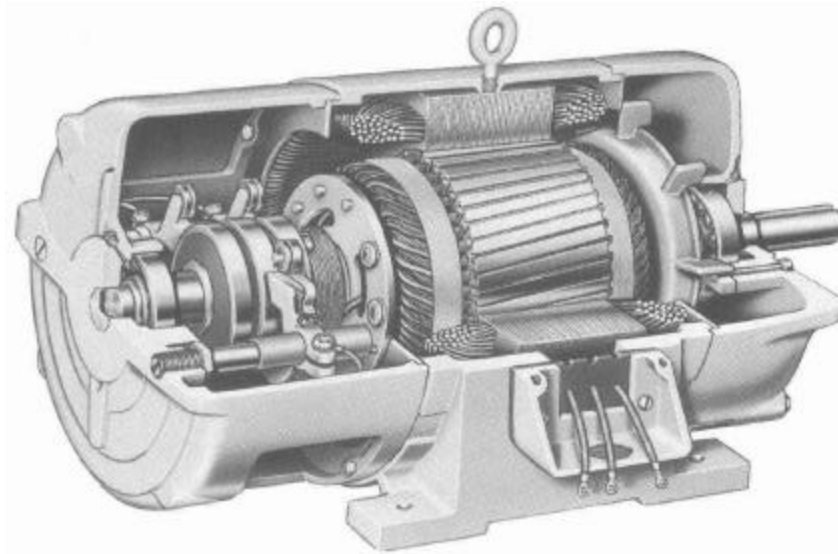


Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Electrónica
Valparaíso-Chile



SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS



José Rodríguez

Agosto de 1999

Introducción.

Este apunte contiene las figuras más importantes que se emplearán en la asignatura Sistemas Electromecánicos. Debo resaltar que este material no incluye las explicaciones ni las ecuaciones que serán deducidas en clases.

Este apunte es un apoyo para entender más los conceptos y para facilitar el trabajo del alumno en clases y durante el estudio personal y **de ninguna manera constituye un sustituto de la asistencia a clases y a la ayudantía.**

Se recomienda a los estudiantes llevar este material a las clases.

José Rodríguez.
Agosto de 1999.

Indice.

Introducción.....	i
Indice.....	ii

Capítulo 1.- Materiales y Circuitos Magnéticos

1.1.- Algunas leyes de los campos magnéticos.....	1
1.1.1.- Conceptos básicos de campos magnéticos.....	1
1.1.2.- La Ley de Faraday.....	3
1.1.3.- Fuerzas de origen electromagnético.....	3
1.1.4.- La Ley de Ampère.....	3
1.2.- Materiales Magnéticos.....	4
1.2.1.- La característica de magnetización.....	4
1.2.2.- Histéresis.....	6
1.2.3.- Energía almacenada en el campo magnético.....	7
1.2.4.- Pérdidas por histéresis.....	8
1.2.5.- Pérdidas por corrientes parásitas.....	9
1.2.6.- Ferrita.....	10
1.2.7.- Imanes permanentes.....	11
1.3.- Circuitos Magnéticos.....	11
1.3.1.- Consideraciones para el estudio de sistemas magnéticos.....	11
1.3.2.- El concepto de circuito magnético.....	12
1.3.3.- La Ley de Faraday aplicada a un campo magnético periódico.....	13
1.3.4.- Comportamiento de un sistema magnético.....	14
1.4.- Modelación del reactor.....	16
1.4.1.- La Inductancia.....	16
1.4.2.- Modelado de un reactor con saturación.....	16
1.4.3.- Modelado de un reactor con dispersión magnética.....	17
1.4.4.- Modelado de las pérdidas de un reactor.....	17

Capítulo 2.- El Transformador.

2.1.- Teoría del transformador monofásico.....	18
2.1.1.- Relaciones básicas del transformador ideal.....	18
2.2.- El transformador monofásico real.....	20
2.2.1.- Circuitos equivalentes del transformador.....	21
2.2.2.- Circuitos equivalentes aproximados.....	22
2.2.3.- Convenciones de variables.....	22
2.2.4.- Polaridad en un transformador.....	23
2.2.5.- El diagrama fasorial.....	24

2.2.6.- Sistemas en por unidad.....	24
2.3.- Características de operación del transformador.....	25
2.3.1.- El transformador en vacío.....	25
2.3.2.- El transformador en cortocircuito.....	25
2.3.3.- La tensión de cortocircuito.....	26
2.3.4.- Regulación de tensión en el transformador.....	26
2.3.5.- Transformadores en paralelo.....	27
2.3.6.- Corriente Inrush en un transformador.....	28
2.3.7.- Obtención de los parámetros del circuito equivalente.....	30
2.4.- El transformador trifásico.....	31
2.4.1.- El banco de transformadores monofásicos.....	31
2.4.2.- Construcción de un transformador trifásico.....	32
2.4.3.- Desfase entre devanados.....	34
2.4.4.- El circuito equivalente por fase.....	35
2.4.5.- Grupos de conexión en transformadores trifásicos.....	36
2.4.6.- Grupos de conexión más usuales.....	38
2.4.7.- El transformador Zig-Zag.....	39
2.4.8.- El autotransformador.....	40
2.4.9.- Transformadores de medición.....	41
2.4.10.- Transformador de pulsos.....	42

Capítulo 3.- Fuerzas Electromagnéticas.

3.1.- Sistemas Mecánicos.....	43
3.1.1.- Sistemas traslacionales.....	43
3.1.2.- Sistemas rotacionales.....	44
3.2.- Sistemas de conversión de energía electromecánica.....	44
3.3.- Energía almacenada en el campo magnético.....	45
3.3.1.- Energía en un sistema monoexcitado.....	45
3.3.2.- Energía de un sistema doblemente excitado.....	46
3.4.- Fuerzas electromagnéticas.....	47
3.4.1.- Fuerza en un sistema monoexcitado.....	47
3.4.2.- Torque en un sistema rotatorio monoexcitado (torque de reluctancia).....	48
3.4.3.- Torque en un sistema rotatorio doblemente excitado.....	49
3.5.- Transductores de movimiento continuo.....	50
3.5.1.- Condiciones para el movimiento continuo en un sistema rotatorio monoexcitado.....	50
3.5.2.- Condiciones para el movimiento continuo en un sistema rotatorio.....	51

Capítulo 4.- Devanados

4.1.- Campos Magnéticos Producidos en las Máquinas Rotatorias.....	52
4.1.1.- Introducción.....	52
4.1.2.- Devanados de estator de máquinas de corriente alterna.....	54
4.1.2.1.- La bobina elemental.....	54
4.1.2.2.- El número de pares de polos.....	55
4.1.2.3.-Devanados distribuidos.....	56
4.1.2.4.-Devanados de doble capa.....	59
4.1.2.5.-El campo giratorio.....	60
4.1.2.6.-Devanado monofásico alimentado con corriente alterna.....	61
4.1.2.7.-El devanado trifásico.....	62
4.1.2.8.-Construcción de un devanado trifásico.....	63
4.1.3.- Devanados de estator de máquinas de corriente continua.....	64
4.1.4.- Devanados de rotores.....	66
4.1.4.1.- El rotor devanado de anillos deslizantes.....	66
4.1.4.2.- El rotor jaula de ardilla.....	68
4.1.4.3.- El devanado de rotor con conmutador.....	69
4.2.- Tensiones inducidas en devanados de máquinas rotatorias.....	73
4.2.1.- Tensiones inducidas en la bobina elemental.....	73
4.2.2.- Tensiones inducidas en bobinas desplazadas geométricamente.....	75
4.2.3.- Tensiones inducidas en un devanado distribuido.....	76
4.2.4.- Tensiones inducidas en el rotor de una máquina de corriente continua (devanado con conmutador.....	77

Capítulo 5.- Máquinas de Corriente Continua

5.1.- Aspectos constructivos y principio de funcionamiento.....	79
5.1.1.- Principio de funcionamiento.....	79
5.1.2.- La reacción de armadura.....	81
5.1.3.- El circuito eléctrico equivalente de la máquina de corriente continua.....	82
5.1.4.- Medidas para compensar los efectos de la reacción de armadura.....	83
5.2.- Ecuaciones generales de las máquinas de corriente continua.....	84
5.2.1.- Ecuaciones del generador.....	84
5.2.2.- Ecuaciones del motor.....	84
5.2.3.- Clasificación de las máquinas de corriente continua.....	85
5.3.- Generadores de corriente continua en estado estacionario.....	86
5.3.1.- El generador de excitación independiente.....	86
5.3.2.- El generador autoexcitado.....	87
5.3.3.- El generador compensado (compound).....	89

5.4.- Motores de corriente continua en estado estacionario.....	90
5.4.1.- El motor de excitación independiente (shunt).....	90
5.4.2.- El motor serie.....	91
5.4.3.- El motor universal.....	91
5.5.- Características de operación y control.....	93
5.5.1.- Generadores en paralelo.....	93
5.5.2.- Comportamiento dinámico del motor de excitación independiente.....	93
5.5.3.- Arranque de un motor con resistencias adicionales en la armadura.....	95
5.5.4.- Frenado de la máquina.....	96
5.5.5.- Control de velocidad del motor.....	96

Capítulo 6.- Máquinas Sincrónicas

6.1.- Aspectos constructivos y principio de funcionamiento.....	101
6.1.1.- Introducción.....	101
6.1.2.- Aspectos constructivos.....	101
6.1.3.- Principio de funcionamiento.....	104
6.2.- Teoría de la máquina sincrónica de rotor cilíndrico en estado estacionario.....	106
6.2.1.- Definición de coordenadas.....	106
6.2.2.- El campo excitador del rotor.....	106
6.2.3.- El circuito equivalente por fase del estator.....	107
6.2.4.- La característica potencia ángulo.....	108
6.2.5.- El torque eléctrico.....	108
6.3.- Características de operación.....	109
6.3.1.- Generador en red propia (carga pasiva).....	109
6.3.2.- La red infinita.....	110
6.3.3.- Arranque de un motor sincrónico conectado a la red infinita..	111
6.3.4.- Sincronización de un generador con la red infinita.....	111
6.3.5.- Operación de la máquina sincrónica conectada a la red infinita.....	112
6.3.6.- La máquina sincrónica operando con velocidad variable.....	113

Capítulo 7.- Máquinas Asíncronas

7.1.- Aspectos constructivos y principio de funcionamiento.....	116
7.1.1.- Introducción.....	116
7.1.2.- Devanado trifásico en el estator.....	117
7.1.3.- Devanados de rotor.....	118
7.1.4.- Principio de funcionamiento.....	120
7.1.5.- Distribución de potencias en la máquina de inducción.....	121
7.2.- Teoría de la máquina de rotor cilíndrico devanado.....	121
7.2.1.- La máquina conectada a la red infinita.....	121
7.2.2.- El circuito equivalente por fase.....	122

7.2.3.- La característica torque velocidad.....	123
7.3.- Características de operación y control.....	124
7.3.1- Operación como generador y freno.....	124
7.3.2.- La zona de trabajo estable.....	124
7.3.3.- Comportamiento de las variables eléctricas.....	125
7.3.4.- Clases de motores.....	125
7.3.5.- Arranque de las máquinas de inducción.....	126
7.3.6.- Variación de la velocidad del motor.....	129

CAPÍTULO 1

MATERIALES Y CIRCUITOS MAGNÉTICOS

1.1) ALGUNAS LEYES DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

1.1.1) Conceptos básicos de campos magnéticos:

- ➔ $\vec{B}$: Inducción Magnética o Densidad de Flujo Magnético [T].
- ➔ Φ : Flujo Magnético [Wb].

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (1.1)$$

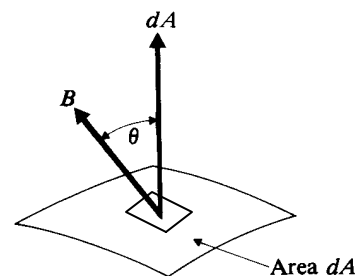


Fig.1.1.:Definición de flujo.

- Φ : [Weber] = [Wb].
- B : [Weber / metro²] = [Wb/m²].
- 1 [Tesla] = 1 [Wb/m²] = 1 [T].

➔ Campo creado por una corriente I :

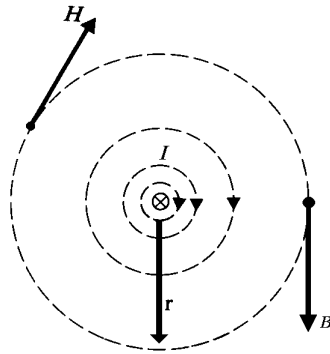


Fig.1.2.: Campo creado por una corriente I .

➔ Intensidad de campo $\vec{H}$:

$$H: \left[\frac{\text{Amper} \cdot \text{Vuelta}}{\text{metro}} \right]$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1.2)$$

μ : Permeabilidad del medio [Henry / metro]

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o \quad (1.3)$$

Donde:

μ_o : Permeabilidad del aire = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H / m].

μ_r : Permeabilidad relativa del medio.

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \quad (1.4)$$

➔ Efectos del campo magnético:

- Generación de tensiones.
- Generación de fuerzas.

1.1.2) La ley de Faraday:

$$e = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.5)$$

e : Fuerza Electromotriz (FEM).

N : Número de Vueltas.

Φ : Flujo Magnético.

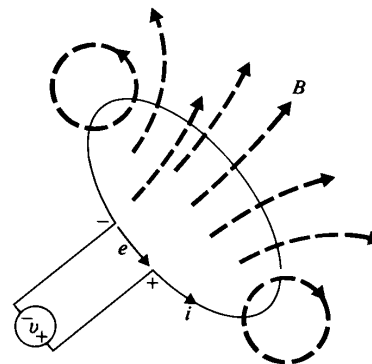


Fig.1.3.: Ley de Faraday en una espira.

1.1.3) Fuerzas de origen electromagnético.

$$\vec{F} = i \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (1.6).$$

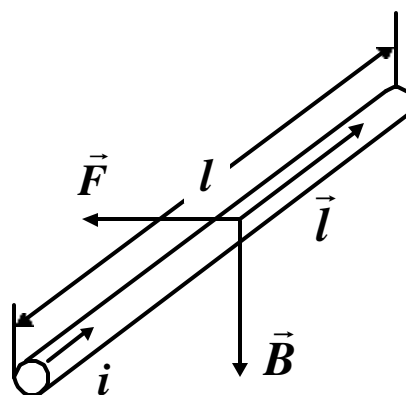


Fig.1.4.: Fuerza en un conductor sobre un campo magnético.

1.1.4) La ley de Ampère:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i \quad (1.7).$$

$$H = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (1.8).$$

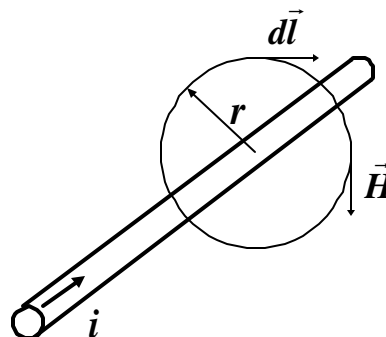


Fig.1.5.: Aplicación de la ley de Ampère.

Ejemplo 1.1: Dos conductores paralelos. Calcule la fuerza entre ellos. Determine si la fuerza es de atracción o de repulsión.

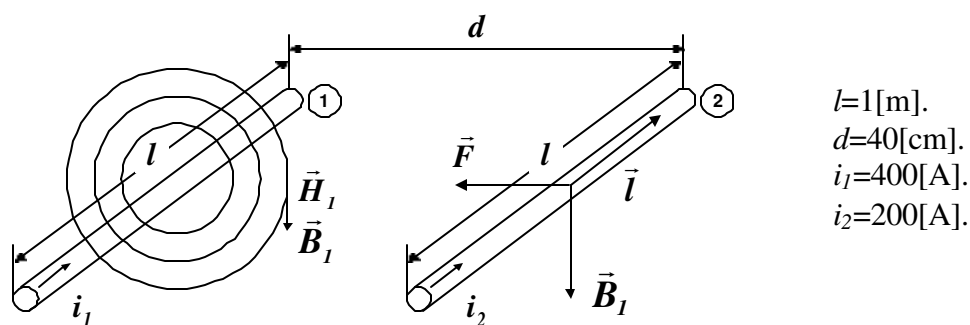


Fig.1.6.: Fuerzas entre conductores paralelos.

1.2) MATERIALES MAGNÉTICOS.

1.2.1) La característica de magnetización.

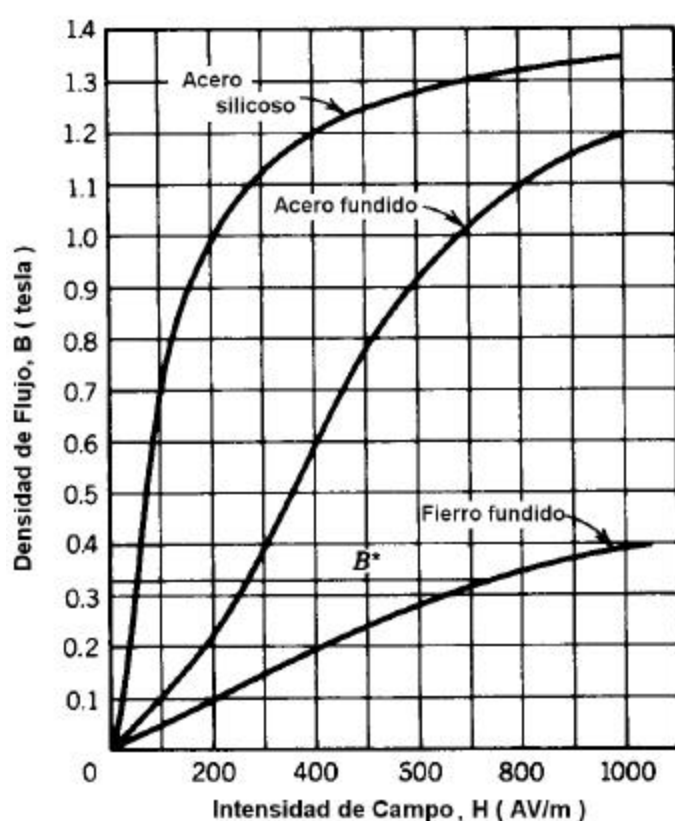


Fig.1.7.: Característica de magnetización de algunos materiales.

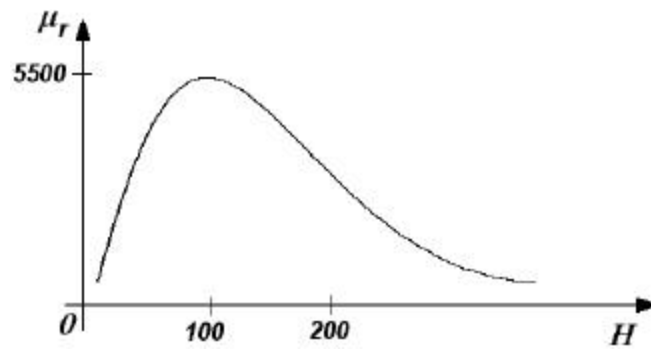


Fig.1.8.: Variación de la Permeabilidad.

➔ **Tipos de permeabilidad.**

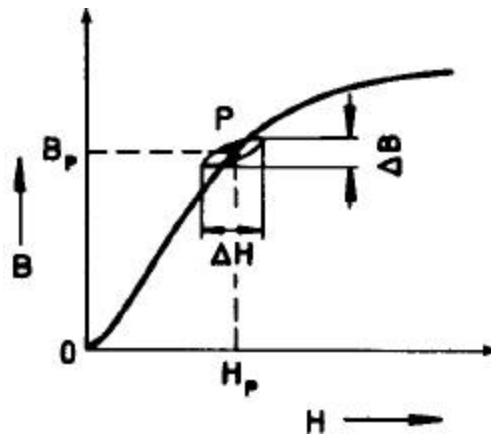


Fig.1.9.: Sobre la determinación de la Permeabilidad.

- **Permeabilidad normal o absoluta:**

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.9).$$

- **Permeabilidad diferencial:**

$$\mu_d = \frac{dB}{dH} \quad (1.10).$$

- **Permeabilidad incremental:**

$$\mu_{inc} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1.11).$$

1.2.2) Histéresis.

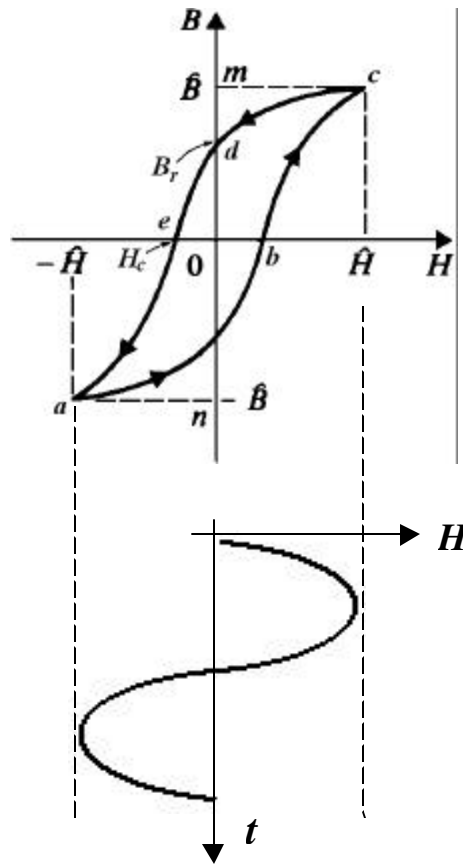


Fig.1.10.a.: Ciclo de histéresis.

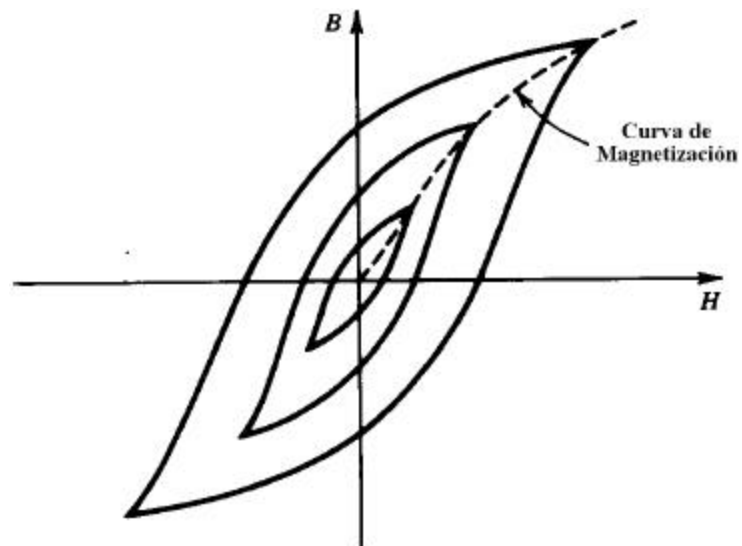


Fig.1.10.b.: Curva de magnetización normal de un acero típico.

1.2.3) Energía almacenada en el campo magnético.

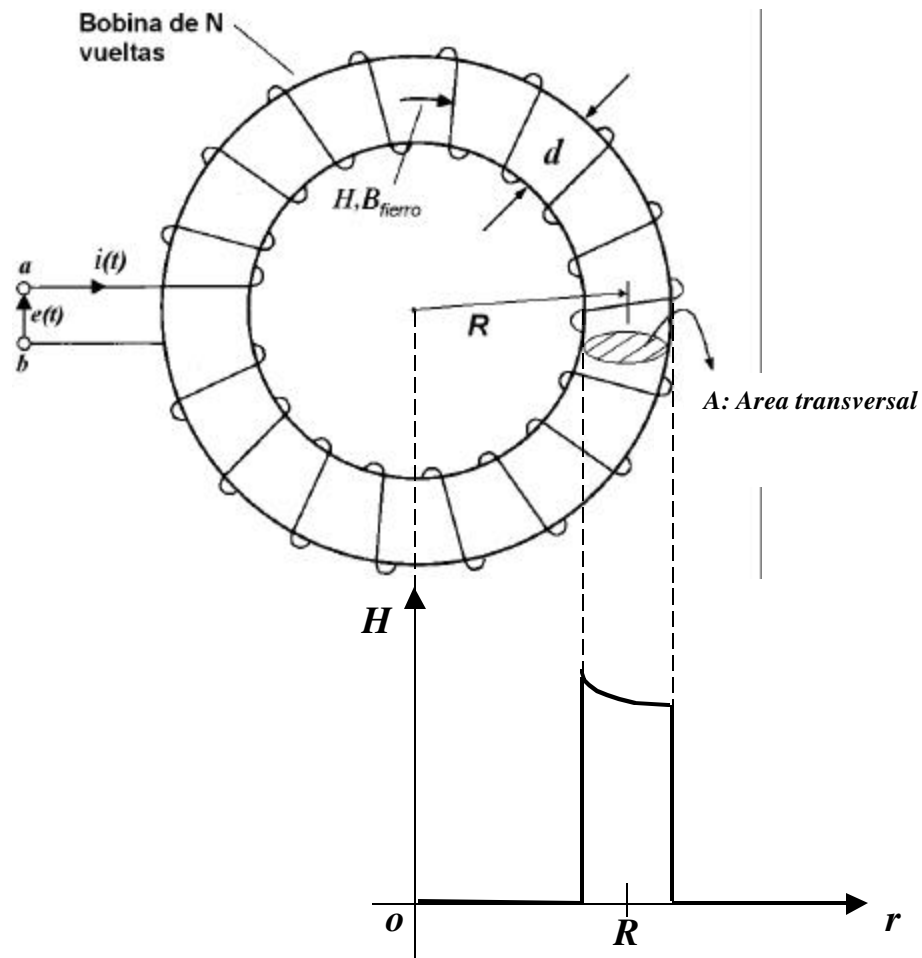


Fig.1.11.: Cuerpo magnético toroidal.

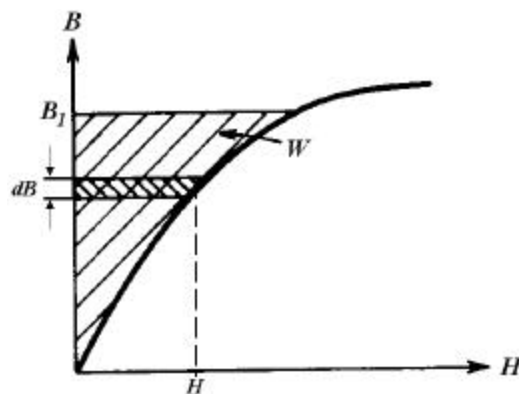


Fig.1.12.: Densidad de energía en un material magnético.

1.2.4) Pérdidas por histéresis.

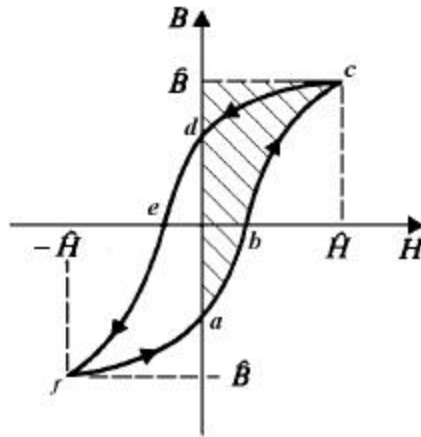


Fig.1.13.a: Energía absorbida.

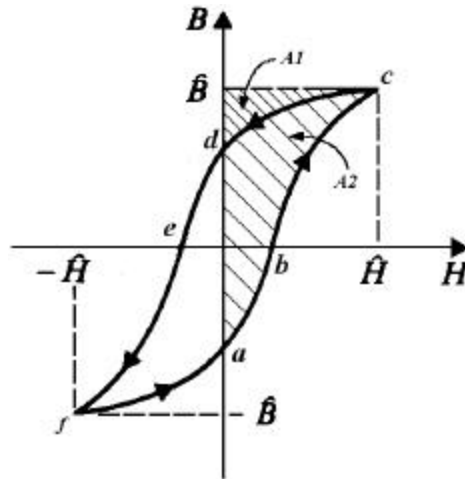


Fig.1.13.b: Energía devuelta.

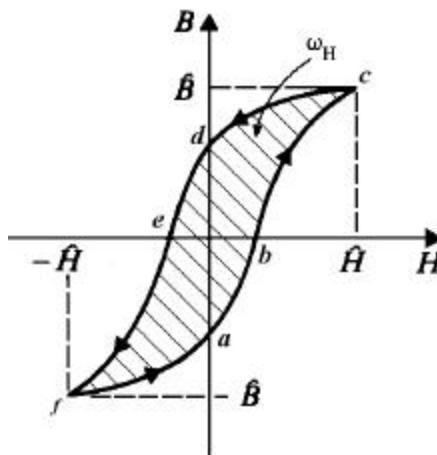


Fig.1.13.c: Energía disipada en un material con histéresis.

1.2.5) Pérdidas por corrientes parásitas.

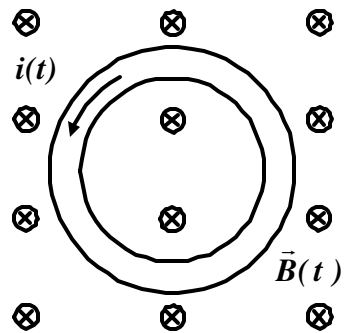


Fig.1.14.: Corriente en un anillo en cortocircuito.

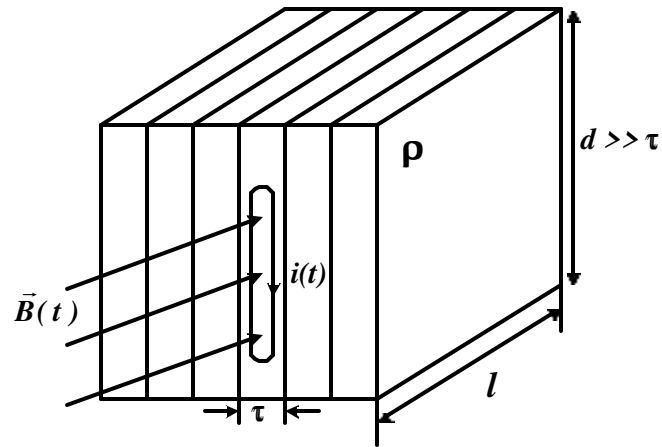


Fig. 1.15.: Corrientes parásitas en un material.

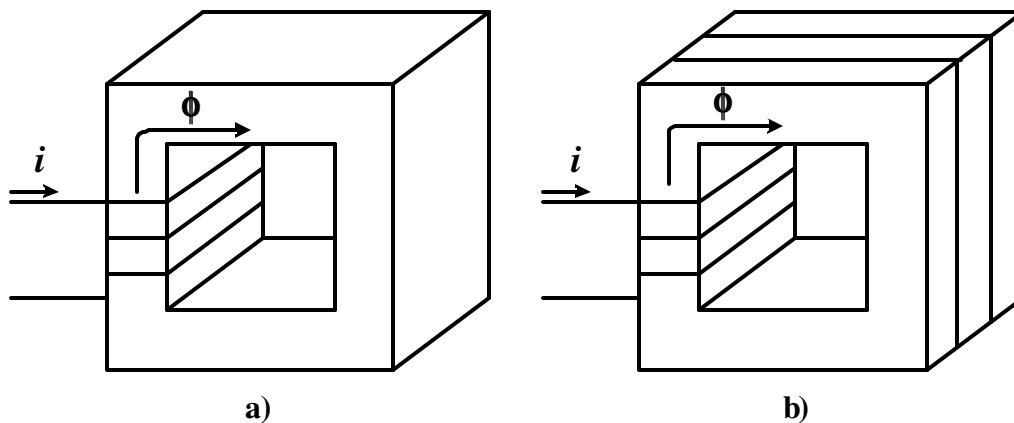


Fig.1.16.: a) Devanado con núcleo macizo; b) Devanado con núcleo laminado.

1.2.6) Ferrita.

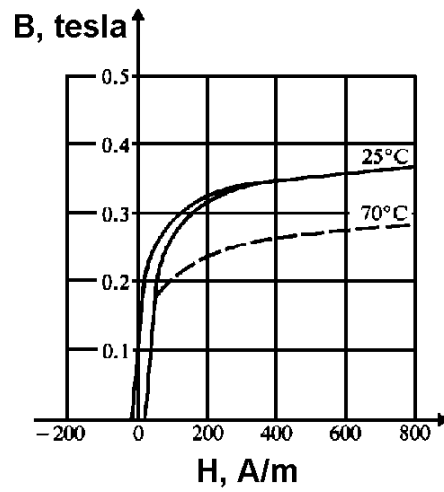


Fig.1.17.: Característica B-H para Ferrita.

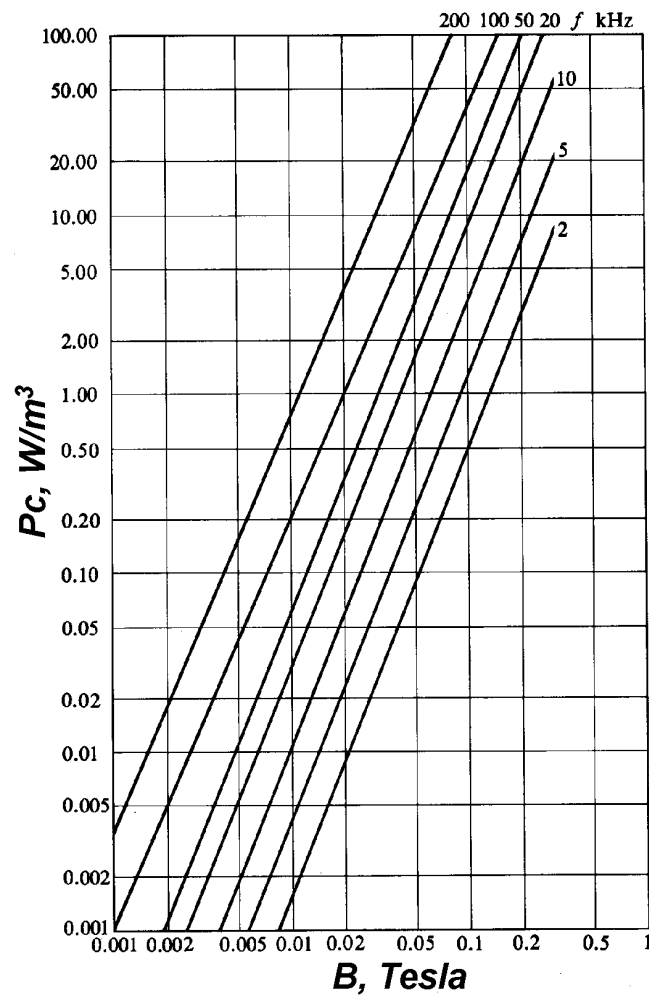


Fig.1.18.: Pérdidas en el fierro para la ferrita de la figura 1.17.

1.2.7) Imanes permanentes.

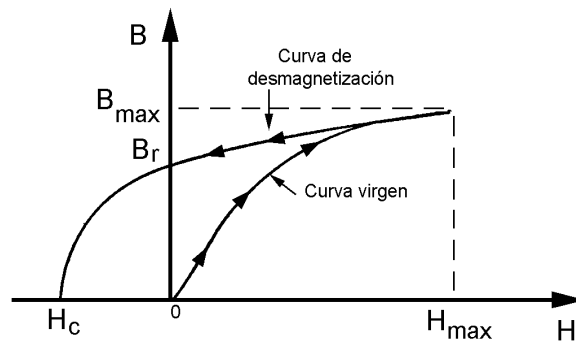


Fig.1.19.: Curva de un material de imán permanente imanado hasta la saturación y luego desimanado.

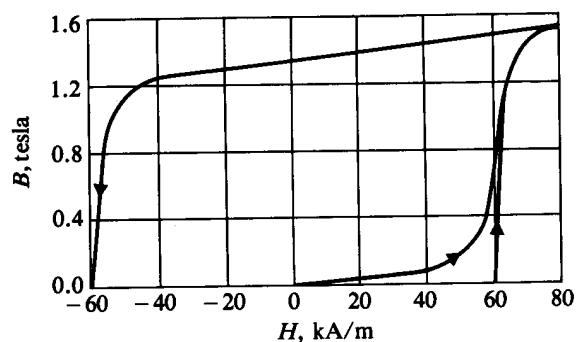


Fig.1.20.: Ciclo de histéresis de un material para imán permanente.

1.3) CIRCUITOS MAGNÉTICOS.

1.3.1) Consideraciones para el estudio de sistemas magnéticos.

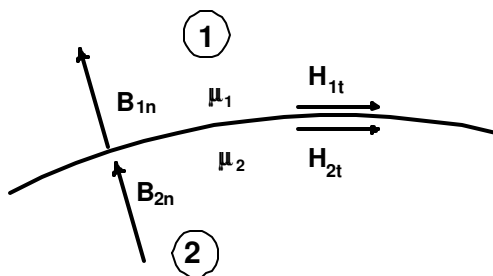


Fig.1.21.a.: Frontera de dos materiales Magnéticos.

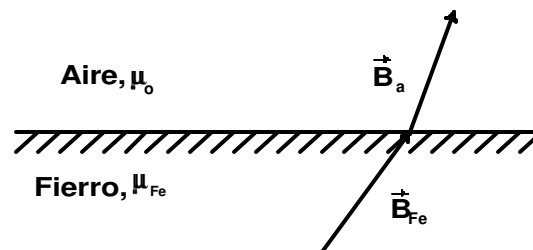


Fig.1.21.b.: Frontera hierro-aire.

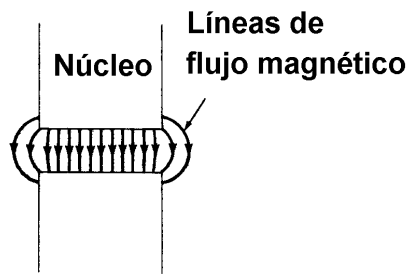


Fig.1.22.: Campos en un entrehierro.

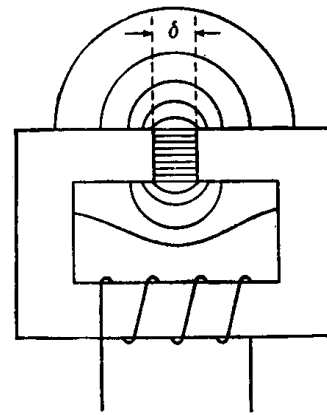


Fig.1.23.: Distribución de campo.

1.3.2) El concepto de circuito magnético.

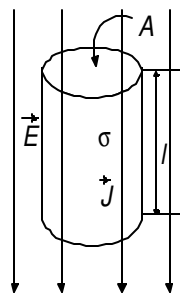


Fig.1.24.: Conductor en un campo eléctrico.

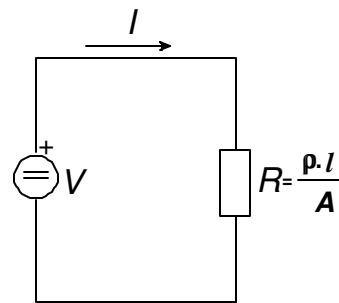


Fig.1.25.: Circuito eléctrico equivalente.

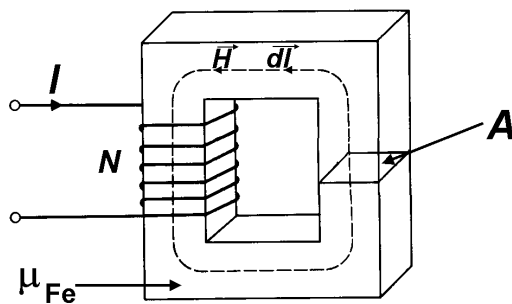


Fig.1.26.: Sistema magnético simple.

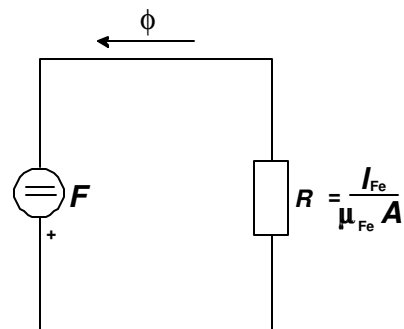


Fig.1.27.: Circuito magnético equivalente.

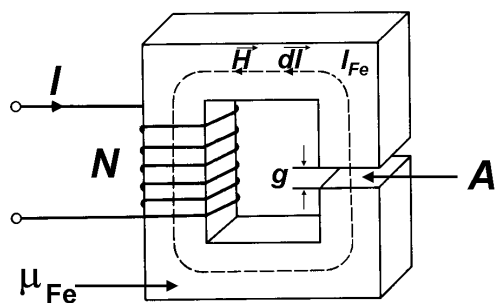


Fig.1.28.: Sistema magnético con entrehierro.

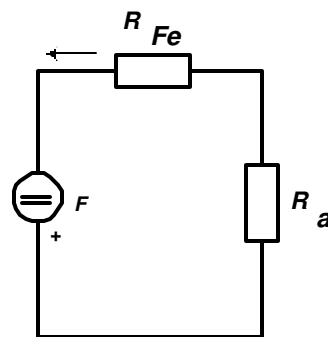


Fig.1.29.: Circuito magnético equivalente.

<i>Circuito Eléctrico</i>	<i>Circuito Magnético</i>
Corriente I [A]	Flujo Φ [Wb]
Tensión(FEM) V [v]	FMM. F [A]
Resistencia R [Ω]	Reluctancia $\mathcal{R}$ [1/H]
Conductancia G[S]	Permeancia Λ [H]
Conductividad [σ]	Permeabilidad μ

Tabla.1.1.: Analogía entre los circuitos eléctrico y magnético.

1.3.3) La Ley de Faraday aplicada a un campo magnético periódico.

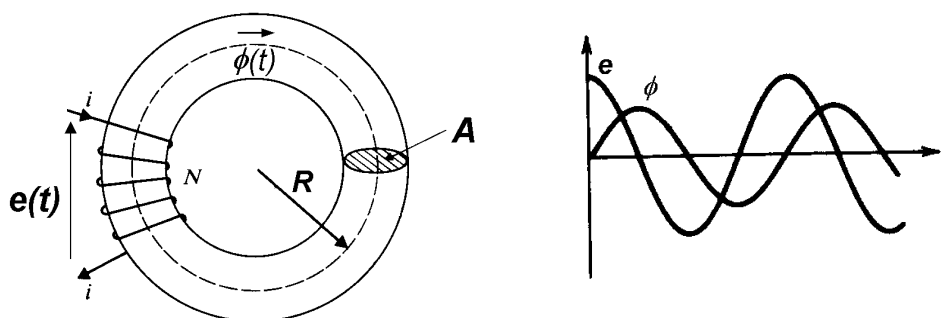


Fig.1.30.: Relación entre flujo y tensión.

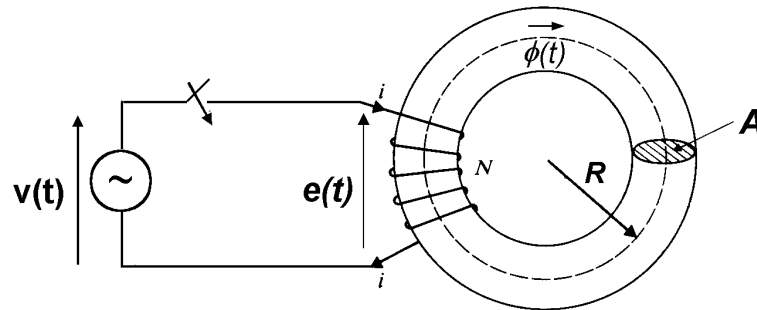


Fig.1.31.: Sistema magnético alimentado por una fuente de tensión independiente.

1.3.4) Comportamiento de un sistema magnético.

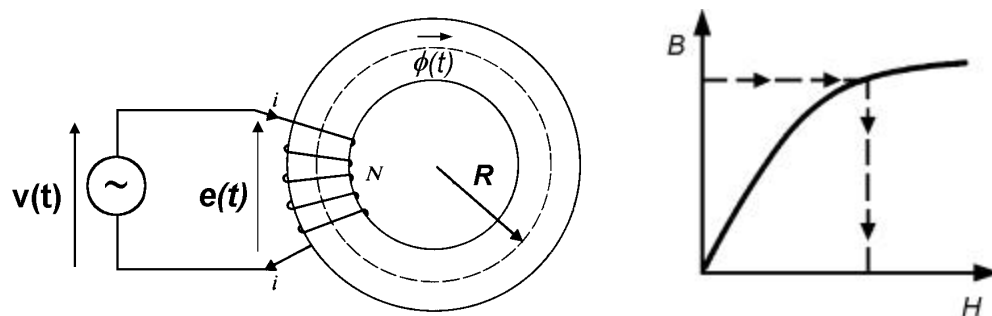


Fig.1.32.: Sistema magnético de corriente alterna.

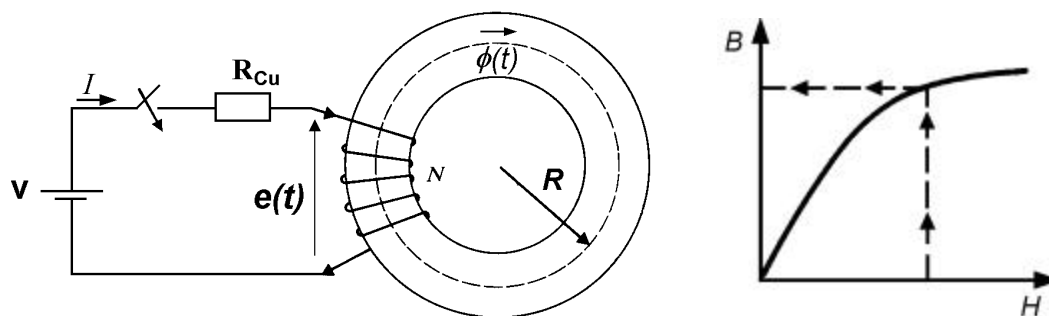


Fig.1.33.: Sistema magnético con corriente continua.

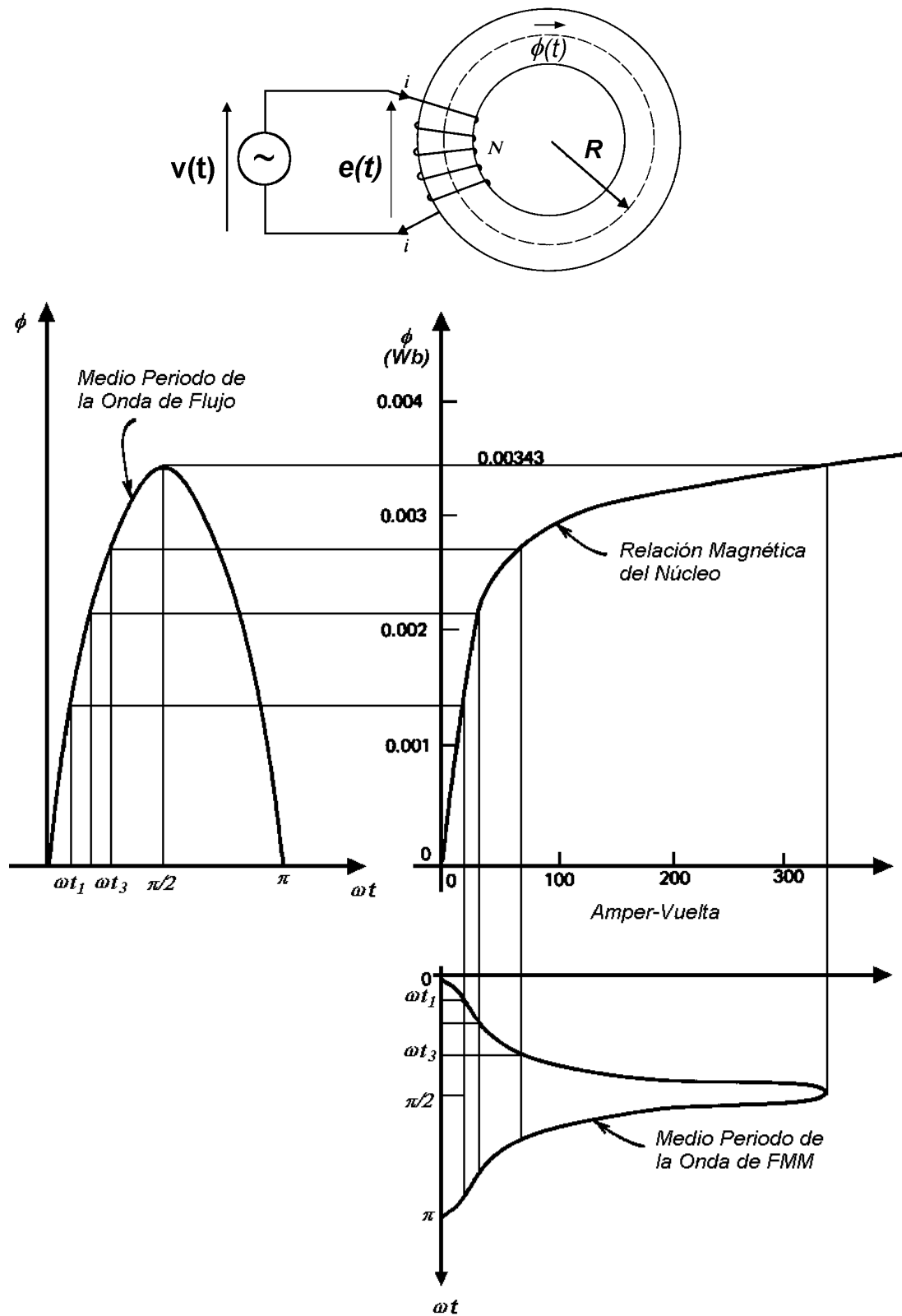


Fig.1.34.: Corriente magnetizante de un sistema magnético.

1.4) MODELACIÓN DEL REACTOR.

1.4.1) La Inductancia.

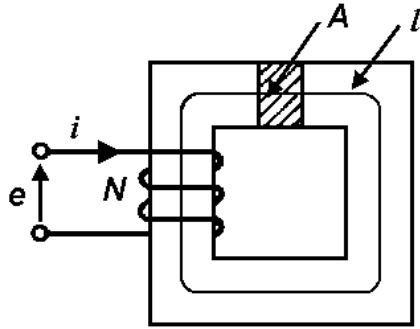


Fig.1.35.: Reactor.

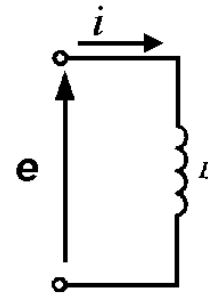


Fig.1.36.: Inductancia.

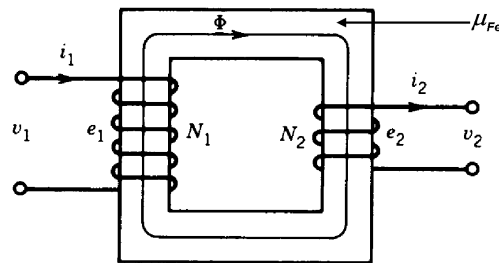


Fig.1.37.: Acoplamiento entre dos devanados.

1.4.2) Modelado de un reactor con saturación.

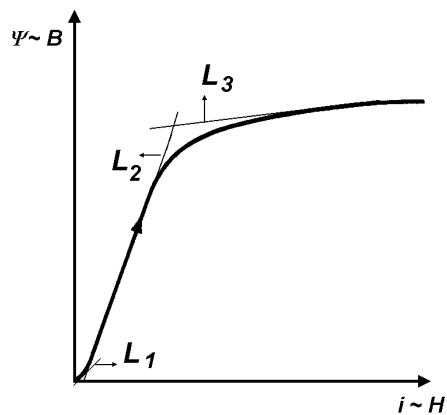


Fig.1.38.: Curva de magnetización.

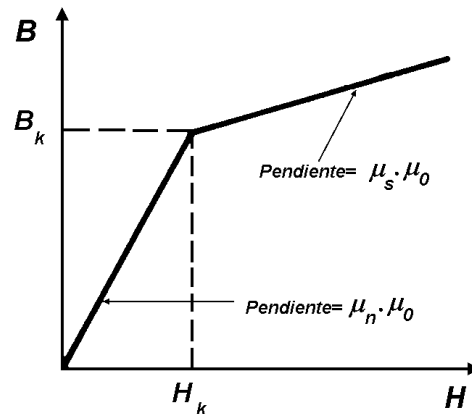


Fig.1.39.: Linealización por tramos.

1.4.3) Modelado de un reactor con dispersión magnética.

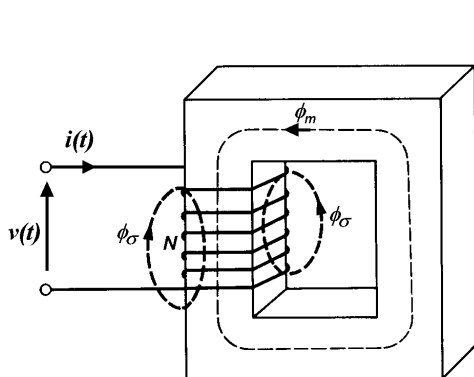


Fig.1.40.: Sistema magnético con dispersión.

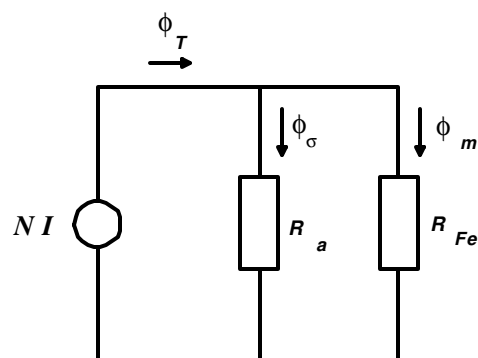


Fig.1.41.: Circuito magnético equivalente.

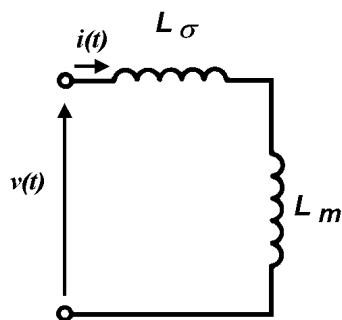


Fig1.42.: Circuito equivalente de un reactor con dispersión.

1.4.4) Modelado de las pérdidas de un reactor.

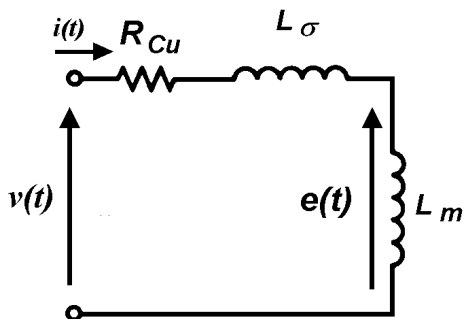


Fig.1.43.: Circuito equivalente del reactor incluyendo pérdidas del devanado (Cobre).

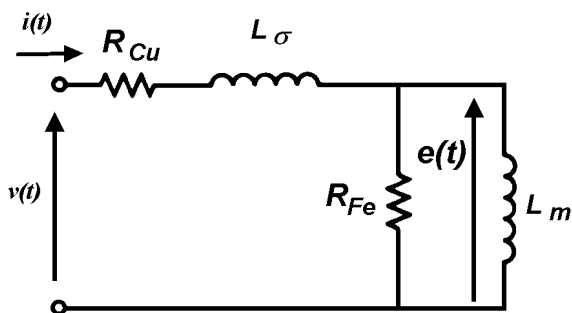


Fig.1.44.: Circuito equivalente del reactor incluyendo pérdidas del cobre y del hierro.

CAPÍTULO 2

EL TRANSFORMADOR

2.1) TEORÍA DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

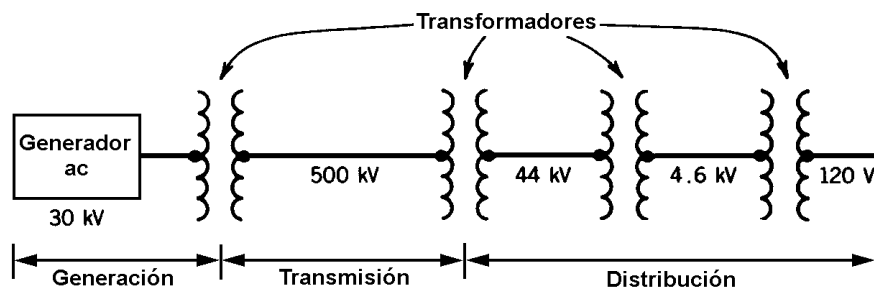


Fig.2.1.: Aplicaciones de transformadores.

2.1.1) Relaciones básicas del transformador ideal.

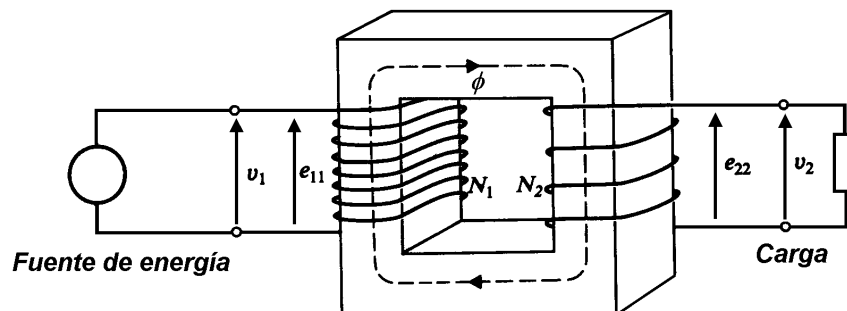


Fig.2.2.: Transformador monofásico con núcleo de hierro.

➔ Relación de transformación de tensión:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (2.1)$$

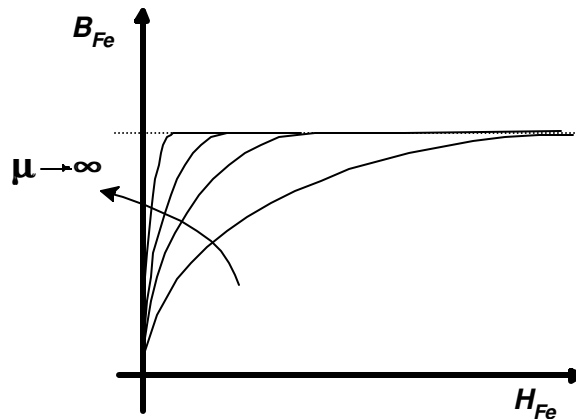


Fig.2.3.: Característica de magnetización.

➔ Relación de transformación de corrientes:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (2.2)$$

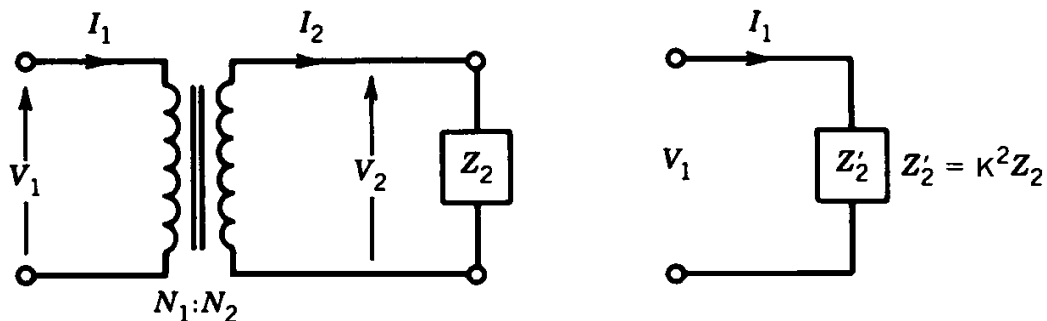


Fig.2.4.: Transformador con carga.

2.2) EL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO REAL.

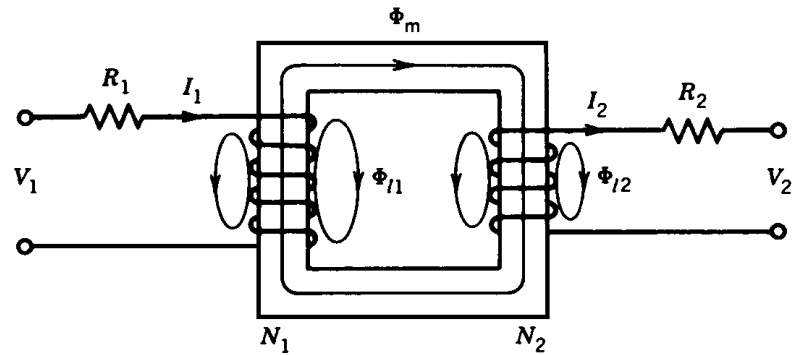


Fig.2.5.: Sistema magnético del transformador.

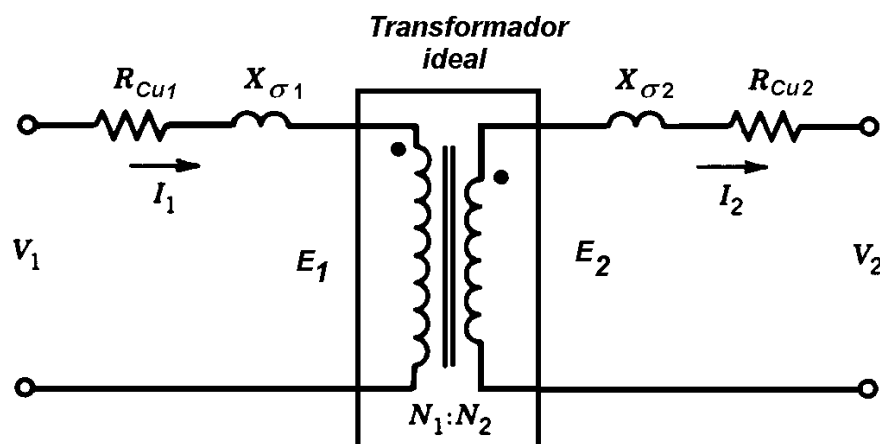


Fig.2.6.: Modelo eléctrico del transformador real.

2.2.1) Circuitos equivalentes del transformador.

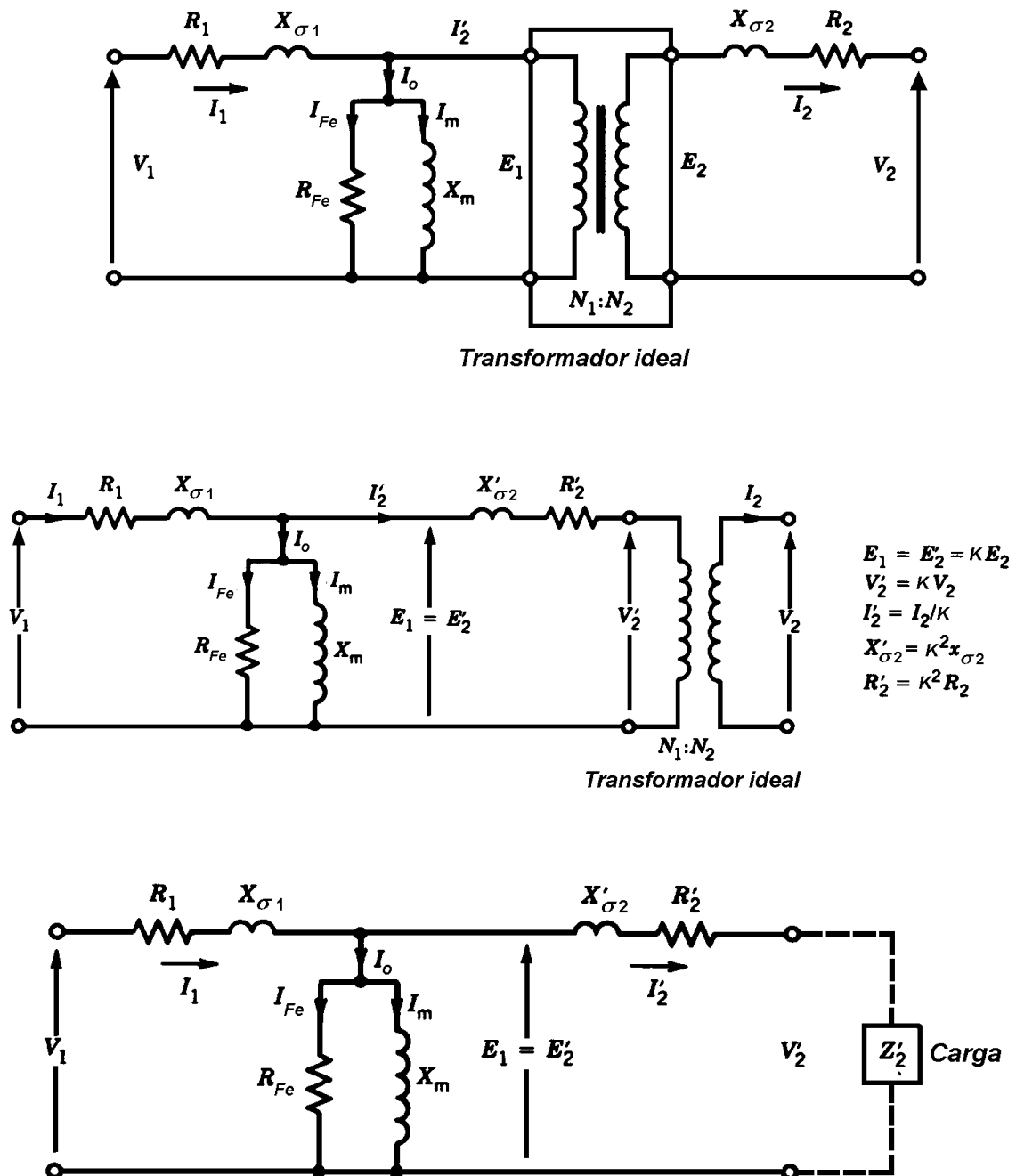


Fig.2.7.: Circuitos equivalentes.

2.2.2) Circuitos equivalentes aproximados.

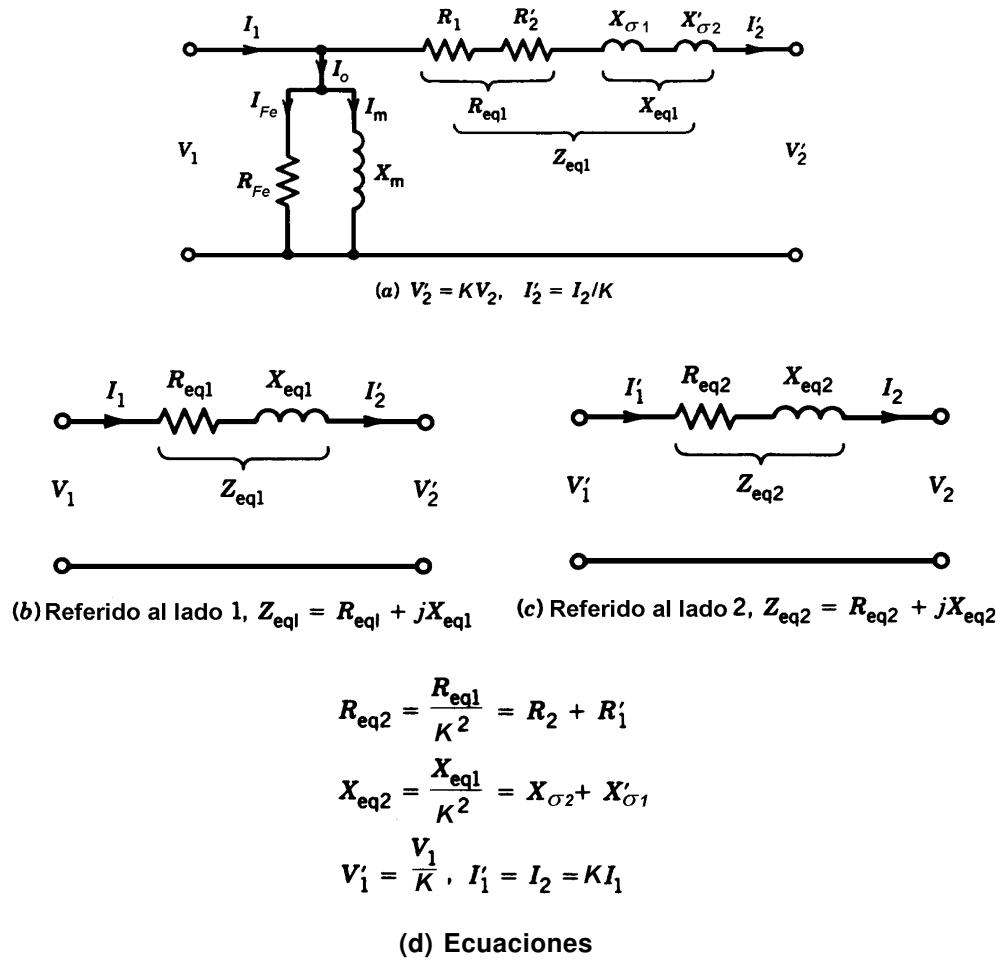


Fig.2.8.: Circuitos equivalentes aproximados.

2.2.3) Convenciones de variables.

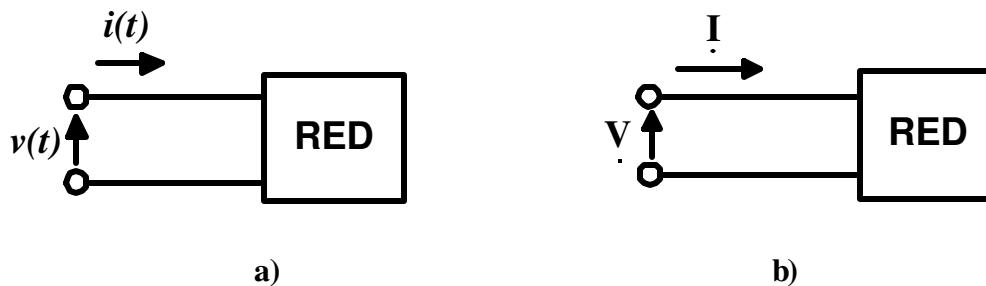
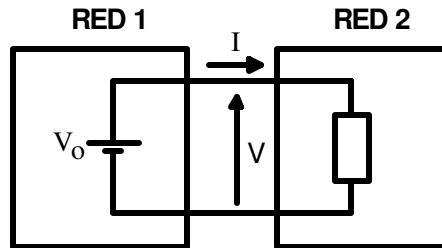
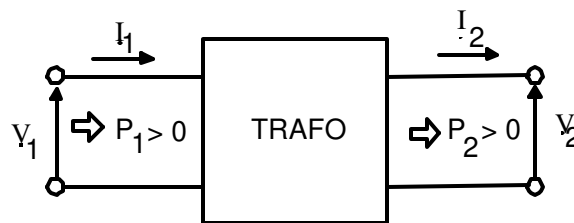
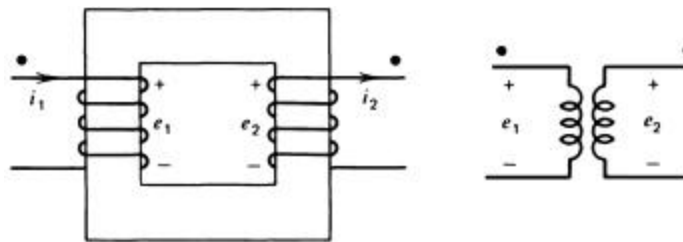
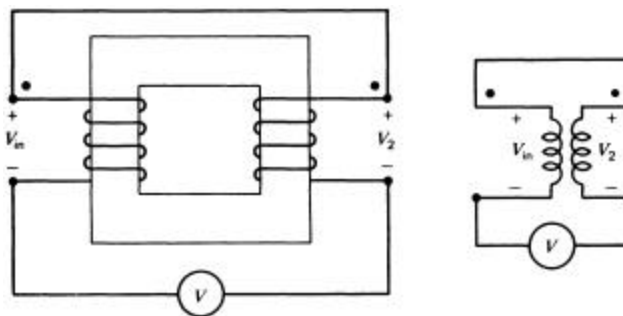


Fig.2.9.: a) Red de corriente alterna.

b) Variables fasoriales.

Ejemplo 2.1.:**Fig2.10.:** Definición de variables.**Fig2.11.:** Convención de variables en el transformador.**2.2.4) Polaridad en un transformador.****Fig.2.12.:** Convención de puntos para señalar la polaridad.**Fig.2.13.:** Test de polaridad.

2.2.5) El diagrama fasorial.

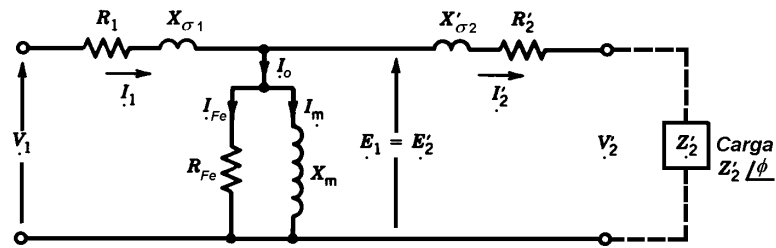


Fig.2.15.: Transformador con carga.

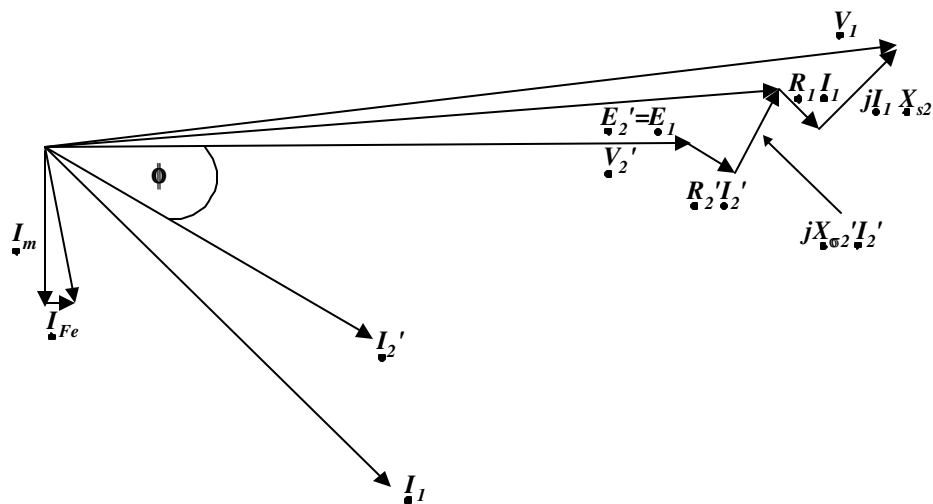


Fig2.16.: Diagrama fasorial del transformador con carga.

2.2.6) Sistemas en por unidad.

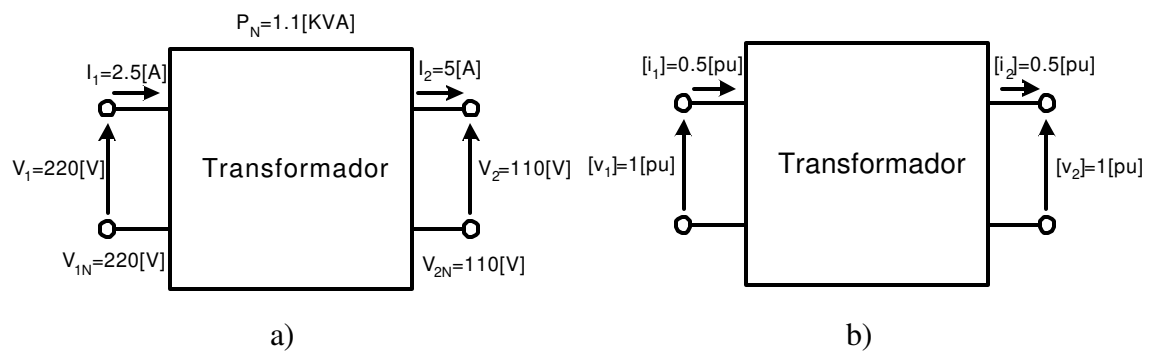


Fig.2.17.: Variables de un transformador. **a)** En valores absolutos.; **b)** En por unidad.

2.3) CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR.

2.3.1) El transformador en vacío.

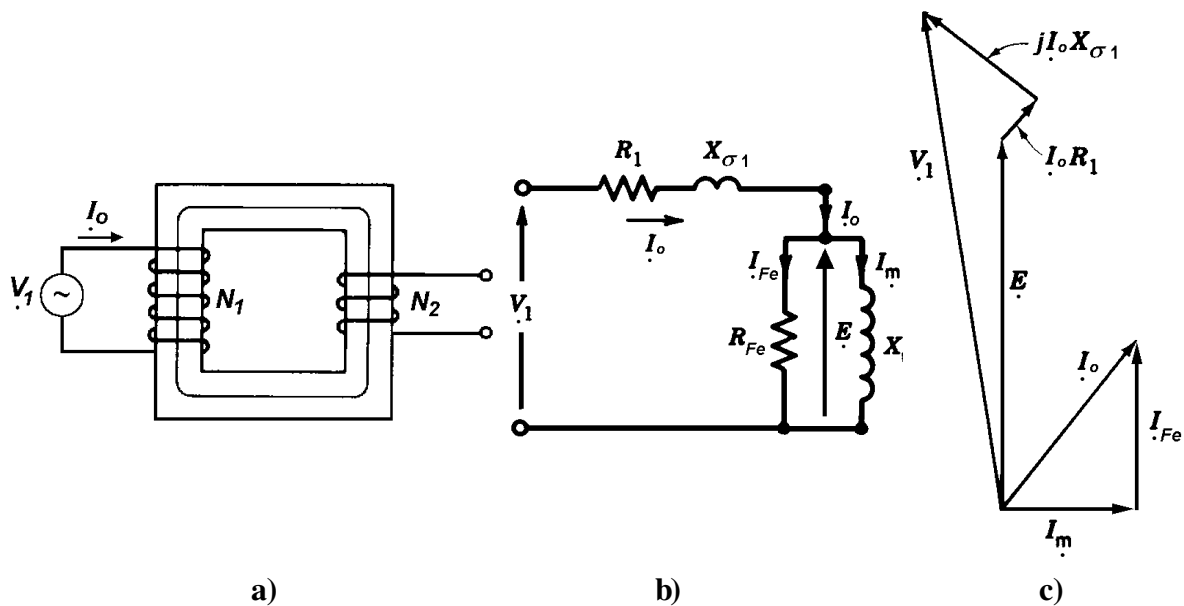


Fig.2.18.: a) Transformador en vacío. b) Circuito equivalente. c) Diagrama fasorial.

2.3.2) El transformador en cortocircuito.

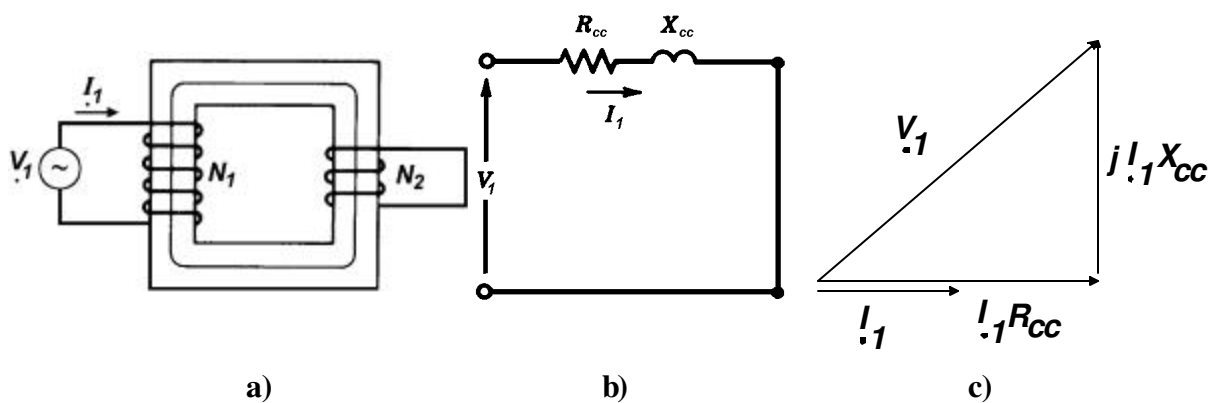


Fig.2.19. a) Transformador en cortocircuito. b) Circuito equivalente c) Diagrama fasorial.

2.3.3) La tensión de cortocircuito.

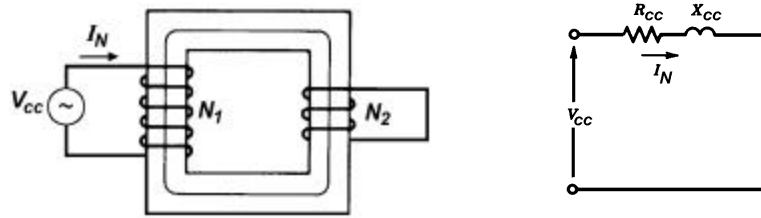


Fig.2.20.: Sobre la definición de la tensión de cortocircuito.

2.3.4) Regulación de tensión en el transformador.

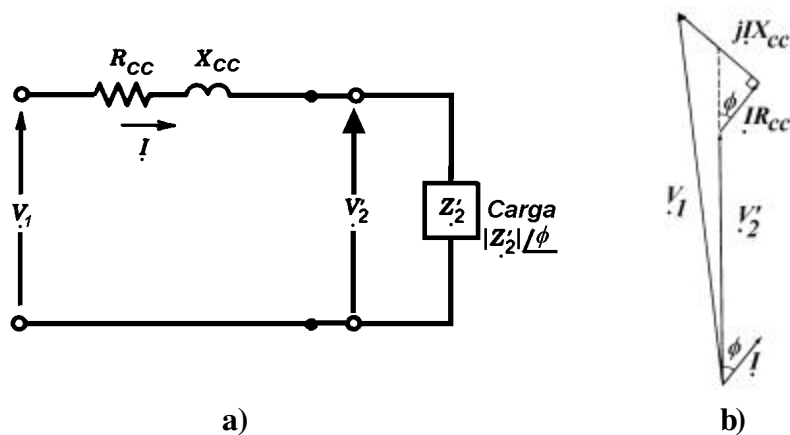


Fig.2.21.: a) Transformador con carga; b) Diagrama fasorial.

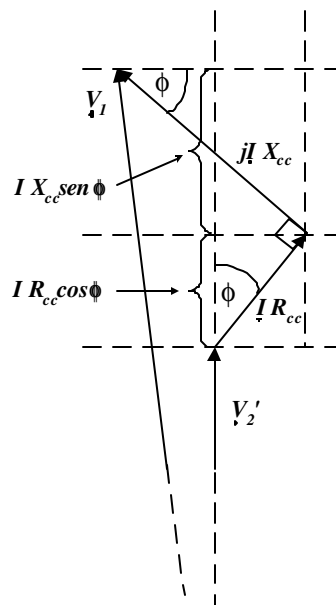


Fig.2.22.: Diagrama fasorial ampliado.

2.3.5) Transformadores en paralelo.

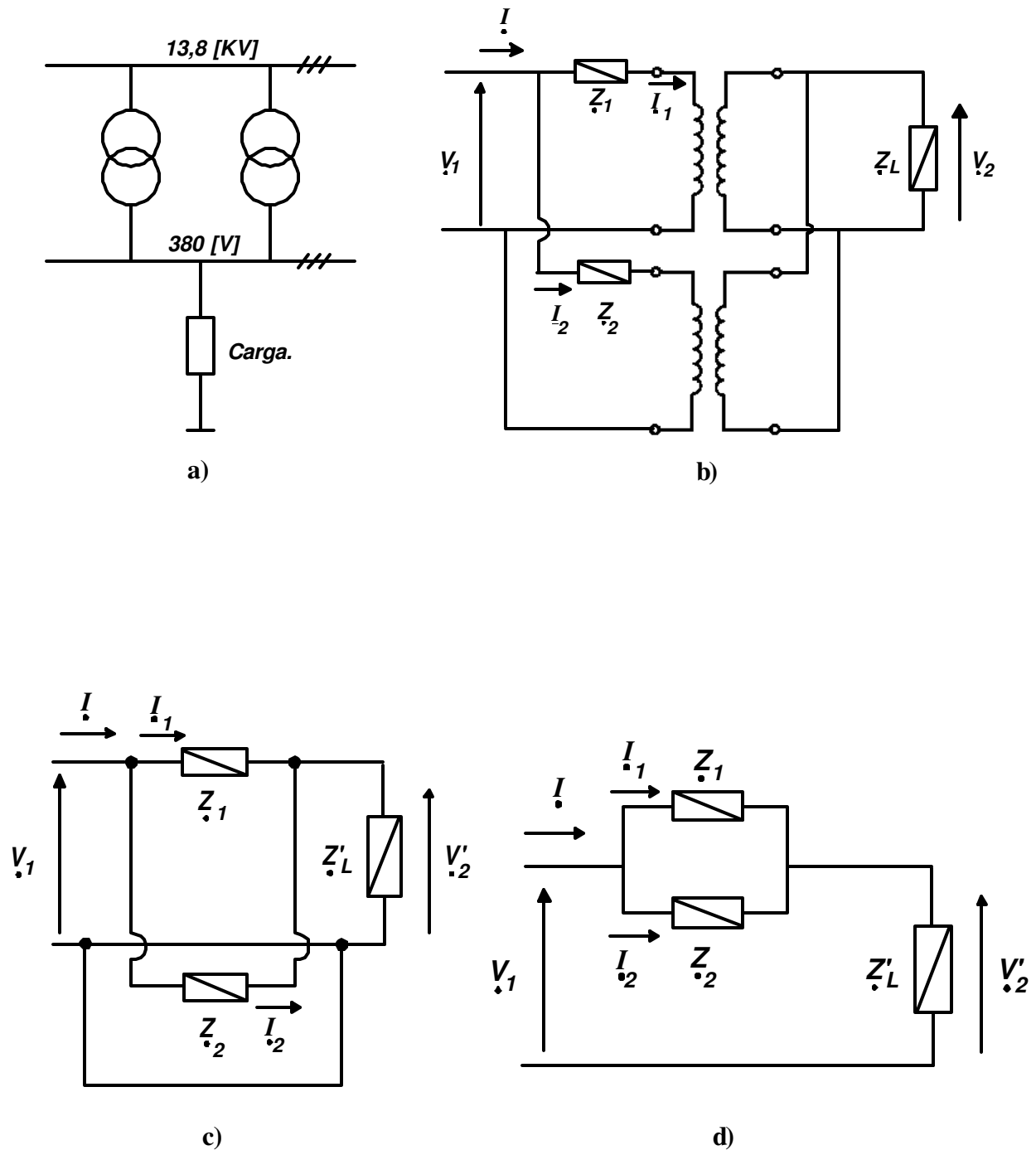


Fig.2.23.: a) Diagrama unilineal; b), c) y d) Circuitos equivalentes simplificados.

2.3.6) Corriente Inrush en un transformador.

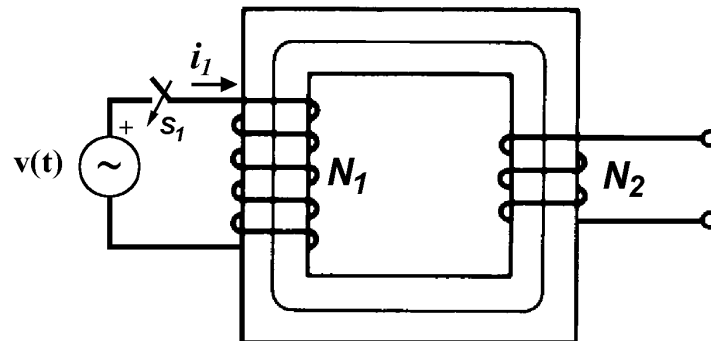


Fig.2.24.: Transformador en vacío.

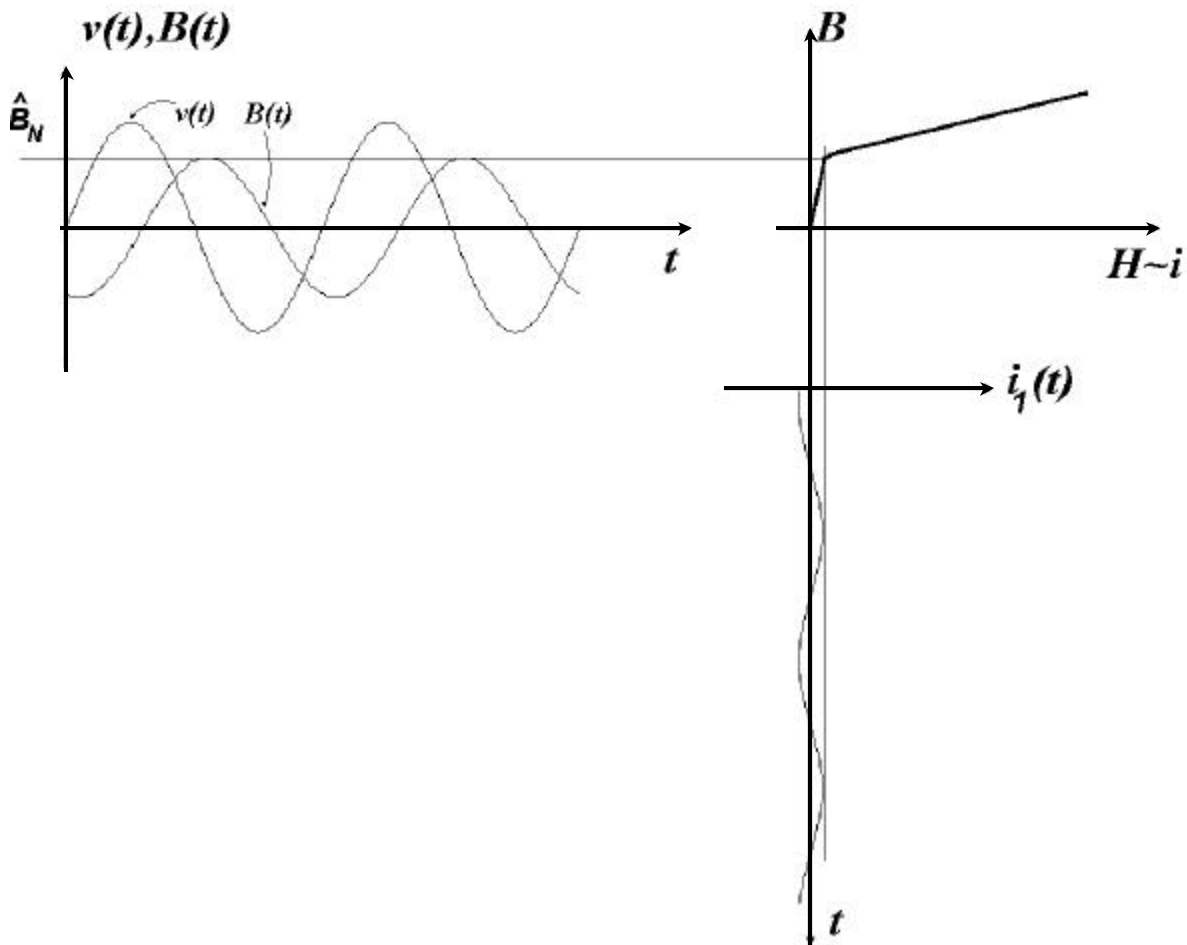


Fig.2.25.: Transformador en vacío en estado estacionario.

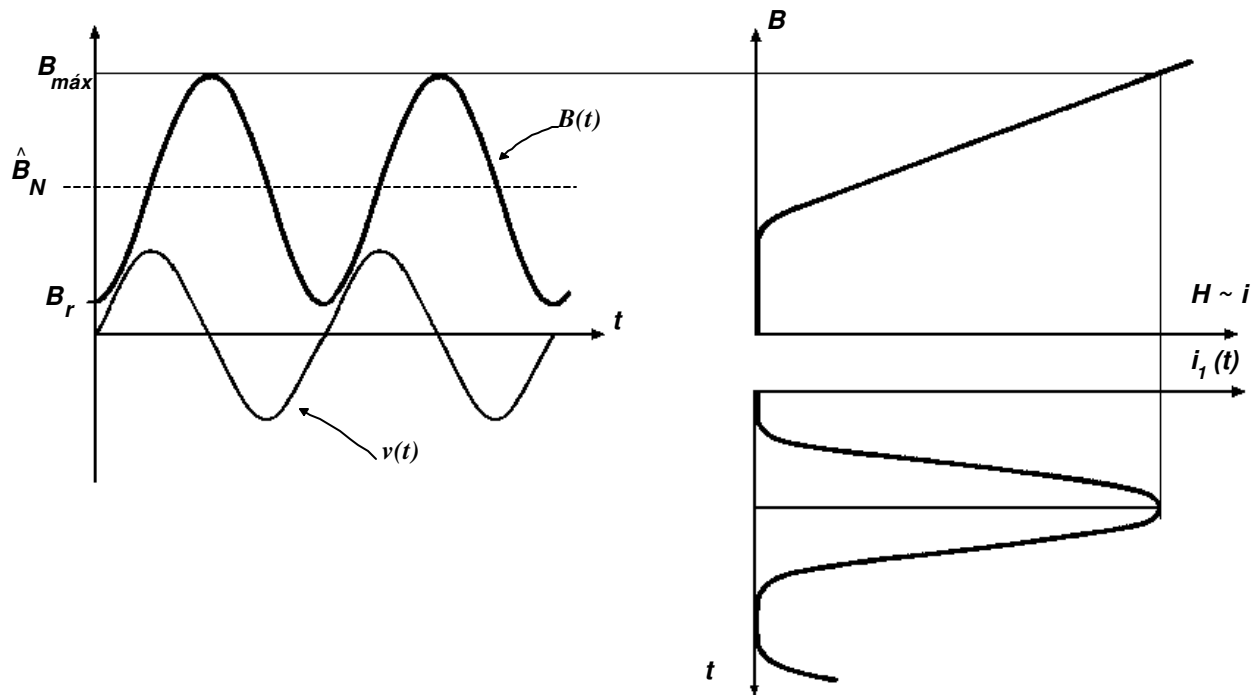


Fig.2.26.: Comportamiento de variables al conectar el transformador.

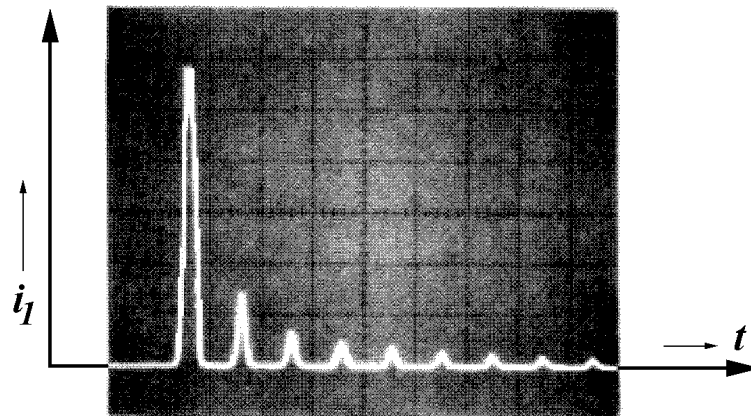


Fig2.27.: Corriente Inrush medida en un transformador.

2.3.7) Obtención de los parámetros del circuito equivalente

Ensayo de cortocircuito:

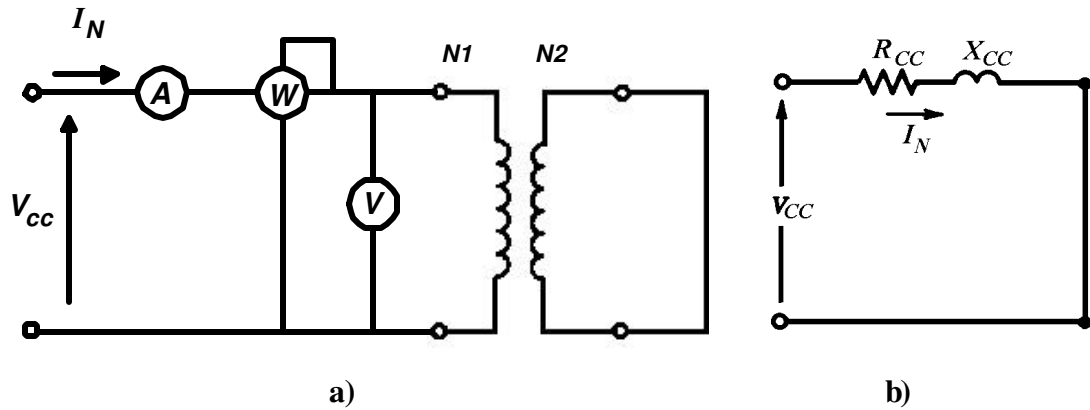


Fig.2.28.: a) Conexionado; b) Circuito equivalente.

Ensayo de vacío:

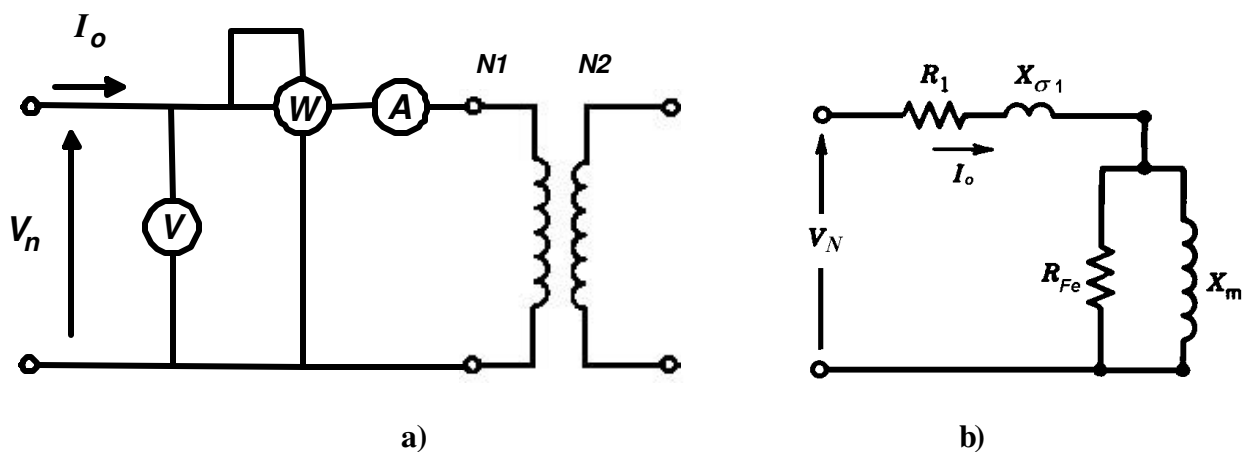


Fig.2.29.: a) Conexionado; b) Circuito equivalente.

2.4) EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.

2.4.1) El banco de transformadores monofásicos

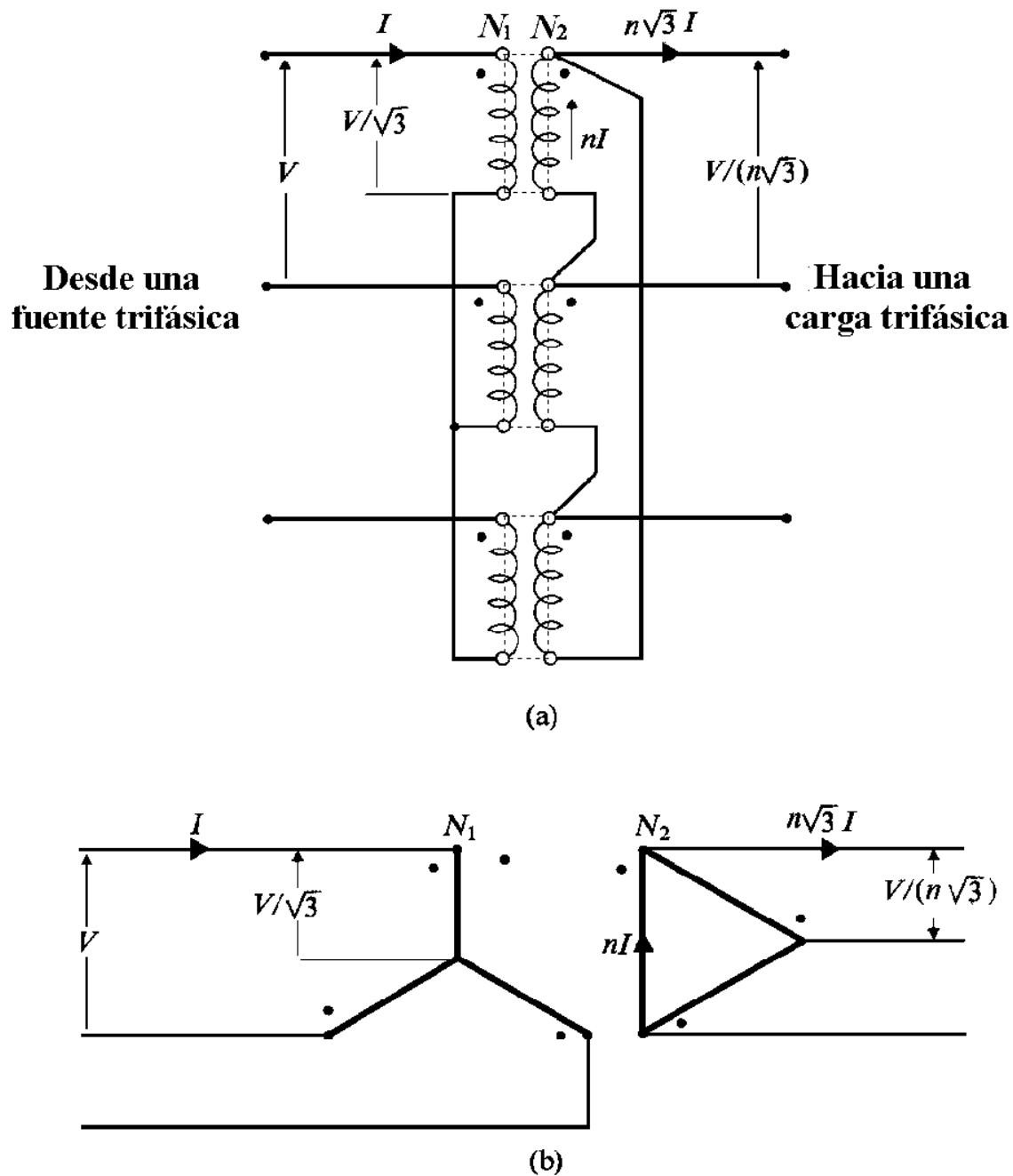


Fig.2.30.: a) Conexionado; b) Símbolo.

2.4.2) Construcción de un transformador trifásico

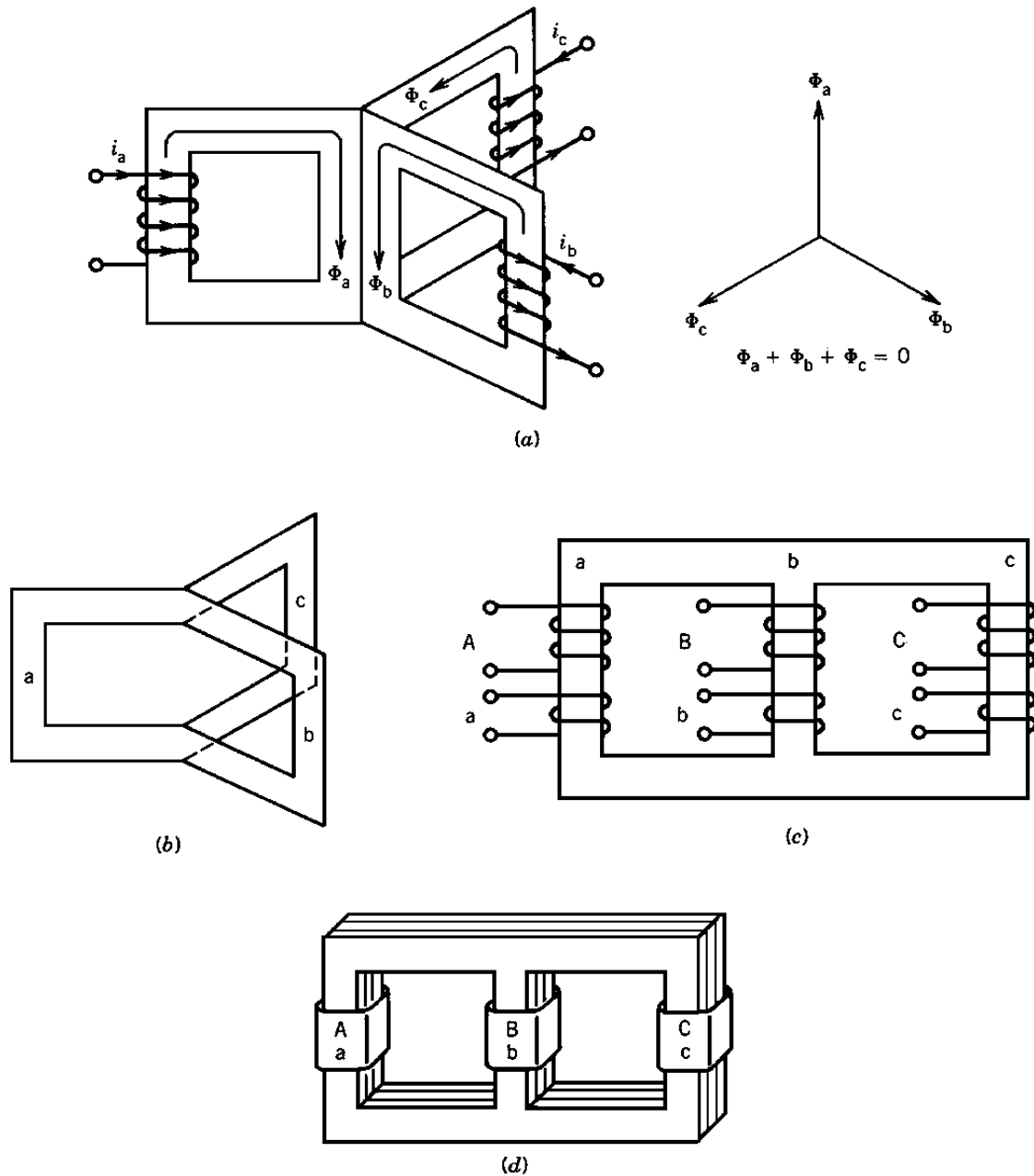


Fig.2.31.: Desarrollo del núcleo de un transformador trifásico.

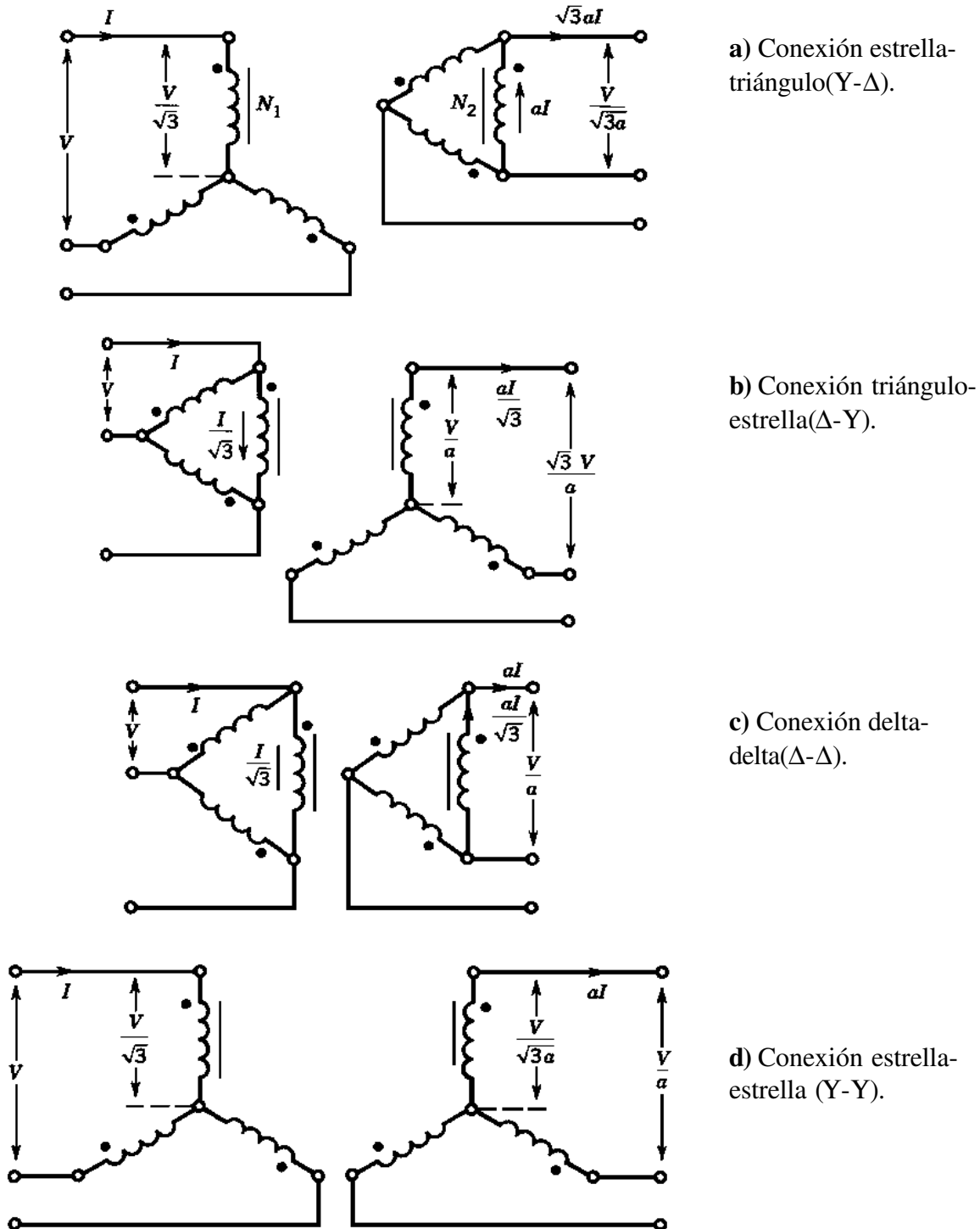


Fig.2.32.: Conexiones de transformadores trifásicos.

2.4.3) Desfase entre devanados

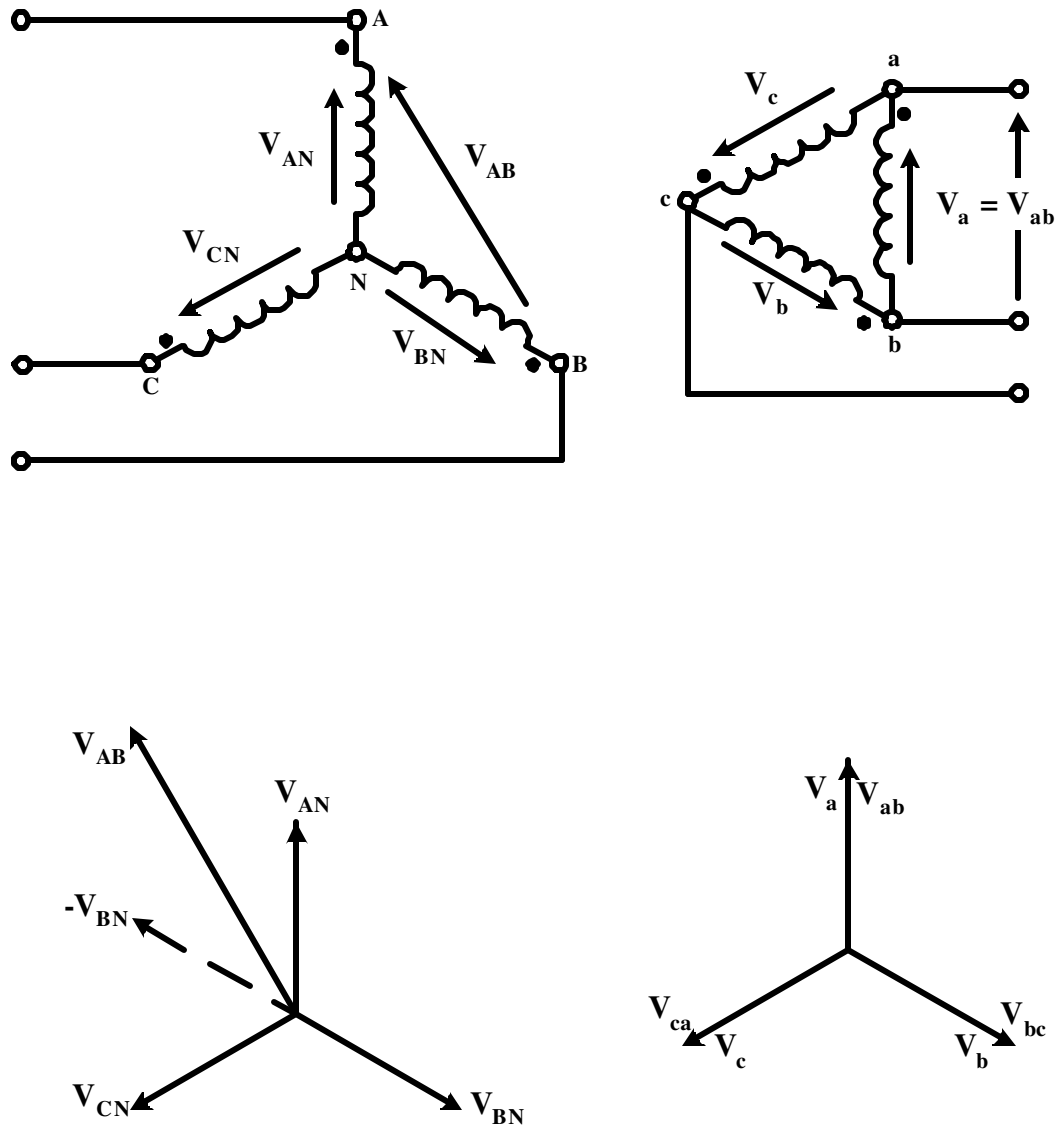


Fig.2.33.: Desfase entre las tensiones línea-línea en los devanados primario y secundario de un transformador trifásico.

2.4.4) El circuito equivalente por fase

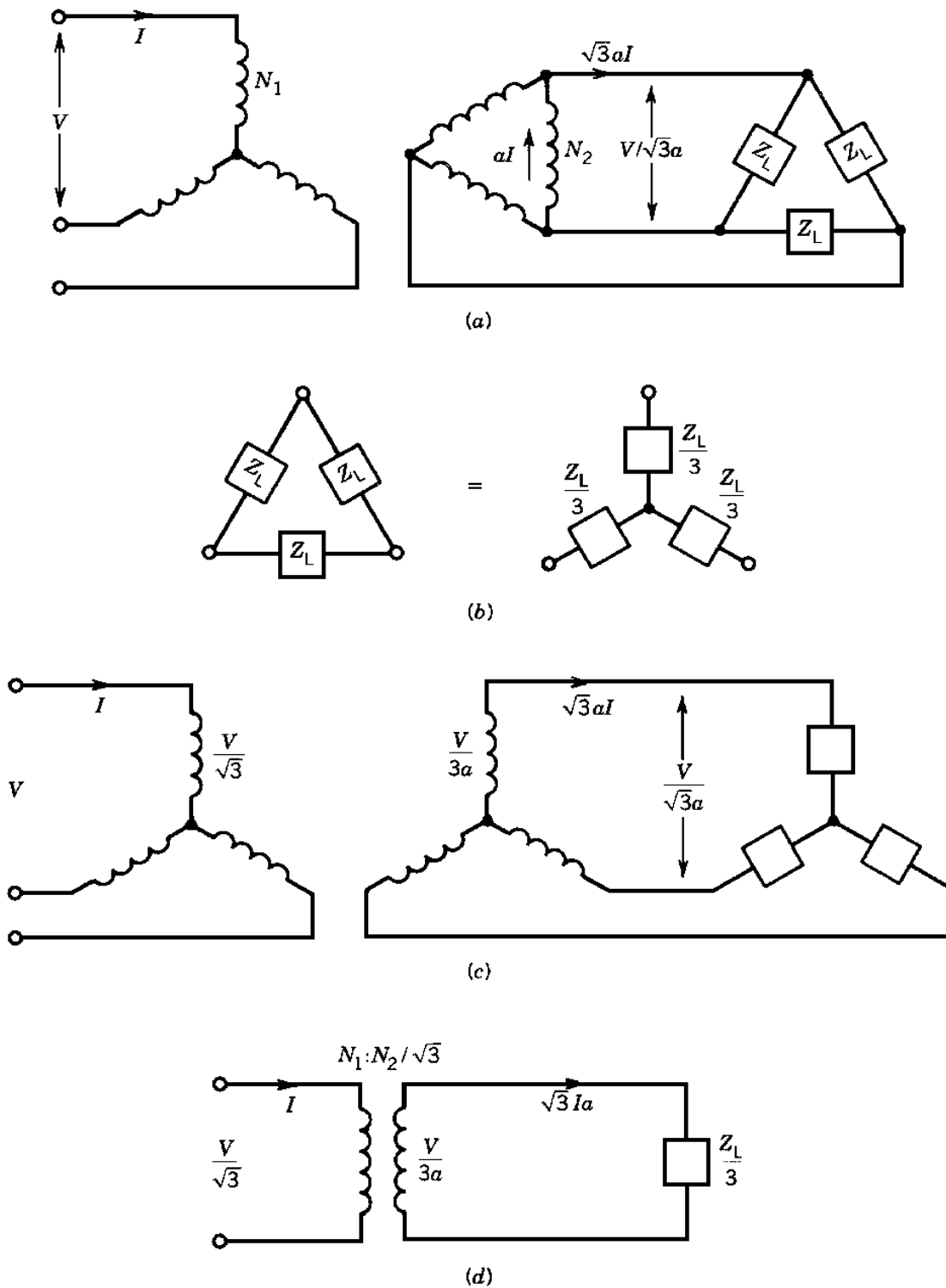


Fig.2.34.: Transformador trifásico y su circuito equivalente por fase.

2.4.5) Grupos de conexión en transformadores trifásicos.

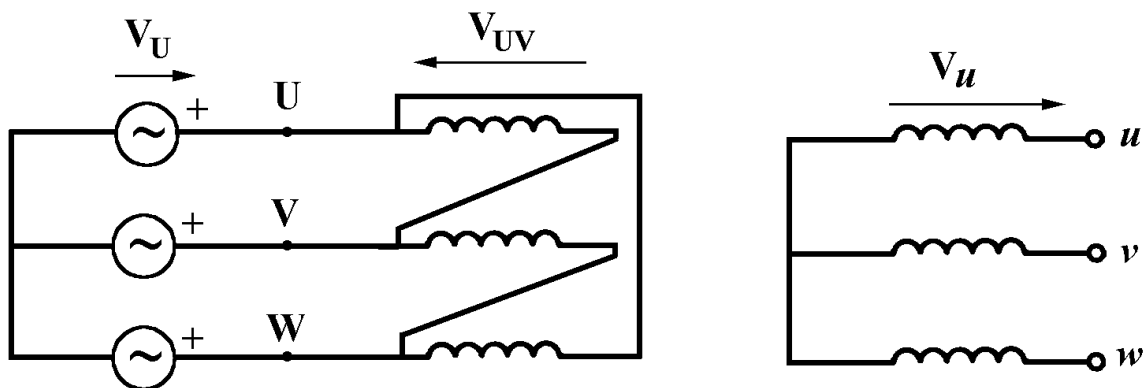


Fig.2.35. Transformador Delta-Estrella.

U, V, W : Devanados de alta tensión.	}	Norma Alemana.
u, v, w : Devanados de baja tensión.		
H1, H2, H3 : Devanados de alta tensión.	}	Norma Americana.
x1, x2, x3 : Devanados de baja tensión.		

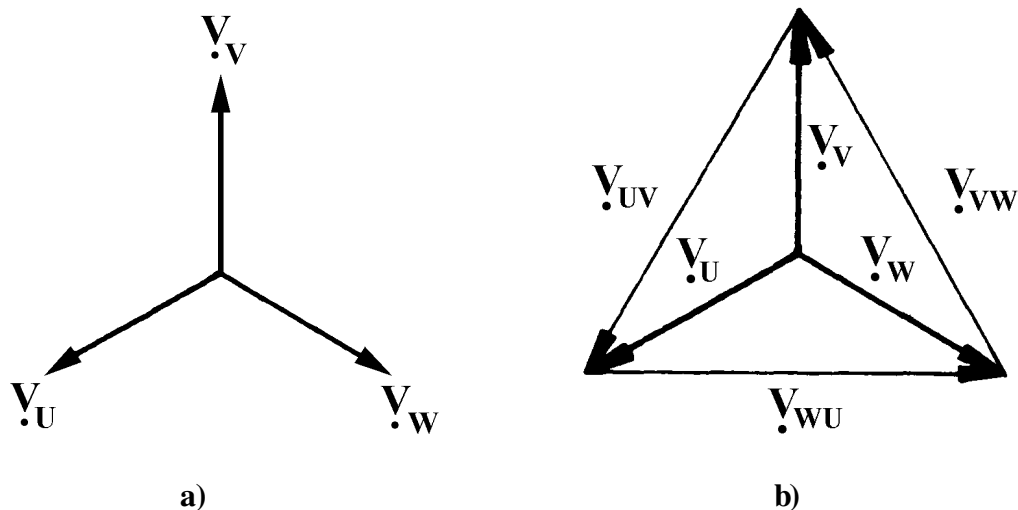


Fig.2.36. Diagramas fasoriales de la figura 2.32. **a)** Tensiones fase-neutro; **b)** Tensiones entre líneas y fase-neutro.

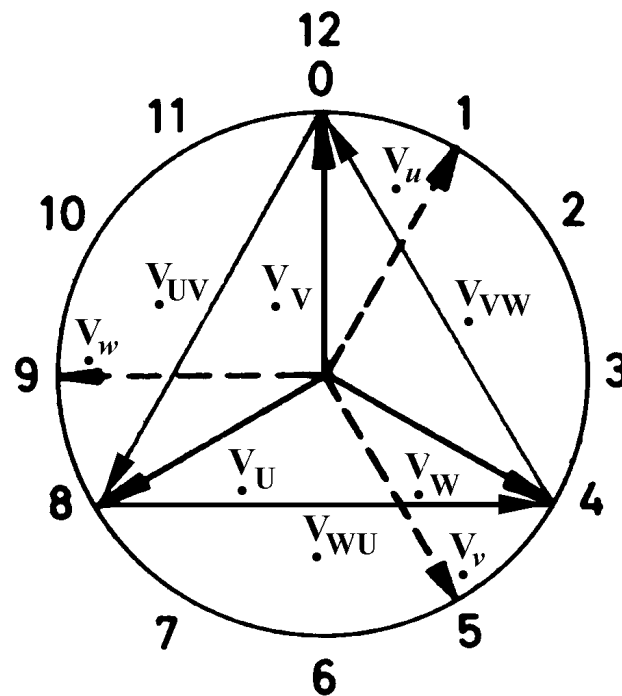
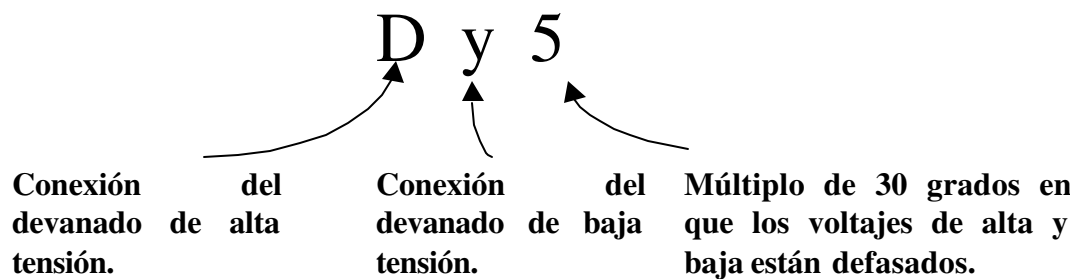


Fig.2.37.: Diagrama fasorial para la definición del grupo de conexión.

Desfase entre $\dot{V}_v$ y $\dot{V}_v$: 150 °.

Grupo de conexión del transformador de fig.2.35:



2.4.6) Grupos de conexión más usuales.

1	2	3		4	
		Diagrama fasorial		Esquema de conexiones	
Cifra Característica	Grupos de conexión	Alta tensión	Baja tensión	Devanado de alta	Devanado de baja
0	D d 0				
	Y y 0				
	D z 0				
5	D y 5				
	Y d 5				
	Y z 5				
6	D d 6				
	Y y 6				
	D z 6				
11	D y 11				
	Y d 11				
	Y z 11				

Fig.2.38.: Grupos de conexión más usuales.

2.4.7) El transformador Zig-Zag.

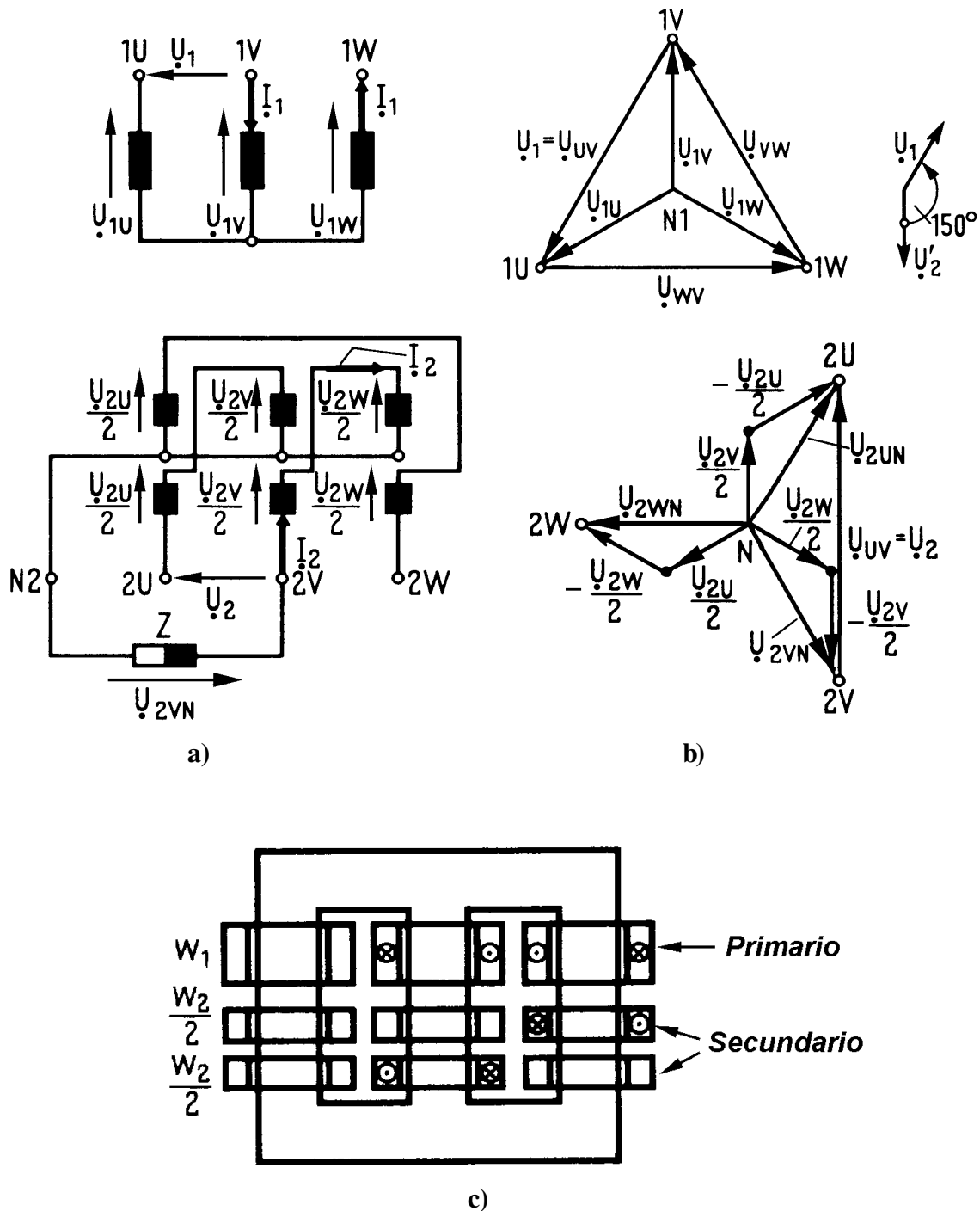


Fig.2.39.: Transformador en conexión Zig-Zag. a) Conexiones; b) Diagramas fasoriales; c) Distribución de devanados.

2.4.8) El autotransformador.

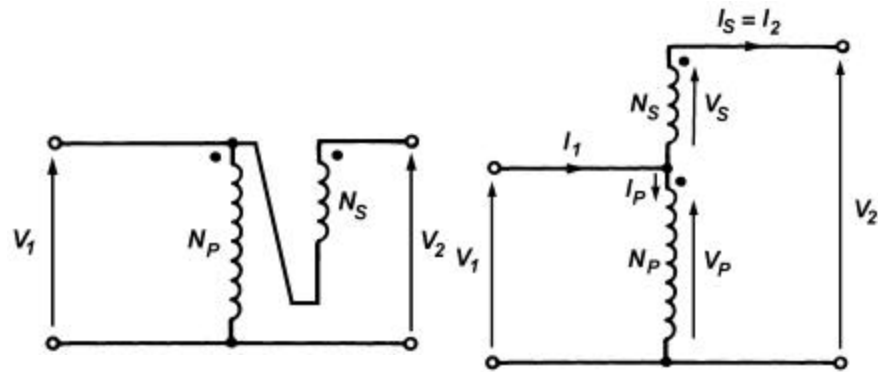


Fig.2.40.: Autotransformador elevador de tensión.

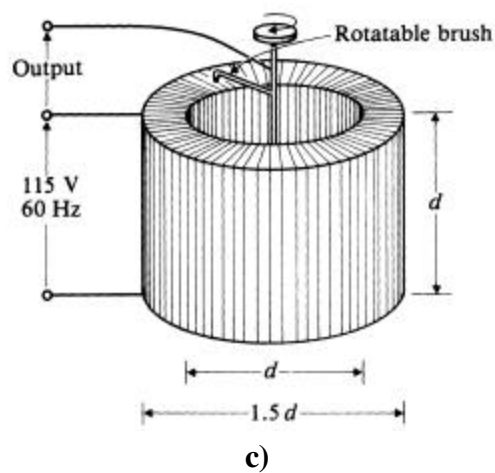
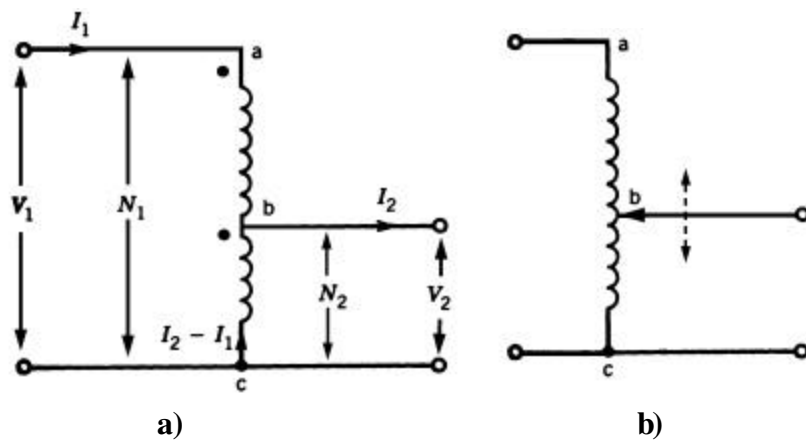


Fig.2.41.: Autotransformador Reductor: a) fijo; b) variable; c) presentación real.

2.4.9) Transformadores de medición.

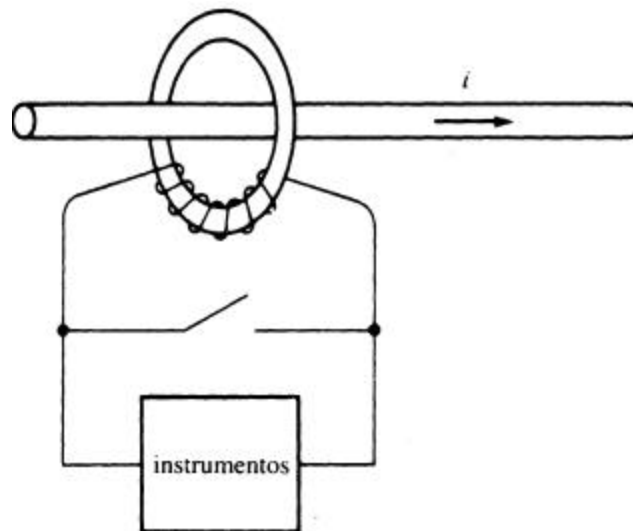


Fig.2.42.: Transformador de medición de corriente.

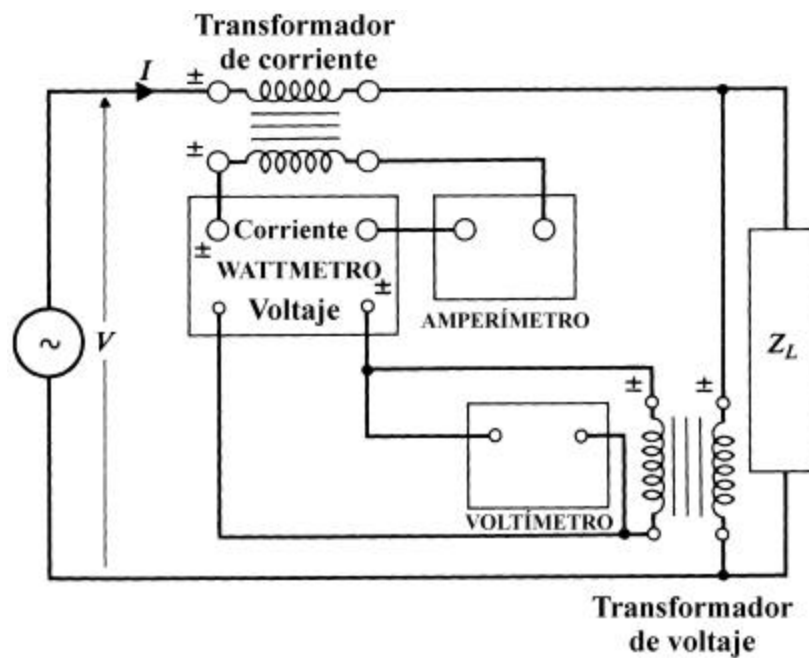


Fig.2.43.: Conexión de transformadores de medición de voltaje y de corriente.

2.4.10) Transformadores de pulsos.

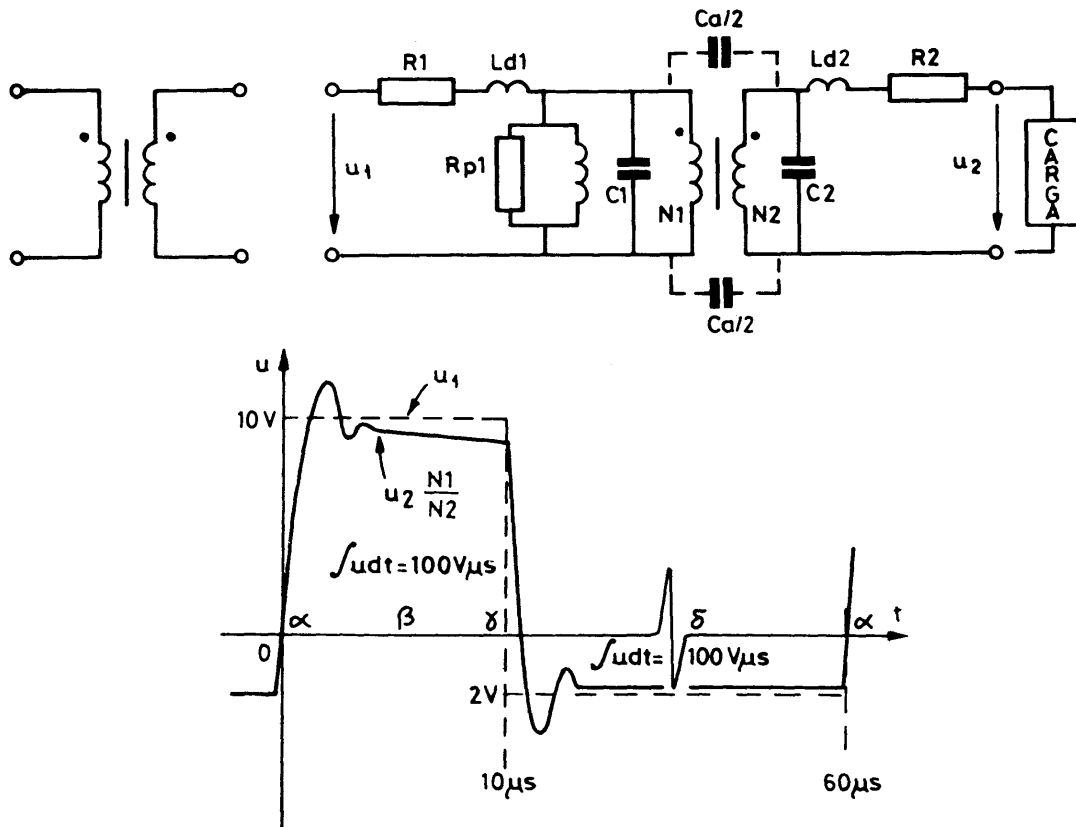


Fig.2.44.: Transformador de pulsos y su circuito equivalente.

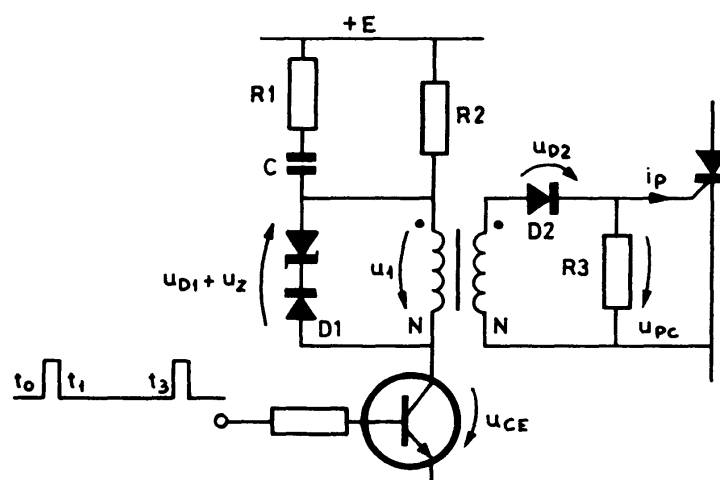


Fig.2.45.: Disparo de un tiristor con un transformador de pulso.

CAPÍTULO 3

FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

3.1) SISTEMAS MECÁNICOS.

3.1.1) Sistemas traslacionales:

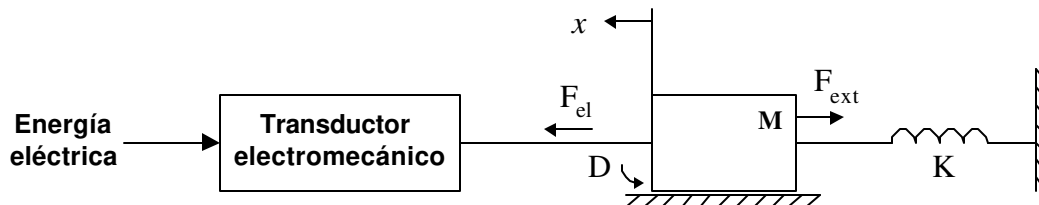


Fig.3.1.: Sistema electromecánico completo.

Donde:

x : posición.

M : masa del cuerpo.

D : coeficiente de roce.

K : constante del resorte.

F_{ext} : fuerza externa.

F_{el} : fuerza de origen eléctrico (generada por el transductor).

3.1.2) Sistemas rotacionales:

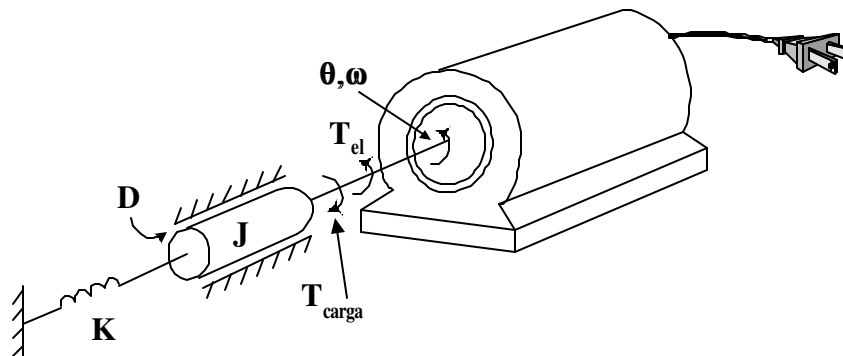


Fig.3.2.: Sistema electromecánico rotacional.

Donde:

θ : posición angular.

J : inercia rotacional.

D : coeficiente de roce.

K : constante de resorte torsional.

T_{carga} : Torque de la carga.

T_{el} : Torque electromagnético (generado por el transductor).

3.2) SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA.

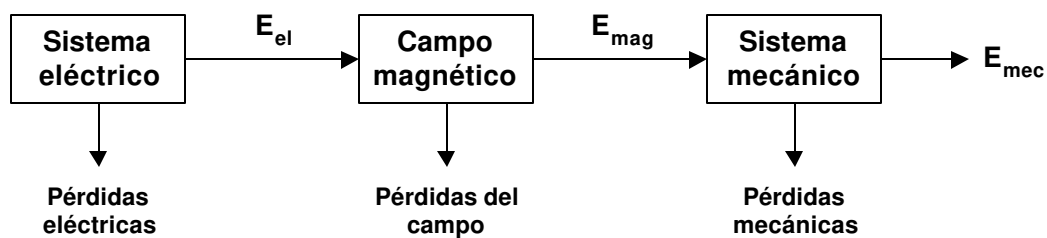


Fig.3.3.: Componentes de un sistema de conversión de energía electromecánica.

3.3) ENERGÍA ALMACENADA EN EL CAMPO MAGNÉTICO.

3.3.1) Energía en un sistema monoexcitado:

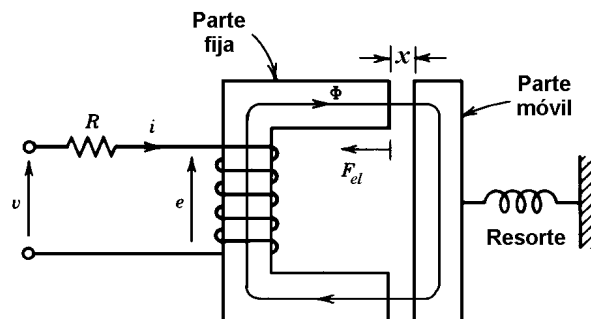


Fig.3.4.: Ejemplo de un sistema electromecánico con una fuente de excitación.

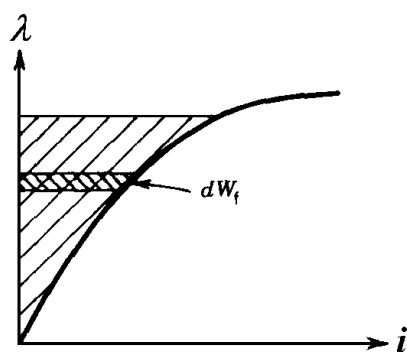


Fig.3.5.: Característica λ - i para $x = \text{cte}$ (ver Fig.3.4.).

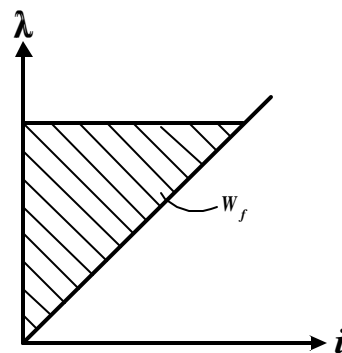


Fig.3.6.: Característica λ - i para un sistema lineal

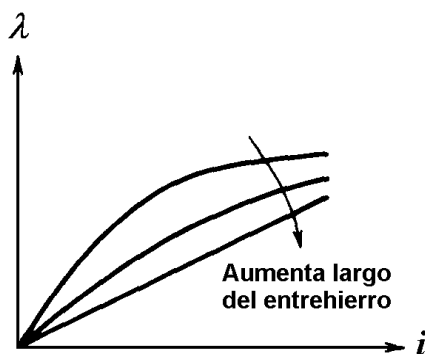


Fig.3.7.: Efecto del entrehierro en la curva λ - i .

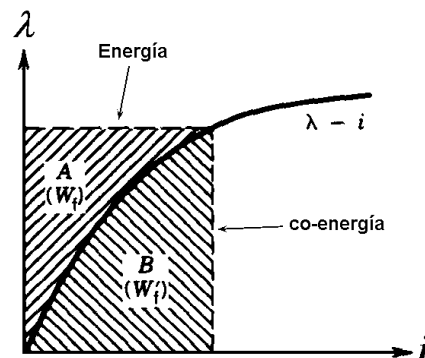


Fig.3.8.: Energía y co-energía.

3.3.2) Energía de sistemas doblemente excitados.

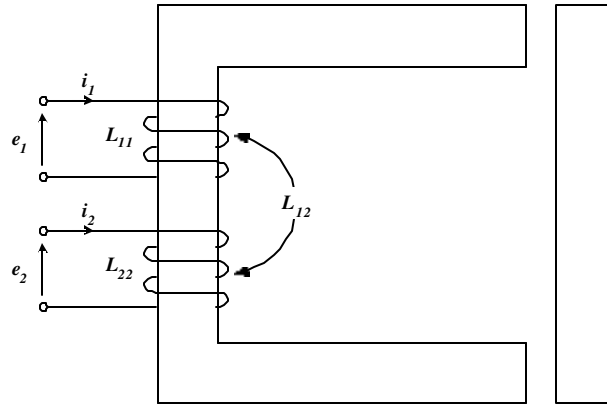


Fig.3.9.: Un sistema doblemente excitado.

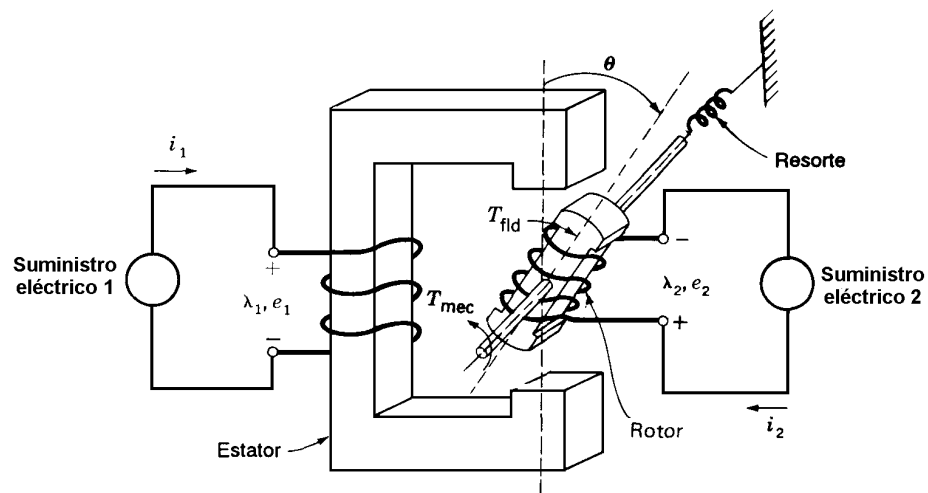


Fig.3.10.: Sistema rotatorio con doble excitación.

3.4) FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS.

3.4.1) Fuerza en un sistema monoexcitado.

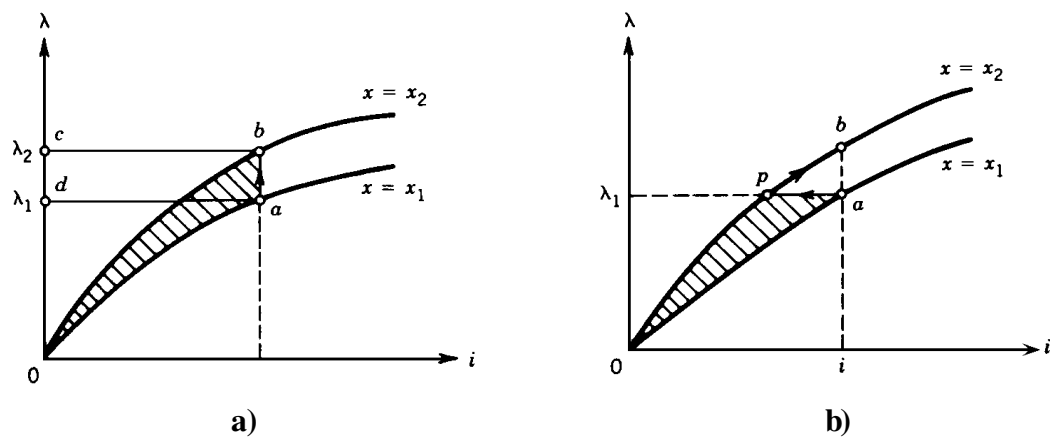


Fig.3.11.: Variación del punto de trabajo del sistema de la figura 3.4: **a)** con corriente constante; **b)** con enlace de flujo constante.

➔ Aplicación: relés.

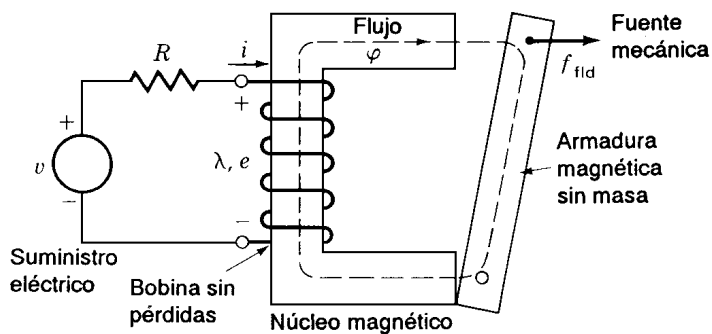


Fig.3.12.: Principio de un relé.

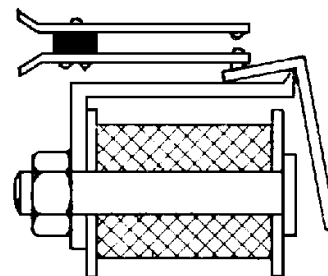


Fig.3.13.: Esquema de un relé real.

➔ **Aplicación:** electroimanes.

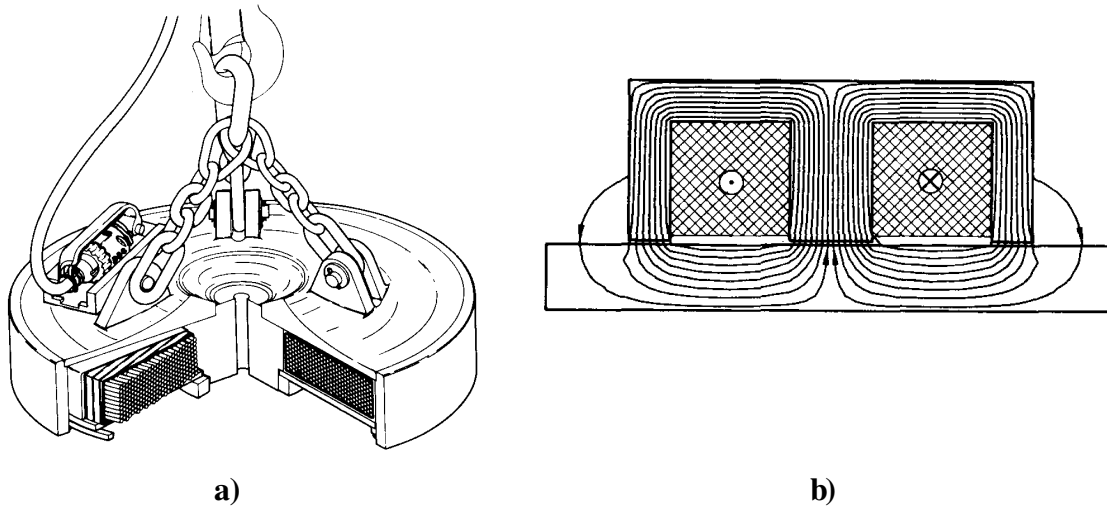


Fig.3.14.: Electroimán circular para transporte de chatarra: a) disposición física; b) distribución del campo.

3.4.2) Torque en un sistema rotatorio monoexcitado (torque de reluctancia).

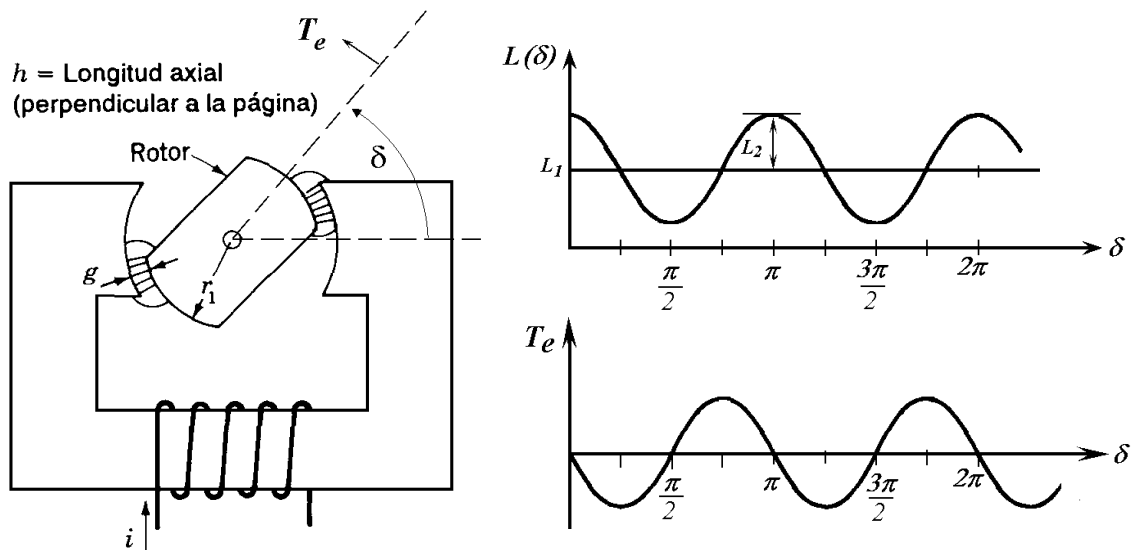


Fig.3.15.: Sistema magnético con parte móvil rotatoria.

Observación:

El torque se origina por la tendencia del rotor a alinearse con el campo (eje) del estator.

Cuando el rotor está alineado cesa el torque.

3.4.3) Torque en un sistema rotatorio doblemente excitado.-

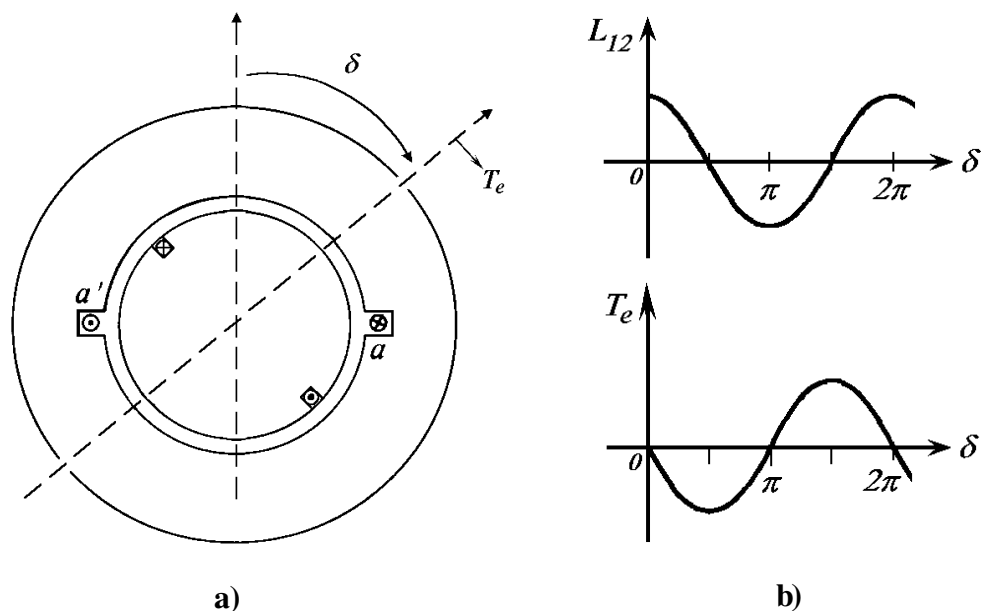


Fig.3.16.: Sistema doblemente excitado: a) bobinas; b) inductancia y torque (análisis aproximado).

Observación:

El torque se origina por la tendencia de los campos (ejes) a alinearse.

Cuando los ejes se han alineado cesa el torque.

3.5) TRANSDUCTORES DE MOVIMIENTO CONTINUO.

3.5.1) Condiciones para el movimiento continuo en un sistema rotatorio monoexcitado.

Condición: Evitar el alineamiento del rotor con el campo (eje) del estator $\Rightarrow$ Se debe hacer girar continuamente el campo del estator.

Ejemplo: Motor de reluctancia por pasos (stepping motor).

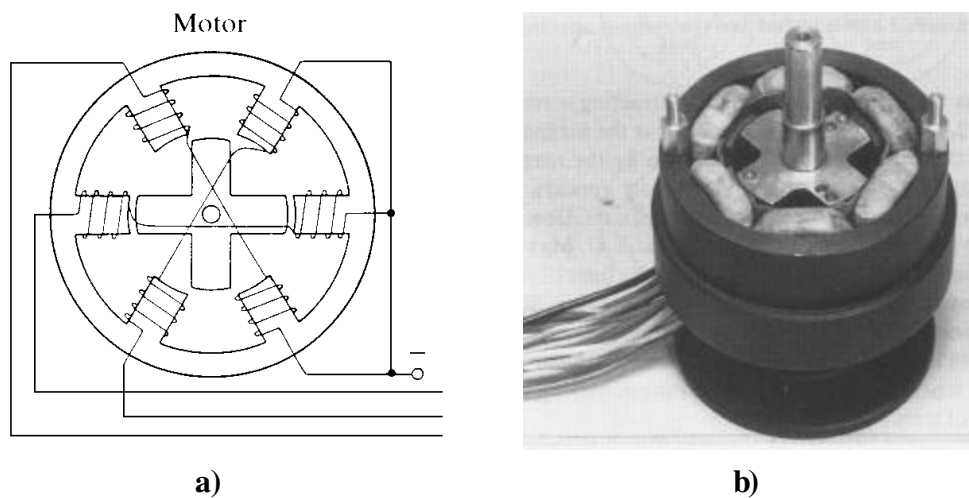


Fig.3.17.: Motor de reluctancia por pasos: a) dibujo esquemático; b) foto.

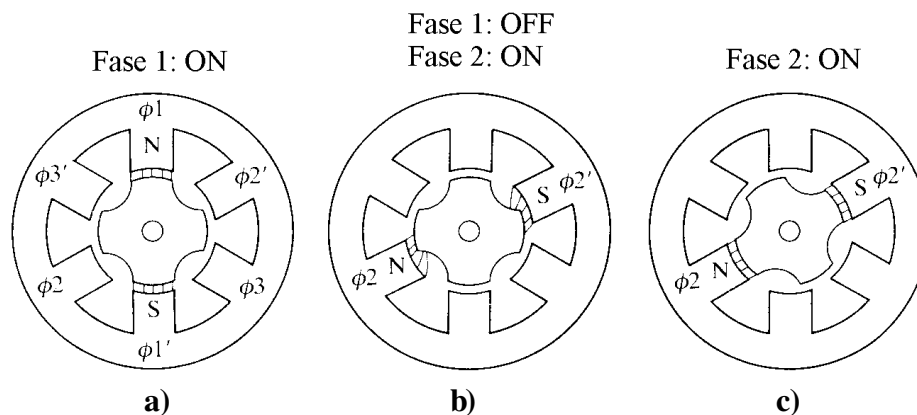


Fig.3.18.: Principio de funcionamiento del motor de pasos de reluctancia variable.

3.5.2) Condiciones para movimiento continuo en un sistema rotatorio:

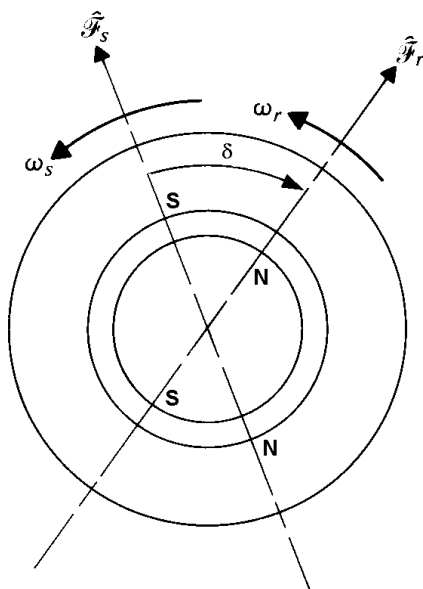


Fig.3.19.: Interacción de campos en una máquina doblemente excitada.

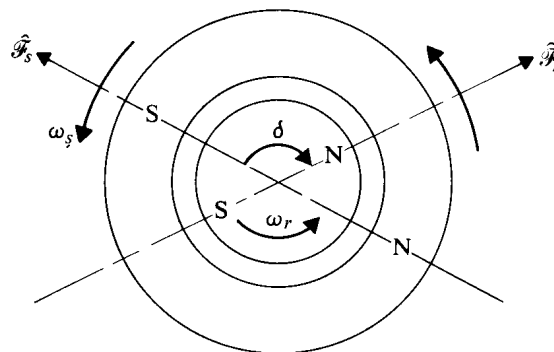


Fig.3.20.: Ejes de campos en una máquina de inducción.

Condición: Evitar el alineamiento entre el campo (eje) del rotor y el campo (eje) del estator.

Ejemplo: Motor de imán permanente y 4 bobinas.

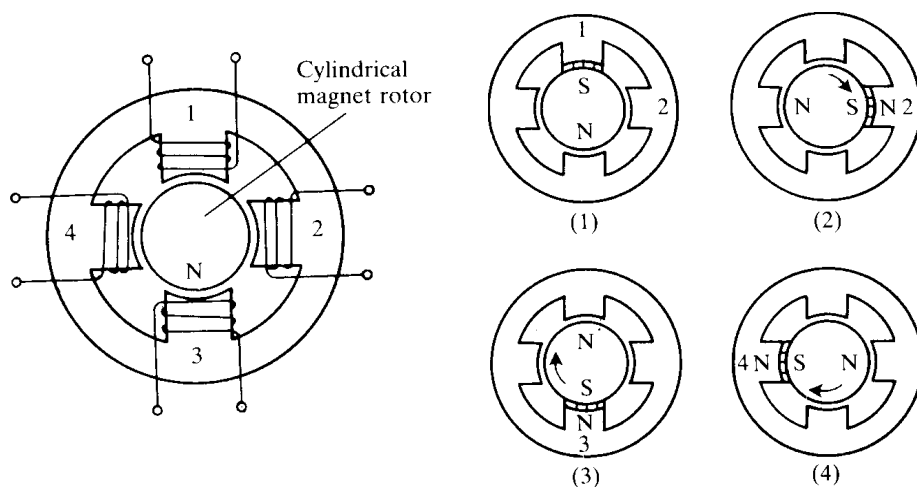


Fig.3.21.: Principio de un motor con imán permanente en el rotor.

CAPÍTULO 4

DEVANADOS

4.1) CAMPOS MAGNÉTICOS PRODUCIDOS EN LAS MÁQUINAS ROTATORIAS.

4.1.1) Introducción.

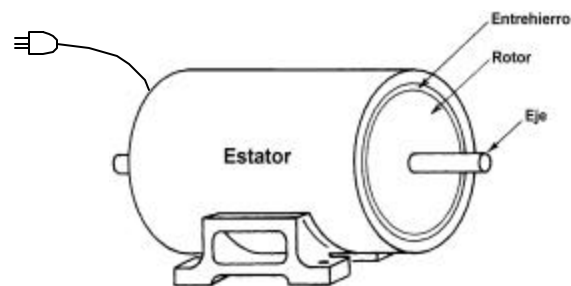


Fig.4.1.: Partes básicas de una máquina rotatoria.

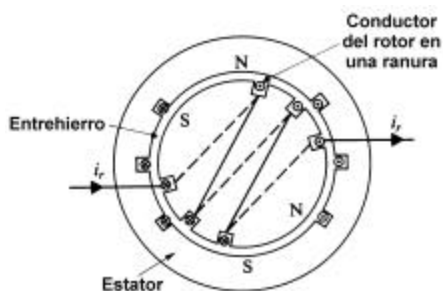


Fig.4.2.: Componentes básicas de una máquina rotatoria.

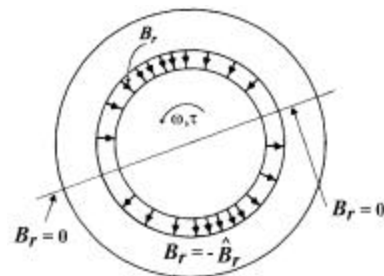


Fig.4.3.: Campo magnético en el entrehierro de una máquina.

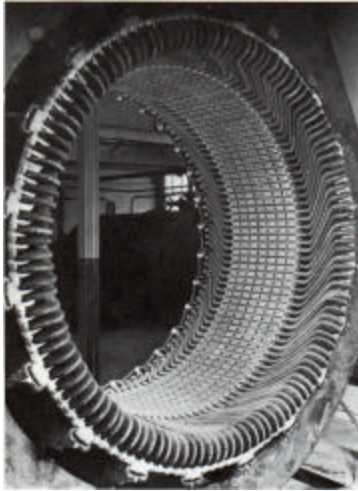


Fig.4.4.: Devanado de estator de una máquina polifásica.

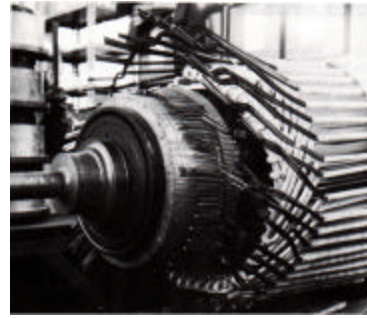
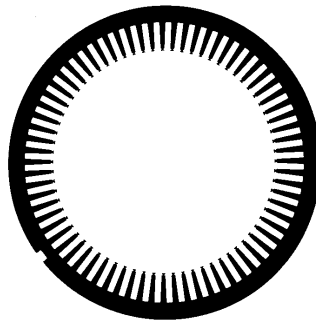
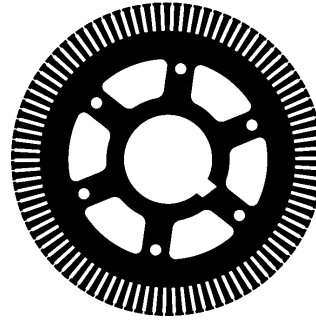


Fig.4.5.: Devanado de rotor en proceso de montaje.



a)



b)

Fig.4.6.: Chapas (láminas) de hierro de un motor de inducción.
a) estator, b) rotor.



Fig.4.7.: Montaje de láminas del estator en un generador sincrónico.

4.1.2) Devanados de estator de máquinas de corriente alterna.

Objetivo: Producir un campo sinusoidal.

$$B(\theta) = \hat{B} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (4.1)$$

4.1.2.1) La bobina elemental.

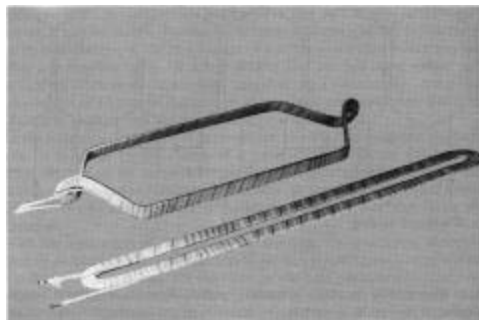


Fig.4.8.: Bobina de varias vueltas para un devanado de corriente alterna.

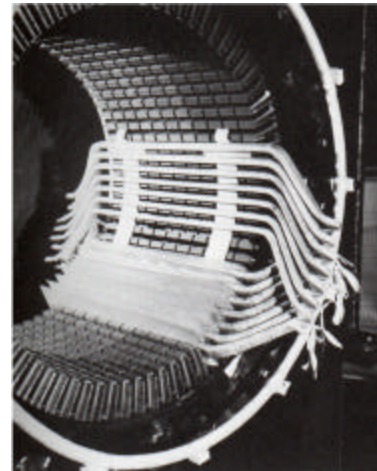


Fig.4.9.: Algunas bobinas montadas en las ranuras.

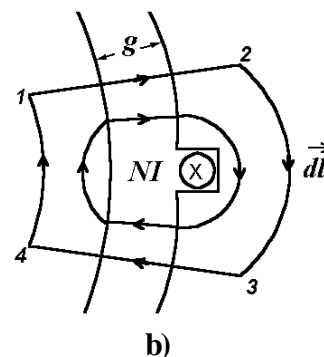
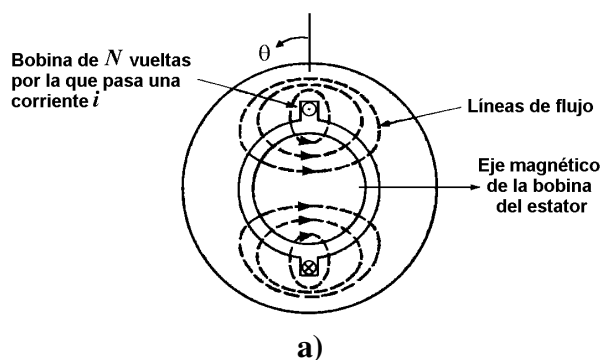


Fig.4.10.: a) Bobina concentrada elemental, b) Trayectoria de integración.

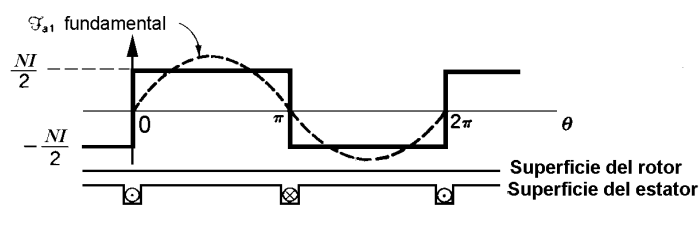


Fig.4.11.: Fuerza magnetomotriz (campo magnético) de una bobina concentrada en dos ranuras.

Campo magnético producido por la bobina elemental:

$$B(\theta) = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot g} \cdot \frac{4}{\pi} \left[\text{sen}(\theta) + \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3\theta) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5\theta) + \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7\theta) + \dots \right] \quad (4.2)$$

Fuerza magnetomotriz de la bobina elemental:

$$F(\theta) = \frac{N \cdot I}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \left[\text{sen}(\theta) + \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3\theta) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5\theta) + \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7\theta) + \dots \right] \quad (4.3)$$

4.1.2.2) El número de pares de polos (p).

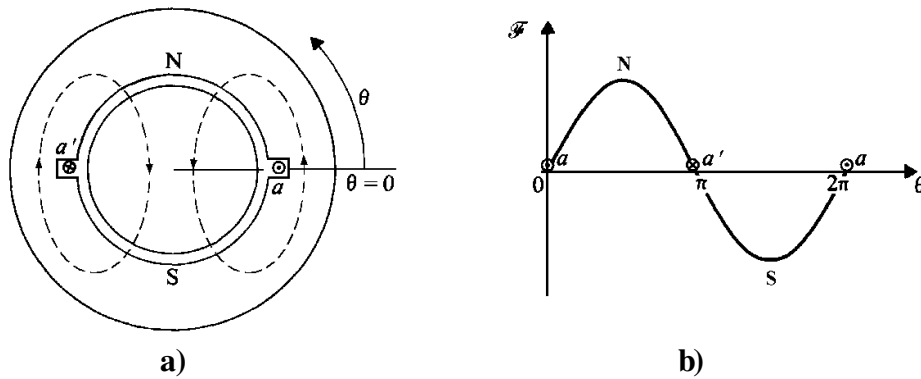


Fig.4.12.: Distribución de FMM (B) de 2 polos ($p=1$).

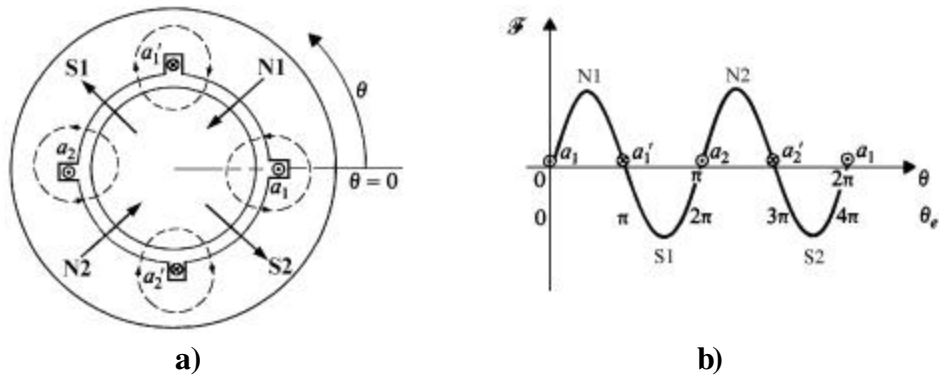


Fig.4.13.: Distribución de FMM (B) de 4 polos ($p=2$).

- θ : Grados mecánicos.
- θ_e : Grados eléctricos, definidos por la periodicidad del campo.

$$\theta_e = p \cdot \theta \quad (4.4)$$

4.1.2.3) Devanados distribuidos.

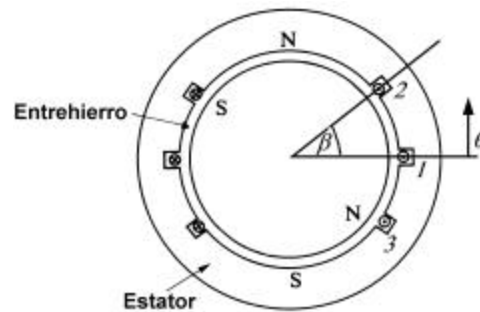


Fig.4.14.: Devanado de 3 bobinas.

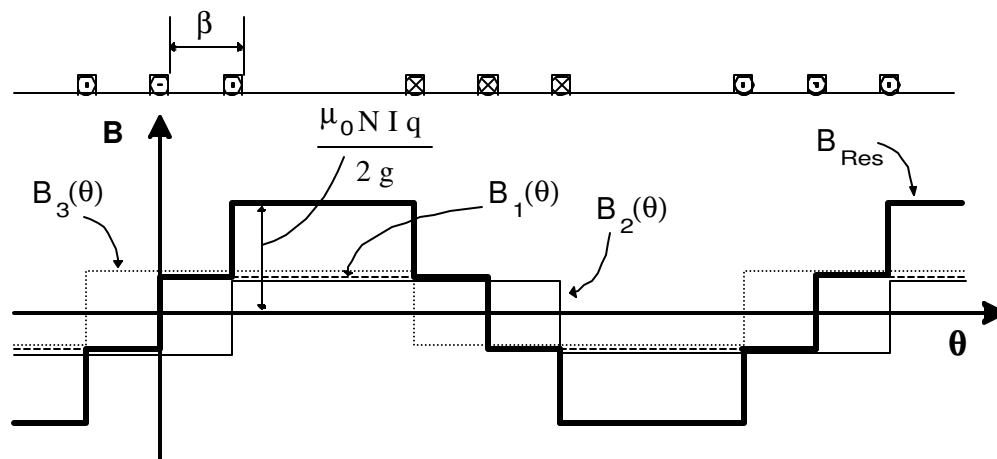


Fig.4.15.: Campo resultante en un devanado de 3 bobinas.

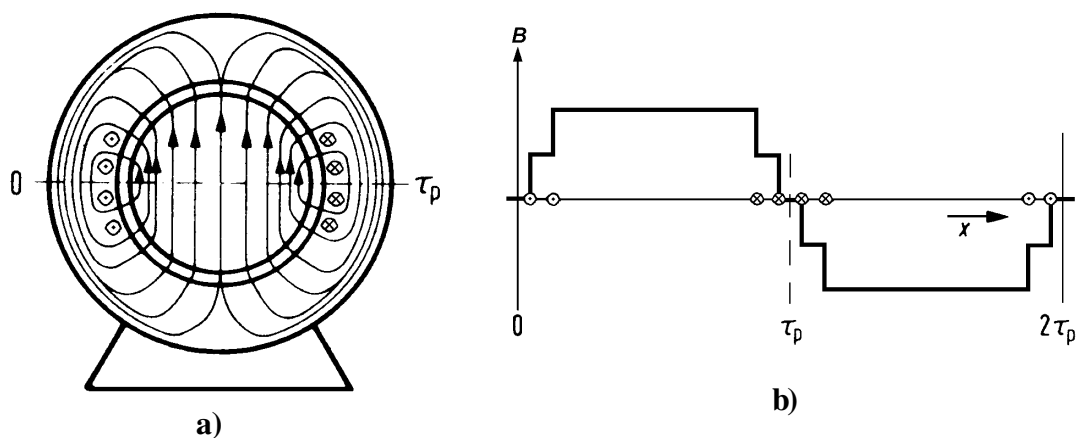


Fig.4.16.: a) Devanado con 4 bobinas $p=1$, $q=4$; b) Campo resultante.

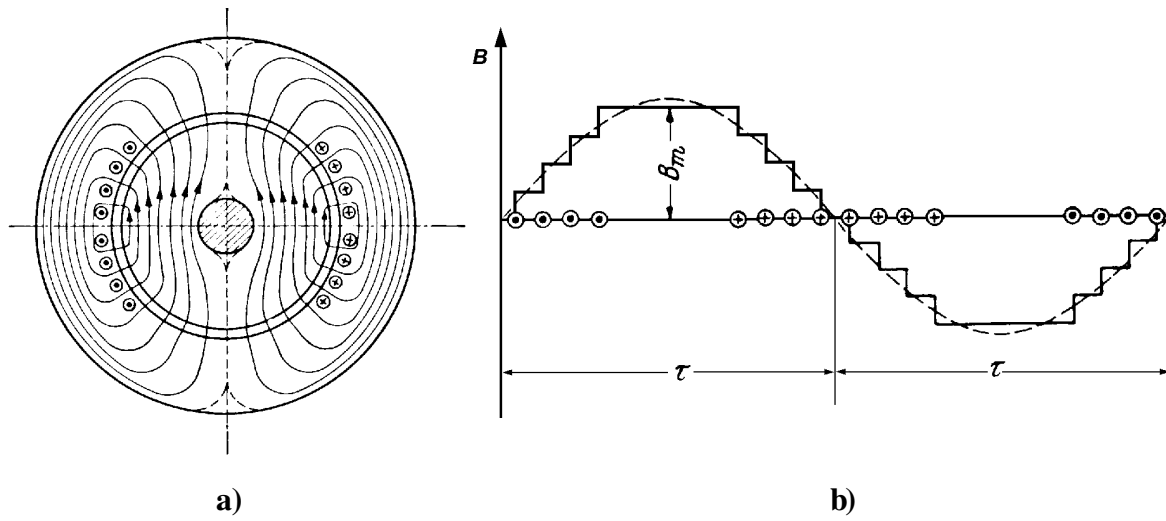


Fig.4.17: a) Devanado monofásico distribuido, $p=1$, $q=8$; b) Campo magnético resultante.

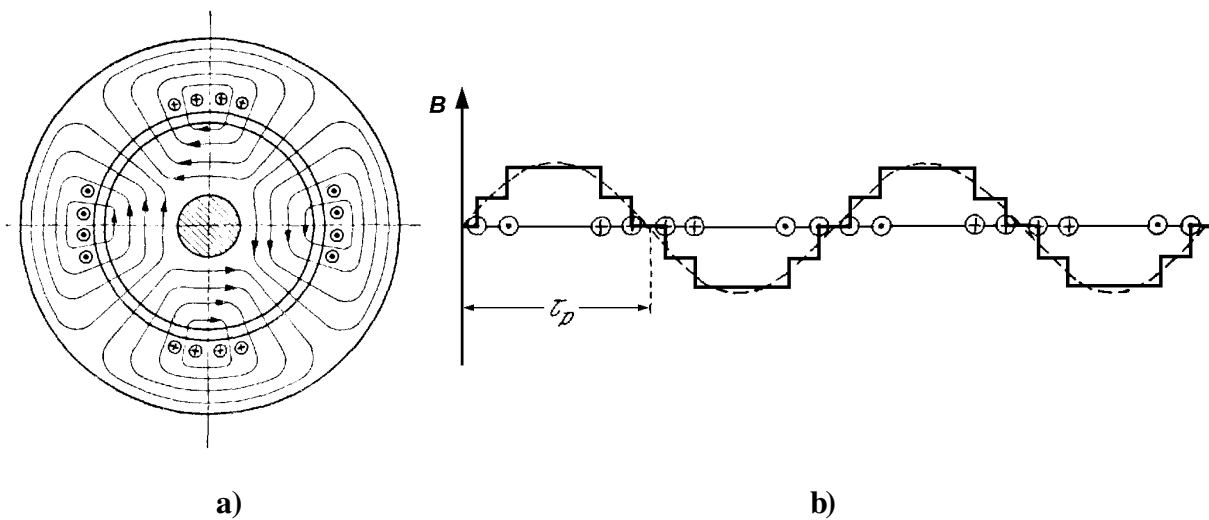


Fig.4.18: a) Devanado monofásico de 4 polos, $p=2$, $q=4$; b) Campo magnético resultante.

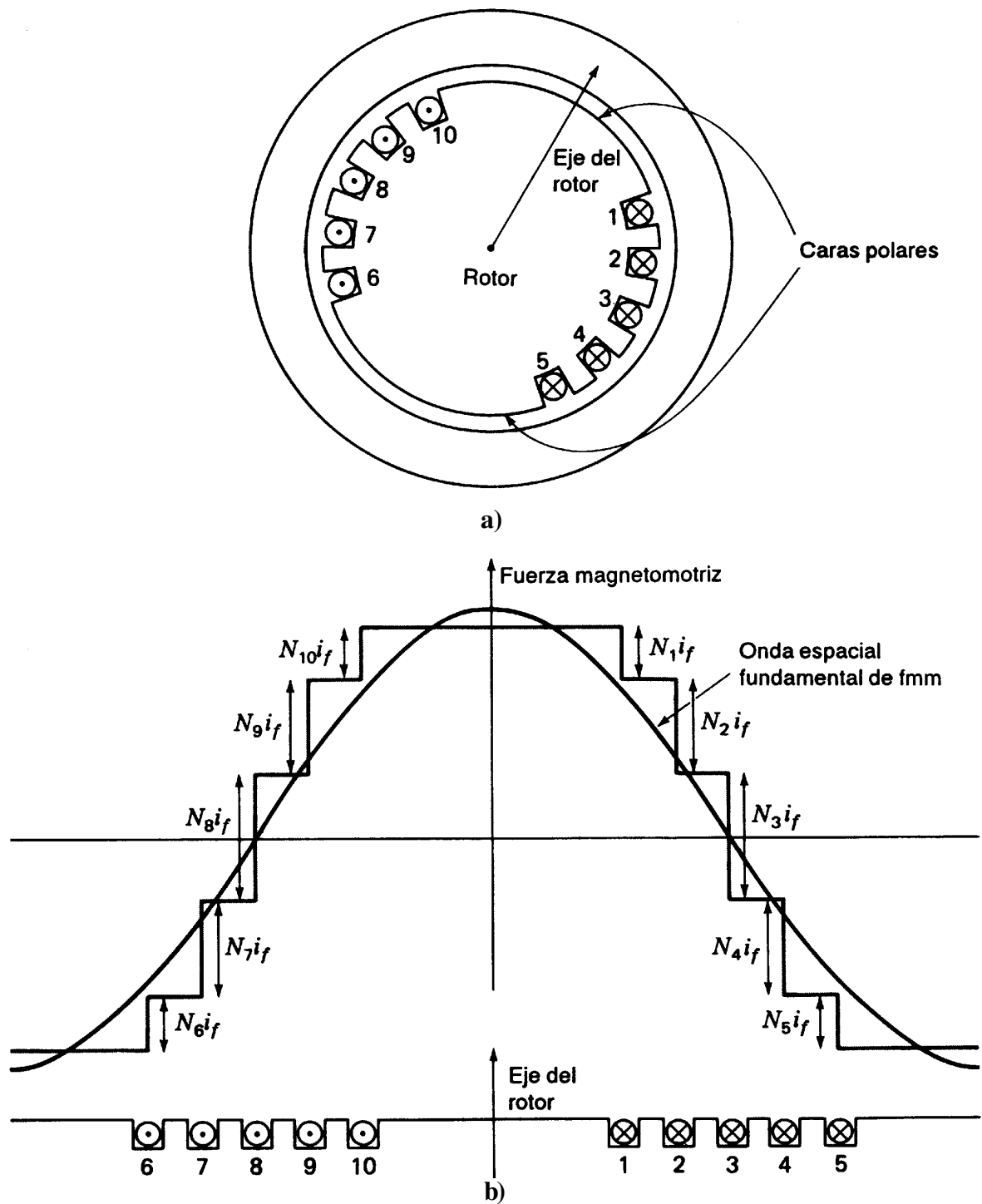


Fig.4.19.: a) Devanado distribuido en un rotor cilíndrico; b) Distribución de la fuerza magnetomotriz.

4.1.2.4) Devanados de doble capa.

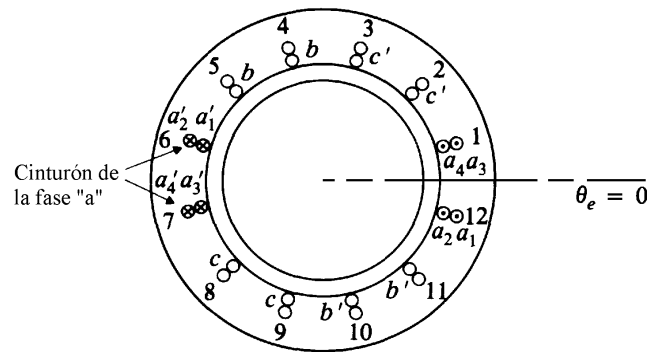


Fig.4.20.: Devanado trifásico de doble capa.

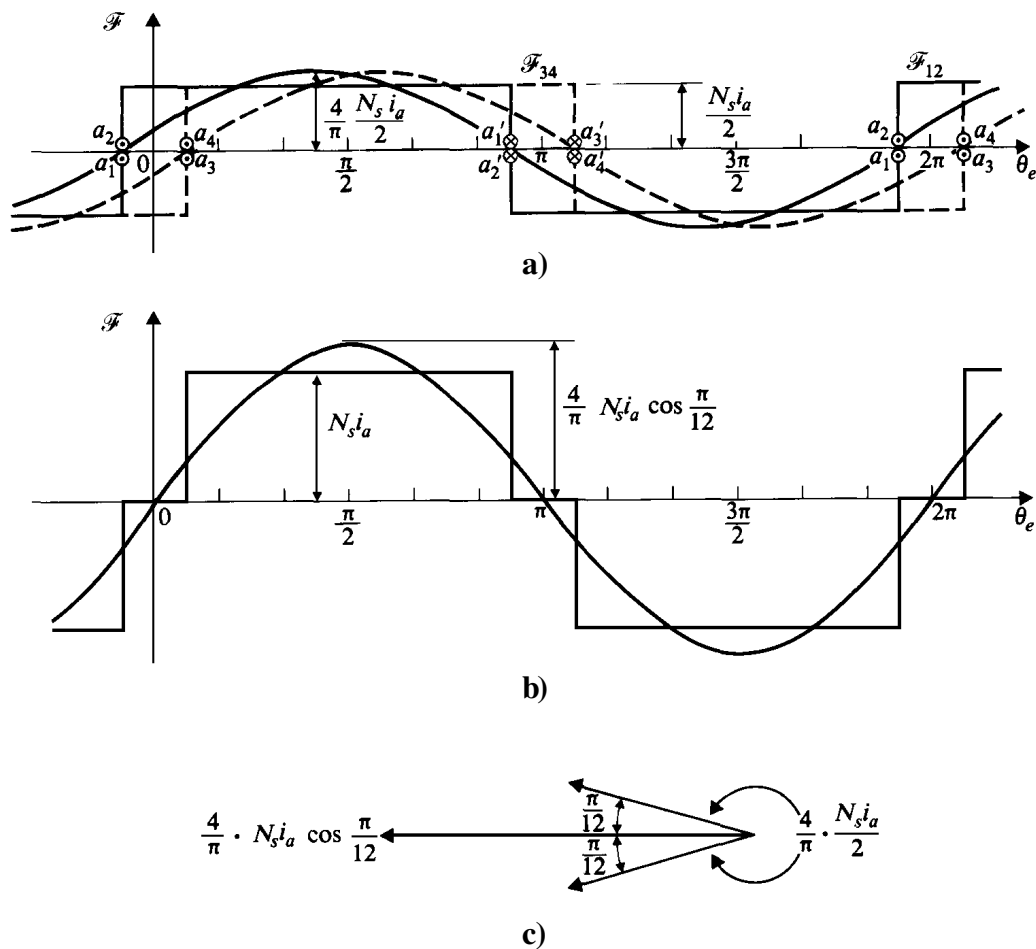


Fig.4.21.: Fuerza magnetomotriz de la fase a del devanado de doble capa de la figura 4.20.

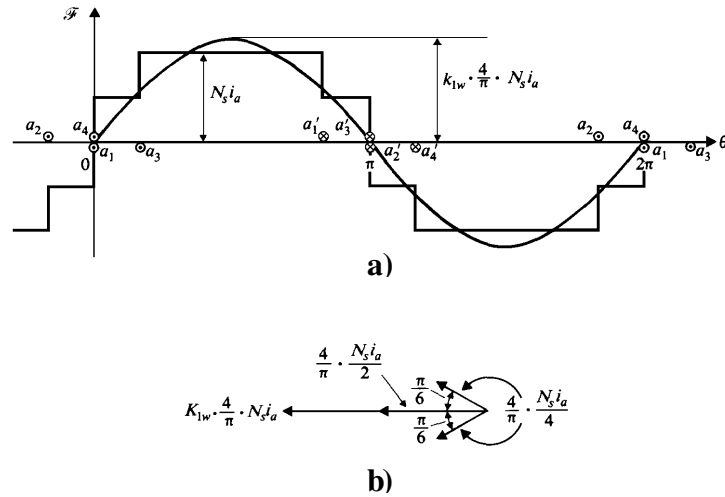


Fig.4.22.: Campo resultante del devanado de doble capa (fase "a") de la figura 4.20. con las capas corridas en una ranura.

4.1.2.5) El campo giratorio.

Campo giratorio de 2 polos:

$$FMM(\theta, t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\theta - \omega \cdot t) \quad (4.5)$$

$$B(\theta, t) = B_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\theta - \omega \cdot t) \quad (4.6)$$

Velocidad del campo:

$$v(t) = \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4.7)$$

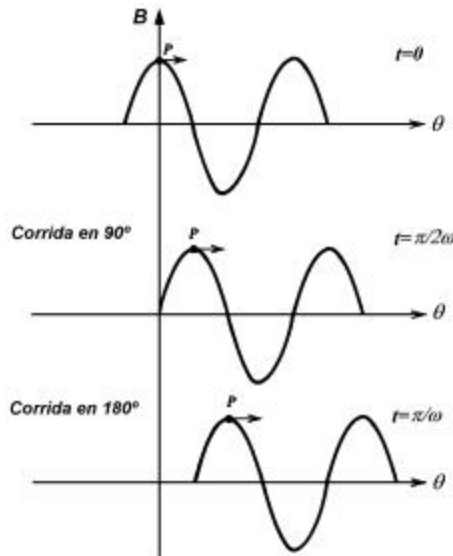


Fig.4.23.: Desplazamiento de un campo giratorio.

➡ *Campo giratorio de p pares de polos:*

$$FMM(\theta, t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(p \cdot \theta - \omega \cdot t) \quad (4.8)$$

$$B(\theta, t) = B_{m\acute{a}x} \cdot \cos(p \cdot \theta - \omega \cdot t) \quad (4.9)$$

Velocidad de giro del campo:

$$v(t) = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{p} \quad (4.10)$$

4.1.2.6) Devanado monofásico alimentado con corriente alterna.

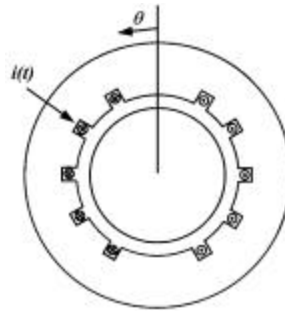


Fig.4.24.: Devanado monofásico distribuido.

$$i(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (4.11)$$

$$FMM(t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega \cdot t) \cos\theta \quad (4.12)$$

$$FMM = \frac{FMM_{m\acute{a}x}}{2} \cdot [\cos(\theta - \omega \cdot t) + \cos(\theta + \omega \cdot t)] \quad (4.13)$$

$\uparrow$ $\uparrow$
 Campo giratorio Campo giratorio
 secuencia positiva. secuencia negativa.

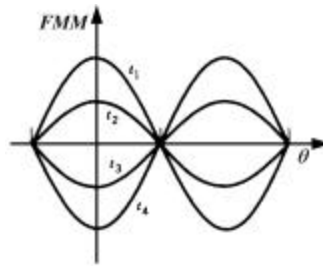


Fig.4.25.: Campo de un devanado monofásico alimentado con corriente alterna.

4.1.2.7) El devanado trifásico.

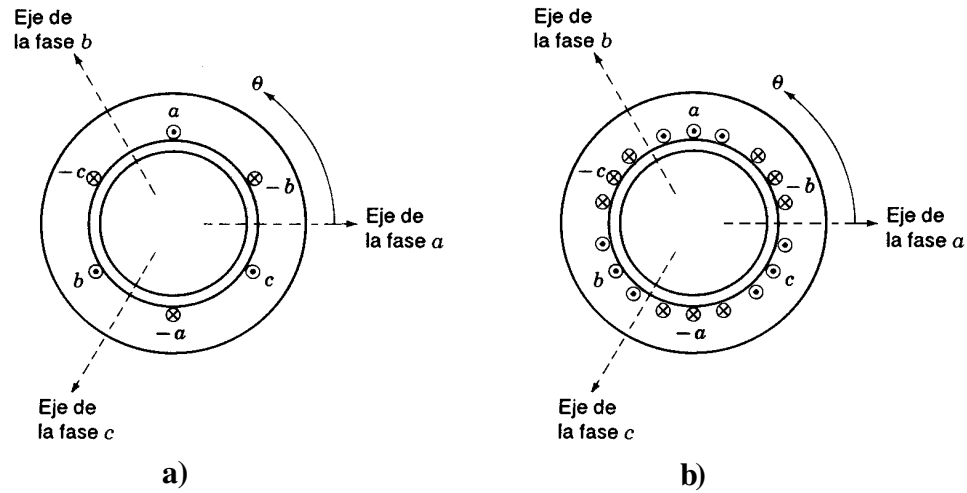


Fig.4.26.: Devanado de estator trifásico de dos polos con: **a)** 1 bobina por fase, **b)** 3 bobinas por fase.

Características del devanado trifásico:

- Las tres fases tienen igual número de vueltas.
- Ejes magnéticos desplazados 120° eléctricos.
- Corrientes desfasadas en 120° .

$$FMM_a(t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega \cdot t) \cos\theta \quad (4.14)$$

$$FMM_b = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega \cdot t - 120) \cdot \cos(\theta - 120) \quad (4.15)$$

$$FMM_c = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega \cdot t - 240) \cdot \cos(\theta - 240) \quad (4.16)$$

$$FMM_{Res} = FMM_a + FMM_b + FMM_c \quad (4.17)$$

$$FMM_{Res} = \frac{3}{2} \cdot FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\theta - \omega \cdot t) \quad (4.18)$$

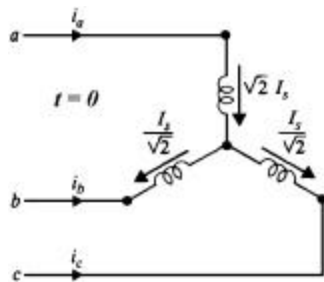


Fig.4.27.: Devanado trifásico en conexión estrella.

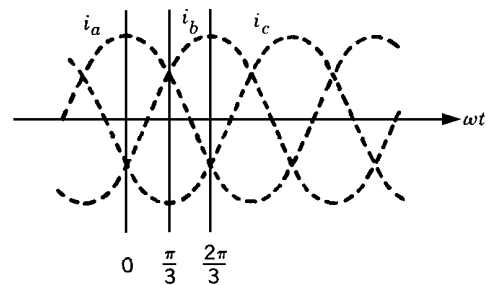


Fig.4.28.: Corrientes trifásicas.

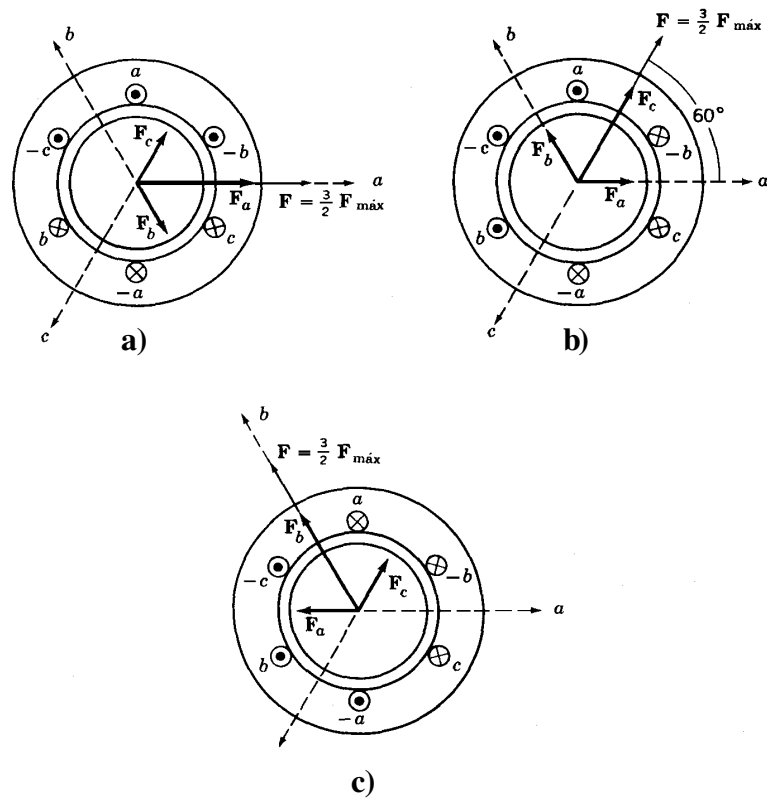


Fig.4.29.: Campo giratorio producido por el devanado trifásico.
a) $\omega t=0$; b) $\omega t=\pi/3$ y c) $\omega t=2\pi/3$.

4.1.2.8) Construcción de un devanado trifásico.

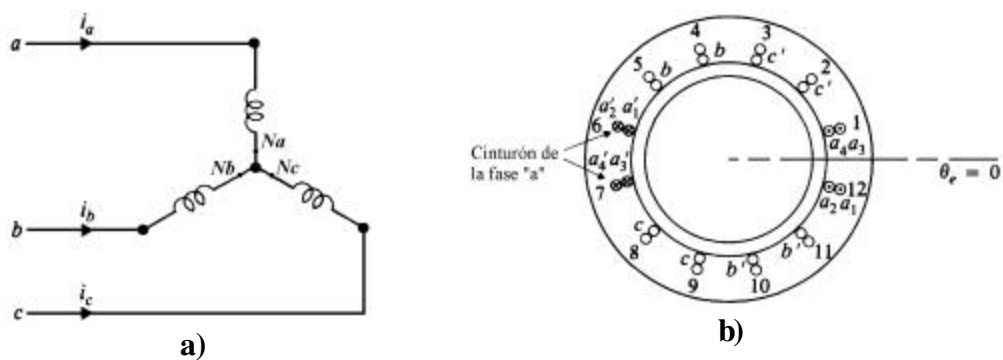


Fig.4.30.: Devanado trifásico de dos polos, doble capa, a) Conexión externa; b) Ranuras de estator.

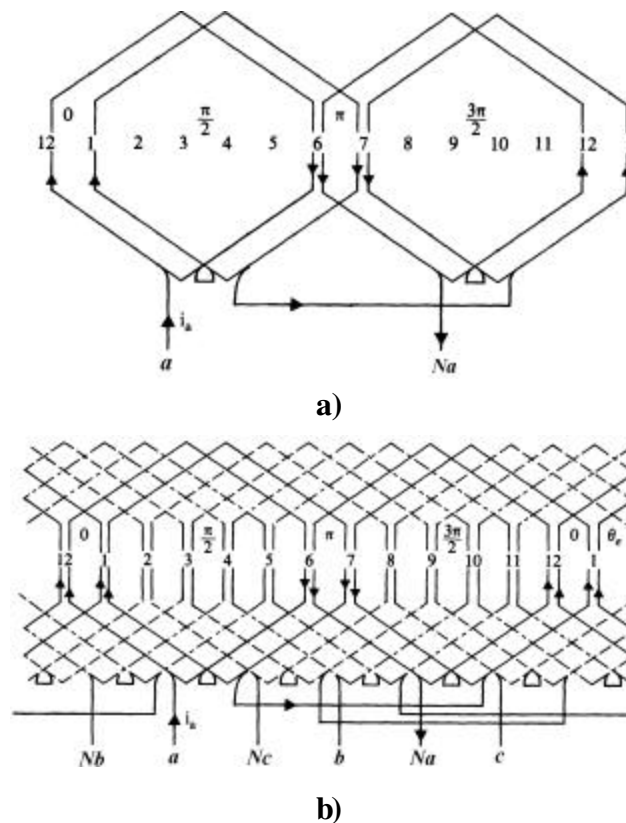


Fig.4.31.: Construcción del devanado de la figura 4.29: **a)** Una fase; **b)** Las tres fases.

4.1.3) Devanados de estator de máquinas de corriente continua.

- ➡ **Objetivo del devanado de estator:** producir un campo en el entrehierro, constante en el tiempo y fijo en el espacio.
- ➡ Devanado del estator = devanado de campo.

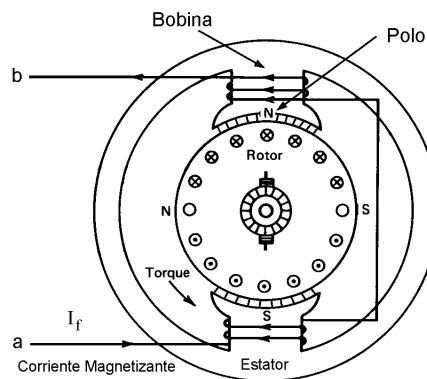


Fig.4.32.: Devanado de campo (estator) de una máquina de corriente continua de 2 polos.

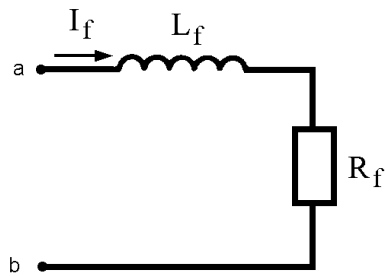


Fig.4.33.: Circuito equivalente del devanado de campo.

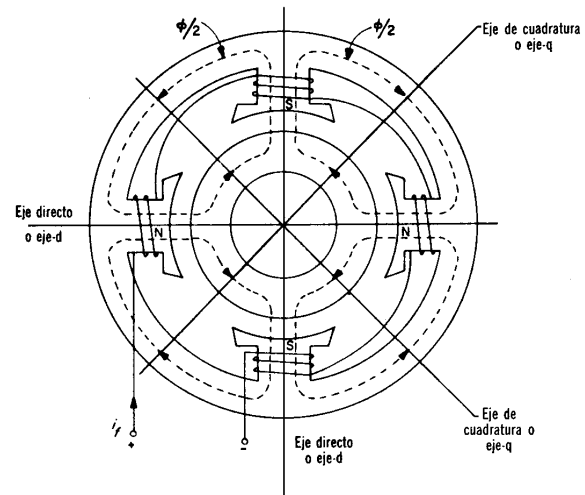


Fig.4.34.: Devanado de estator de 4 polos de una máquina de corriente continua.

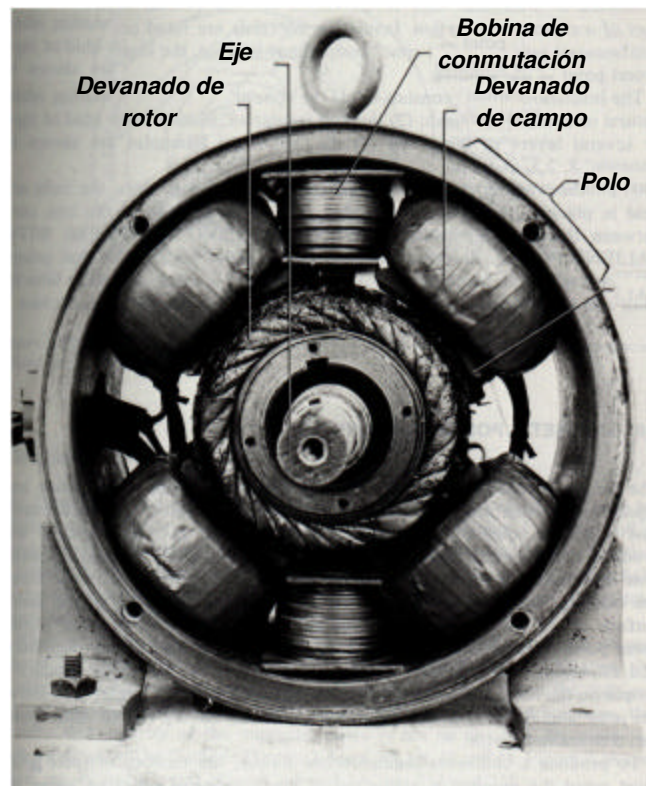


Fig.4.35.: Máquina de corriente continua de 4 polos.

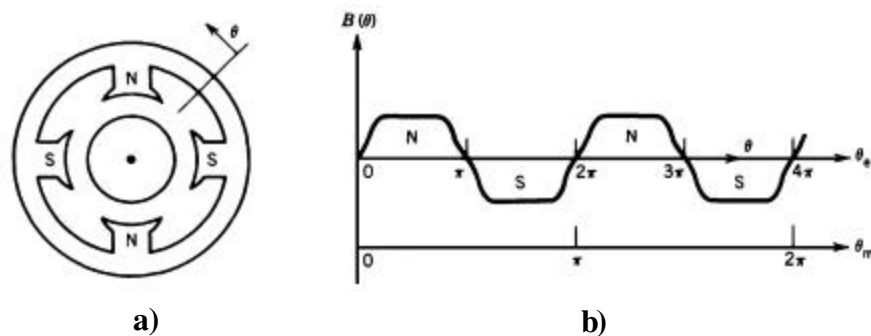


Fig.4.36.: Distribución de campo en un devanado de 4 polos.

4.1.4) Devanados de rotores

4.1.4.1) El rotor devanado con anillos deslizantes.

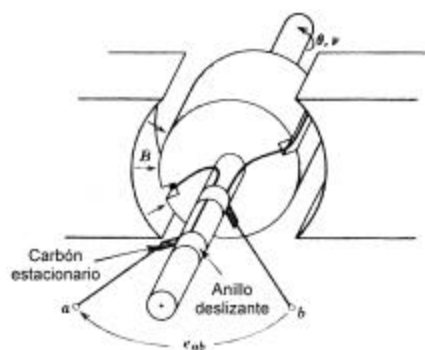


Fig.4.37.: Una bobina del rotor conectada por anillos deslizantes.

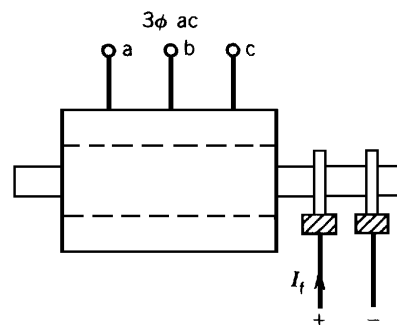


Fig.4.38.: Inyección de corriente al rotor mediante anillos deslizantes.

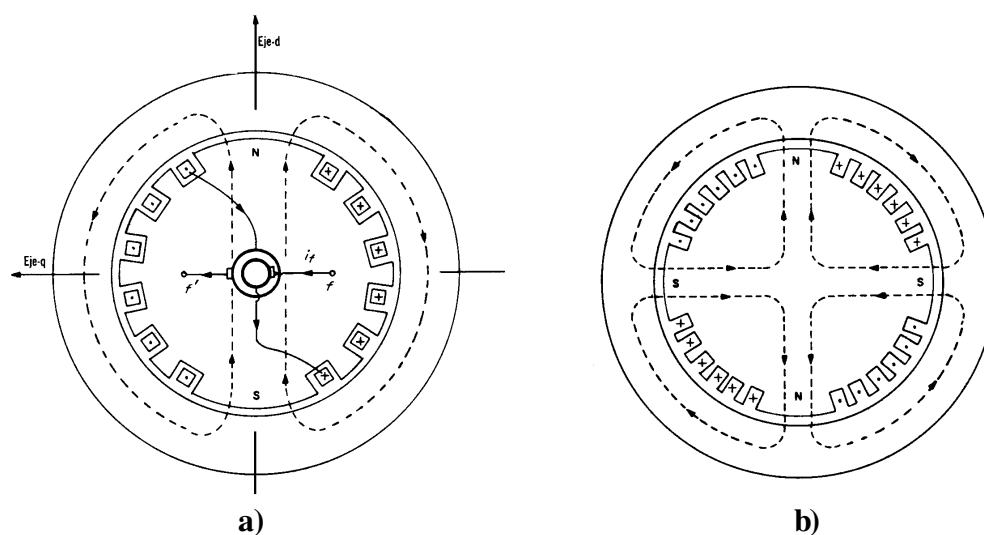


Fig.4.39.: Devanado monofásico alimentado por anillos deslizantes: **a)** de 2 polos; **b)** de 4 polos. Usado en máquinas sincrónicas.

➔ Rotores de polos salientes.

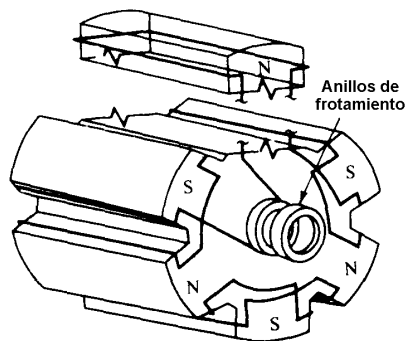


Fig.4.40.: Devanados de rotor de 6 polos.

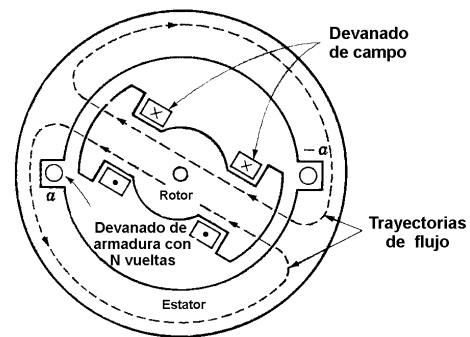


Fig.4.41.: Devanados de rotor de 2 polos.

➔ Rotores de polos salientes.

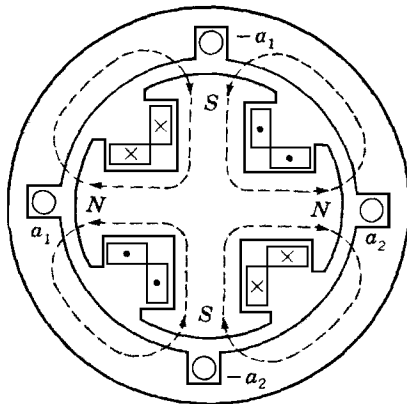


Fig.4.42.: Rotor de 4 polos.



Fig.4.43.: Sector de una máquina de 12 polos.

➔ Devanado de rotor trifásico con anillos deslizantes.

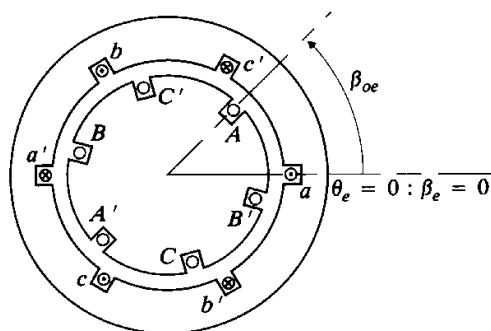


Fig.4.44.: Máquina con devanados trifásicos en el estator y en el rotor.

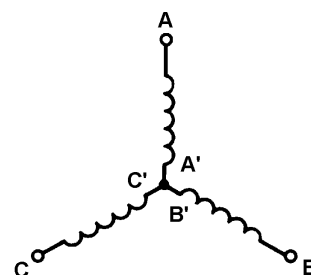


Fig.4.45.: Devanado trifásico del rotor.

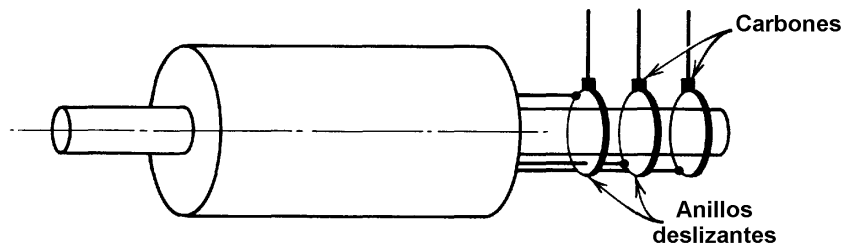


Fig.4.46.: Rotor devanado trifásico con sus tres anillos deslizantes.

4.1.4.2) El rotor jaula de ardilla.

No tiene contactos deslizantes.

Las corrientes son inducidas por el campo en el entrehierro.

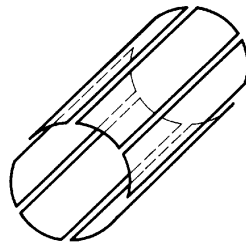


Fig.4.47.: Sobre el origen del rotor jaula de ardilla.

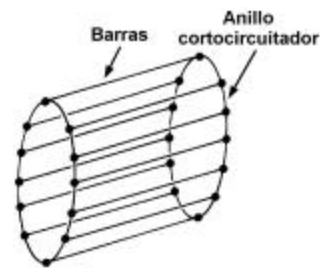
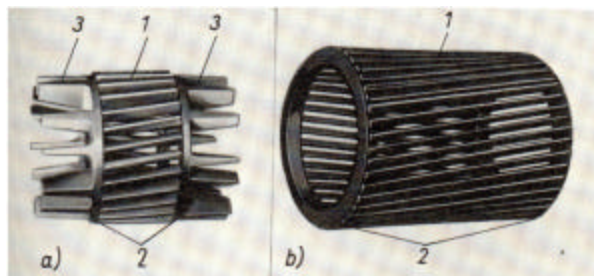


Fig.4.48.: Esquema básico de un rotor jaula de ardilla.



Fig.4.49.: Rotor jaula de ardilla. La jaula es de aluminio fundido.



Barras.
Anillos cortocircuitados.
Aletas de ventilación.

Fig.4.50.: Rotor jaula de ardilla. **a)** de aluminio fundido; **b)** de cobre soldado.

4.1.4.3) El devanado de rotor con conmutador.

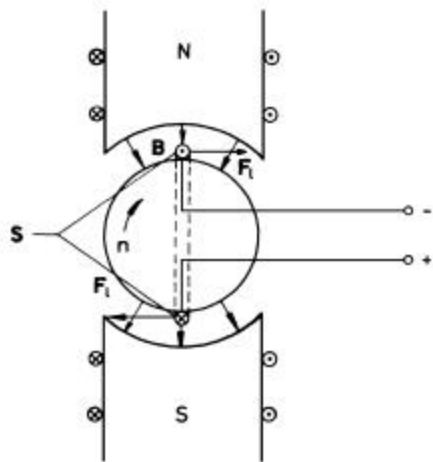


Fig.4.51.: Mecanismo de generación de fuerza (torque) en un motor de corriente continua.

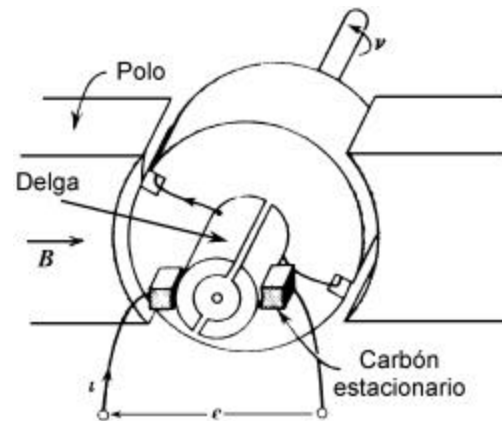


Fig.4.52.: Principio de una bobina de rotor alimentada por un conmutador de dos delgas.

- ➔ **Conmutador:** es el conjunto de delgas y carbones.
- ➔ **Objetivo del conmutador:** conmutar las corrientes por la bobina del rotor.

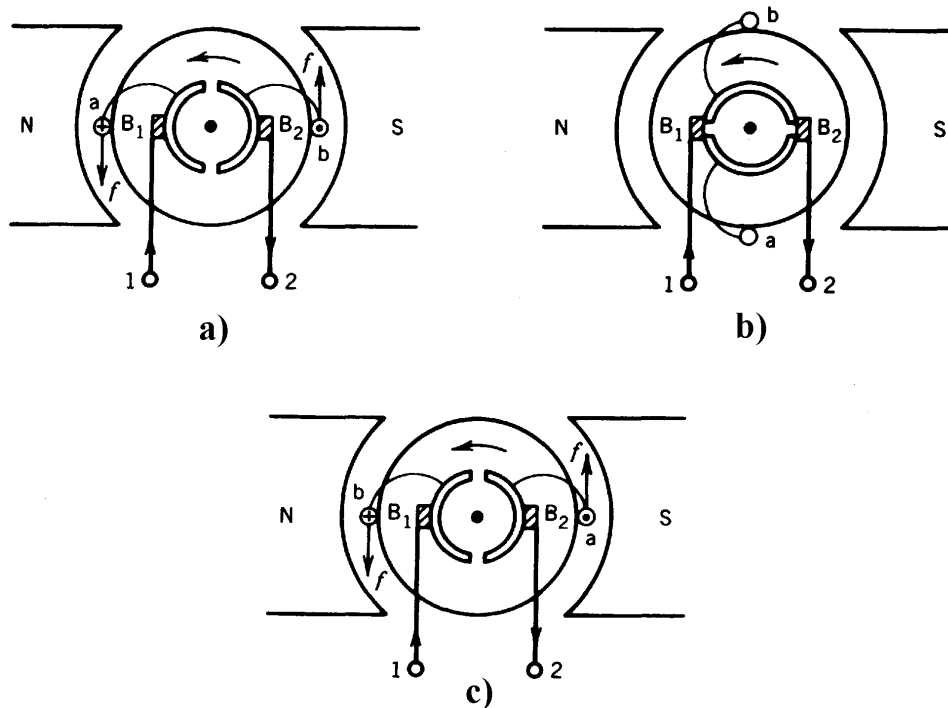


Fig.4.53.: Principio de funcionamiento de un conmutador de dos delgas.

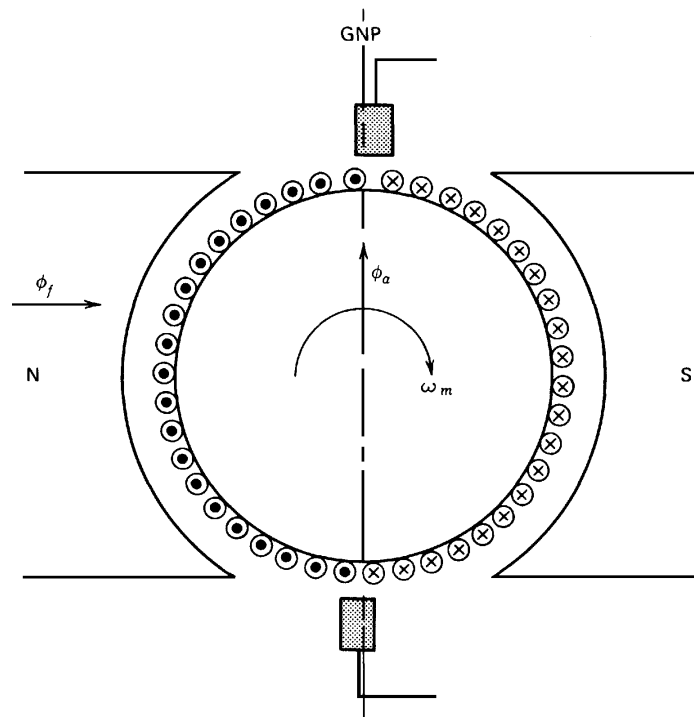


Fig.4.54.: Distribución de corriente en una máquina de corriente continua.

Objetivo: la distribución de corrientes por el rotor se mantiene constante con respecto al estator.

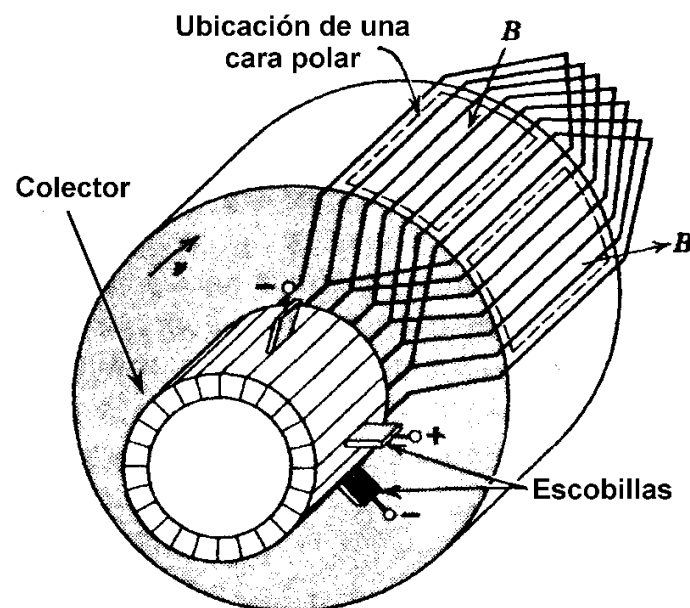


Fig.4.55.: Devanado de rotor de varias delgas y varios pares de polos.

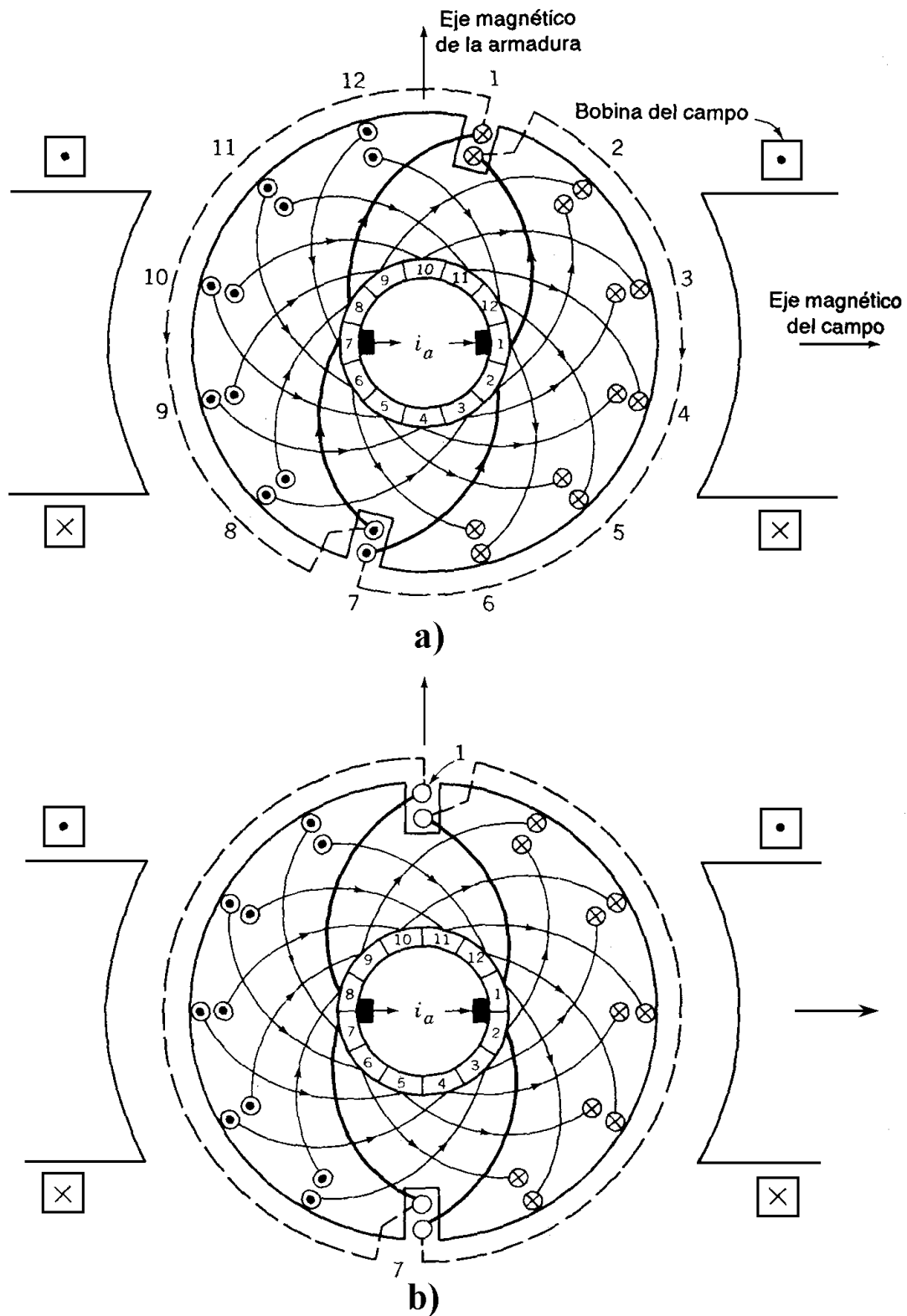
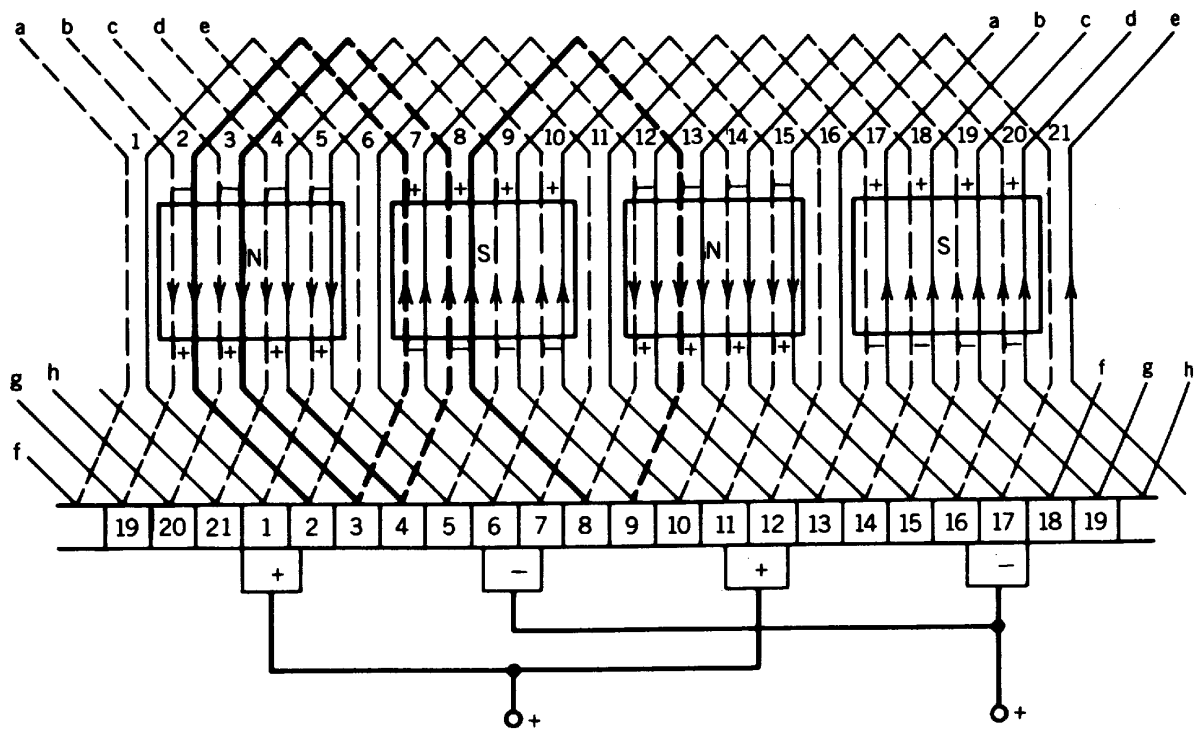


Fig.4.56.: Devanado de rotor con conmutador.(2 polos).



a)

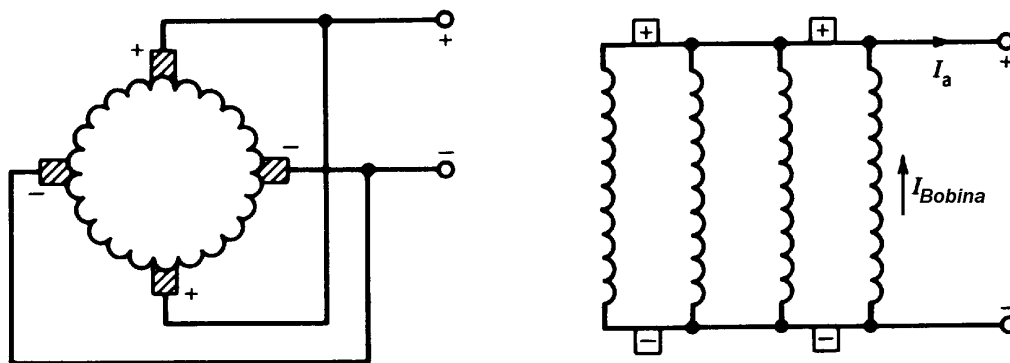


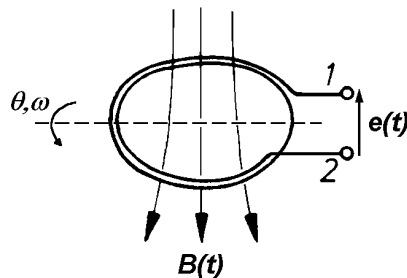
Fig.4.57.: Devanado de rotor con conmutador de 4 polos:
 a) conexionado; b) circuitos equivalentes.



Fig.4.58.: Vista de un rotor con colector.

4.2) TENSIONES INDUCIDAS EN DEVANADOS DE MÁQUINAS ROTATORIAS.

4.2.1) Tensiones inducidas en la bobina elemental.



θ : Posición angular
 ω : Velocidad angular

Fig.4.59.: Bobina en un campo magnético.

$$e(t) = \frac{d\Psi}{dt}(\theta, t) = \underbrace{\frac{\partial \Psi}{\partial t}}_{\text{Tensión de transformación}} + \underbrace{\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \omega}_{\text{Tensión de rotación}} \quad (4.19)$$

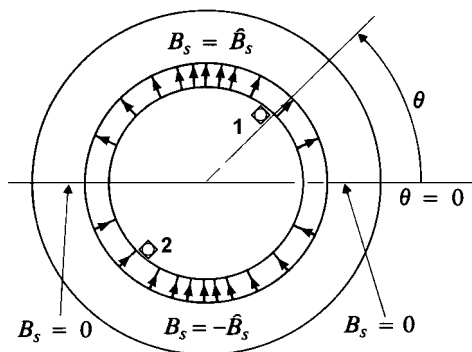


Fig.4.60.: Bobina del rotor en campo magnético producido por el estator.

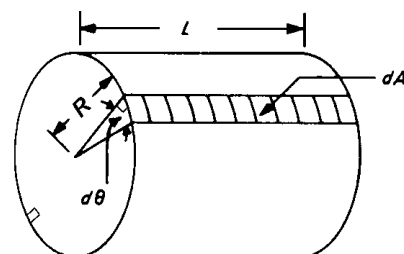


Fig.4.61.: Dimensiones del rotor.

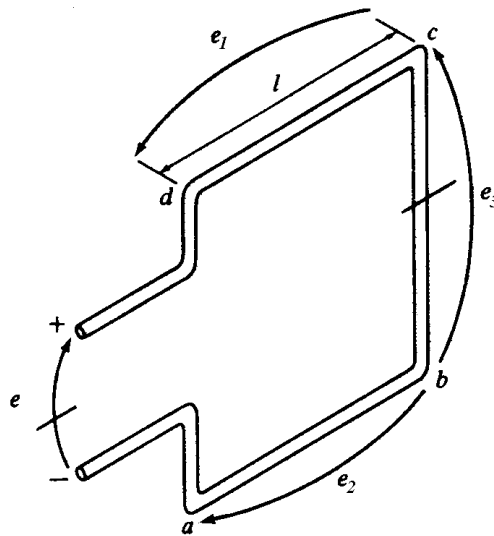


Fig.4.62.: Tensiones en la bobina elemental.

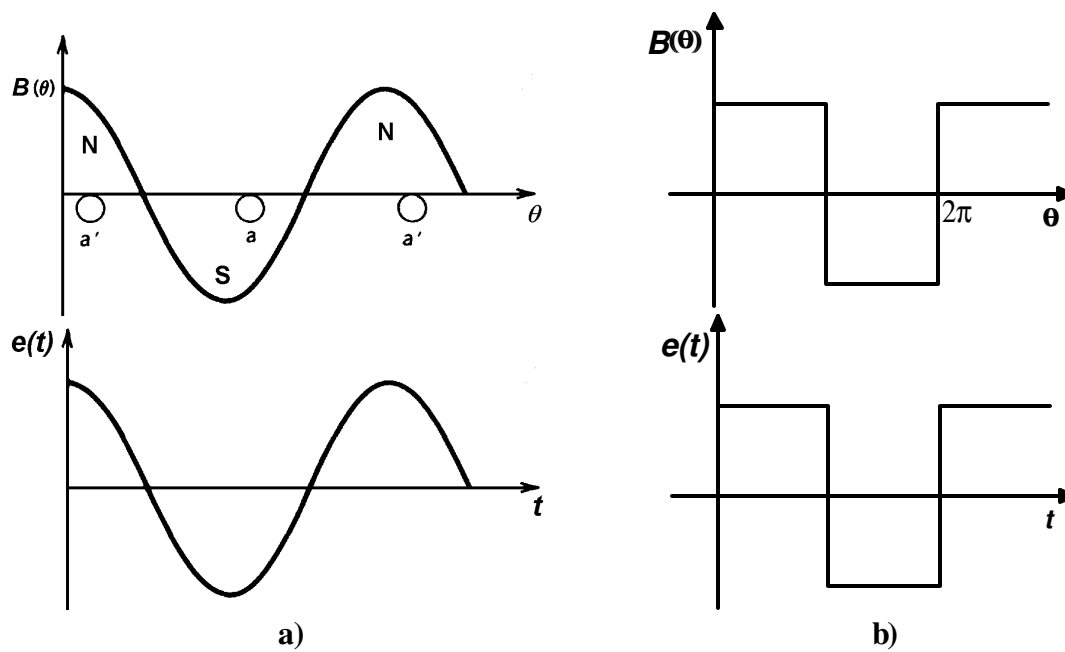


Fig.4.63.: Tensión inducida en una bobina que gira a velocidad fija con campo: a) sinusoidal; b) rectangular.

4.2.2) Tensiones inducidas en bobinas desplazadas geométricamente.

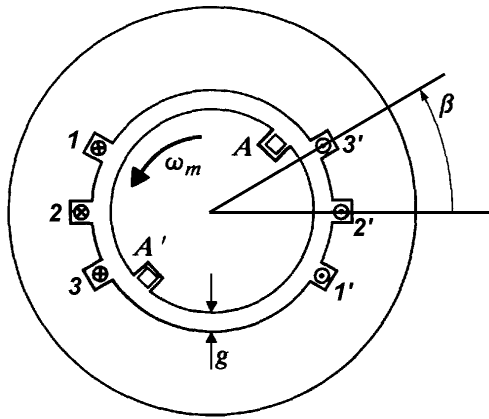


Fig.4.64.: Bobinas de estator desplazadas en ángulo β .

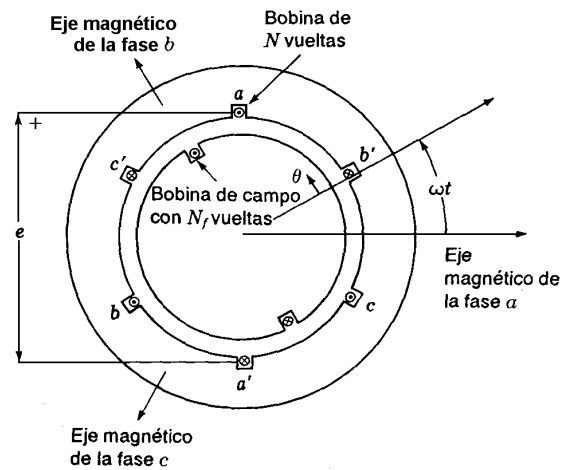


Fig.4.65.: Bobinas de estator desplazadas en 120° .

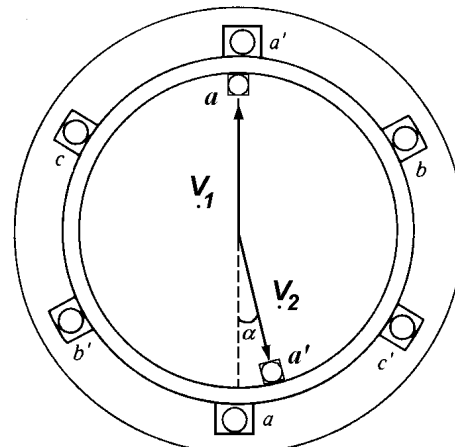
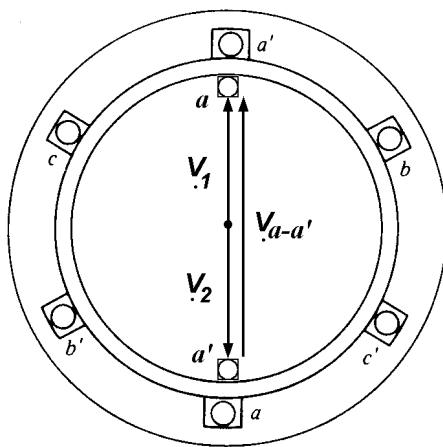


Fig.4.66.: Bobina con: a) paso polar; b) paso acortado

4.2.3) Tensiones inducidas en un devanado distribuido.

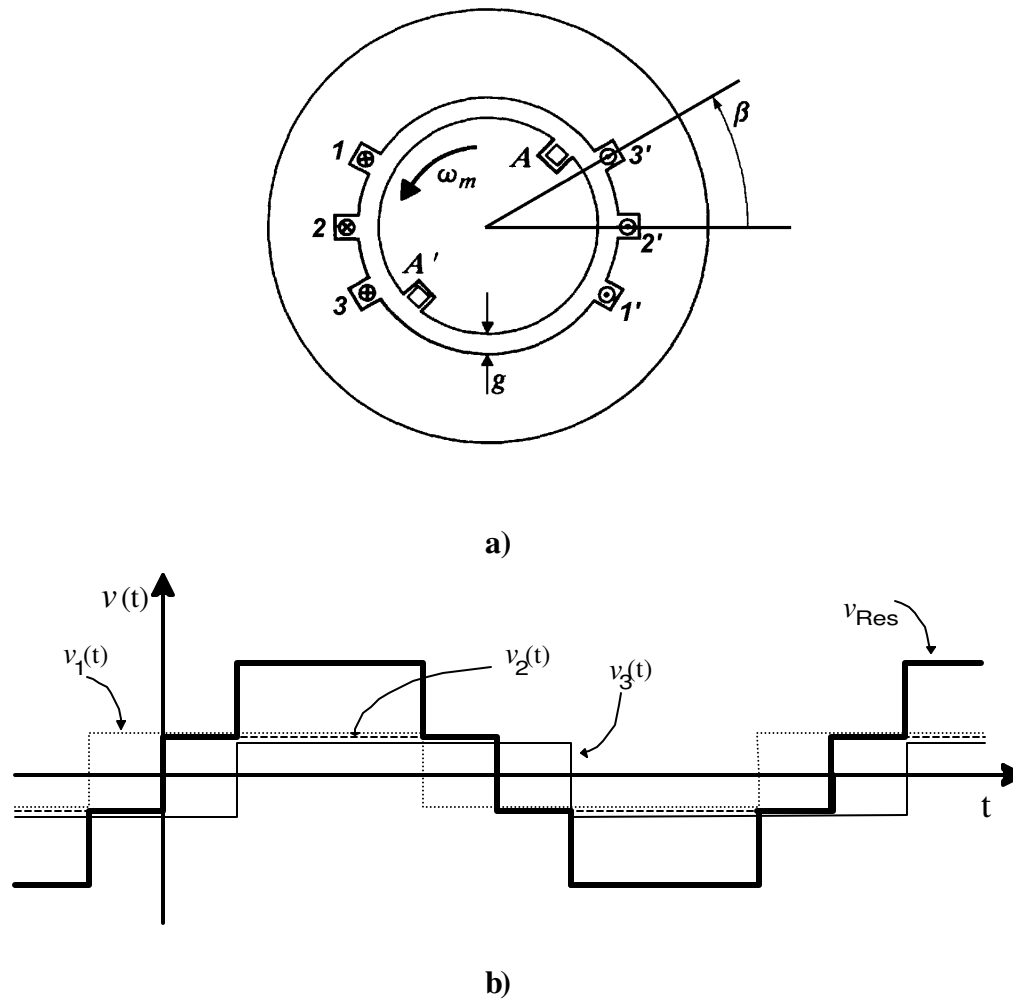


Fig.4.67.: Devanado distribuido en 6 ranuras: **a)** disposición; **b)** tensiones inducidas.

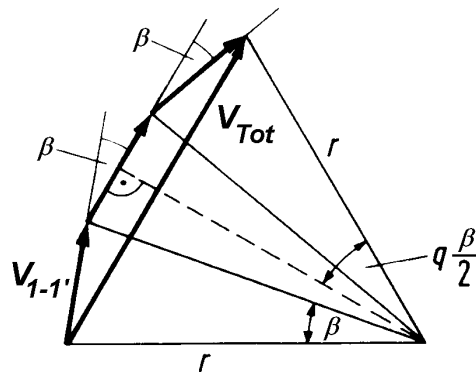


Fig.4.68.: Tensión resultante en un devanado distribuido en 6 ranuras.

4.2.4) Tensiones inducidas en el rotor de una máquina de corriente continua (Devanado con conmutador).

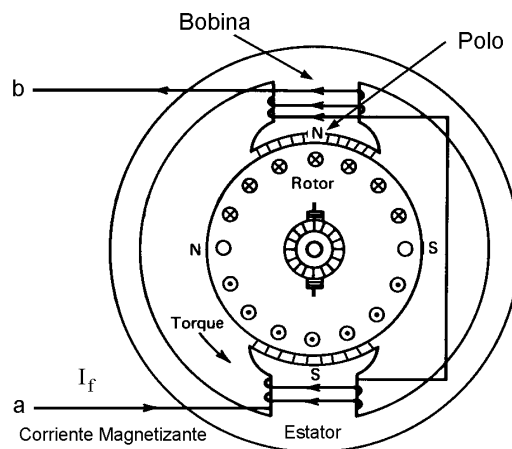


Fig.4.69.: Devanado de campo (estator) de una máquina de corriente continua de 2 polos.

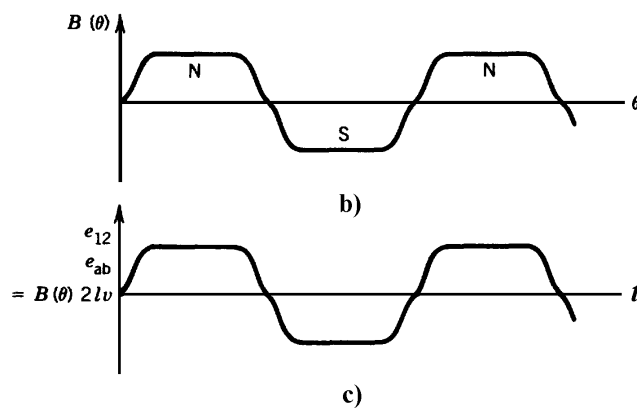
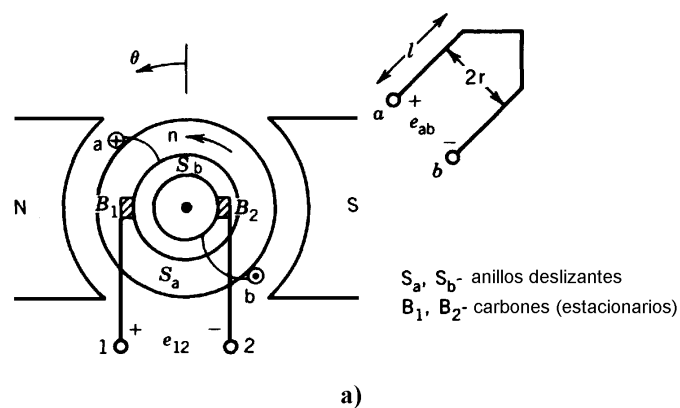


Fig.4.70.: Máquina de corriente continua elemental (con una bobina en el rotor y anillos deslizantes): a) disposición de la bobina; b) campo; c) tensión inducida.

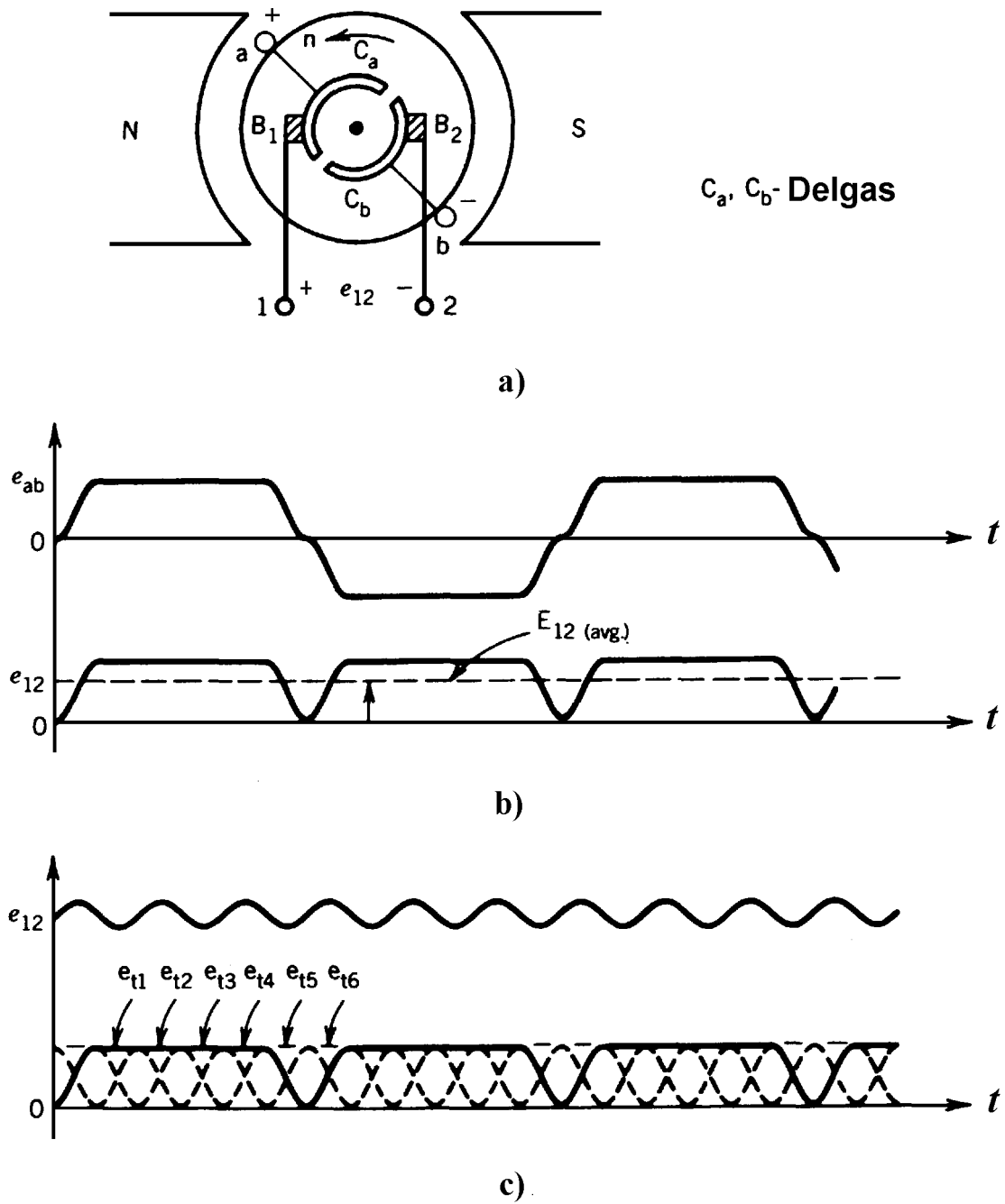


Fig.4.71. Máquina de corriente continua elemental (con 1 bobina en el rotor y un conmutador de 2 delgas): **a)** disposición de la bobina; **b)** y **c)** tensiones inducidas.

CAPÍTULO 5

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

5.1) ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

5.1.1) Principio de funcionamiento.

➔ **Devanado de Estator (campo):**

- **Objetivo:** producir el campo que posibilita la conversión de energía.

➔ **Devanado del rotor (armadura):**

Objetivo: realizar la conversión de energía eléctrica-mecánica.

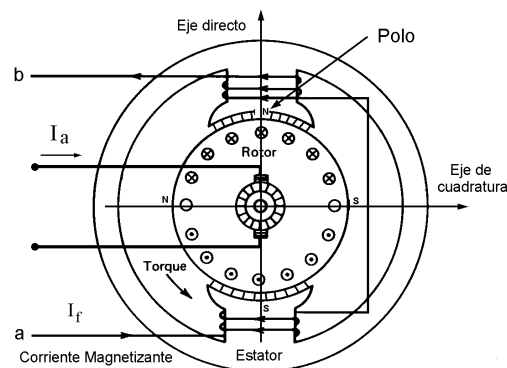


Fig.5.1.: Esquema básico de una máquina de corriente continua.

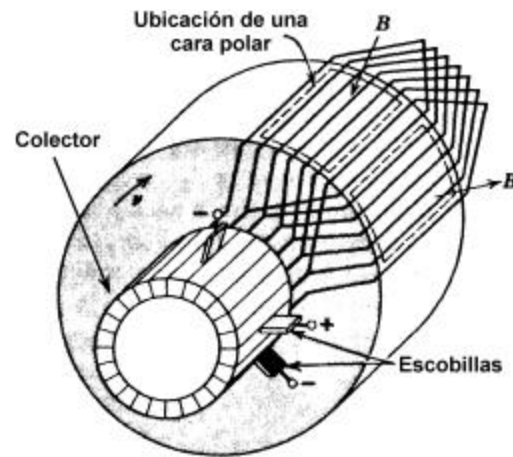


Fig.5.2.: Diagrama de alimentación del rotor de una máquina de corriente continua.

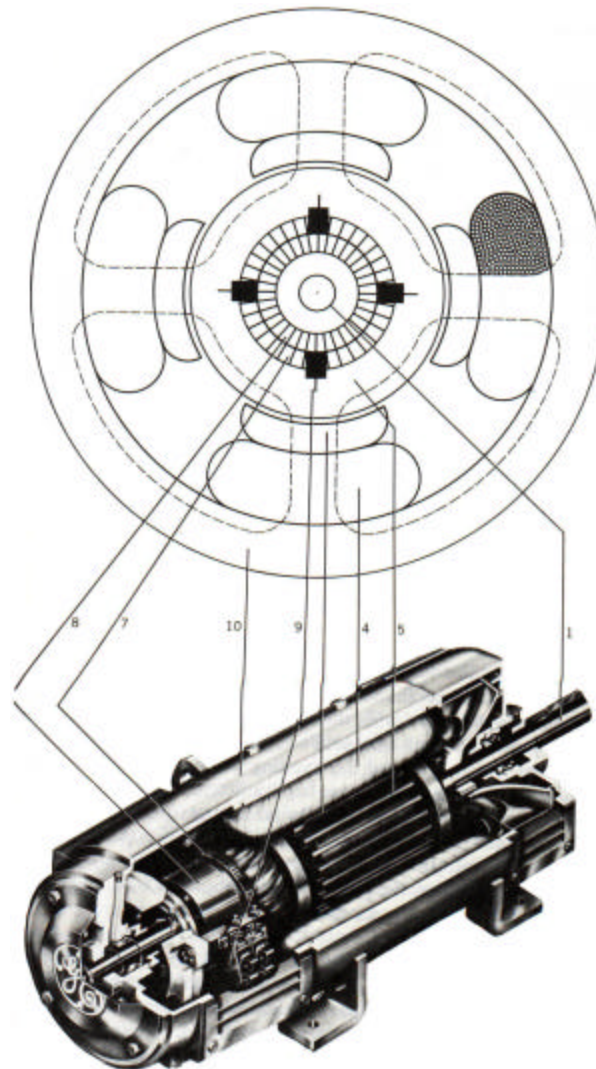


Fig.5.3.: Visión global de una máquina de corriente continua.

5.1.2) La reacción de armadura.

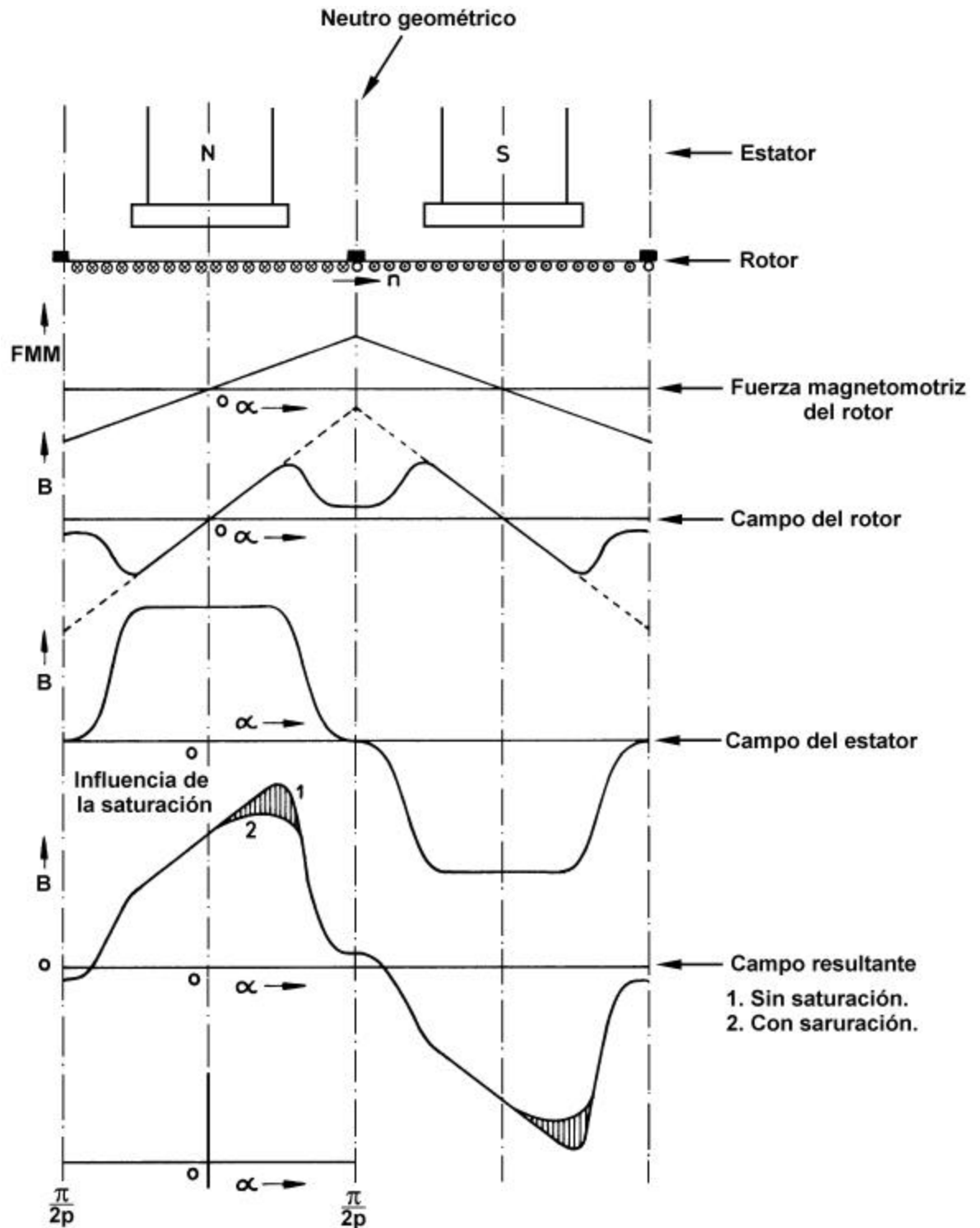


Fig.5.4.: Campos de la máquina de corriente continua.

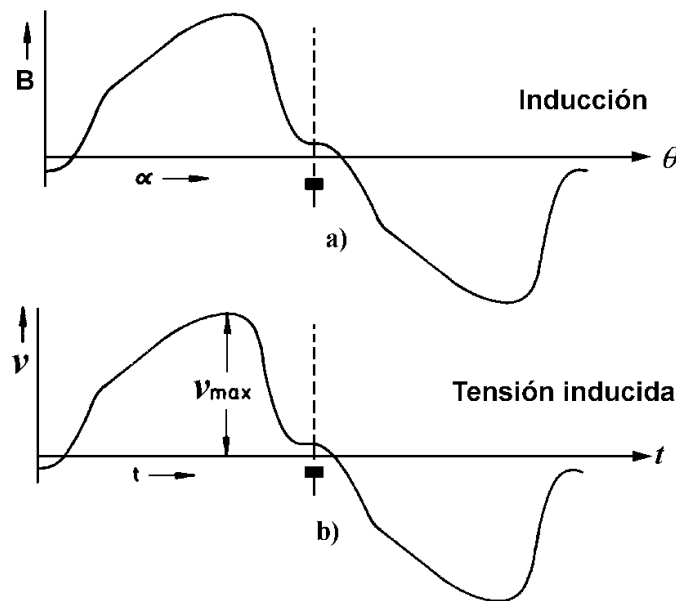


Fig.5.5.: Efecto del campo en la tensión inducida en una bobina.

5.1.3) El circuito eléctrico equivalente de la máquina de corriente continua.

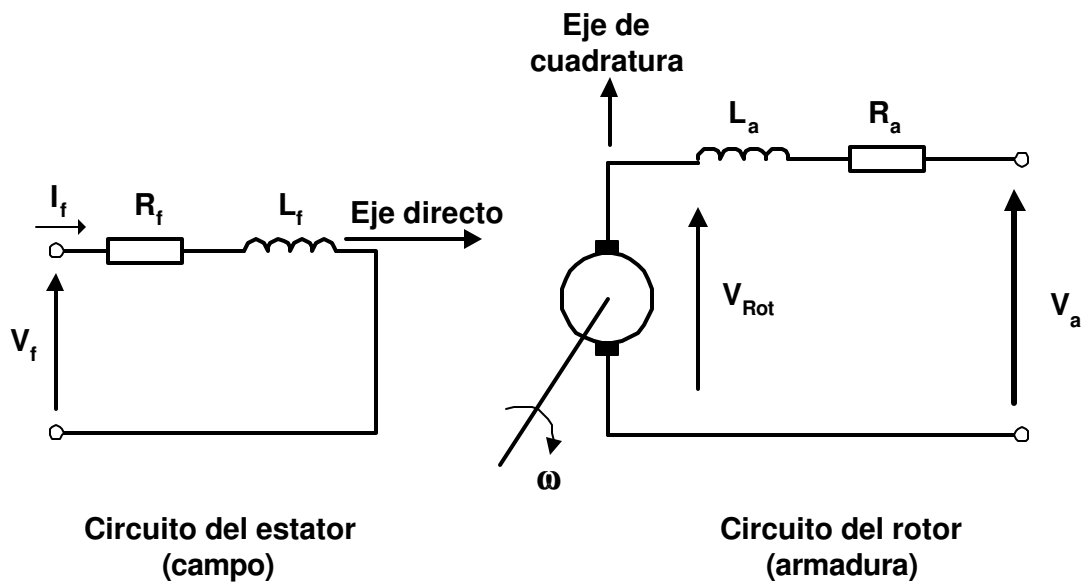


Fig.5.6.: Circuito equivalente.

5.1.4) Medidas para compensar los efectos de la reacción de armadura.

➔ Uso de devanados de compensación

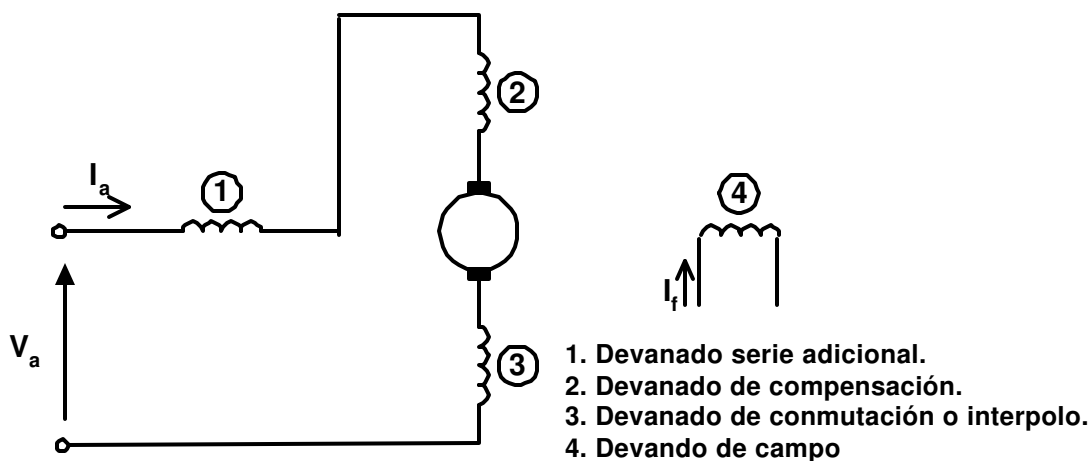


Fig.5.7.: Devanados de compensación en una máquina de corriente continua.

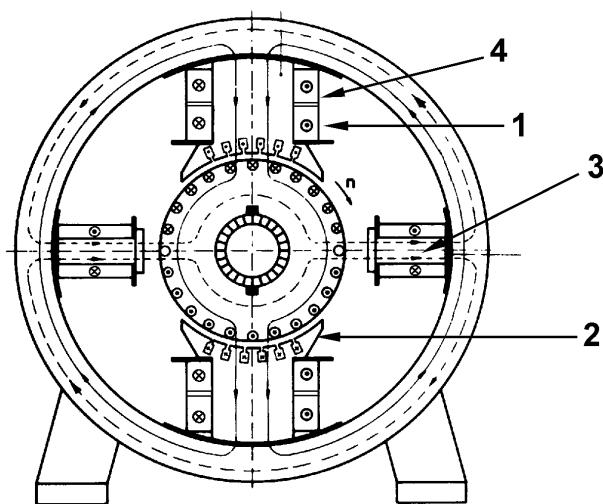


Fig.5.8.: Disposición física de los devanados de compensación.

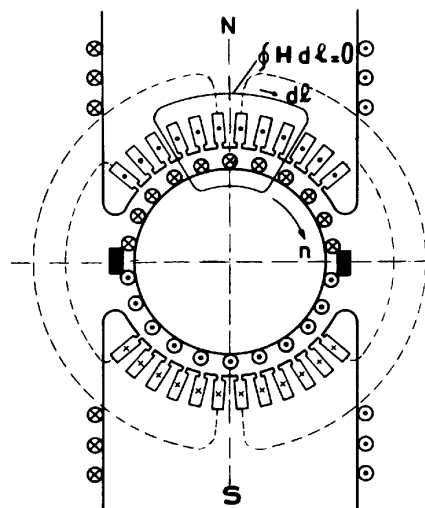


Fig.5.9.: Vista detallada de un devanado de compensación.

5.2) ECUACIONES GENERALES DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.

5.2.1) Ecuaciones del generador.

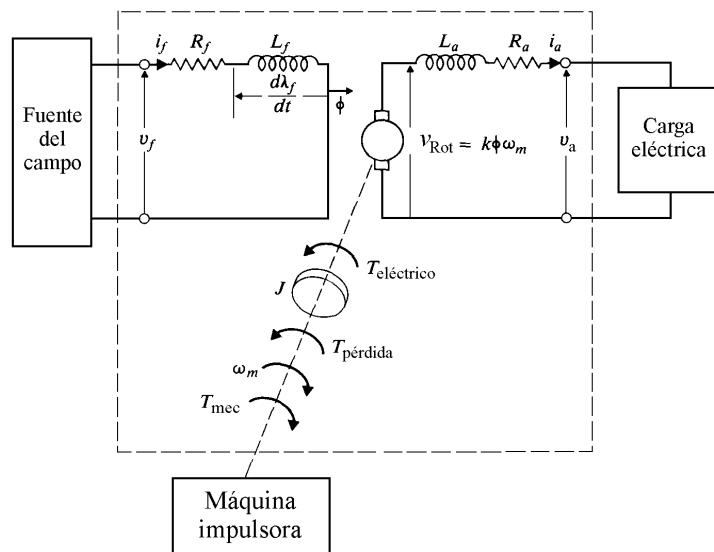


Fig.5.10.: Circuito equivalente de un generador de corriente continua.

5.2.2) Ecuaciones del motor.

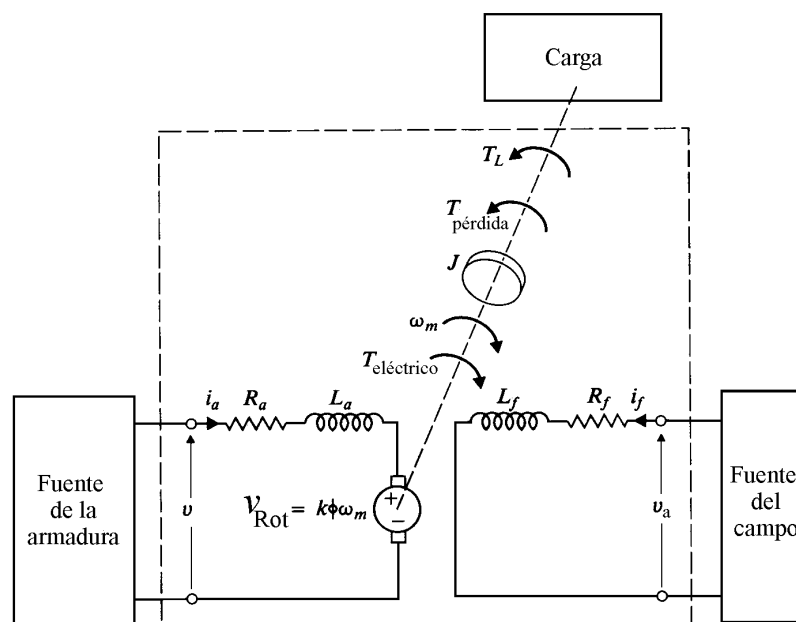


Fig.5.11.: Circuito equivalente del motor de CC.

5.2.3) Clasificación de las máquinas de corriente continua.

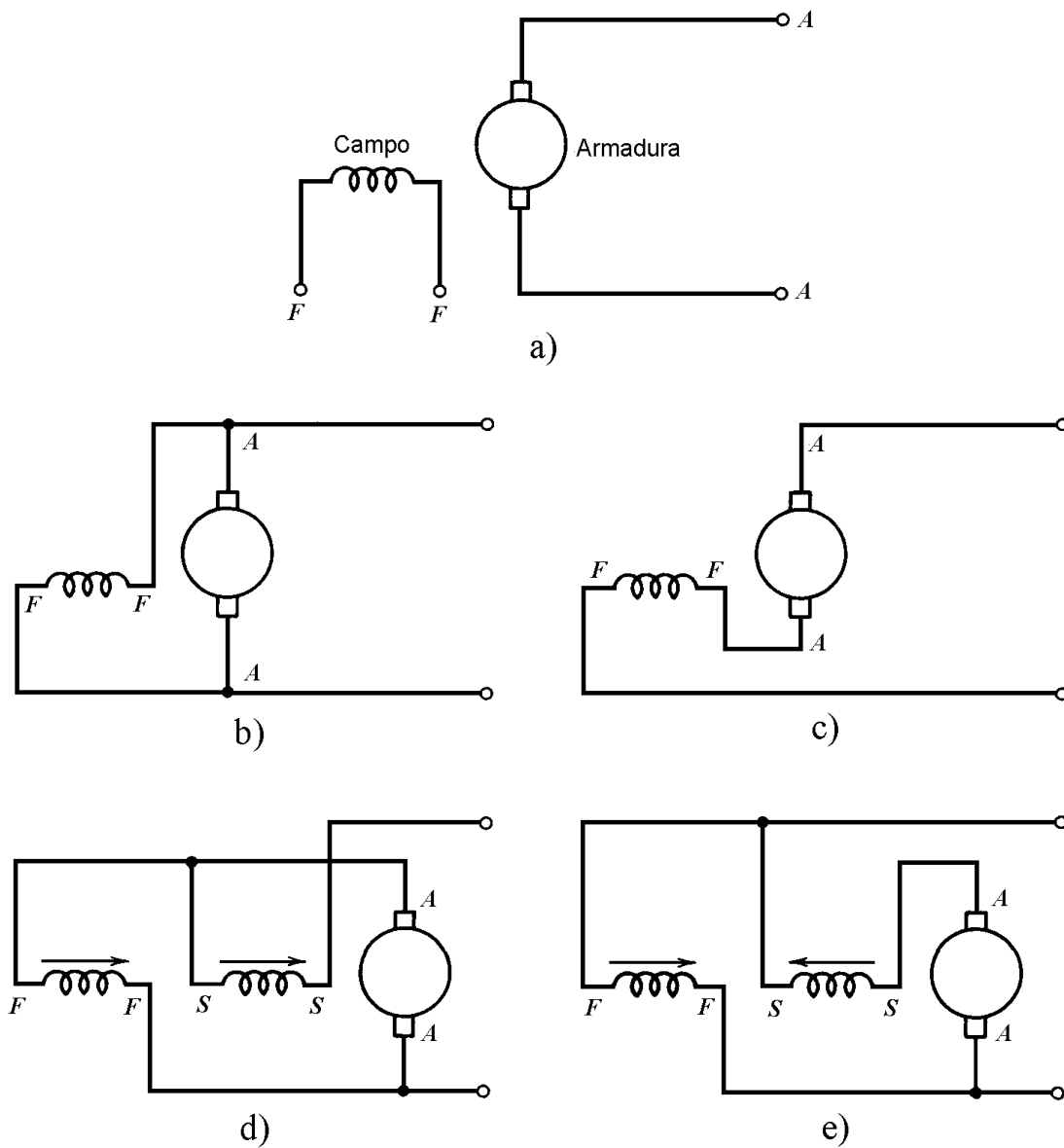


Fig.5.12.: Conexiones de algunas máquinas de corriente continua: **a)** de excitación independiente; **b)** shunt; **c)** serie; **d)** compensada acumulativa; **e)** compensada diferencial.

5.3) GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA EN ESTADO ESTACIONARIO.

5.3.1) El generador de excitación independiente.

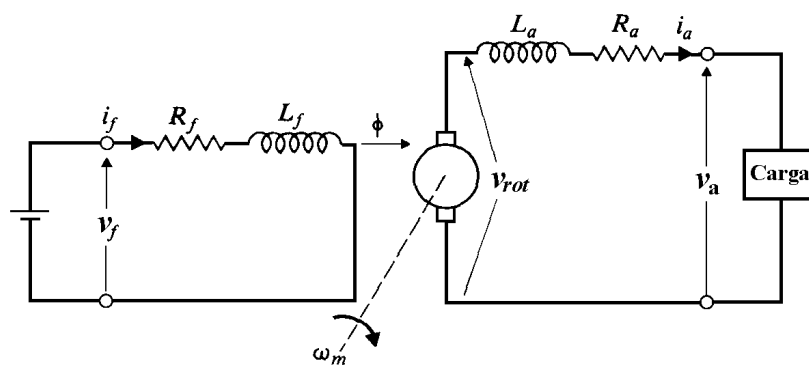


Fig.5.13. Circuito equivalente del generador de excitación independiente.

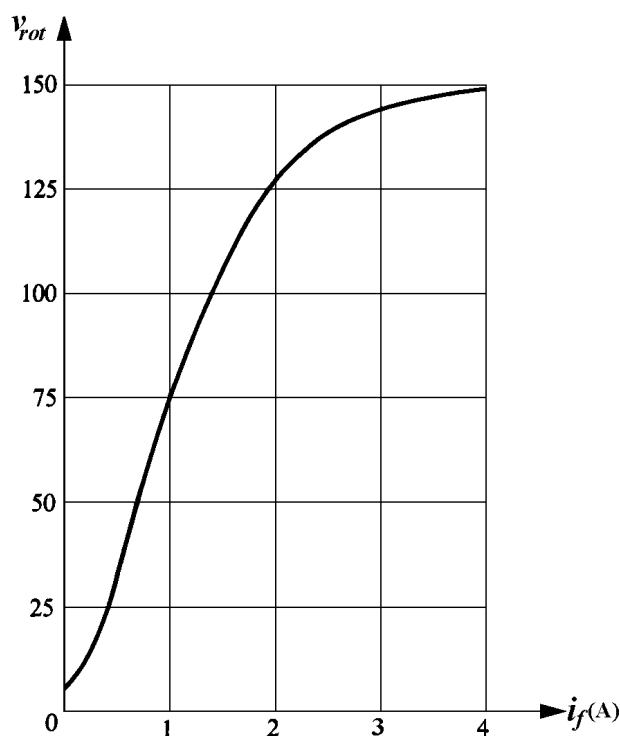


Fig.5.14. Característica de vacío (de magnetización) del generador de excitación independiente.

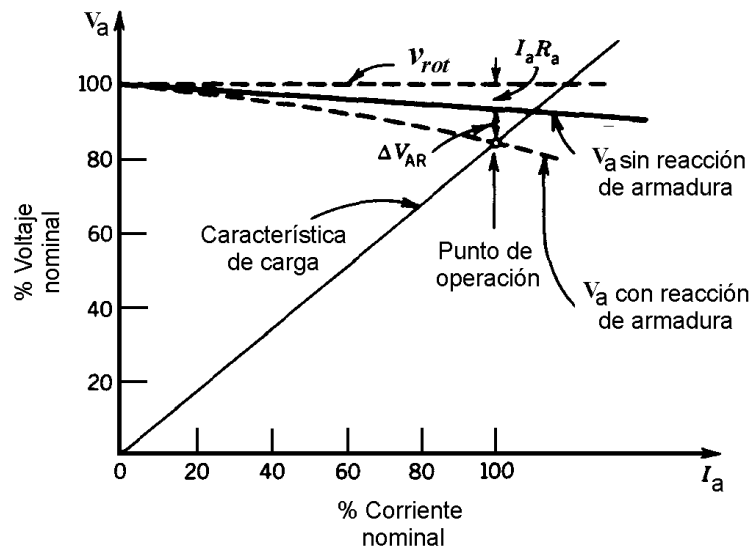


Fig.5.15.: Característica de carga del generador de excitación independiente.

5.3.2) El generador autoexcitado.

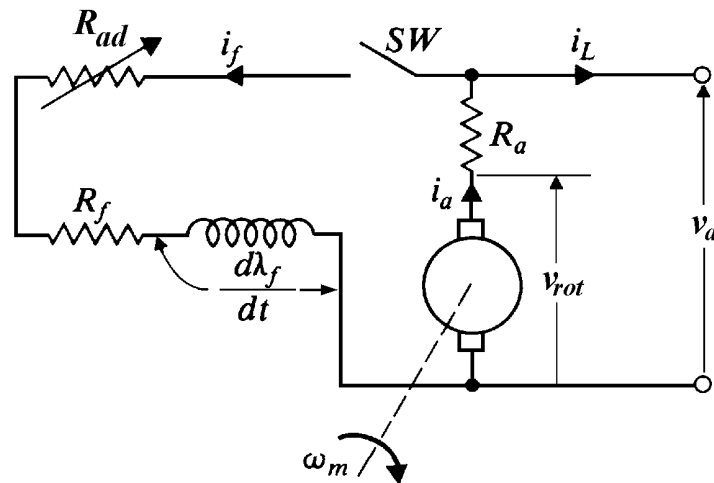


Fig.5.16.: Conexiones de un generador autoexcitado shunt.

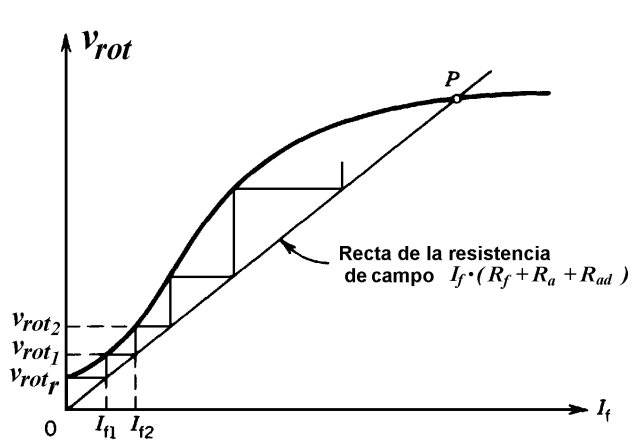


Fig.5.17.: Aumento de la tensión en el generador autoexcitado.

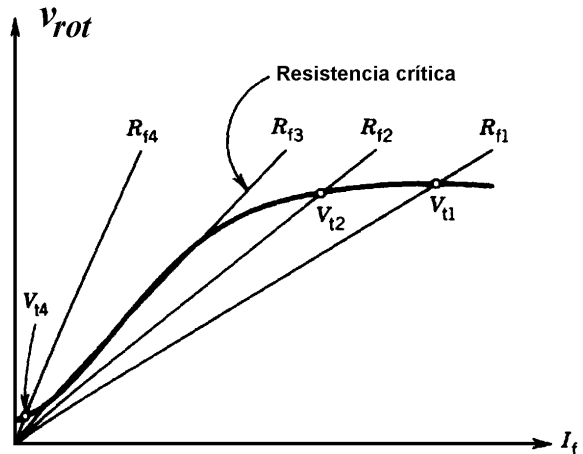


Fig.5.18.: Efecto de la resistencia de campo.

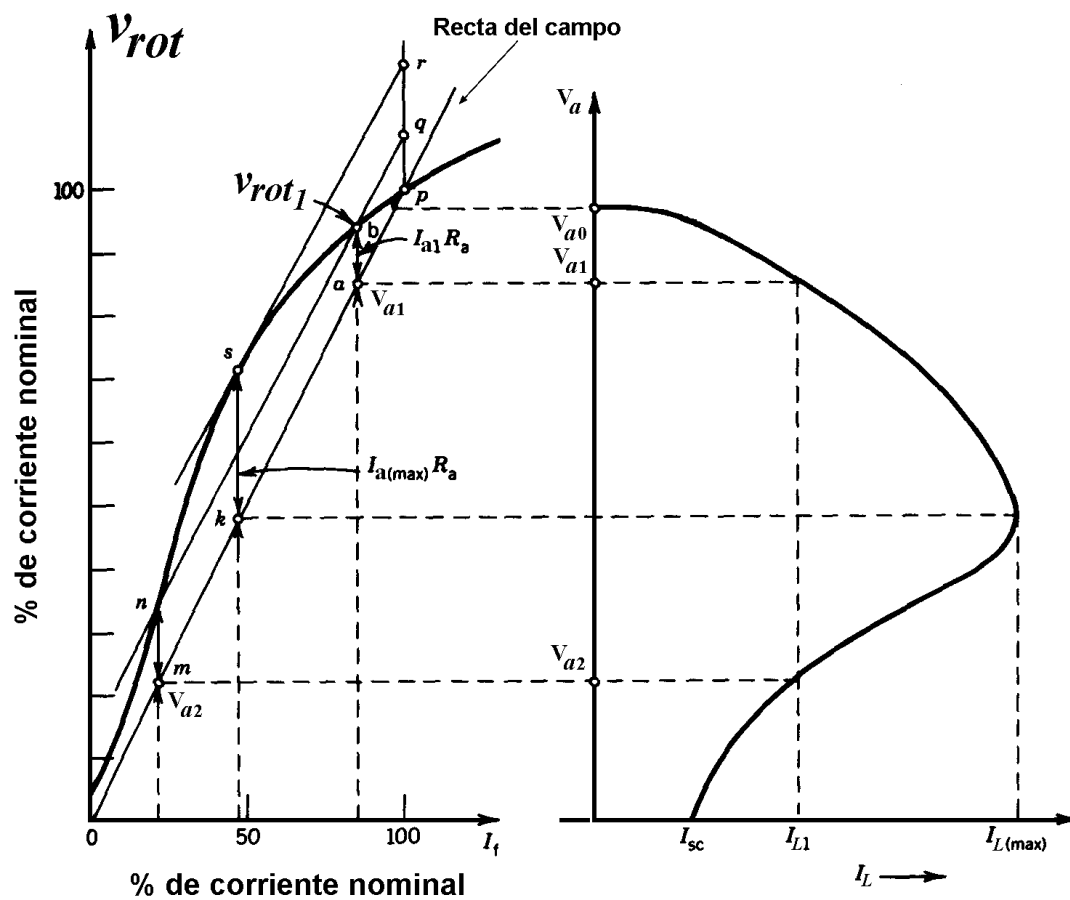


Fig.5.19.: Característica de carga de un generador autoexcitado.

5.3.3) El generador compensado (compound).

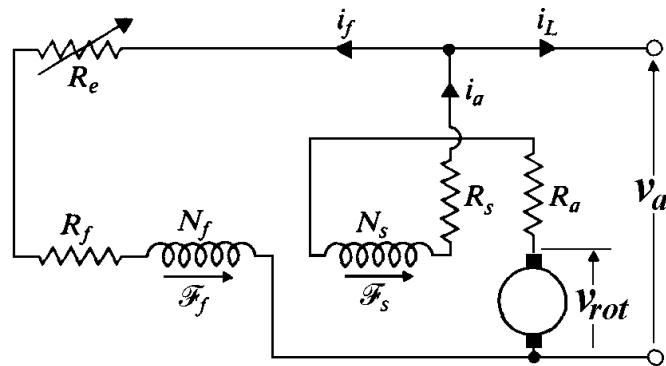


Fig.5.20.: Circuito de un generador compensado.

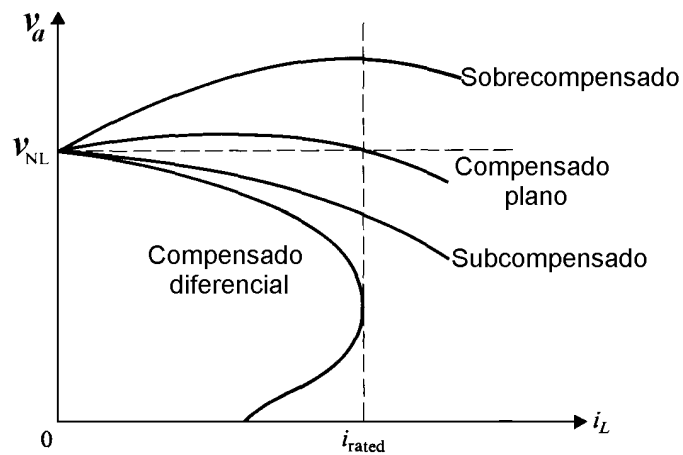


Fig.5.21.: Característica de carga de un generador autoexcitado compensado.

5.4) MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA EN ESTADO ESTACIONARIO.

5.4.1) El motor de excitación independiente (shunt).

- ➔ El motor de excitación independiente tiene el devanado de campo alimentado por una fuente independiente (ver figura 5.11).
- ➔ El motor shunt tiene el devanado de campo conectado en paralelo con el devanado de armadura.

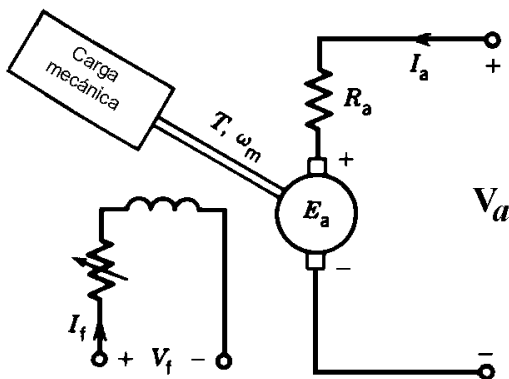


Fig.5.22.: El motor de excitación independiente.

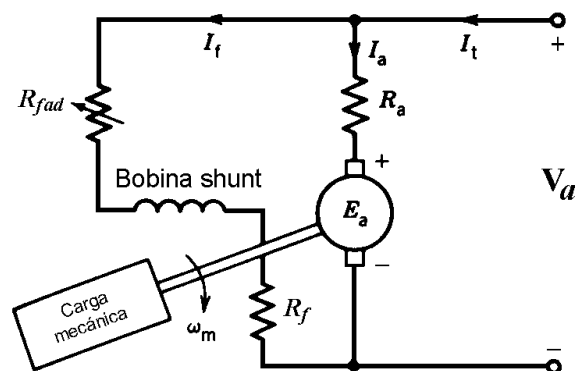


Fig.5.23.: El motor shunt.

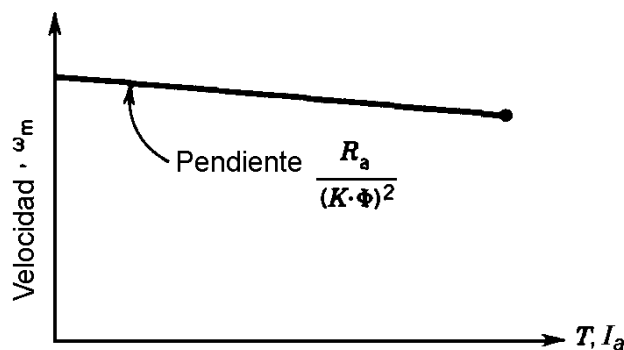


Fig.5.24.: Característica de carga de un motor de excitación independiente (o shunt).

5.4.2) El motor serie.

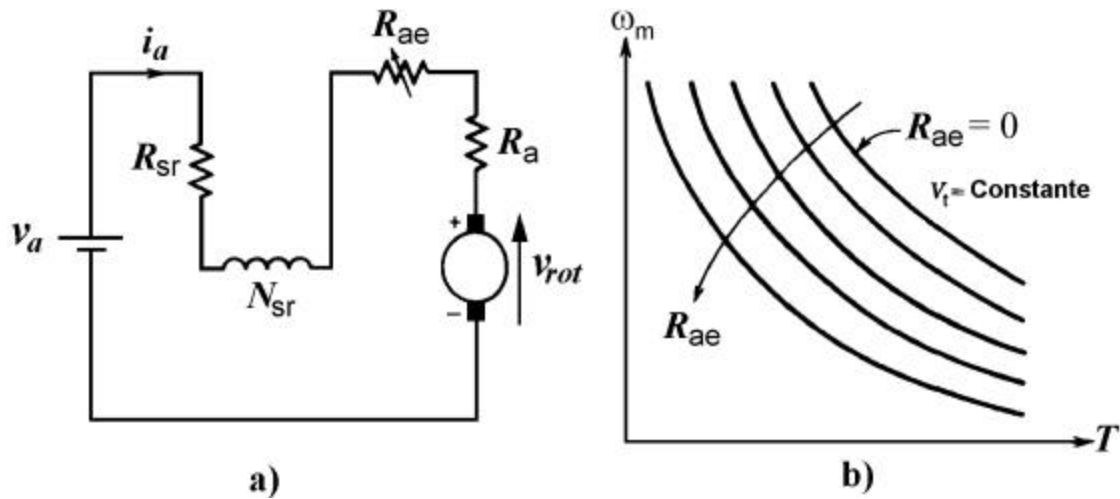


Fig.5.25.: Motor serie: **a)** circuito; **b)** Característica de carga.

5.4.3) El motor universal.

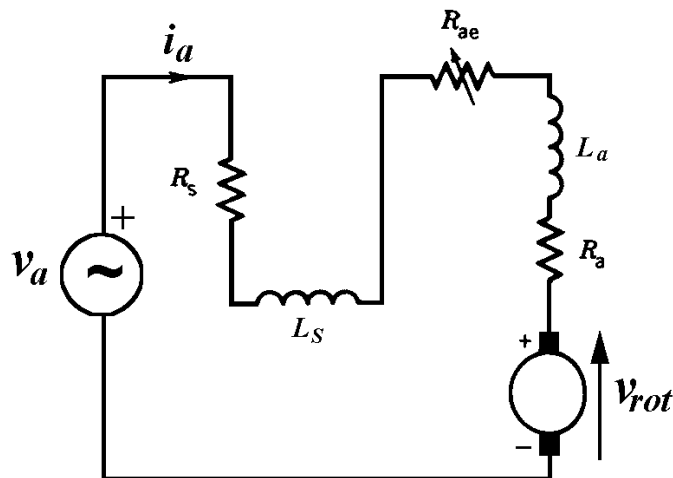


Fig.5.26.: Motor universal.

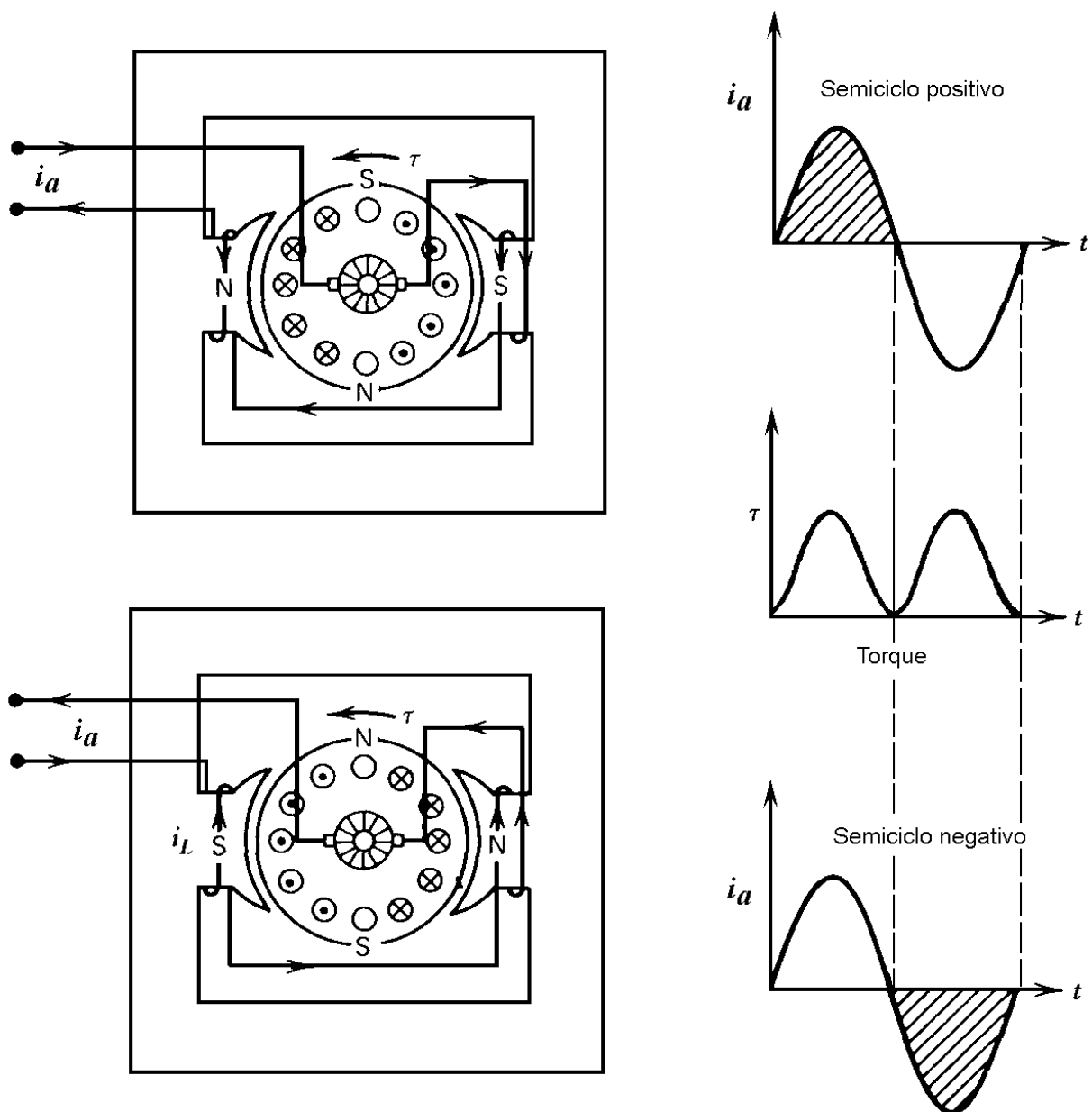


Fig.5.27.: Principio de funcionamiento del motor universal.

5.5) CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y CONTROL.

5.5.1) Generadores en paralelo.

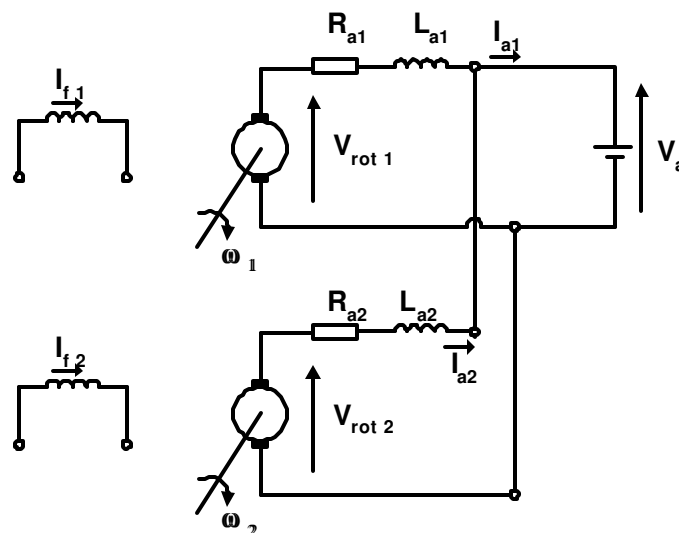


Fig.5.28.: Conexión paralelo de dos generadores de excitación independiente.

5.5.2) Comportamiento dinámico del motor de excitación independiente.

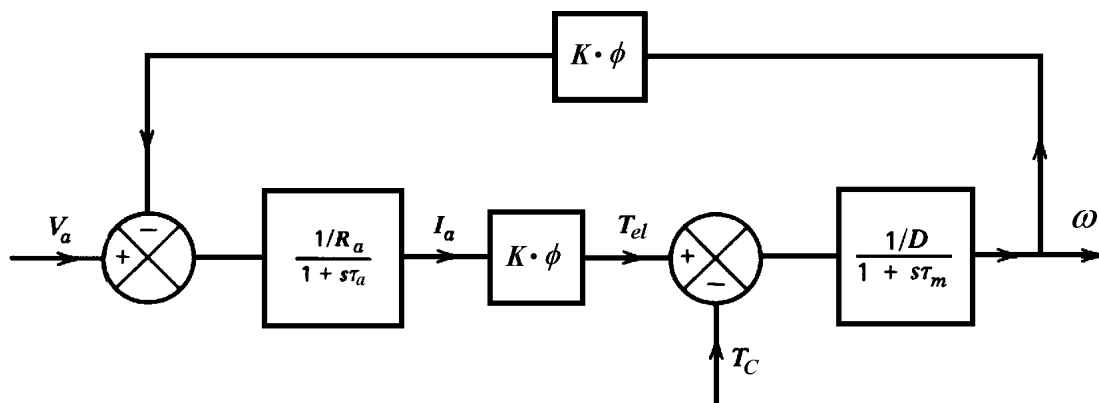


Fig.5.29.: Diagrama de bloques del motor de excitación independiente.

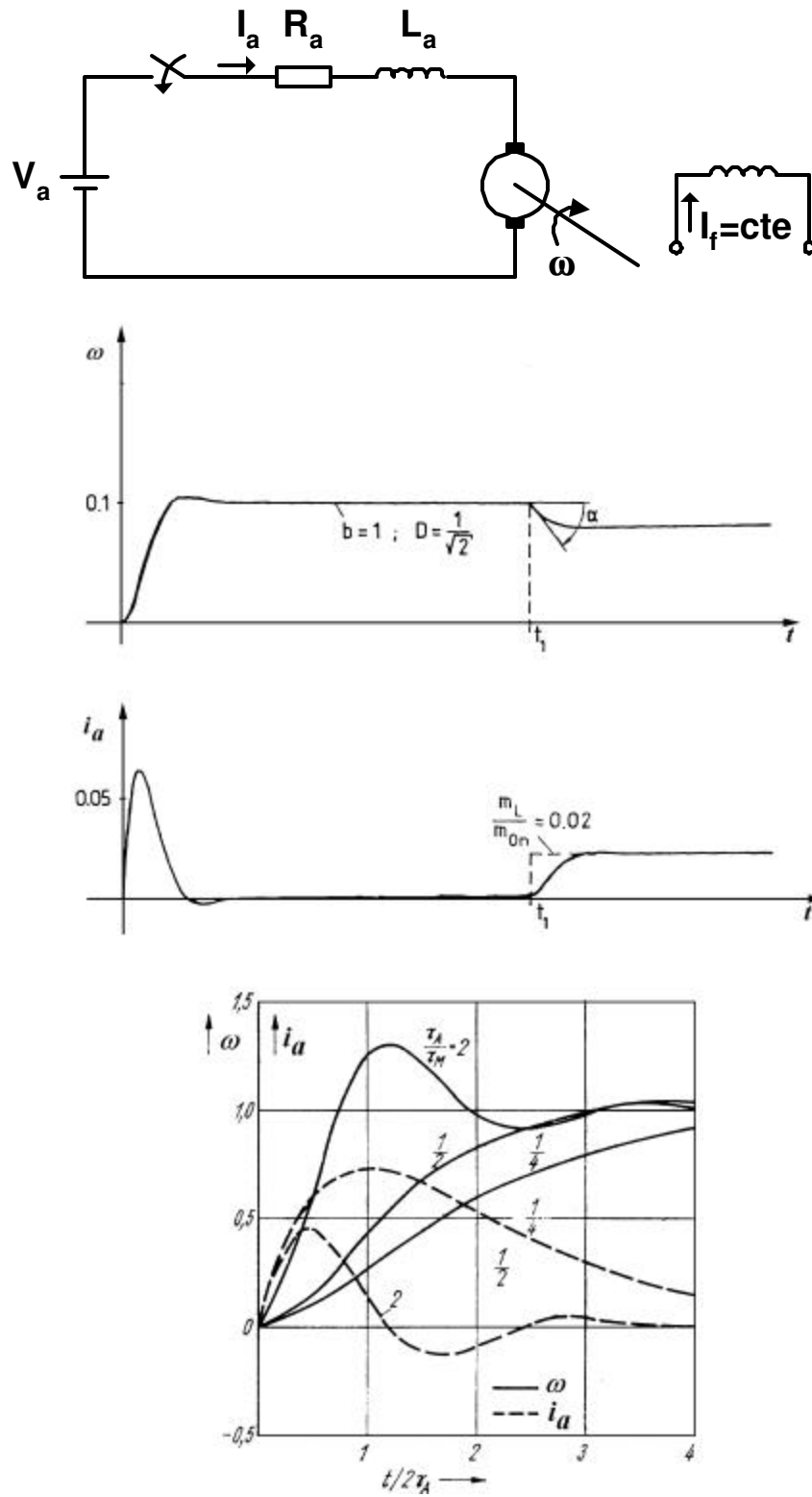


Fig.5.30.: Partida directa de un motor de excitación independiente.

5.5.3) Arranque de un motor con resistencias adicionales en la armadura.

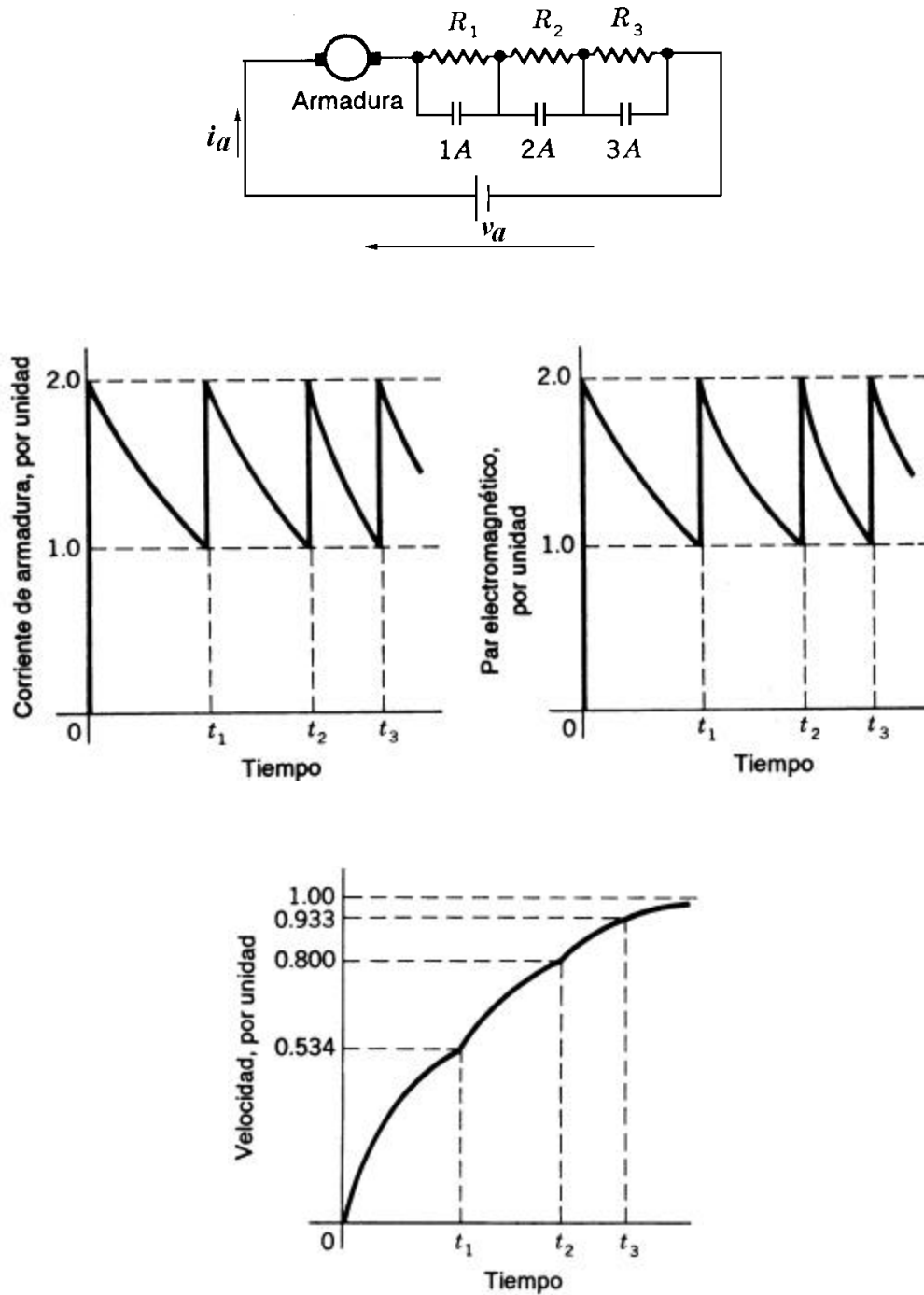


Fig.5.31.: Partida de un motor de excitación independiente con resistencias adicionales en el rotor.

5.5.4) Frenado de la máquina.

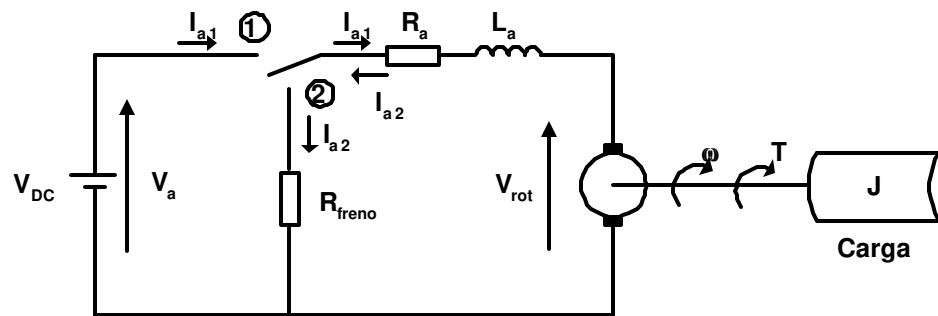


Fig.5.32.: Frenado eléctrico (con resistencia) de un motor de excitación independiente.

5.5.5) Control de velocidad del motor.

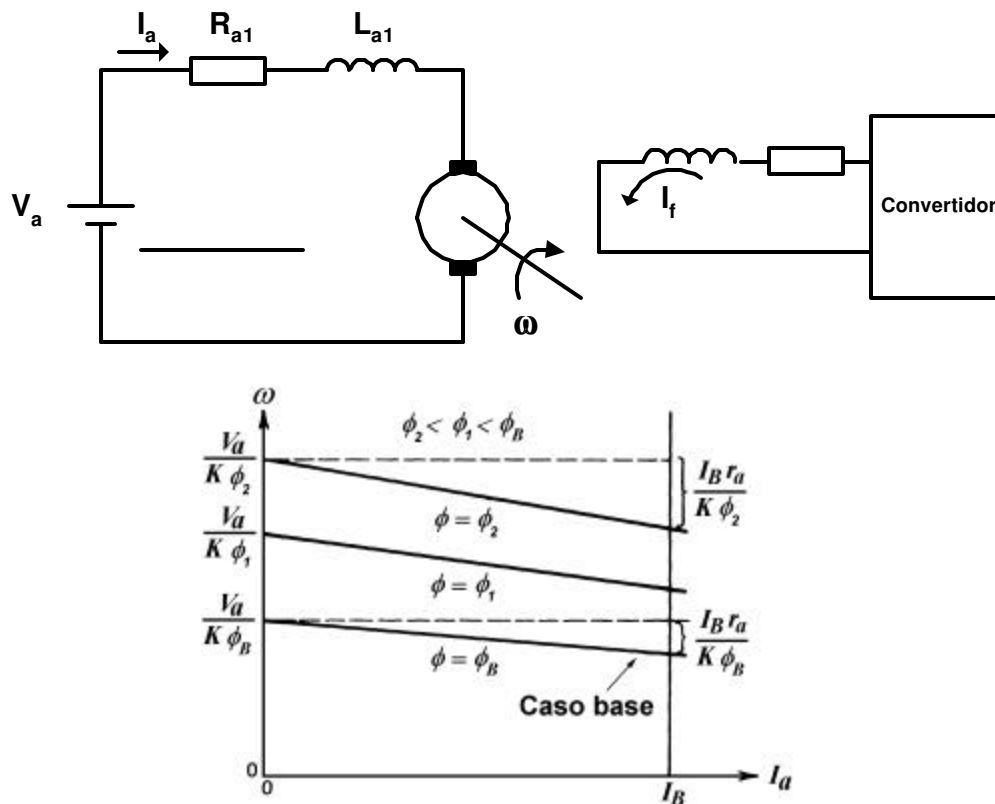


Fig.5.33.: Variación de la velocidad controlando la corriente de campo.

➔ Uso de resistencias adicionales en el rotor.

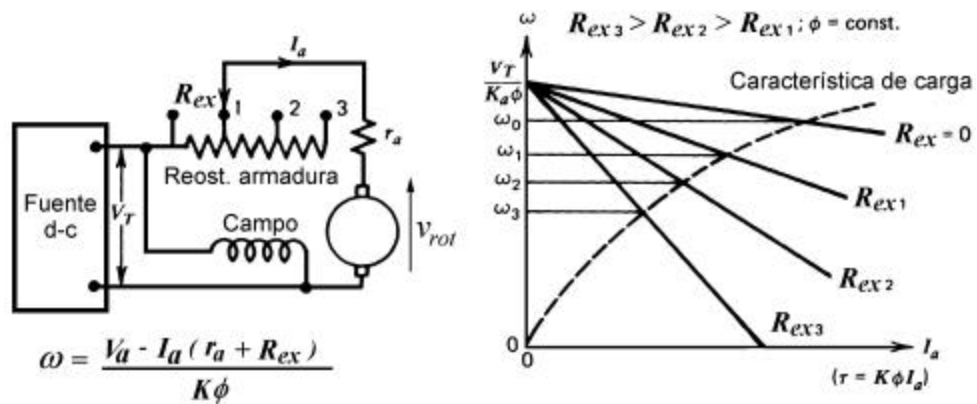


Fig.5.34.: Variación de la velocidad mediante resistencias adicionales en el rotor.

➔ Control de la tensión (corriente) de armadura.

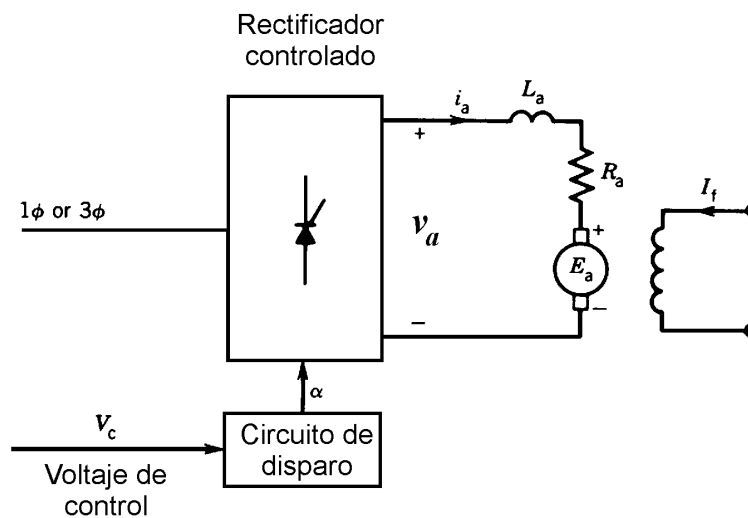


Fig.5.35.: Motor alimentado por un rectificador controlado.

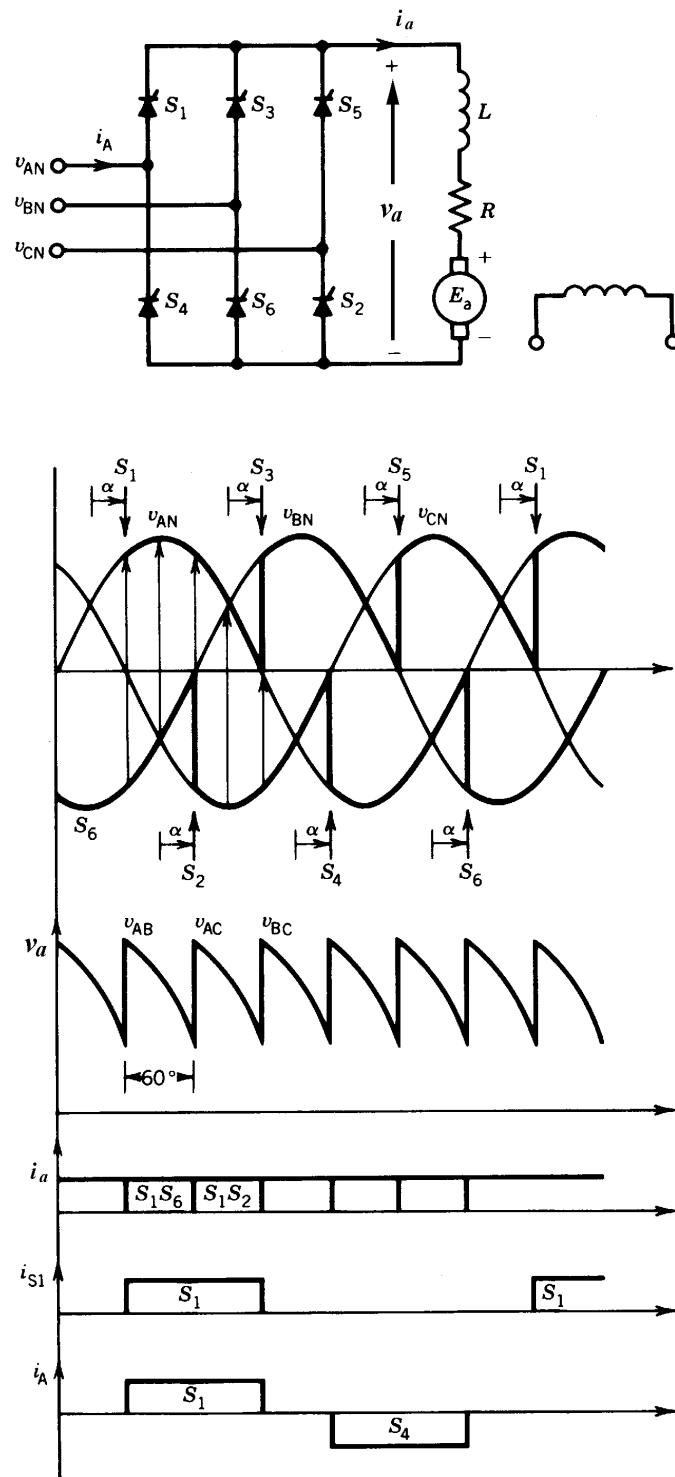


Fig.5.36.: Formas de onda de un rectificador trifásico alimentado a un motor de excitación independiente.

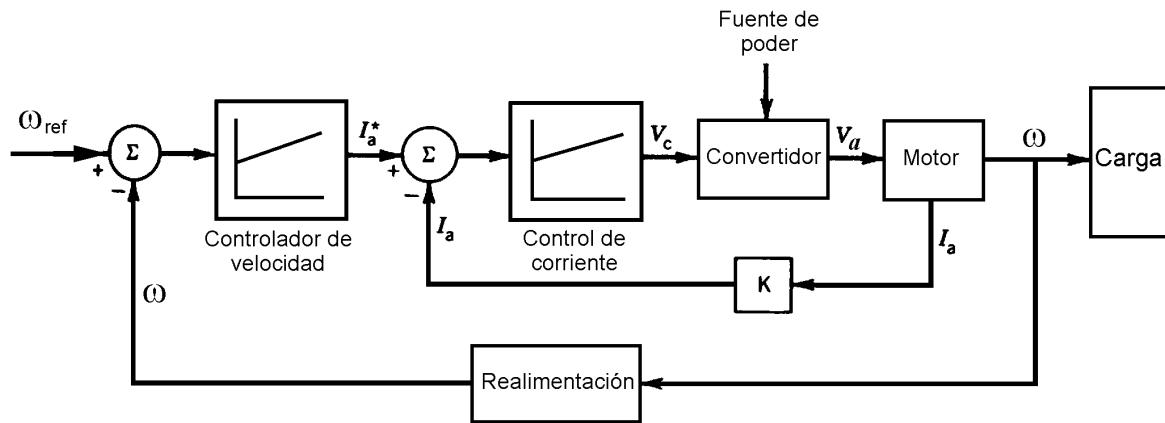


Fig.5.37.: Control de velocidad de lazo cerrado de una máquina de corriente continua.

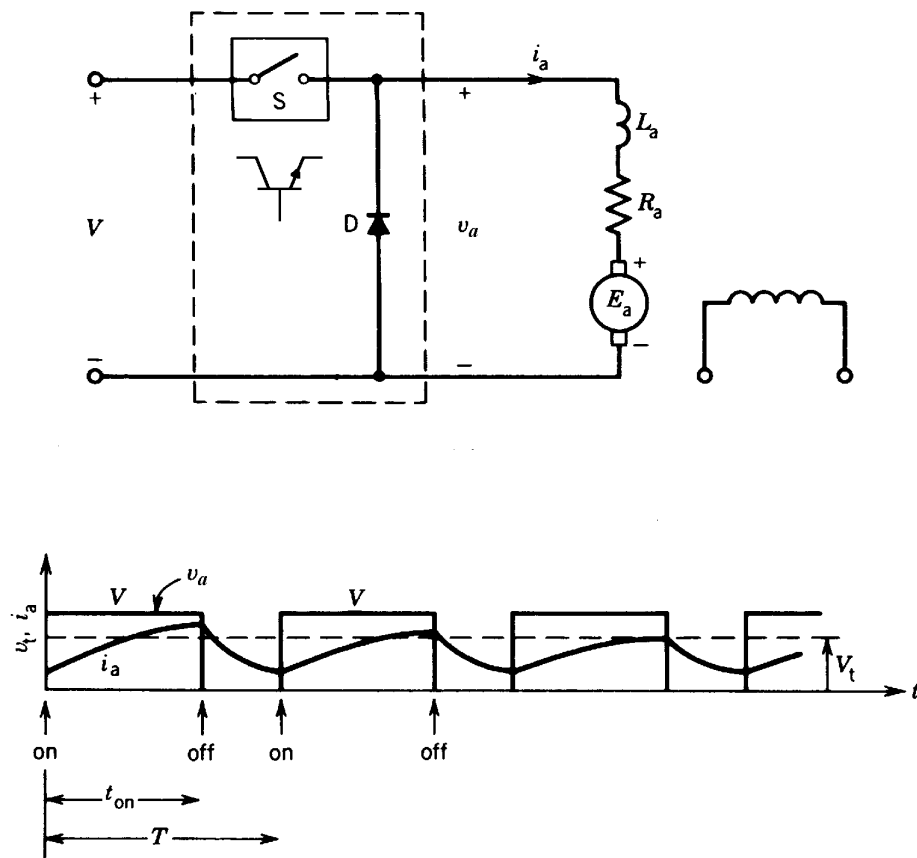


Fig.5.38.: Motor de excitación independiente alimentado por un pulsador (chopper).

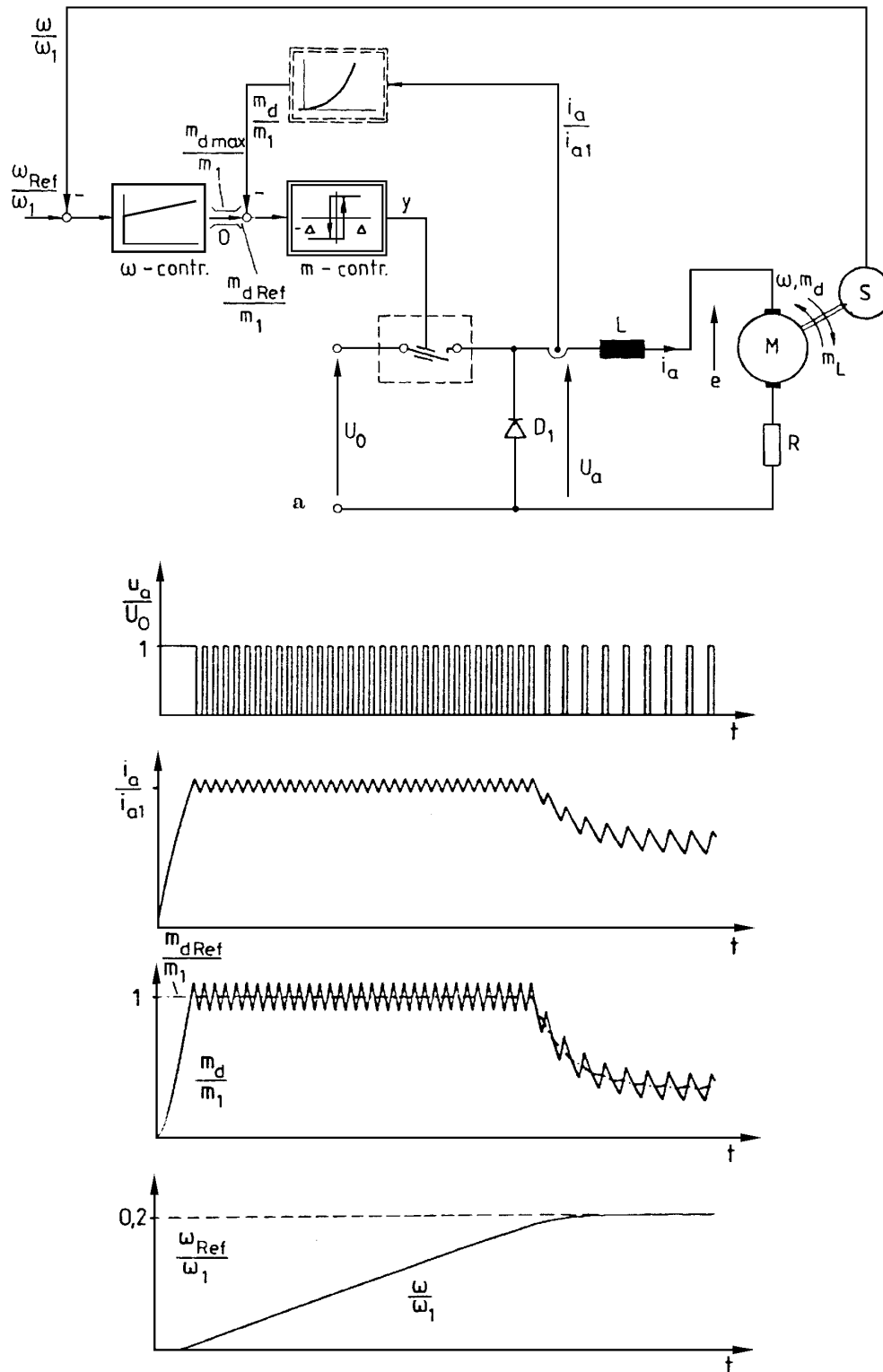


Fig.5.39.: Principio del control de velocidad de un motor alimentado por un chopper.

CAPÍTULO 6

MÁQUINAS SINCRÓNICAS

6.1) ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

6.1.1) Introducción.

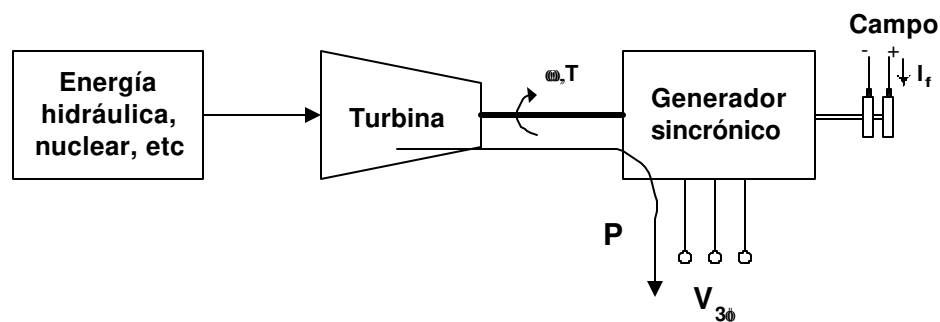


Fig.6.1.: Esquema básico de generación de energía eléctrica.

6.1.2) Aspectos constructivos.

- ➡ Devanado trifásico en el estator.
- ➡ Rotor alimentado con corriente continua mediante anillos deslizantes.

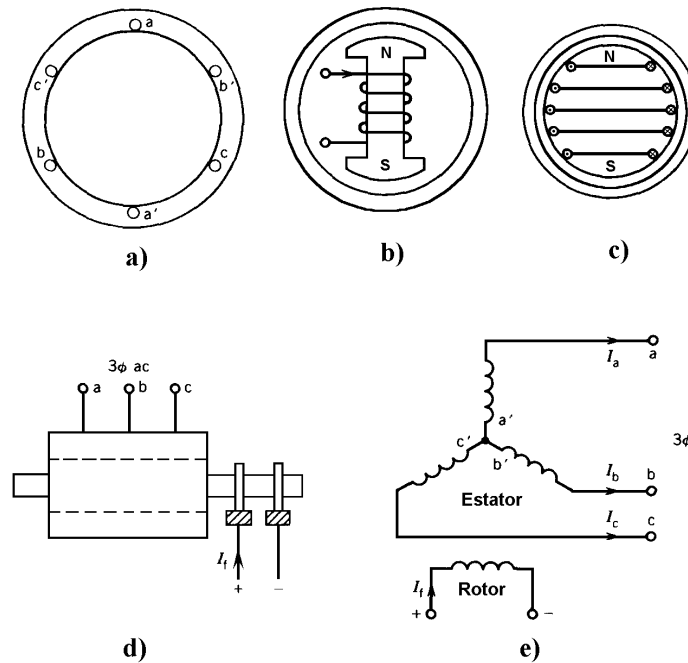


Fig.6.2.: Estructura básica de una máquina síncrona: **a)** estator trifásico; **b)** rotor de polos salientes; **c)** rotor cilíndrico; **d)** dibujo simbólico; **e)** circuito esquemático del estator y el rotor.

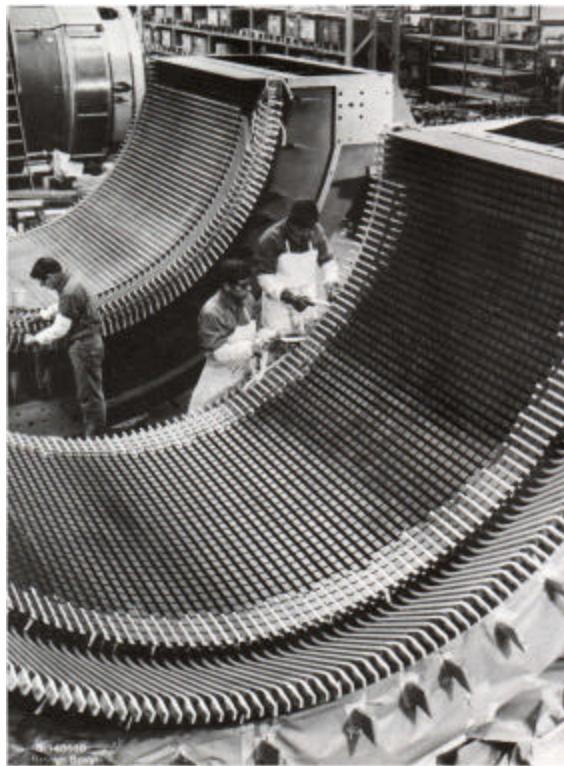


Fig.6.3.: Montaje de conductores en el estator (la mitad) de una máquina síncrona.

Rotor de polos salientes:

- ➔ Se usa en máquinas de baja velocidad (gran número de polos).
- ➔ Se usa con turbinas hidráulicas (centrales hidroeléctricas)

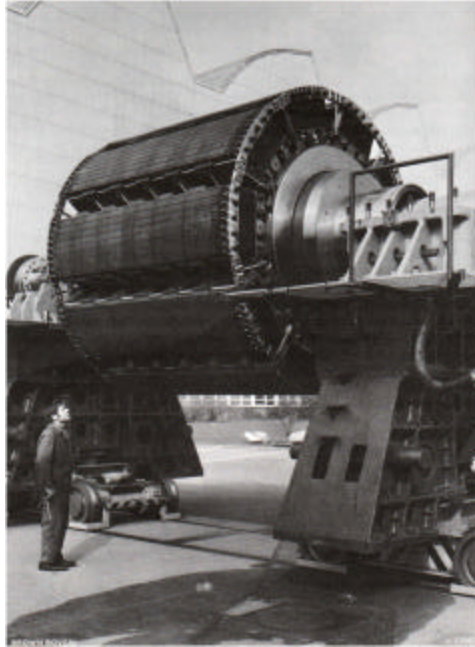


Fig.6.4.: Rotor de polos salientes de una máquina sincrónica de 13,8 [kV], 152,5 [MVA].

Rotor cilíndrico:

- ➔ Se usa en máquinas de alta velocidad (2 a 4 polos).
- ➔ Se usa con turbinas de gas o vapor. (Centrales térmicas).

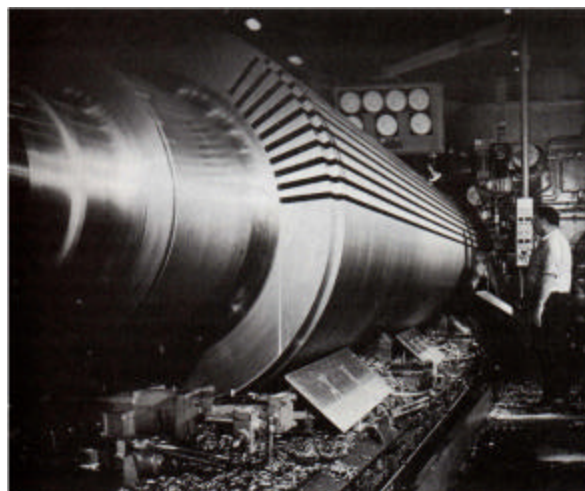


Fig.6.5.: Fabricación de ranuras en una máquina sincrónica grande.

6.1.3) Principio de funcionamiento.

➔ Motor síncrono:

- Rotor alimentado con corriente continua $\Rightarrow$ produce campo B_f estacionario con respecto al rotor.
- Estator alimentado con corrientes trifásicas $\Rightarrow$ produce un campo giratorio a la velocidad:

$$\omega_{\text{Sinc}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (6.1)$$

ω_{Sinc} : Velocidad a la que gira el campo del estator.

f : Frecuencia de las corrientes por el estator.

p : número de pares de polos.

$$T_{\text{el}} = K \cdot \hat{B}_{\text{est}} \cdot \hat{B}_{\text{rot}} \cdot \sin \delta_T \quad (6.2)$$

$$T_{\text{el}} = K \cdot \hat{FMM}_{\text{est}} \cdot \hat{FMM}_{\text{rot}} \cdot \sin \delta_T \quad (6.3)$$

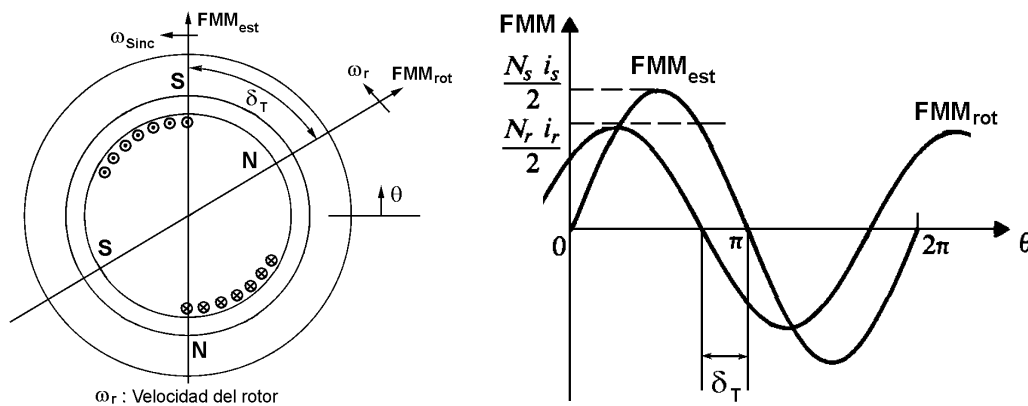


Fig.6.6.: Interacción de campos en una máquina síncrona.

- El motor síncrono desarrolla $\bar{T}_{\text{el}} \neq 0$ cuando :

$$\omega_r = \omega_{\text{Sinc}}$$

ω_r : Velocidad del rotor.

- El motor síncrono no puede arrancar en forma autónoma.

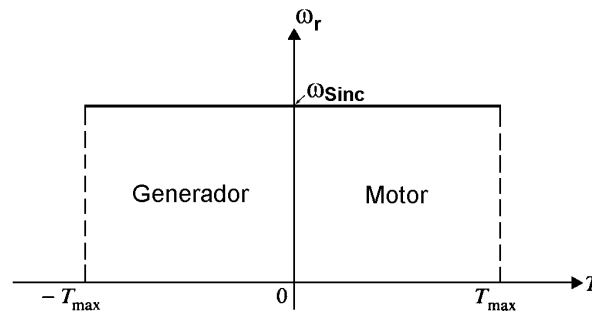


Fig.6.7.: Característica velocidad-torque del motor síncrono.

➔ Generador síncrono:

- Rotor alimentado con corriente continua a través de anillos deslizantes $\Rightarrow$ Produce campo B_f .
- Al girar el rotor impulsado por la máquina motriz $\Rightarrow$ el campo B_f gira a la misma velocidad.
- El campo giratorio B_f induce tensiones trifásicas en el estator con una frecuencia:

$$f = \frac{p \cdot \omega_r}{2 \cdot \pi} \quad (6.4)$$

f : frecuencia de las tensiones inducidas en el estator.

ω_r : velocidad de giro del rotor

p : número de pares de polos.

- Al conectar carga trifásica circulan corrientes trifásicas por el devanado del estator $\Rightarrow$ aparece un campo giratorio de reacción del estator.
- El campo giratorio producido por las corrientes del estator es el campo de reacción del inducido.
- Devanado inductor (el que induce las tensiones) es el rotor.
- Devanado inducido (donde se inducen las tensiones) es el estator.
- El campo resultante es la suma del campo excitador producido por el rotor y del campo de reacción del inducido.

6.2) TEORÍA DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA DE ROTOR CILÍNDRICO EN ESTADO ESTACIONARIO.

6.2.1) Definición de coordenadas.

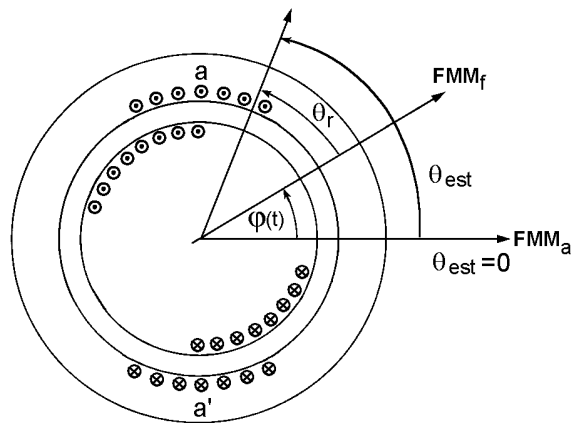


Fig.6.8.: Definición de ángulos.

6.2.2) El campo excitador del rotor.

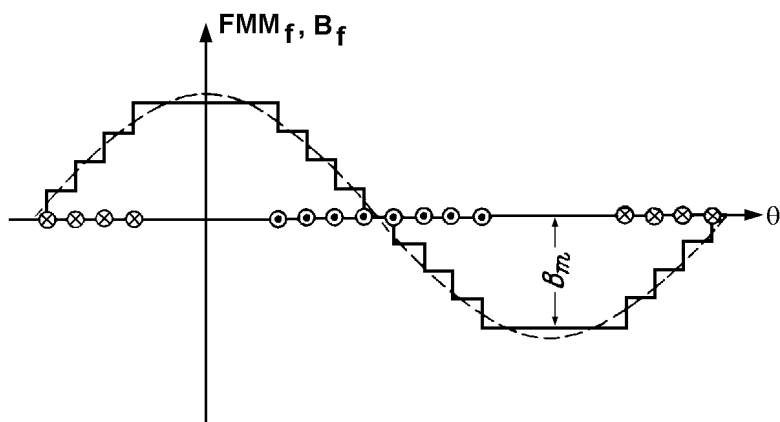


Fig.6.9.: Campo excitador del rotor.

6.2.3) El circuito equivalente por fase del estator.

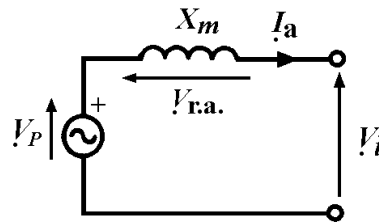


Fig.6.10.: Circuito equivalente por fase.

V_P : Tensión inducida en el estator por el campo excitador del rotor.

X_m : Reactancia de magnetización. Representa al campo magnético del estator.

V_i : Tensión interna. Representa el efecto del campo resultante en el entrehierro.

$V_{r.a.}$: Tensión de reacción de armadura. Representa el campo magnético del estator.

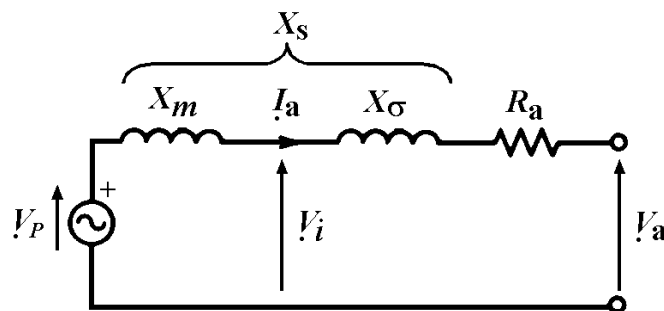


Fig.6.11.: Circuito equivalente por fase completo.

X_σ : Reactancia de dispersión.

R_a : Resistencia del devanado de la fase a.

V_a : Tensión de terminales del estator fase-neutro.

$X_s = X_m + X_\sigma$: reactancia sincrónica.

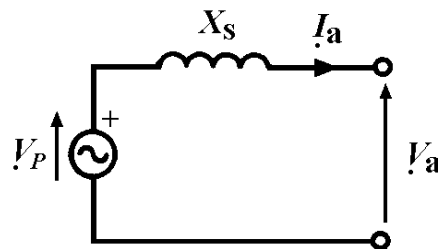


Fig.6.12.: Circuito equivalente por fase simplificado (desprecia R_a).

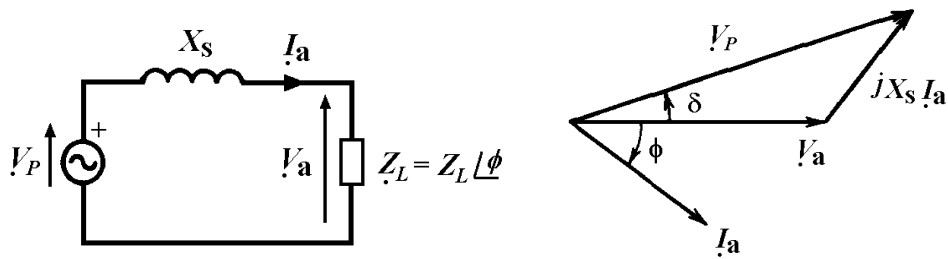


Fig.6.13.: Diagrama fasorial de un generador sincrónico alimentando a una carga Z_L .

δ : Ángulo de carga.

6.2.4) La característica potencia ángulo.

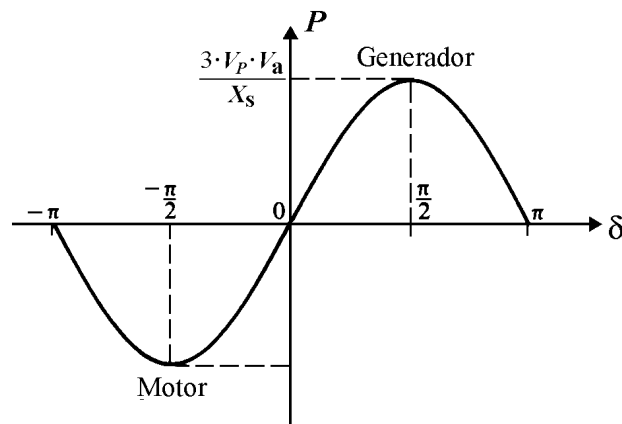


Fig.6.14.: Característica potencia ángulo de la máquina sincrónica de rotor cilíndrico.

6.2.5) El torque eléctrico.

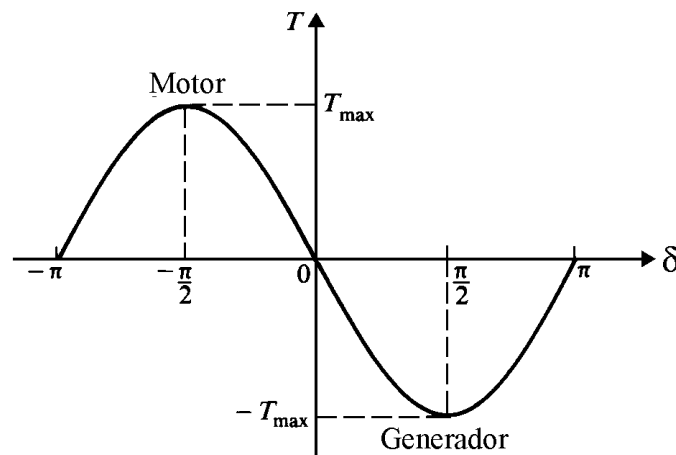


Fig.6.15.: Torque desarrollado por la máquina sincrónica.

6.3) CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN.

6.3.1) Generador en red propia(carga pasiva).

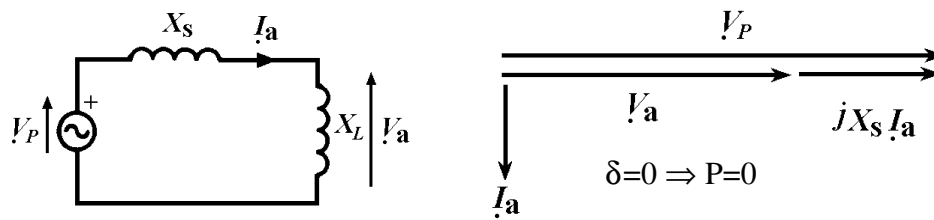


Fig.6.16.: Operación con carga inductiva.

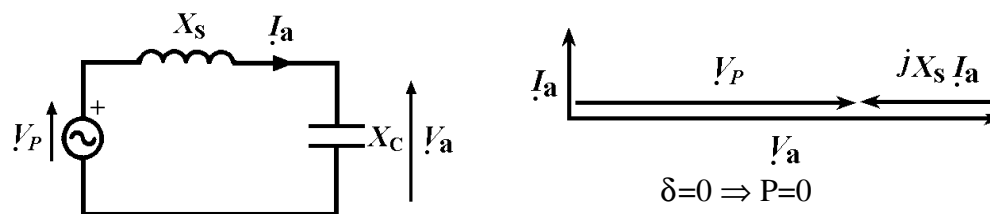


Fig.6.17. Operación con carga capacitiva.

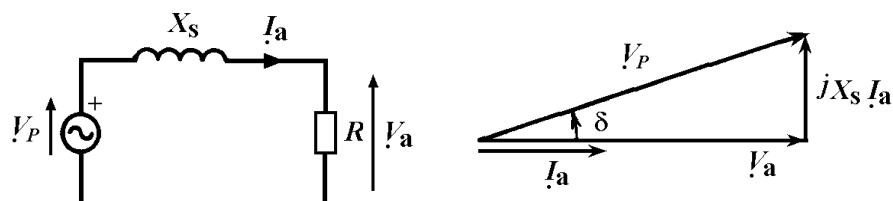


Fig.6.18.: Operación con carga resistiva.

6.3.2) La red infinita.

- ➔ Es la realización práctica de la fuente ideal de tensión.
- ➔ Se obtiene conectando generadores en paralelo.

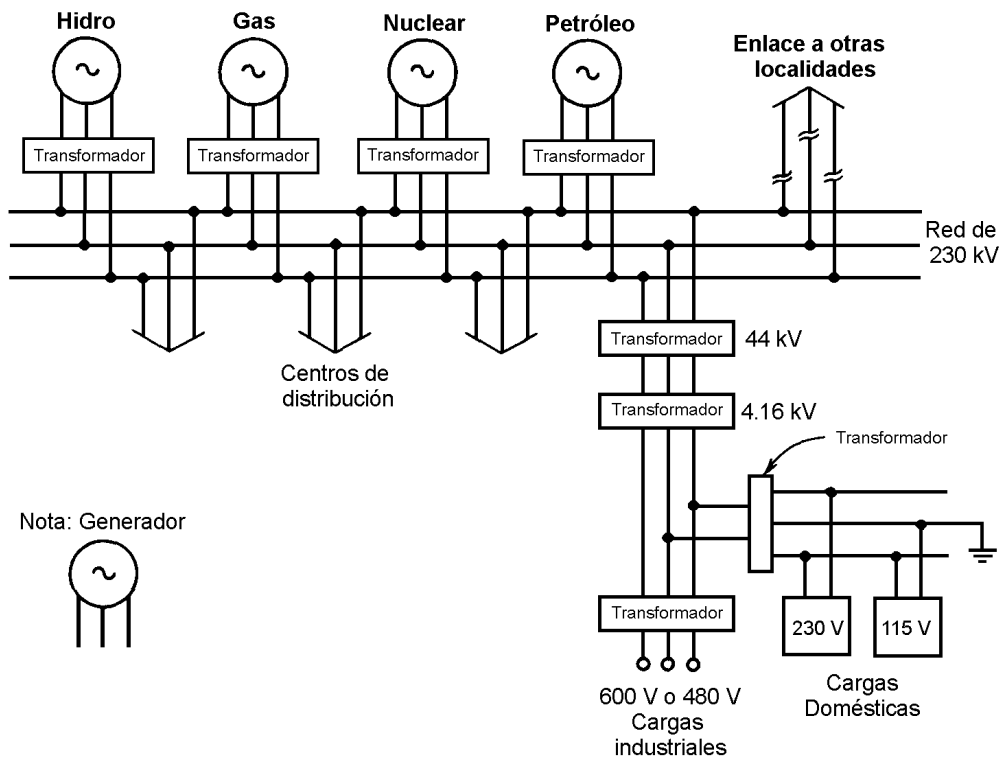


Fig.6.19.: Estructura de una red o barra infinita.

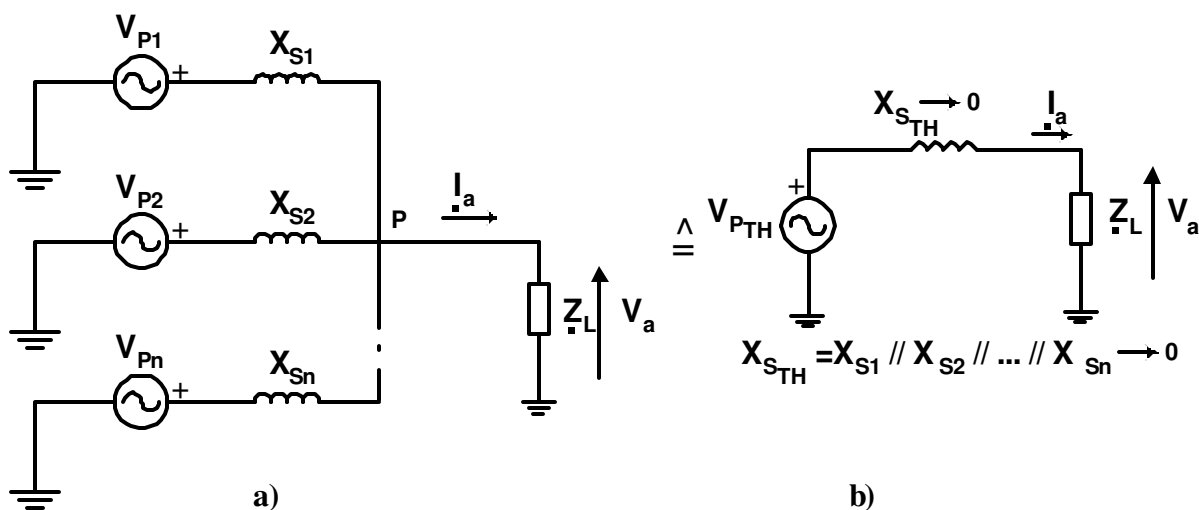


Fig.6.20.: a) Generadores conectados en paralelo; b) Equivalente Thevenin.

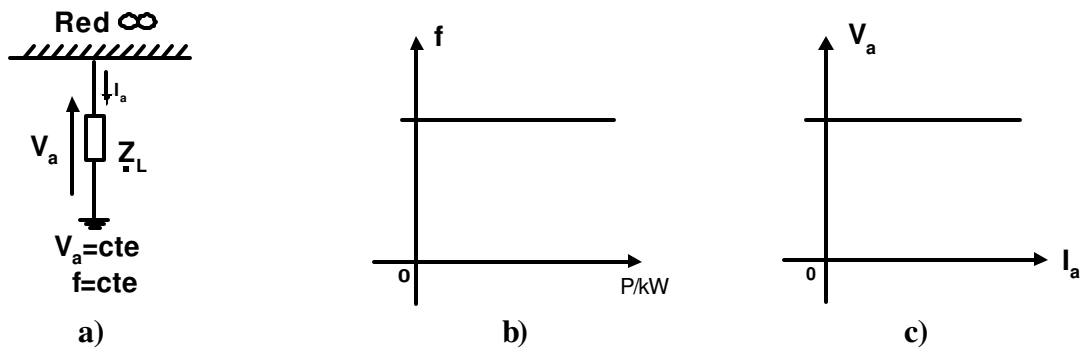


Fig.6.21.: Red infinita: a) símbolo; b) característica frecuencia-potencia; c) característica tensión corriente.

6.3.3) Arranque de un motor sincrónico conectado a la red infinita.

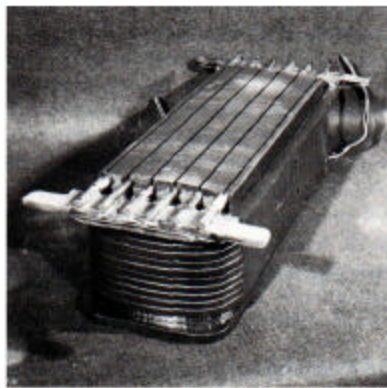


Fig.6.22.: Polo saliente de un motor sincrónico con barras de la jaula de arranque.

6.3.4) Sincronización de un generador con la red infinita.

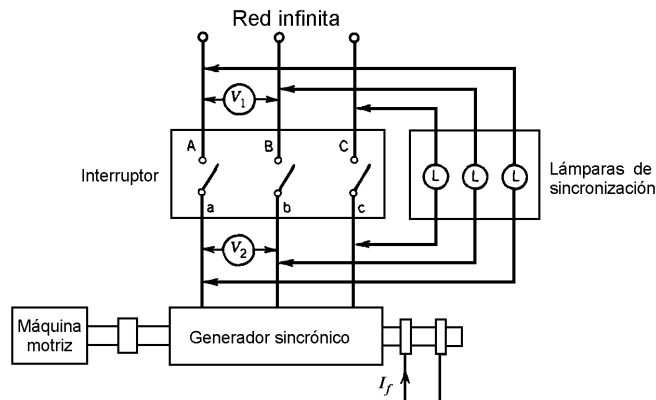


Fig.6.23.: Sistema de sincronización con lámparas (ampolletas).

6.3.5) Operación de la máquina síncrona conectada a la red infinita.

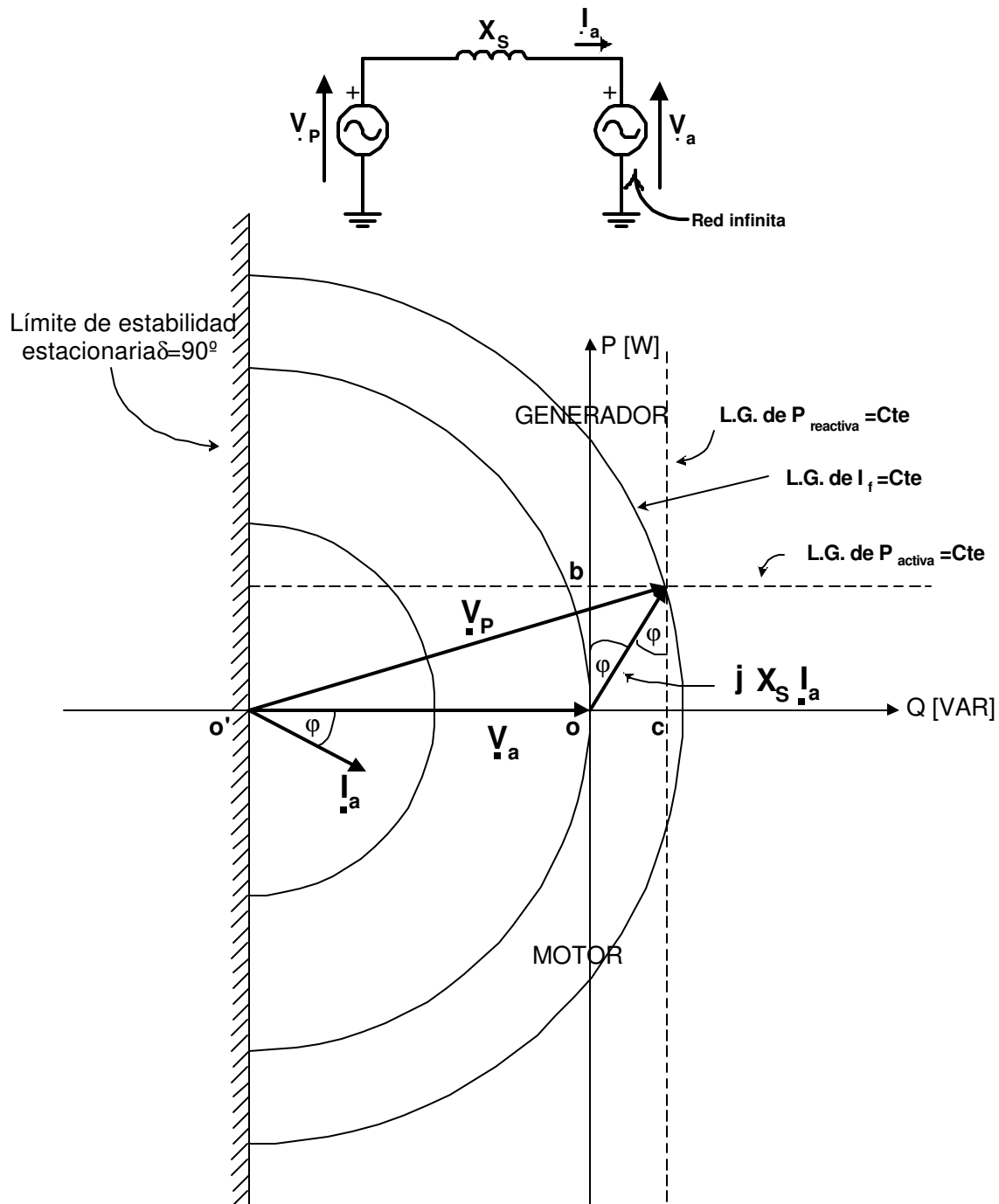


Fig.6.24.: Carta de operación de la máquina síncrona conectada a la red infinita.

6.3.6) La máquina síncrona operando con velocidad variable.

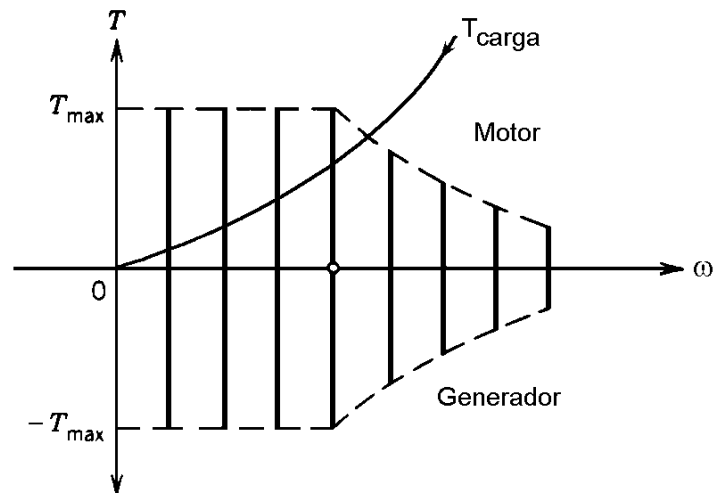


Fig.6.25.: Característica torque velocidad de la máquina síncrona operando con frecuencia variable.

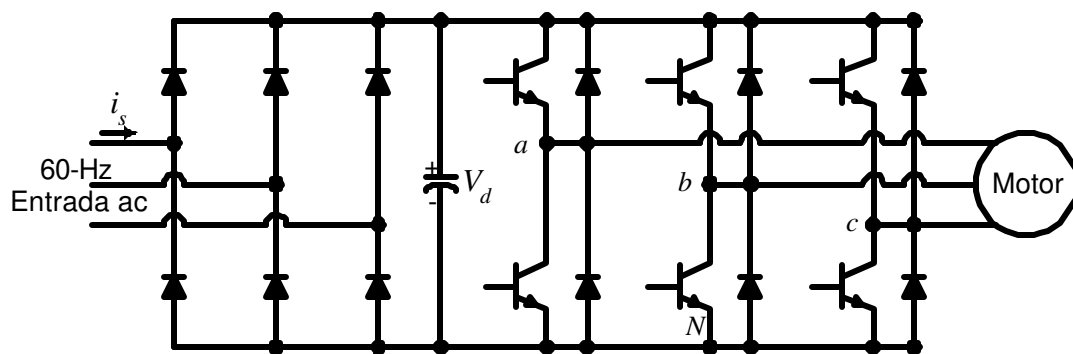


Fig.6.26.: Variador de frecuencia (inversor trifásico) con transistores de potencia

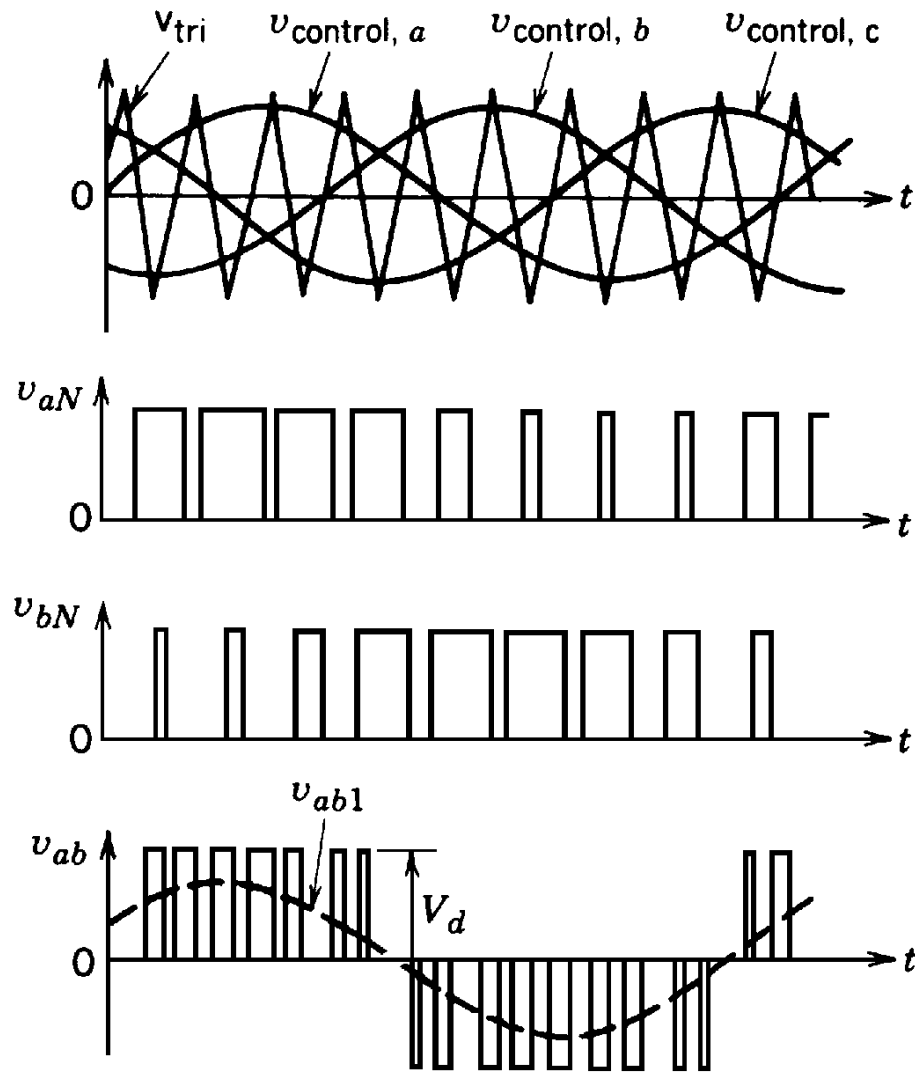


Fig.6.27.: Formas de onda del inversor de la figura 6.26.

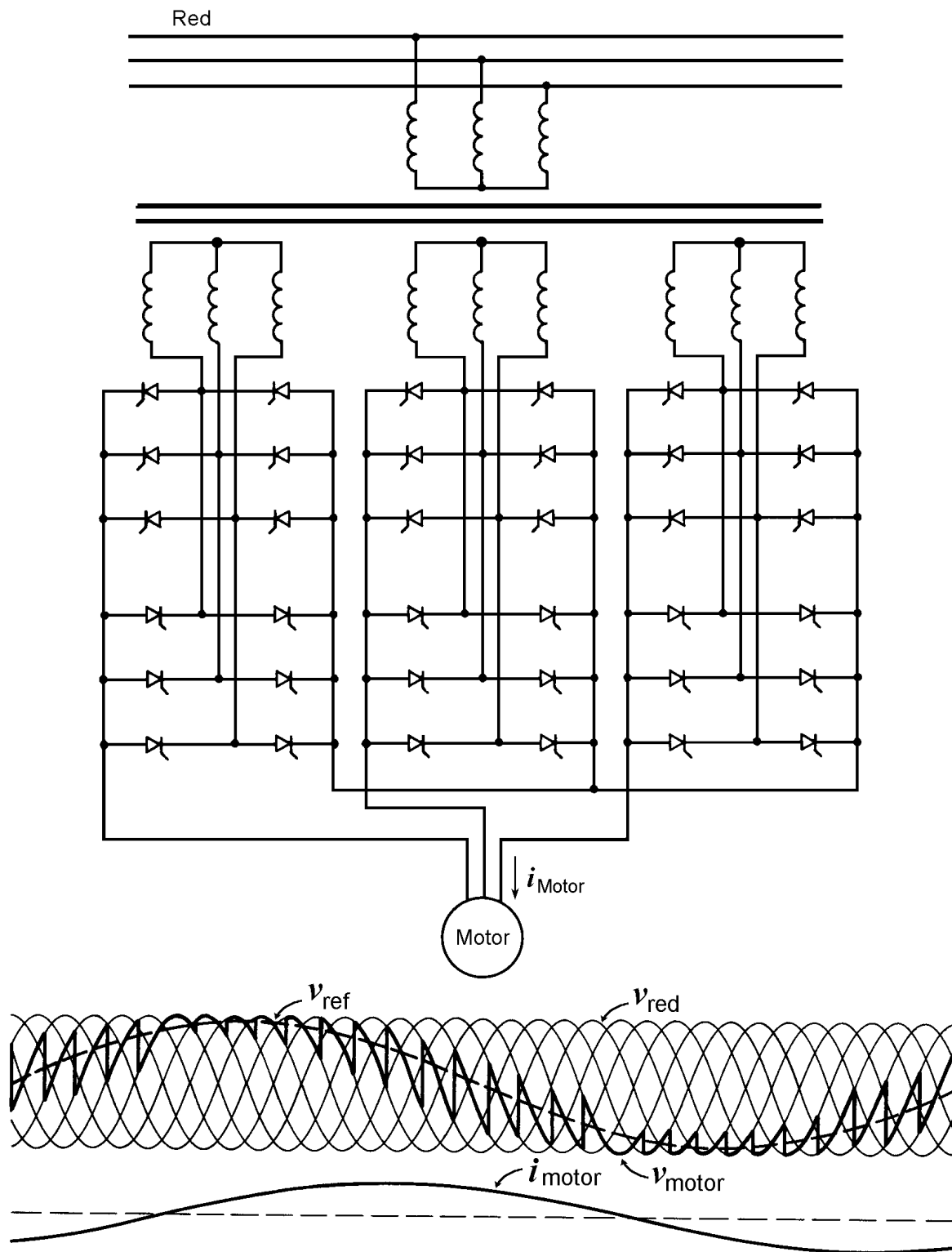


Fig.6.28.: Cicloconversor trifásico alimentando un motor sincrónico

CAPÍTULO 7

MÁQUINAS ASINCRÓNICAS

7.1) ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

7.1.1) Introducción.

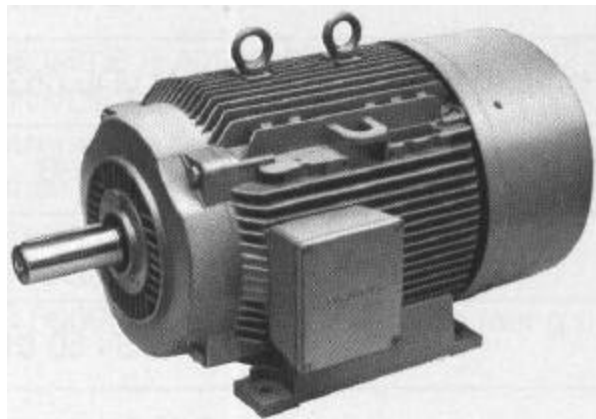


Fig.7.1.: Aspecto externo de un motor de inducción típico.

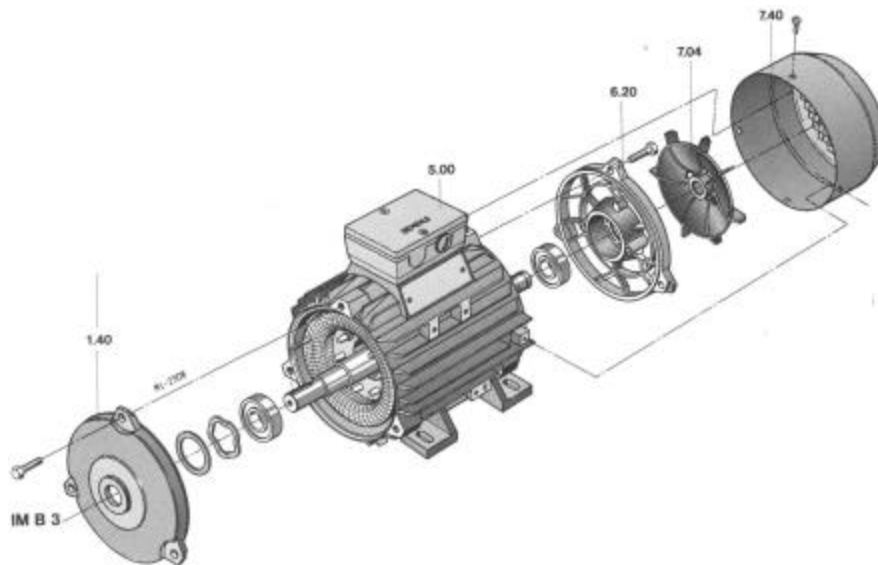


Fig.7.2.: Partes componentes de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla.

7.1.2) Devanado trifásico en el estator.

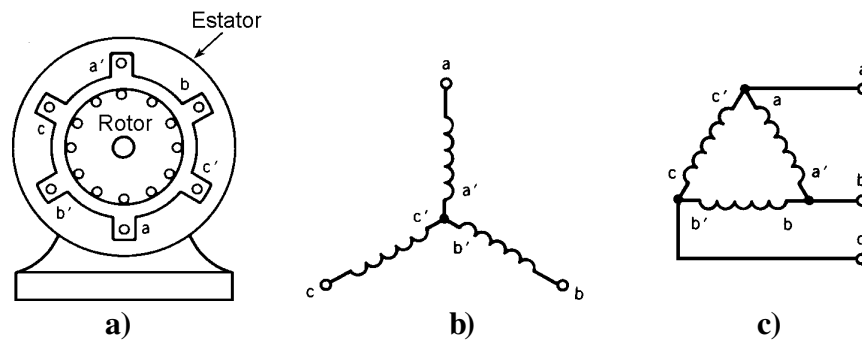


Fig.7.3.: Máquina de inducción trifásica; a) corte transversal; devanado de estator en conexión b) estrella y c) triángulo.

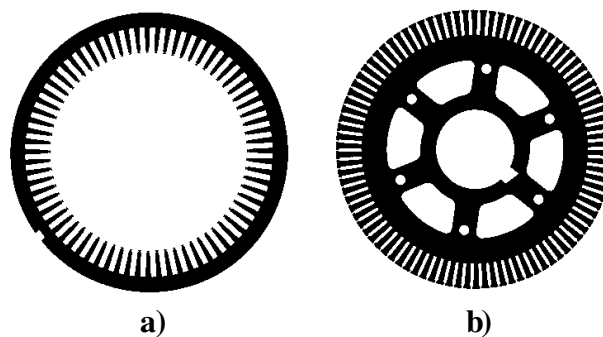


Fig.7.4.: Láminas de núcleo en un motor de inducción trifásico: a) estator; b) rotor devanado.

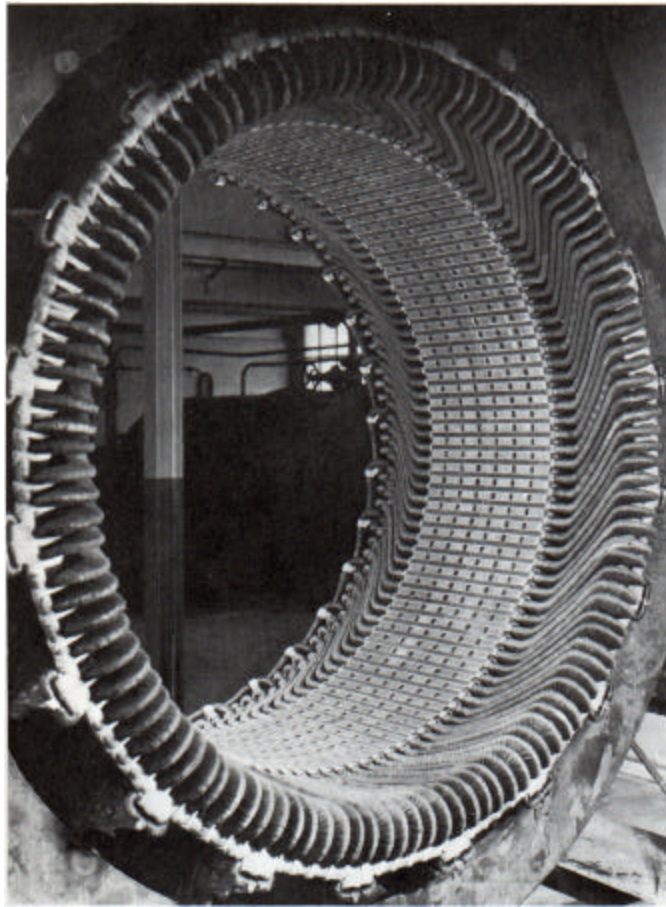


Fig.7.5.: Vista del estator de una máquina de corriente alterna trifásica.

7.1.3) Devanados de rotor.



a)



b)

Fig.7.6.: rotores de máquinas de inducción: **a)** rotor devanado con anillos deslizantes; **b)** rotor jaula de ardilla.

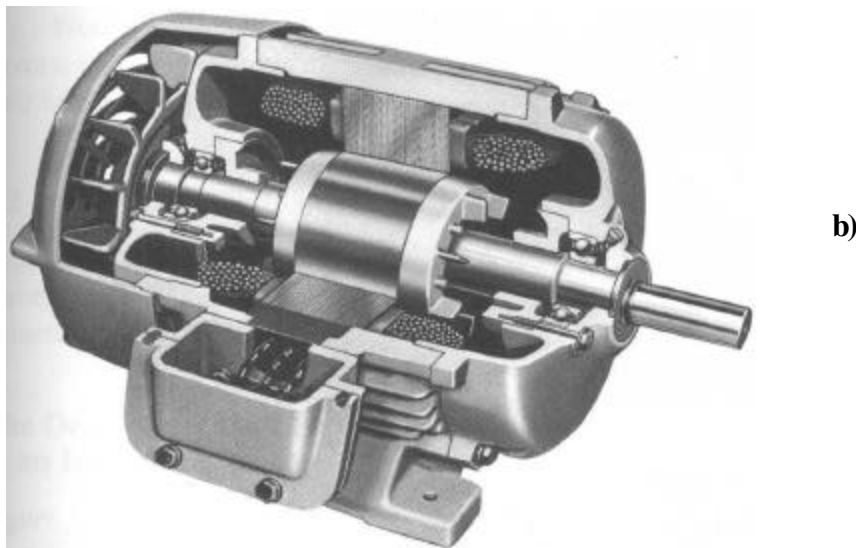
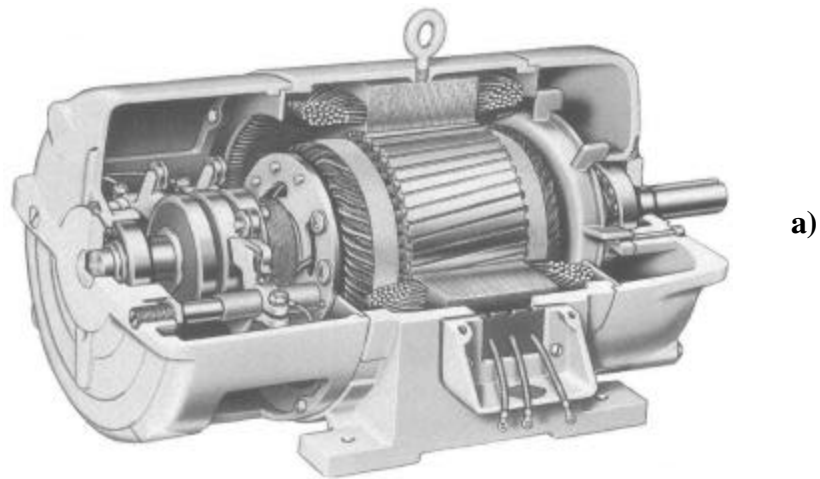


Fig.7.7. Corte de un motor de inducción: **a)** con rotor devanado; **b)** con rotor jaula de ardilla.

7.1.4) Principio de funcionamiento.

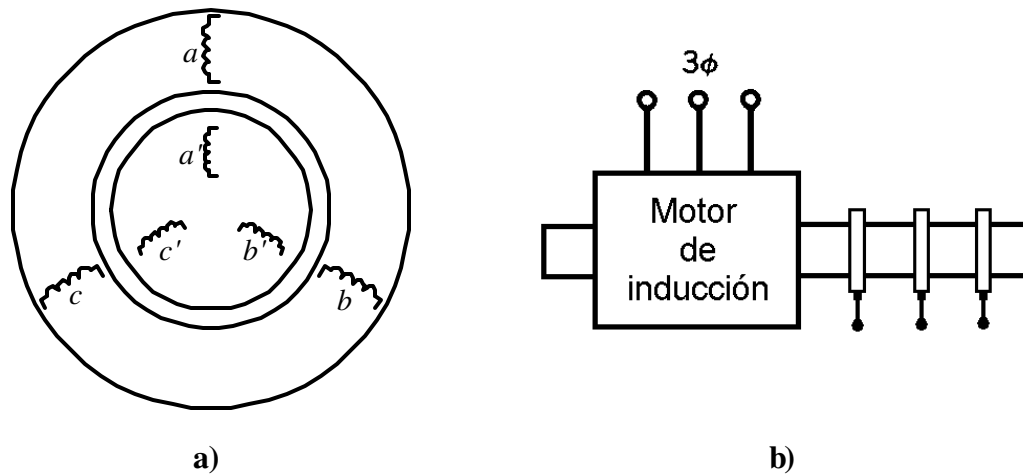


Fig.7.8.: Motor de inducción con rotor devanado: **a)** devanados del estator y del rotor; **b)** terminales del estator y del rotor.

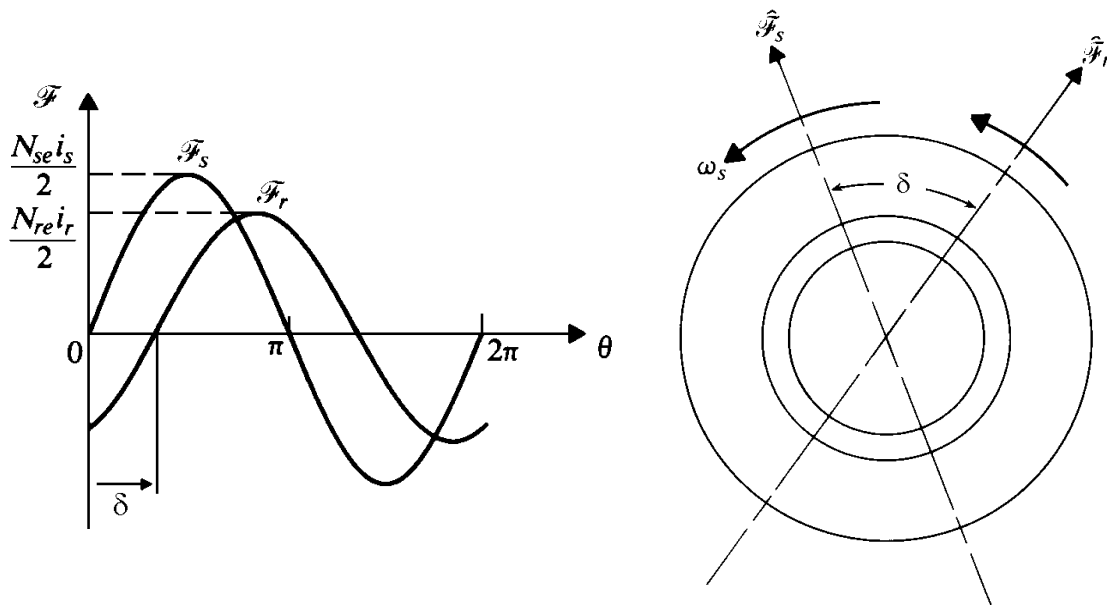


Fig.7.9.: Interacción de campos del estator y del rotor en una máquina de inducción de rotor devanado.

7.1.5) Distribución de potencias en la máquina de inducción.

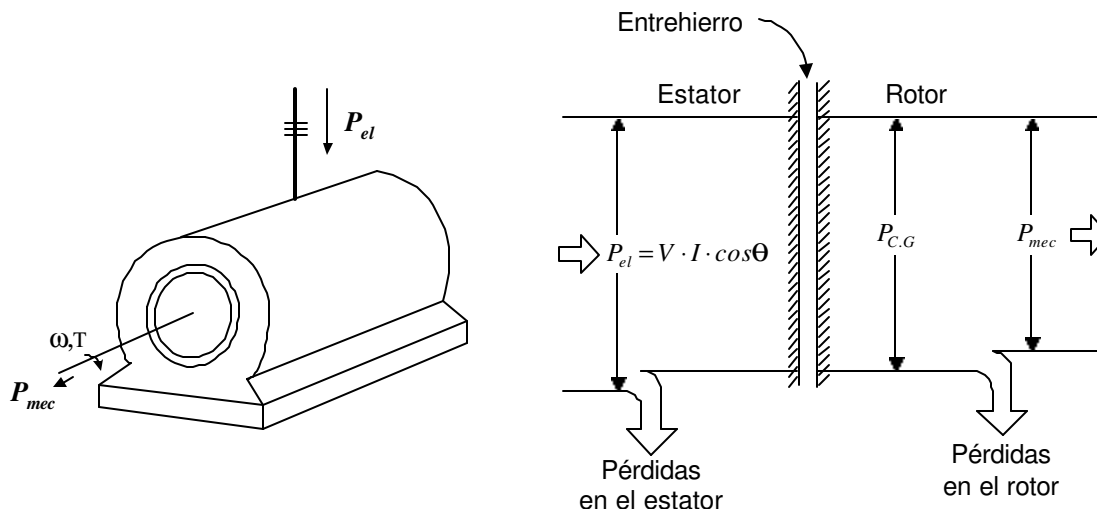


Fig.7.10.: Flujo de potencias en la máquina de inducción.

7.2) TEORÍA DE LA MÁQUINA DE ROTOR DEVANADO.

7.2.1) La máquina conectada a la red infinita.

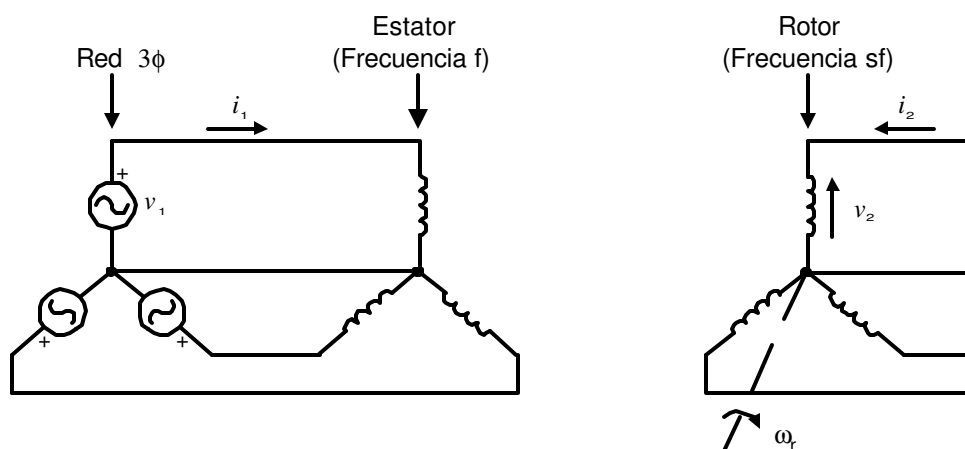


Fig.7.11.: Máquina de inducción conectada a la red trifásica.

7.2.2) El circuito equivalente por fase.

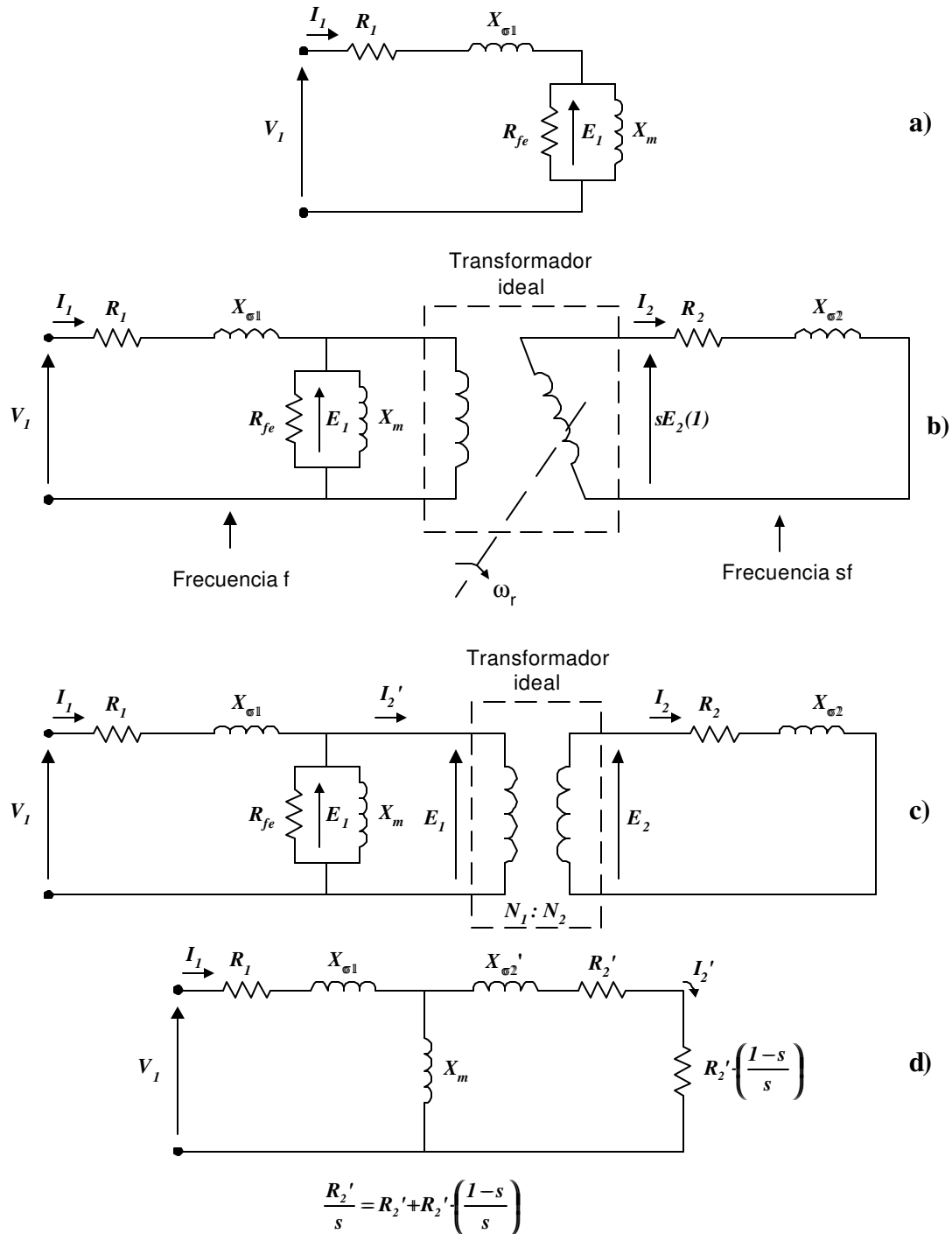


Fig.7.12.: Circuito equivalente por fase: **a)** considerando solamente el estator; **b)** con rotor girando; **c)** con rotor detenido; **d)** referido al estator, recomendado por IEEE.

7.2.3) La característica torque-velocidad.

$$T(s) = \frac{2 \cdot T_M}{\frac{s_M}{s} + \frac{s}{s_M}} \quad (7.1)$$

Donde: T : Torque desarrollado por la máquina.

s : Deslizamiento.

T_M : Torque máximo.

s_M : Deslizamiento para torque máximo.

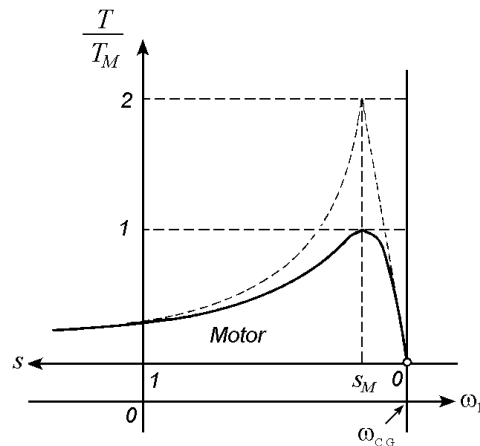


Fig.7.13.: Deducción de la característica torque-velocidad de un motor de inducción trifásico.

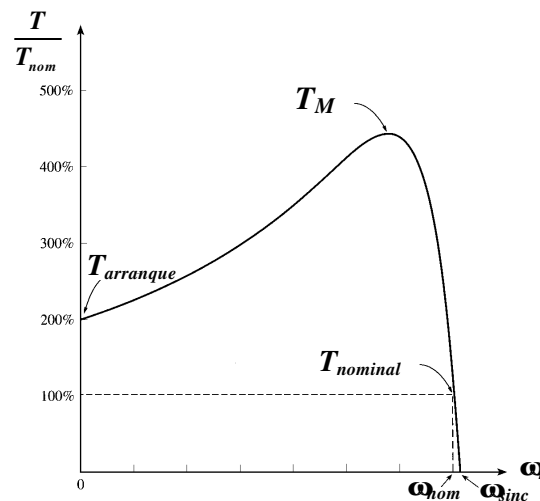


Fig.7.14.: Característica torque-velocidad de un motor de inducción típico.

7.3) CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y CONTROL.

7.3.1) Operación como generador y freno.

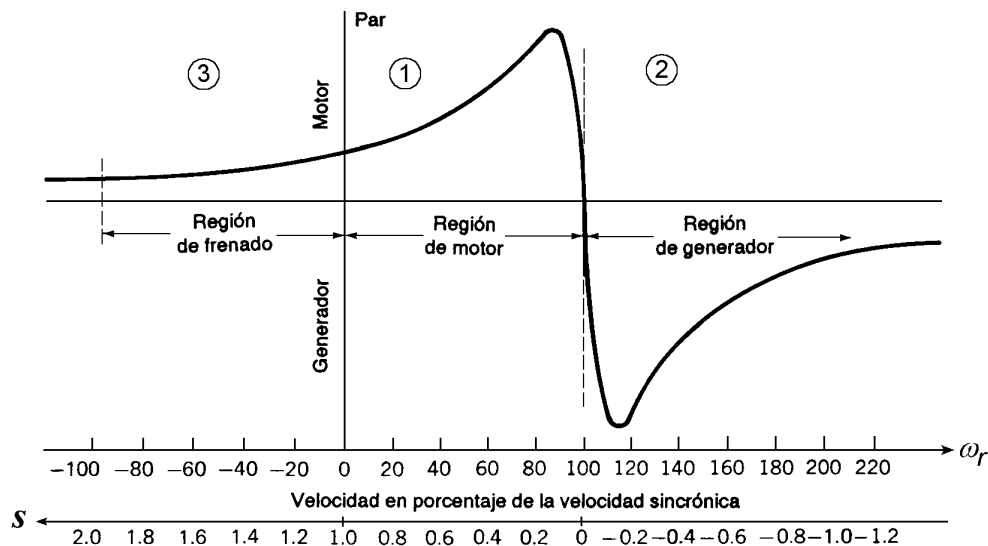


Fig. 7.15.: Característica torque-velocidad como motor, generador y freno.

7.3.2) La zona de trabajo estable.

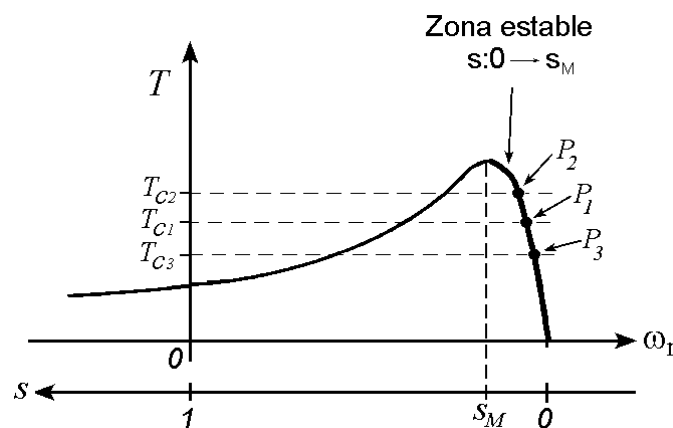


Fig. 7.16.: Zona de trabajo estable en una máquina de inducción.

7.3.3) Comportamiento de las variables eléctricas.

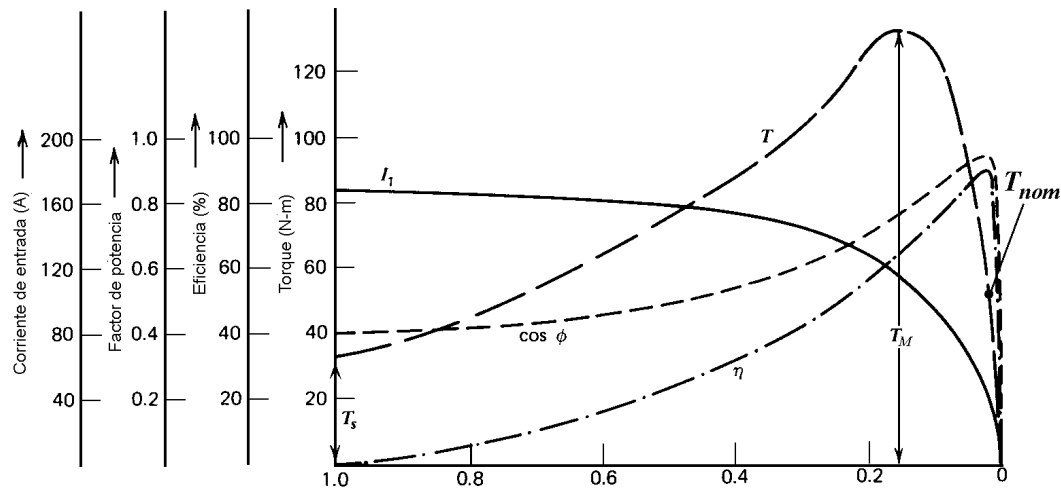


Fig.7.17.: Comportamiento de las variables eléctricas en un motor de inducción de 220[V] 3 ϕ , 60 [Hz], 10 kW, $T_{nom}=52,4$ [Nm].

7.3.4) Clases de motores.

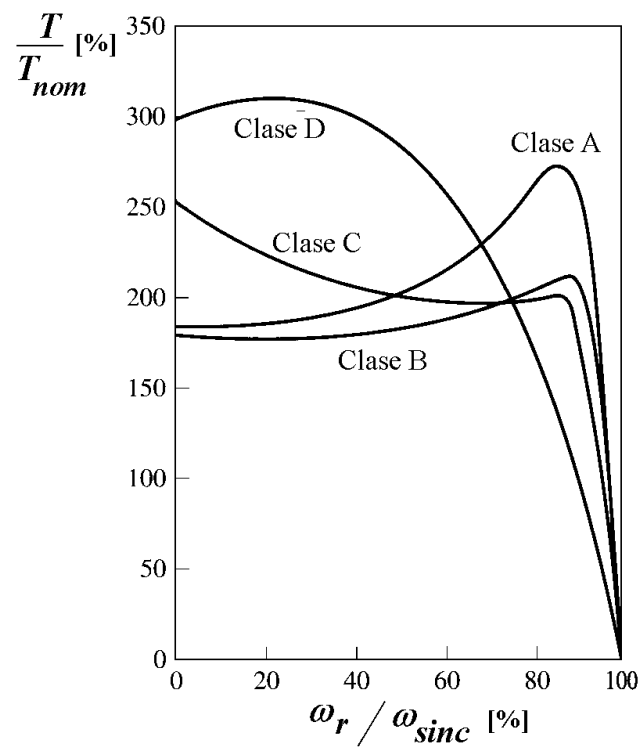


Fig.7.18.: Curvas torque-velocidad típicas para las diferentes clases de motores.(A-B-C-D).

7.3.5) Arranque de las máquinas de inducción.

➡ El partidor estrella triángulo.

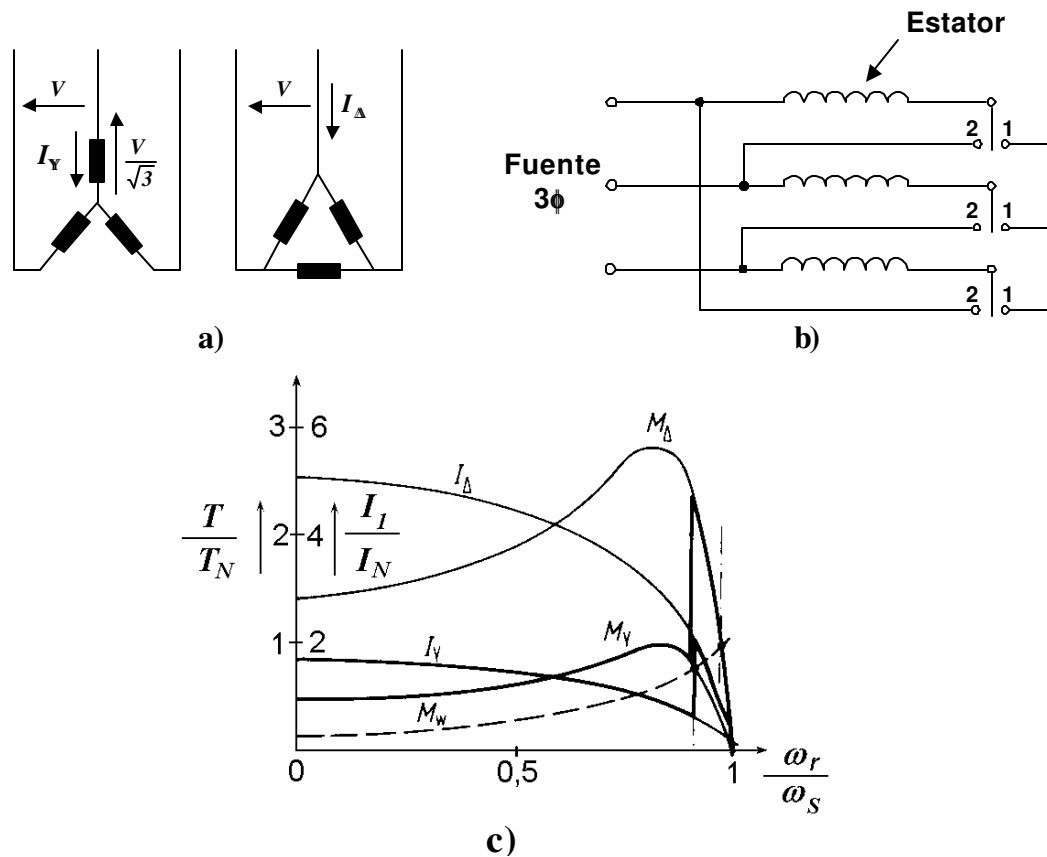


Fig.7.19.: a) Devanados en estrella y triángulo; b) partidor estrella triángulo; c) curva torque-velocidad.

➡ Partida por autotransformador.

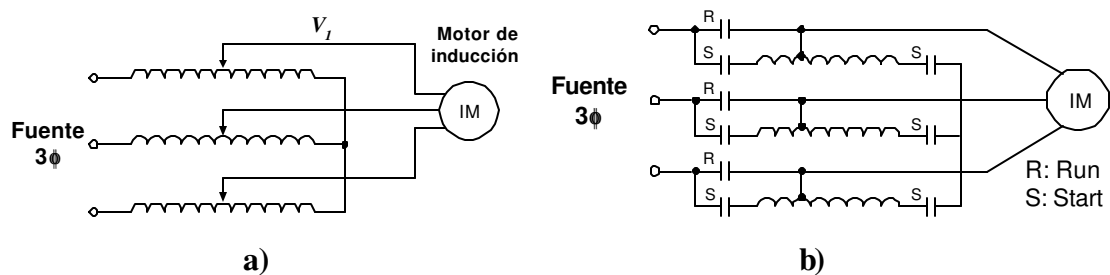


Fig.7.20.: Partida de un motor mediante autotransformador: a) variable; b) fijo.

➡ Partidor de estado sólido (soft starter).

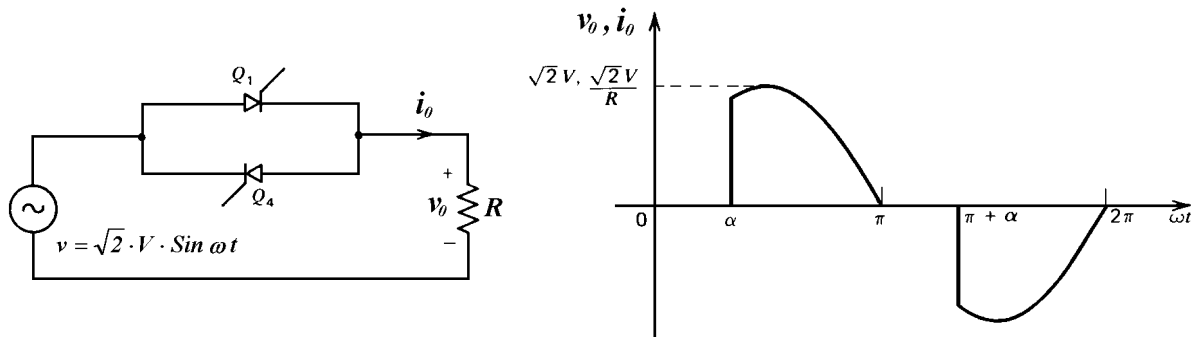


Fig.7.21.: Variación de la tensión en la carga mediante semiconductores.

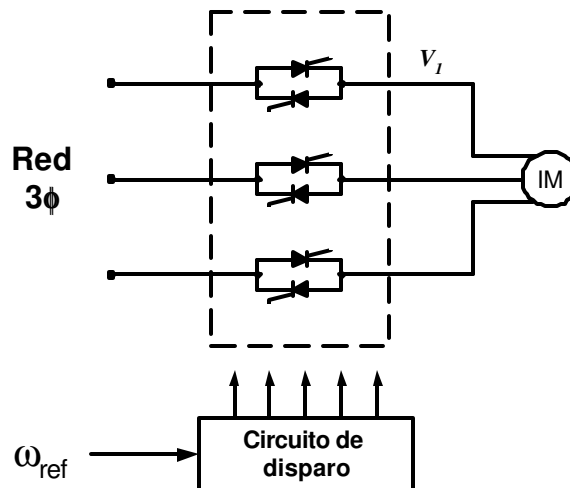


Fig.7.22.: Partidor suave (soft starter) trifásico.

➡ Resistencias adicionales en el rotor.

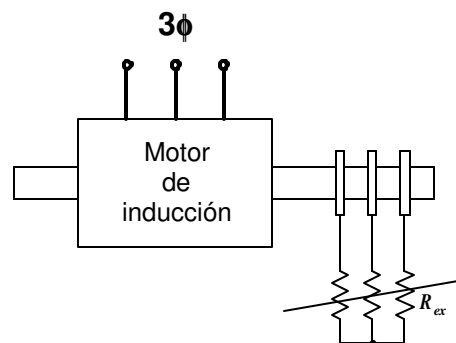


Fig.7.23.: Motor de inducción con rotor devanado y resistencias adicionales en el rotor.

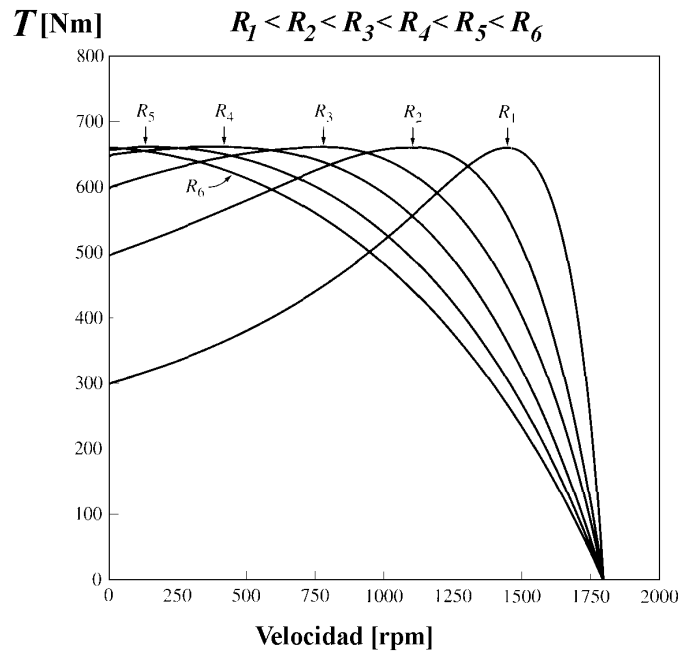


Fig.7.24.: Efecto de la variación de la resistencia en el rotor.

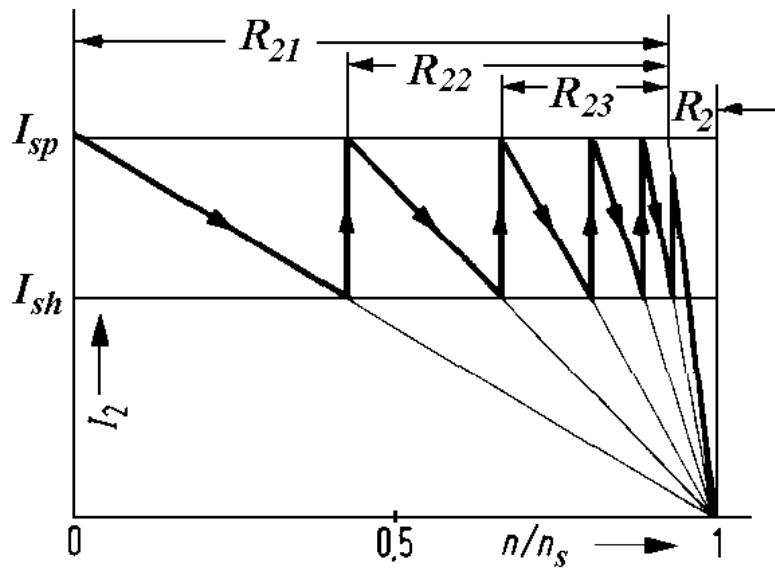


Fig.7.25.: Comportamiento de la corriente del rotor con resistencias adicionales en el rotor.

7.3.6) Variación de la velocidad del motor.

➡ Variación de la velocidad variando la tensión del estator.

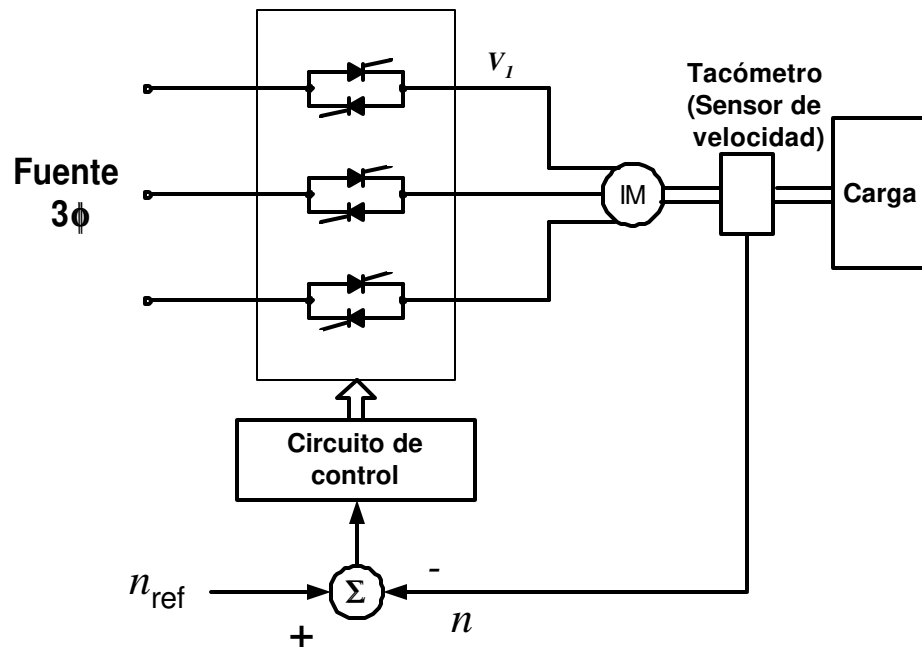


Fig.7.26.: Control de velocidad mediante un partidador suave.

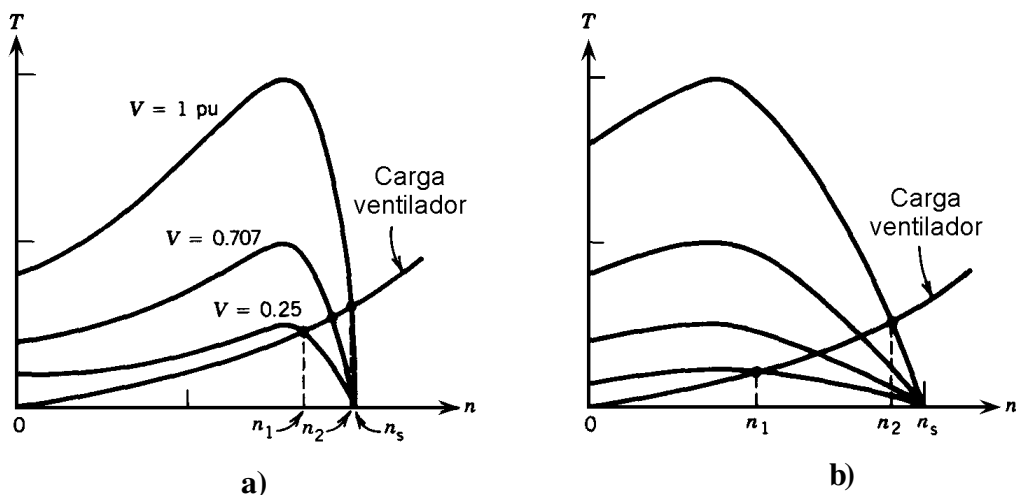


Fig.7.27.: Características Torque-Velocidad para diferentes tensiones del estator: **a)** motor clase A; **b)** motor clase D.

➔ **Variación de la velocidad usando resistencias adicionales en el rotor.**

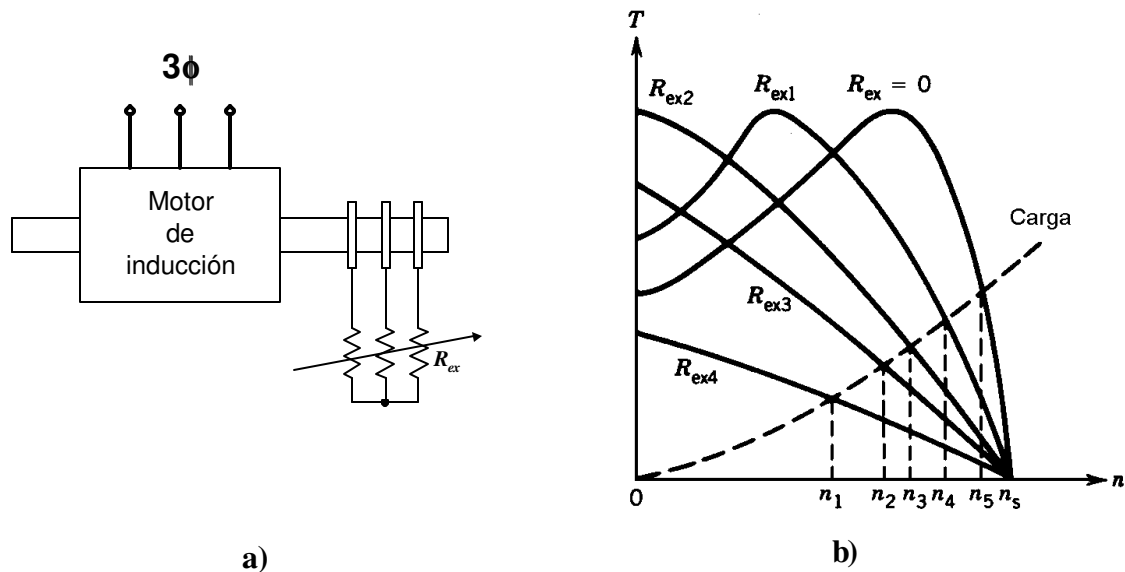


Fig. 7.28.: Variación de velocidad en un motor de inducción de rotor devanado con resistencia variable en el rotor.

➔ **Control de velocidad mediante alimentación de frecuencia variable.**

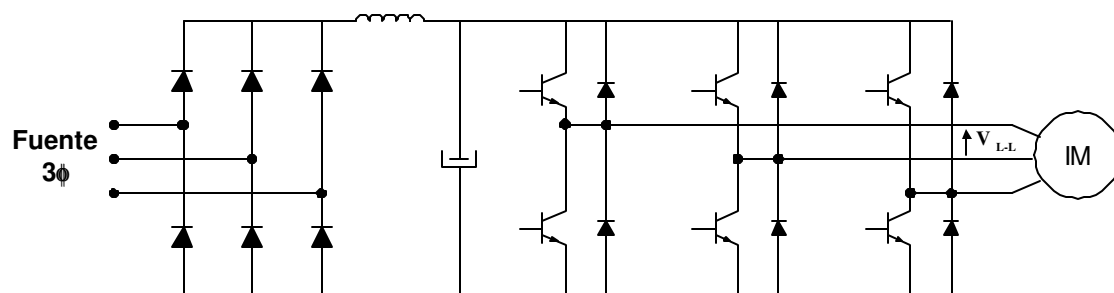
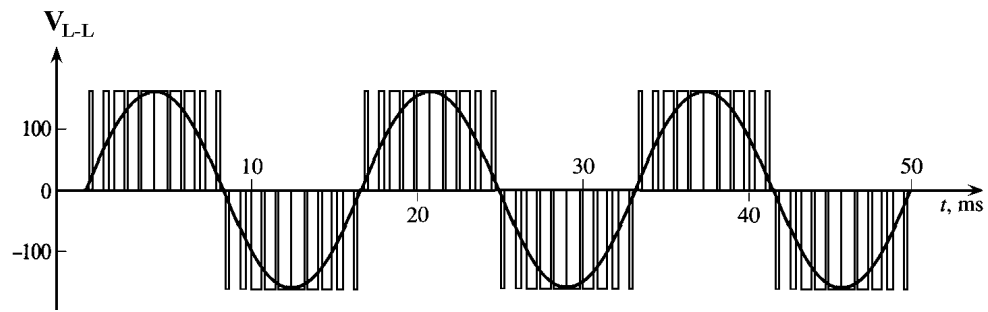
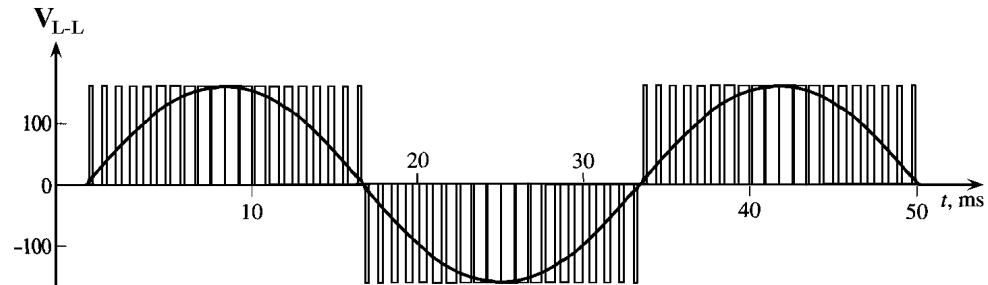


Fig. 7.29.: Motor de inducción alimentado por un inversor (variador de frecuencia) trifásico.

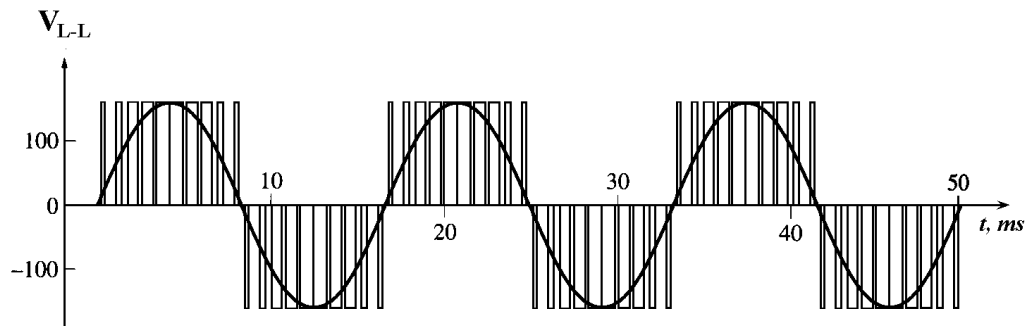


a)

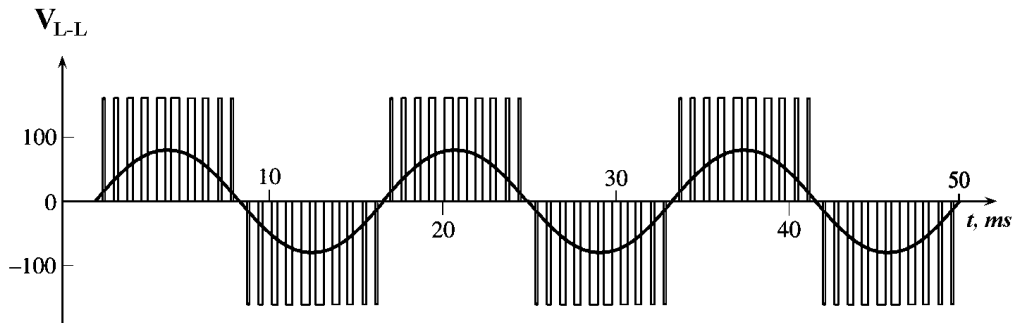


b)

Fig.7.30.: Tensión de frecuencia variable generada por un inversor con control PWM (Pulse Width Modulation): **a)** $f=60$ [Hz] y $V_{L-L \text{ fund}}=120$ [V]; **b)** $f=30$ [Hz] y $V_{L-L \text{ fund}}=120$ [V].



a)



b)

Fig.7.31.: Tensión de frecuencia variable generada por un inversor con control PWM: **a)** $f=60$ [Hz] y $V_{L-L \text{ fund}}=120$ [V]; **b)** $f=60$ [Hz] y $V_{L-L \text{ fund}}=60$ [V].

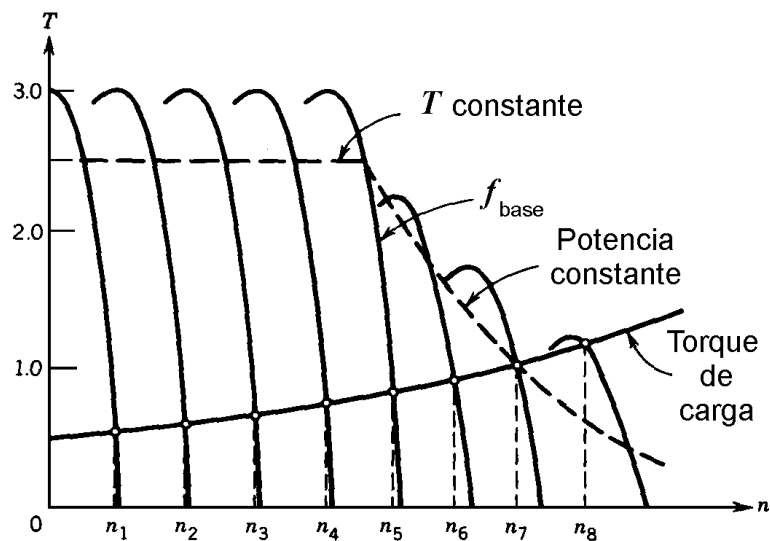


Fig.7.32.: Características torque-velocidad de un motor de inducción con tensión y frecuencia variables.

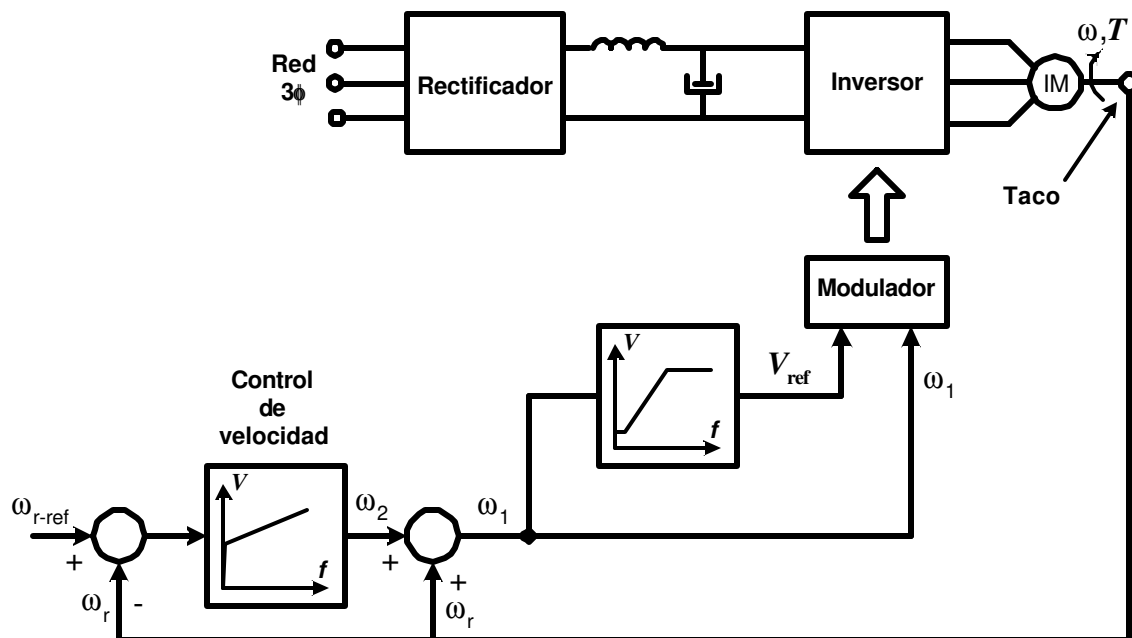


Fig.7.33.: Esquema de control de velocidad simple.