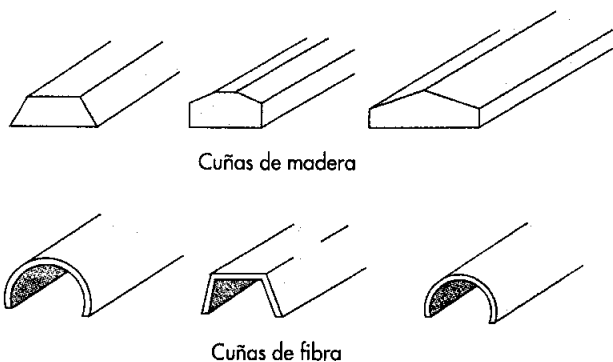


Fig. 6.29. Cuñas de cierre de ranuras de inducido.

Una vez desmontado y limpiado el colector y revisadas las delgas, se procede al montaje en el eje; la colocación del colector se debe hacer, exactamente, a la misma distancia del final del eje que se midió en el proceso de desmontaje (véase la Figura 6.30).

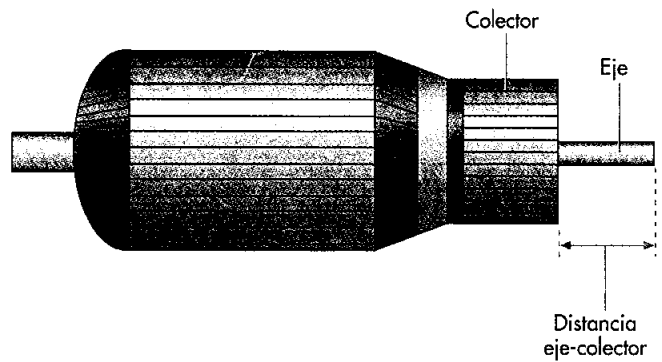


Fig. 6.30. Medida para la colocación exacta del colector.

#### D. Secuenciación de las operaciones para la reposición del bobinado

Una vez desmontado, restaurados los desperfectos del inducido y tomados los datos del inducido en la ficha de datos, se procede al rebobinado en proceso secuencial, es decir, las operaciones del rebobinado deberán ser ordenadas y precisas.

#### La elección del hilo

Para la elección del hilo, debemos medir el diámetro del hilo desmontado del inducido con un **micrómetro** o **pálmer**. Para poder efectuar la medida con precisión, se deberá quitar el barniz que aísla el conductor; a continuación se realiza la medida, como se observa en la Figura 6.31.

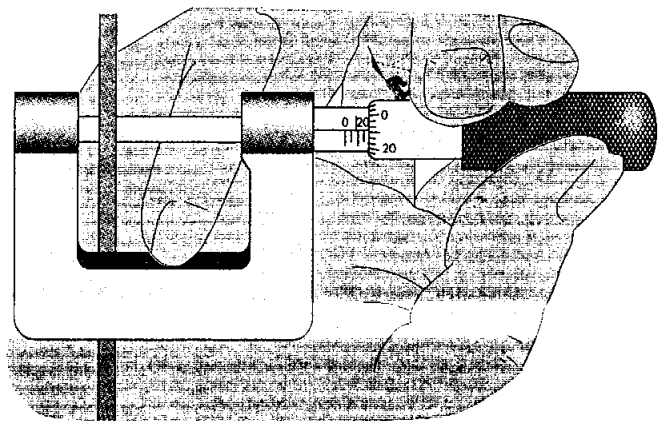


Fig. 6.31. Medida del diámetro del hilo con el micrómetro o pálmer.



## Conexiones

Las conexiones de las bobinas se realizan en el colector soldando las puntas de las bobinas a las delgas correspondientes del mismo.

Para que no produzca cortocircuito en el momento de la soldadura y resbale el estaño por detrás del colector, las conexiones se hacen con el inducido ligeramente inclinado, dejando el colector en la parte más baja, como indica la Figura 6.36. Manteniendo el soldador vertical, se evitará que el estaño se extienda por la delga contigua.

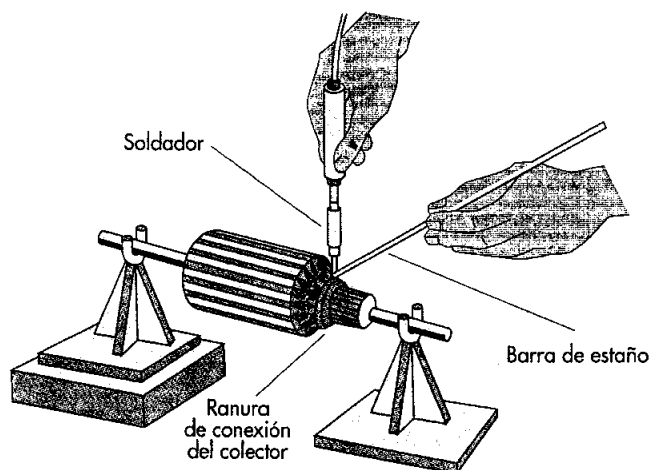


Fig. 6.36. Forma de soldar las conexiones en el colector.

El **zunchado** del inducido tiene por objeto sujetar los hilos que se dirigen al colector para su conexión y para evitar que las bobinas se salgan de las ranuras por la fuerza centrífuga.

El zunchado de los pequeños inducidos se conoce como **bandaje** y se realiza con cuerdas. En los inducidos de grandes dimensiones, el zunchado se realiza con alambre de acero dispuesto a lo largo de la periferia del inducido, pero sin salir de la superficie del mismo.

Un bandaje debe estar fuertemente atado y compacto. En la Figura 6.37 se puede observar el método que se ha de seguir en el bandaje de un pequeño inducido.

## Barnizado

El barnizado es el barniz aislante que se aplica sobre los bobinados para mejorar su aislamiento y su solidez. Un buen barnizado debe impregnar todas las partes del bobinado, incluido el interior de las ranuras si es posible.

Los procedimientos más utilizados en el barnizado son:

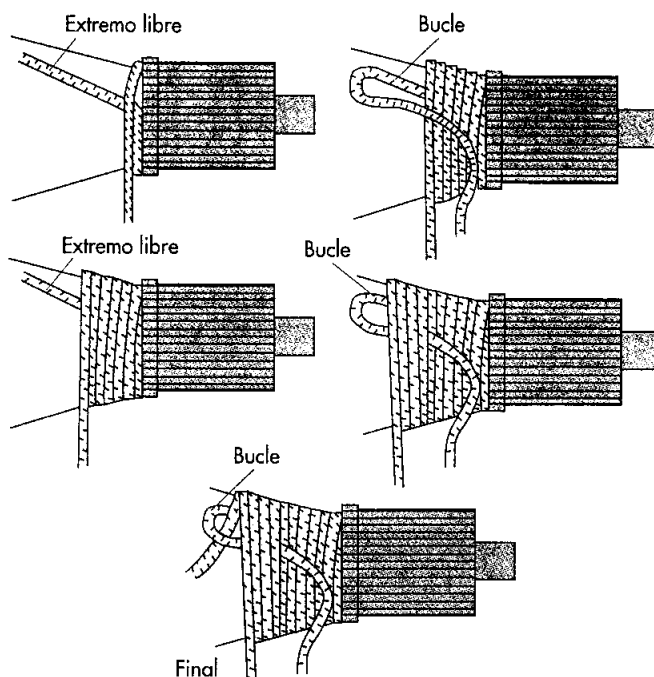


Fig. 6.37. Proceso de bandaje con cuerda de un pequeño inducido.

- **Con brocha:** su eficacia es escasa debido a la dificultad de penetración en todos los huecos del bobinado. Este método se aplica para reparaciones y pequeños defectos en los aislamientos. En la Figura 6.38 se puede observar el barnizado con brocha.

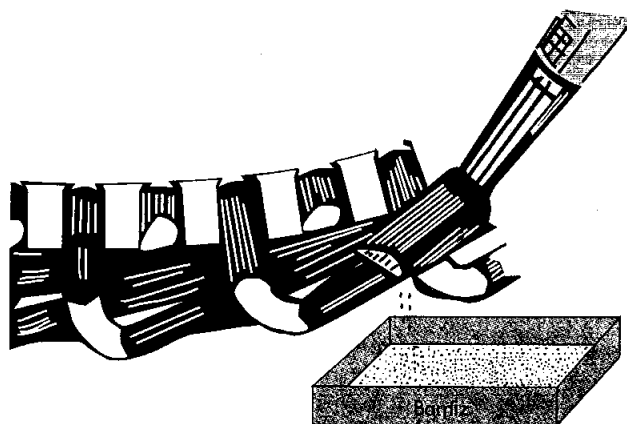


Fig. 6.38. Barnizado del bobinado mediante brocha.

- **Por pulverización:** es un barnizado más uniforme y llega donde el pincel no puede llegar; se realiza mediante un pulverizador.
- **Por inmersión:** consiste en sumergir el bobinado en un recipiente de barniz, y moverlo para todos lados con

el objetivo de evacuar todo el aire a la superficie. En la Figura 6.39 se puede ver el procedimiento de barnizado por inmersión.

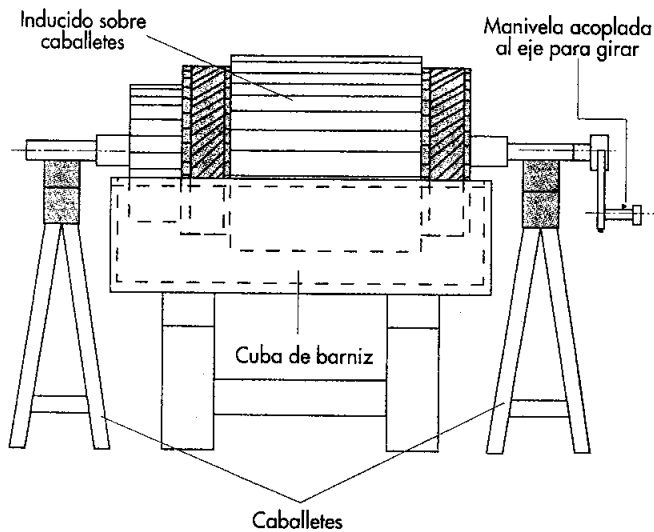


Fig. 6.39. Método para barnizar un inducido por inmersión.

## 6.6 Normas de seguridad en el mantenimiento de máquinas

Las normas que se han de seguir, en el mantenimiento de máquinas eléctricas, siempre son el buen uso de las herramientas y la ausencia de tensión en las máquinas que se van a reparar.

El estado de conservación de las herramientas es muy importante. No se debe realizar el desmontaje de una máquina con herramientas deterioradas o inadecuadas. En cada proceso de reparación de averías deben utilizarse las herramientas y útiles adecuados.

El puesto de trabajo deberá tener toma de corriente cerca para la prueba con el zumbador electromagnético y evitar largos y enredados cables por el suelo.

Las herramientas y útiles deben estar situadas en el sitio correspondiente para efectuar con rapidez cualquier tipo de reparación.

### Conceptos básicos

**Barnizado:** es la aplicación de un barniz aislante sobre los bobinados para mejorar su aislamiento y su solidez. Los métodos más utilizados para realizarlo son el barnizado con brocha, el barnizado por pulverización y el barnizado por inmersión.

**Descebado:** en un generador de corriente continua, es la pérdida del magnetismo remanente del circuito magnético.

**Escobillas:** son elementos de carbón especial que conectan eléctricamente el inducido con el circuito eléctrico exterior.

**Extractor de poleas:** útil empleado para la extracción de poleas, cojinetes y tapas de carcasas. Para su utilización se acopla el eje de la máquina al eje del extractor, se colocan correctamente las palas y se hace girar el eje del extractor hasta completar la extracción.

**Galgas de espesores:** es un conjunto de pletinas con espesores exactos para ajustar las uniones de poleas o medir el entrehierro de la máquina.

**Molde de ranuras:** útil que se emplea para conseguir que el aislante adquiera la misma forma que la ranura donde se va a aplicar.

**Nivel de burbuja:** es una regla que tiene una pequeña ampolla de agua en la que se encuentra una burbuja de aire, y que se utiliza para equilibrar máquinas.

**Nivelador:** útil empleado en el acople de dos máquinas para conseguir la correcta alineación de los ejes.

**Proceso de mantenimiento preventivo:** lo constituyen una serie de líneas de actuación esenciales a la hora de intervenir en una máquina. Las principales son:

- Planificación.
- Observación.
- Actuación.
- Comprobación.
- Puesta en funcionamiento.

**Zunchado:** procedimiento que tiene por objeto sujetar los hilos que se dirigen al colector para su conexión y para evitar que las bobinas se salgan de las ranuras por la fuerza centrífuga. El zunchado de los pequeños inducidos se conoce también como «bandaje».

## Autoevaluación

1. ¿Es siempre posible tener un equipo de mantenimiento en la empresa? Razona la respuesta.
2. ¿Qué equipo de herramientas y útiles se necesita para un buen mantenimiento?
3. Explica dos procedimientos para detectar sobrecalentamiento en una máquina de corriente continua.
4. ¿De qué material aislante es la separación entre delgas del colector?
5. ¿Qué es el descebado de una máquina de corriente continua?
6. ¿Cómo se detectan espiras en cortocircuito en un inducido?
7. ¿Cómo se debe soldar en el colector los hilos de las bobinas del inducido?
8. ¿Cómo se cambia un cojinete?
9. ¿De qué materiales están fabricados los cajetines de ranuras y las cuñas de cierre?
10. ¿Qué función tiene el barnizado en la terminación del bobinado de una máquina eléctrica?

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

### 11. Planifica sobre una máquina convencional de corriente continua las secuencias de las operaciones que requiere el mantenimiento preventivo.

#### • Objetivos:

- Exponer las secuencias del mantenimiento preventivo de un generador de CC.
- Exponer la frecuencia de actuación sobre cada operación de mantenimiento de una máquina de CC.

#### • Medios didácticos:

- Programas de mantenimiento preventivo de empresas del sector.
- Partes de trabajo de operarios en empresa de mantenimiento.

#### • Procedimiento:

- 1.º Analiza las averías posibles de un generador de corriente continua.

- 2.º Calcula y consulta en empresas de mantenimiento de máquinas eléctricas la frecuencia de las diferentes operaciones de mantenimiento.
- 3.º Ordena y clasifica en función de la frecuencia de mantenimiento.
- 4.º Confecciona un programa de mantenimiento preventivo cíclico con periodo de un año.

#### • Contesta:

- a) ¿Qué diferencias encuentras entre un programa de mantenimiento preventivo y un historial de averías?
- b) ¿Con qué líneas de actuación se deberá intervenir en el mantenimiento de una máquina eléctrica?
- c) ¿Cuáles son las actuaciones que deberán realizarse con la máquina parada?
- d) ¿Cuáles son las actuaciones que se pueden realizar con la máquina en funcionamiento?

### 12. Analiza las averías más comunes que se producen en una máquina de corriente continua.

#### • Objetivo:

- Aplicar los conocimientos adquiridos en esta unidad para conocer las averías más comunes en una máquina de CC.

#### • Medios didácticos:

- Máquinas de corriente continua.
- Equipo de medidas.
- Equipo de herramientas específicas.
- Útiles específicos para el mantenimiento de máquinas.
- Máquinas relacionadas con el bobinado de máquinas.

#### • Procedimiento:

- Mediante los equipos de medidas, herramientas y útiles, detecta las posibles averías de una máquina eléctrica.

#### • Contesta:

- a) ¿Sabes detectar por el ruido el mal estado de un cojinete? Explica por qué.

- b) ¿Sabes detectar por el funcionamiento cuándo el colector está sucio? Explica por qué.
- c) Explica el procedimiento para la detección de un cortocircuito en el inducido mediante el zumbador electromagnético.
- d) Explica el procedimiento para la detección de una derivación a masa en el inducido mediante el comprobador de continuidad acústico.
- e) Explica el procedimiento para la detección de una interrupción en el bobinado inducido.

### 13. Detecta las posibles causas del funcionamiento defectuoso de una máquina de CC.

#### • Objetivos:

- Analizar los síntomas de funcionamiento defectuoso de una máquina.
- Citar las diferentes causas para su reparación.
- Efectuar el procedimiento en caso de funcionamiento defectuoso de una máquina de CC.

#### • Medios didácticos:

- Documentación sobre máquinas eléctricas.
- Máquinas de corriente continua.
- Equipo de medidas.
- Equipo de herramientas específicas.
- Útiles específicos para el mantenimiento de máquinas.

#### • Procedimiento:

- 1.º En la puesta en marcha de la máquina, no arranca.
- 2.º En la puesta en marcha de la máquina, gira a velocidad muy inferior a la normal.
- 3.º En la puesta en marcha de la máquina, gira con velocidad superior a la normal.
- 4.º Durante el funcionamiento, se producen chispas en el colector.
- 5.º Durante el funcionamiento, la máquina se calienta.
- 6.º Durante el funcionamiento, la máquina hace ruido.

7.º En la puesta en marcha del generador, no genera corriente.

8.º Al conectar la carga al generador, la tensión baja rápidamente.

9.º Durante el funcionamiento del generador, la tensión no alcanza la tensión nominal.

#### • Contesta:

a) Cita las posibles causas de las detecciones de funcionamiento defectuoso, con los siguientes indicios:

- En la puesta en marcha de la máquina, no arranca.
- En la puesta en marcha de la máquina, gira a velocidad muy inferior a la normal.
- En la puesta en marcha de la máquina, gira con velocidad superior a la normal.
- Durante el funcionamiento, se producen chispas en el colector.
- Durante el funcionamiento, la máquina se calienta.
- Durante el funcionamiento, la máquina hace ruido.
- En la puesta en marcha del generador, no genera corriente.
- Al conectar la carga al generador, la tensión baja rápidamente.
- Durante el funcionamiento del generador, la tensión no alcanza la tensión nominal.

b) Cita al menos tres posibles causas de defectos de funcionamiento que coincidan con dos funcionamientos defectuosos.

### 14. Detecta el cortocircuito en el inducido e identifica las características del esquema del bobinado inducido de una máquina de corriente continua.

#### • Objetivos:

- Conocer el procedimiento a seguir para la detección de averías y la recopilación de datos.



- Interpretar los elementos que integran los diferentes elementos para la anotación de los valores de cada uno de ellos.
- Determinar el cálculo y esquema del bobinado inducido a identificar partiendo de los datos obtenidos.

• **Medios didácticos:**

- Polímetro.
- Ficha para toma de datos.
- Calibre.
- Tornillo micrométrico.
- Extractor de poleas.
- Zumbador electromagnético.
- Comprobador de continuidad acústico.
- Equipo de herramientas para el desmontaje y montaje.

• **Procedimiento:**

- 1.º Inspección visual para detectar el cortocircuito.
- 2.º Aplicación de tensión al inducido para detectar los puntos calientes.
- 3.º Desmontaje de la máquina para la extracción del inducido.
- 4.º Comprobación de la resistencia, continuidad y derivación a masa de cada uno de los bobinados.
- 5.º Anotación de los datos; número de ranuras, delgas, secciones inducidas, ancho de bobina, ancho de sección, número de polos, paso de colector.
- 6.º Con los datos obtenidos y anotados debidamente en la ficha de datos, confeccionar el esquema del bobinado identificado.

• **Contesta:**

- a) ¿Cuáles son las principales averías del inducido de una máquina de corriente continua?
- b) ¿Qué síntomas aparecen cuando el inducido de una máquina de corriente continua está en cortocircuito?
- c) ¿Qué necesitamos para detectar un cortocircuito?

**15. Localiza la derivación a masa del bobinado inducido de una máquina de corriente continua.**

• **Objetivos:**

- Detectar mediante los aparatos adecuados, la derivación a masa del bobinado inducido.
- Eliminar el contacto a masa si el contacto es exterior y visible.

• **Medios didácticos:**


- Polímetro.
- Óhmetro
- Ficha para toma de datos.
- Calibre.
- Tornillo micrométrico.
- Zumbador electromagnético.
- Comprobador de continuidad acústico.
- Extractor de poleas.
- Equipo de herramientas para el desmontaje.

• **Procedimiento:**

- 1.º Inspección visual para detectar el contacto a masa.
- 2.º Conectar el comprobador de continuidad o el óhmetro entre cualquiera de las delgas y masa para comprobar la derivación a masa.
- 3.º Realizar la prueba de la detección a masa para la localización de la bobina exacta mediante el zumbador electromagnético.
- 4.º Actuar sobre el contacto a masa para la desaparición de la derivación a masa si el contacto es visible y exterior.

• **Contesta:**

- a) ¿Qué efecto puede producir una derivación a masa?
- b) ¿Qué aparato te ha sido más eficaz para la detección de la derivación a masa?
- c) Explica cómo has actuado para corregir la derivación a masa.



**Ensayo de máquinas  
de corriente continua**

**7**

## 7.1 Generadores de CC. Tipos y clasificación por su excitación

Para un correcto desarrollo de los ensayos de las máquinas que se van a estudiar en esta unidad, se debe conocer al menos el funcionamiento, la excitación y el conexionado de cada una de las máquinas que se van a tratar.

Vamos a estudiar el funcionamiento de la máquina de CC por separado, es decir, la máquina de corriente continua como generador (dínamo) y como motor.

La mayor parte de la energía eléctrica que se consume es la suministrada por generadores de corriente alterna (**alternadores**). Pero determinadas aplicaciones industriales necesitan la utilización de la corriente continua.

La corriente continua se está utilizando cada vez más como corriente rectificada de la corriente alterna. Pero el estudio y el uso de estas máquinas están justificados por la versatilidad de la propia máquina; una máquina de corriente continua es reversible, es decir, se puede utilizar como generador y como motor.

Se diferencian en el funcionamiento: para que un generador produzca corriente, debe ser arrastrado por su eje en un movimiento circular que haga girar el inducido y se obtenga corriente entre sus bornes.

En cambio, a un motor de CC hay que aplicarle corriente en los bornes del inductor para crear el campo magnético y producir de esta manera el par de giro del inducido o rotor.

### A. Generador de corriente continua

La corriente de excitación es la que recorre el bobinado inductor y produce el campo magnético.

El campo magnético que se produce en las máquinas eléctricas de CC está proporcionado por **electroimanes**, que crean los campos suficientes para que su funcionamiento sea idóneo.

En unidades anteriores se vio que, según su sistema de excitación, los generadores se clasifican en:

- Generador de **excitación independiente**.
- Generador **autoexcitado**.

La designación de los bornes que nos encontraremos en las placas de las máquinas de CC está normalizada de la siguiente manera:

**Placas de bornes de las máquinas de CC**

Excitación independiente

Excitación shunt

Excitación serie

Excitación compund

Excitación shunt con polos auxiliares

Normalización de los bornes de las máquinas de CC	Antigua	Nueva
Bobinado del inducido	A - B	A1 - A2
Bobinado inductor. Shunt o derivación	C - D	E1 - E2
Bobinado inductor. Serie	E - F	D1 - D2
Bobinado auxiliar o de conmutación	G - H	B1 - B2
Bobinado inductor independiente	J - K	F1 - F2

Tabla 7.1. Normalización de los bornes de las máquinas de CC.

## 7.2 Generador de excitación independiente

Es un generador de CC que recibe la corriente de excitación mediante una fuente de energía del exterior.

En la Figura 7.1, se representa el esquema eléctrico de un generador de excitación independiente, con el circuito de excitación conectado a una fuente de energía exterior (batería).

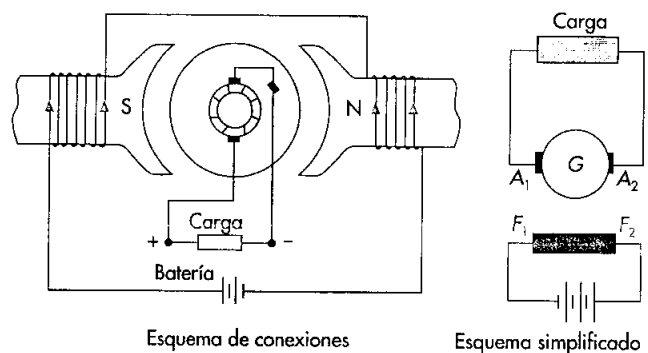


Fig. 7.1. Generador de excitación independiente.

## 7.3 Generador autoexcitado

Es la máquina que produce ella misma su excitación tomando la corriente de excitación de su propio inducido.

La **autoexcitación** en estos generadores es posible por el magnetismo remanente que hay en el circuito magnético.

Al hacer girar el inducido mediante una máquina motriz a su velocidad nominal se induce una fem ( $E_1$ ) muy pequeña, ya que el flujo remanente es pequeño en los primeros momentos.

Esta pequeña fem se hace circular por el inducido a velocidad constante; esto reforzará el campo magnético aumentando la f.e.m. inducida ( $E_1$ ), que aumentará a su vez la corriente, y así sucesivamente hasta alcanzar la fem nominal ( $E_n$ ) de la máquina.

### Fórmula 7.1

$$E = K \cdot \Phi_u \cdot n$$

Donde:

$K$  = constante del inducido

$\Phi_u$  = flujo útil producido por el magnetismo remanente

$n$  = velocidad nominal

$E$  = f.e.m. de cebado

Si la velocidad es constante, la fuerza electromotriz será:

### Fórmula 7.2

$$E = K \cdot \Phi_u$$

El proceso de **cebado progresivo** que se produce en el bobinado inductor, se puede representar siguiendo la secuencia:

Magnetismo remanente  $\rightarrow E_r \rightarrow I_{ex,1} \rightarrow E_1 \rightarrow I_{ex,2} \rightarrow E_2 \rightarrow \dots$   
 $\rightarrow I_{ex,n} \rightarrow E_{nominal}$

Lo descrito anteriormente no sería posible si en el circuito magnético del inductor no existiera magnetismo remanente, por lo que tendríamos que conectar el bobinado inductor a una fuente de corriente continua externa durante un tiempo determinado.

Para comprobar si existe magnetismo remanente y qué polaridad tiene, recurrimos a la brújula. Si la comprobación

se hace con el inductor serie, la tensión que se aplique deberá ser baja (24 voltios en corriente continua). Si la comprobación se hace con el inductor *shunt*, la tensión que aplicar será de 110 V en corriente continua.

La brújula determinará el polo N o S y se seguirá comprobando cada inductor adyacente, de manera que tenga la orientación opuesta al polo anterior, y así hasta completar todo el recorrido de los polos inductores. En la Figura 7.2, se puede ver la determinación de la polaridad de los inductores.

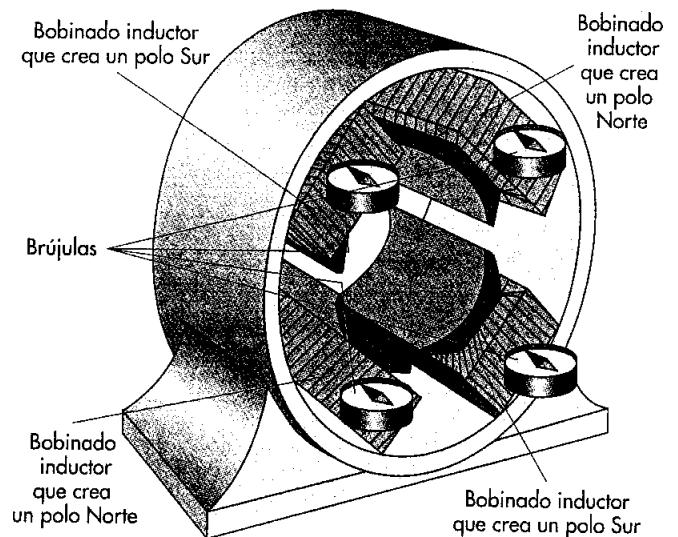


Fig. 7.2. Determinación de la polaridad de los inductores mediante brújula.

Según el tipo de conexión, los tipos de generadores autoexcitados son:

- Generador con **excitación serie**.
- Generador con **excitación derivación** o *shunt*.
- Generador con **excitación compuesta** o *compund*.

### A. Generador con excitación serie

Es aquel cuyo bobinado inductor ( $D_1, D_2$ ) está conectado en serie con el inducido ( $A_1, A_2$ ), de manera que la intensidad que circula por el circuito interior y por el exterior (carga) es la misma. En la Figura 7.3, se puede observar el generador con excitación en serie.

### Formula 7.3

$$I_i = I_{ex} = I$$

Donde:

$I_i$  = intensidad que suministra el inducido

$I_{ex}$  = intensidad o corriente de excitación

$I$  = intensidad que absorbe la carga

La tensión en bornes del inducido según la ley de Ohm será:

**Fórmula 7.4**

$$U_b = E - (R_i \cdot I - R_s \cdot I) - 2 \cdot U_e$$

Donde:

$E$  = fem de cebado

$U_b$  = tensión en bornes de la carga

$R_i$  = resistencia del inducido

$R_s$  = resistencia del bobinado inductor serie

$U_e$  = caída de tensión de escobillas. Se considera de valor un voltio; por lo tanto,  $2 \cdot 1 = 2$  V

$I$  = Intensidad que absorbe la carga

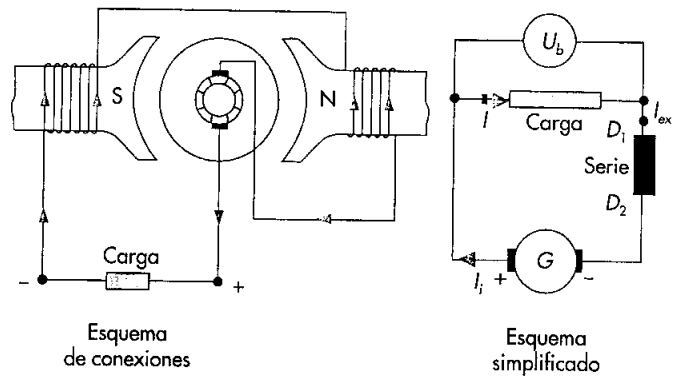


Fig. 7.3. Generador con excitación serie.

**Caso práctico 1**

Un generador con excitación en serie aporta una intensidad de 1,59 A a una carga exterior que consume una potencia de 350 W. El rendimiento eléctrico del inducido es del 96 %. Calcular la resistencia interior del inducido si la resistencia del bobinado en serie es de 0,98 Ω.

La tensión en bornes será:

$$U_b = \frac{P}{I} = \frac{350}{1,59} = 220 \text{ V}$$

Se conoce el rendimiento del inducido como el cociente que resulta de la potencia útil que absorbe la carga y la potencia total.

**Fórmula 7.5**

$$\eta_G = \frac{P_u}{P_t}$$

$$P_t = \frac{P_u}{\eta_G} = \frac{350}{0,96} = 364,5 \text{ W}$$

La diferencia entre la potencia total y la útil corresponde a la potencia que por efecto Joule se pierde en el cobre ( $P_p$ ), despreciando la  $P_{Fe}$ .

La resistencia total del circuito ( $R_t$ ), una vez despreciada la caída de tensión en las escobillas, está formada por  $R_s$  y  $R_i$ .

$$P_p = P_t - P_u = 364,5 - 350 = 14,5 \text{ W}$$

$$P_p = R_t \cdot I^2$$

$$R_t = \frac{P_p}{I^2} = \frac{14,5}{1,59^2} = \frac{14,5}{2,52} = 11,98 \text{ } \Omega$$

Como  $R_t = R_s + R_i$

$$R_i = R_t - R_s = 11,98 - 0,98 = 11 \text{ } \Omega$$

**B. Generador con excitación derivación o shunt**

Es aquel cuyo bobinado inductor ( $E_1, E_2$ ) está conectado en derivación con el inducido ( $A_1, A_2$ ).

La intensidad que circula por el inducido es la suma de las intensidades de excitación y de la carga exterior. En la Figura 7.4 se puede observar el generador con excitación derivación o shunt.

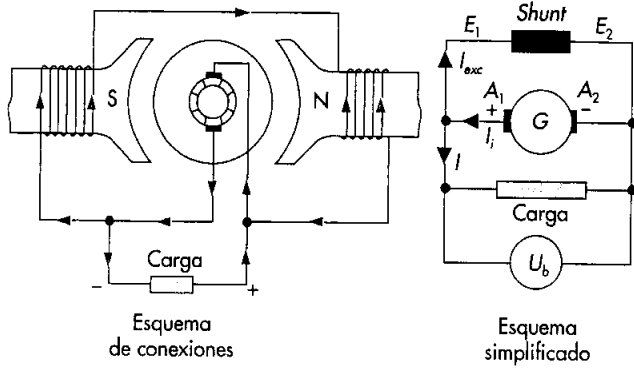


Fig. 7.4. Generador de excitación shunt.

La tensión en bornes del inducido, por ley de Ohm, será:

**Fórmula 7.6**

$$U_b = R_d \cdot I_{ex}$$

$$U_b = R \cdot I$$

$$U_b = E - (R_i \cdot I_i) - 2 U_e$$

Donde:

$R_d$  = resistencia del bobinado derivación o *shunt*

$R$  = resistencia de la carga

$R_i$  = resistencia del inducido

$U_e$  = caída de tensión en las escobillas de valor 1 V. Por tanto,  $2 U_e = 2 \cdot 1 = 2$  V.

**Caso práctico 2**

Un generador con excitación *shunt* genera en vacío una tensión de 220 V. Al someterse a una carga, la tensión baja a 210 V. Calcula la intensidad que absorbe la carga si la resistencia *shunt* ( $R_d$ ) es de 98  $\Omega$  y la  $R_i$  es de 8  $\Omega$ .

La fem inducida en carga será:

$$E = U_b + (R_i \cdot I_i) + 2 \cdot U_e$$

$$220 = 210 + 8 \cdot I_i + 2$$

$$I_i = \frac{220 - 212}{8} = 1 \text{ A}$$

$$I_{ex} = \frac{U_b}{R_d} = \frac{210}{98} = 2,18 \text{ A}$$

**C. Generador con excitación compuesta o compund**

Es el generador que dispone de dos bobinados inductores, uno conectado en serie con el inducido ( $D_1, D_2$ ) y otro conectado en derivación ( $E_1, E_2$ ).

Por ser un generador formado por un bobinado en serie y otro en derivación, su nombre es **compuesto** o *compund*.

Las formas en las que se puede conectar el bobinado inductor en derivación son:

Derivación corta, conectando el bobinado *shunt* antes de conectar al inducido el bobinado serie, como se puede ver en la Figura 7.5.

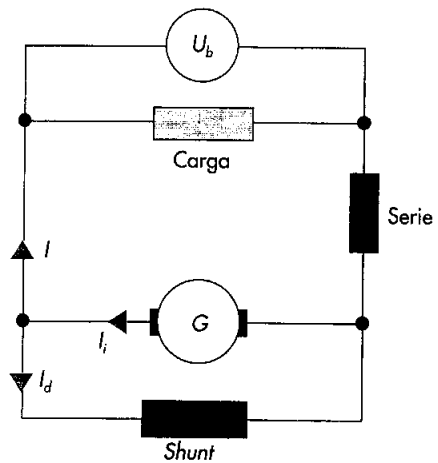


Fig. 7.5. Generador compund, conexión corta.

Derivación larga, conectando el bobinado serie al inducido antes de conectar el bobinado *shunt*, como se puede observar en la Figura 7.6.

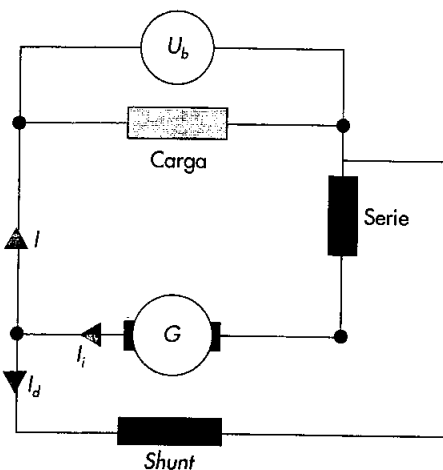


Fig. 7.6. Generador compund, conexión larga.

## 74 Curvas de características del generador de CC

Hasta ahora no ha sido posible establecer un método matemático que relacione las magnitudes que intervienen en el estudio y funcionamiento de las máquinas de CC.

Para establecer relaciones entre las magnitudes de una máquina de CC se ha recurrido a los ensayos de las máquinas, y a partir de los resultados obtenidos, se determinan **representaciones gráficas** o curvas características, que nos permiten analizar y predecir el comportamiento de la máquina en sus diferentes estados de funcionamiento.

Las curvas de características nos permiten conocer la variación de una magnitud con respecto a otra cuando las magnitudes restantes permanecen constantes.

Como se ha comprobado en los ejercicios de aplicación, las magnitudes que intervienen en el funcionamiento de un generador son:

- Tensión en bornes de la carga ( $U_b$ )
- Corriente de excitación ( $I_{ex}$ )
- Corriente suministrada por el inducido ( $I_i$ )
- Velocidad de giro ( $n$ )

La posición de las escobillas se considera fija.

La **relación entre las magnitudes** citadas nos lleva a la necesidad de representar una función en las que intervengan las cuatro magnitudes.

$$f(U_b, I_{ex}, I_i, n) = 0$$

Como es complejo relacionar cuatro variables, se recurre a la representación de una variable en función de otra, mientras que las demás permanecen constantes, pudiendo así determinar las diferentes curvas de características.

### A. Tipos de curvas de características esenciales en los generadores de CC

Los diferentes tipos de excitación de una máquina de CC son motivo suficiente para conocer sus características más funcionales y poder establecer el mejor servicio con las mejores garantías de funcionamiento.

A continuación trataremos las curvas de características más representativas que se pueden determinar en función de las magnitudes estudiadas.

#### Característica en vacío

Es la curva que representa la **tensión en bornes en vacío**, para una velocidad de rotación determinada, en función de la corriente de excitación. La característica en vacío se expresa:

$$U_{bo} = f(I_{ex})$$

Siendo:

$$I_i = 0$$

$$n = \text{constante}$$

#### Característica en carga

Es la curva que representa la **tensión en bornes en función de la corriente de excitación**, para una velocidad de rotación y una intensidad en el circuito exterior constantes. La característica en carga se expresa:

$$U_b = f(I_{ex})$$

Siendo:

$$n = \text{constante}$$

$$I_i = \text{constante} > 0$$

#### Característica de excitación o regulación

Es la curva que representa la **corriente de excitación en función de la corriente suministrada** por la máquina, para una velocidad de rotación y una tensión en bornes constantes. La característica en carga se representa:

$$I_{ex} = f(I_i)$$

Donde:

$$U_b = \text{constante} > 0$$

$$n = \text{constante}$$

#### Característica exterior

Es la de mayor interés, ya que es la curva que representa la **tensión en bornes en función de la carga del generador**, manteniendo constantes los valores de la intensidad de excitación y la velocidad de rotación. La característica exterior se representa:

$$U_b = f(I)$$

Donde:

$I_{ex} = \text{constante} > 0$

$n = \text{constante}$

## 7.5 Interpretación de las curvas de características del generador de excitación independiente

Las propiedades del generador con excitación independiente se determinan en función de los aspectos derivados del estudio de la curva de características.

Las ventajas para la determinación de las curvas de características del generador de excitación independiente pasa por no condicionar el inductor al inducido, y viceversa.

### A. Curva de característica en vacío

Al funcionar la dinamo de excitación independiente en vacío, la fem coincide con la tensión en bornes; por ello esta curva se representará por:

$$U_{bo} = f(I_{ex})$$

En la curva se distinguen tres partes. La parte inferior es recta; al producirse una corriente de excitación muy pequeña los **amperios vuelta** generados son absorbidos por el entrehierro.

Esta parte es muy inestable por su elevada inclinación, ya que una pequeña variación de la corriente de excitación produce una gran variación la tensión en bornes ( $U_{bo}$ ).

En la parte intermedia, conocida también como **codó**, se pierde la proporción entre la corriente de excitación y la tensión en bornes, lo que produce el inicio de la saturación del circuito magnético; esta parte de la curva, al ser más estable, es la recomendada como zona de funcionamiento.

En la parte final de la curva, se llega al **punto de saturación** de la chapa magnética, y se produce una recta; aunque varíe bastante la corriente de excitación, la tensión en bornes no sufre apenas variación.

En la Figura 7.7, se representa cada una de las partes de la curva de característica en vacío del generador de excitación independiente.

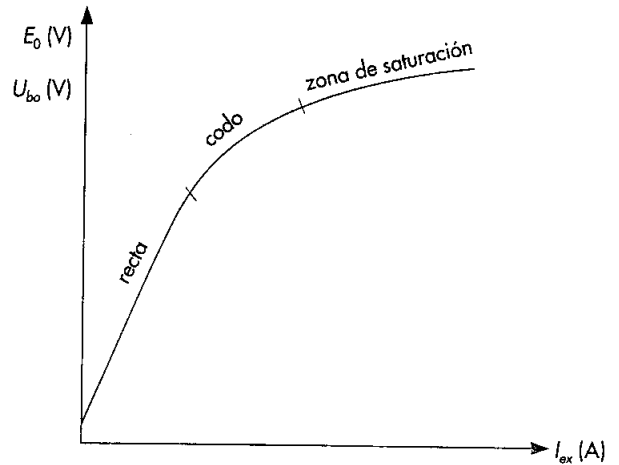


Fig. 7.7. Partes de la curva en vacío de un generador de CC de excitación independiente.

### B. Curva de característica en carga

Al funcionar el generador de excitación independiente en carga, se produce en el inducido una caída de tensión por dos motivos: por la propia resistencia del bobinado inducido, además de la producida en las escobillas, y por la caída de tensión como consecuencia de la reacción del inducido:

$$U_b = f(I_{ex})$$

La característica en carga se deberá hacer con un valor constante en la corriente de carga.

En la Figura 7.8, se obtiene la curva de características en función de la carga; se representan cuatro curvas para los diferentes valores de la carga o intensidad nominal.

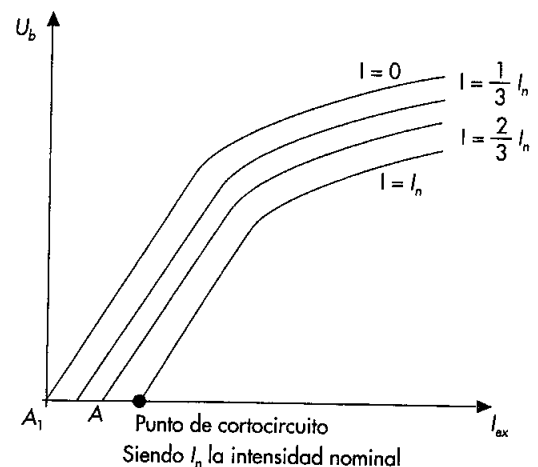


Fig. 7.8. Curvas de características en carga de un generador con excitación independiente.



### C. Curva de característica de regulación

La característica de regulación determina las variaciones de la corriente de excitación en diferentes regímenes de cargas, comprendidos entre el vacío y la plena carga:  $(I_{ex}) = f(I_l)$ .

La **curva de regulación** permite conocer la fuerza magnetomotriz del circuito inductor necesaria para cualquier valor de intensidad de carga.

Si nos atenemos a la curva de características de regulación de la Figura 7.9, podemos ver cómo la curva corta al eje de ordenadas en un punto, que corresponde con el valor de la corriente de excitación necesaria para suministrar una determinada tensión en bornes en el momento del arranque.

El punto *B* de la curva corresponde a la corriente de excitación necesaria para suministrar la tensión en bornes, cuando el generador suministra corriente a plena carga ( $I_n$ ).

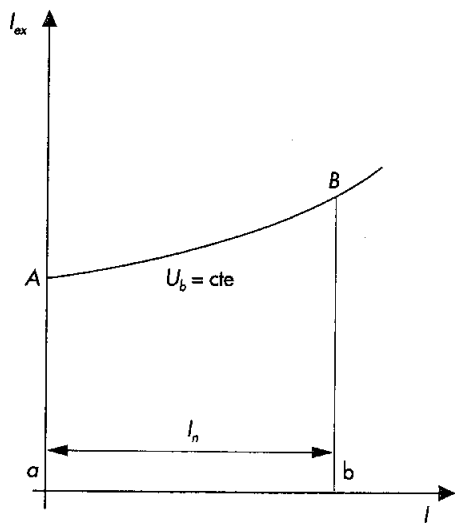


Fig. 7.9. Curvas de características de regulación de un generador con excitación independiente.

### D. Curva de característica exterior

Como se ha estudiado anteriormente,  $U_b = f(I)$ . Con la característica externa del generador que estamos estudiando se puede comprobar cómo cae la tensión en bornes de la carga a medida que va aumentando la intensidad absorbida de los receptores, mientras permanecen constantes la corriente de excitación y la velocidad del inducido.

La curva se representa tomando el eje de abscisas para los valores de la intensidad de carga, y el eje de ordenadas para los valores de la tensión en bornes.

La línea horizontal ( $E_0$ ) representa la tensión en vacío que este generador produce ( $I = 0$ ), y permite comprobar, para cualquier valor de la carga, la caída total de tensión del generador.

En el funcionamiento a plena carga indicado por el punto *A* en la curva, la caída de tensión será:

$$A_0 A = A_0 \cdot B - AB$$

Cuando la carga alcanza valores elevados, aumenta tanto la caída de tensión interna, principalmente por la reacción del inducido, que la tensión es cercana a cero. Si la intensidad siguiera aumentando llegaría al **punto de cortocircuito**. En la Figura 7.10, se puede observar la curva de característica exterior del generador en cuestión.

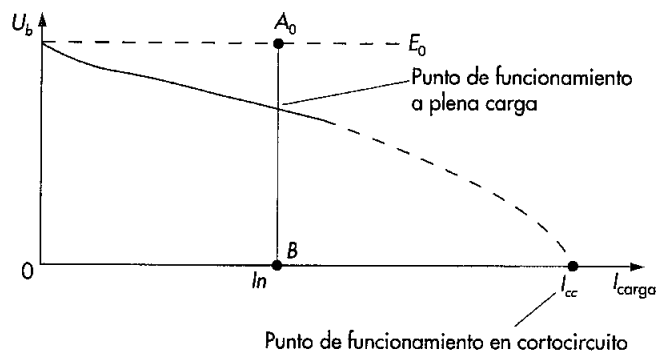


Fig. 7.10. Curva de característica exterior de un generador de CC de excitación independiente.

Si el generador dispone de polos auxiliares y bobinado de compensación, se contrarrestará la reacción del inducido y la caída de tensión se reducirá, dando lugar a una nueva característica,  $U_b = f(I)$ , con menos inclinación. Esta nueva característica la podemos ver en la Figura 7.11.

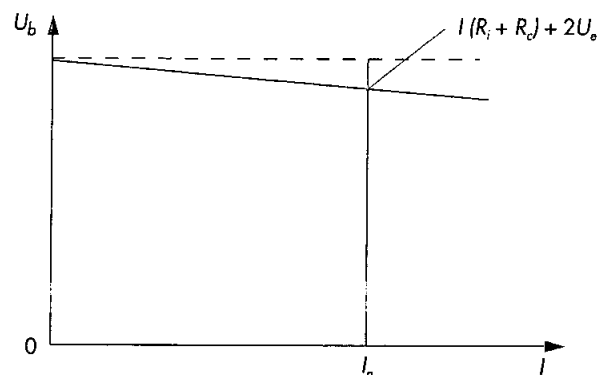


Fig. 7.11. Curva de característica exterior con la reacción del inducido corregida.

## 7.6 Curvas de características del generador autoexcitado

Las propiedades del generador autoexcitado se determinan en función de los aspectos derivados del estudio de las curvas de características.

La característica en vacío, en carga, de regulación y la de exterior son las curvas que se van a estudiar en los generadores de CC autoexcitados.

### A. Curva de característica en vacío del generador shunt

Al circular por el inducido una corriente de excitación cuando funciona en vacío, hace que no se cumpla la condición de que la corriente de carga sea nula. Al ser la corriente de excitación muy pequeña, si la comparamos con la corriente de carga, se puede afirmar que la curva se obtiene prácticamente en vacío.

La **curva de característica en vacío** del generador *shunt* vendrá dada por la función  $U_{b_0} = f(I_{ex})$ ; si la comparamos con la curva de vacío del generador independiente, se puede comprobar que existen las tres partes indicadas en la curva en vacío: la recta inicial (1), el codo (2) y la zona de saturación (3).

En la curva de vacío, se puede ver cómo la curva comienza en el eje de ordenadas, y cuenta con una pequeña tensión en bornes, producida por el magnetismo remanente.

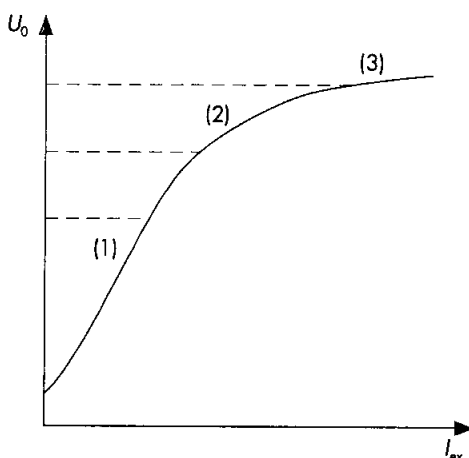


Fig. 7.12. Curva de característica de vacío de un generador shunt.

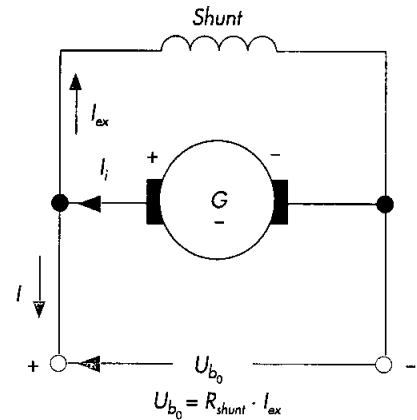


Fig. 7.13. Esquema de conexión de un generador shunt.

### B. Curva de característica en carga del generador shunt

La **curva de característica en carga** del generador *shunt*, dada por la función  $U_b = f(I_{ex})$ , siendo  $I > 0$  y  $n =$  constante, es muy parecida a la característica en carga del generador de excitación independiente, aunque con una pequeña variación.

En el generador de excitación independiente, la corriente exterior ( $I$ ) y la del inducido ( $I_i$ ) coinciden; en el generador *shunt* no coinciden, y se cumple la función:

#### Fórmula 7.7

$$I_i = I + (I_{ex})$$

En la Figura 7.14, se representa la curva para dos valores de la carga, muy parecida a la curva en carga del generador de excitación independiente.

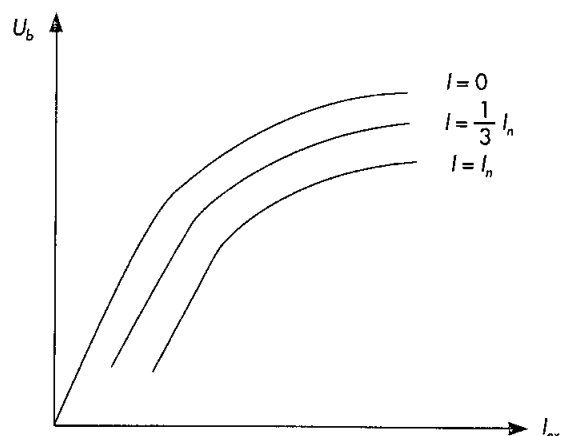


Fig. 7.14. Característica para dos valores de carga.

### C. Curva de característica de regulación del generador shunt

La **curva de característica de regulación** del generador shunt  $i_{ex} = f(I)$  es prácticamente igual, y permite averiguar la excitación necesaria para cualquier carga.

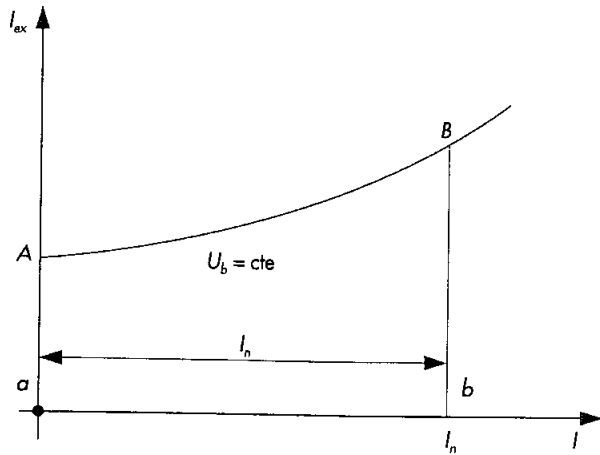


Fig. 7.15. Curva de característica de regulación en un generador shunt.

### D. Curva de característica exterior del generador shunt

La **curva de característica exterior** del generador shunt,  $U_b = f(I)$ , no mantiene constante la corriente de excitación por variar ésta en función de la tensión en bornes. Para ello se toma como variable constante la resistencia del circuito de excitación, es decir, del inductor shunt.

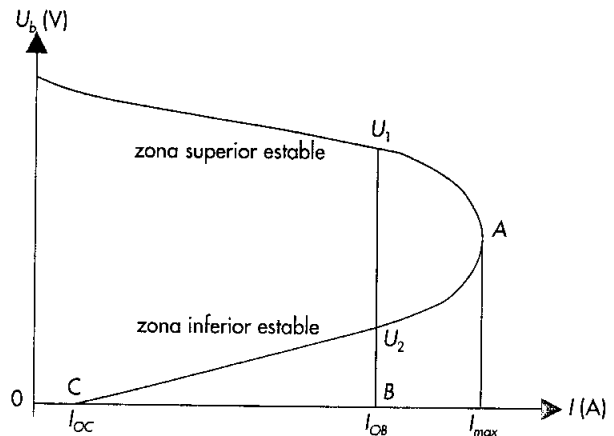
Como se puede comprobar, la característica exterior de un generador shunt tiene algunas diferencias con respecto al generador de excitación independiente, como:

- Bajada de tensión al pasar de vacío a carga.
- Aumento limitado de la corriente de carga.
- Se obtienen dos valores de tensión ( $U_1 - U_2$ ) para una misma corriente de carga.

### E. Curva de característica en vacío del generador serie

El generador con excitación serie presenta el inconveniente de su inestabilidad en el suministro de la tensión. Para el normal funcionamiento de este generador, es necesaria una carga exterior.

Este generador presenta una corriente de excitación igual a la corriente exterior, por lo que no es posible determinar



$I_{OC}$  = Corriente debida al magnetismo remanente  
 $I_{OB}$  = Corriente de carga para la que se obtienen dos tensiones:  $U_1 - U_2$   
 $I_{max}$  = Corriente exterior máxima, que es  $(2 \text{ a } 2'5) I_n$

Fig. 7.16. Curva de característica exterior de un generador shunt.

la curva de característica de vacío, salvo el punto inicial, que corresponde al magnetismo remanente del circuito inductor, donde la corriente de excitación será cero.

Se puede determinar la característica en vacío separando el circuito serie del inducido y aplicando una tensión de una fuente exterior.

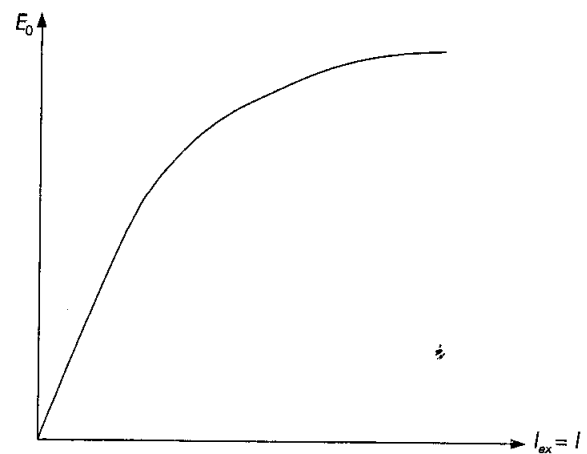


Fig. 7.17. Curva de característica de vacío en un generador serie.

### F. Característica de carga del generador serie

El funcionamiento normal de este generador, como se ha expuesto en el apartado anterior, es el de **funcionamiento en carga**, por ser necesaria la circulación de una corriente de excitación por el inductor.

El circuito de excitación es atravesado por la corriente de carga. Para evitar pérdidas de tensión y potencia, se cons-

truye el bobinado con pocas espiras de gran sección. De las curvas de características posibles, la que más interés puede tener es la de característica exterior.

### ■ G. Curva de característica exterior de un generador serie

La característica exterior del generador serie,  $U_b = f(I)$ , no cumple la condición de mantener la corriente de excitación constante al variar con la carga, aun manteniendo la velocidad constante.

Como se puede observar en la Figura 7.18, al principio la curva presenta una inclinación considerable, lo que la hace inestable, ya que una pequeña variación en la carga provocará una variación considerable en la tensión en bornes.

Al disminuir la resistencia de carga, aumenta la corriente de carga y la tensión en bornes, y se alcanza el valor máximo en el punto C de la Figura 7.18.

Si la resistencia de carga siguiera bajando, la tensión en bornes llegaría a anularse, lo que provocaría una elevación en la corriente de carga que llegaría hasta el punto A, y el generador funcionaría en cortocircuito.

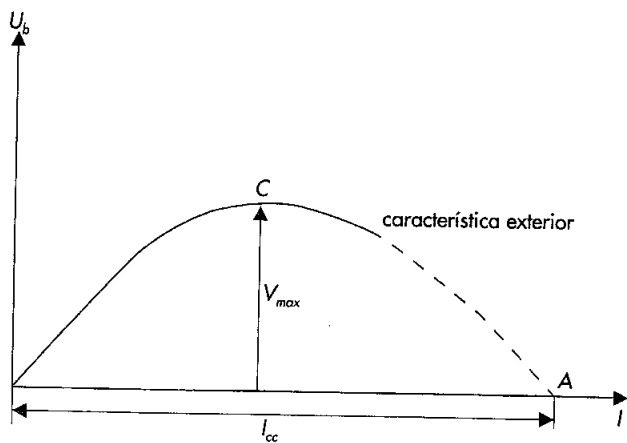


Fig. 7.18. Curva de característica exterior de un generador serie.

## 7.7 Curvas de características del generador compund

La excitación del generador *compund* esta producida por el bobinado *shunt* y el bobinado serie.

Cuando los dos bobinados producen el campo magnético en la misma dirección, hablamos de **compund aditivo**, y cuando producen campos magnéticos opuestos, recibe el nombre de **compund diferencial**.

Las características de funcionamiento del generador *compund* están comprendidas entre el generador *serie* y *shunt*.

Las características que responden al funcionamiento del generador *compund* son las de vacío y las de exterior.

### ■ A. Curva característica de vacío de un generador compund

El funcionamiento en vacío del generador *compund* se es similar a la de un generador *shunt*, ya que la corriente que recorre el bobinado serie es insignificante.

Por lo tanto, la curva característica del generador *compund* en vacío será idéntica a la del generador *shunt* en vacío.

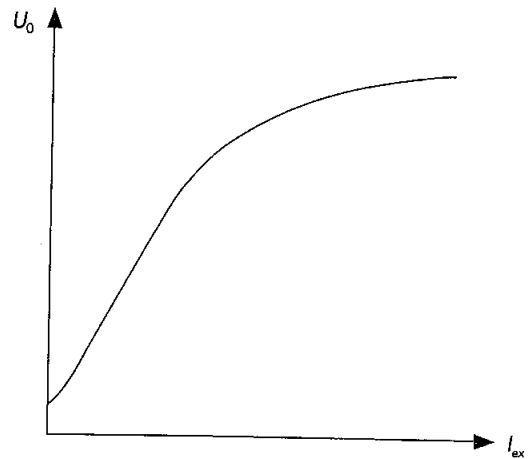


Fig. 7.19. Curva característica de vacío de un generador compund.

### ■ B. Curva de característica exterior de un generador compund

En los generadores *compund* se relacionan las características del generador *shunt* y serie, originando las combinaciones siguientes:

- **Generador compund:** proporciona una tensión en bornes estable para cualquier carga (Figura 7.20).
- **Generador hipocompund:** proporciona una tensión en bornes decreciente con el aumento de la carga. En esta

curva predomina la excitación *shunt* con respecto a la serie (Figura 7.20).

- **Generador anticompond:** proporciona una tensión en bornes muy decreciente con el aumento de la carga (Figura 7.20).
- **Generador hipercompund:** proporciona un ligero aumento de la tensión en bornes al aumentar la corriente de carga. En este tipo predomina la excitación serie con respecto a la excitación *shunt* (Figura 7.20).

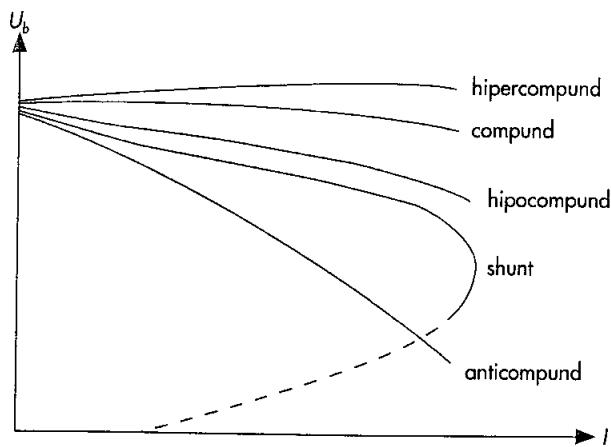


Fig. 7.20. Características exteriores de un generador compund y un generador shunt.

## 7.8 Características fundamentales del motor de CC

A lo largo del texto se ha expuesto que la máquina de corriente continua es reversible, es decir, que su aspecto constructivo se puede utilizar para generador y para motor.

El caso que nos ocupa, es decir, el motor de CC, transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

La aplicación del motor de corriente continua es mayor que la de los generadores, ya que prácticamente toda la generación de energía en sistemas de potencia se hace en corriente alterna.

Las magnitudes que intervienen en los motores de CC son, fundamentalmente:

- La velocidad de rotación ( $n$ ).
- El par motor ( $M$ ).
- La corriente del inducido ( $I_i$ ).

- La corriente de excitación ( $I_{ex}$ ).
- La tensión en bornes ( $U_b$ ).

Para estudiar el comportamiento del motor, relacionaremos la velocidad de rotación, el par motor y la corriente de excitación, con la tensión en bornes constante.

Al relacionar las tres variables citadas, obtendremos una función de tres variables:

$$f(n, M, I_i) = 0$$

Al igual que sucedía en los generadores, la combinación de variables da lugar a las siguientes características.

### A. Curva característica de velocidad

Es la curva que representa gráficamente la **velocidad del motor en función de la corriente del inducido:**

$$n = f(I_i)$$

En la Figura 7.21, se puede comprobar la relación entre la velocidad y la corriente del inducido.

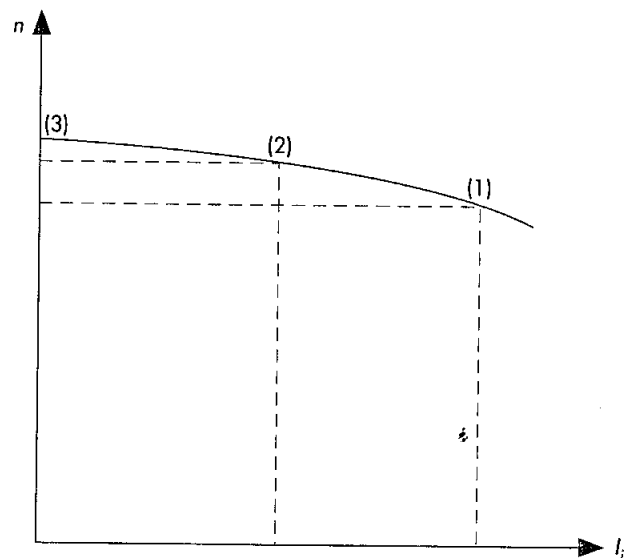


Fig. 7.21. Característica de velocidad del motor de CC.

### B. Curva característica de par motor

Es la curva que representa gráficamente el **par motor en función de la corriente del inducido:**

$$M = f(I_i)$$

En la Figura 7.22, se puede comprobar la relación entre el par motor y la corriente del inducido.

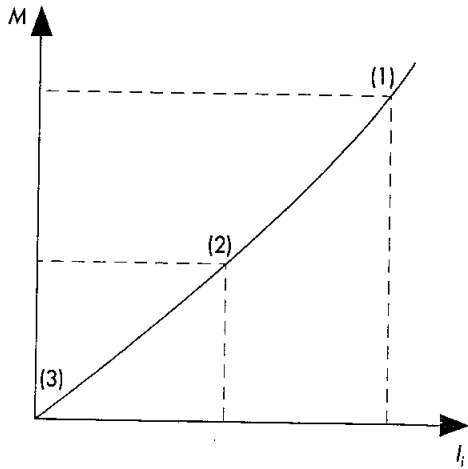


Fig. 7.22. Características de par motor.

### C. Curva de característica mecánica

Es la curva que representa gráficamente el **par motor en función de la velocidad de rotación:**

$$M = f(M, n)$$

En la Figura 7.23, se puede comprobar la relación entre el par motor y la velocidad de rotación.

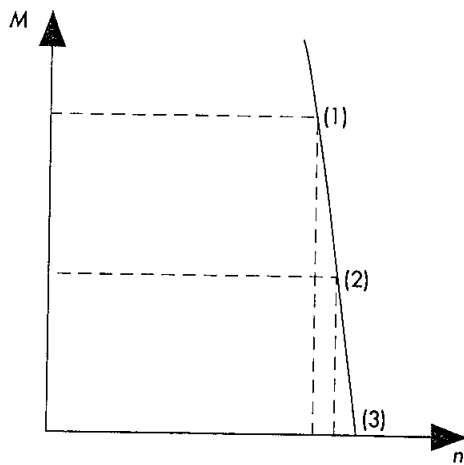


Fig. 7.23. Característica mecánica.

### • Por su funcionamiento.

Como se pudo comprobar en unidades anteriores, los motores, por su excitación, pueden ser:

- Motor con excitación independiente.
- Motor con excitación derivación o *shunt*.
- Motor excitación serie.
- Motor excitación compuesta o *compund*.

Las características específicas de las máquinas de corriente continua y los bornes de identificación de los bobinados son las mismas que se han expuesto para los generadores de corriente continua.

En la Figura 7.24 están representados los esquemas simplificados de cada uno de los tipos de excitación de los motores de CC.

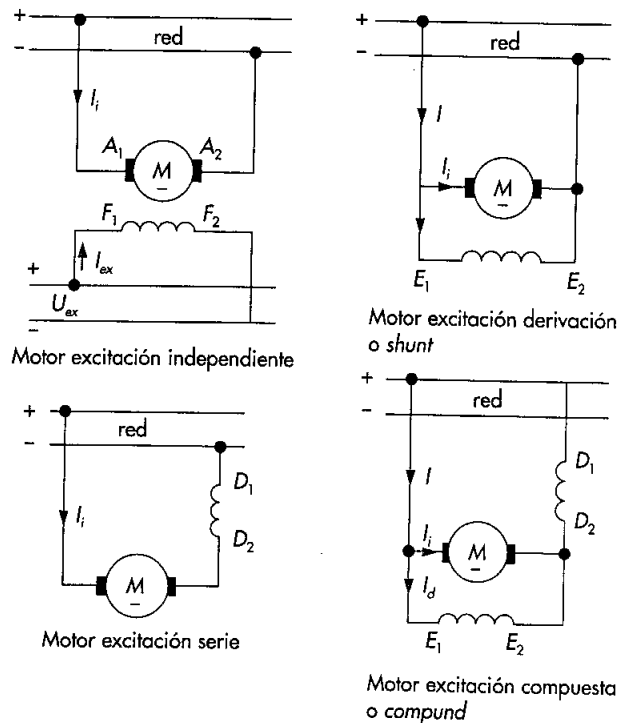


Fig. 7.24. Motores de corriente continua.

## 7.9 El motor de corriente continua en servicio

Entre las diferentes formas de clasificar los motores de corriente continua, se pueden destacar dos:

### • Por su excitación.

## 7.10 Características generales aplicadas en los motores de CC

Las características utilizables en el estudio de los motores de CC son:

- **Característica de velocidad.**
- **Característica de par motor.**

La expresión para determinar la velocidad en todos los motores de corriente continua, de manera simplificada, será:

**Fórmula 7.8**

$$n = K_1 \cdot \frac{U_b - (R_i \cdot I_i)}{\Phi}$$

La expresión para determinar el par motor en todos los motores de corriente continua será:

**Fórmula 7.9**

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_i$$

**A. Característica de velocidad del motor shunt**

En el motor de excitación *shunt*, la velocidad disminuye ligeramente ( $\approx 5\%$ ) cuando el par motor aumenta.

Al ser constante la tensión de la red, sólo intervienen en la expresión las variables  $R_i \cdot I_i$  y  $\Phi$ .

**Fórmula 7.10**

$$n = K \cdot [U_b - (R_i \cdot I_i)]$$

Al ser el término  $R_i \cdot I_i$  muy pequeño, la velocidad baja algo con la carga. Se puede ver en la Figura 7.25, en la curva 1.

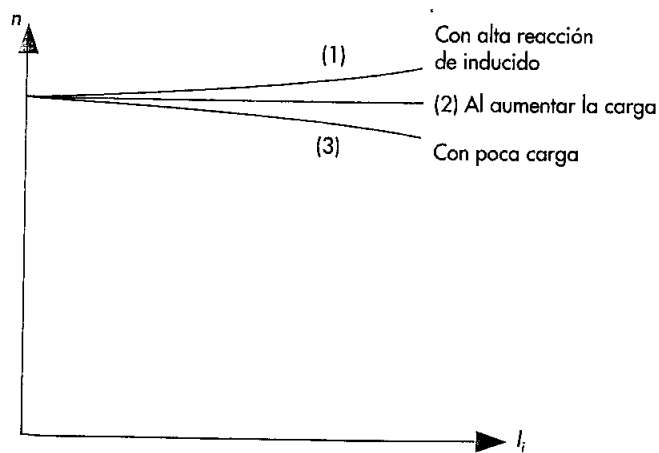


Fig. 7.25. Característica de velocidad de un motor shunt.

Al disminuir el flujo por reacción del inducido al aumentar la carga, aumenta la velocidad, por lo que al disminuir el denominador de la Fórmula 7.8, aumentará la velocidad, como indica la curva 2 de la Figura 7.25.

Puede ocurrir que la reacción del inducido sea muy elevada, lo que hace que la velocidad aumente aún más, como indica la curva 3 de la Figura 7.25.

**B. Característica del par motor excitación shunt**

Si el flujo permanece constante, la característica del **par interno** se mostrará como una línea recta con su principio en el origen de las coordenadas. Se puede ver en la curva 1 de la Figura 7.26.

Al no ser el flujo constante, ya que disminuye ligeramente con la carga, la característica del par interno está sensiblemente inclinada, como se ve en la curva 2 de la Figura 7.26.

La característica del **par útil** está por debajo de la curva anterior, a una distancia prácticamente constante; este par contrarresta las pérdidas, manteniéndose el par constante en carga y en vacío, por ser la velocidad y el flujo constantes.

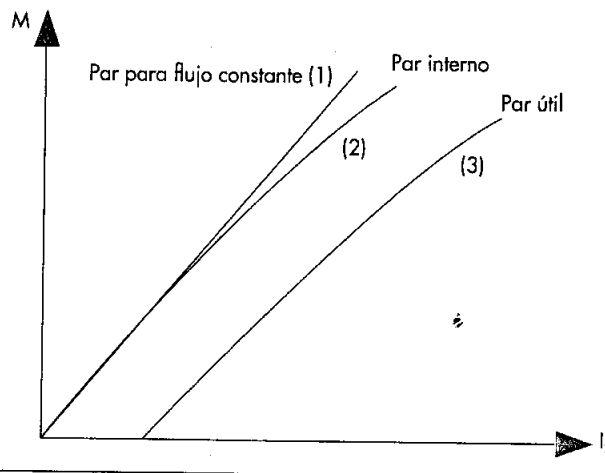


Fig. 7.26. Característica del par motor con diferentes valores de flujo.

**C. Característica de velocidad del motor serie**

En el motor de excitación serie, al aumentar el par motor, la velocidad disminuye sensiblemente, de la misma manera que el motor no tiene límite de velocidad cuando se encuentra en vacío.

Por lo tanto, este motor no debe funcionar en vacío debido a la aceleración y pérdida de control en su velocidad; por eso decimos que es un motor muy inestable, cuya velocidad se expresa:

$$n \approx K \cdot \Phi$$

A diferencia del motor *shunt*, la corriente de excitación es la misma que la corriente de la carga, lo que hace variar el flujo con respecto a la carga.

Llegamos a la conclusión de que la **velocidad dependerá prácticamente del flujo**. En la Figura 7.27, se puede observar la característica de la velocidad de un motor serie; la velocidad disminuye al disminuir la intensidad, como se puede comprobar en la siguiente igualdad:

$$I = I_i = I_{ex}$$

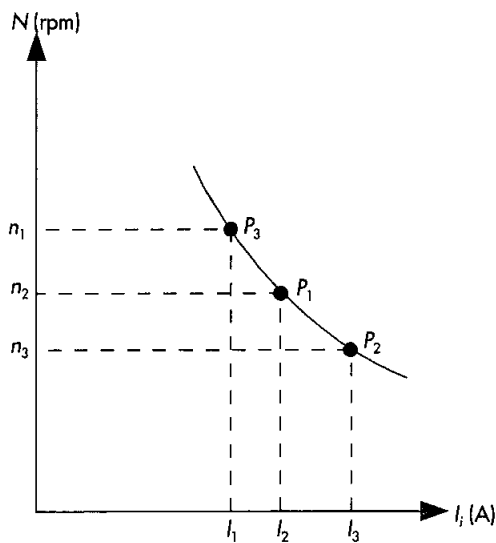


Fig. 7.27. Característica de velocidad de un motor serie.

#### D. Característica del par motor excitación serie

Al depender el par motor del producto del flujo por la corriente, dado que el flujo depende de la corriente, el par motor será:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_i$$

Al aumentar la corriente, el motor se satura y el par interno tiende a un valor constante, como se puede comprobar en la curva 1 de la Figura 7.28.

La característica del par útil está situada debajo de la característica interna (ver curva 2 de la Figura 7.28), una vez que se le restan los valores del par que neutralizará las pérdidas.

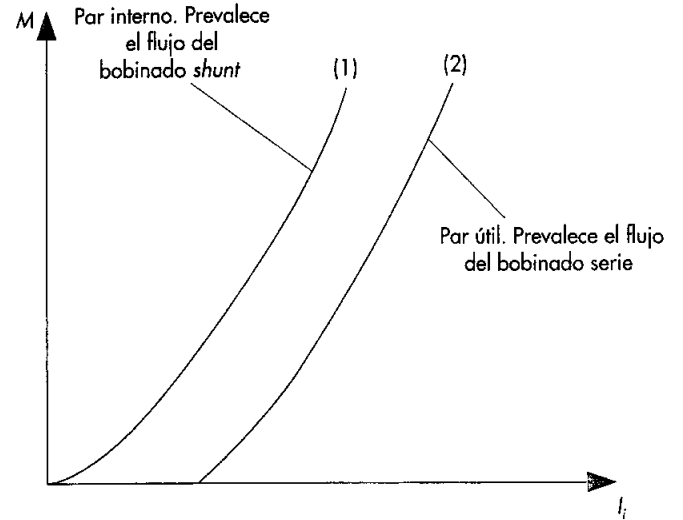


Fig. 7.28. Característica del par motor.

#### E. Característica de velocidad del motor compund

Las características de funcionamiento del motor *compund*, como ocurriera en los generadores, están comprendidas entre las del motor serie y las del motor *shunt*.

Cuando los flujos de los bobinados inductores serie y *shunt* se suman tenemos el motor *compund* aditivo, mientras que en el motor *compund* diferencial los flujos de los bobinados inductores serie y *shunt* se oponen.

De la Fórmula 7.11, se puede deducir que la velocidad del motor *compund* aditivo depende directamente de la corriente del inducido y, por tanto, también del flujo resultante.

#### Fórmula 7.11

$$n = \frac{K \cdot [U_b - (R_i \cdot I_i) - (R_s \cdot I_i) - 2 U_a]}{\Phi_{shunt} + \Phi_{serie}}$$

En la Fórmula 7.12 se puede deducir la velocidad del motor *compund* diferencial.

#### Fórmula 7.12

$$n = \frac{K \cdot [U_b - (R_i \cdot I_i) - (R_s \cdot I_i) - 2 U_a]}{\Phi_{shunt} - \Phi_{serie}}$$

También se puede comprobar en las Figuras 7.29 y 7.30, la diferencia de característica de velocidad del motor *compund* aditivo con el motor *compund* diferencial; por lo tanto, se deduce que la variación de la característica del mo-



tor diferencial es la oposición de los flujos de los bobinados *shunt* y serie.

La forma de la curva dependerá del flujo que prevalezca. Si el flujo del bobinado serie prevalece sobre el bobinado *shunt*, la característica será la curva 2 de la Figura 7.29.

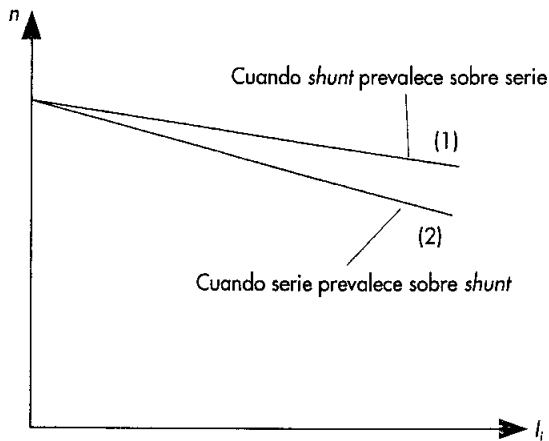


Fig. 7.29. Característica de velocidad del motor compund aditivo.

En el caso del motor *compund* diferencial, a medida que aumenta la carga, lo hace también el flujo serie, y disminuye el flujo resultante y, por lo tanto, el aumento de la velocidad, como indica la curva 1 de la Figura 7.30.

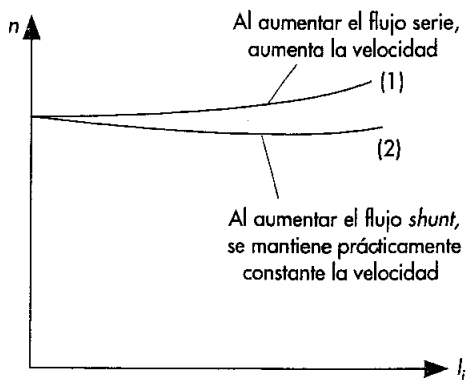


Fig. 7.30. Característica de velocidad del motor compund diferencial.

### F. Característica del par motor, excitación compund

El par motor depende tanto de la intensidad como del flujo resultante de los bobinados *shunt* y serie. En el caso de motor aditivo, los flujos se suman, como se puede comprobar en la Fórmula 7.13.

### Fórmula 7.13

$$M_{ad} = K \cdot (\Phi_{shunt} + \Phi_{serie}) \cdot I_i$$

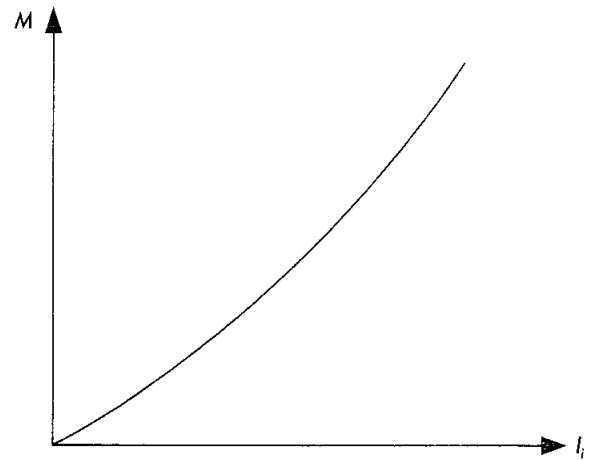


Fig. 7.31. Característica del par motor excitación compund aditivo.

Sin embargo, en un motor diferencial los flujos se oponen, como indica la siguiente fórmula:

### Fórmula 7.14

$$M_{ad} = K \cdot (\Phi_{shunt} - \Phi_{serie}) \cdot I_i$$

El descenso de la curva 1 de la Figura 7.32 se debe al predominio de la excitación serie sobre la excitación *shunt*.

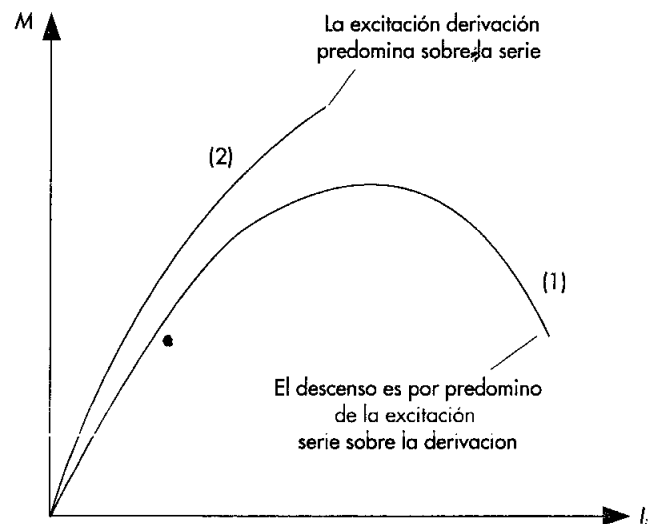


Fig. 7.32. Característica del par motor excitación compund diferencial.

## 7.11 Componentes necesarios para el ensayo de la máquina

Además de los equipos de herramientas y útiles para el mantenimiento de máquinas eléctricas que se han citado en unidades anteriores, para el ensayo de máquinas de CC el equipamiento es muy específico.

Para el ensayo de máquinas, se debe disponer de un laboratorio de máquinas, donde el cambio, el acople y desacople de las mismas no supongan traslados, y así evitar manipulaciones innecesarias.

Un laboratorio de ensayos de máquinas debe tener al menos:

- Dos equipos para determinar las magnitudes eléctricas, mecánicas, térmicas, etc.
- Bancada con máquina motriz, equipos de generadores de CC con excitación independiente y autoexcitadas, serie, *shunt* y *compund*, equipo de motores de CC con excitación independiente, serie, *shunt* y *compund*.
- Cargas eléctricas variables, fuentes de alimentación, cargas mecánicas, reóstatos de campo, reguladores de tensión, medidor de aislamiento o megóhmetro, medidor de rigidez dieléctrica de sólidos.

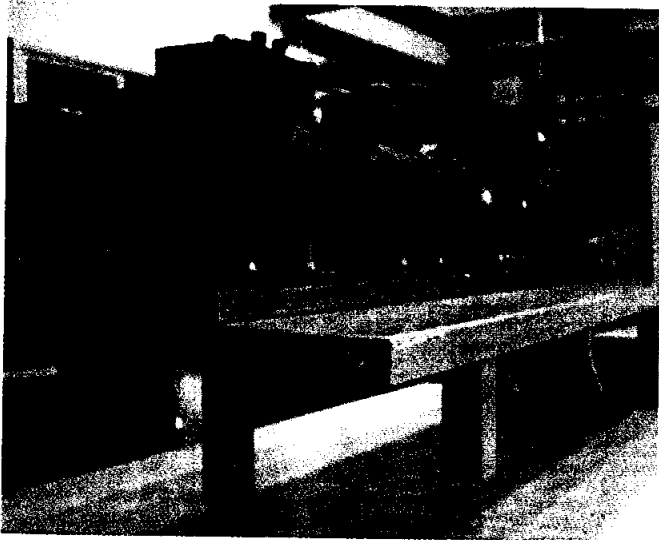


Fig. 7.33. Bancada de ensayos de máquinas de corriente continua.

### A. Reóstato de campo

La función del reóstato de campo consiste en variar el flujo del bobinado inductor de una máquina de CC, intercalán-

dolo en serie en el circuito inductor cuando la excitación de la máquina es independiente o *shunt*, y en paralelo al inductor cuando la máquina tiene excitación serie. En la Figura 7.33, se puede ver representado un reóstato de campo para la regulación del circuito de excitación.

Los reóstatos de campo también se llaman «reguladores de tensión» cuando el receptor necesita una tensión constante y se precisa regular las variables del generador. Si es la intensidad la que debe permanecer constante, se denomina «regulador de corriente».

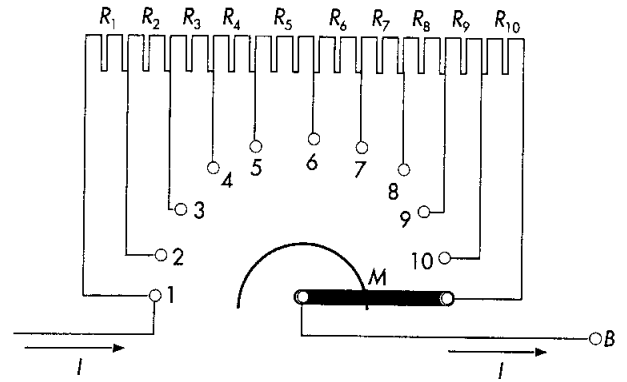


Fig. 7.34. Regulador de campo de diez tramos de resistencias.

En la Figura 7.35 podemos observar las conexiones de un reóstato de campo en los diferentes tipos de excitaciones de las máquinas de corriente continua.

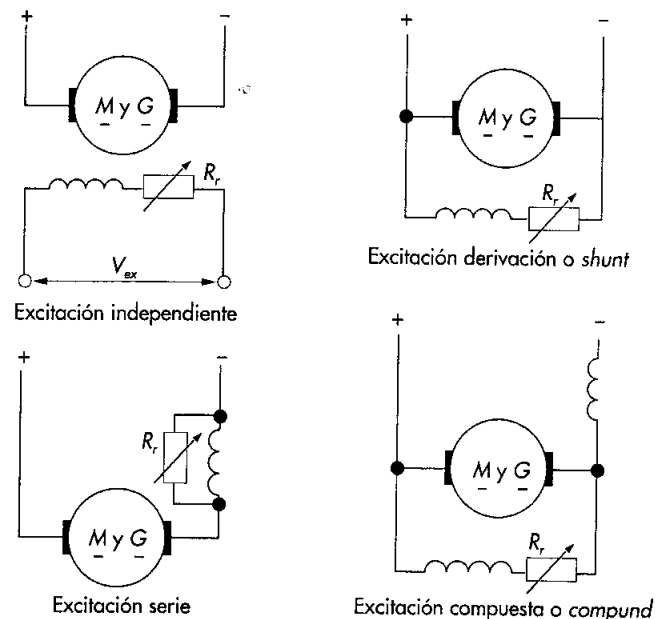


Fig. 7.35. Conexión de un reóstato de campo.

## 7.12 Ensayo de aislamiento

El aislamiento es uno de los factores más importantes para que la máquina pueda estar en perfecto estado de funcionamiento.

Para ello, se recurre a la medida de resistencia de aislamiento y al ensayo dieléctrico o rigidez dieléctrica.

Generalmente, estas mediciones se realizan entre cada uno de los circuitos eléctricos y masa, y a cada uno de los circuitos eléctricos que deben estar aislados entre sí.

La medida de aislamiento se realiza con un medidor de aislamiento (*megger*).

La **resistencia de aislamiento**, dada por el CEI (Comité Electrotécnico Internacional), recomienda que el valor mínimo de aislamiento sea de 1 000  $\Omega$  por voltio; por consiguiente, según la expresión, será:

### Fórmula 7.15

$$R_{\text{aisl}} > 1\,000 \cdot U$$

Donde:

$R_{\text{aisl}}$  = resistencia de aislamiento.

$U$  = tensión mayor de los bobinados.

Con un valor mínimo de 250 k $\Omega$ .

El ensayo de rigidez dieléctrica se puede definir como la prueba que se le realiza al aislante hasta el instante de perforación aplicándole una determinada tensión.

El aparato que se utiliza para este tipo de ensayo es el **medidor de rigidez dieléctrica** (chispómetro). Este aparato dispone de una alta tensión en sus puntas.

El ensayo debe aplicarse entre cada uno de los bobinados y masa, y a los propios bobinados aislados entre sí. El ensayo debe comenzar aplicando una baja tensión y progresivamente aumentarla hasta llegar a la tensión eficaz de ensayo.

La duración del ensayo va en función del tipo de máquina, y, por lo general, se realiza en máquinas rotativas con potencia inferior a 10 000 kW.

### Recuerda

La tensión eficaz de ensayo deberá ser 1 000 voltios, más dos veces la tensión nominal de trabajo de la máquina.

$$V_{\text{ef}} = 1\,000 \text{ V} + 2 U_n$$

Siendo:

$V_{\text{ef}}$  = tensión de ensayo

$U_n$  = tensión nominal de la máquina

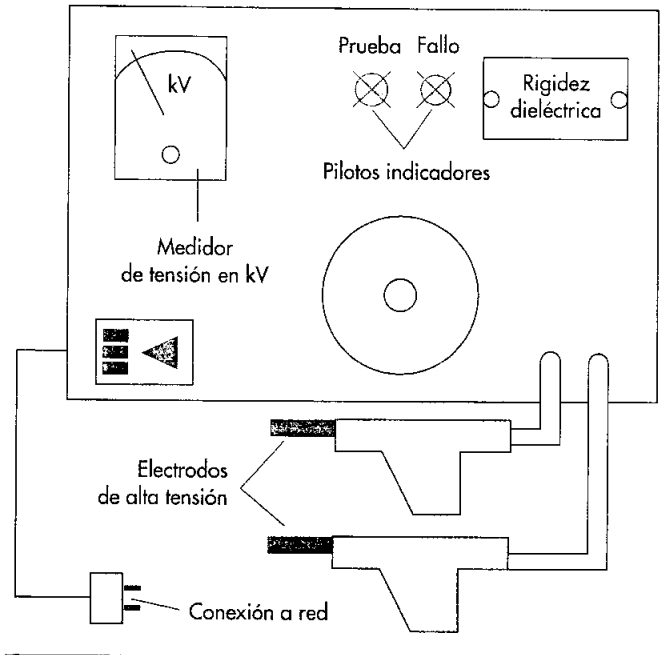


Fig. 7.36. Medidor de rigidez dieléctrica.

## 7.13 Medición de temperaturas de funcionamiento

Los métodos para la medición de temperatura son:

- **Método por termómetro.**
- **Método por variación de resistencia.**
- **Método por indicadores internos de temperatura** (termistores).

El método por termómetro consiste en medir la temperatura sobre una parte accesible de la máquina.

El método por variación de resistencia consiste en determinar la temperatura de los bobinados mediante el aumento del valor de su resistencia.

El método por indicadores internos de temperatura consiste en colocar durante la construcción de la máquina unos **termistores** en zonas inaccesibles del bobinado, repartidos a lo largo de la circunferencia de la máquina.

## 7.14 Ensayo en los generadores de CC

La determinación de cada característica se realizará para el generador de excitación independiente, que cumple todos los requisitos que se estudiaron en el Apartado 7.5.

Los ensayos en los generadores de CC serán:

- Los determinados para las características de vacío.
- Los determinados para las características de carga.
- Los determinados para las características de regulación.
- Los determinados para las características exteriores.

### A. Ensayo del generador en vacío

Como se recordará del apartado 7.5, la característica en vacío se representa por:

$$E_0 = f(I_{ex})$$

Para la  $I_f = 0$  ;  $n = \text{constante}$

En la Figura 7.37 se puede apreciar el esquema de montaje que corresponde a un generador de excitación independiente; el circuito inductor será alimentado por una fuente exterior a su tensión nominal.

Se intercalará un reóstato en serie con el bobinado inductor para variar la corriente de excitación.

El procedimiento es poner la máquina motriz en marcha con el generador acoplado al eje, recibiendo la velocidad prevista.

Antes de conectar el circuito de excitación, se tomará la lectura del voltímetro  $E_0$ , que indicará la tensión producida por el magnetismo remanente.

A continuación se conecta el circuito inductor con el reóstato a la mayor resistencia, y por el circuito inductor circulará una intensidad de excitación mínima que deberá medirse en el amperímetro del circuito inductor.

Se puede comprobar entonces:

$$I_{ex} = \frac{U_{ex}}{R_{ex} + R_r}$$

En la tabla de valores se deberán registrar los datos de la lectura del voltímetro y del amperímetro cuando vaya disminuyendo la resistencia del reóstato  $R_r$ . Estos datos se anotarán en determinados tramos de forma que se indiquen así los diferentes puntos de la curva.

Una vez recogidos los datos ascendentes, tomaremos desde el último punto ascendente hacia los puntos anteriores, pero con los valores descendentes, hasta llegar al punto inicial del ensayo. Estos datos los anotaremos también en la tabla de valores, y completaremos así los datos del ensayo.

En la Tabla 7.2 se pueden apreciar los distintos apartados para la anotación de valores.

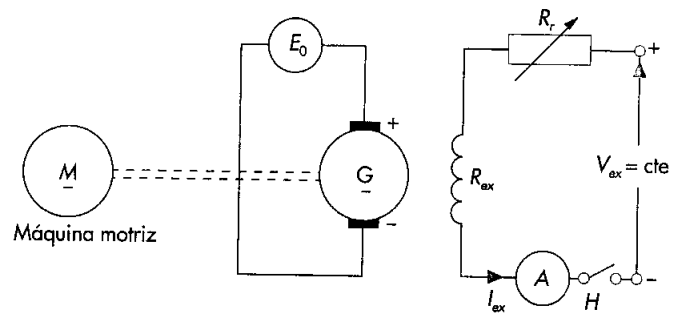


Fig. 7.37. Esquema de montaje para el ensayo de vacío de un generador de excitación independiente.

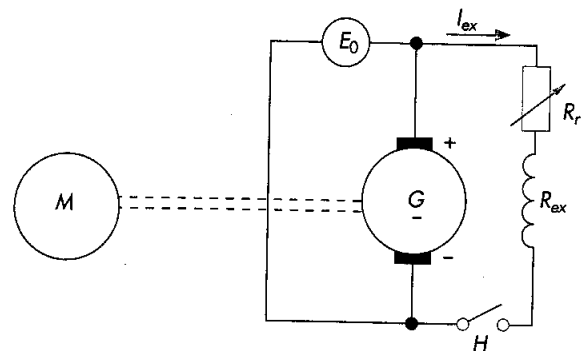


Fig. 7.38. Esquema de montaje del ensayo de vacío de un generador shunt.

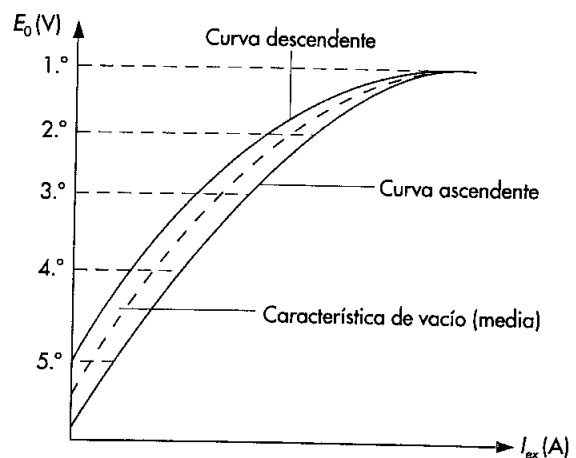


Fig. 7.39. Curva de característica de vacío resultante de los datos de la Tabla 7.3 del ensayo del generador de CC en vacío.

1.º					Medidas ascendentes
2.º					
3.º					
4.º					
5.º					
5.º					Medidas descendentes
4.º					
3.º					
2.º					
1.º					

Tabla 7.2. Tabla de valores del ensayo en vacío de un generador de CC.

La curva de la Figura 7.39 indica los pasos seguidos por el ensayo, los valores y los puntos determinados en las medidas efectuadas.

## B. Ensayo del generador en carga

Como se estudió en el apartado 7.5, la característica en carga se representa por:

$$U_b = f(I_{ex})$$

Cuando  $I_i$  es constante y  $n$  es constante.

En la Figura 7.40 se indica el esquema de montaje de un generador de excitación independiente; la diferencia con el esquema del ensayo en vacío es que se le incorporará una carga mediante una resistencia variable  $R$ .

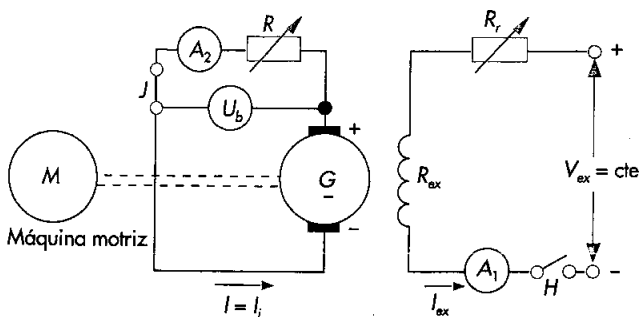


Fig. 7.40. Esquema de montaje del ensayo de un generador de excitación independiente en carga.

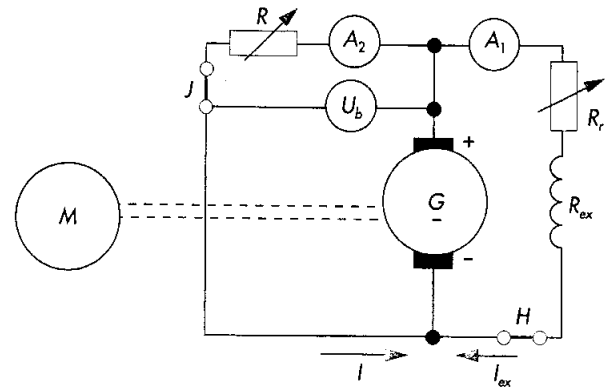


Fig. 7.41. Esquema de montaje del ensayo en carga de un generador de excitación shunt.

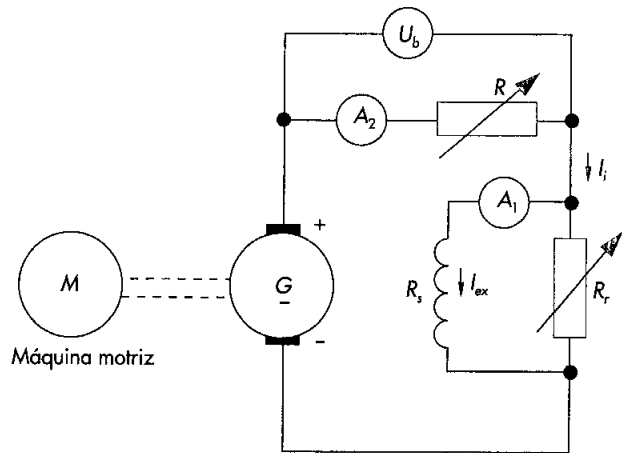


Fig. 7.42. Esquema de montaje del ensayo en carga de un generador de excitación serie.

Puesto en marcha el grupo, se ajustará a la velocidad nominal y se mantendrá la velocidad constante en todo el desarrollo del ensayo. Se medirá en determinados momentos la velocidad de giro mediante un **tacómetro**, para comprobar la estabilidad de la velocidad.

Al conectarse el circuito de excitación, el reóstato deberá estar a la máxima resistencia ( $R_r$ ), cerrándose el circuito de carga con el valor máximo de resistencia también.

El amperímetro del circuito de carga ( $A_2$ ) indicará el paso de una corriente, y se comprobará la que la corriente de carga coincida con la del ensayo, que normalmente es la plena carga ( $I_n$ ).

Para que la corriente de carga circule, se tendrá que actuar sobre el reóstato de excitación ( $R_r$ ).

Una vez determinada la corriente de carga, se toman los valores indicados en el voltímetro ( $U_b$ ) del circuito de carga y

en el amperímetro ( $A_1$ ) del circuito inductor, y se anotan en los casilleros correspondientes de la Tabla 7.3.

Se disminuirá la resistencia ( $R_r$ ) e irá aumentando la corriente de excitación, por lo que también aumentará la intensidad de carga ( $I_l$ ). Para que la intensidad de carga se mantenga constante, se actuará simultáneamente sobre la resistencia de carga ( $R$ ), con lo que se formarán los valores  $I_{ex}$  y  $U_b$ , que compondrán la curva prevista.

Puntos de la curva	Magnitudes o medidas				E <sub>b</sub> (V)	E <sub>a</sub> (V)
	I <sub>1</sub> (A)	E <sub>b</sub> (V)	I <sub>l</sub> (A)	E <sub>a</sub> (V)		
1.º						
2.º						
3.º						
4.º						
5.º						
5.º						
4.º						
3.º						
2.º						
1.º						

Tabla 7.3. Tabla de valores del ensayo en carga de un generador de CC.

La Figura 7.43 indica la curva de característica en carga del generador de excitación independiente, característica que correspondería al generador del ensayo.

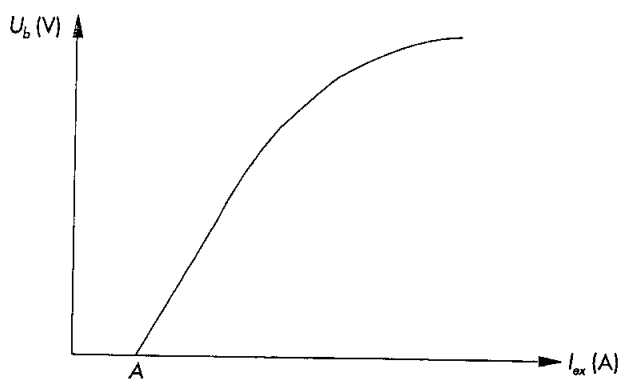


Fig. 7.43. Curva de característica en carga de un generador de excitación independiente.

## 7.15 Ensayo de las características de regulación

La característica de regulación, como se estudió en el apartado 7.5, se representa por:

$$I_{ex} = f(I_l)$$

Siendo la tensión en bornes ( $U_b$ ) y la velocidad ( $n$ ) constantes

Se obtiene por medio de un ensayo en carga, por lo que el esquema de montaje corresponde con el de la Figura 7.41 del ensayo en carga de un generador de excitación *shunt*.

Una vez puesto en marcha el grupo, se ajustará la velocidad a la nominal, manteniéndola constante mientras dure el ensayo.

Se actúa el reóstato ( $R_r$ ) sin cerrar el interruptor ( $J$ ) hasta que el voltímetro ( $U_b$ ) marque la tensión prevista para el ensayo.

Se tomarán los valores del primer punto, obtenido con la corriente de carga nula, indicándolo el amperímetro  $A_1$ . Una vez cerrado el interruptor ( $J$ ), bajará la tensión  $U_b$ , actuando simultáneamente sobre  $R_r$  y la carga  $R$ , hasta conseguir que el valor de  $U_b$  sea de nuevo fijado.

Con los valores de  $A_1$  y  $A_2$  se obtienen los puntos de la curva. El resto de los puntos se obtendrán variando la carga y la corriente de excitación.

Con los valores medios de los resultados de las medidas ascendentes y descendentes se representa la curva de la Figura 7.44.

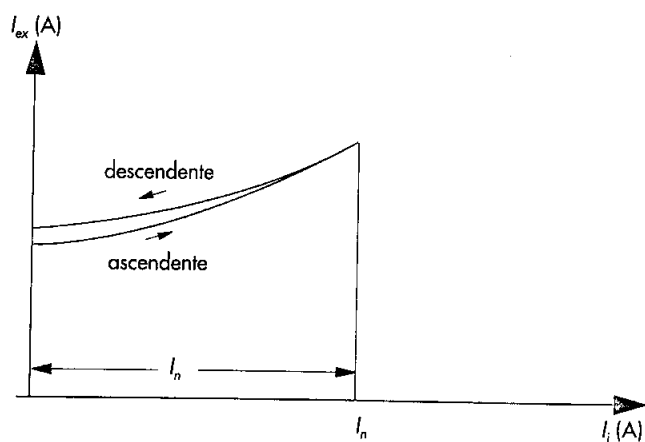


Fig. 7.44. Curva del ensayo de regulación de un generador de excitación independiente.

1.º						Medidas ascendentes
2.º						
3.º						
4.º						
5.º						
5.º						Medidas descendentes
4.º						
3.º						
2.º						
1.º						

Tabla 7.4. Tabla de valores del ensayo de regulación de un generador de CC.

## 7.16 Ensayo de las características exterior e interior

Como se estudió en el apartado 7.5, las características exterior e interior se representan por  $U_b = f(I)$  cuando  $I_{ex}$  y la velocidad  $n$  son constantes. Se obtiene por el ensayo en carga.

La **característica interior** se representa por  $E = f(I_i)$  cuando  $I_{ex}$  y la velocidad  $n$  son constantes. Se obtiene a partir de los resultados de la característica exterior.

El ensayo para determinar la **característica exterior** es el de mayor interés; este ensayo indica la tensión que suministra cada generador en función de la carga. El esquema de montaje para este ensayo corresponde al de la Figura 7.37.

Para la toma de datos, se obtendrá primero el momento de vacío, y será indicado por el volímetro  $U_b$ ; éste será el primer punto de la curva.

A continuación se cierra el interruptor de la carga con la máxima resistencia ( $R_c$ ), se toma los valores de tensión ( $U_b$ ) e intensidad de carga ( $I$ ) y se anotan los valores en la tabla.

Los demás puntos se obtienen regulando la resistencia de carga ( $R$ ) y aumentando la corriente ( $I$ ). En la Figura 7.45 se puede observar la curva correspondiente:

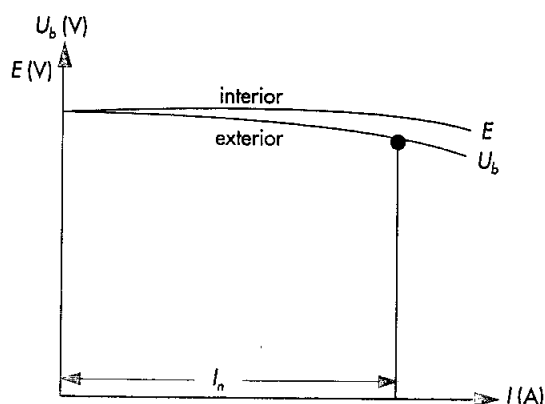


Fig. 7.45. Curva del ensayo de las características de exterior e interior de un generador de excitación independiente.

1.º						
2.º						
3.º						
4.º						
5.º						

Tabla 7.5. Tabla de valores del ensayo de características exterior e interior de un generador de CC.

## 7.17 Determinación del rendimiento

El rendimiento se puede definir como el cociente entre la potencia útil de la máquina y la potencia absorbida multiplicado por 100, para que el resultado sea en tanto por ciento (%).

### Fórmula 7.16

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \times 100$$

Donde:

$P_u$  = potencia útil

$P_a$  = potencia absorbida

$\eta$  = rendimiento

Los métodos para la **determinación del rendimiento** más utilizados son:

• **Método directo.**

• **Método indirecto.**

El método directo consiste en medir la potencia útil y la potencia absorbida de la máquina y aplicar la Fórmula 7.16. Este método se emplea sobre todo en máquinas de poca potencia.

El método indirecto consiste en medir todas las pérdidas de la máquina, sumando a la potencia útil las pérdidas obtenidas en los diferentes ensayos.

Si el **rendimiento** es:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Si la **potencia absorbida** es:  $P_a = P_u + P_p$

- La potencia útil se determina por:  $P_u = U \cdot I$
- La potencia pérdida es:  $P_p = P_0 + P_i + P_{es} + P_{ad}$

Donde:

$P_p$  = potencia perdida total

$P_0$  = potencia perdida en circuito abierto o en vacío

$P_i$  = potencia perdida por efecto Joule en el inducido

$P_{es}$  = potencia perdida en las escobillas en carga

$P_{ad}$  = potencia perdida adicional en carga

La determinación de la característica de la velocidad, la característica del par motor y la determinación del rendimiento serán los ensayos a seguir en los motores de CC.

### A. Determinación de la característica de velocidad

La característica de la velocidad, como podemos comprobar en el Apartado 7.8, se representa por:

$$n = f(I_i)$$

Siendo constante la tensión en bornes  $U_b$ .

Se consigue a través del freno que se le aplica al eje. La característica de la velocidad, en el motor *shunt*, corresponde en su montaje ensamblando un freno al eje para utilizarlo como carga al motor.

En la Figura 7.46, se indica el esquema de montaje correspondiente a un motor de excitación *shunt*.

Una vez ensamblado el freno al motor, se alimenta con su tensión nominal  $U_b$ , actúa sobre su excitación  $R$ , y consigue poner el motor a su velocidad nominal en plena carga mediante el freno.

Conseguida la excitación para el valor a plena carga, se mantendrá estable mientras dure el ensayo. A continuación se toman los valores; el primer punto corresponde al funcionamiento en vacío, medida para el cual se habrá desconectado el freno.

El amperímetro indicará la corriente absorbida de la red, y la velocidad se obtendrá mediante un tacómetro. Los demás puntos de la curva se irán obteniendo a medida que se aplique más resistencia al freno y se produzca más carga.

A continuación se va anotando en cada punto la intensidad indicada por el amperímetro y las revoluciones indicadas por el tacómetro, que se reflejarán en la tabla de valores correspondiente.

Los **puntos que se deberán realizar** son:

- En vacío.
- Al 25 % de la carga.
- Al 50 % de la carga.
- Al 75 % de la carga.
- Al 100 % de la carga.
- Al 125 % de la carga.

## 7.18 Planificación de los ensayos de motores de CC

Como ocurre con los generadores, el estudio de los motores de CC se realiza a través de sus características, relacionando la velocidad ( $n$ ), el par motor ( $M$ ) y la corriente del inducido ( $I_i$ ), como se pudo comprobar en el Apartado 7.8.



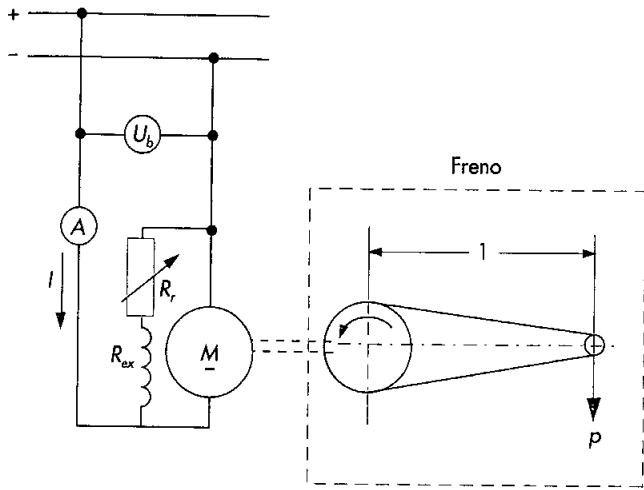


Fig. 7.46. Esquema de montaje para el ensayo de velocidad de un motor shunt.

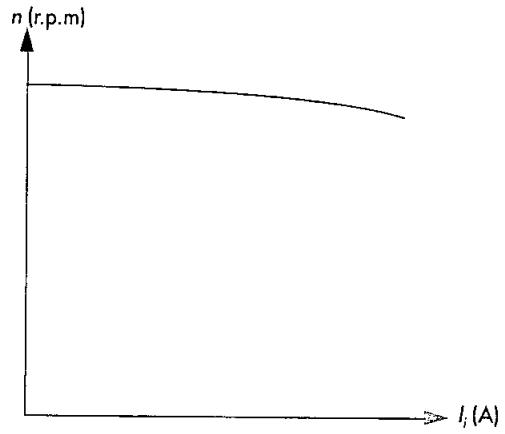


Fig. 7.48. Curva de característica del ensayo de velocidad de un motor shunt.

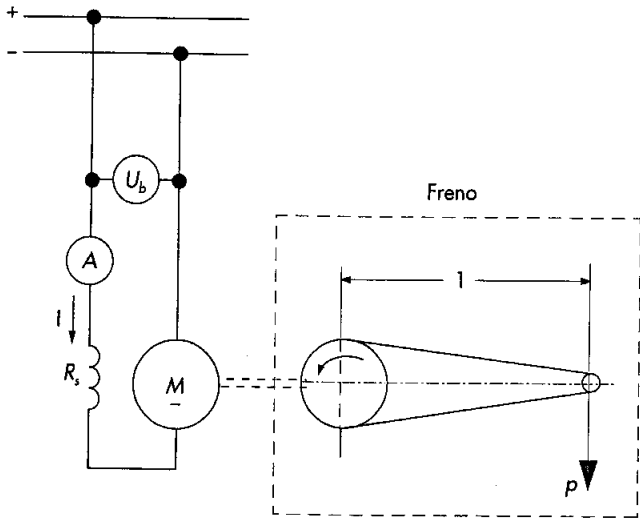


Fig. 7.47. Esquema de montaje para el ensayo de velocidad de un motor serie.

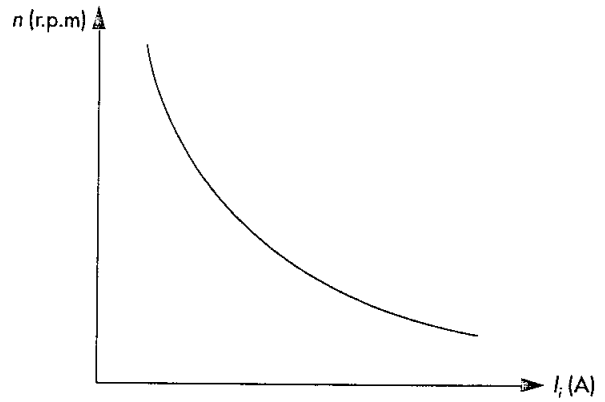


Fig. 7.49. Curva de característica del ensayo de velocidad de un motor serie.

### B. Determinación de las características del par motor

La característica del par motor excitación *shunt*, cuando la tensión en bornes ( $U_b$ ) es constante y el ensayo es realizado por freno, se identifica por:

$$M_v = f(I_i)$$

El esquema de montaje es el mismo que se utilizó para el ensayo de la velocidad con motor *shunt* (Figura 7.46), y el proceso del ensayo es el mismo que el de la velocidad.

La diferencia es que los datos obtenidos serán el par desarrollado en vez de la velocidad, obtenida por la siguiente fórmula:

#### Fórmula 7.17:

$$M_v = p \cdot l$$

0						
25%						
50%						
75%						
100%						
125%						

Tabla 7.6. Tabla de valores para el ensayo de la característica de velocidad de un motor.

Donde:

$p$  = peso total (kgf)

$l$  = longitud del brazo (m)

$M$  = par desarrollado por la polea (kgf · m)

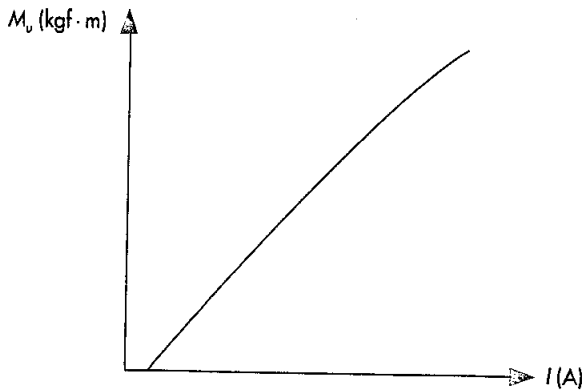


Fig. 7.50. Curva del ensayo del par motor de excitación shunt.

### 7.18. Determinación del rendimiento

De forma parecida al rendimiento de los generadores, se establece el rendimiento de los motores, aplicando los métodos directo e indirecto.

Los puntos de la curva que se determinan suelen ser los mismos que en los generadores, es decir:

- En vacío.
- A potencia del 25%.
- A potencia del 50%.
- A potencia del 75%.
- A potencia del 100%.
- A potencia del 125%.

La **medida directa del rendimiento** se realiza al mismo tiempo que se determinan las características electromecánicas; se obtiene por la potencia útil del motor y la potencia absorbida.

$$\eta = \frac{P_v}{P_a}$$

Donde:

$P_v = p \cdot l \cdot n$  (medida con el freno)

$P_a = U_b \cdot I$  (medida con voltímetro y amperímetro)

La curva correspondiente al rendimiento del motor de CC se indica en la Figura 7.51.

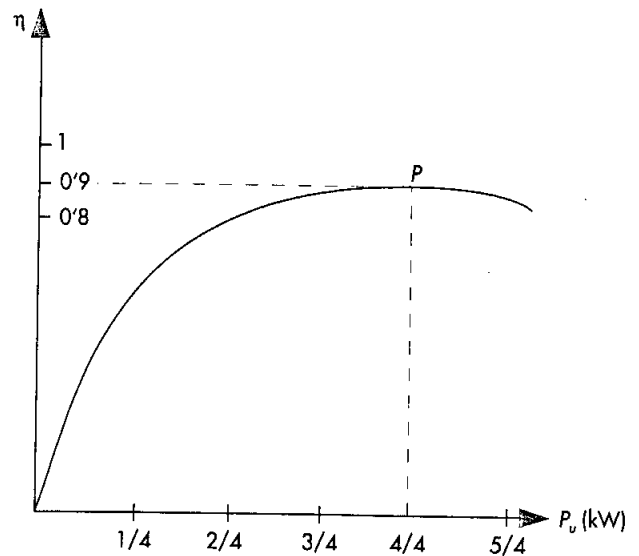


Fig. 7.51. Curva del ensayo del rendimiento de un motor de CC.

### 7.19. Normas de seguridad en los ensayos de máquinas de CC

Cuando se trabaja en laboratorios eléctricos o cuando se emplea equipo eléctrico, seguir las precauciones adecuadas de seguridad es tan importante como llevar a cabo mediciones exactas.

Existen peligros potencialmente mortales en el ambiente del laboratorio; el más común y más serio en laboratorios eléctricos es el choque eléctrico.

Otros peligros que también deben tenerse en cuenta provienen del empleo de maquinarias en movimiento y equipos de soldaduras.

Si no se siguen con cuidado los procedimientos de seguridad establecidos, puede que algún compañero sea la víctima de un accidente serio.

El mejor sistema para evitar accidentes es reconocer sus causas y aplicar los procedimientos de seguridad establecidos.

Una completa concienciación acerca de los peligros y las consecuencias posibles de los accidentes ayuda a desarrollar la motivación adecuada para seguir esos procedimientos.

**Característica de velocidad:** es la curva que representa gráficamente la velocidad ( $n$ ) del motor en función de la corriente del inducido ( $I_i$ ).

**Característica del par motor:** es la curva que representa gráficamente el par motor ( $M$ ) en función de la corriente del inducido ( $I_i$ ).

**Característica en carga:** es la curva que representa la corriente de excitación en función de la corriente suministrada por la máquina, para la velocidad de rotación ( $n$ ) y una tensión en bornes constante.

**Característica en vacío:** es la curva que representa la tensión en bornes ( $U_b$ ) en vacío, para una velocidad de rotación determinada en función de la corriente de excitación ( $I_{exc}$ ).

**Característica exterior:** es la curva que representa la tensión en bornes ( $U_b$ ) en función de la carga del generador, para una velocidad de rotación ( $n$ ) y la intensidad de excitación ( $I_{exc}$ ) constantes.

**Característica mecánica:** es la curva que representa gráficamente el par motor ( $M$ ) en función de la velocidad de rotación ( $n$ ).

**Curvas de características:** representaciones gráficas que nos permiten conocer la variación de una magnitud con respecto a otra cuando las magnitudes restantes permanecen constantes. A partir de los resultados, se puede analizar y predecir el comportamiento de una máquina en sus diferentes estados de funcionamiento.

En un generador de corriente continua, las curvas de característica más representativas, que se pueden determinar en función de las magnitudes  $f(U_b, I_{exc}, I_i, n)$ , son las siguientes:

- Característica en vacío.
- Característica en carga.
- Característica exterior.

En un motor de corriente continua, las curvas características más representativas, que se pueden determinar en función de las magnitudes  $f(n, M, I_i)$ , son las siguientes:

- Característica de velocidad.
- Característica del par motor.

- Característica mecánica.

**Ensayo de rigidez dieléctrica:** es la prueba que se realiza a los aislantes hasta el instante de perforación, aplicándole una tensión determinada durante un tiempo establecido.

**Generador autoexcitado:** es la máquina que produce su propia excitación tomando la corriente de excitación de su propio inducido. La autoexcitación es posible por el magnetismo remanente que hay en el circuito magnético.

**Generador de excitación compund:** es aquel que dispone de dos bobinados inductores, uno conectado en serie ( $D_1 - D_2$ ) con el inducido ( $A_1 - A_2$ ) y otro conectado en derivación ( $E_1 - E_2$ ).

**Generador de excitación independiente:** es un generador de CC que recibe la corriente de excitación mediante una fuente de energía del exterior.

**Generador de excitación serie:** es aquel cuyo bobinado inductor ( $D_1 - D_2$ ) está conectado en serie con el inducido ( $A_1 - A_2$ ) de manera que la intensidad que circula por el circuito interior y por el exterior (carga) es la misma.

**Generador de excitación shunt:** es aquel cuyo bobinado inductor ( $E_1 - E_2$ ) está conectado en derivación con el inducido ( $A_1 - A_2$ ).

**Medida de resistencia de aislamiento:** es la determinación de la existencia de comunicación entre dos partes independientes de una máquina eléctrica.

**Medidor de rigidez dieléctrica:** también llamado «chispómetro», es el aparato que registra el comportamiento que tiene un aislante cuando se le aplica una determinada tensión hasta su perforación.

**Rendimiento de la máquina:** es el cociente que resulta entre la potencia útil de la máquina y la potencia absorbida. El resultado se multiplica por 100 para expresarlo en tanto por ciento (%).

**Reóstato de campo:** es un componente que varía el flujo del bobinado inductor de una máquina de CC, intercalándolo en serie en el circuito inductor cuando la excitación de la máquina es independiente o *shunt*, y en paralelo al inductor, cuando la máquina tiene excitación serie.

## Autoevaluación

1. Indica los bornes de conexión para cada uno de los bobinados inductores y del inducido de una máquina de CC.
2. Señala las causas que pueden producir la desaparición del magnetismo remanente.
3. Indica los procedimientos para producir magnetismo remanente en las máquinas que lo han perdido.
4. Enumera los tipos de excitación de las máquinas de corriente continua.
5. Enumera las características fundamentales del generador de corriente continua.
6. ¿Cuáles son las diferencias que existen entre un generador de excitación independiente y uno autoexcitado?
7. ¿Qué diferencias constructivas existen entre un generador y un motor de corriente continua?
8. ¿Cuál es el principal peligro de un motor serie en vacío?
9. Cita el proceso secuencial para proceder al ensayo en carga de un generador *shunt*.
10. ¿Para qué sirven el ensayo de aislamiento y el de rigidez dieléctrica?

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

### 11. Representa la característica de vacío de un generador *shunt* autoexcitado, partiendo de los datos obtenidos en el ensayo.

#### • Objetivos:

- Verificar el circuito de excitación.
- Determinar la curva de características de excitación en vacío.

#### • Medios didácticos:

- Un generador *shunt* autoexcitado.
- Una máquina motriz.

- Un voltímetro.
- Un reóstato.

#### • Procedimiento:

- 1.º Se pone en marcha la máquina motriz, con el generador *shunt* acoplado a ella.
- 2.º Antes de conectar el circuito de excitación, se anota la indicación del voltímetro, que será la tensión producida por el magnetismo remanente.
- 3.º Al conectar el circuito, el reóstato deberá estar en la máxima resistencia.
- 4.º La toma de valores se realizará de manera ascendente en cada punto previsto, y se irán anotando en la tabla de valores.
- 5.º La toma de valores de manera descendente se realizará en aquellos cercanos a los ascendentes, sin llegar a ser los mismos, y se anotarán en la tabla de valores.
- 6.º Con los datos obtenidos, se procede a representar las curvas ascendente y descendente en las coordenadas de la Figura 7.53, conformando la curva de vacío, la media de ambas curvas.

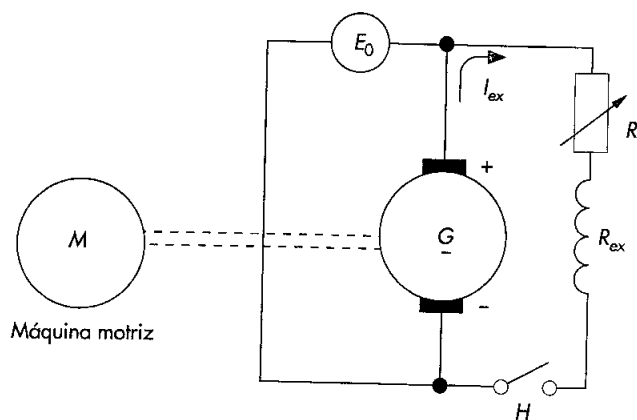


Fig. 7.52. Esquema de montaje de un generador excitación *shunt* para ensayo.

1.º					Medidas ascen- dentes
2.º					
3.º					
4.º					
5.º					
6.º					
6.º					Medidas descen- dentes
5.º					
4.º					
3.º					
2.º					
1.º					

Tabla 7.7. Tabla de valores para el ensayo en vacío de un generador de CC (Actividad 11).

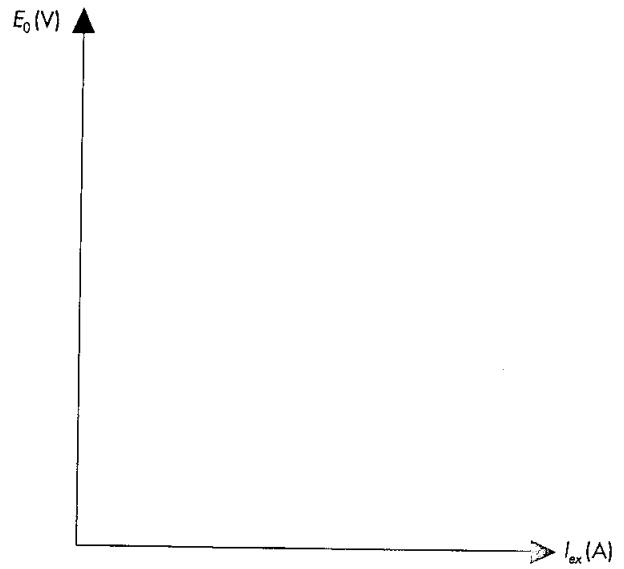
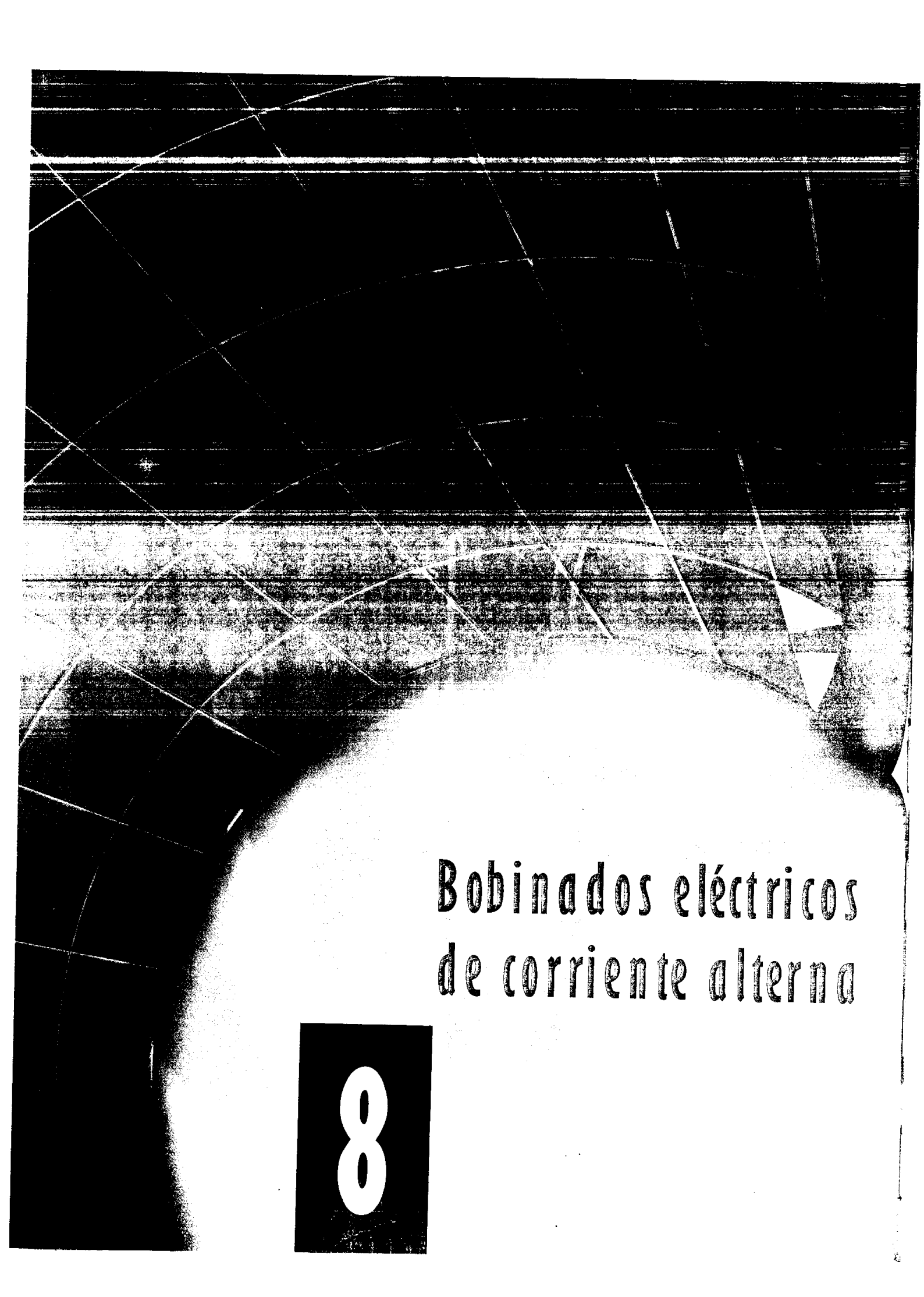


Fig. 7.53. Coordenadas para la representación gráfica de la curva.

• **Contesta:**

- a) Representa la curva de vacío del generador excitación *shunt* del presente ejercicio, con los resultados obtenidos y anotados en la tabla de valores.



**Bobinados eléctricos  
de corriente alterna**

**8**

## 8.1 Introducción a las máquinas de corriente alterna (CA)

Entre las máquinas eléctricas de corriente alterna, hay que distinguir entre **motores** y **alternadores**.

Cuando una máquina de corriente alterna funciona como **motor**, convierte la energía eléctrica de corriente alterna que recibe en sus bornes en energía mecánica.

Por otro lado, cuando dicha máquina trabaja como **alternador** (o **generador**), recibe energía mecánica —proporcionada, por ejemplo, por un motor de explosión— y la transforma en energía eléctrica (en forma de corriente alterna).

Su movimiento es rotativo, por lo que su principio de funcionamiento está basado en el campo giratorio y par electromagnético.

En el motor, al contrario que en el alternador, se suministra energía eléctrica a los conductores y al campo magnético de la máquina, con el fin de que provoque por sí mismo un campo giratorio que cree un movimiento rotativo y, por lo tanto, se produzca una energía mecánica.

En nuestro caso, el estudio se basa en el motor asíncrono de corriente alterna.

Podemos observar, en el seccionado de la máquina de la Figura 8.1, las partes detalladas de una máquina de corriente alterna correspondiente a un motor trifásico de inducción.

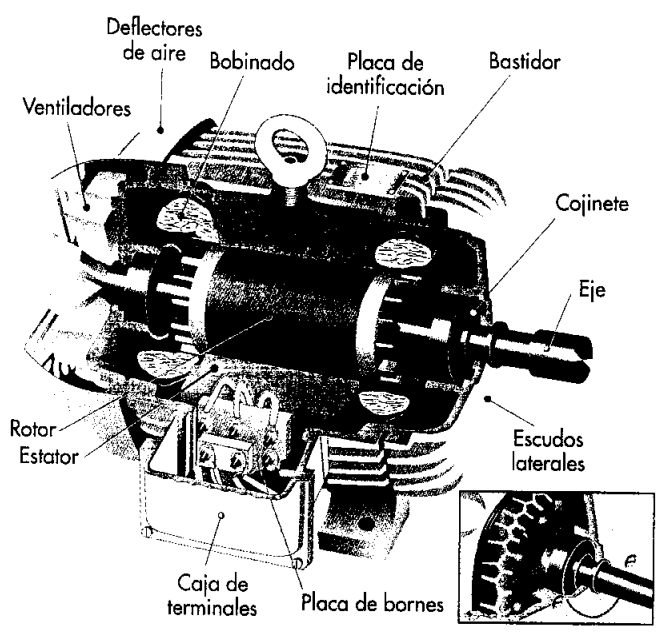
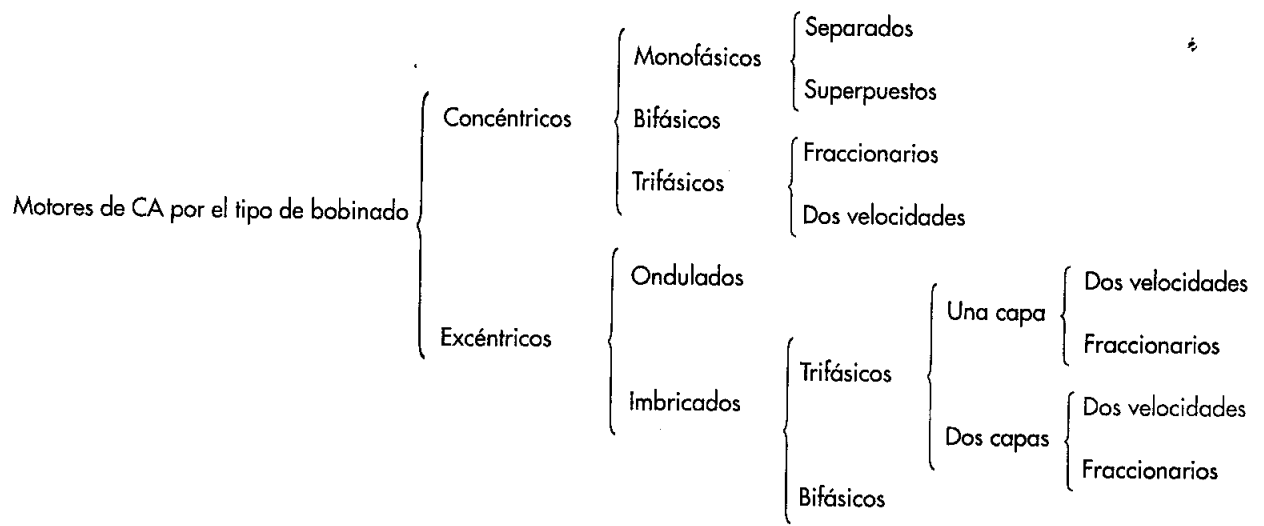


Fig. 8.1. Motor asíncrono trifásico de corriente alterna.

## 8.2 Clasificación de los motores asíncronos de corriente alterna

El motor de corriente alterna es la máquina eléctrica más utilizada en todos los sectores de la vida cotidiana y en la industria. Su versatilidad en potencia, en velocidad y su



Cuadro 8.1. Clasificación de los motores asíncronos de corriente alterna.

adaptación al sistema eléctrico lo convierten en una máquina imprescindible para la industria actual.

El Cuadro 8.1 indica los tipos de motores más utilizados en función de su bobinado.

### 8.3 Análisis de los bobinados de una máquina de corriente alterna

Como se ha podido estudiar en Electrotecnia, en el estator de una máquina de corriente alterna se aloja el bobinado capaz de crear un campo magnético suficiente para producir el giro del rotor. Por la distribución del bobinado, el campo magnético que se crea es un campo giratorio que origina el movimiento en el rotor.

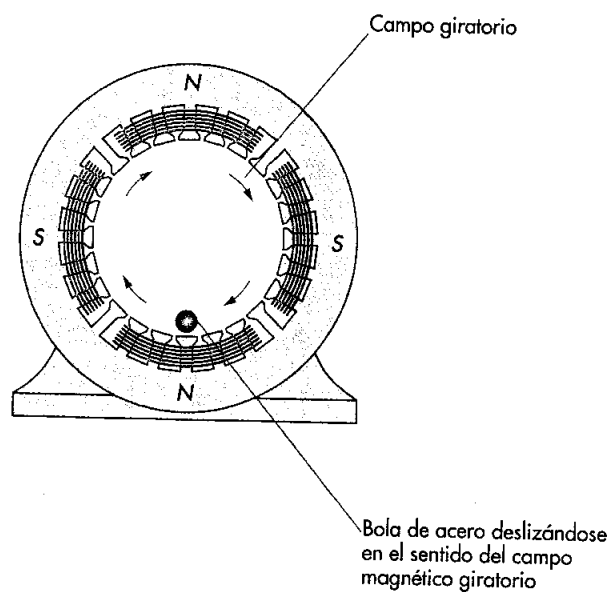


Fig. 8.2. Generación del campo giratorio en un estator.

La velocidad de rotación del rotor es siempre inferior a la velocidad del campo magnético giratorio. Para que en los conductores del rotor se pueda generar una fem es necesario que entre los conductores del rotor y la velocidad del campo giratorio exista una diferencia de velocidad. A esta diferencia de velocidad se le llama **deslizamiento**.

La velocidad del campo giratorio o de sincronismo es:

#### Fórmula 8.1

$$n = 60 \cdot \frac{f}{p}$$

Donde:

$n$  = revoluciones por minuto (rpm)

$f$  = frecuencia

$p$  = número de pares de polos

Debido al deslizamiento, la velocidad del rotor de un motor asíncrono será algo menor que la velocidad de sincronismo.

Los motores monofásicos, trifásicos, concéntricos, excéntricos, etc., tienen elementos comunes tanto en la estructura constructiva como en el desarrollo del cálculo del bobinado y montaje.

Sirvan como introducción las definiciones siguientes, para la comprensión y posterior cálculo y representación de los esquemas de los bobinados.

#### A. Ranuras (K)

Son los espacios huecos que se encuentran a lo largo de la circunferencia del motor, cercana al entrehierro, en donde se colocan los lados activos de las bobinas, ya que sólo éstos cortan líneas de fuerza.

En la Figura 8.3, se indica dónde están y cómo son las ranuras.

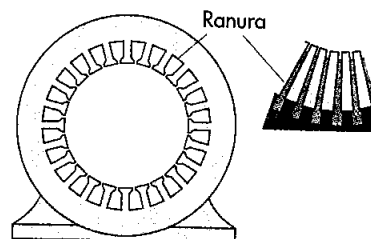


Fig. 8.3. Ranura de un motor.

#### B. Bobinas (B)

Son las formadas por un número determinado de espiras cerradas que tienen un principio y un final. Las bobinas se componen de los lados activos y las cabezas (véanse las Figuras 8.4 y 8.5).



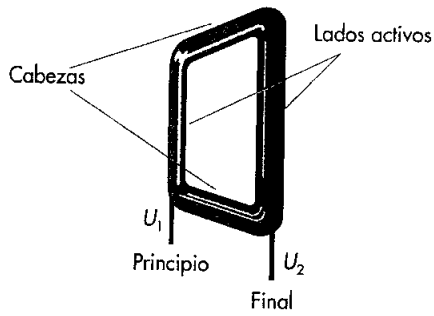


Fig. 8.4. Bobina para motor de CA.

### C. Lado activo

Es la parte recta de la bobina, situada en el interior de la ranura, rodeada y cerrada por elementos aislantes. En la Figura 8.5, se indica un lado activo.

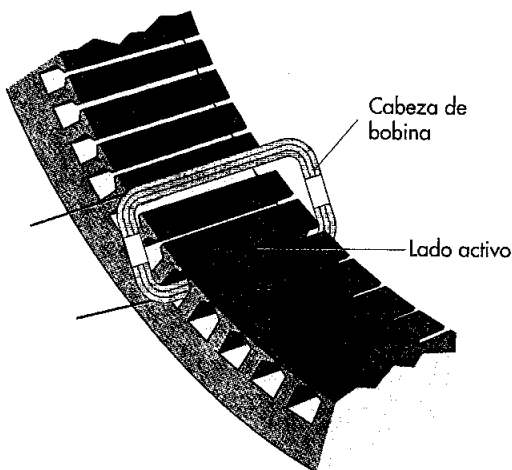


Fig. 8.5. Lado activo y cabeza de bobina.

### D. Grupos de bobinas (G)

Están formados por un grupo de bobinas, conectadas en serie entre ellas; cada grupo contiene un principio y un final. En la Figura 8.6, se puede apreciar un grupo de bobinas de construcción **concéntrica** y un grupo de bobinas de construcción **excéntrica**, en este caso imbricadas.

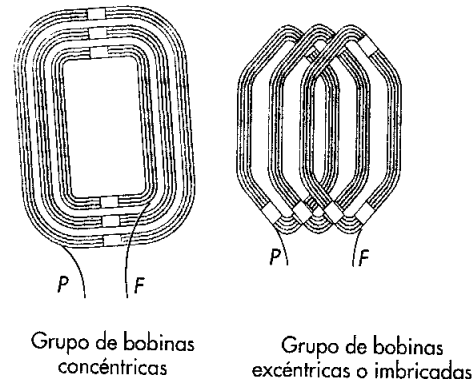


Fig. 8.6. Grupo de bobinas.

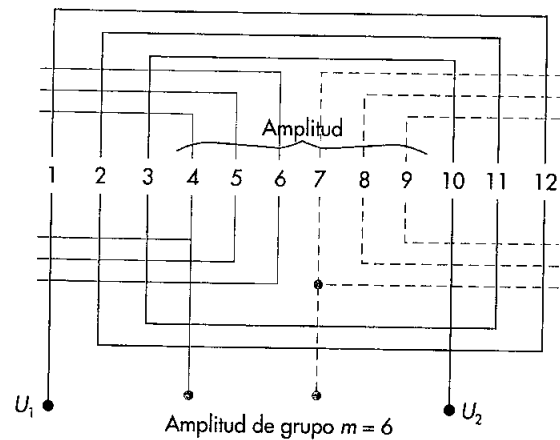


Fig. 8.7. Amplitud de grupo.

### E. Polos

Son núcleos de hierro rodeados por bobinas que, al ser recorridas por la corriente eléctrica, provocan un flujo magnético que da lugar a los polos magnéticos. Dependiendo del sentido de la corriente, los polos pueden ser **Norte** o **Sur**.

En la Figura 8.8, se puede observar la formación de polos magnéticos en los grupos de bobinas.

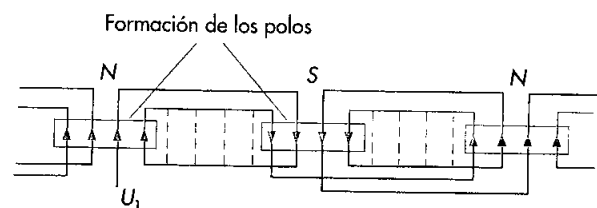


Fig. 8.8. Formación de los polos.

### E. Amplitud de grupo (m)

Es el número de ranuras que quedan entre la bobina más pequeña del grupo y que serán ocupadas por otros grupos diferentes. La **amplitud de grupo** sólo se utiliza para los cálculos de bobinados concéntricos, tal y como se indica en la Figura 8.7.

### G. Paso polar ( $Y_p$ )

Es la distancia que hay entre los ejes de dos polos contiguos y, por lo tanto, de diferente polaridad. En la Figura 8.9 se indica el arco o distancia que abarca el paso polar en un motor hexapolar.

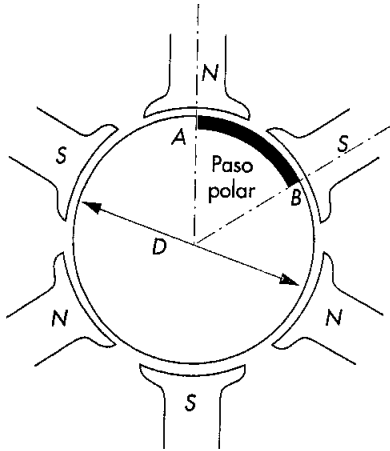


Fig. 8.9. Paso polar de un motor hexapolar.

### H. Ancho de bobina ( $Y_k$ )

Es la anchura que tiene la bobina calculada en número de ranuras. En la Figura 8.10 se puede ver el ancho de bobina.

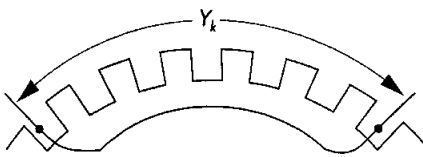


Fig. 8.10. Ancho de bobina.

## 8.4 Sistemas de conexión de los bobinados concéntricos trifásicos

Son bobinados concéntricos aquellos que tienen las bobinas de los grupos concéntricas, es decir, que tienen en un mismo centro todas las bobinas del grupo; por lo tanto, todas las bobinas del grupo son diferentes.

En la representación esquemática de los bobinados, los concéntricos se pueden representar de diversas formas, todas ellas convencionales, ya que se utiliza una u otra en función de la comodidad o el montaje.

En la Figura 8.11, se indican las diferentes formas de representación de los grupos de bobinas en el esquema del bobinado de un motor eléctrico concéntrico.

Los bobinados concéntricos tienen el inconveniente de necesitar, para su ejecución, varios moldes para el grupo de bobinas, ya que cada bobina del grupo es diferente.

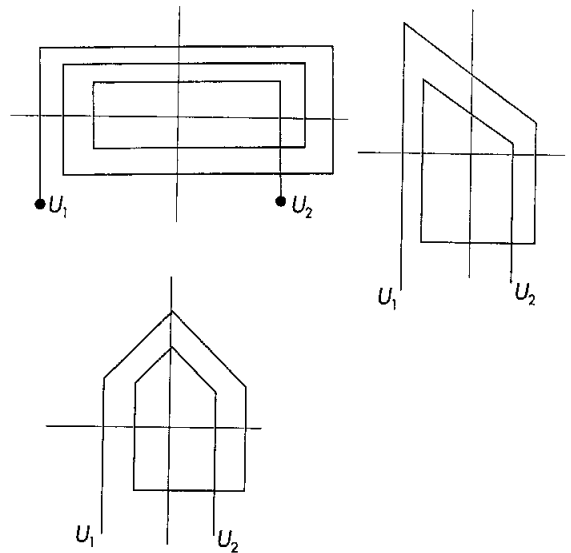


Fig. 8.11. Diferentes tipos de grupos de bobinas concéntricas.

### A. Formación de grupos de bobinas totales ( $B_t$ )

Los grupos se van colocando en función del número de ellos que tenga la fase a lo largo de todo el perímetro del estator, de forma equidistante entre ellos, cuando el número de grupos por fase es par.

La distribución se realizará a lo largo del perímetro del estator, que se dividirá en dos partes; la primera debe tener los mismos grupos que la segunda, y han de ser exactamente iguales.

En la Figura 8.12, se confirma la distribución de los grupos en la circunferencia. Al ser dos grupos por fase, cada grupo queda a un lado del eje y equidistante.

En la Figura 8.13, podemos ver la distribución de los grupos a lo largo de las ranuras, representada linealmente. Al ser cuatro el número de grupos por fase, en cada lado del eje quedan dos grupos distribuidos exactamente igual.

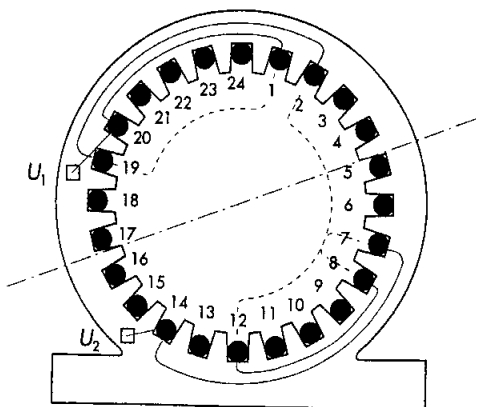


Fig. 8.12. Distribución de los grupos a lo largo del perímetro.

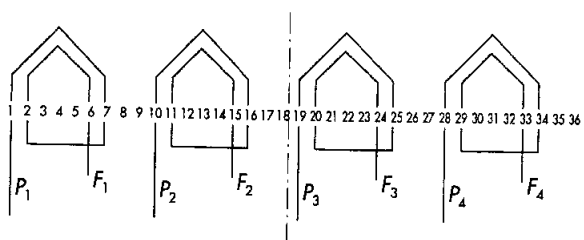


Fig. 8.13. Distribución de los grupos por las ranuras, representada de forma lineal.

Cuando el número de grupos por fase es impar, se colocarán los grupos de forma proporcionada a lo largo del perímetro de la circunferencia del estator.

En la Figura 8.14, se puede comprobar la distribución; en este caso, son tres grupos por fase, que se distribuyen proporcionalmente a lo largo del motor.

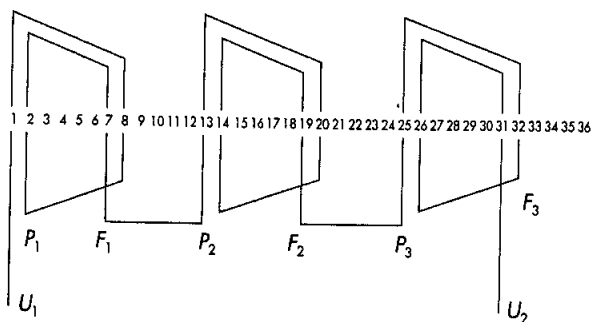


Fig. 8.14. Distribución de grupos impares en las ranuras.

## B. Conexión de los grupos de bobinas de una fase

En los bobinados concéntricos, la conexión entre los grupos se puede hacer de dos maneras diferentes:

- **Conexión por polos (pp):** final con final y principio con principio. Los grupos de esta conexión son de menor tamaño y menor número de bobinas, pero hay más grupos por fase.
- **Conexión por polos consecuentes (ppc):** final con principio y principio con final. Los grupos de esta conexión son de mayor tamaño y disponen de mayor número de bobinas en cada grupo, y el número de grupos del bobinado es menor.

### Conexión por polos (pp)

La conexión de grupos por polos se realiza conectando finales con finales y principios con principios, tomando el primer principio como el comienzo de la fase. Por ejemplo,  $U_1$ .

A lo largo del bobinado, las conexiones entre grupos de la misma fase se realizarán considerando el siguiente procedimiento:

El final del primer grupo con el final del segundo, el principio del segundo grupo con el principio del tercero, el final del tercer grupo con el final del cuarto, el principio del cuarto grupo con el principio del quinto, y así hasta que todos los grupos estén conectados entre sí; quedará un principio y un final de cada fase.

En la Figura 8.15, se puede observar cómo los finales de los grupos se conectan con los principios, y los principios con los finales.

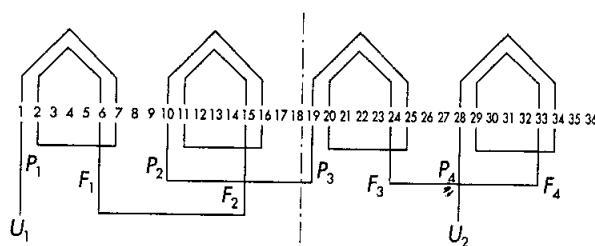


Fig. 8.15. Conexión por polos (pp) de los grupos de bobinas.

### Conexión por polos consecuentes (ppc)

La conexión de grupos por polos consecuentes se realiza conectando finales con principios y principios con finales, tomando el primer principio como el comienzo de la fase.

A lo largo del bobinado, las conexiones entre grupos de la misma fase se realizarán considerando el siguiente procedimiento:

El final del primer grupo con el principio del segundo, el final del segundo grupo con el principio del tercero, el final del tercer grupo con el principio del cuarto, el final del cuarto grupo con el principio del quinto, y así hasta que todos los grupos estén conectados entre sí; quedará un principio y un final de cada fase.

En la Figura 8.16, se puede observar las conexiones entre los principios y finales de los grupos.

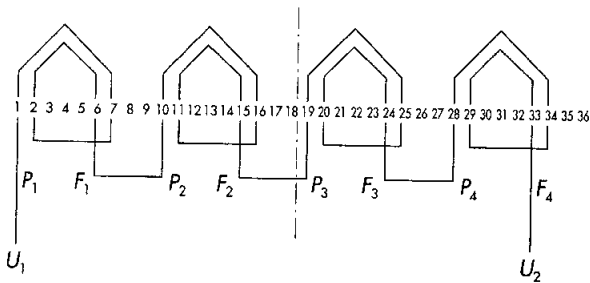


Fig. 8.16. Conexión por polos consecuentes (ppc) de los grupos de bobinas.

## 8.5 Proceso de cálculo de los bobinados concéntricos de CA

Para proceder al cálculo de los bobinados concéntricos de corriente alterna, será necesario establecer el tipo de conexión de sus grupos, es decir, por polos o por polos consecuentes, y conocer algunos conceptos que los constituyen, así como la nomenclatura que los define:

- El número de fases ( $q$ ).
- El número de polos ( $2p$ ).
- El número de ranuras por polo y fase ( $K_{pq}$ ).
- El número de bobinas y capas por ranuras ( $B$ ).
- El número de grupos totales ( $Gt$ ).
- El número de grupos por fase ( $Gf$ ).
- El número de bobinas por grupos ( $U$ ).
- La amplitud de grupo ( $m$ ).

### A. Número de fases ( $q$ )

Como se ha expuesto anteriormente, los bobinados concéntricos se pueden construir, por el número de fases, en

monofásicos y trifásicos. Se representa con la letra  $q$ . Es uno de los datos necesarios para realizar el cálculo del bobinado.

### B. Número de polos ( $2p$ )

El número de polos de un motor indica la velocidad del mismo, como se puede deducir de la Fórmula 8.1. Para la realización de los cálculos hay que diferenciar claramente qué son los polos y qué son los pares de polos.

El número de polos se representa por  $2p$ , que son los que tiene la máquina; es decir, si tiene un polo Norte se contabilizará como un polo, y un polo Sur contabilizará como otro polo. Un polo Norte y un polo Sur corresponderán a un par de polos.

El número de pares de polos se representa por  $p$ .

El número de polos es un dato necesario para el cálculo del bobinado; si no lo tenemos, al menos deberemos conocer las revoluciones por minuto que tiene la máquina.

Recurriendo a la Fórmula 8.1 y despejando el número de pares de polos, obtendremos los polos de la máquina.

### C. Número de ranuras, polos y fases ( $K_{pq}$ )

El número de ranuras por polo y fase es una demostración analítica de la posibilidad que hay de realizar un bobinado. Este concepto aclara, antes de continuar con el cálculo, qué número de ranuras le corresponde a un polo ocupado por una misma fase. Se obtiene mediante la fórmula:

#### Fórmula 8.2

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

La posibilidad de construir el bobinado depende del resultado de  $K_{pq}$ ; no se puede realizar con un valor fraccionario.

En caso de ser valor impar en la conexión por polos, los grupos de bobinas ( $U$ ) serán un número entero de bobinas más media bobina, que será la bobina exterior del grupo, con la mitad de espiras.

La ranura se cerrará con otra media bobina de otro grupo de la misma fase o de distinta fase, y se completará con dos medias bobinas.

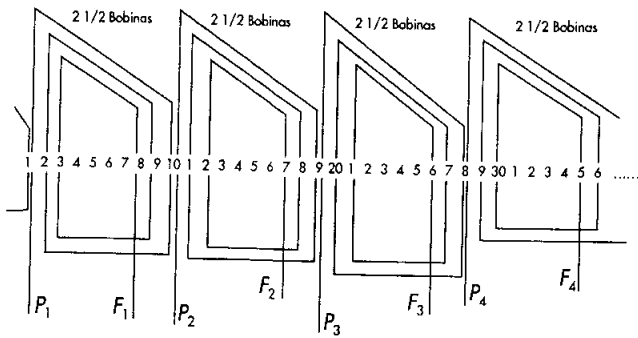


Fig. 8.17. Bobinas exteriores compartidas.

También existe la posibilidad de hacer grupos desiguales en grupos consecutivos de la misma fase. El primer grupo tendría un determinado número de bobinas, y el segundo, una menos; el tercero, las mismas que el primero, y el cuarto, las mismas que el segundo, y así hasta terminar con todos los grupos de esa fase. En la Figura 8.18, se pueden apreciar los grupos desiguales pero equilibrados en su totalidad.

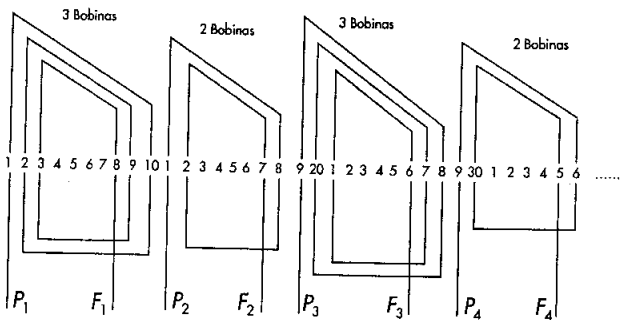


Fig. 8.18. Grupos de bobinas desiguales de una misma fase.

Esta compensación de bobinas se hace para equilibrar el número de espiras en todos los grupos.

En el caso de la conexión por polos consecuentes, la distribución de las bobinas se haría compartiendo media bobina exterior del grupo, como se ha expuesto anteriormente.

#### D. Bobinas y capas por ranuras (B)

Los bobinados de una y dos capas indican que en la ranura pueden entrar, al mismo tiempo, uno o dos lados activos de bobinas con un aislamiento entre ellas. Es sólo de una capa cuando en una ranura hay sólo un lado activo de bobina, y de dos capas cuando en el interior de una misma

ranura se introducen dos lados activos de dos bobinas distintas.

Cuando el bobinado es de **una capa**, el número de bobinas es la mitad del número de ranuras, ya que cada bobina ocupa dos ranuras. Se obtiene mediante:

#### Fórmula 8.3

$$B = \frac{K}{2}$$

Cuando el bobinado es de **dos capas**, el número de bobinas es igual al número de ranuras, ya que cada ranura contiene dos lados activos de bobina. Se obtiene mediante:

#### Fórmula 8.4

$$B = K$$

#### E. Número de grupos totales (Gt)

Los grupos totales son la suma de los grupos de bobinas de todas las fases. Para la conexión **por polos (pp)**, se obtiene mediante:

#### Fórmula 8.5

$$Gt = 2p \cdot q$$

El número de grupos de bobinas por fase para la conexión **por polos consecuentes (ppc)** se obtiene mediante:

#### Fórmula 8.6

$$Gt = p \cdot q$$

#### F. Número de grupos por fase (Gf)

Es el número de grupos de bobinas que contiene una fase. En conexión **por polos (pp)**, serán tantos grupos de bobinas como polos tiene la máquina. Se obtiene mediante:

### Fórmula 8.7

$$Gf = 2p$$

En conexión **por polos consecuentes (ppc)** serán tantos grupos de bobinas como pares de polos tiene la máquina. Se obtiene mediante:

### Fórmula 8.8

$$Gf = p$$

### G. Número de bobinas por grupos (U)

El número de bobinas por grupo es la cantidad de bobinas que se conectan entre sí en el mismo grupo. En la Figura 8.6 se observan tres bobinas por grupo. El número de bobinas por grupo en conexión **por polos (pp)** se obtiene mediante:

### Fórmula 8.9

$$U = \frac{B}{Gt}$$

El número de bobinas por grupo para la conexión **por polos consecuentes (ppc)** se obtiene mediante:

### Fórmula 8.10

$$U = \frac{B}{Gt}$$

### H. La amplitud del grupo (m)

Como se pudo ver en el apartado E, la amplitud es el número de ranuras que quedan entre los lados activos de la bobina más pequeña del grupo, y que serán ocupadas por otros grupos diferentes. La amplitud de grupo en conexión **por polos (pp)** se obtiene mediante:

### Fórmula 8.11

$$m = (q - 1) \cdot U$$

La amplitud de grupo para la conexión **por polos consecuentes (ppc)** se obtiene mediante:

### Fórmula 8.12

$$m = (q - 1) \cdot 2U$$

## 8.6 Determinación de los principios de las fases ( $Y_{120}$ )

A diferencia de los bobinados de corriente continua, los de corriente alterna han de ser abiertos. Cada fase que compone el bobinado tiene dos extremos libres, uno al principio y otro al final.

La determinación de los principios de los bobinados tiene relación directa entre sí, motivada por el desfase existente en el sistema, ya sea monofásico o trifásico.

El principio de una determinada fase puede iniciarse en cualquier ranura de las que forman los  $360^\circ$  de la circunferencia de la máquina.

A partir de la colocación del principio de la primera fase, se ubicarán los demás principios de las demás fases, respetándose el desfase. En los bobinados trifásicos, el cálculo se determina por el desfase, en este caso de  $120^\circ$  eléctricos.

El principio de cada una de las fases se obtiene aplicando:

### Fórmula 8.13

$$Y_{120} = \frac{K}{3p}$$

### A. Composición de los cuadros de principios de fase

Para la composición del cuadro de principios, se construye un cuadrante con tres columnas (una por cada fase), y tantas filas como pares de polos tenga la máquina.

A la primera celda de la columna  $U$  le corresponderá la ranura 1; a las demás celdas se les irá añadiendo sucesivamente el valor de principio de fase, hasta completar todas las celdas.

A cada columna de principio de fases le corresponderá un número de ranuras, que serán las que se decida utilizar como principio de esa fase.

Para los bobinados concéntricos, en la conexión por polos, nos dará tantos principios en cada una de las columnas como pares de grupos tenga esa fase.

En la conexión por polos consecuentes, nos dará tantos principios en cada una de las columnas como grupos tiene esa fase.

El siguiente cuadro de principios corresponde a los principios de fase de un estator de 48 ranuras, con un paso de principios de  $Y_{120} = 4$ . Sobre el cuadro, podemos elegir los principios de fase, uno por cada columna.

U	V	W
1	5	9
13	17	21
25	29	33
37	41	45

### B. Elección de los principios más adecuados

Generalmente se eligen los primeros de cada columna para mantener un mismo criterio de diseño de construcción; puede ocurrir que se elijan los principios de fase que permitan a los terminales del bobinado estar más cerca del orificio de salida.

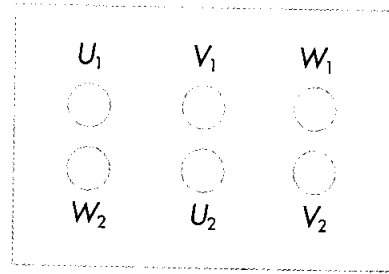
En el cuadro anterior, se elegirían las ranuras 1, 5 y 9 como principios de las fases U, V y W, respectivamente.

### C. Identificación de los principios y finales de las fases

Las normativas internacionales establecen los criterios para diferenciar los principios y finales de cada una de las fases del bobinado y para conectarlos a la red eléctrica.

Cada uno de los principios y finales de los motores de corriente alterna se denominan de la siguiente manera:

Los principios se denominan  $U_1$ ,  $V_1$  y  $W_1$ , los finales  $U_2$ ,  $V_2$  y  $W_2$ . En el siguiente cuadro se indica la correspondencia entre fases, principios y finales.



Placa de bornes de un motor asíncrono.

Normativa anterior			Normativa nueva		
Fases	Principios	Finales	Fases	Principios	Finales
R	U	X	$L_1$	$U_1$	$U_2$
S	V	Y	$L_2$	$V_1$	$V_2$
T	W	Z	$L_3$	$W_1$	$W_2$

Tabla 8.1. Designación de bornes en motores de CA.

## 8.7 Proceso de elaboración del esquema de un motor trifásico

Vamos a elaborar el proceso para la construcción del esquema de un motor trifásico de CA paso a paso. La colocación de las bobinas se irá haciendo grupo por grupo hasta completar el bobinado.

Las conexiones de cada uno de los grupos de una misma fase entre sí se irán especificando. Una vez construida una fase, las demás fases se elaborarán de la misma forma; cada fase respetará su principio.

### A. Datos necesarios

Tenemos un motor trifásico de una capa con 24 ranuras con una velocidad de 1 496 rpm. Realizaremos el esquema del bobinado con la conexión por polos consecuentes.

Los datos del esquema del motor que queremos construir son:

- Conexión = ppc
- $K = 24$  ranuras
- $B = \frac{k}{2}$

Al ser el motor de una capa, el número de bobinas totales será la mitad de las ranuras.

$$q = 3 \text{ fases}$$

El número de polos ( $2p$ ) no se conoce, pero al tener como dato la velocidad de giro, a partir de la Fórmula 8.1 podemos determinar el número de pares de polos y, por tanto, el número de polos.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Despejando  $p$ , despreciando las revoluciones por deslizamiento, obtendremos la expresión:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1496} \cong 2$$

Por lo tanto, al ser 2 el número de pares de polos, el número de polos del motor será  $2p = 4$

### Números de ranuras, polos y fases ( $K_{pq}$ )

Como se expuso anteriormente, el número de ranuras por polo y fase es el indicativo de las posibilidades de ejecución del bobinado; por lo tanto lo debemos determinar antes de proceder al resto del cálculo, sabiendo las condiciones para realizarlo.

En este caso, el resultado permite realizar el bobinado con grupos enteros.

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

### Bobinas y capas por ranuras ( $B$ )

En una ranura se sitúa, en este caso, un haz activo de bobina, por lo que el número de bobinas del motor será la mitad del número de ranuras.

$$Bt = \frac{K}{2} = \frac{24}{2} = 12$$

### Número de grupos totales ( $Gt$ )

En conexión  $ppc$ , el número de grupos de todo el bobinado será:

$$Gt = p \cdot q = 2 \cdot 3 = 6$$

### Número de grupos por fase ( $Gf$ )

Conocido el número de grupos totales, lo único que hay que hacer es determinar el número de grupos de bobinas por fase. Como ya se explicó, el número de bobinas por fase será tantos grupos de bobinas como pares de polos tenga el motor; por lo tanto, será, en conexión  $ppc$ :

$$Gf = p = 2$$

### Número de bobinas por grupos ( $U$ )

En este caso de conexión  $ppc$ , será:

$$U = \frac{Bt}{Gt} = \frac{12}{6} = 2$$

### La amplitud de grupo ( $m$ )

La amplitud, en este caso de conexión  $ppc$ , será:

$$m = (q - 1) \cdot U = (3 - 1) \cdot 2 = 4$$

### Determinación de los principios de las fases ( $Y_{120}$ )

En el caso de los principios de fase, la conexión de los grupos de bobinas se determinará de la misma manera para los dos tipos de conexiones; por lo tanto, será:

$$Y_{120} = \frac{K}{3p} = \frac{24}{6} = 4$$

### Composición de los cuadros de principios de fase

Hay que componer el cuadro de principios trazando tantas filas como pares de polos tiene el motor, y empezando el principio «U» por la ranura 1; luego añadiremos a las siguientes celdas del cuadro el resultado de  $Y_{120}$ . Por lo tanto, será:

U	V	W
1	5	9
13	17	21

En este caso, podemos observar en el esquema de la Figura 8.24 que los principios de cada fase que nos indica el cuadro coinciden con los principios que hay en cada grupo.



## 8.8 Realización del esquema de un bobinado concéntrico

Vamos a realizar el esquema del bobinado del motor concéntrico de **conexión por polos consecuentes**. El esquema lo vamos a realizar paso a paso y grupo a grupo, partiendo del ejercicio que anteriormente hemos calculado:

- 1.º Indicaremos las ranuras en el esquema, como podemos observar en la Figura 8.19, y colocaremos el primer grupo de la fase *U* comenzando por la ranura 1 y respetando el número de bobinas por grupos (2) y la amplitud resultante (4).

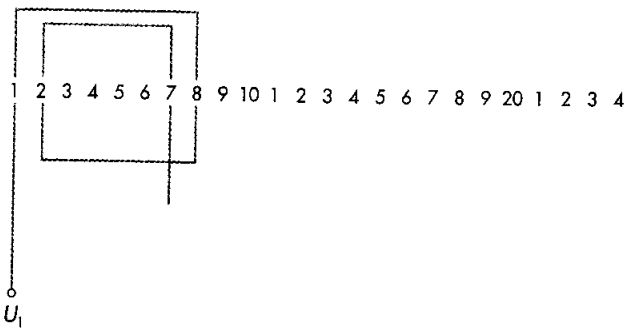


Fig. 8.19. Colocación del primer grupo de bobinas de la fase *U*.

- 2.º A continuación, colocamos el segundo y el último grupo de la fase *U* utilizando la ranura 13, como principio del segundo grupo, respetando, como en el grupo anterior, la amplitud y el número de bobinas por grupo.

En la Figura 8.20, podemos observar la colocación del segundo grupo de la fase *U* conectado con el anterior, final con principio o por polos consecuentes *ppc*.

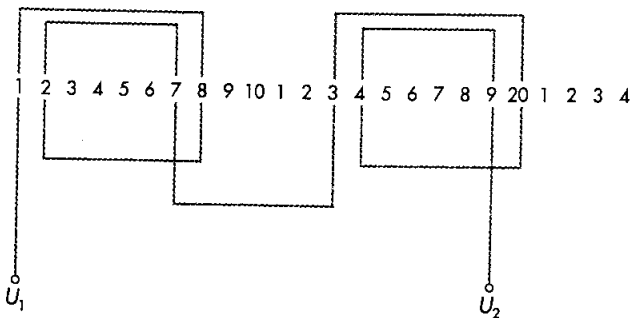


Fig. 8.20. Colocación y conexión del segundo grupo de la misma fase *U*.

Aunque todas las fases son exactamente iguales, vamos a representar la segunda fase o fase *V* grupo a grupo.

- 3.º La fase *V* comenzará por donde indica el cuadro de principios de la fase *V*, es decir, por la ranura 5, como podemos ver en la Figura 8.21.

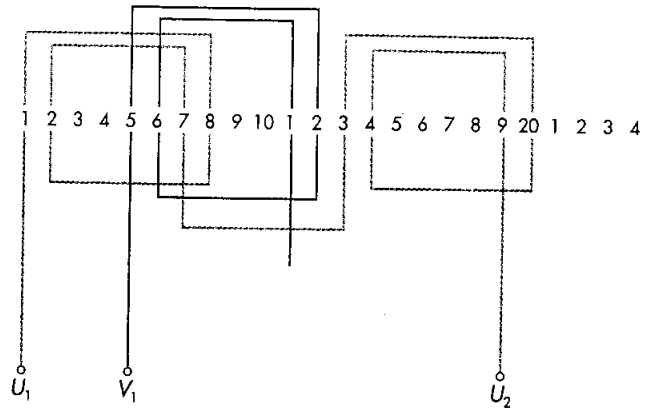


Fig. 8.21. Colocación del primer grupo de la fase *V*.

- 4.º En el segundo grupo de la fase *V* se tomará como principio de grupo la ranura 17, como indica el cuadro de principios de fase. En la Figura 8.22, se puede observar cómo queda colocado y conectado el segundo grupo de la fase *V*.

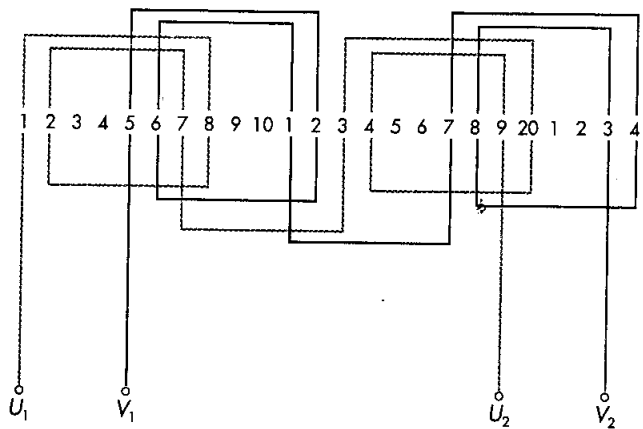


Fig. 8.22. Colocación y conexión del segundo grupo de la fase *V*.

- 5.º De la misma manera que se han colocado los grupos de las fases *U* y *V*, se colocarán los grupos de bobina de la fase *W*, comenzando por poner el primer grupo en la ranura que indica el cuadro de principios de fase para *W*.

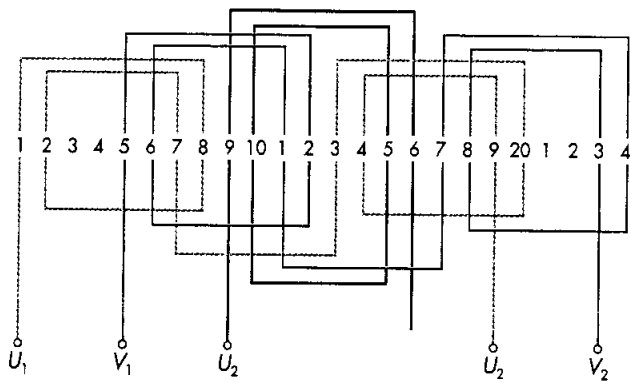


Fig. 8.23. Colocación del primer grupo de la fase W.

6.º Para concluir el esquema, se coloca el segundo grupo de la fase W y el último del bobinado, como se puede observar en la Figura 8.23.

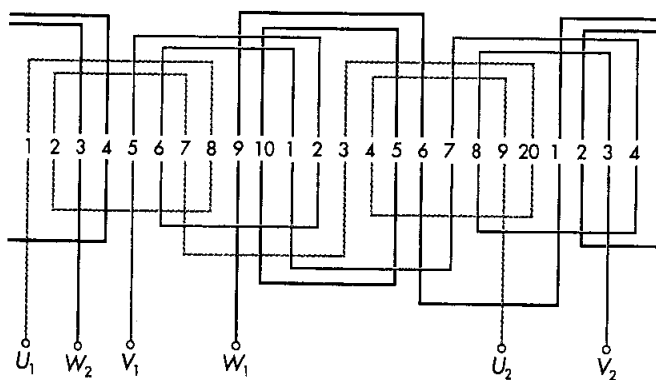


Fig. 8.24. Colocación del segundo grupo de la fase W y último del bobinado.

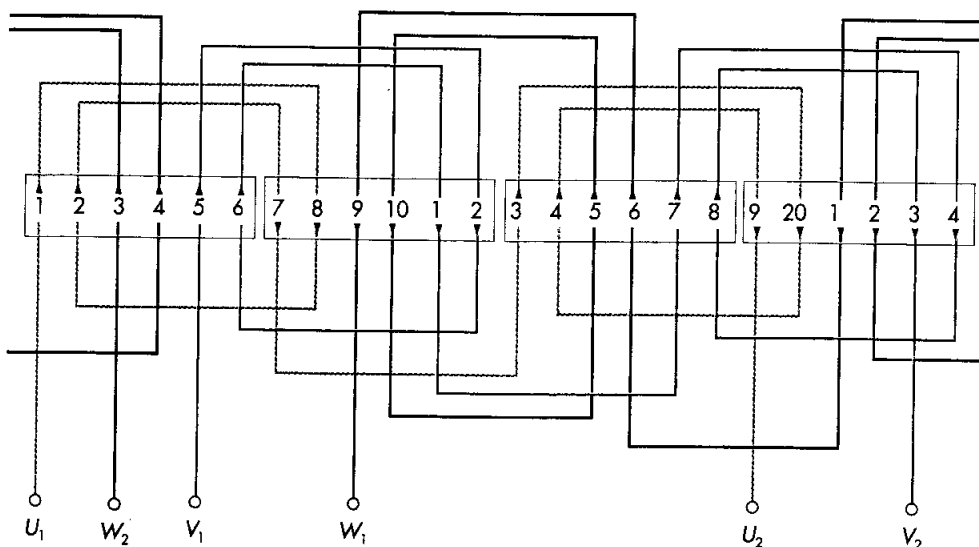


Fig. 8.25. Sentidos de las corrientes y formación de los polos.

### A. Indicación de los extremos de las fases, sentidos de las corrientes y formación de los polos

Como se puede observar en la Figura 8.23, la designación de los principios y finales de las fases está indicada con unas letras normalizadas, que coincidirán con las indicadas en la placa de bornes del motor.

Como se expuso en la Tabla 8.1, los principios de las fases son  $U_1$ ,  $V_1$  y  $W_1$ , y los finales de las mismas son  $U_2$ ,  $V_2$  y  $W_2$ , respectivamente.

Los sentidos de las corrientes en las fases se corresponden con los de un sistema trifásico; dos fases tendrán un sentido, y una fase, el sentido contrario, o viceversa.

El sentido de las corrientes se aplica a las bobinas del motor, con una flecha que indica el sentido de la corriente; una vez concluido, reproducirá el aspecto de los polos. Se puede comprobar en la Figura 8.25.

### B. Diferencia entre los bobinados concéntricos por polos y por polos consecuentes

En el proceso de cálculo de los bobinados concéntricos se ha podido comprobar que se pueden hacer con la conexión por polos (*pp*) o por polos consecuentes (*ppc*).

Independientemente de que se puedan construir los bobinados, la conexión por polos tiene el doble de grupos por fase que el bobinado en conexión por polos consecuentes, pero con la mitad de bobinas por grupo.

Como se puede comprobar, el cuadro de principio de fase del bobinado por polos consecuentes es el mismo que la conexión por polos.

Por lo tanto, la conexión por polos indica el principio de fase de la mitad de los grupos, y coloca los grupos restan-

tes en el espacio entre grupos de la misma fase y de igual tamaño.

En la Figura 8.26, podemos observar la colocación de los grupos de bobinas para un bobinado de 24 ranuras, de 4 polos, trifásico y conexión por polos.

### Caso práctico 1

Realiza el esquema del bobinado de un motor trifásico concéntrico de una capa, con 24 ranuras, 4 polos y conexión por polos.

El procedimiento a seguir será el siguiente:

#### Números de ranuras, polos y fases ( $Kpq$ )

El número de ranuras por polo y fase es el indicativo de las posibilidades de ejecución del bobinado, por lo que debemos determinarlo antes de proceder al resto del cálculo, sabiendo las condiciones para realizarlo.

En este caso, el resultado permite realizar el bobinado con grupos enteros.

$$Kpq = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

#### Bobinas y capas por ranuras ( $B$ )

En una ranura se sitúa, en este caso, un haz activo de bobina, por lo que el número de bobinas del motor será la mitad del número de ranuras.

$$Bt = \frac{K}{2} = \frac{24}{2} = 12$$

#### Número de grupos totales ( $Gt$ )

En conexión  $pp$ , el número de grupos de todo el bobinado será:

$$Gt = 2p \cdot q = 4 \cdot 3 = 12$$

#### Número de grupos por fase ( $Gf$ )

Conocido el número de grupos totales, lo único que hay que hacer es determinar el número de grupos de bobinas por fase.

$$Gf = 2p = 4$$

#### Número de bobinas por grupos ( $U$ )

En este caso de conexión  $pp$ , el número de bobinas por grupo será:

$$U = \frac{Bt}{Gt} = \frac{12}{12} = 1$$

#### Amplitud de grupo ( $m$ )

La amplitud en este caso de conexión  $pp$ , será:

$$m = (q - 1) \cdot 2U = (3 - 1) \cdot 2 \cdot 1 = 4$$

#### Principios de las fases ( $Y_{120}$ )

En el caso de los principios de fase, determinará de la misma manera para los dos tipos de conexiones, y la fórmula será la misma para ambas conexiones:

$$Y_{120} = \frac{K}{3p} = \frac{24}{6} = 4$$

#### Cuadros de principios de fase

Hay que componer el cuadro de principios trazando tantas filas como pares de polos tiene el motor, y empezando el principio  $U$  por la ranura 1; después, sumaremos a las siguientes celdas del cuadro el resultado de  $Y_{120}$ . Por lo tanto, será:

$U$	$V$	$W$
1	5	9
13	17	21

En este caso, podemos observar, en el esquema de la Figura 8.27, que los principios de cada fase que nos indica el cuadro coinciden con la mitad de los principios que

## Caso práctico 1 (continuación)

hay en cada grupo, por lo que la otra mitad de los grupos de cada fase se colocará como indica la Figura 8.26.

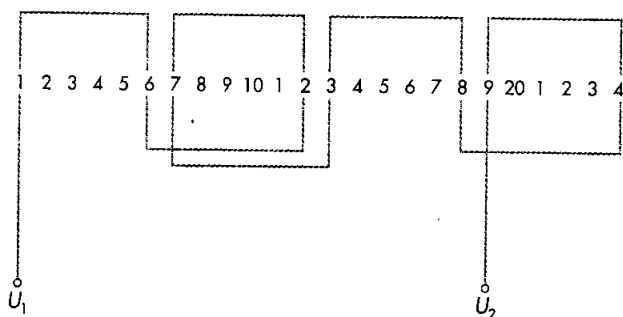


Fig. 8.26. Colocación de los grupos de bobinas de la fase U, conexión por polos.

Una vez obtenidos los datos necesarios para confeccionar el esquema, se procederá con el primer grupo de la fase U, y así hasta terminar con el último grupo de la fase W.

En la Figura 8.27, se puede comprobar el esquema completo del bobinado.

Este esquema está representado a tres niveles para impedir el cruce de las cabezas de las bobinas. Se ha seleccionado esta forma de representación porque facilita tanto su composición como su comprensión.

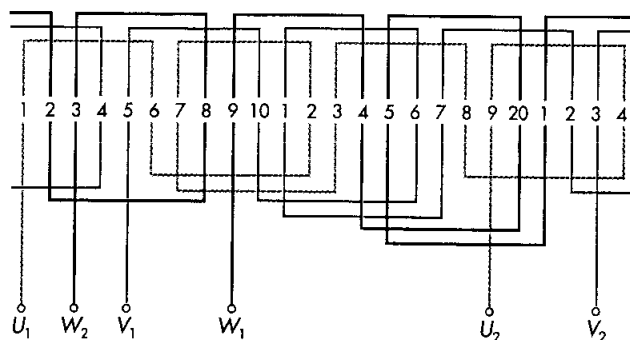


Fig. 8.27. Bobinado por polos de un motor trifásico concéntrico de 24 ranuras de una capa.

### 8.9 Bobinados concéntricos enteros y fraccionados

Un bobinado es fraccionario cuando el número de ranuras por polo y fase ( $Kpq$ ) es fraccionario.

Estos bobinados se ejecutan generalmente cuando se quiere adaptar de una polaridad a otra con el mismo estator, produciéndose unos resultados en el número de bobinas por grupo, un valor entero más una parte fraccionaria.

Como el número de bobinas por grupo no es un número entero (por ejemplo, dos bobinas y media), se formarán grupos, en la misma fase, de tres bobinas y dos bobinas alternativamente, y el número total de bobinas de una fase ( $Bf$ ) será el valor del número de bobinas por grupo por el número de grupos. En la Figura 8.28, se puede comprobar el resultado del número de grupos y de bobinas por fase.

$$Bf = U \cdot Gf = 2,5 \cdot 2 = 5$$

### 8.10 Esquema de un motor monofásico concéntrico

El bobinado de los motores monofásicos consta, esencialmente, de un bobinado principal que está funcionando permanentemente y un bobinado auxiliar que funciona en el momento del arranque.

Los bobinados monofásicos se confeccionan concéntricamente y generalmente por polos, aunque para los de bobinados superpuestos no hay unos criterios definidos.

Entre el bobinado principal y el auxiliar debe existir un desfase de 80 a 85 grados eléctricos para conseguir el arranque; por ello, la construcción de los bobinados se hace con bobinas de diferentes espiras y diámetros entre los bobinados auxiliar y principal.

En muchos casos no es posible conseguir el arranque del motor, por lo que se conecta un condensador al bobinado auxiliar para aumentar el desfase entre los bobinados.

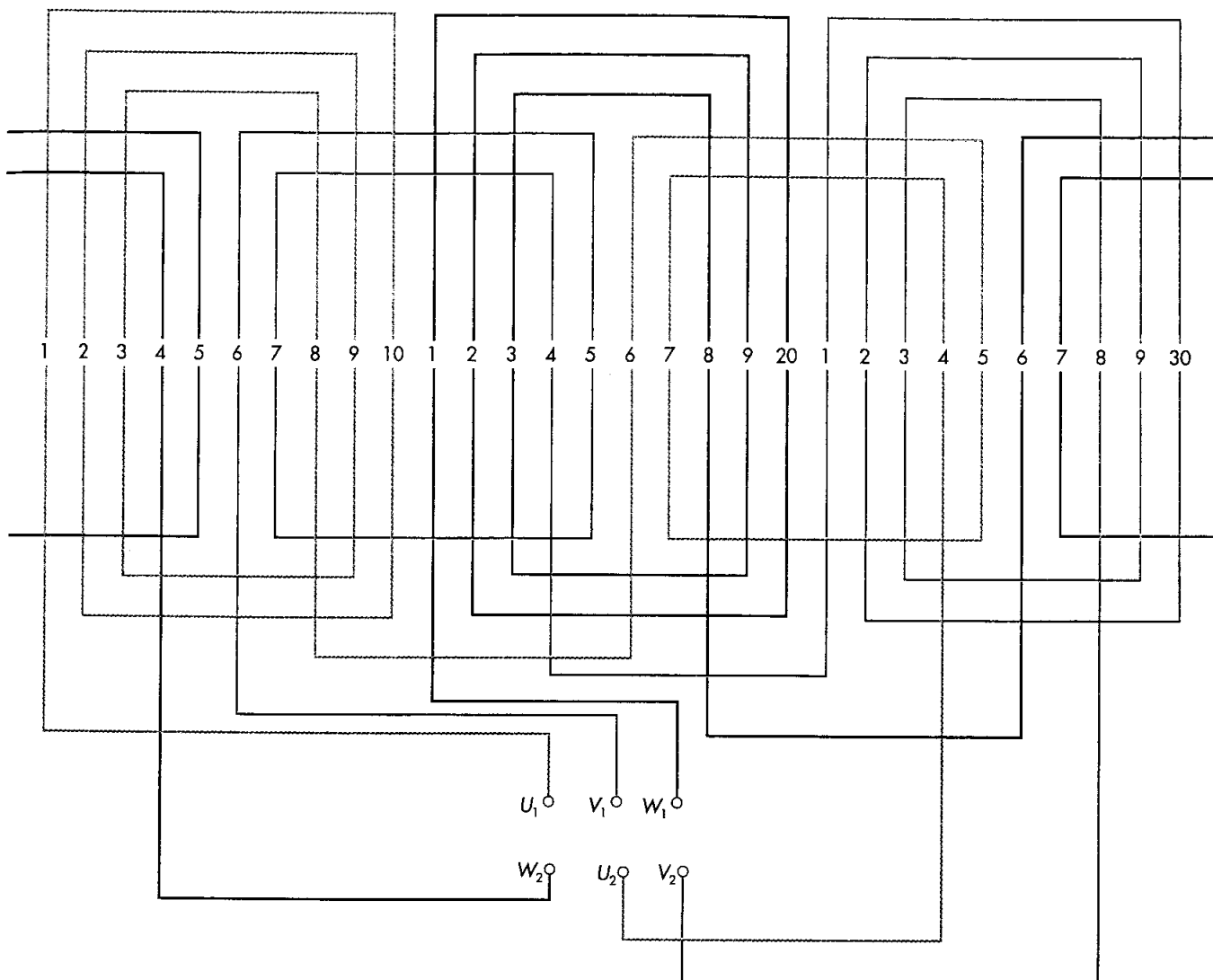


Fig. 8.28. Esquema de un bobinado concéntrico fraccionario.

Nos podremos encontrar motores concéntricos por su bobinado, con bobinados separados y con bobinados superpuestos.

Los bobinados separados tienen ranuras independientes en cada bobinado, y los bobinados superpuestos comparten ranuras de ambos bobinados.

#### A. Cálculo de los bobinados monofásicos separados

Los bobinados separados constan de un bobinado principal, que ocupa dos tercios del número de ranuras del estator, y de un bobinado auxiliar que ocupa el tercio restante.

El cálculo para el bobinado principal se realiza con independencia del bobinado auxiliar.

#### Bobinas por grupo y amplitud de grupo en el bobinado principal

En los bobinados separados, las bobinas por grupo y la amplitud se determinan con la misma fórmula:

#### Fórmula 8.14

$$U = m = \frac{K}{6p}$$

#### Bobinas por grupo del bobinado auxiliar

El número de bobinas que contiene cada grupo del bobinado auxiliar se determina por:

### Fórmula 8.15

$$U_o = \frac{K}{12 \cdot p}$$

### Amplitud del grupo del bobinado auxiliar

La amplitud se determina mediante el número de ranuras, y el número de polos se determina por:

### Fórmula 8.16

$$m_a = \frac{K}{3p}$$

### Paso de principios

Para confeccionar el cuadro de principios, se determinará el paso de principio:

### Fórmula 8.17

$$Y_{90} = \frac{K}{4p}$$

Si el desfase de los bobinados monofásicos es de, aproximadamente, 90 grados eléctricos, el paso de principios, como en los bobinados trifásicos, estará en función del número de ranuras y de polos.

## Caso práctico 2

Realiza el esquema de un bobinado monofásico concéntrico separado, cuyos datos son:

$$K = 24$$

$$2p = 4$$

$$q = 1$$

### Número de bobinas por grupo del bobinado principal

$$U = m = \frac{K}{6p} = \frac{24}{6 \cdot 2} = 2$$

### Número de bobinas por grupo del bobinado auxiliar

$$U_o = \frac{K}{12p} = \frac{24}{12 \cdot 2} = 1$$

### Amplitud de grupo auxiliar

$$m = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \cdot 2} = 4$$

### Paso de principios

$$Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4 \cdot 2} = 3$$

### Cuadro de principios

U	U <sub>o</sub>
1	4
7	10
13	16
19	22

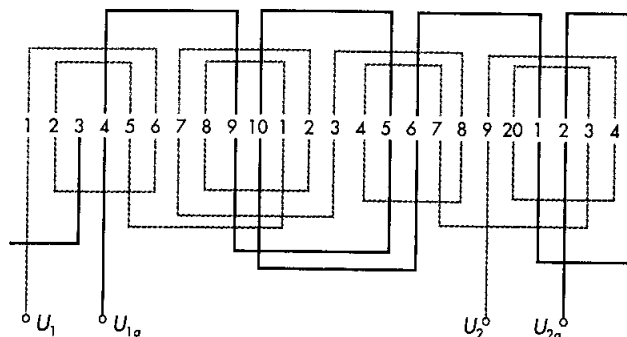


Fig. 8.29. Esquema de un bobinado monofásico separado.

## B. Cálculo de los bobinados monofásicos superpuestos

Para realizar el cálculo de los bobinados monofásicos superpuestos, partimos de determinar el número de bobinas por grupo de forma convencional, bien por datos obtenidos en el desmontaje, o bien por características propias del motor.

### Bobinas por grupo del bobinado principal ( $U$ )

El número de bobinas por grupo será tomado convencionalmente del desmontaje del bobinado.

### Bobinas por grupo del bobinado auxiliar ( $U_a$ )

El número de bobinas por grupo será tomado convencionalmente del desmontaje del bobinado.

### Amplitud de grupo del bobinado principal ( $m$ )

La amplitud se determinará por:

### Fórmula 8.18

$$m = \frac{K - (2p \cdot 2U)}{2p}$$

### Amplitud de grupo del bobinado auxiliar ( $m_a$ )

La amplitud se determinará por:

### Fórmula 8.19

$$m_a = \frac{K - (2p \cdot 2U_a)}{2p}$$

### Paso de principio

El paso de principio que se utiliza es el determinado en los bobinados separados.

$$Y_{90} = \frac{K}{4p}$$

## Caso práctico 3

Realiza el esquema de un bobinado monofásico concéntrico superpuesto, cuyos datos son:

- $K = 24$
- $2p = 4$
- $q = 1$

### Bobinas por grupo del bobinado principal ( $U$ )

El número de bobinas por grupo será tomado convencionalmente en el desmontaje del bobinado.

$$U = 2,5$$

### Bobina por grupo del bobinado auxiliar ( $U_a$ )

El número de bobinas por grupo será tomado convencionalmente del desmontaje del bobinado.

$$U_a = 1,5$$

### Amplitud de grupo del bobinado principal

$$m = \frac{K - (2p \cdot 2U)}{2p} = \frac{24 - (4 \cdot 2 \cdot 2,5)}{4} = \frac{4}{4} = 1$$

### Amplitud de grupo del bobinado auxiliar

$$m_a = \frac{K - (2p \cdot 2U_a)}{2p} = \frac{24 - (4 \cdot 2 \cdot 1,5)}{4} = \frac{12}{4} = 3$$

### Paso de principio

$$Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{8} = 3$$

### Cuadro de principios

$U$	$U_a$
1	4
7	10
13	16
19	22

A continuación se procederá a la confección del esquema de un bobinado monofásico superpuesto, que corresponde con el de la Figura 8.30.

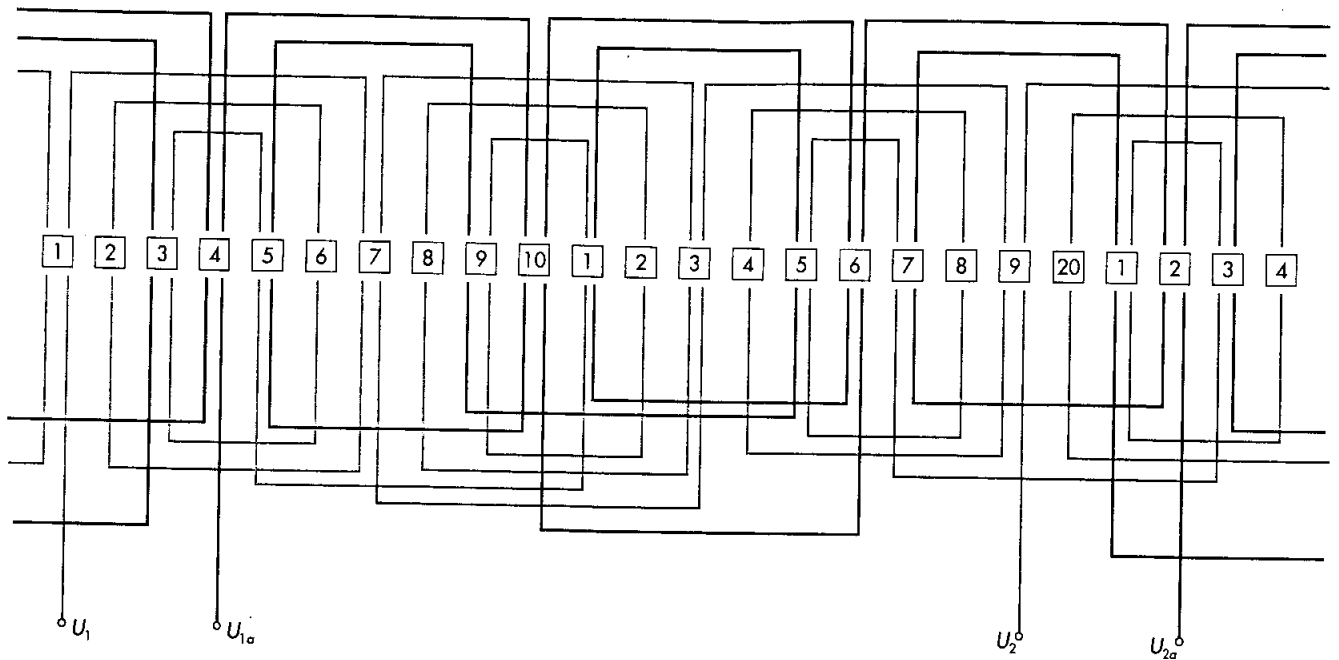


Fig. 8.30. Bobinado monofásico superpuesto.

### 8.11 Diferencias entre los bobinados excéntricos y los concéntricos

A diferencia de los bobinados concéntricos, en los bobinados excéntricos todas las bobinas del bobinado son iguales. Los bobinados excéntricos, como se puede ver en el Cuadro 8.1, se clasifican en imbricados y ondulados.

Los bobinados excéntricos que vamos a estudiar en esta Unidad serán los imbricados, ya que son los que generalmente se utilizan en motores y están extendidos por todos los ámbitos industriales, agrícolas, domésticos, etc.

Los bobinados imbricados se conectan generalmente mediante polos, lo que indica que tienen tantos grupos de bobinas como polos tiene el bobinado.

Los bobinados imbricados se pueden calcular y ejecutar en una o dos capas.

En los bobinados excéntricos de una y dos capas se puede reducir el paso polar (ancho de bobina). En el caso de los bobinados imbricados de una capa, el paso polar se puede reducir, pero siempre respetando el valor impar, como veremos más adelante. En cambio, en los bobinados im-

bricados de dos capas, el valor del paso polar puede ser par o impar.

### 8.12 Bobinados excéntricos enteros y fraccionados

Al clasificar los bobinados, se estudió cómo los bobinados imbricados podían ser de una o dos capas, pero también enteros o fraccionarios.

Serán enteros o fraccionarios dependiendo de si el número de bobinas por grupo es entero o fraccionario, para lo que aplicaremos la siguiente fórmula:

**Fórmula 8.21**

$$U = \frac{K}{4p \cdot q}$$

En los imbricados de dos capas, el número de bobinas totales será igual al número de ranuras.



### A. Condiciones de los bobinados imbricados enteros de una capa

En los bobinados enteros de una capa, cada lado activo de la bobina ocupa una ranura. Las bobinas de estos bobinados tienen colocado un lado activo en una ranura par, y el otro lado activo, en una ranura impar, lo que hace que el **paso de ranura o ancho de bobina sea impar**.

Por su construcción, las cabezas de bobinas están dirigidas hacia la derecha y hacia la izquierda alternativamente. En la Figura 8.30, se puede observar la dirección de las cabezas de bobinas.

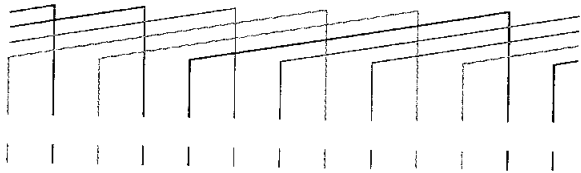


Fig. 8.31. Sentido de las cabezas de bobinas de un bobinado imbricado de una capa.

Otra de las condiciones que deben reunir estos bobinados es que el paso de ranura sea aproximadamente igual al paso polar. Conocidas estas condiciones, podemos exponer lo siguiente:

- **Para paso polar impar**, el ancho de bobina deberá ser igual al paso polar. También puede ser acortado el paso polar en la cantidad deseada, de forma que quede **siempre el paso polar como valor impar**.

El paso polar se obtiene mediante:

**Fórmula 8.22**

$$Y_p = \frac{K}{2p}$$

$$Y_p \cong Y_k$$

Si acortamos el ancho de bobina en los bobinados imbricados, obtendremos tantas ranuras muertas como ranuras acortemos; esto reduce el tamaño de los polos y, por consiguiente, reduce la potencia del motor.

- **Para paso polar par**, forzosamente debemos acortarlo a valor impar para que se pueda construir. Si tenemos un paso polar de 8, deberemos reducirlo a 7 o 5, pero siempre deberá ser impar.

## 8.13 Cálculo de los bobinados imbricados de una capa

Como indicábamos en el Apartado 8.3 al estudiar los bobinados trifásicos, los elementos son comunes a todos los bobinados de corriente alterna.

Por lo tanto, se utilizarán los mismos para determinar cada uno de los elementos de los bobinados imbricados.

Para el cálculo de los bobinados imbricados, se recurrirá a las fórmulas utilizadas en los concéntricos, con la excepción del paso polar o ancho de bobina; como **los bobinados imbricados se ejecutan generalmente por polos**, sólo recurriremos a las empleadas en conexión por polos.

**Número de ranuras por polo y fase**

**Fórmula 8.2**

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

**Número de bobinas para un bobinado imbricado de una capa**

**Fórmula 8.3**

$$B = \frac{K}{2}$$

**Número de bobinas para un bobinado imbricado de dos capas**

**Fórmula 8.4**

$$B = K$$

**Grupos totales del bobinado**

**Fórmula 8.5**

$$G_t = 2p \cdot q = \frac{Bt}{2pq}$$

**Grupos de bobinas por fase**  
**Fórmula 8.7**

$$Gf = 2p$$

**Número de bobinas por grupo**  
**Fórmula 8.9**

$$U = \frac{B}{Gf}$$

**Paso polar o ancho de bobina**  
**Fórmula 8.22**

$$Y_p = \frac{K}{2p}$$

**Paso de principios de fase**  
**Fórmula 8.13**

$$Y_{120} = \frac{K}{3p}$$

**Caso práctico 4**

Realiza el esquema del bobinado de un motor trifásico imbricado de una capa, cuyos datos son:

- $K = 24$  ranuras
- $2p = 2$  polos
- $q = 3$

**Número de ranuras por polo y fase**

Será:

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{24}{2 \cdot 3} = 4$$

**Número de bobinas para imbricado de una capa**

Será:

$$B = \frac{K}{2} = \frac{24}{2} = 12$$

**Grupos totales del bobinado**

Será:

$$Gt = 2p \cdot q = 2 \cdot 3 = 6$$

**Grupos por fase**

Será:

$$Gf = 2p = 2$$

**Bobinas por grupo**

Será:

$$U = \frac{B}{Gf} = \frac{12}{6} = 2$$

**Paso polar**

Será:

$$Y_p = \frac{K}{2p} = \frac{24}{2} = 12 - 3 = 9$$

Al ser número par, se acortará hasta tener un paso polar impar. En este caso el paso polar queda en 9.

**Ancho de bobina o paso de ranura**

Será:

$$Y_k \equiv Y_p = 12 - 3 \Rightarrow 9$$

**Paso de principios de fase**

Será:

$$Y_{120} = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \cdot 1} = 8$$

**Cuadro de principios de fase**

U	V	W
1	5	9

## 8.14 Esquema de un bobinado imbricado de una capa

Como se observa en la tabla de principios de fase, tan sólo hay un principio de fase por cada una, lo que indica que de los dos grupos de bobina que tiene cada fase, tan sólo uno tiene identificado el principio, por lo que el segundo grupo se tendrá que ubicar como se expuso con los concéntricos.

En la Figura 8.32, se observa la distribución de los dos grupos de la fase U.

Una vez calculado el bobinado, para confeccionar el esquema debemos tener en consideración las siguientes observaciones:

- Los lados activos de ranuras consecutivas deberán tener sus cabezas de bobinas dirigidas en sentido opuesto.
- Las bobinas dirigidas hacia el mismo sentido deberán agruparse por grupos de valor igual al del número de bobinas por grupo.

En la Figura 8.33, se puede observar el sentido de las bobinas y su agrupamiento.

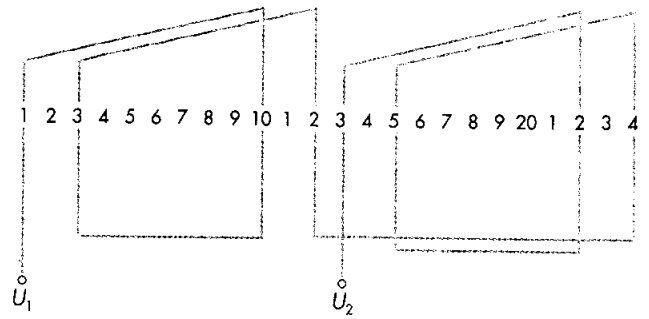


Fig. 8.32. Distribución de los grupos de la fase U.

## 8.15 Cálculo de los bobinados imbricados de dos capas

Un bobinado de dos capas es aquel en el que se encuentran dos bobinas diferentes de distinta fase, o de su misma fase en una misma ranura.

Para realizar los cálculos de los bobinados imbricados de dos capas, debemos considerar, con respecto a los imbricados de una capa, que el número de bobinas en este caso es igual al número de ranuras ( $B = K$ )

Por lo tanto, el cálculo se realizará con las mismas fórmulas.

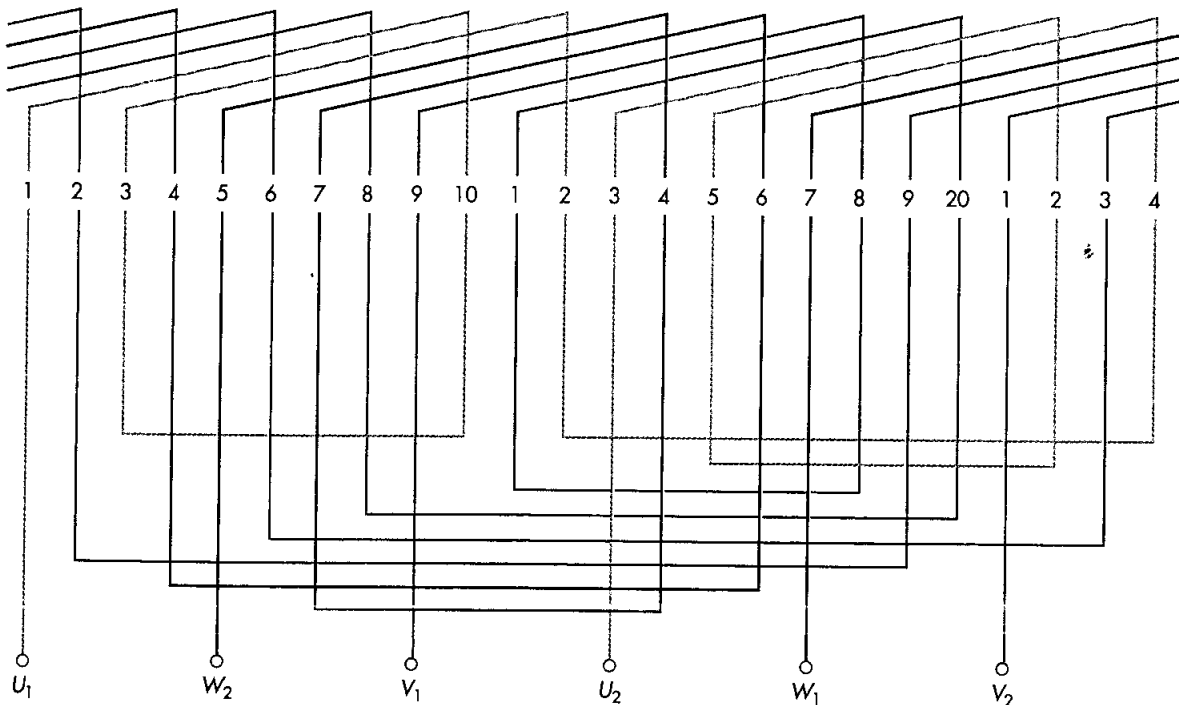


Fig. 8.33. Esquema completo de un bobinado trifásico imbricado de una capa.

## Caso práctico 5

Calcula y realizar el esquema de un bobinado imbricado de dos capas, con los datos siguientes:

- $K = 12$
- $2p = 2$
- $q = 3$
- $B = k$

Número de ranuras por polos y fase

Será:

$$K_{pq} = \frac{K}{2pq} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2$$

**Bobinas totales**

Será:

$$B = K = 12$$

**Grupos totales**

Será:

$$G_t = 2p \cdot q = 2 \cdot 3 = 6$$

**Grupos por fase**

Será:

$$G_f = 2p = 2$$

**Bobinas por grupo**

Será:

$$U = \frac{B}{G_t} = \frac{12}{6} = 2$$

**Paso polar**

Será:

$$Y_p = \frac{K}{2p} = \frac{12}{2} = 6$$

**Ancho de ranura o paso de bobina**

Será:

$$Y_k \cong Y_p = 6 \text{ (acortado en 2 unidades)} \Rightarrow 4$$

**Paso de principios**

Será:

$$Y_{120} = \frac{K}{3p} = \frac{12}{3 \cdot 1} = 4$$

**Cuadro de principios**

U	V	W
1	5	9

## 8.16 Esquema de un bobinado imbricado de dos capas

En los bobinados de dos capas, los lados activos de una misma ranura deberán tener las cabezas de bobinas dirigidas en sentidos opuestos, como se puede apreciar en la Figura 8.34.

El paso polar de los bobinados imbricados de dos capas puede ser par o impar, y se puede acortar cuando se quiera o sea necesario.

Para confeccionar el esquema del bobinado, cuando una bobina sale de la parte derecha de la ranura, debe entrar en la parte izquierda de la ranura que le corresponda para evitar cruces innecesarios.

En este sentido, en la Figura 8.34 se pueden comprobar los cruces de bobinas innecesarios que se producen en las salidas de las ranuras, y que complican la elaboración de los esquemas de los bobinados de dos capas.

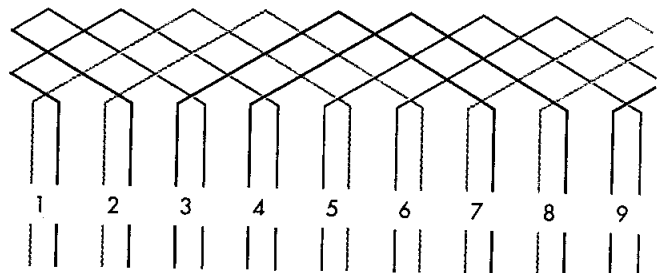


Fig. 8.34. Dirección de las cabezas de bobinas salidas de una misma ranura.

### A. Esquema del bobinado imbricado de dos capas

En la Figura 8.35 se puede observar la colocación de la fase U, que consta de dos grupos de bobinas, al igual que todas las fases del bobinado.

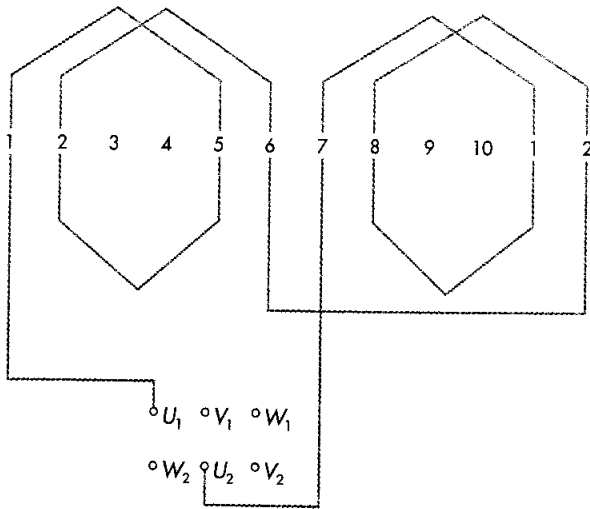


Fig. 8.35. Esquema del montaje de la fase U de un bobinado imbricado de dos capas.

En la Figura 8.36, se puede observar cómo queda colocada la fase V.

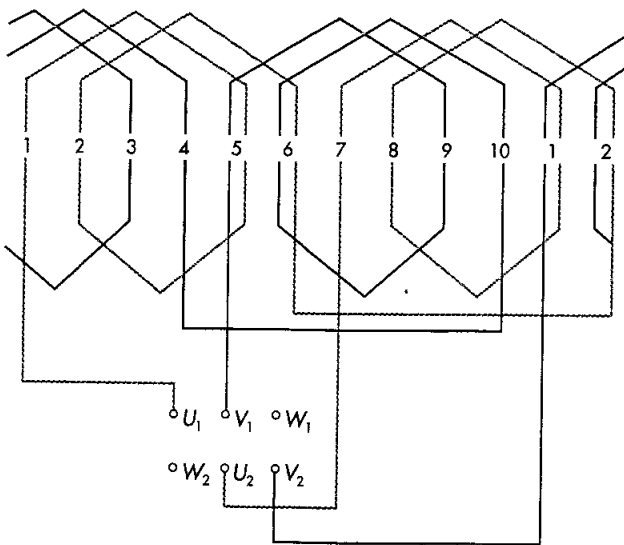


Fig. 8.36. Esquema del montaje de la fase V de un bobinado imbricado de dos capas.

En la Figura 8.37, se puede observar el esquema completo de un bobinado imbricado de dos capas.

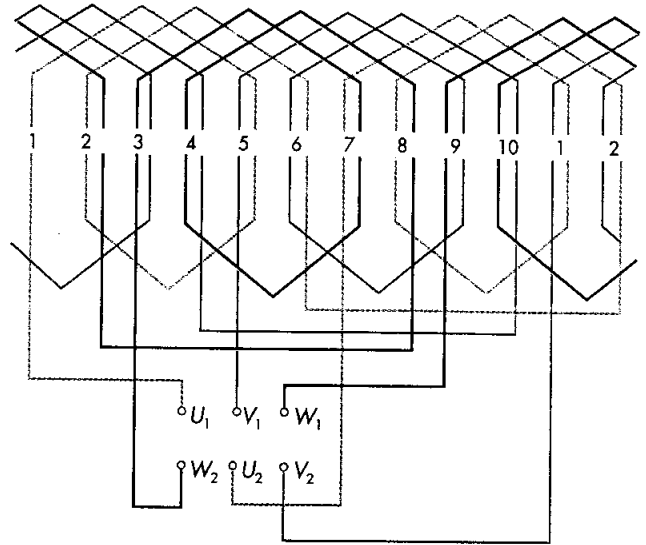


Fig. 8.37. Esquema del montaje completo de un bobinado imbricado de dos capas.

## 8.17 Bobinados de dos velocidades Conexión Dahlander

En los motores asíncronos, es posible obtener dos velocidades distintas con un solo bobinado mediante el cambio del número de polos.

Esto se consigue mediante un cambio de conexiones internas y disponiendo cada fase del bobinado en dos mitades. Mediante la conmutación de polos del propio bobinado, se consigue el cambio de velocidad.

La relación de velocidades distintas que se puede obtener mediante la conmutación de polaridad es de 2:1. Esto supone que si la mayor velocidad de un motor de dos velocidades es de 1 500 rpm, la menor velocidad será de 750 rpm.

Este tipo de bobinado se conoce con el nombre de bobinado de **conexión Dahlander**.

Como se indicó antes, este bobinado consiste en dividir la fase en dos mitades. La conexión de los grupos se hará por polos entre los grupos impares, y de la misma manera entre los grupos pares.

Conectados los grupos pares e impares, para cerrar el bobinado se conectarán ambas mitades, uniendo el final del último grupo impar con el siguiente grupo par.

En la Figura 8.38, se puede comprobar la distribución y conexión de los grupos.

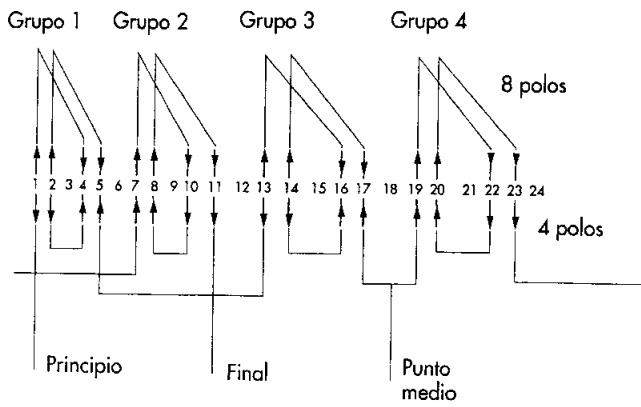


Fig. 8.38. Distribución y conexión de grupos de un bobinado de conexión Dahlander.

Una polaridad se formará aplicando la entrada de corriente en los principios de fases; los finales de las fases serán las salidas.

La otra polaridad se formará aplicando la entrada de corriente en los puntos medios; los principios y los finales de las mismas serán la salida de las fases.

## 8.18 Cálculo de los bobinados imbricados de dos velocidades

En este tipo de bobinados, el proceso de cálculo se realizará teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Generalmente, se ejecutan como si fueran imbricados de dos capas.
- El ancho de bobina se determinará mediante el mayor número de polos.
- El número de bobinas por fase se determinará mediante el menor número de polos.
- El principio de fases se determinará mediante el menor número de polos.
- Las dos mitades de cada fase (grupos impares y pares) se conectarán mediante un puente.
- Por cada fase se obtienen tres puntas: principio, final y punto medio.

Mayor número de polos	
$K_{pq} = \frac{K}{2pq}$	$G_t = 2p \cdot q$
$Y_p = \frac{K}{2p} \Rightarrow Y_k$	$G_f = 2p$
	$U = \frac{B_t}{G_t} = \frac{K}{2p}$
	$Y_{120} = \frac{K}{3p}$

Tabla 8.2. Cuadro resumen para el cálculo de un bobinado de conexión Dahlander.

### Caso práctico 6

Calcular el bobinado imbricado de dos velocidades de conexión Dahlander, cuyos datos son los siguientes:

- $K = 24$
- $2p = 2$  y  $4$
- $q = 3$

#### Número de ranuras por polos y fase

Será:

$$K_{pq} = \frac{K}{2pq} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

#### Bobinas totales

Será:

$$B = K = 24$$

#### Grupos totales

Será:

$$G_t = 2p \cdot q = 2 \cdot 3 = 6$$

#### Grupos por fase

Será:

$$G_f = 2p = 2$$

**Bobinas por grupo**

Será:

$$U = \frac{B}{Gf} = \frac{24}{6} = 4$$

**Paso polar**

Será:

$$Y_p = \frac{K}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

**Ancho de ranura o paso de bobina**

Será:

$$Y_k \cong Y_p = 6 \Rightarrow \text{Acortado en 2 unidades} \Rightarrow Y_k = 4$$

**Paso de principios**

Será:

$$Y_{120} = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \cdot 2} = 4$$

**Cuadro de principios**

U	V	W
1	5	9

**8.19 Esquema de un bobinado imbricado de dos velocidades**

En la confección del bobinado imbricado de dos velocidades, la conexión de los grupos se hará por polos entre los grupos impares, de la misma manera que entre los grupos pares.

Conectados los grupos pares e impares, para cerrar el bobinado se conectarán ambas mitades, uniéndose el final del último grupo impar con el siguiente grupo par.

De esta manera obtendremos un principio ( $U_1$ ), un final ( $U_2$ ) y un punto medio ( $U_M$ ) por cada fase.

En la Figura 8.39, se puede observar el esquema de los dos grupos de la fase U.

Las tres fases del bobinado se pueden conectar en estrella o en triángulo, ya estén las mitades conectadas en estrella o en triángulo.

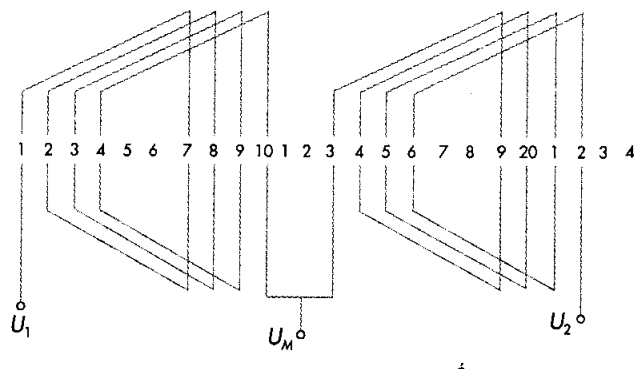


Fig. 8.39. Esquema de la fase U del bobinado imbricado de dos velocidades, conexión Dahlander.

Las conexiones más utilizadas en los bobinados Dahlander son la estrella-doble estrella ( $Y/YY$ ) y triángulo-doble estrella ( $\Delta/YY$ ).

La conexión estrella-doble estrella se realiza cuando las mitades de las fases se ponen en paralelo, creando otra estrella con la mitad del bobinado, como se puede observar en la Figura 8.42.

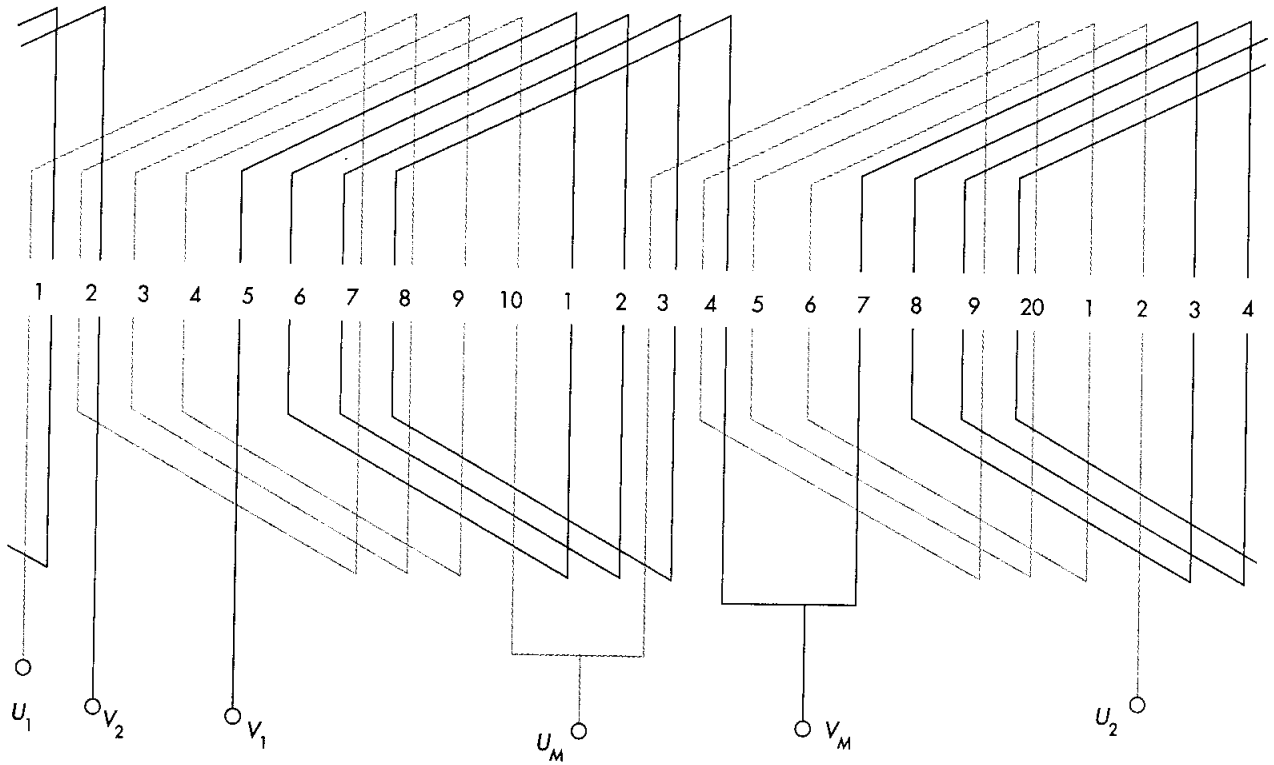


Fig. 8.40. Esquema de la fase V del bobinado imbricado de dos velocidades, conexión Dahlander.

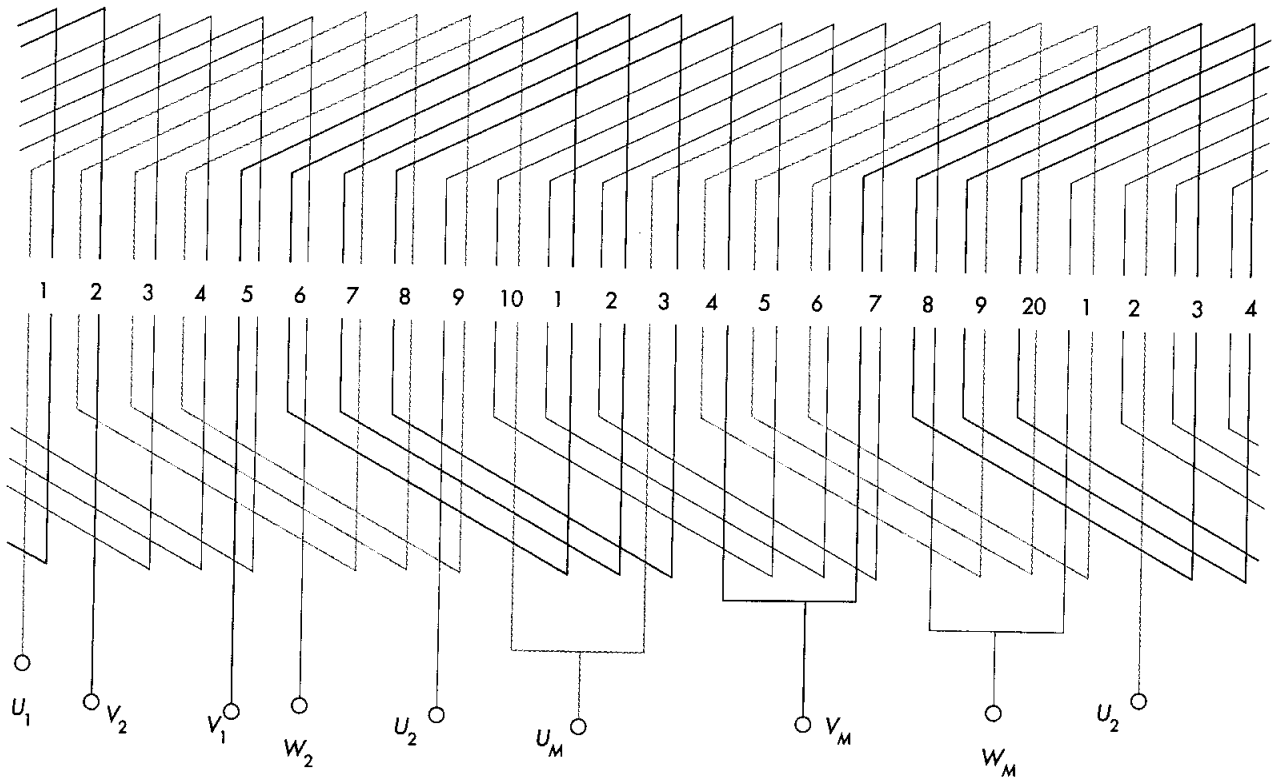


Fig. 8.41. Esquema del bobinado imbricado de dos velocidades, conexión Dahlander.



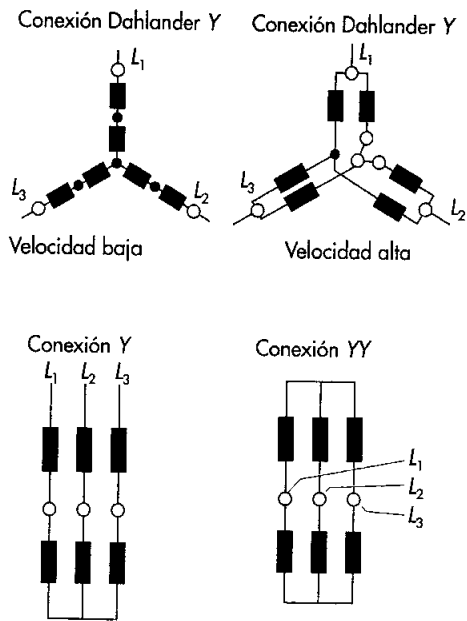


Fig. 8.42. Conexión Dahlander estrella-doble estrella (Y/YY).

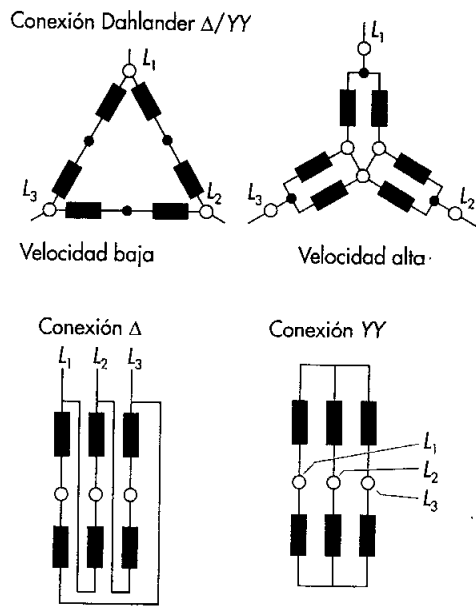


Fig. 8.43. Conexión Dahlander triángulo-doble estrella (Δ/YY).

## 8.20 Características diferenciadoras de los bobinados excéntricos fraccionarios

Un bobinado es fraccionario si el resultado obtenido del número de bobinas de grupos es entero; en este caso, todos los grupos del bobinado serán iguales.

En cambio, si el número de bobinas por grupo es fraccionario, los grupos serán desiguales y se distribuirán por la periferia del estator con una repetición de los grupos; estos bobinados se llaman fraccionarios.

Estos bobinados se ejecutan generalmente cuando se quiere cambiar de una polaridad a otra con el mismo estator. Con el cambio de polaridad, puede ocurrir que el número de bobinas por grupo nos dé un número entero más una parte fraccionaria.

Como el número de bobinas por grupo no es entero (por ejemplo, 2 bobinas y media), se formarán grupos, en la misma fase, de 3 bobinas y 2 bobinas alternativamente; el número total de bobinas de una fase ( $B_f$ ) será el valor del número de bobinas por grupo por el número de grupos. En la Figura 8.28, se puede comprobar el resultado del número de grupos y de bobinas por fase.

$$B_f = U \cdot G_f$$

### Conceptos básicos

**Ancho de bobina:** es la anchura que tiene la bobina calculada en número de ranuras.

**Bobinas:** están formadas por un número determinado de espiras cerradas que tienen un principio y un final. En su composición se distinguen los lados activos y las cabezas.

**Deslizamiento:** es la diferencia de velocidad existente entre la velocidad de sincronismo y la velocidad de rotación del inducido (rotor). El deslizamiento es necesario para que en los conductores del rotor se genere una fme.

**Paso polar:** es la distancia que hay entre los ejes de dos polos contiguos y, por tanto, de diferente polaridad.

**Polos:** son núcleos de hierro rodeados por bobinas que, al ser recorridas por la corriente eléctrica, provocan un flujo magnético que da lugar a los polos magnéticos. Dependiendo del sentido de la corriente, los polos pueden ser Norte o Sur.

**Ranuras:** son los espacios huecos que se encuentran a lo largo de la circunferencia del estator del motor, donde se colocan los lados activos de las bobinas.

## Autoevaluación

1. Clasifica los motores asíncronos en función de su bobinado.
2. ¿Qué se comprueba con el cálculo del número de ranuras por polo y fase ( $Kpq$ )?
3. ¿Qué es la amplitud de grupo? ¿En qué tipos de bobinados se emplea?
4. ¿Cómo definirías el ancho de bobina y qué relación tiene con el paso polar?
5. ¿Qué datos son necesarios para confeccionar el esquema de un bobinado concéntrico de una capa?
6. ¿Por qué se produce el arranque en un motor monofásico?
7. ¿Qué se hace cuando el paso polar de un bobinado imbricado de una capa tiene un valor par?
8. ¿Qué ocurre cuando en un bobinado imbricado de dos capas el paso polar tiene un valor impar?
9. ¿Cómo se soluciona un bobinado concéntrico de una capa cuando el número de bobinas por grupo tiene una unidad más de media?
10. ¿Qué es un bobinado de conexión Dahlander? ¿Cómo se distribuyen los grupos de bobinas?

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

### 11. Calcula el bobinado de un motor concéntrico, conociendo los siguientes datos:

$$K = 36 \text{ ranuras}$$

$$n = 1000 \text{ rpm}$$

$$q = 3$$

Conexión por polos, en una red de 50 Hz.

#### • Objetivos:

- Determinar si es posible su cálculo y su posterior ejecución.
- Comprobar el buen funcionamiento, señalizando los sentidos de las corrientes y la marcación de los polos.
- Utilizar las nuevas designaciones de bornes.
- Confeccionar el esquema de un bobinado concéntrico.

#### • Medios didácticos:

- Libro de texto.
- Útiles de dibujo.

#### • Procedimiento:

- 1.º Calcula el bobinado utilizando las fórmulas adecuadas para los bobinados concéntricos.
- 2.º Diseña el esquema del bobinado, comenzando y terminando con una fase, para más tarde continuar con las demás.
- 3.º Señaliza los principios y finales de fase.
- 4.º Señaliza los sentidos de las corrientes y, por consiguiente, la marcación de los polos.

#### • Contesta:

- a) Realiza el cálculo del bobinado propuesto.
- b) Dibuja el esquema del bobinado propuesto.

### 12. Calcula el bobinado de un motor concéntrico, conociendo los siguientes datos:

$$K = 36 \text{ ranuras}$$

$$2p = 6$$

$$q = 3$$

Conexión por polos consecuentes.

#### • Objetivos:

- Determinar si es posible su cálculo y su posterior ejecución.
- Comprobar el buen funcionamiento, señalizando los sentidos de las corrientes y la marcación de los polos.
- Utilizar las nuevas designaciones de bornes.
- Confeccionar el esquema de un bobinado concéntrico.

#### • Medios didácticos:

- Libro de texto.
- Útiles de dibujo.

#### • Procedimiento:

- 1.º Calcula el bobinado utilizando las fórmulas adecuadas para los bobinados concéntricos.

- 2.º Diseña el esquema del bobinado, comenzando y terminando con una fase, para más tarde continuar con las demás.
- 3.º Señaliza los principios y finales de fase.
- 4.º Señaliza los sentidos de las corrientes y la marcación de los polos.

• **Contesta:**

- a) Realiza el cálculo del bobinado propuesto.
- b) Dibuja el esquema del bobinado propuesto.

**13. Calcula el bobinado de un motor imbricado de una capa, conociendo los siguientes datos:**

$K = 36$  ranuras

$2p = 4$

$q = 3$

Conexión por polos.

Paso diametral (ancho del valor del paso polar).

• **Objetivos:**

- Determinar si es posible su cálculo y su posterior ejecución.
- Comprobar el buen funcionamiento, señalizando los sentidos de las corrientes y la marcación de los polos.
- Utilizar las nuevas designaciones de bornes.
- Confeccionar el esquema de un bobinado imbricado.

• **Medios didácticos:**

- Libro de texto.
- Útiles de dibujo.

• **Procedimiento:**

- 1.º Calcula el bobinado utilizando las fórmulas adecuadas para los bobinados imbricados.
- 2.º Diseña el esquema del bobinado, comenzando y terminando con una fase, para más tarde continuar con las demás.
- 3.º Señaliza los principios y finales de fase.
- 4.º Señaliza los sentidos de las corrientes y la marcación de los polos.

• **Contesta:**

- a) Realiza el cálculo del bobinado propuesto.
- b) Dibuja el esquema del bobinado propuesto.

**14. Calcula el bobinado de un motor imbricado de dos capas, conociendo los siguientes datos:**

$K = 12$  ranuras

$2p = 2$

$q = 3$

$B = K$

Paso diametral (ancho del valor del paso polar).

• **Objetivos:**

- Determinar si es posible su cálculo y su posterior ejecución.
- Comprobar el buen funcionamiento, señalizando los sentidos de las corrientes y la marcación de los polos.
- Utilizar las nuevas designaciones de bornes.
- Confeccionar el esquema de un bobinado imbricado de dos capas

• **Medios didácticos:**

- Libro de texto.
- Útiles de dibujo.

• **Procedimiento:**

- 1.º Calcula el bobinado utilizando las fórmulas adecuadas para los bobinados imbricados de dos capas.
- 2.º Diseña el esquema del bobinado, comenzando y terminando con una fase, para más tarde continuar con las demás.
- 3.º Señaliza los principios y finales de fase.
- 4.º Señaliza los sentidos de las corrientes y la marcación de los polos.

• **Contesta:**

- a) Realiza el cálculo del bobinado propuesto.
- b) Dibuja el esquema del bobinado propuesto.



**Mantenimiento de máquinas  
de corriente alterna**

**9**



Cada máquina debe contar con un plan de mantenimiento preventivo, además de un historial de averías.

## A. Procesos

Como se indicó en la Unidad 6, los procesos para intervenir en una máquina deberán contar al menos con las siguientes **líneas de actuación**:

- Planificación.
- Observación.
- Actuación.
- Comprobación.
- Puesta en funcionamiento.

En el mantenimiento preventivo, si se llevan a cabo comprobaciones específicas, no hay que realizar paradas prolongadas en la máquina.

En los procesos que se siguen, hay que diferenciar entre las actuaciones de mantenimiento con la máquina en funcionamiento y con la máquina parada.

Las actuaciones que se deberán realizar **con la máquina parada** son las que se exponen a continuación; se reparará o sustituirá si el estado de los elementos lo requieren:

- Limpieza con aspirador o aire seco, en las partes internas de la máquina.
- Comprobación del estado del ventilador.
- Comprobación de la superficie de los anillos rozantes.
- Comprobación visual de la uniformidad del entrehierro.
- Comprobación visual del equilibrado del rotor.
- Comprobación de holguras y ajustes en el rotor.
- Comprobación de placa de bornes, conexiones visibles y sujeción de las bobinas.
- Medición de la puesta a tierra y las resistencias de aislamiento.
- Examen del estado de los aislantes. En caso de estar resquebrajado, se limpiará, se secará y se rebarnizará.
- Comprobación de la maniobra de arranque.
- Comprobación del engrase de los elementos mecánicos.
- Limpieza de los conductos de ventilación.

Las actuaciones que se deberán realizar **con la máquina en funcionamiento**, por no suponer ningún riesgo, son las que se exponen a continuación:

- Limpieza exterior.
- Comprobación de la ventilación adecuada.
- Comprobación de la temperatura de funcionamiento.
- Observación de ruidos, vibraciones y roces.
- Medición de la tensión de alimentación y la intensidad de funcionamiento, que hay que contrastar con las características correspondientes de la máquina.

En la Tabla 9.2, podemos observar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo de un ciclo anual.

## B. Útiles

Los útiles que se emplean en el mantenimiento de máquinas de corriente alterna son diversos; muchos de ellos confeccionados por el propio equipo de mantenimiento en función de las necesidades que van surgiendo.

Estos útiles pueden ser: destornilladores adaptados a las ranuras del estator, hojas de sierra preparadas para extraer las cuñas de aislamiento de las ranuras, hojas de sierra para cortar los aislamientos, máquinas para decapar hilo esmaltado, baquetas con cerdas de acero para la limpieza de ranuras, espadines de *nylón* para adaptar el hilo esmaltado en la ranura, maza de *nylón* que permite golpear y moldear las bobinas, anillos fijadores de plástico para agrupar los hilos de las bobinas, moldes de bobinas, etc.

En la Figura 9.1 podemos ver varios útiles y herramientas que se utilizan en bobinados de máquinas eléctricas.

### Estetoscopio

Se emplea para la detección de vibraciones y ruidos. Este aparato se coloca sobre la carcasa de la máquina, y a través de un conducto transmite el ruido a los acoples del oído.

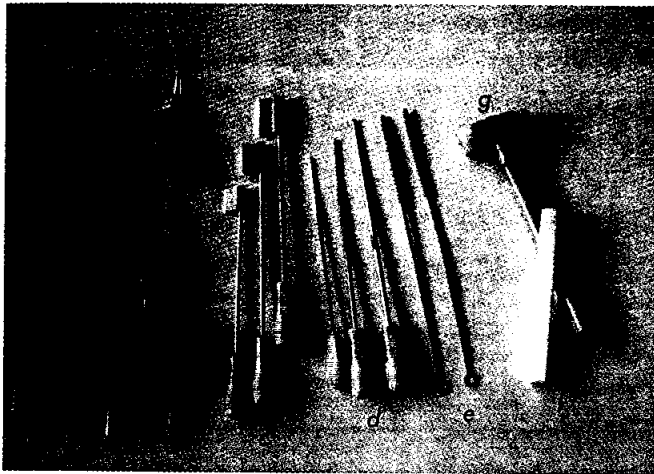
### Termómetro

Se utiliza para la medición del calentamiento de la máquina; se le suele acoplar unas sondas para que llegue a diferentes puntos de la máquina.

### Moldes de bobinas

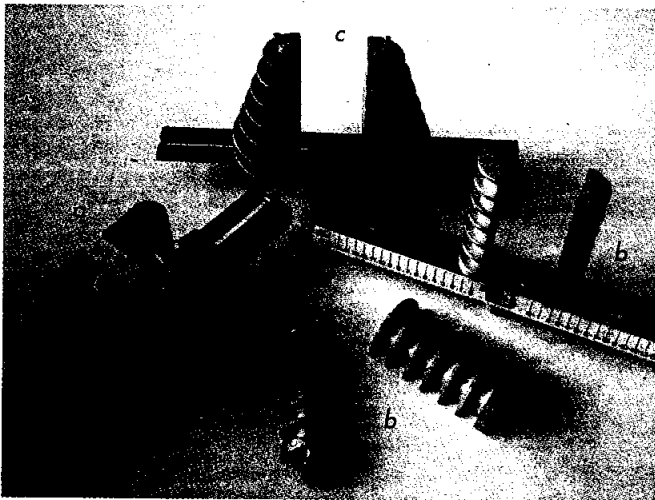
Se emplean para la confección de las bobinas; los hay para bobinados concéntricos y excéntricos, como se puede ver en la Figura 9.2.





- |                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| a) Alicete universal            | f) Espadín de nylon      |
| b) Extractor de poleas          | g) Maza de nylon         |
| c) Solapadores guía             | h) Alicete punta redonda |
| d) Espadines                    | i) Alicete de corte      |
| e) Baquetas con cerdas de acero | j) Tijera reforzada      |

Fig. 9.1. Diferentes útiles y herramientas empleados en el mantenimiento de máquinas.



- a) Molde telescópico de bobinados concéntricos.  
 b) Moldes de bobinas excéntricas.  
 c) Molde de bobinas concéntricas.

Fig. 9.2. Moldes de bobinas.

### Extractor de poleas

El extractor de poleas es un útil eficaz para la extracción de poleas, cojinetes y tapas de carcasas. Su funcionamiento consiste en acoplar el eje de la máquina al eje del extractor; con las palas de éste colocadas en el cojinete, giramos el eje del extractor provocando la salida del cojinete del eje de la máquina (véase Figura 9.10).

### Nivel de burbuja

El nivel de burbuja es una herramienta necesaria para equilibrar las máquinas en la superficie de trabajo; se emplea para el nivelado horizontal y vertical.

Consta de una regla que tiene una pequeña ampolla de agua en la que se encuentra una burbuja de aire. Para la correcta alineación, la burbuja deberá estar en el centro de la parte superior del nivel.

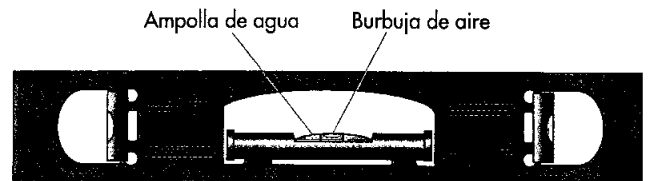


Fig. 9.3. Nivel de burbuja para plano horizontal y vertical.

### Molde para ranuras

El molde para ranuras es un útil que se emplea para dar al aislante de la ranura la forma de la misma. Como podemos ver en la Figura 9.4, una vez confeccionado el aislante que rodea la ranura, se amolda para que ocupe todo el volumen de la misma; de esta forma, el hilo entrará en ella con más facilidad.

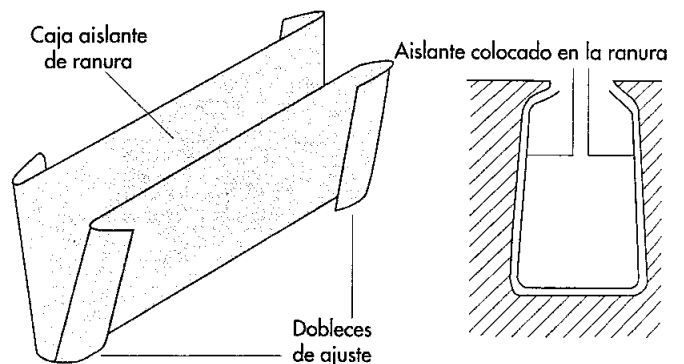


Fig. 9.4. Molde aislante de ranura.

### C. Máquinas y herramientas

Como se ha podido comprobar en la Unidad 1, las herramientas y máquinas utilizadas en el mantenimiento de máquinas son muy específicas. Las que se citan a continuación son las que generalmente se pueden encontrar en un taller de mantenimiento de máquinas eléctricas de corriente alterna:



Bobinadora eléctrica, bobinadora manual, devanador estático, comprobador integral de motores eléctricos, taladradora portátil, taladro sensitivo, esmeriladora, etc.

Tampoco deben faltar herramientas generales: armario mural de panoplia, juego de destornilladores planos, juego de destornilladores *Phillips*, juego de destornilladores *Stecker*, alicate de boca plana, alicate de boca redonda, alicate universal, alicate de punta de aguja larga, mordazas, tijeras de electricista, soldador eléctrico, comprobador de continuidad acústico, detector de tensión (buscapolos).

Las llaves son esenciales en desmontajes y montajes de máquinas. No deben faltar: llaves fijas dobles, llaves ajustables, llaves de tubo, llaves acodadas, llaves de vasos y llaves *Allen*.

que la burbuja de aire quede completamente en la parte superior del nivel, como muestra la Figura 9.5.

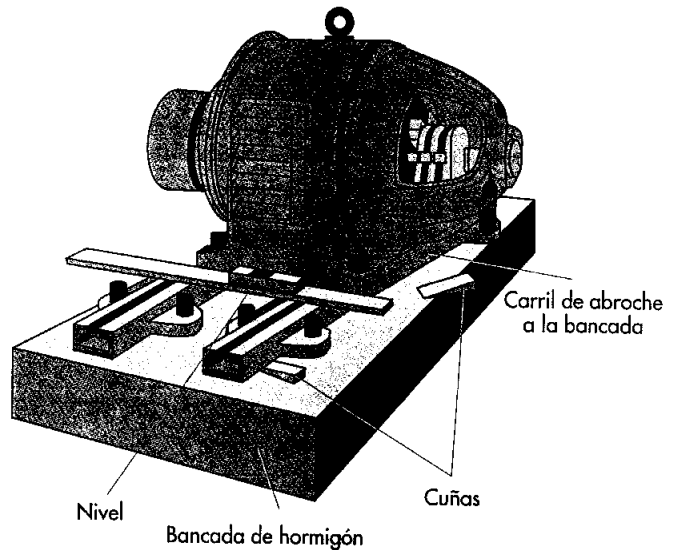


Fig. 9.5. Nivelación de una máquina eléctrica.

## 9.3 Análisis secuencial del mantenimiento preventivo

Como se ha podido ver en la Tabla 9.2, la secuenciación del plan de mantenimiento preventivo de una máquina es variable.

Los elementos que componen una máquina eléctrica no tienen la misma actividad funcional ni el mismo grado de deterioro. Los anillos rozantes de un alternador, por ejemplo, no tienen el mismo mantenimiento que el propio bobinado, puesto que el rozamiento que se produce en los anillos rozantes aumenta el deterioro de este último por lo que, el mantenimiento en ambos elementos no es el mismo.

Esto nos hace comprender que la secuenciación de un mantenimiento preventivo sólo se realiza por cada elemento y en función del tiempo de trabajo.

### A. Comprobación de los anclajes. Eliminación de vibraciones y ruidos

Una de las causas que puede producir desequilibrio y vibraciones en una máquina es la desnivelación de la propia máquina. Para ello es importante la colocación nivelada y ajustada de sus anclajes.

La **nivelación** se puede realizar colocando la máquina en una cimentación adecuada o en carril nivelado. Una vez colocada la máquina en su sitio, terminaremos de nivelar con cuñas preparadas para tal fin, colocadas de manera

### B. Limpieza de los aislamientos eléctricos

Hay casos en los que los aislamientos están recubiertos de una película de aceite o de suciedad adherida. Éstos deben limpiarse con un paño humedecido en petróleo; después hay que pasarles rápidamente un paño limpio y seco.

Actualmente, existen pulverizadores para la limpieza de grasas, aceites, etc., que facilitan considerablemente la limpieza de las máquinas, al proyectar el líquido pulverizado incluso en partes de la máquina a las que no se puede acceder.

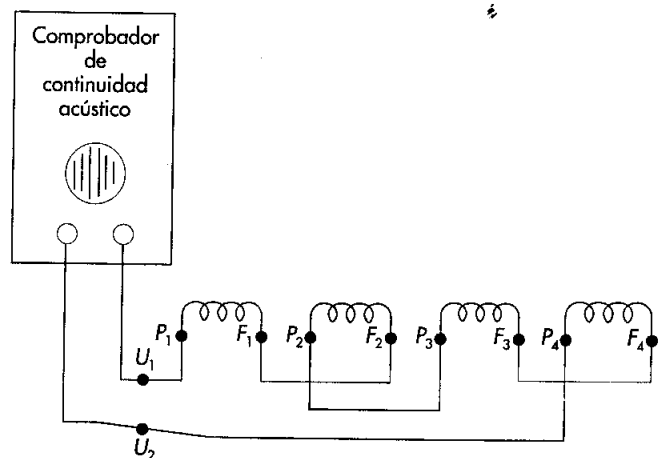


Fig. 9.6. Prueba de continuidad de una fase de un motor asíncrono de corriente alterna.

### C. Limpieza de anillos rozantes. Verificación de desgaste

Los anillos rozantes se deben limpiar, de forma cíclica, del polvo y suciedad que normalmente se produce en los ambientes de trabajo de las máquinas. Para ello se actúa frotando un paño sobre los anillos.

También se pueden limpiar frotando con una lija muy fina, con movimientos circulares, o impregnando un paño con petróleo y frotando con movimientos circulares los anillos.

Para la verificación del desgaste de los anillos rozantes, basta con inspeccionar visualmente sin desmontar la máquina, ya que generalmente los alternadores tienen en la parte de los anillos rozantes una tapa de fácil desmontaje.

### D. Revisión de los bornes y conexiones interiores

Las conexiones de una máquina de corriente alterna se realizan en su placa de bornes; componente de fácil acceso para la revisión de sus contactos con los bobinados. La **comprobación de continuidad** es una operación que clarifica bastante el estado de las conexiones.

Si la comprobación se realiza con un aparato sonoro de continuidad (medidor electroacústico), es posible detectar por el sonido las posibles conexiones defectuosas, agitando levemente las conexiones.

La **medición de la resistencia** de los bobinados es una forma exacta de comprobar si existe una mala conexión por la resistencia de contacto que se produce.

### E. Conservación de los cojinetes. Comprobación del entrehierro

Los **cojinetes** son componentes muy importantes para el buen funcionamiento de los demás elementos. Un cojinete gastado produce un movimiento descentrado en el rotor y, por tanto, un entrehierro desigual; puede producir un rozamiento entre el estator y el rotor y provocar una rotura de las chapas magnéticas de éstos.

Conviene comprobar la holgura de los cojinetes moviendo el eje verticalmente, como se puede observar en la Figura 9.7.

Como se indicó en la Unidad 6, el entrehierro es el espacio libre que separa el rotor del estator. La comprobación del entrehierro en los motores de corriente alterna se realiza visualmente, en una primera inspección, para la detección de desequilibrios y vibraciones.

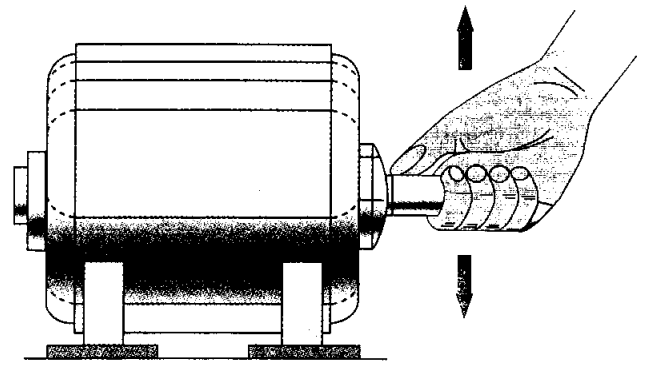


Fig. 9.7. Comprobación del desgaste de los cojinetes.

El **entrehierro** debe permanecer siempre uniforme en toda la circunferencia de la máquina, es decir, que la distancia entre el rotor y el estator deberá ser siempre la misma en toda la longitud de la circunferencia.

En la Figura 9.8, se puede observar cómo la parte inferior del entrehierro no está a la misma distancia que la parte superior, lo que indica que el rotor está desequilibrado.

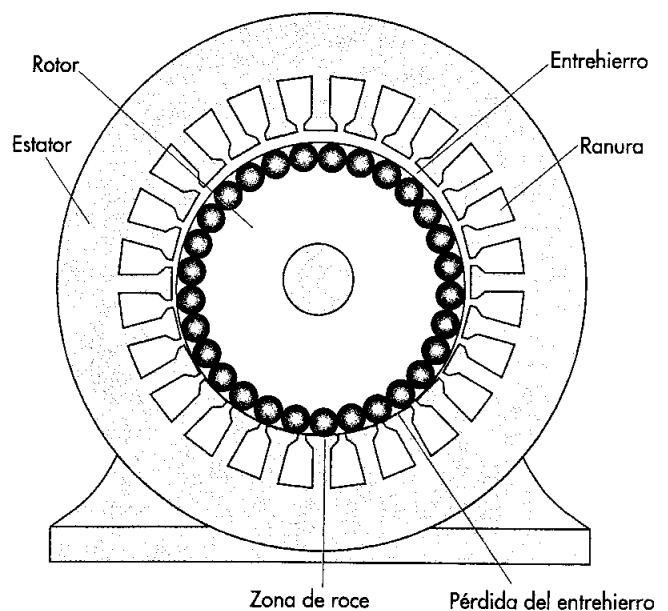


Fig. 9.8. Entrehierro de un motor de corriente alterna.

En algunos casos, se producen alteraciones de este espacio que causan averías complicadas de reparar; en máquinas especiales se recurre al rectificado del estator.

Este tipo de avería se suele provocar por el desgaste de los cojinetes, y en la mayor parte de los casos, por falta de engrase de los mismos.

En la Figura 9.9, se puede observar el rotor sobre un caballete equilibrado y cómo se desplaza la marca hacia abajo indicando el mayor peso sobre ese punto, lo que permite detectar el desequilibrio del rotor.

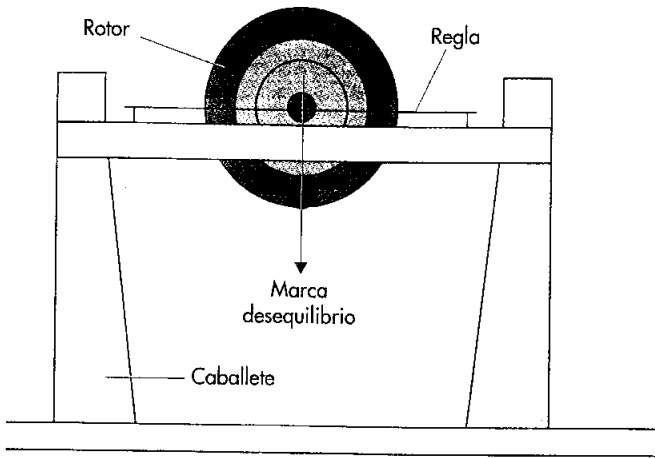


Fig. 9.9. Comprobación del desequilibrio del rotor.

Como se ha expuesto anteriormente, el entrehierro se puede descompensar por el desgaste de algún cojinete o de ambos. Para reparar la avería, se deberá sustituir el cojinete utilizando el extractor de cojinetes y colocándolo de la manera indicada en la Figura 9.10. Cuantas más vueltas se le aplique al eje del extractor, más fuerza hacia atrás harán las palas sobre el cojinete, provocando su extracción.

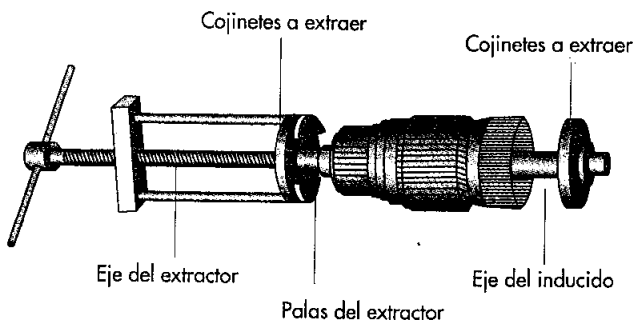


Fig. 9.10. Extracción del cojinete de un motor.

## F. Prueba de aislamiento y continuidad de las fases

La prueba de aislamiento se debe realizar durante la operación de secado, cada cuatro horas y durante un minuto en cada prueba.

Los bobinados con una resistencia óhmica superior a los 50 000 ohmios pueden secarse con el propio calor inter-

no producido por el funcionamiento, caso poco probable en las máquinas de corriente alterna.

La prueba de continuidad se realiza antes de la limpieza, y una vez rebarnizado y secado se vuelve a comprobar la continuidad y la derivación a masa. En la Figura 9.6 se puede apreciar cómo se realiza esta prueba.

## 94 Localización de averías y sistemas de reparación

En todo taller de reparación y mantenimiento de máquinas eléctricas y en toda actuación del equipo de mantenimiento de la propia empresa, se realiza una prueba de recepción de la máquina.

Las **pruebas de recepción** se centran en estos cuatro tipos:

- Verificación de contactos a masa en el bobinado.
- Verificación de interrupciones en cada una de las fases de los bobinados.
- Verificación de cortocircuitos en cada una de las fases del bobinado.
- Verificación manual del giro del eje.

La toma de datos de la máquina en el momento de la recepción facilita considerablemente la organización y la preparación del trabajo.

El tipo de etiqueta que aparece en la Figura 9.11 es el sistema más usual en la toma de datos iniciales de la recepción.

Empresa _____	
Dirección _____	Teléfono _____
Tipo de máquina _____	Serie _____
Fecha de recepción _____	Tensión _____
rpm _____	Intensidad _____
Fases _____	
Conexión en placa de bornes _____	
Diagnóstico de avería _____	

Fig. 9.11. Etiqueta de recepción del motor en el taller.

Para la prueba de recepción, se utilizan útiles y aparatos que permitan una valoración inicial ágil y rápida, así como

proceder a la detección de la avería y, seguidamente, a la reparación.

Los aparatos de medidas son los instrumentos que generalmente se utilizan para la detección de averías, además del comprobador de continuidad y la brújula.

Una vez hechas las comprobaciones pertinentes y antes de desmontar la máquina, se procede a identificar las posiciones que la carcasa y las tapas de la máquina tienen al ser recepcionadas.

Para que el montaje de las tapas se realice en la misma posición en que se desmontó, se señala con un **granete** tanto en las tapas como en la carcasa. En la Figura 9.12, se observan las marcas en las tapas y la carcasa.

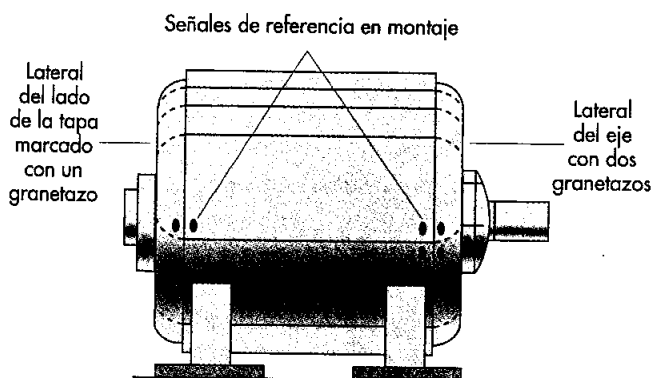


Fig. 9.12. Marcas de identificación de la posición de la carcasa y las tapas.

### A. Bobina del estator abierta

Las interrupciones de las bobinas, de los grupos de bobinas o de la fase se pueden producir por la rotura del bobinado en un punto determinado o por una mala conexión en los terminales de los bobinados.

Esta interrupción en un motor trifásico repercute en su funcionamiento, ya que al interrumpirse una fase, el motor se puede quemar por sobrecarga de las otras dos.

Para la localización de las interrupciones en los bobinados, se utiliza el ohmímetro, la lámpara en serie o el comprobador de continuidad acústico.

Para la detección de un bobinado determinado, se colocarán las puntas del comprobador en cada uno de los extremos de cada fase; en caso de detectarse la interrupción, se comprobará en cada uno de los grupos de bobinas hasta localizar la bobina y el punto interrumpido. La Figura 9.13 muestra el procedimiento de localización de la interrupción de un bobinado.

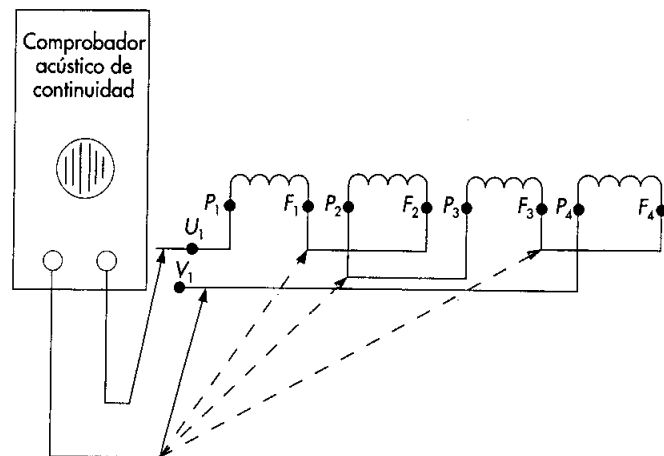


Fig. 9.13. Detección de un bobinado interrumpido.

Para comprobar la interrupción en un bobinado trifásico con **conexión estrella**, se desconectarán las puntas de entradas  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  de la placa de bornes.

Una punta del comprobador de continuidad se conectará al borne de entrada de cada fase  $U_1$ ,  $V_1$  y  $W_1$ , y la otra punta, en el puente de conexión estrella  $U_2$ ,  $V_2$  y  $W_2$ , de manera que en el caso de una interrupción en alguna de las fases, será localizada por la falta de sonido entre el borne de entrada de esa fase y el punto de conexión estrella.

En la Figura 9.14, se puede observar cómo los bornes de entrada al motor están desconectados; el comprobador de continuidad acústico entre una fase y el punto de conexión estrella no producirá ningún tipo de sonido.

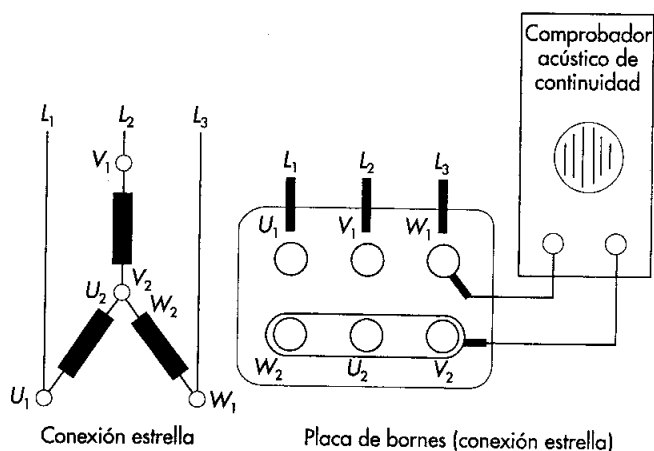


Fig. 9.14. Prueba de continuidad en conexión estrella.

Para comprobar la interrupción en un bobinado trifásico con **conexión triángulo**, se desconectarán las puntas

de entradas  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  de la placa de bornes y los puentes de la conexión triángulo.

Una punta del comprobador de continuidad se conectará al borne de entrada de cada fase  $U_1$ ,  $V_1$  y  $W_1$ , y la otra punta en cada final de cada fase  $U_2$ ,  $V_2$  y  $W_2$ , de manera que en el caso de una interrupción en alguna de las fases, ésta será localizada por la falta de sonido entre los bornes de esa fase.

En la Figura 9.15, se puede observar cómo en el borne de entrada de la fase  $W_1$  se conecta una punta del comprobador y, en el final de esa misma fase, se conecta la otra punta sin obtener sonido alguno.

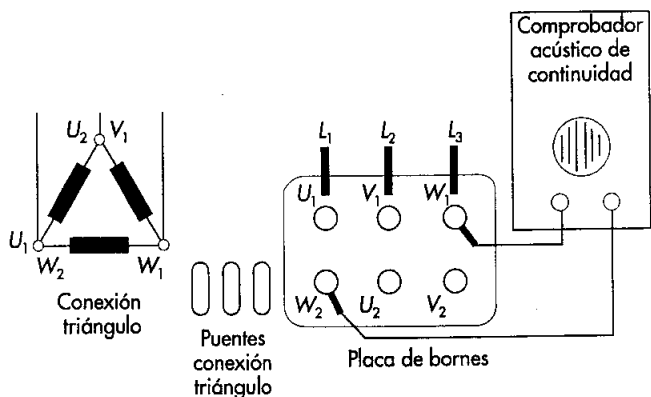


Fig. 9.15. Prueba de continuidad en conexión triángulo.

## B. Bobinado del estator en cortocircuito

Los cortocircuitos se pueden producir por diversas causas: aislamiento defectuoso, rallado del aislamiento de los hilos al colocar en las ranuras, etc.

Una de las causas de bobinados en cortocircuito que con más frecuencia se da en los motores de corriente alterna es el calentamiento en los bobinados.

El calentamiento en los bobinados produce el deterioro del aislamiento y las bobinas quedan sin aislamiento, lo que da lugar a una disminución de la resistencia de las bobinas y, por lo tanto, a la elevación de la intensidad en la fase. Esto es debido a la sobrecarga a que se someten en muchas ocasiones los motores.

La forma de detectar un cortocircuito en un bobinado es medir la intensidad en las tres fases con el motor funcionando en vacío. Si las intensidades son iguales, no existe cortocircuito; si la diferencia entre una fase y otra es considerable, será esa fase la que esté cortocircuitada. En la Fi-

gura 9.16, se puede comprobar cómo se localiza un cortocircuito en una fase.

Otra forma de detectar el cortocircuito en el bobinado es poner en marcha el motor durante unos minutos; una vez calentado el motor, se para y se comprueba con la mano la zona que se ha calentado en exceso. En esta zona sobrecalentada se localiza la bobina en cortocircuito.

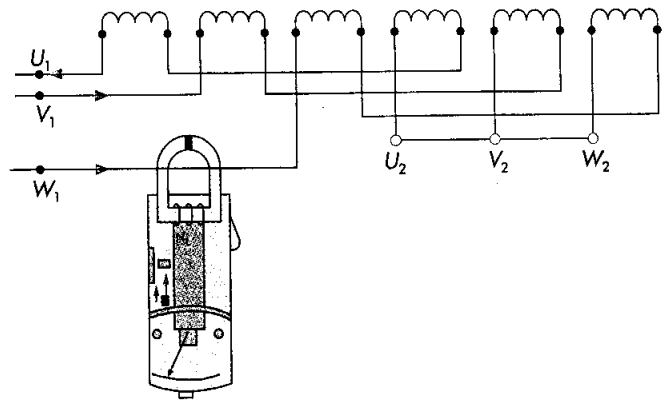


Fig. 9.16. Localización de un cortocircuito en un bobinado.

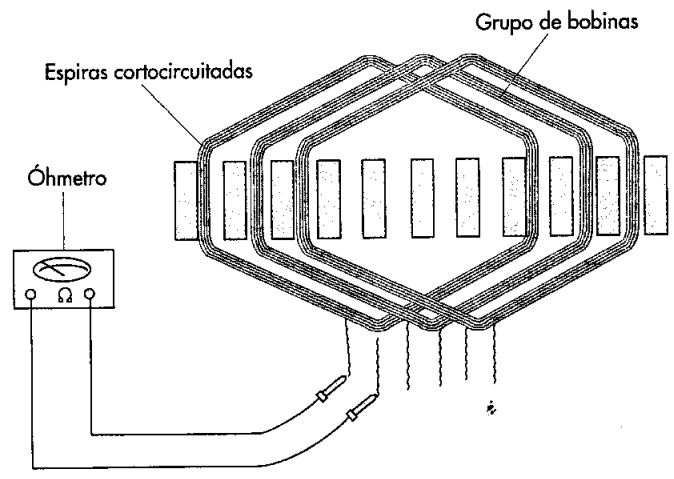


Fig. 9.17. Grupo de bobinas con una bobina en cortocircuito.

Otro sistema para localizar bobinas en cortocircuito es utilizar una **bobina de prueba**, que consiste en una bobina arrollada a un núcleo de chapas alimentada con corriente alterna.

Desmontado el estator, la bobina de prueba se coloca en el interior de éste y se va desplazando ranura a ranura. Cuando encontremos una bobina cortocircuitada, se producirán vibraciones en la banda metálica (por ejemplo, una hoja de sierra) dispuesta en el otro extremo de la bobina. En la

Figura 9.18, se puede comprobar cómo va colocada la bobina de prueba y dónde se ubica la banda metálica.

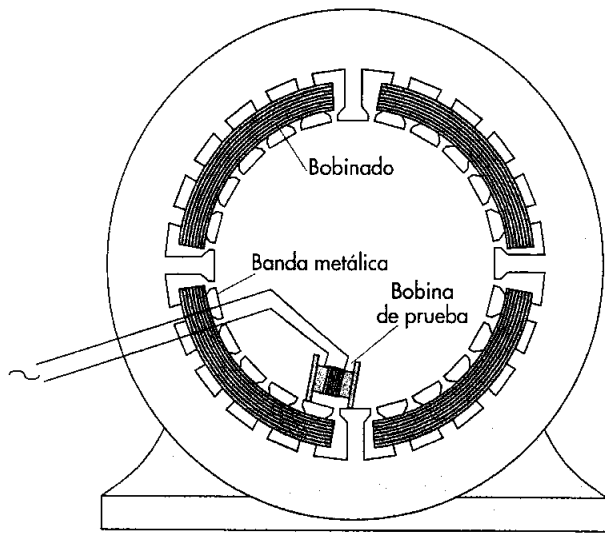


Fig. 9.18. Localización de bobina en cortocircuito por medio de una bobina de prueba.

### C. Bobinado del estator derivada a masa

La derivación a masa es el contacto de un conductor activo del bobinado con algún punto de la carcasa del motor.

Este tipo de contacto se suele producir en el principio o final de una ranura; es un punto de presión de las bobinas en el que el aislamiento de la ranura termina y topa con la parte sin aislar del estator. En la Figura 9.19, se puede observar el punto de contacto a masa.

Para la detección de una derivación a masa de un motor, se conecta una punta del comprobador de continuidad acústico en un punto de la carcasa, y la otra punta del com-

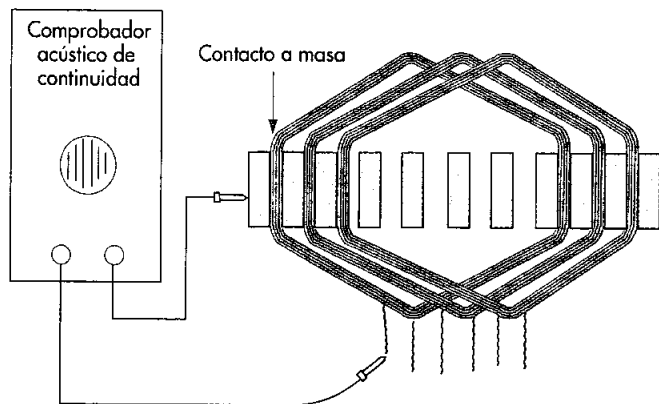


Fig. 9.19. Localización de contacto a masa de un grupo de bobinas.

probador al punto de conexión estrella de la placa de bornes del motor. Si el comprobador acústico suena, el motor estará derivado a masa aunque sin localizar aún la fase derivada.

Para localizar la fase derivada, debemos desconectar los puentes de la placa de bornes y comprobar cada fase con la carcasa del motor, hasta ser detectada mediante el sonido del comprobador. En la Figura 9.20, se muestra el procedimiento para detectar un contacto a masa.

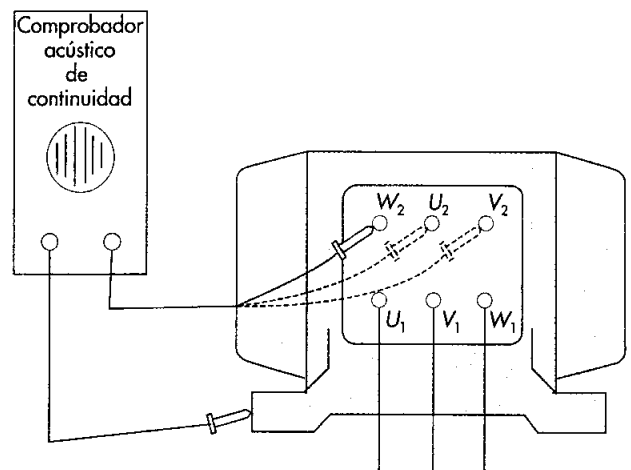


Fig. 9.20. Localización de contacto a masa de un motor.

### D. Conexiones defectuosas entre las bobinas y entre los grupos de bobinas

Cuando en un bobinado se producen conexiones defectuosas, como por ejemplo un grupo de bobinas conectado en oposición al resto de grupos, se da un cambio de polaridad y, como consecuencia, un mal funcionamiento en el motor. Puede producirse un aumento considerable de la intensidad además de ruidos anómalos y velocidad muy reducida.

Para localizar y reparar este inconveniente, se conectan las fases una a una y sucesivamente a una de corriente continua de baja tensión. Se va acercando una brújula a los grupos de bobinas dispuestos en el estator.

Si los grupos están bien conectados, la aguja cambiará de posición cuando se acerque a grupos de bobinas consecutivos; como indica la Figura 9.21, los polos cambian alternativamente de norte a sur (N-S).

Si al pasar la brújula por un grupo la aguja no cambia de posición, indicará que ese grupo está conectado en oposi-

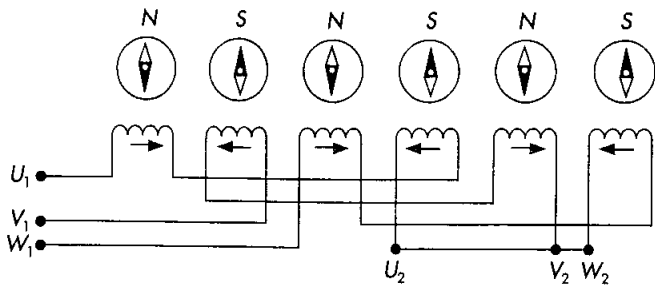


Fig. 9.21. Polaridad de grupos de bobinas correcta.

ción, lo que permitirá detectar el grupo con conexión defectuosa. Como indica la Figura 9.22, los grupos están conectados tres consecutivos con una polaridad y tres con otra, indicando la conexión incorrecta de los grupos.

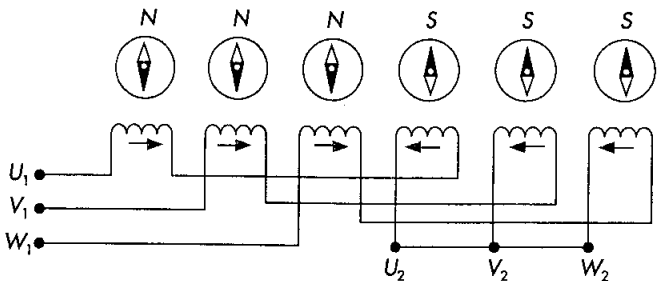


Fig. 9.22. Polaridad de grupos de bobinas incorrecta.

El procedimiento más rápido para confirmar que las conexiones internas del bobinado están bien realizadas consiste en desmontar el rotor, introducir en el estator una bola de acero y conectar el motor a la red, como se representa en la Figura 9.23.

Si las conexiones están bien hechas, la bola rodará por el interior del estator; si una o varias conexiones están mal, la bola permanecerá inmóvil.

### ■ E. Averías por falta de una fase

En los motores trifásicos, la falta de una fase supone una sobrecarga en las otras dos fases, aunque el motor siga funcionando en el momento de la interrupción de una fase; esto puede producir un grave problema, e incluso llegar a quemarse el motor.

Para ello, se procederá a la localización de la avería en el motor, aplicando la detección de la interrupción pertinente si corresponde al motor, o bien localizando la falta de fase si ello fuera en la red eléctrica.

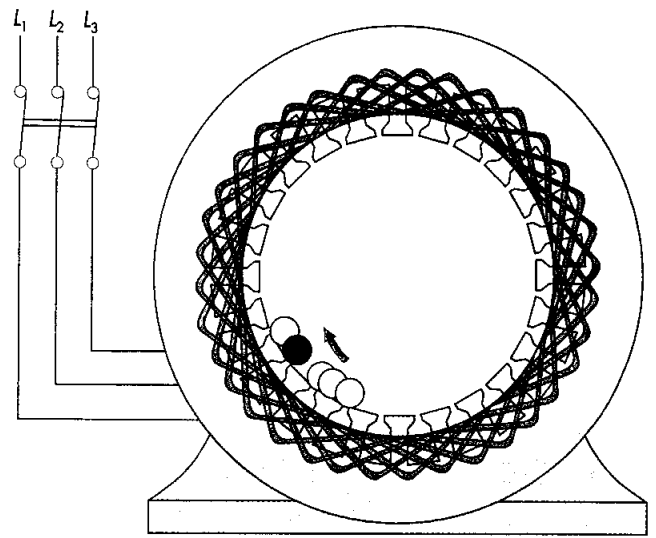


Fig. 9.23. Comprobación de las conexiones del bobinado.

Si la falta de fase corresponde al bobinado del motor, se actuaría, como se expuso anteriormente, desconectando los principios y finales de cada fase y localizando la fase interrumpida.

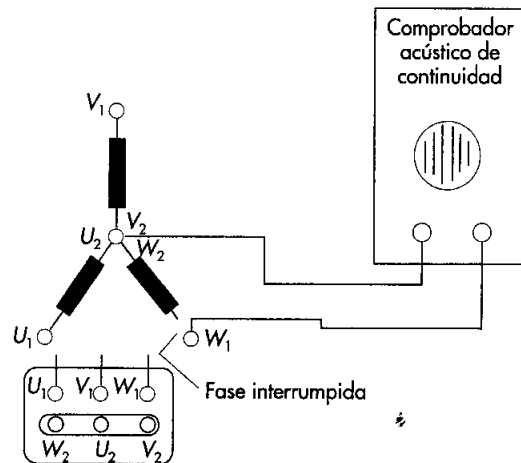


Fig. 9.24. Localización de falta de fase.

### ■ F. Averías de los rotores en cortocircuito y bobinados

Los rotores en cortocircuito, llamados «rotores de jaula de ardilla», disponen de unas barras llamadas «barras rotóricas» que, unidas a dos aros de cobre, forman un cilindro que las pone en cortocircuito.

Cuando estas barras producen ruidos en el funcionamiento, reducen la potencia considerablemente y producen chispas en las barras y aros frontales de la jaula de ardilla.

Las barras rotóticas flojas se pueden detectar mediante una inspección visual o haciendo girar el rotor por la bobina de prueba.

La banda metálica vibrará; de no ser así, la barra no estaría en contacto con los aros. Para solucionarlo, bastaría con soldar las barras a los aros.

En los rotores de aluminio esto no es posible, debido a que la construcción se hace con aros y barras en la misma pieza.

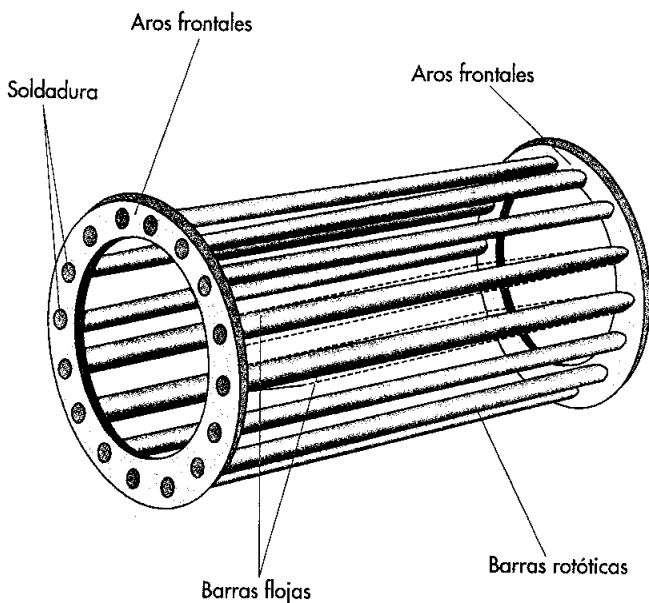
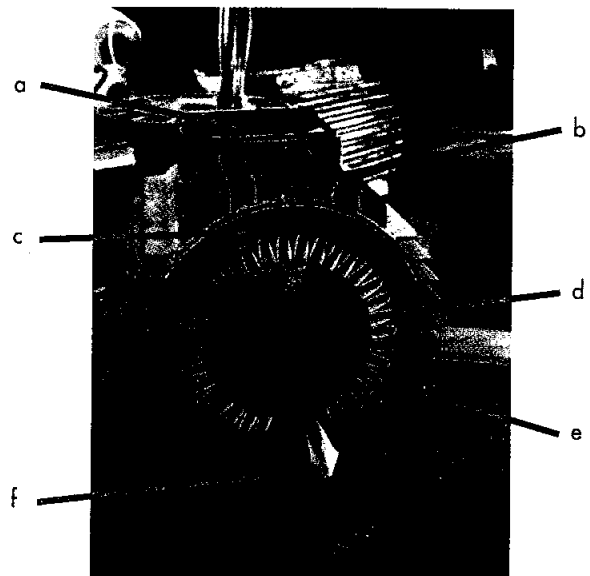


Fig. 9.25. Rotor de jaula de ardilla.

## A. Análisis de las características constructivas del estator y tipo de bobinado

El **estator** es la parte fija del motor, como se puede comprobar en la Figura 9.26. Los estatores de corriente alterna están constituidos por:

- El núcleo magnético del estator.
- El soporte del núcleo magnético del estator (carcasa).
- Las ranuras para la colocación del bobinado estatórico.
- El bobinado del estator.
- La caja de bornes.
- Los canales de ventilación.



- |                            |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| a) Caja de placa de bornes | d) Ranura aislada              |
| b) Canales de ventilación  | e) Soporte de núcleo (carcasa) |
| c) Núcleo magnético        | f) Papel aislante de ranura    |

Fig. 9.26. Estator de un motor asíncrono.

Los motores trifásicos, ya sean construidos de modo concéntrico, imbricado, ondulado o de una o dos capas, tienen el mismo tipo de estator.

En los motores monofásicos, el tamaño de las ranuras depende de los bobinados, y en particular de los bobinados del tipo separado, cuyas ranuras del bobinado de trabajo son mayores que las del bobinado de arranque.

Algunos fabricantes construyen el estator de forma homogénea respetando el tamaño de las ranuras para ambos bobinados. En la Figura 9.27, se pueden apreciar diferentes tipos de estatores para motores de corriente alterna.

## 9.5 Reposición total del bobinado estatórico

El rebobinado de un motor de corriente alterna, de pequeña o mediana potencia, puede estar motivado porque se haya quemado o porque haya que adaptarlo a otra velocidad o tensión de alimentación.

Antes de desmontar el motor conviene marcar las tapas del estator como primera medida, de manera que cuando se monte coincida cada tapa en su lado para evitar confusiones y montajes defectuosos. En la Figura 9.12, se puede observar la operación de señalización de referencia.

A continuación se desmontan las tapas y el rotor, con lo que el motor queda preparado para la reparación del bobinado estatórico.



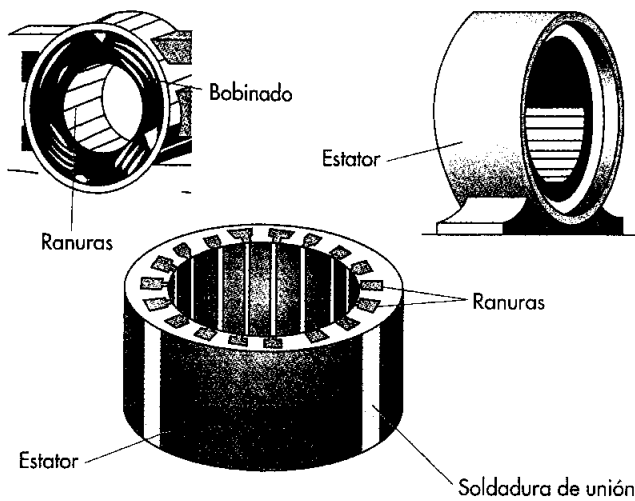


Fig. 9.27. Diferentes tipos de estatores para motores de corriente alterna.

### B. Secuenciación de las operaciones para la reposición del bobinado

El **rebobinado** de un motor de corriente alterna, tanto trifásico como monofásico, consta de varias operaciones. A continuación citamos las más importantes:

- Toma de datos.
- Desmontaje del bobinado averiado.
- Limpieza del estator y las ranuras.
- Aislamiento de las ranuras.
- Construcción de las bobinas.
- Colocación de las bobinas en las ranuras.
- Conexión del nuevo bobinado.
- Verificación de las conexiones.
- Secado y barnizado.

### C. Recogida de datos en el documento apropiado

Esta operación es de las más importantes, pues consiste en anotar el mayor número de datos del bobinado inservible para facilitar que el rebobinado se pueda efectuar exactamente igual y con la menor dificultad posible.

Antes de desmontar el bobinado averiado, es conveniente tomar los datos que nos puedan servir para el rebobinado. Los datos que se pueden tomar a simple vista antes del desmontaje son: el número de fases del motor ( $q$ ), la conexión que tiene en la placa de bornes en la recepción, el número

de bobinas por grupos ( $U$ ), la amplitud de grupo ( $m$ ), si es concéntrico, o el ancho de ranura ( $Y_k$ ), si es excéntrico, y los grupos totales ( $G_t$ ).

Los datos que se deben tomar durante el desmontaje son: el número de ranuras ( $K$ ), el diámetro del hilo o de los hilos del bobinado (ver Unidad 1, medida con micrómetro) —puesto que en los bobinados monofásicos de fase partida suelen tener dos diámetros diferentes—, y el número de espiras de las bobinas ( $N$ ).

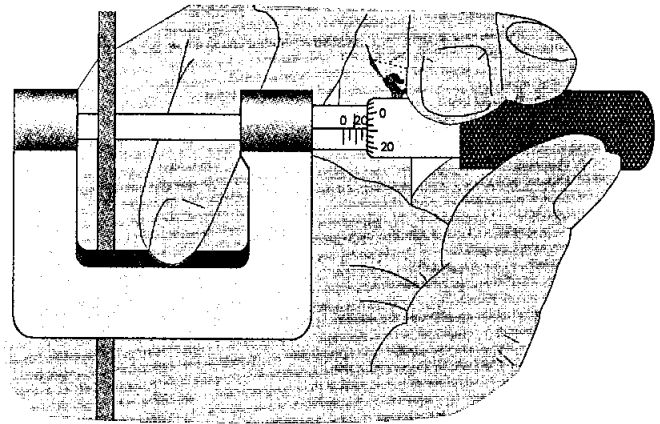


Fig. 9.28. Medición del diámetro de hilo con tornillo micrométrico.

Antes o después del desmontaje, se pueden tomar todos los datos de la placa de características, donde podemos conseguir, entre otros, las revoluciones del motor, información importante para determinar el número de polos del mismo.

Es conveniente recoger los datos en una ficha de donde podamos recabar la información para otras ocasiones o para motores iguales. La Tabla 9.3 es un ejemplo de tipo de ficha de datos.

### D. Operaciones de desbobinado, limpieza y aislamiento de las ranuras

Quando es sólo una parte del bobinado la que hay que cambiar y se encuentra en la parte exterior, como ocurre en algunos bobinados concéntricos o en los bobinados de arranque de los bobinados monofásicos, se emplea una hoja de sierra para cortar el aislante de las ranuras donde se encuentran las bobinas a desmontar, como se puede apreciar en la Figura 9.29.

Quando hay que sustituir todo el bobinado, la operación anterior es bastante complicada y lenta, ya que el endure-

Fabricante	Modelo	Número
Tipo de bobinado	Tensión	Intensidad
Potencia	Conexión en placa de botones	Frecuencia
N.º de ranuras	N.º de espiras	rpm
Diámetro del hilo	Bobinas por ranura	Bobinas por grupo
Grupos totales	Grupos por fase	Conexión de grupos
$\cos \varphi$	Aislante clase	Grado de dificultad
Observaciones		

Tabla 9.3. Ficha de datos de motores.

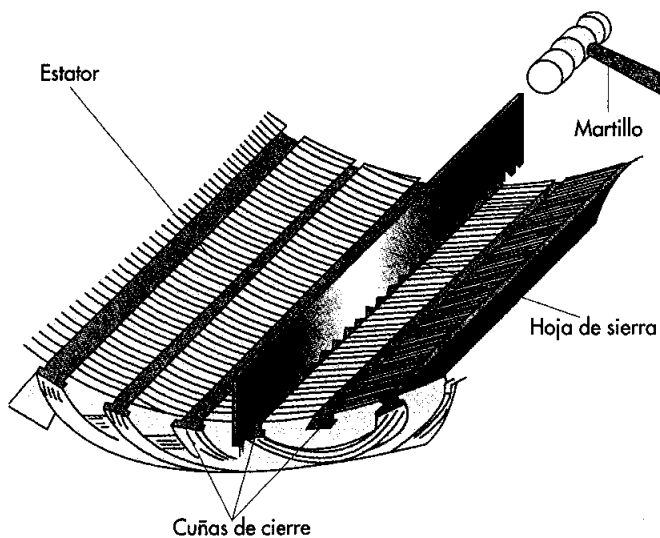


Fig. 9.29. Método para el desmontaje parcial de un bobinado.

cimiento del bobinado producido por el barniz hace que el método anterior no sea efectivo.

Para ello, emplearemos otros métodos, que se aplicarán en función de la dificultad del bobinado. Cuando el bobinado está bastante compacto por el efecto del barniz, el estator se introduce en una estufa de secado para reblandecer el barniz y acometer con más facilidad el corte y desmontaje del bobinado defectuoso.

A continuación se cortan las cabezas de bobinas a ras del estator por un lado, para tirar por el otro lado con el obje-

tivo de sacar la bobina de la ranura, como se aprecia en la Figura 9.30.

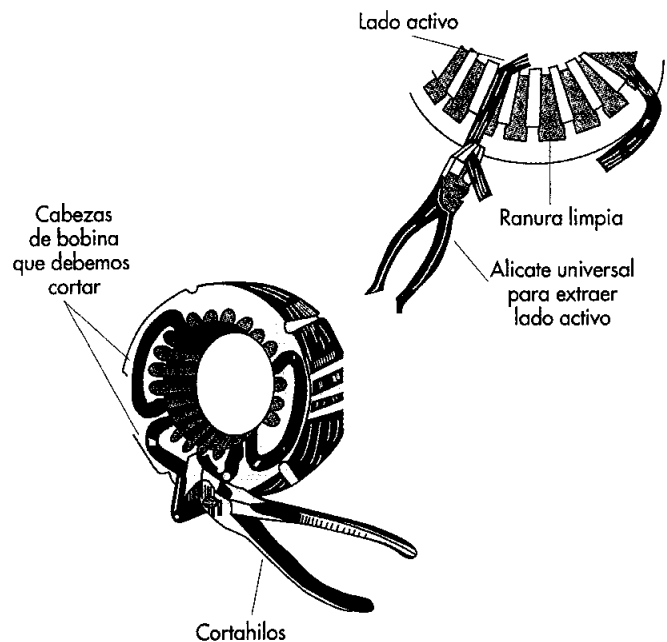


Fig. 9.30. Método de extracción de bobinas insertables.

Otro método para el desmontaje de las cabezas de bobinas, en particular para grandes bobinados, es cortar un lado de la cabeza de bobina con una herramienta automática, como es el **escoplo eléctrico** o neumático, que facilita considerablemente el desmontaje de las bobinas de gran tamaño (véase Figura 9.31).

Como se indicó en el Apartado 9.2, las herramientas y útiles para el mantenimiento de máquinas eléctricas son muy específicos y en muchos casos son fabricadas en el propio taller de mantenimiento. Para la limpieza de las ranuras, se utilizan unas **baquetas** con cerdas de acero que se introducen en la ranura para extraer cualquier resto de aislante o hilo esmaltado que se hubiera quedado adherido en el interior de la ranura. En la Figura 9.32, se puede observar baquetas y espadines de acero.

## E. Aislamiento en las ranuras

El aislamiento original se cambiará por otro de iguales características, con el mismo espesor y la misma calidad, con lo que se evitará la variación en el espacio de la ranura. Este aspecto es muy importante, ya que una reducción de espacio en la ranura impediría que la nueva bobina se pudiera introducir.



Fig. 9.31. Corte de bobinas mediante escoplo eléctrico.

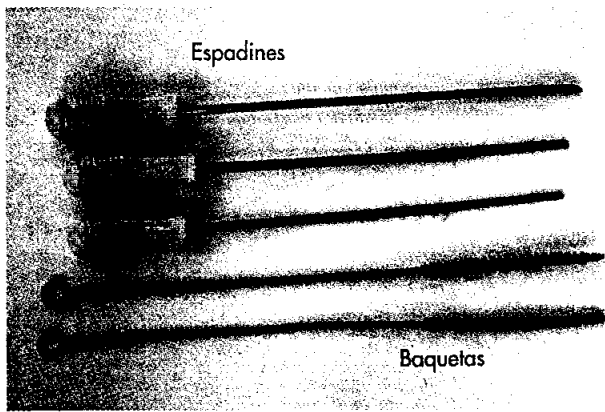


Fig. 9.32. Espadines de acero y baquetas con cerdas de acero.

El aislante que rodea la ranura se llama caja. Es habitual confeccionarla con un doble en los finales para que no se desplace el aislante cuando se está rebobinando o por movimientos producidos por vibraciones.

Para la confección de las cajas de las ranuras, que sustituyen a las deterioradas, o bien se coge una de las deterioradas para coger las medidas, o bien se toma la medida de la ranura para confeccionarla, como se puede ver en la Figura 9.33.

La caja de la ranura puede ser de varios tipos; en la Figura 9.34 se pueden ver algunos de ellos.

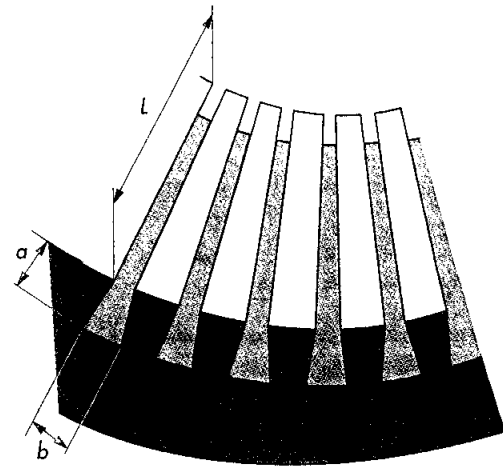


Fig. 9.33. Medición de la ranura para confeccionar la caja aislante.

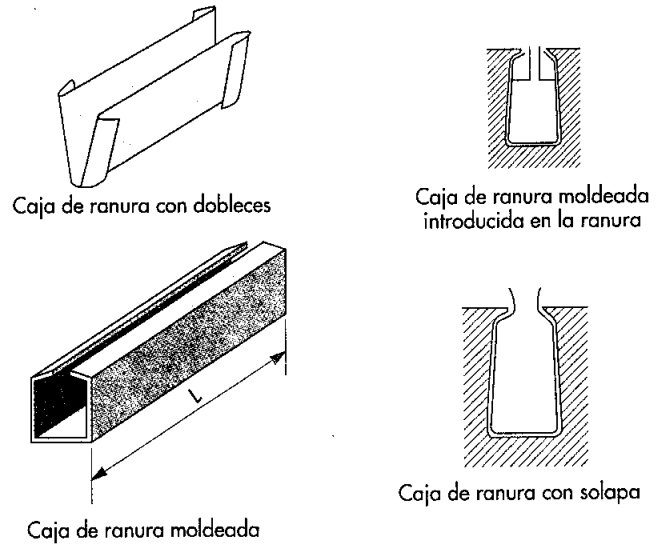
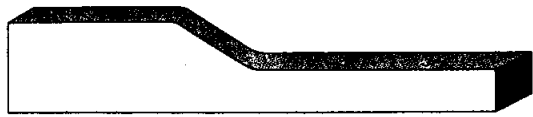


Fig. 9.34. Diversas cajas de ranuras de estatores.

Para el moldeo de las cajas aislantes de las ranuras, en muchos talleres de mantenimiento de máquinas se construyen moldes u hormas de ranuras de casi todas las medidas, para facilitar el moldeo del aislante de la caja de la ranura. En la Figura 9.35, se puede ver un tipo de horma de caja de ranura en el mismo proceso de moldeo.

## F. Construcción de las bobinas

Las bobinas de los motores se construyen de formas diversas en función del tamaño de las mismas. Independientemente del tamaño que puedan tener, en la actualidad todas las bobinas de motores polifásicos se construyen mediante



Horma de caja de ranura

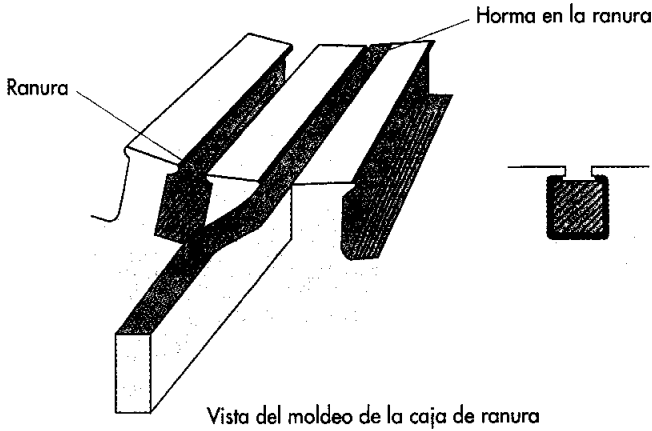


Fig. 9.35. *Horma de caja de ranura de estator.*

moldes fabricados exclusivamente para el rebobinado de motores.

Antes de construir las bobinas, se diseñará el molde de una de ellas sobre el mismo estator para obtener la medida que se ha de transportar al juego de moldes. Si el bobinado es concéntrico, es conveniente medir la bobina interior del grupo (bobina pequeña). El **molde telescópico** (Figura 9.2) será el que proporcione las medidas al resto de las bobinas del grupo. En la Figura 9.36, se puede ver el procedimiento para realizar la medición del molde.

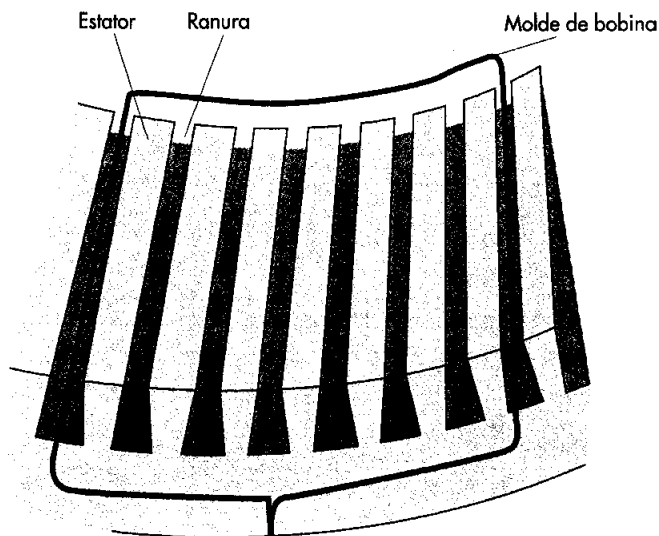


Fig. 9.36. *Toma de medida del molde de bobina.*

En la Figura 9.2, se muestran diversos tipos de moldes para bobinados; así mismo, en la Figura 9.37 se aprecia una bobinadora manual y, en su eje, un molde de bobinas escalonadas para bobinados concéntricos.

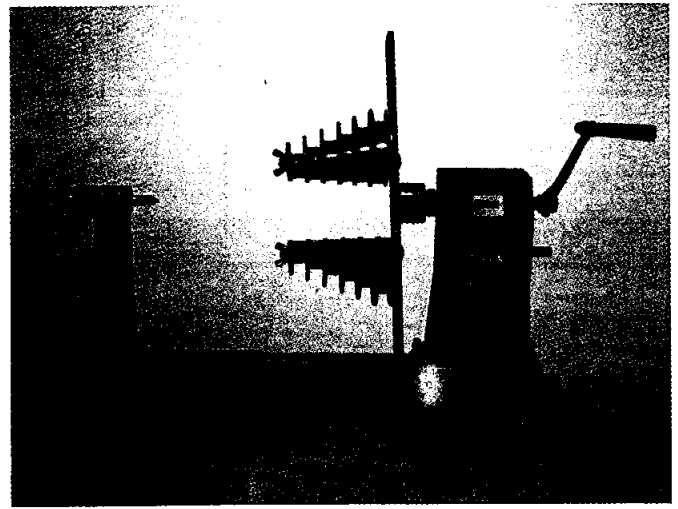


Fig. 9.37. *Bobinadora manual con molde de bobinas concéntricas.*

En los bobinados de motores pequeños y medianos, las espiras se introducen en la ranura en pequeños grupos porque éstas son **semicerradas**. En cambio, en motores de gran potencia, las ranuras del estator son **abiertas**. En la Figura 9.38, se aprecian ambos tipos de ranuras.

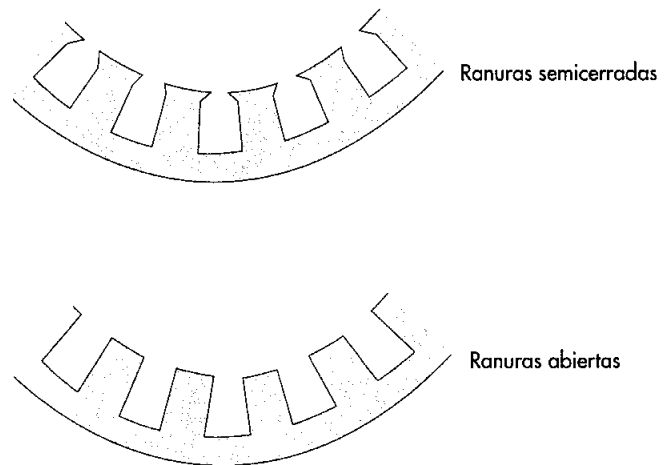


Fig. 9.38. *Ranuras de estator.*

En los moldes de bobinadora, las bobinas se pueden confeccionar una a una o por grupos. En los motores de pequeña y mediana potencia, las bobinas se confeccionan por grupos, como se puede ver en la Figura 9.39.

Antes de retirar las bobinas del molde es conveniente ajustar, con anillos de sujeción, las cabezas de las bobinas para que no se deshilen y se deterioren con la manipulación.

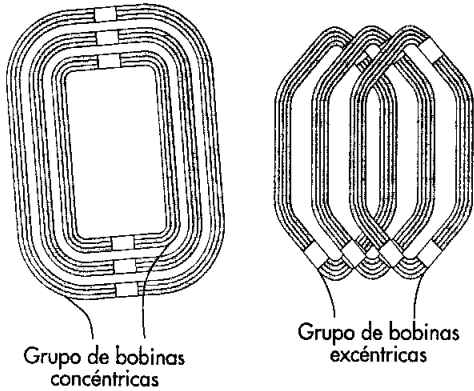


Fig. 9.39. Bobinas construidas por grupos.

### G. Colocación de las bobinas en las ranuras

En ranuras semicerradas, las bobinas se deberán de introducir espira a espira para evitar que el hilo se raye y pueda producirse derivación o cortocircuito en la bobina. Para ello, se deben abrir un poco los lados activos de las bobinas a la hora de introducirlas. Es muy importante que no quede ninguna espira fuera de la ranura ni tocando el estator, ya que podría provocar un corte en la bobina o una derivación a masa.

En la Figura 9.40, se puede ver cómo se separan los hilos del lado activo para introducirlos en la ranura.

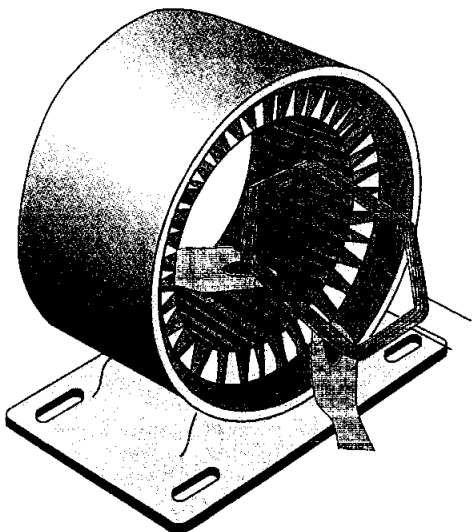


Fig. 9.40. Colocación de un lado activo de bobina en la ranura.

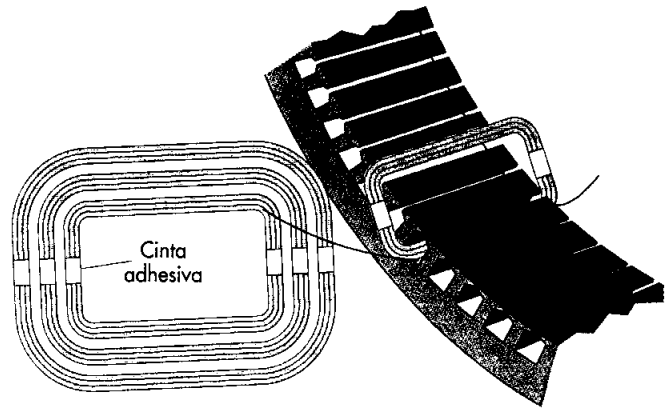


Fig. 9.41. Colocación de grupo concéntrico en ranuras.

Para evitar que las espiras salgan de las ranuras, por la fuerza centrífuga del giro del rotor o vibraciones, se coloca una cuña de poliéster en la boca de la ranura, para que el lado activo de la bobina quede aislado, y una cuña de madera en el cierre de la ranura, para inmovilizar las bobinas. En la Figura 9.42, se pueden apreciar los distintos tipos de cuñas de cierre y cómo queda cerrada la ranura.

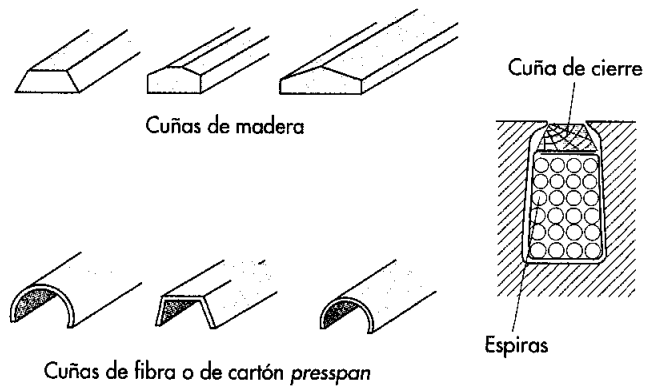


Fig. 9.42. Diversos tipos de cuñas de cierre.

En la Figura 9.43, se puede comprobar cómo quedan montados los grupos de bobinas concéntricas en el estator.

Para montar los bobinados de dos capas, se comenzará introduciendo en la ranura el primer grupo de la primera fase; a continuación, se introducirá el primer grupo de la segunda fase y, tras éste, el primer grupo de la tercera fase. Una vez terminados los primeros grupos de cada fase, continuaremos con los segundos grupos, y así hasta introducir todos los grupos.

Manteniendo el orden establecido al introducir los grupos, se cerrará el bobinado de forma que coincidan dos bobi-

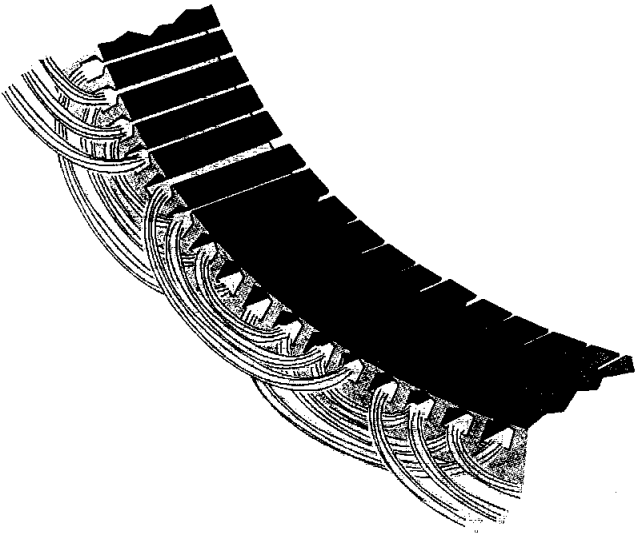


Fig. 9.43. Distribución de un bobinado concéntrico en el estator.

nas en cada ranura. Como podemos comprobar en la Figura 9.44, los grupos de tres bobinas se van colocando sucesivamente por el orden descrito.

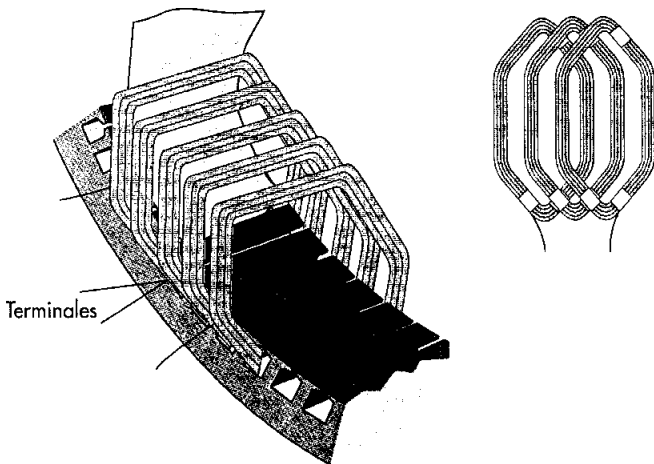


Fig. 9.44. Distribución de un bobinado imbricado de dos capas.

En los bobinados de dos capas, en cada ranura entrarán dos lados activos independientes y generalmente de distinta fase, por lo que entre bobinas dentro de la misma ranura se colocará un separador aislante, como se indica en la Figura 9.45.

## W. Conexiones entre bobinas

Los empalmes que se efectúan para conectar las bobinas entre sí y los grupos de bobinas se realizan retorciendo los

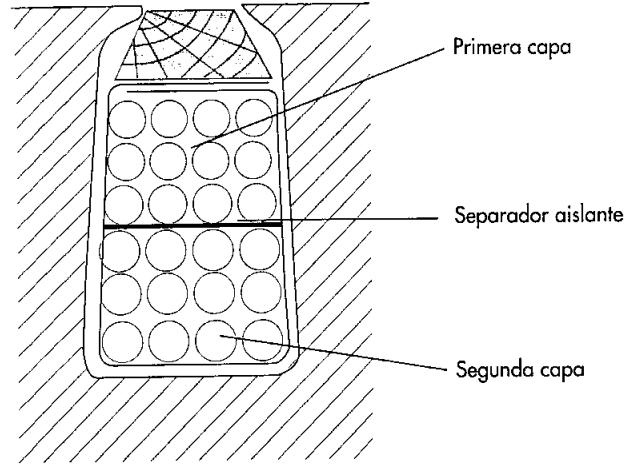


Fig. 9.45. Ranura con dos lados activos.

extremos y aplicándoles calor hasta que se queden soldados; el barniz aislante se desintegrará con el calor, y la unión se realizará correctamente.

Antes de la conexión, se le introduce por el hilo un **manguito** aislante que la recubre por completo. En la Figura 9.46, se puede apreciar el empalme aislado por el manguito.

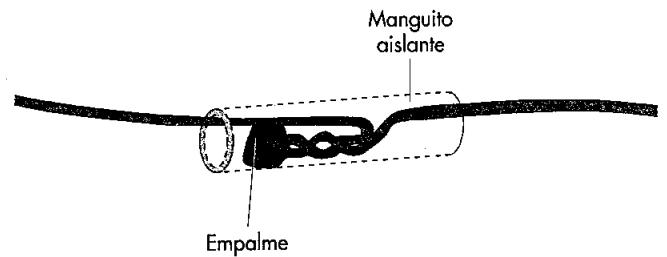


Fig. 9.46. Empalmes entre bobinas y grupos de bobinas.

Este mismo sistema de conexión se puede realizar mediante soldador de estaño.

Una vez conectadas las bobinas y los grupos de bobinas, se conectarán los terminales de cada bobinado a la placa de bornes mediante terminales de presión o soldadura.

## XI. Amoldado, amarrado y barnizado

Cuando todos los grupos de bobinas están montados y conectados, se amolda el bobinado hasta lograr dejar completamente libre la circunferencia por donde deberá entrar el rotor, además de dejar espacio suficiente para colocar las tapas sin que toquen el bobinado.

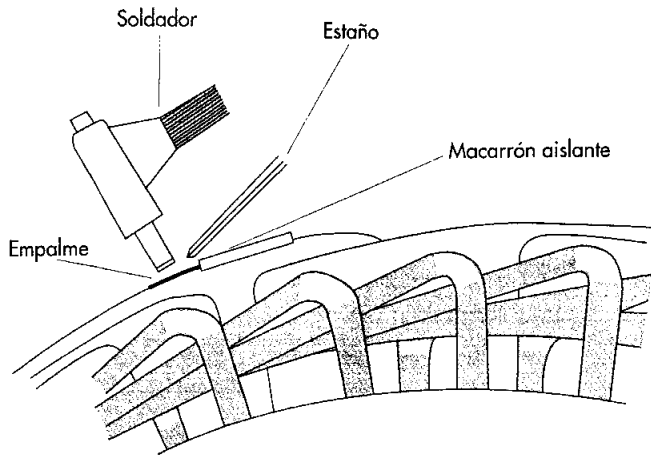


Fig. 9.47. Conexión entre bobinas y entre grupos mediante un soldador.

Una vez moldeado el bobinado, se le coloca un aislante de papel *presspan* o de fibra de vidrio entre grupos, para conseguir que el contacto entre ellos sea mínimo. Para ello preparamos un aislante por grupo, con el fin de colocarlos sin que sobresalgan mucho de las cabezas, como se puede apreciar en la Figura 9.48.



Fig. 9.48. Motor con aislamiento entre grupos de bobinas (cortesía de Electro-Utrera).

Una vez aislado y moldeado, se procede al **amarrado** del bobinado, con el objetivo de sujetarlo para superar vibraciones, al mismo tiempo que sirve para que el barnizado compacte aún más el bobinado. En la Figura 9.49, se puede observar el amarrado del bobinado a lo largo de la circunferencia del motor.

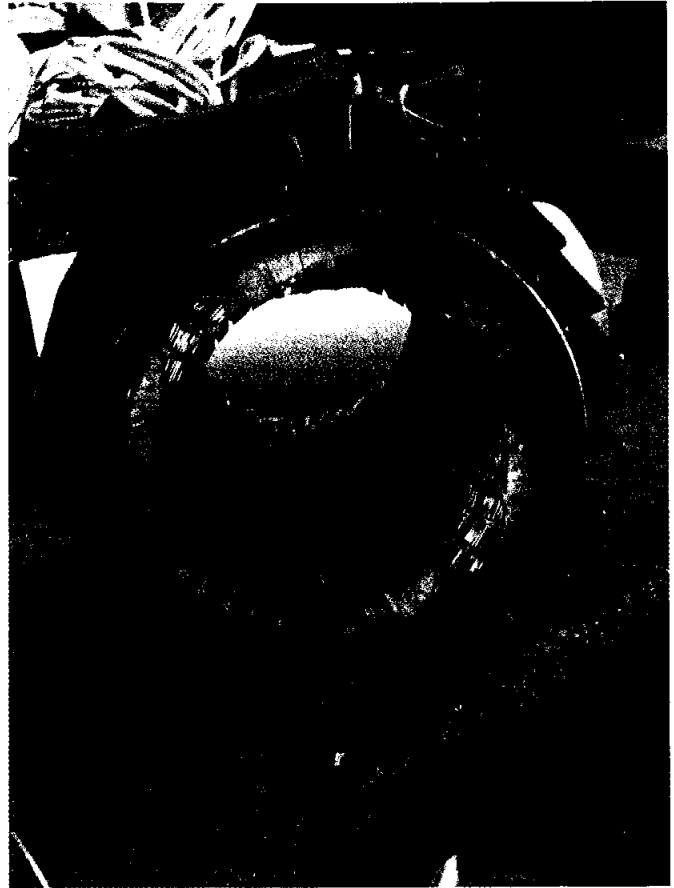


Fig. 9.49. Amarrado del bobinado (cortesía de Electro-Utrera).

Realizadas las operaciones anteriores, es conveniente verificar eléctricamente la continuidad de las fases, los posibles contactos a masa y los cortocircuitos en bobinas (Figura 9.50).

El **barnizado** es la última operación antes de montar y comprobar el motor; para ello, se prepara un recipiente donde pueda gotear el barniz que se le aplique pulverizado con pistola, a brocha o por inmersión. Pero antes es conveniente extraer del motor y del bobinado la humedad que pudiera tener, aplicándole calor con estufas o mediante un horno especial para bobinados.

El barniz debe ser suficientemente fluido para que pueda penetrar en todos los huecos del bobinado, y suficientemente espeso para conseguir una capa consistente después del secado.

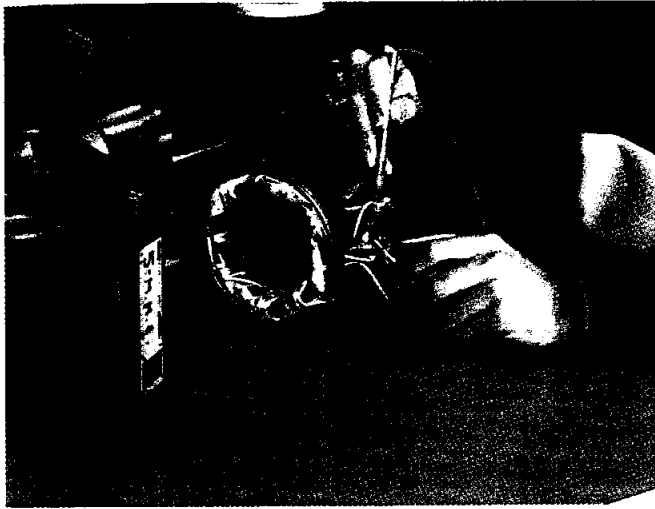


Fig. 9.50. Verificación de continuidad y aislamiento de las bobinas.

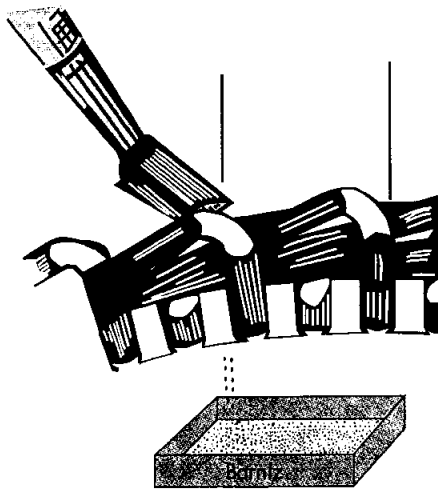


Fig. 9.51. Barnizado del bobinado mediante brocha.

Terminado el proceso de barnizado y secado, el motor estará dispuesto para su montaje, como se puede ver en la Figura 9.49. Las pruebas, ensayos y conexiones del motor se estudiarán en la siguiente unidad.

## 9.6 Cambio de tensión de un motor de corriente alterna

En ocasiones necesitaremos cambiar algunas características del motor, como puede ser el número de espiras ( $N$ ), la tensión de funcionamiento y la velocidad, e incluso preparar el motor para que funcione a una frecuencia industrial

distinta a la europea (50 Hz) sin modificar la tensión de funcionamiento.

### 1 A. Cambio de tensión en un motor trifásico de CA

Atendiendo a la igualdad:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{S_{cu2}}{S_{cu1}}$$

Denominamos  $U_2$  a la tensión que queremos cambiar;  $U_1$ , a la tensión antigua;  $N_1$ , al número de espiras antiguo, y  $N_2$ , al número de espiras nuevo.

Para realizar un cambio de tensión en un bobinado, es lógico que en el nuevo bobinado cambie el número de espiras, según la igualdad expresada anteriormente.

Escogiendo de la igualdad los términos que aplicaremos para el cambio de tensión:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Conocida la tensión  $U_1$  y el número de espiras  $N_1$  del bobinado antiguo, y determinada la nueva tensión, el único dato que nos queda por conocer es el número de espiras del nuevo bobinado  $N_2$ .

Aplicando la igualdad, despejamos  $N_2$ ; resultará:

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot U_2}{U_1}$$

El comportamiento eléctrico del motor de inducción al pasar de un estado 1 a otro estado 2 se puede aproximar al comportamiento de un transformador con su primario (estado 1) y su secundario (estado 2).

Se verifica que:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

Por tanto:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{cu2}}{S_{cu1}}$$



## Caso práctico 1

Tenemos un motor trifásico que trabajaba a 127/220 V; queremos ponerlo en marcha para que trabaje a la tensión de 230/400 V. El diámetro  $d_1$  del hilo antiguo es de 0,7 mm. Al desmontar el bobinado, se han contado 52 espiras por bobina.

Para rebobinar el motor para la nueva tensión, se tendrá que determinar, en primer lugar, el número de espiras.

Siendo:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Despejando  $N_2$ , obtenemos:

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot U_2}{U_1} = \frac{52 \cdot 400}{220} = 94,5 \text{ esp}$$

Para el cálculo del diámetro, deberemos determinar antes la sección que le corresponde al mismo diámetro, por lo que será:

$$S_{cu1} = \frac{\pi d^2}{4} = 0,785 \cdot (d_1)^2 = 0,785 \cdot 0,7^2 = 0,384 \text{ mm}^2$$

Conocida la sección de bobinado antiguo, la sección del bobinado nuevo se determinará aplicando la igualdad:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{S_{cu2}}{S_{cu1}}$$

Despejando  $S_{cu2}$ :

$$S_{cu2} = \frac{U_1 \cdot S_{cu1}}{U_2} = \frac{220 \cdot 0,384}{400} = 0,21 \text{ mm}^2$$

Luego, el nuevo diámetro será:

$$d_2 = \sqrt{\frac{S_{cu2}}{0,785}} = \sqrt{\frac{0,21}{0,785}} = 0,51 \text{ mm}$$

El cambio de frecuencia en un motor altera sus características de funcionamiento y puede llegar a variar la velocidad de giro.

Siendo:

$$n = \frac{f \cdot 60}{P}$$

Donde:

$P$  = número de polos

$n$  = velocidad en rpm

$f$  = frecuencia

Modificando la frecuencia, se modificará en proporción directa la velocidad de giro.

Si de la fórmula  $E = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N$  queremos determinar el número de espiras ( $N_2$ ) para una frecuencia distinta ( $f_2$ ) será:

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot N_2$$

Si se quiere conectar el mismo motor a una frecuencia distinta, en la misma tensión, con el mismo flujo y no queremos que cambie la velocidad, el número de espiras se deberá modificar, y resultará de la fórmula anterior:

$$f \cdot N = f_2 \cdot N_2$$

Por tanto:

$$\frac{f}{f_2} = \frac{N_2}{N}$$

$$N_2 = \frac{f \cdot N}{f_2}$$

## Caso práctico 2

Tenemos un motor que trabaja a una frecuencia ( $f$ ) de 60 Hz; lo queremos conectar a una frecuencia ( $f_2$ ) de 50 Hz a la misma tensión. La velocidad del motor deberá ser la misma, y cada bobina del motor tendrá 500 espiras ( $N$ ). Se deberá determinar el número de espiras ( $N_2$ ) del bobinado con la nueva frecuencia.

Siendo:

$$\frac{N_2}{N} = \frac{f}{f_2}$$

Despejando:

$$N_2 = \frac{N \cdot f}{f_2} = \frac{500 \cdot 60}{50} = 600 \text{ espiras}$$

## B. Cambio de frecuencia a tensión constante

Como se indicó antes, no todos los países comparten la misma frecuencia industrial. En países americanos, la frecuencia es de 60 Hz, algo mayor que la frecuencia europea (50 Hz).

## 9.7 Normas de seguridad en operaciones de mantenimiento

Las normas que se han de seguir en el mantenimiento de máquinas eléctricas deberán ser siempre el buen uso de las herramientas y la ausencia de tensión en las máquinas que se van a reparar.

No se debe realizar el desmontaje de una máquina con herramientas deterioradas o inadecuadas. En cada proceso de reparación de averías deben utilizarse las herramientas y útiles adecuados.

El puesto de trabajo deberá tener toma de corriente cerca para evitar largos y enredados cables por el suelo que puedan producir accidentes.

Las herramientas y útiles deben estar situados en el sitio correspondiente para efectuar con rapidez cualquier tipo de reparación.

Una buena organización facilita las operaciones de mantenimiento.

En el Capítulo VI de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, se enumeran los aspectos relacionados con el sector eléctrico. Destacan los de la Tabla 9.4.

	Protección contra contactos en las instalaciones y equipos eléctricos.
	Inaccesibilidad a las instalaciones eléctricas.
	Baterías de acumuladores.
	Soldadura eléctrica.
	Locales con riesgos eléctricos especiales.
	Máquinas de elevación y transporte.
	Electricidad estática.
	Motores eléctricos.
	Conductores eléctricos.
	Interruptores cortocircuitos de baja tensión.
	Equipos y herramientas portátiles.

Tabla 9.4. Normativa sobre seguridad e higiene en el sector eléctrico relacionado con el mantenimiento de máquinas eléctricas.

Además de esto, tenemos las normas de seguridad y protección incluidas en el R.E.B.T., y también los temas tratados en el módulo de este ciclo (Seguridad en las Instalaciones Eléctricas), estudiadas en el primer curso.

### Conceptos básicos

**Derivación a masa:** se da cuando un conductor activo del bobinado está en contacto directo con la carcasa o con cualquier otra parte metálica del motor.

**Estetoscopio:** es un instrumento empleado en el mantenimiento de máquinas con el que se detectan vibraciones y ruidos.

**Extractor de poleas:** útil con el que podemos extraer, eficazmente, tanto poleas como cojinetes o tapas de carcasa.

**Molde para ranuras:** es un útil que se emplea para dar al aislante de la ranura la forma de ésta. Cuando tenemos confeccionado el aislante que rodea la ranura, se amolda para que ocupe todo el volumen de la ranura y el hilo entre con más facilidad.

**Procesos de mantenimiento:** son aquellas actuaciones básicas que integran el plan de mantenimiento de una máquina.

**Pruebas de recepción:** procedimiento que se realiza en el momento de recepción de la máquina, para facilitar la organización y preparación del trabajo del equipo de mantenimiento. Este proceso se basa en cuatro tipos de comprobación:

- Verificación de contactos a masa en el bobinado.
- Verificación de interrupciones en cada una de las fases de los bobinados.
- Verificación de cortocircuitos en cada una de las fases del bobinado.
- Verificación manual del giro del eje.

**Rebobinado:** procedimiento por el que se repone totalmente el bobinado de un motor, bien porque se haya quemado o bien porque necesitemos adaptarlo a otra velocidad o tensión de alimentación.

## Autoevaluación

1. Describe la constitución de un motor trifásico y enumera y dibuja esquemáticamente las partes que lo componen.
2. Indica las operaciones que comprende el rebobinado de un motor trifásico.
3. Describe cómo se aíslan las ranuras estatóricas de un motor trifásico. ¿Qué objeto tienen los dobleces de la caja aislante de la ranura?
4. ¿Cuáles son los dos tipos principales de los bobinados trifásicos?
5. Enumera al menos siete de los datos que figuran en una placa de bornes de un motor trifásico.
6. Explica cómo se determina el nuevo hilo que se va a emplear y el número de espiras del nuevo bobinado.
7. Explica cómo se localiza una derivación a masa en un bobinado trifásico.
8. Explica cómo se localiza una bobina en cortocircuito en un bobinado trifásico.
9. Explica cómo se localiza una interrupción en una fase del bobinado.
10. ¿Qué modificaciones hay que efectuar al rebobinar un motor trifásico para una nueva tensión de alimentación?

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

### 11. Planificar sobre un taladro sensitivo de columna las secuencias de las operaciones que requiere el mantenimiento preventivo.

#### • Objetivos:

- Exponer las secuencias del mantenimiento preventivo de un taladro sensitivo de columna.
- Exponer la frecuencia de actuación sobre cada operación de mantenimiento del taladro sensitivo.

#### • Medios didácticos:

- Programas de mantenimiento preventivo de empresas de talleres de bobinados y automatizados eléctricos.
- Partes de trabajo de operarios en empresa de mantenimiento.

#### • Procedimiento:

- 1.º Analiza las averías posibles de un taladro sensitivo de columna.
- 2.º Consulta, en empresas de mantenimiento de máquinas eléctricas, la frecuencia de las diferentes operaciones de mantenimiento del taladro.
- 3.º Ordena y clasifica en función a las frecuencias de mantenimiento.

#### • Contesta:

- a) ¿Qué diferencias encuentras entre un programa de mantenimiento preventivo y un historial de averías?
- b) ¿Con qué líneas de actuación se deberá intervenir en el mantenimiento de una máquina eléctrica?
- c) ¿Cuáles son las actuaciones que deberán realizarse con la máquina parada?
- d) ¿Cuáles son las actuaciones que se pueden realizar con la máquina en funcionamiento?
- e) Confecciona un programa de mantenimiento preventivo cíclico con periodo de un año.

### 12. Analiza al proceso de localización de averías en un motor averiado.

#### • Objetivos:

- Describir las causas producidas por la avería.
- Identificar la avería.
- Identificar el proceso de reparación.

#### • Medios didácticos:

- Equipo de aparatos de medidas y comprobación.
- Herramientas de mano mecánicas.
- Herramientas de mano eléctricas.
- Máquina averiada o avería provocada en una máquina.

#### • Procedimiento:

- 1.º Análisis visual de la máquina.
- 2.º Identificación del motor en la recepción.

3.º Preparación de útiles, herramientas y aparatos de medida y comprobación.

4.º Pruebas de recepción.

5.º Reparación y prueba.

• **Contesta:**

- a) Anota las causas de la avería.
- b) Localiza mediante pruebas la avería.
- c) Actúa en consecuencia con el proceso de reparación.
- d) Enumera los útiles, herramientas y aparatos necesarios para su correcta reparación.

**13. Analiza el proceso de secuenciación, en caso de reposición total del bobinado del estator de los siguientes tipos de motores: motor monofásico con bobinado auxiliar, motor trifásico con bobinado de una capa y motor trifásico con bobinado de dos capas.**

• **Objetivos:**

- Identificar el proceso de recogida de datos del estator.
- Planificar los procesos de desbobinados y bobinados de un motor monofásico con bobinado auxiliar, de un motor trifásico de una capa y de un motor trifásico de dos capas.

• **Medios didácticos:**

- Equipo de aparatos de medidas y comprobación.
- Herramientas de mano mecánicas.
- Herramientas de mano eléctricas.
- Estator de un motor monofásico con bobinado auxiliar.
- Estator de un motor trifásico de una capa.
- Estator de un motor trifásico de dos capas.

• **Procedimiento:**

- 1.º Análisis visual de los estatores.
- 2.º Identificación del bobinado.

3.º Preparación de útiles, herramientas y aparatos de medida y comprobación.

4.º Pruebas de recepción.

5.º Enumeración de las operaciones a realizar.

• **Contesta:**

- a) Anota las causas de la avería de cada motor.
- b) Selecciona el método para el desbobinado.
- c) Relaciona las operaciones para el aislamiento de las ranuras.
- d) Describe los métodos para la construcción y posterior montaje de las bobinas.
- e) Describe las operaciones de aislamiento de terminales y los métodos de conexión de las bobinas y grupos.
- f) Decide la forma de sujeción de las cabezas de bobinas y el tipo de aislamiento entre fases.
- g) Enumera los útiles, herramientas y aparatos necesarios para la preparación de la bobinadora manual.

**14. Identifica las características del bobinado de un motor trifásico quemado por sobrecarga y confecciona su esquema.**

• **Objetivos:**

- Conocer el procedimiento a seguir para la recopilación de datos.
- Interpretar cada uno de los elementos que integran el bobinado para la anotación de los valores de cada elemento.
- Determinar el cálculo y esquema del bobinado a identificar partiendo de los datos obtenidos.

• **Medios didácticos:**

- Polímetro.
- Ficha para toma de datos.
- Calibre.
- Tornillo micrométrico.
- Extractor de poleas.
- Equipo de herramientas para el desmontaje.

• **Procedimiento:**

- 1.º El olor a quemado, es el primer indicio para la detección de un bobinado quemado.
- 2.º Comprobación de la resistencia, continuidad y derivación a masa de cada uno de los bobinados.
- 3.º Anotar la conexión que tiene en la placa de bornes.
- 4.º Desmontaje de las tapas y del rotor.
- 5.º Desatar el bobinado y retirar los aislantes.
- 6.º Anotar el número de ranuras del estator, el número de grupos de bobinas totales, el número de bobinas por ranuras, el número de bobinas por grupo, la amplitud de grupo o el ancho de bobina, el número de hilos en paralelo si los hubiera.
- 7.º Una vez desmontado el bobinado del estator, medir el diámetro del hilo y contar el número de espiras que tiene cada una de las bobinas de un grupo.
- 8.º Con los datos obtenidos y anotados debidamente en la ficha de datos, confeccionar el esquema del bobinado a reponer.

• **Contesta:**

- a) ¿Todas las bobinas del mismo grupo siempre tienen las mismas espiras? ¿Por qué?
- b) ¿Todos los grupos de bobinas tienen las mismas bobinas? ¿Por qué?
- c) ¿Todas las fases tienen los mismos grupos de bobinas y las mismas espiras totales? ¿Por qué?

**15. Localiza la derivación a masa del bobinado de un motor trifásico.**

• **Objetivos:**

- Detectar mediante aparatos adecuados, la derivación a masa del bobinado de un motor.

- Eliminar el contacto a masa.

• **Medios didácticos:**


- Polímetro.
- Óhmetro.
- Comprobador de continuidad acústico.
- Extractor de poleas.
- Equipo de herramientas para el desmontaje.

• **Procedimiento:**

- 1.º Desconexión de los puentes de la placa de bornes.
- 2.º Conectar el comprobador de continuidad o el óhmetro en cada una de los principios de las fases y masa.
- 3.º Conectar el comprobador de continuidad o el óhmetro entre los principios de las fases para comprobar si las fases estuvieran unidas entre sí.
- 4.º Identificar la fase derivada.
- 5.º Localizar la derivación en el grupo y la bobina correspondiente de la fase identificada.
- 6.º Localizar el punto de derivación a masa y corregirlo hasta que la derivación desaparezca.
- 7.º Realizar la medición correspondiente para comprobar la desaparición de la derivación a masa.

• **Contesta:**

- a) ¿Qué efecto puede producir una derivación a masa?
- b) ¿Qué puede ocurrir cuando dos fases están derivadas a masa al mismo tiempo?
- c) ¿Qué aparato te ha sido más eficaz para la detección de la derivación a masa?
- d) ¿Cómo has actuado para corregir la derivación a masa?



Ensayo de máquinas  
de corriente alterna

10

## 10.1 Pruebas de funcionamiento. Historial de un motor de CA

Una vez terminadas las operaciones de bobinado, y cuando las circunstancias lo permitan, se deben realizar, al motor reparado, todas las pruebas y mediciones posibles. En nuestro caso, las mediciones que se realicen reforzarán los conceptos de las medidas eléctricas estudiados en Electrotecnia.

### A. Conexión en placa de bornes

La **placa de bornes** se conectará dependiendo de la tensión de la red y de la tensión de los bobinados de fase. El motor se puede conectar en **estrella** o en **triángulo**. Por ejemplo, la conexión en estrella se realizará en una línea trifásica 3~400 V, si las tensiones del motor son de 230/400 V.

En la Figura 10.1, se observa cómo la intensidad en línea ( $IL$ ) es la misma que la intensidad en fase ( $If$ ).

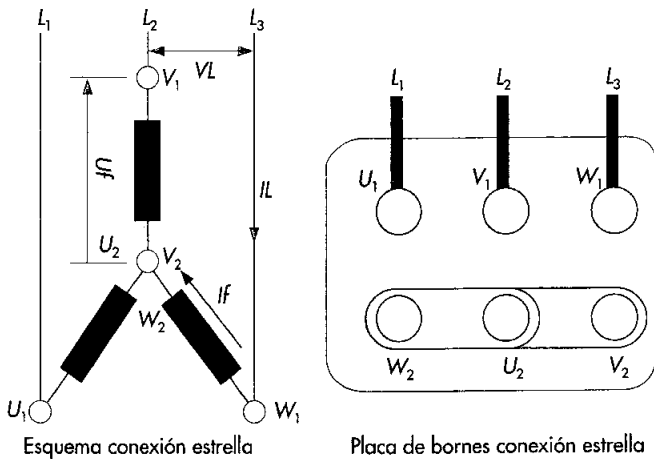


Fig. 10.1. Conexión estrella en un motor trifásico.

La conexión en triángulo se realizará, por ejemplo, en una línea trifásica de 3~230 V. La red trifásica de 230 V está en desuso, por lo que los motores conectados a una red trifásica de 400 V se conectan en estrella. En la Figura 10.2, se observa cómo la tensión en línea ( $UL$ ) es la misma que la tensión en fase ( $Uf$ ).

### B. Medida de tensión en un sistema trifásico

Es conveniente realizar la medida de tensión en un sistema trifásico antes de cualquier medida posterior **para verifi-**

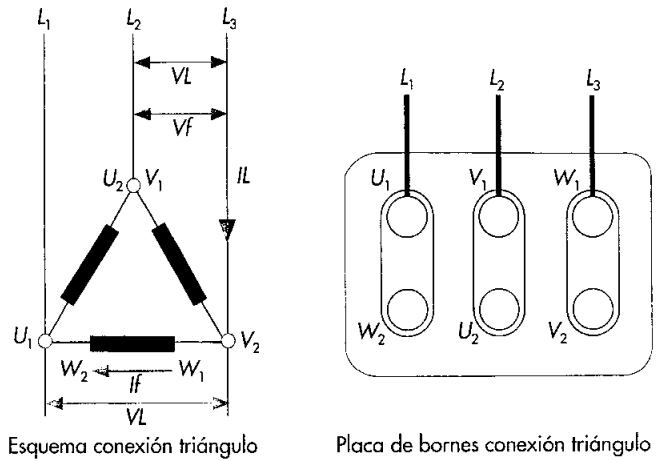


Fig. 10.2. Conexión triángulo en un motor trifásico.

**car que el sistema está equilibrado.** Si esta comprobación no se ha realizado previamente, las demás medidas pueden resultar erróneas.

Los tres voltímetros  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  deben de dar un mismo valor de tensión.

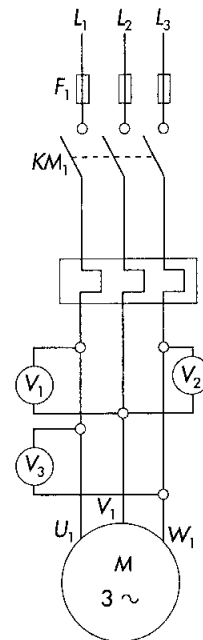


Fig. 10.3. Medición de la tensión de un sistema trifásico.

### C. Medida de intensidades en un motor trifásico de corriente alterna

Para medir la intensidad de un motor trifásico en estado de funcionamiento, se utiliza la **pinza amperimétrica** o electropinza. La pinza amperimétrica permite realizar la

medida de intensidad sin interrupción del circuito para la conexión del amperímetro.

En la Figura 10.4, se observa la medición de intensidad de una fase. Si el sistema está equilibrado, las tres fases deberán medir igual.

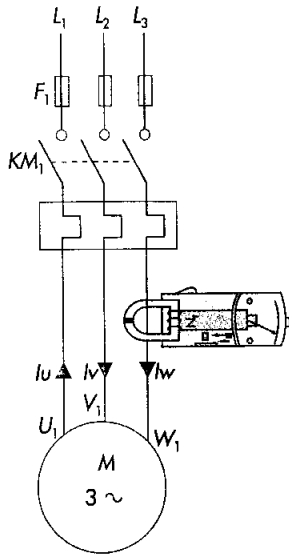


Fig. 10.4. Medición de intensidad de una fase.

Un **motor trifásico de inducción** constituye un sistema de potencia trifásico equilibrado y, por tanto, la suma de sus tres intensidades de línea da, en todo instante, un valor de cero amperios.

En la Figura 10.5, se puede observar la medición de dos fases de un motor en un sistema trifásico, con indicación del sentido de las fases.

En la medida de intensidad de las tres fases del motor en un sistema trifásico, la suma de las intensidades debe ser cero, si el sistema está equilibrado, ya que la suma de las intensidades que entran es igual a la suma de las intensidades que salen:

$$I_u + I_v + I_w = 0$$

En la Figura 10.6, se indica la medición de las tres fases y los sentidos de las intensidades.

#### D. Medida de potencia activa (P) de un motor en un sistema trifásico

La medida de potencia se puede realizar en un sistema equilibrado o en un sistema desequilibrado.

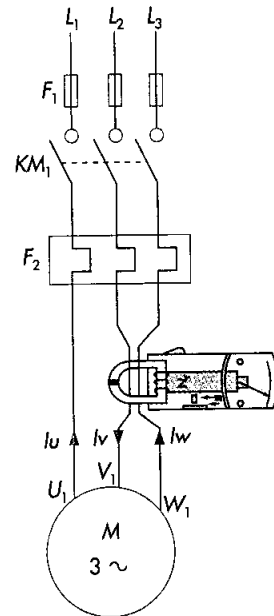


Fig. 10.5. Medición de intensidad de dos fases de un motor en un sistema trifásico.

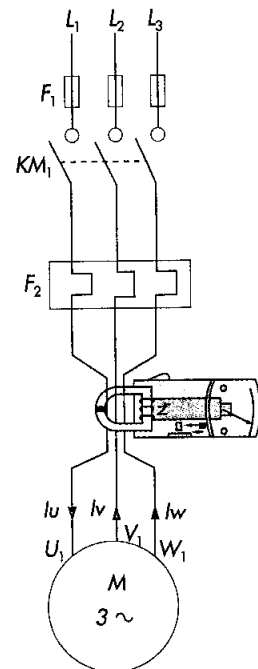


Fig. 10.6. Medición de intensidad en las tres fases de un motor en un sistema trifásico equilibrado.

En ambos sistemas, se pueden dar las circunstancias con neutro o sin neutro.

En un **sistema trifásico equilibrado**, con neutro y sin neutro, las potencias activas (P) de las fases son iguales; por lo tanto, con la medición de una fase tendremos la potencia del circuito:



$$P_1 = P_2 = P_3$$

Tanto para la **conexión estrella** como para la **conexión triángulo**, la potencia de una fase será:

$$P_1 = P_2 = P_3 = U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Por lo tanto, la potencia total será:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Si recordamos que para la conexión estrella la tensión en fase ( $U_f$ ) es:

$$U_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

Por tanto:

$$P = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Para la **potencia activa en triángulo**, se determinará si:

$$P_1 = P_2 = P_3 = U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Y la  $P$  en un sistema trifásico es:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_L \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Si para conexión triángulo es:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

La potencia activa en triángulo será:

$$P = 3 \cdot U_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

En la Figura 10.7, se puede ver la medición de potencia, con un vatímetro, en un sistema trifásico equilibrado a tres hilos. Como se observa, en este montaje obliga a tener accesibles los seis bornes de conexión del motor para instalar

el vatímetro en las conexiones dentro del bobinado de fase. Por este inconveniente, no se utiliza este montaje.

En el montaje de la Figura 10.7, la creación de un neutro artificial permite la medición de la potencia en el bobinado donde se ha conectado el vatímetro; como se trata de un circuito equilibrado, podemos determinar la potencia del motor.

Las resistencias  $R_2$  y  $R_3$  que constituyen el neutro artificial deberán ser del mismo valor que la resistencia interna del vatímetro.

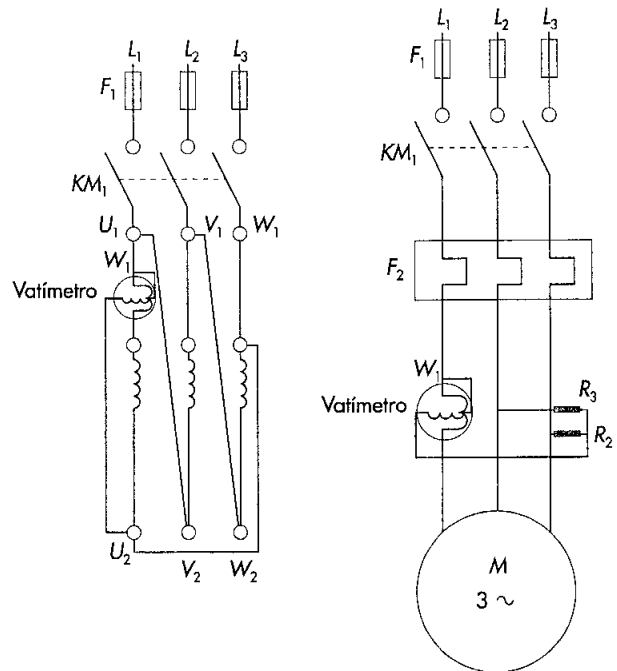


Fig. 10.7. Medida de potencia activa en un sistema equilibrado.

En un **sistema desequilibrado**, tanto en conexión estrella como en conexión triángulo, se puede obtener la potencia activa conectando tres vatímetros monofásicos o un vatímetro trifásico. En la Figura 10.8, se puede ver la medida de potencia en un sistema desequilibrado mediante tres vatímetros monofásicos ( $W_1, W_2, W_3$ ).

En un **sistema trifásico con neutro**, los tres vatímetros conectarán los finales de la bobina voltimétrica en el hilo neutro. En la Figura 10.9, se puede observar la conexión en un sistema desequilibrado con neutro.

### Método Arón

Mediante el sistema de los dos vatímetros, o conexión Arón, se mide la potencia de un sistema trifásico a tres hilos, tanto equilibrado como desequilibrado.

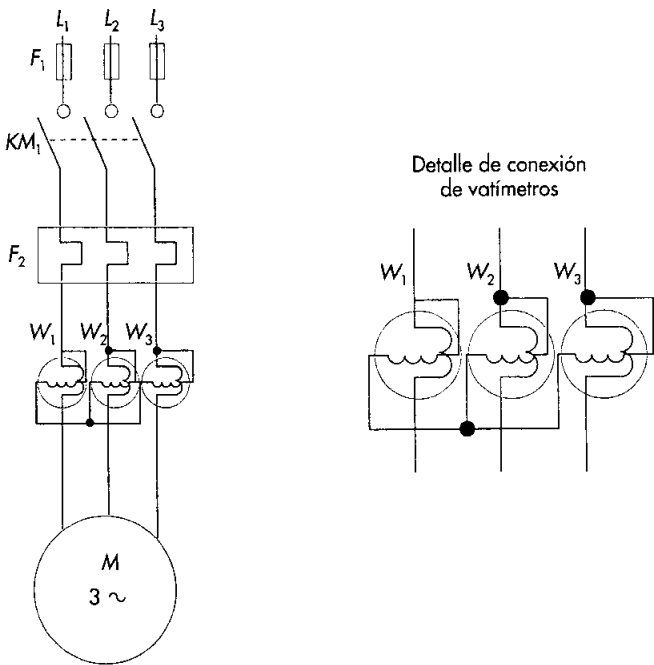


Fig. 10.8. Medición de la potencia activa en un sistema trifásico desequilibrado a tres hilos.

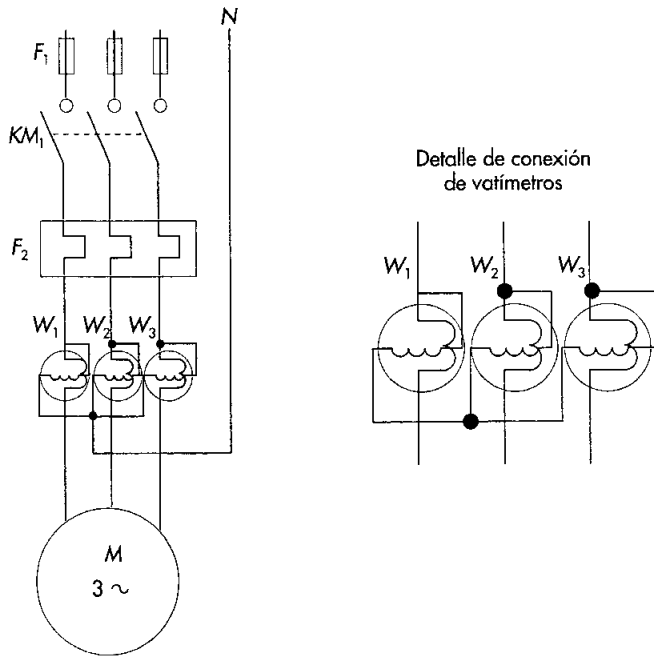


Fig. 10.9. Medición de la potencia activa en un sistema trifásico desequilibrado con neutro.

La conexión Arón, o de los dos vatímetros, se efectúa como se indica en la Figura 10.10.

Siempre que el factor de potencia ( $\cos \varphi$ ) de la carga sea mayor de 0,5, la potencia trifásica es igual a la suma de la lectura de los dos vatímetros.

$$P = W_1 + W_2$$

Es el método que se utiliza normalmente para un sistema de tres hilos. en nuestro caso en particular, es decir, para motores trifásicos a plena carga ( $\cos \varphi > 0,5$ ), es el método ideal.

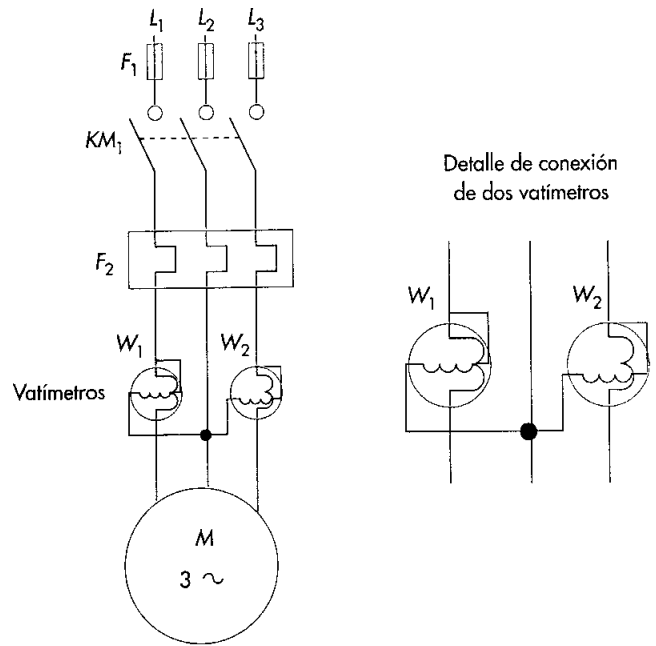


Fig. 10.10. Medición de la potencia activa por el método Arón.

### E. Medida de la potencia reactiva (Q) de un motor en un sistema trifásico

Para determinar la **potencia reactiva**, recurriremos a la fórmula:

$$Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen } \varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \text{sen } \varphi_2 + U_3 \cdot I_3 \cdot \text{sen } \varphi_3$$

La potencia resultante puede ser positiva o negativa, dependiendo de si la carga es inductiva o capacitiva. En el caso de la potencia inductiva, siempre es positiva.

El **vármetro** (vatímetro reactivo) se utiliza poco debido a su complicada construcción, ya que su circuito de tensión está alimentado por una tensión con un desfase de  $90^\circ$  respecto a la de la línea, mediante un montaje especial del propio aparato.

La medida de la potencia reactiva se puede hacer por dos métodos diferentes utilizando vatímetros de potencia activa:

• **Método Arón**

Donde:

$$Q = \sqrt{3} \cdot (W_1 - W_2)$$

Siendo:

- $W_1 > W_2$  en receptor inductivo.
- $W_1 < W_2$  en receptor capacitivo.

La Figura 10.10 corresponde al montaje para mediciones de potencias reactivas por el método Arón.

• **Método Righi**

Utiliza tres vatímetros de potencia activa, conectados como se indica en la Figura 10.11. El valor de la potencia reactiva trifásica viene dado por la expresión:

$$Q = \frac{W_1 - W_2 + 2 \cdot W_3}{\sqrt{3}}$$

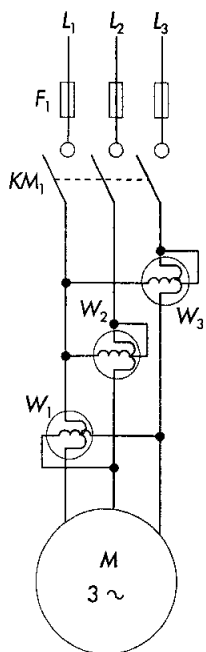


Fig. 10.11. Medición de la potencia reactiva por el método Righi.

**F. Medida de resistencias óhmicas (R) e inductivas (Xl) de cada fase**

La **resistencia óhmica (R)**, también llamada resistencia efectiva, origina una corriente inductiva mínima al ser recorrida por la corriente alterna, que en la mayoría de los casos no se tiene en cuenta.

En el caso de una resistencia óhmica, el valor de la resistencia es igual al valor de la impedancia ( $R = Z$ ).

La resistencia óhmica en un bobinado se puede medir mediante el procedimiento de puente de resistencias, o mediante un ohmiómetro, que determinará el valor de la resistencia de manera directa.

También se puede determinar la resistencia óhmica de un circuito, conectado a una red de corriente continua, mediante voltímetro y un amperímetro.

Conocida la tensión y la intensidad, podemos determinar la resistencia mediante la expresión:

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

Si la red es de corriente alterna, se puede determinar el factor de potencia calculando la potencia aparente (S) mediante el producto entre los valores de las mediciones del voltímetro y el amperímetro, así como la potencia activa (P) mediante la lectura del vatímetro.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Por ser una resistencia óhmica, el valor del factor de potencia deberá ser la unidad.

En la Figura 10.12, se puede ver la medición de la intensidad, tensión y potencia activa en un circuito trifásico equilibrado de resistencias óhmicas.

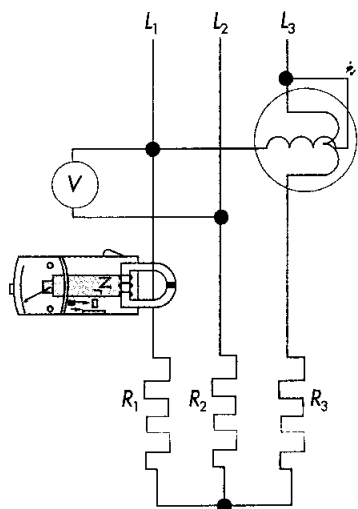


Fig. 10.12. Medida para el cálculo de resistencias óhmicas en un circuito trifásico equilibrado.

La **resistencia inductiva** ( $X_L$ ) es la resistencia que se crea cuando un hilo conductor se arrolla sobre un núcleo magnético constituyendo una bobina.

Una bobina, además de originar una resistencia inductiva cuando se conecta en una fuente de alimentación alterna, tiene además una resistencia óhmica.

Para determinar la **inductancia** del circuito trifásico equilibrado de la Figura 10.13, se emplea un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro.

La **impedancia** de una fase se obtiene mediante la Ley de Ohm:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Donde:

$R$  = resistencia óhmica

$X_L$  = resistencia inductiva

La **potencia aparente** ( $S$ ) será la que resulte del producto de los valores obtenidos en el amperímetro y el voltímetro:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + P_Q^2}$$

$P$  = potencia indicada en el vatímetro

$P_Q$  = potencia originada por la inductancia

El **factor de potencia** será:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Por lo tanto:

$$\text{sen } \varphi = \frac{P_Q}{S}$$

Para obtener la resistencia inductiva, se debe recurrir a la impedancia y al factor de potencia:

$$X_L = Z \cdot \text{sen } \varphi$$

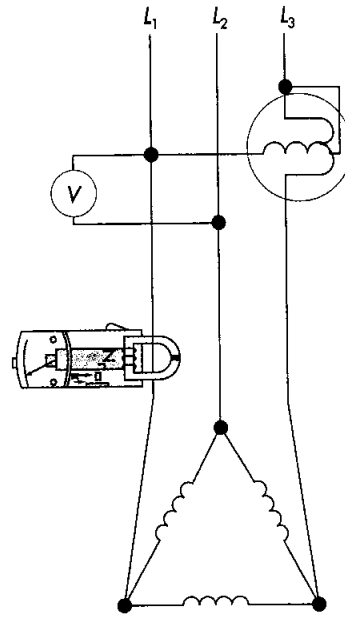


Fig. 10.13. Medida de resistencia inductiva.

### G. Velocidad de giro de un motor asíncrono

En los alternadores y motores de corriente alterna, el número de polos es el que determina la velocidad de la máquina cuando la frecuencia es constante.

Como se estudió en la unidad anterior, la frecuencia industrial en Europa es de 50 Hz, lo que indica que el número de polos de la máquina será el referente de la velocidad de la máquina de corriente alterna. La expresión de la **frecuencia** es:

$$f = \frac{n_s \cdot P}{60}$$

Donde:

$f$  = frecuencia en Hz

$n_s$  = velocidad de sincronismo o del campo giratorio en rpm

$P$  = número de pares de polos

Despejando la velocidad de giro:

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{P}$$

La velocidad del rotor siempre será menor que la velocidad del campo giratorio del estator, ya que si alcanzan la misma, no se producirían cortes de líneas de fuer-

za y, por lo tanto, no existiría movimiento relativo entre ambos.

La velocidad de rotor suele oscilar entre el 1% y el 7% menor que la velocidad de sincronismo.

El **deslizamiento** es la diferencia entre la velocidad del campo giratorio y la velocidad del rotor, expresado en porcentaje (%).

$$s_{\%} = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

El **valor absoluto del deslizamiento** vale:

$$s = n_s - n$$

Donde:

$s$  = deslizamiento en valor absoluto

$s_{\%}$  = deslizamiento en tanto por ciento

$n_s$  = velocidad del campo giratorio (velocidad de sincronismo)

$n$  = velocidad del rotor

El deslizamiento disminuye al aumentar la potencia del motor; por el contrario, al aumentar la potencia aumentan el factor de potencia y el rendimiento.

En la Figura 10.14, se puede observar cómo se mide la velocidad de giro de un motor mediante un **tacómetro de contacto** (fototacómetro).

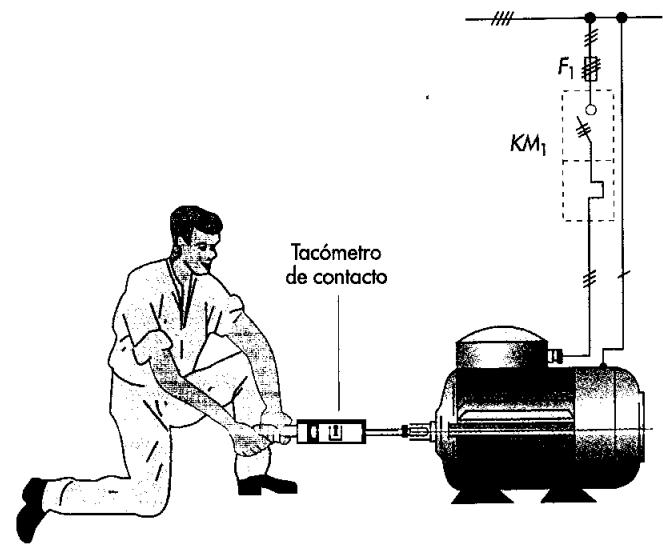


Fig. 10.14. Método para medir la velocidad de giro.

## H. Medida del factor de potencia ( $\cos \phi$ )

La **medida del factor de potencia** ( $\cos \phi$ ), como se ha estudiado anteriormente, se puede calcular a partir del cociente entre la potencia activa y la potencia aparente.

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

En los circuitos trifásicos, la medida directa es la más utilizada, y se obtiene mediante un **fasímetro trifásico**, como el de la Figura 10.15.

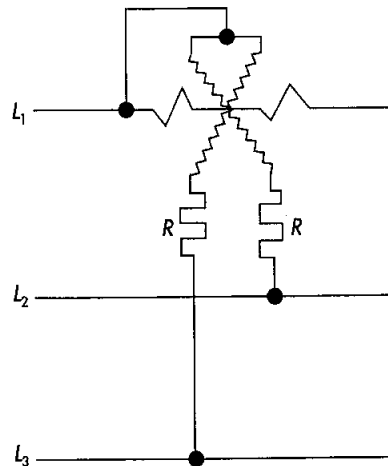


Fig. 10.15. Fasímetro trifásico para sistemas equilibrados.

El  $\cos \phi$  también se puede medir directamente y sin interrumpir el circuito con la **tenaza fasimétrica**, preparada con un conmutador de polaridad para desviaciones negativas de la aguja.

## I. Medida de aislamiento

La medida de aislamiento se realiza para comprobar si dos partes independientes de la máquina están o no comunicadas eléctricamente.

El **aislamiento** es uno de los factores más importantes para que la máquina pueda estar en perfecto estado de funcionamiento.

Para ello, se recurre a la medida de resistencia de aislamiento y al ensayo dieléctrico o rigidez dieléctrica.

Generalmente, estas mediciones se realizan entre cada uno de los circuitos eléctricos y masa, y entre cada uno de los circuitos eléctricos, que deben estar aislados entre sí.

La medida de aislamiento se realiza con un **medidor de aislamiento** (*megger*).

La resistencia de aislamiento, dada por el CEI (Comité Electrotécnico Internacional) recomienda que el valor mínimo de aislamiento sea de  $1\,000\ \Omega$  por voltio; por consiguiente, según la expresión será:

$$R_{\text{aisl}} > 1\,000 \cdot U$$

Donde:

$R_{\text{aisl}}$  = resistencia de aislamiento con un valor mínimo de  $250\ \text{k}\Omega$

$U$  = tensión mayor de los bobinados en voltios

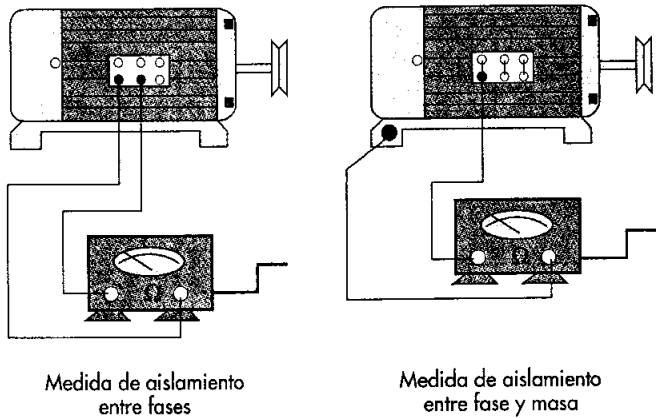


Fig. 10.16. Medida de aislamiento de un motor trifásico.

### J. Medida de rigidez dieléctrica

El ensayo de **rigidez dieléctrica** se puede definir como la prueba que se le realiza al aislante hasta el instante de perforación, aplicándole una determinada tensión.

El aparato que se utiliza para este tipo de ensayo es el **medidor de rigidez dieléctrica** (chispómetro). Este aparato dispone de una alta tensión en sus puntas.

Se debe someter a tensión a cada uno de los bobinados y masa, y a los propios bobinados aislados entre sí. El ensayo debe comenzar aplicando una baja tensión, que se ha de aumentar progresivamente hasta llegar a la tensión eficaz de ensayo.

La tensión eficaz de ensayo ( $U_{\text{ens}}$ ) será de  $1\,000$  voltios más dos veces la tensión nominal del bobinado; como mínimo será de  $1\,500\ \text{V}$ .

$$U_{\text{ens}} = 1\,000 + 2 \cdot U_n$$

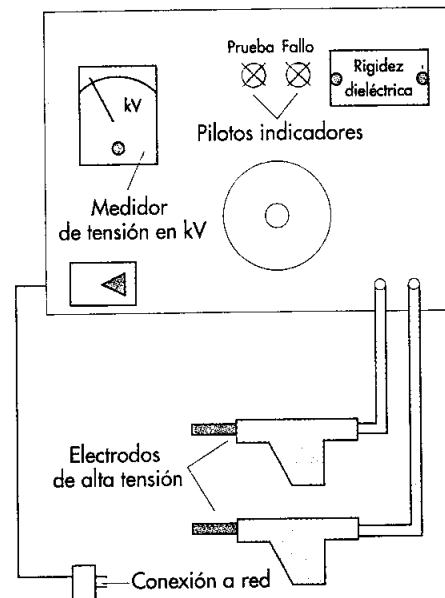


Fig. 10.17. Medidor de rigidez dieléctrica (chispómetro).

### K. Identificación de fases de un sistema trifásico

Para ciertas aplicaciones, es necesario conocer la secuencia de fase de las líneas de alimentación trifásicas, como, por ejemplo, en el caso de accionamiento de motores asíncronos trifásicos, cuyo sentido de rotación depende del sentido de giro de esta secuencia de fase.

El **comprobador o identificador de fase** es un instrumento que se conecta en las fases donde se conectará el motor trifásico, para averiguar el sentido de giro que llevará el motor cuando se conecte.

El comprobador dispone de tres pinzas de cocodrilo de diferentes colores; respetando la relación de colores de las pinzas del comprobador y las fases  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ , se puede averiguar el orden de sucesión de las fases y, por lo tanto, el sentido de giro del motor.

El comprobador posee en la parte delantera tres *led* (uno por cada fase) que se encenderán cuando exista una correcta conexión, y un disco que deberá girar en sentido de las agujas del reloj.

Cuando el disco gire en sentido contrario a las agujas del reloj, se deberán cambiar dos fases, lo que indicará que la conexión es correcta y que  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  están identificadas para la correcta conexión del motor.

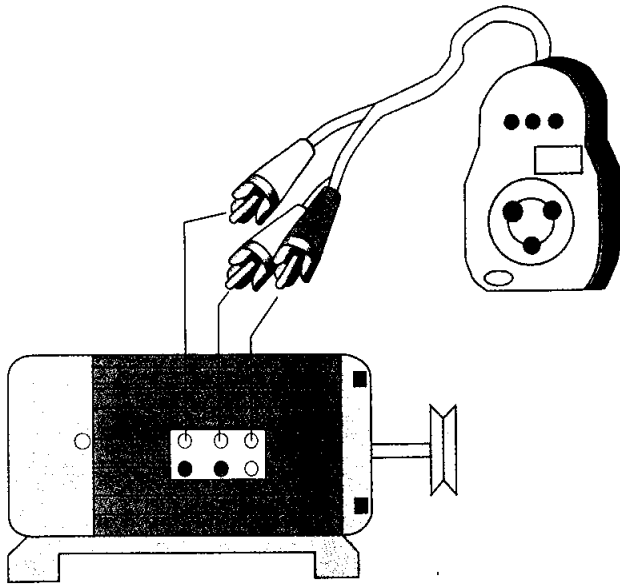


Fig. 10.18. Identificación de fases en un sistema trifásico.

### 1. Control de la velocidad en los motores de CA con rotor en cortocircuito

La regulación de velocidad de un motor trifásico con rotor en cortocircuito siempre ha sido complicada de realizar. La regulación se conseguía con **variadores mecánicos** accionados por motores trifásicos de corriente alterna y utilizando motores de CC después de rectificar las corrientes alternas o generando corriente continua mediante un grupo *Ward Leonard*, o cualquier otro sistema.

El variador de frecuencia ha reducido el coste y está en condiciones de ser aplicado en la generalidad de los motores con necesidad de regulación de velocidad, ya que el rendimiento que se obtiene es bastante considerable.

Como se ha estudiado anteriormente, la velocidad de un motor está directamente relacionada con la frecuencia como factor variable, sin necesidad de alterar el bobinado ni la tensión de servicio.

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}$$

En el caso más probable de utilización de frecuencias industriales, tenemos la frecuencia de 50 Hz, utilizada en Europa, y la frecuencia de 60 Hz, que se utiliza en América.

En los motores, este cambio de frecuencia produce alteraciones en el par motor, en la velocidad, en la potencia, etc.

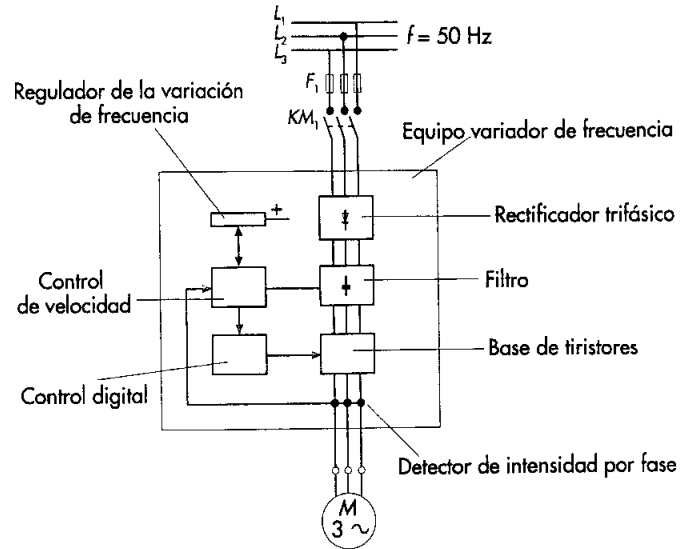


Fig. 10.19. Variador de frecuencia.

## 10.2 Adaptación de un motor trifásico de CA a una red monofásica

Un motor trifásico puede funcionar como un motor monofásico si en su conexión se instala un condensador. La adaptación del motor trifásico a una red monofásica se consigue mediante la **conexión Steinmetz**.

Esta conexión permite que un motor trifásico funcione, conectado en estrella o en triángulo, mediante un condensador permanente, que no se debe confundir con el de arranque de un motor monofásico. La potencia que el motor puede alcanzar con esta adaptación es de dos tercios de la potencia total del motor conectado en un sistema trifásico. En muchos casos, este resultado permite utilizar permanentemente un motor trifásico en una red monofásica.

Para determinar el valor de la **capacidad del condensador** que se debe conectar, se recurre a la fórmula:

$$C = 50 \cdot P \left( \frac{230}{U} \right)^2 \cdot \frac{50}{f}$$

Donde:

C = capacidad del condensador expresada en  $\mu\text{F}$

P = potencia del motor en CV

U = tensión a la que se conectará, expresada en voltios (V)

f = frecuencia de la red en hercios (Hz)

## 10.3 Diferencias entre alternadores y generadores de CC

En un generador de corriente continua, se estudió que la fem que genera es alterna hasta llegar al colector; eso nos demuestra que la generación de corriente alterna es más fácil de conseguir, puesto que no existe colector.

La construcción de un alternador es semejante a la de un generador de corriente continua, aunque salvando diferencias fundamentales (Figura 10.21).

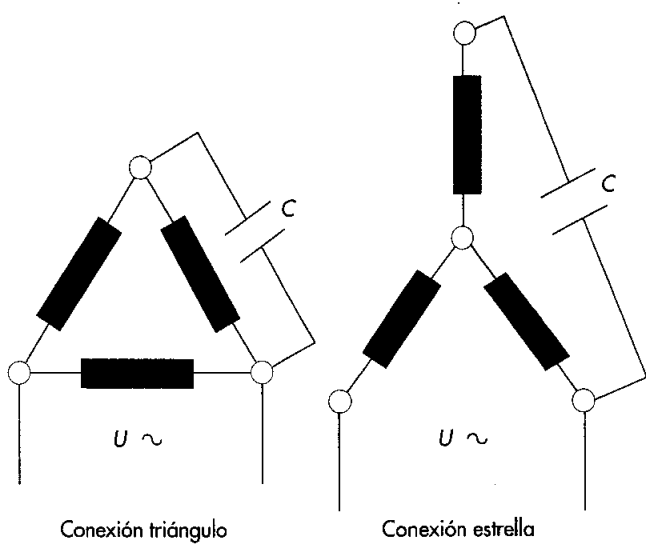
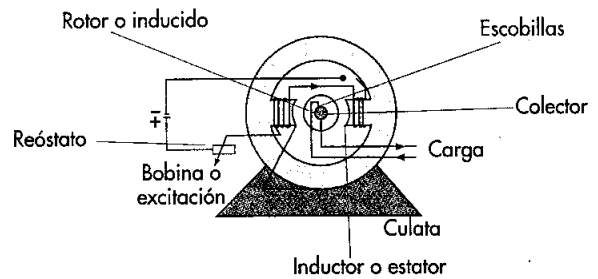


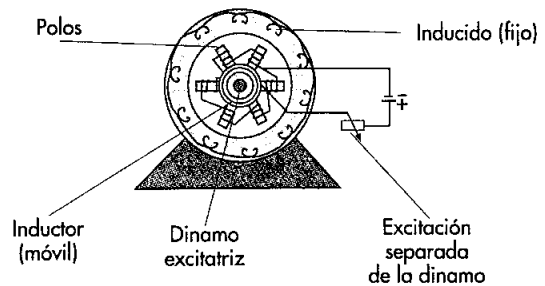
Fig. 10.20. Conexión de un motor trifásico a una red monofásica.

No obstante, las pruebas realizadas en algunas industrias del sector hacen que se utilice una capacidad de 50  $\mu\text{F}$  por kW o 70  $\mu\text{F}$  por CV, y a una tensión de trabajo de 220 V.

Con el ábaco de la Tabla 10.1, se puede calcular la capacidad del condensador permanente que se deberá conectar en un motor trifásico conectado a una red monofásica.



Generador de CC



Alternador

Fig. 10.21. Diferencias entre un generador de CC y un alternador.

### A. Anillos rozantes

El alternador, al no tener colector de delgas, es sustituido por **anillos rozantes**; a través de éstos suministra tensión al bobinado giratorio. Su constitución es de cobre, bronce o acero, y sobre ellos se conectan las escobillas, que son similares a las de los colectores, también de carbón.

### B. Bobinados

Los bobinados de los inducidos de corriente continua son cerrados y se conectan al colector, mientras que los bobinados en los alternadores son abiertos, de forma que se fija un principio y un final del bobinado.

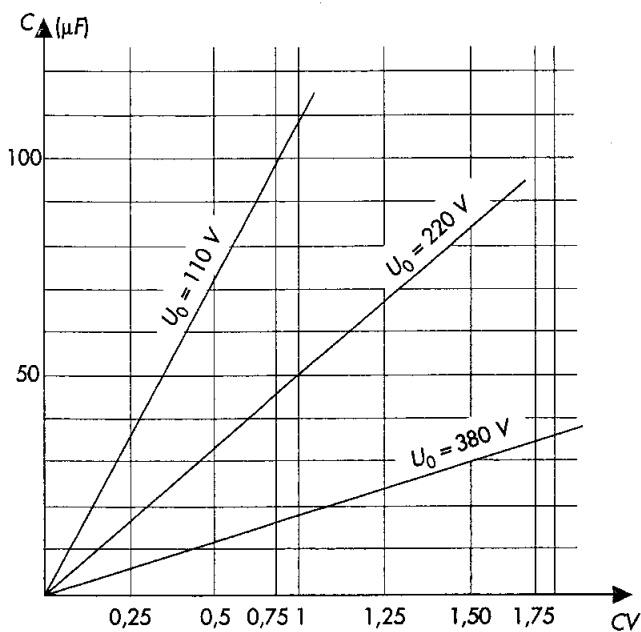


Tabla 10.1. Ábaco para calcular la capacidad de un condensador permanente.



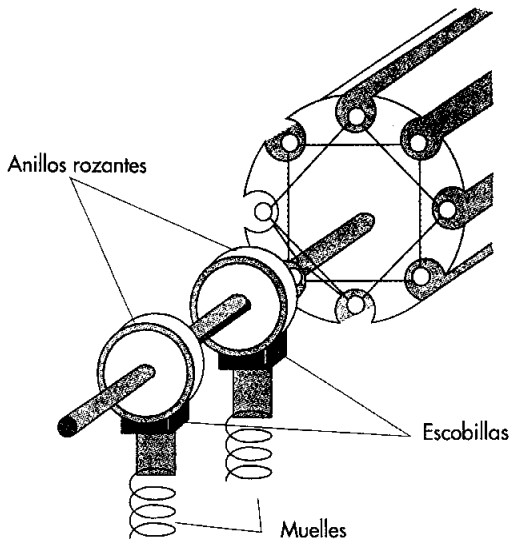


Fig. 10.22. Anillos rozantes y escobillas.

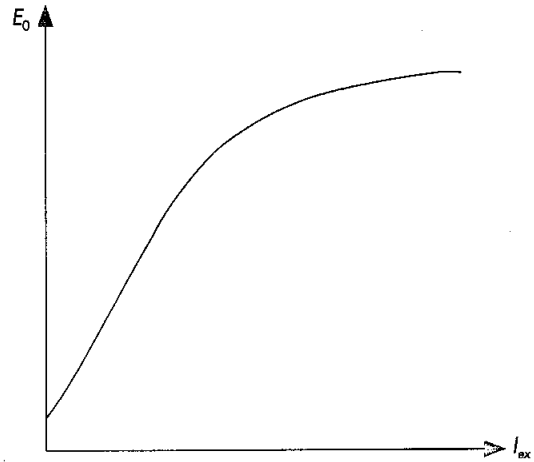


Fig. 10.23. Curva de característica de vacío de un alternador.

la energía suministrada en las centrales eléctricas está generada por alternadores síncronos.

## 10.4 Características eléctricas de un alternador

Al igual que las máquinas de corriente continua se determinan por sus características, las máquinas de corriente alterna también se determinan por sus curvas características.

### A. Característica de vacío

La **curva de vacío** de un alternador se determina por la variación de la corriente de excitación cuando el generador gira a su velocidad nominal y originando la propia tensión.

La curva de vacío de un alternador es idéntica a la curva de características de vacío de una máquina de corriente continua (Figura 10.23).

### B. Característica exterior

Una de las características fundamentales del alternador es la relacionada con la regulación de la tensión en bornes, al variar la corriente de carga absorbida por los receptores.

En los alternadores, el factor de potencia también depende de los receptores. La **característica exterior** comprende varias curvas, aunque suele ser el funcionamiento normal con cargas inductivas.

La máquina síncrona se aplica casi exclusivamente a la producción de energía eléctrica; de hecho, prácticamente toda

## 10.5 Motor síncrono: fundamento y aplicación

Está basado en la reversibilidad del funcionamiento que presentan los alternadores. El **motor síncrono** gira a velocidad constante o de sincronismo.

La aplicación esencial del motor síncrono es **aumentar el factor de potencia en la línea**, puesto que al conectarse en paralelo a la línea hace el efecto del condensador, siempre en vacío y sobreexcitado.

Otra aplicación en la que se emplean los motores síncronos es en subestaciones que **convierten la corriente alterna en continua**, como se puede apreciar en la Figura 10.24.

Esta aplicación no requiere arranque en carga y no sufre variaciones bruscas; por lo tanto, no hay ningún inconveniente en utilizar el motor síncrono.

La corriente absorbida por un motor síncrono en vacío es del orden de un décimo de la intensidad a plena carga; en cambio, en un motor asíncrono, la intensidad en vacío para la misma carga es de un tercio de la intensidad de carga.

El motor síncrono tiene algunos inconvenientes, como, por ejemplo, no poder arrancar con carga; se deberá arrancar en vacío y aplicarle carga una vez alcanzada la velocidad de sincronismo.

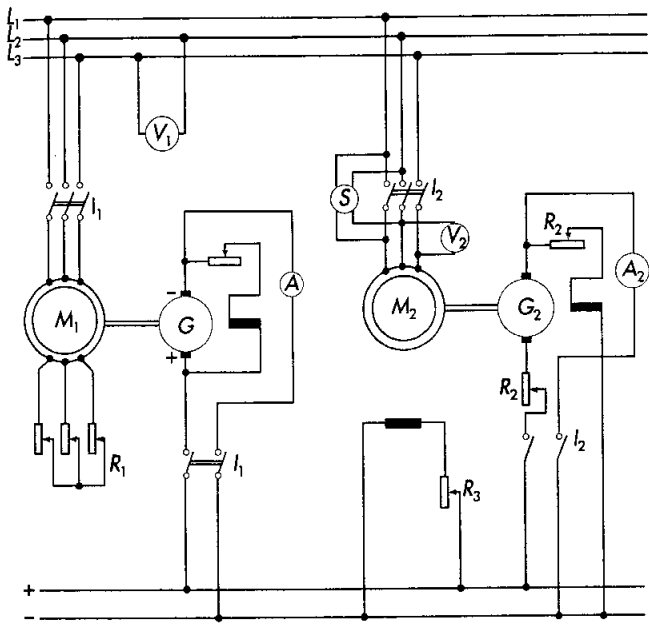


Fig. 10.24. Instalación para la conversión de corriente alterna en continua mediante un motor síncrono.

## 10.6 Características de los motores asíncronos trifásicos

Los ensayos en carga de los motores asíncronos son difíciles de realizar, sobre todo cuando la potencia de la máquina es elevada, ya que requieren métodos para absorber y disipar esas grandes potencias.

Se trata de sustituir las pruebas en carga por otras en vacío y en cortocircuito, donde el consumo sólo cubre para determinar y predecir el comportamiento de la máquina en servicio normal.

### A. Ensayo en vacío

Para llevar el ensayo en vacío, se seguirá el esquema de la Figura 10.25. Hacer funcionar el motor trifásico a una tensión y frecuencia nominales, sin carga en el eje, nos permite conocer la intensidad de vacío ( $I_0$ ) que el motor toma de la red y las potencias activa ( $P_0$ ) y reactiva ( $Q_0$ ) correspondientes a este funcionamiento.

Nos interesa calcular la reactancia total en vacío ( $X_0$ ) y las pérdidas mecánicas ( $P_m$ ). Si representamos mediante ( $U$ ) la tensión entre fases, el ángulo de desfase en vacío se obtendrá a partir de la potencia activa o de la potencia reactiva por las expresiones:

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_0}$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_0}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_0}$$

La potencia **activa** ( $P_0$ ) y la **reactiva** ( $Q_0$ ) se obtendrán por el método Arón, que, como hemos visto, nos da la potencia con dos vatímetros en redes equilibradas, como se puede apreciar en la Figura 10.25, según las siguientes ecuaciones:

$$P_0 = W_0 + W_1$$

$$Q_0 = \sqrt{3} \cdot (W_0 - W_1)$$

Donde  $W_0$  y  $W_1$  son la medición en vatios de los vatímetros en montaje Arón.

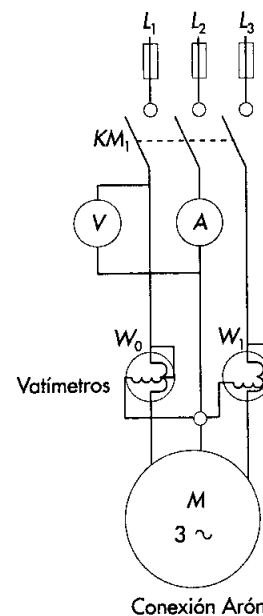


Fig. 10.25. Esquema del ensayo de un motor asíncrono de corriente alterna.

La **reactancia total** del motor en vacío ( $X_0$ ) se determinará una vez calculada la **impedancia** en vacío ( $Z_0$ ) y la **resistencia óhmica** en vacío ( $R_0$ ) mediante la fórmula:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

La **impedancia en vacío** se calcula por fase del motor trifásico, conectado el bobinado en estrella; la expresión será:

$$Z_0 = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_0}$$

En conexión triángulo, será:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{I_0}$$

La **resistencia por fase** en la conexión estrella será:

$$R_0 = \frac{\frac{P_0}{3}}{I_0^2}$$

En conexión triángulo será:

$$R_0 = \frac{\frac{P_0}{3}}{(I_0 \cdot \sqrt{3})^2} = \frac{P_0}{I_0^2}$$

Al ser muy reducido el deslizamiento en vacío, la resistencia óhmica de la rama representativa del rotor en el circuito equivalente es casi infinita; esto da lugar a que la reactancia total del circuito en vacío sea aproximadamente igual a la suma de la reactancia de dispersión del estator ( $X_1$ ) y del circuito de excitación ( $X_e$ ).

$$X_0 = X_1 - X_e$$

Al ser la reactancia de vacío la correspondiente a la reactancia de autoinducción cíclica del motor:

$$X_0 = \omega_1 = L_1$$

Si deducimos de la potencia en vacío ( $P_0$ ) las pérdidas por efecto Joule del estator, obtendremos como valor de la potencia perdida del motor la suma de las pérdidas en el hierro y las pérdidas mecánicas, en las que se incluyen las de rozamiento y ventilación:

$$P_{fe} + P_m = P_0 - m_1 \cdot R_1 \cdot I_{0f}^2$$

Donde  $I_{0f}$  es la corriente de vacío por fase; la resistencia del bobinado primario ( $R_1$ ) se determinará midiendo directamente con un ohmímetro o por medio de un puente de resistencias; la medición será a temperatura de régimen del motor.

Realizando el ensayo en vacío del motor con distintas tensiones, como por ejemplo  $0,2 U_n$  y  $1,1 U_n$ , es fácil determinar por separado las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el hierro, si  $U_n$  es la tensión nominal y se mide cada valor de la tensión aplicada a la potencia absorbida y a la intensidad.

En la Figura 10.26, se puede apreciar cómo las tensiones aplicadas en el eje de abscisas y la suma de las pérdidas mecánicas y las del hierro, dada en la expresión anterior, situadas en el eje de ordenadas, nos definen la curva.

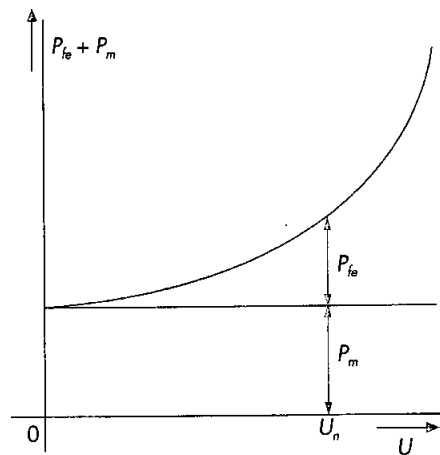


Fig. 10.26. Curva de ensayo en vacío de una máquina de inducción trifásica.

La curva indica que las pérdidas mecánicas son constantes y las pérdidas en el hierro son proporcionales al cuadrado de la tensión. Si tomamos el cuadrado de las tensiones ( $U^2$ ) en el eje de abscisas en vez de la tensión ( $U$ ), los puntos se hallarán sensiblemente sobre una recta, y su intersección con el eje de ordenadas quedará mejor definida, como se puede apreciar en la Figura 10.27.

## 10.7 Arranque de los motores asíncronos

El arranque de los motores asíncronos depende del tipo de rotor que tenga; el de jaula de ardilla, sencillo, absorbe en

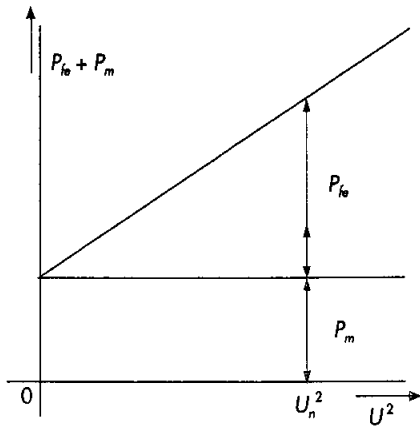


Fig. 10.27. Curva de ensayo en vacío aplicando el cuadrado de la tensión en el eje de abscisas.

el arranque del orden de 5 a 7 veces la intensidad nominal. La intensidad en el arranque de un motor con rotor bobinado es menor.

Las intensidades elevadas en el arranque producen una elevada caída de tensión en la línea eléctrica, perjudicando a los usuarios. Por ello, está prohibido el arranque directo en los motores de cierta potencia; se deben emplear sistemas de arranque que reduzcan la intensidad en el mismo.

Entre los **sistemas más utilizados en el arranque de motores**, que eviten intensidades elevadas, se encuentran:

- Arranque en estrella-triángulo.
- Arranque por autotransformador.
- Arranque por reóstatos en los motores de rotor bobinado.
- Arranque por variador de frecuencia.
- Arranque por resistencias estáticas.

Superado el inconveniente del arranque, estos motores son los de construcción más sencilla, robustos y económicos, especialmente los de **jaula de ardilla**. Estos motores son las máquinas utilizadas en la industria debido a su diversa aplicación.

## 10.8 Aplicaciones del motor monofásico

El motor monofásico nace de la necesidad de las aplicaciones domésticas y de la pequeña industria, en la que se

carece de red trifásica y sólo se dispone de red monofásica.

La necesidad es patente en motores de pequeña potencia, que, por su uso, no suelen superar 1 CV.

En los motores monofásicos, el flujo se crea por una sola corriente que recorre el bobinado del estator. El flujo que crea el motor monofásico es de dirección constante, pero variable. Para hacer girar el motor, es necesario un dispositivo específico para el arranque.

En los motores monofásicos de inducción o asíncronos, el empleo de un bobinado auxiliar conectado con una inductancia o un condensador es capaz de producir un desfase de entre  $80^\circ$  y  $85^\circ$  con respecto al bobinado de trabajo, suficiente para producir el arranque por sí mismo.

A continuación, analizaremos los diferentes sistemas de arranque.

### A. Motor de fase partida

Este tipo de motor está constituido por un bobinado principal, o de trabajo, y un bobinado auxiliar, con un desfase entre ellos de  $80^\circ$  a  $85^\circ$  por la diferencia de inductancias.

El bobinado auxiliar lleva conectado en serie un dispositivo que permite la desconexión de éste una vez alcanzada la velocidad de régimen; este dispositivo es solidario con el eje del motor, que por la fuerza centrífuga actúa sobre un interruptor.

El par de arranque de este tipo de motor es moderado, 1,75 veces el par motor nominal, lo que hace que se utilice en máquinas de poca carga en el arranque, como extractores, bombas centrífugas, etc. En la Figura 10.28, se puede ver el esquema del motor de fase partida.

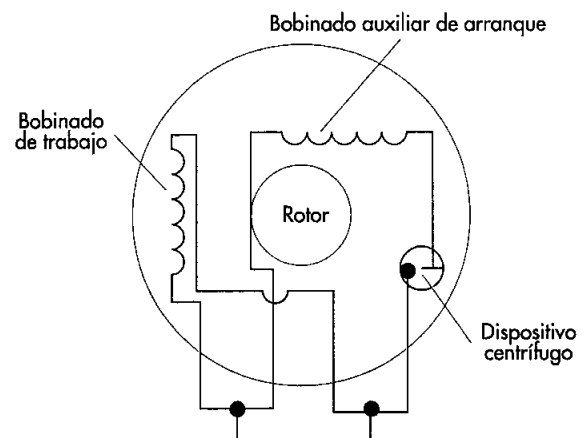


Fig. 10.28. Motor monofásico de fase partida con interruptor de arranque.

## B. Motor de condensador

El motor monofásico con condensador es similar al anterior, pero con un condensador conectado en serie al bobinado auxiliar de arranque que mejora el par de arranque, llegando a conseguir uno de 3,5 veces el par nominal. En la Figura 10.29, se puede ver el esquema del motor monofásico de fase partida con condensador.

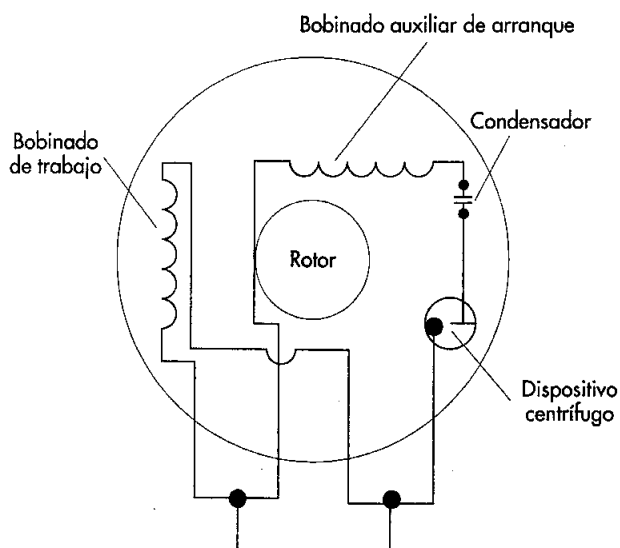


Fig. 10.29. Motor monofásico con condensador.

## C. Motor monofásico de espiras en cortocircuito

En los motores de estator de polos salientes y rotor de jaula de ardilla, el arranque se realiza por las bobinas polares que se encuentran en el estator y mediante la espira en cortocircuito colocada en una ranura longitudinal situada en el mismo polo saliente del estator. En la Figura 10.30, se puede ver el estator con los polos salientes, la ranura longitudinal y el bobinado.

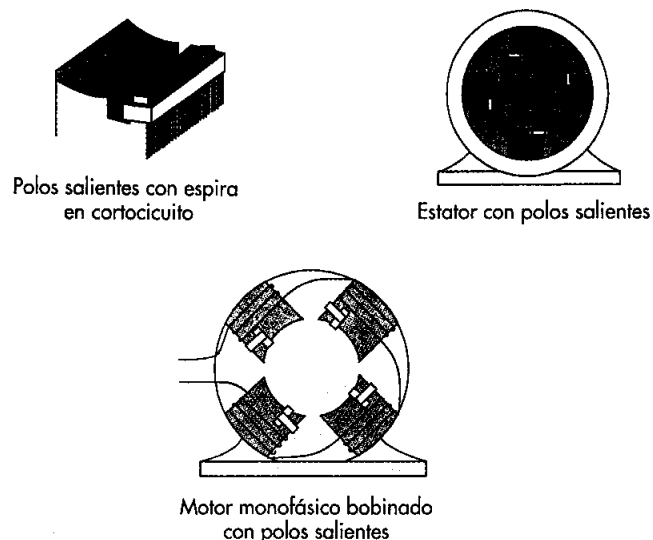


Fig. 10.30. Motor de polos salientes con espira en cortocircuito.

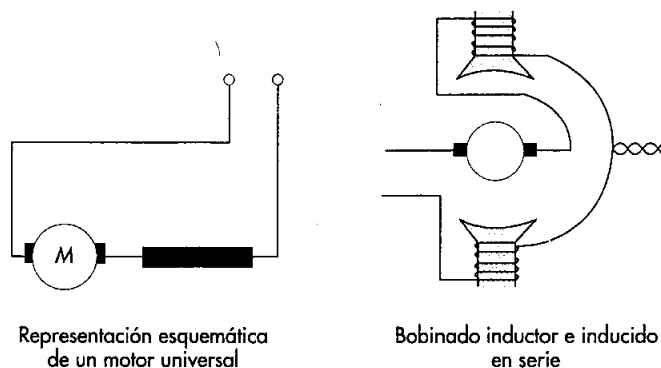


Fig. 10.31. Esquema de conexión de un motor universal.

## D. Motor universal

El **motor universal** puede conectarse tanto en corriente continua como en corriente alterna, y mantiene sus características de funcionamiento, como la velocidad, el par motor, etc., con escasas alteraciones.

Su velocidad depende de la carga, y puede llegar a ser elevada, inadmisibles para determinadas máquinas. Estos motores se construyen para potencias menores a 1 CV, y se aplican, entre otras cosas, en aspiradoras, máquinas de coser, herramientas eléctricas portátiles, etc.

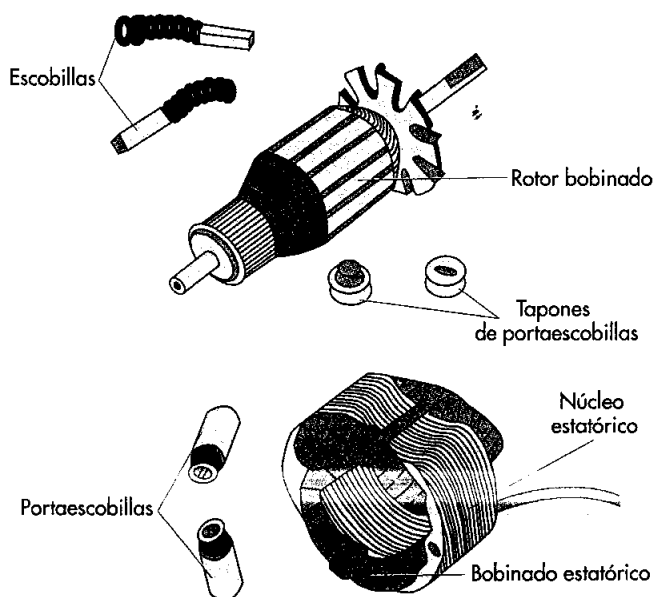


Fig. 10.32. Despiece de un motor universal.

## 10.9 Normas de seguridad en ensayos de máquinas de CA

Cuando se trabaja en laboratorios eléctricos o cuando se emplea equipo eléctrico, seguir las precauciones adecuadas de seguridad es tan importante como llevar a cabo mediciones exactas.

Existen peligros potencialmente mortales en el ámbito del laboratorio; el más común y más serio en laboratorios eléctricos, es el **cortocircuito eléctrico**.

Otros riesgos que también deben evaluarse son los derivados del empleo de **maquinarias en movimiento** y equipos de **soldaduras**.

Si no se siguen con cuidado los procedimientos de seguridad establecidos, puede que algún compañero sea víctima de un accidente serio.

El mejor sistema para evitar accidentes es reconocer sus causas y aplicar los procedimientos de seguridad establecidos. Una completa **concienciación** acerca de los peligros y las posibles consecuencias de los accidentes ayuda a desarrollar la motivación adecuada para seguir esos procedimientos.

### Conceptos básicos

**Anillos rozantes:** fabricados en cobre, bronce o acero, son los componentes del alternador que suministran la tensión al bobinado giratorio.

**Comprobador de fase:** también llamado «identificador de fase», es el instrumento que, conectado a las fases donde se conectará un motor trifásico, nos permite averiguar el sentido de giro que llevará el motor en funcionamiento.

**Deslizamiento:** es la diferencia porcentual existente entre la velocidad del campo giratorio y la velocidad del rotor. Si la potencia del motor aumenta, el porcentaje de deslizamiento disminuye.

**Máquinas asíncronas:** son aquellas en las que la velocidad de giro del eje es diferente con respecto a la velocidad de giro de los campos magnéticos giratorios.

**Máquinas síncronas:** son las que giran a velocidad constante según la frecuencia y el número de polos que tengan, coincidiendo con la velocidad del campo giratorio de cada máquina.

**Método Arón:** también conocido como «sistema de los dos vatímetros», es un procedimiento mediante el cual se puede medir la potencia de un sistema trifásico a tres hilos, tanto equilibrado como desequilibrado.

**Motor síncrono:** basado en la reversibilidad de funcionamiento de los alternadores, es el motor que gira a velocidad constante (o de sincronismo). Sus principales aplicaciones son aumentar el factor de potencia en línea y, en subestaciones, convertir la corriente alterna en corriente continua.

**Motor universal:** es el motor que, al mantener estables sus características de funcionamiento (velocidad, par motor, etc.), se puede conectar tanto en corriente continua como en corriente alterna. Construido para potencias menores a 1 CV, estos motores se utilizan, entre otras cosas, en herramientas eléctricas portátiles, aspiradoras, máquinas de coser, etc.

**Sistemas de arranque:** en los motores asíncronos, para paliar los efectos de una elevada intensidad de arranque, se utilizan diferentes sistemas que inhiben esta intensidad y evitan caídas de tensión en la línea eléctrica. Entre los más utilizados, están:

- Arranque estrella-triángulo.
- Arranque por autotransformador.
- Arranque por reóstatos.
- Arranque por variador de frecuencia.
- Arranque por resistencias estáticas.

## Autoevaluación

1. Si en un sistema trifásico equilibrado medimos con una pinza amperimétrica dos fases al mismo tiempo, ¿qué intensidad estamos midiendo?
2. Si en un sistema trifásico equilibrado medimos al mismo tiempo las tres fases con una pinza amperimétrica, ¿qué intensidad estamos midiendo?
3. Cita los métodos para la medición de la potencia activa en un sistema trifásico desequilibrado.
4. Cita los métodos para la medición de la potencia reactiva en un sistema trifásico desequilibrado.
5. Determina la velocidad de giro de motores asíncronos con las siguientes polaridades: 2, 4, 6, 8 y 12 polos.
6. Determina el deslizamiento de un motor que tiene dos polos cuya velocidad se ha medido con un fototacómetro, y resulta ser de 2850 rpm.
7. Mide el factor de potencia del motor que has rebobinado.
8. Mide el aislamiento y la rigidez dieléctrica del motor que has rebobinado y comprueba que está dentro de los márgenes recomendados.
9. Calcula el condensador necesario para conectar el motor que has rebobinado a un sistema trifásico.
10. ¿Qué inconvenientes presenta el motor síncrono en su puesta en marcha?
11. Cita los elementos eléctricos y mecánicos que componen un motor monofásico de condensador y realiza el esquema eléctrico.
12. Cita los elementos eléctricos y mecánicos que componen un motor monofásico de espira en cortocircuito y realiza el esquema eléctrico.
13. Cita los elementos eléctricos y mecánicos que componen un motor universal y realiza el esquema eléctrico.

## Actividades de enseñanza-aprendizaje

14. **Mide la tensión, intensidad, potencia e impedancia del motor rebobinado en conexión estrella y conexión triángulo en vacío, en una red trifásica equilibrada.**

## • Objetivos:

- Planificar las medidas básicas en un motor trifásico rebobinado.
- Evaluar los datos obtenidos.
- Identificar los diferentes métodos para la medida de potencia en un motor trifásico en un sistema equilibrado.

## • Medios didácticos:

- Motor trifásico rebobinado.
- Voltímetro, pinza amperimétrica, vatímetro, ohmímetro o puente de resistencias.
- Cuadro de control y protección.

## • Procedimiento:

- 1.º Elaboración de una ficha de recogida de datos.
- 2.º Conexión del motor en estrella.
- 3.º Conexión del motor a la red previo contacto de arranque.
- 4.º Medida de tensión en las tres fases conexión estrella.
- 5.º Medición de la intensidad en las tres fases por separado y juntas en conexión estrella.
- 6.º Medida de potencia por el método de un vatímetro en conexión estrella.
- 7.º Medida de potencia por el método Arón en conexión estrella.
- 8.º Medida de la resistencia óhmica de cada fase.
- 9.º Conexión del motor en triángulo.
- 10.º Medida de tensión en las tres fases conexión triángulo.
- 11.º Medición de la intensidad en las tres fases, por separado y juntas, en conexión triángulo.

## • Contesta:

- a) Elabora un listado de los aparatos de medidas utilizados en las mediciones realizadas.
- b) Explica el procedimiento desarrollado para la medición de cada una de las magnitudes eléctricas y de cada conexión del motor.

- c) Determina la reactancia inductiva ( $X$ ) por medio de la impedancia.
- d) Determina la potencia aparente ( $S$ ).
- e) Realiza un informe con las conclusiones de la actividad.

**15. Calcula y mide el factor de potencia, la velocidad de giro, el aislamiento y la rigidez dieléctrica según los resultados del ejercicio anterior.**

**• Objetivos:**

- Planificar los cálculos y medidas que se han de realizar en un motor trifásico rebobinado.
- Evaluar los datos obtenidos.
- Identificar los diferentes aparatos de medidas.

**• Medios didácticos:**

- Motor trifásico rebobinado.
- Cosímetro, tacómetro de contacto (fototacómetro).
- Megóhmetro, medidor de rigidez dieléctrica (chispómetro).
- Diferentes conectores y pinzas de cocodrilo.
- Cuadro de control y protección.

**• Procedimiento:**

- 1.º Elaboración de una ficha de recogida de datos.
- 2.º Conexión del motor en estrella.
- 3.º Conexión del motor a la red previo contacto de arranque.
- 4.º Cálculo y medida del  $\cos \phi$  del motor rebobinado.
- 5.º Medición de la velocidad de giro en estrella y en triángulo mediante el tacómetro de contacto (fototacómetro).
- 6.º Medida de aislamiento entre fases y entre fase y masa.
- 7.º Medida de rigidez dieléctrica entre fases y entre fase y masa.

**• Contesta:**

- a) Elabora un listado de los aparatos de medidas utilizados en las mediciones realizadas.
- b) Explica el procedimiento desarrollado para la medición del  $\cos \phi$
- c) Explica el procedimiento desarrollado para cada una de las mediciones realizadas.
- d) Determina el número de polos del motor mediante la velocidad de giro.
- e) Determina el deslizamiento del motor con respecto a la velocidad de sincronismo.
- f) Realiza un informe con las conclusiones de la actividad.

**16. Identifica las fases de un sistema trifásico mediante el comprobador de fase.**

**• Objetivos:**

- Identificar las fases de un sistema trifásico para arrancar un motor en el sentido de giro predeterminado.
- Conocer la conexión del identificador de fase en una red trifásica.

**• Medios didácticos:**

- Motor trifásico rebobinado.
- Comprobador o identificador de fase.
- Diferentes conectores y pinzas de cocodrilo.
- Cuadro de control y protección.

**• Procedimiento:**

- 1.º Elaboración de una ficha de recogida de datos.
- 2.º Conexión del motor en estrella.
- 3.º Conexión a la red previo contacto de arranque.
- 4.º Conexión de los diferentes conectores del indicador de fase a la red trifásica.
- 5.º Comprobación del encendido de los *led* y del sentido de giro del disco del identificador de fase.
- 6.º Toma de datos de la conexión realizada atendiendo los colores de las pinzas y de las fases.
- 7.º Conexión del motor rebobinado.



• **Contesta:**

- a) Toma datos de las conexiones realizadas.
- b) Explica el procedimiento desarrollado para la identificación de las fases.
- c) Conecta el motor rebobinado, con el sentido de giro predeterminado.
- d) Realiza un informe con las conclusiones de la actividad.

**17. Adaptación de un motor trifásico a una red monofásica.**

• **Objetivos:**

- Conocer las conexiones de un motor trifásico en estrella y en triángulo para conectarlo en una red monofásica.
- Analizar el proceso para determinar el condensador necesario para conseguir un rendimiento del 75% de la potencia del motor trifásico conectado a una red monofásica.

• **Medios didácticos:**

- Motor trifásico rebobinado.
- Pinza amperimétrica, voltímetro, vatímetro.
- Condensador.
- Diferentes conectores y pinzas de cocodrilo.

• **Procedimiento:**

- 1.º Elaboración de una ficha de recogida de datos.
- 2.º Conexión del motor en estrella.
- 3.º Conexión a la red previo contacto de arranque.
- 4.º Medida de potencia del motor conectado a la red trifásica.
- 5.º Cálculo del condensador necesario.

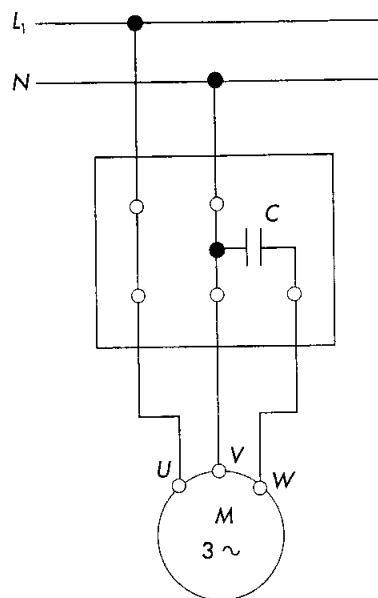


Fig. 10.33. Esquema de montaje de un motor trifásico en una red monofásica.

6.º Montaje del motor trifásico en la red monofásica, como indica la Figura 10.33.

• **Contesta:**

- a) Mide la potencia del motor trifásico en la red trifásica.
- b) Calcula el condensador necesario para la conexión del motor trifásico en la red monofásica.
- c) Conecta el motor trifásico, conectado a la red monofásica, con el condensador determinado.
- d) Realiza una nueva medición de la potencia del motor adaptado a una red monofásica con condensador conectado.
- e) Explica el procedimiento desarrollado para el cálculo y conexión del condensador en el motor trifásico.
- f) Realiza un informe con las conclusiones de la actividad.



AneXO

## Transformadores

$$S_1 = U_1 \cdot I_1$$

$$S_2 = U_2 \cdot I_2$$

$$A_n = L \cdot L$$

$$A_n \approx \sqrt{S_2}$$

$$A_n = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{S_2} \text{ cm}^2$$

$$\text{N.º de chapas} = 10 \times \frac{A_n}{a \cdot \Delta}$$

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{\text{max}}$$

$$\beta_{\text{max}} = \frac{\phi_{\text{max}}}{A_n}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

$$\text{Espiras por voltio} = \frac{N}{U}$$

$$S_{\text{cu}} = \frac{I}{\delta} \text{ en mm}^2$$

$$P_f = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{\text{max}}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}}$$

$$P_{\text{cu}} = K_k \cdot f \cdot \beta_{\text{max}}^2$$

$$P_{\text{e}} + P_{\text{cu}} = P_{\text{tr}}$$

## Bobinados trifásicos con bobinas por fase

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

$$B = \frac{K}{2}$$

$$G_t = 2p \cdot q$$

$$G_f = 2p$$

$$U = \frac{B}{G_t}$$

$$m = (q - 1) \cdot U$$

$$Y_{120} = \frac{K}{3p}$$

## Bobinados trifásicos concéntricos por polos consecuentes

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

$$B = \frac{K}{2}$$

$$G_t = p \cdot q$$

$$G_f = p$$

$$U = \frac{B}{G_t}$$

$$m = (q - 1) \cdot 2U$$

$$Y_{120} = \frac{K}{3p}$$

## Bobinados trifásicos imbricados de una y dos capas

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

$$B = \frac{K}{2}$$

$$B = K$$

$$G_t = 2p \cdot q$$

$$G_f = 2p$$

$$U = \frac{B}{G_t}$$

$$Y_{120} = \frac{K}{3p}$$

$$Y_p = \frac{K}{2p} \quad Y_p \cong Y_k$$

## Bobinados Dahlander

$$K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

$$B = \frac{K}{2}$$

$$B = K$$

$$G_t = 2p \cdot q$$

$$G_f = 2p$$

$$U = \frac{B}{G_t}$$

$$Y_{120} = \frac{K}{3p}$$

$$Y_p = \frac{K}{2p} \quad Y_p \cong Y_k$$

$$K_{pq} = \frac{K}{2pq}$$

$$G_t = 2p \cdot q$$

$$Y_p = \frac{K}{2p} \Rightarrow Y_k$$

$$G_f = 2p$$

$$U = \frac{B_f}{G_t} = \frac{K}{2p}$$

$$Y_{120} = \frac{K}{3p}$$

## Bobinados monofásicos concéntricos separados

$$U = m = \frac{K}{6p}$$

$$U_o = \frac{K}{12 \cdot p}$$

$$m_o = \frac{K}{3p}$$

$$Y_{sc} = \frac{K}{4p}$$

## Bobinados monofásicos concéntricos separados

$$Y_{sc} = \frac{K}{4p}$$

$$m = \frac{K - (2p \cdot 2U)}{2p}$$

$$m = \frac{K - (2p \cdot 2U_d)}{2p}$$

## Bobinados de inducción

$$Y_o = \frac{K}{2p}$$

$$Y_k = Y_p$$

$$Y_i = Y_o \cdot U$$

$$Y_{sc} = Y_o$$

$$D = S = K \cdot U$$


$$N_{sc} = \frac{D}{2p}$$

$$N_{sc} = \frac{K}{p}$$

$$B_{sc} = K$$

$$Y_{sc} = \frac{K}{p}$$

SOLIMOLAS

1. Nome do <b>Solicitante</b>	2. Data de Nascimento (dd/mm/aa)	3. Número de Matrícula 
4. Nome do Colaborador	5. Cargo	6. Departamento

Esquema

Blank area for drawing the organizational chart (Esquema).

