



TRANSFORMADORES

✎ Máquinas estáticas.

✎ Transformación de e.e. (a.c.) de unas características a otras.

✎ Principio. Ley de inducción. Faraday o Lenz.

✎ Circuito magnético.

✎ Pérdidas magnéticas.

✎ Circuitos eléctricos.

✎ Devanados. Primario.

✎ Secundario.

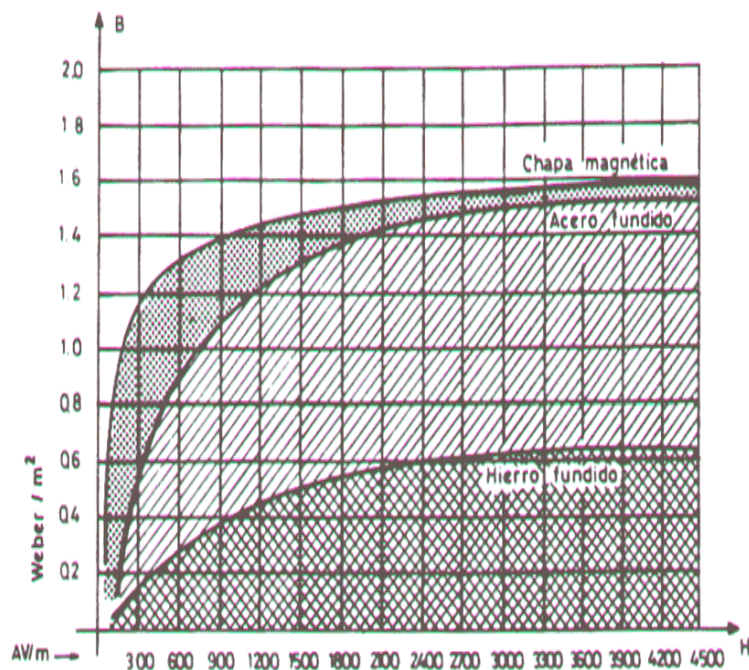
✎ Alta tensión(A.T.)

✎ Baja tensión(B.T.)



TRANSFORMADORES

Materiales del núcleo



$$B=f(H)$$

NOMBRE	COMPOSICION %	μ_r máxima	H_c AV/m	B_r Teslas	RESISTIVIDAD $\Omega \cdot m \times 10^{-8}$
Hierro	99,9 Fe	5000	80	2,15	10
Hierro al silicio	4 Si; 96 Fe	7000	48	1,97	59
Hierro al silicio	3,3 Si; 96,7 Fe	10000	16	2,00	50
Permalloy	45 Ni; 54 Fe	25000	24	1,6	50
Mumetal	75 Ni; 2 Cr 5 Mn; 18 Fe	110000	2,4	0,72	60



TRANSFORMADORES

✍️ Pérdidas magnéticas

✓ Histéresis

$$p_H = fV(\text{Area}BH)$$

$$p_H(W/kg) = k_H f B_{\max}^n$$

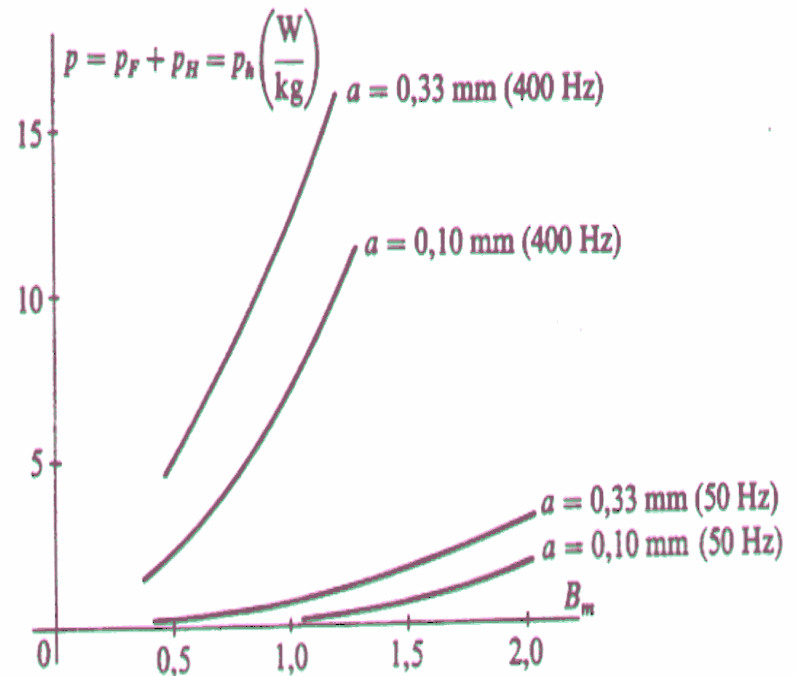
✓ Foucault

$$p_F(W/kg) = \frac{B_{\max}^2 \omega^2 \sigma_{Fe} a^2}{24 d_{Fe}}$$

$$p_F(W/kg) = k_F f^2 B_{\max}^2$$

✍️ Parámetros

- ✓ Campo magnético
- ✓ Frecuencia
- ✓ Geometría(espesor)
- ✓ Propiedades físicas material
- ✓ Propiedades magnéticas
 - ✓ Área del ciclo





TRANSFORMADORES

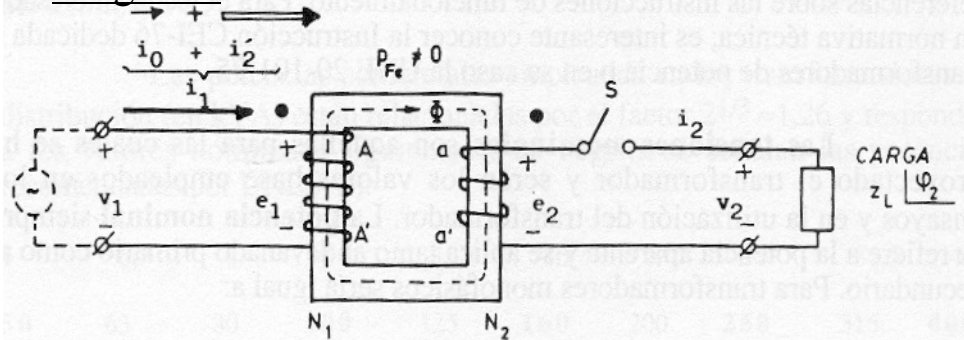
- ✍ Régimen de funcionamiento.
 - ✓ Transitorio y estacionario.
- ✍ Vacío.(Secundario abierto)
- ✍ Carga.
- ✍ Cortocircuito.
- ✍ Transformador ideal.Transformador real.
- ✍ Circuito equivalente. Diagrama fasorial.
- ✍ Ensayos. Vacío.
 - Cortocircuito.
- ✍ Pérdidas y rendimiento de un transformador.
- ✍



TRANSFORMADORES

TRANSFORMADOR IDEAL

Diagrama



Ecuaciones

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$V_1 = E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$V_2 = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

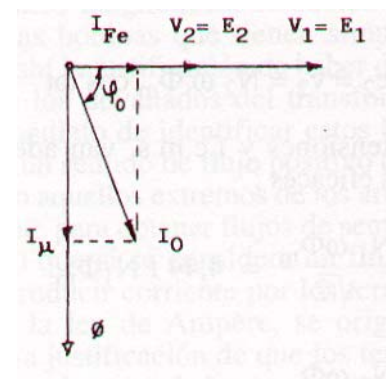
$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m} = I_0 + I_2'$$

$$m = \alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Representación fasorial

Vacío



$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$



TRANSFORMADORES

Ecuaciones básicas.Transformador ideal

$$\Phi = \Phi_m \text{ sen } \omega t$$

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$V_1 = E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$V_2 = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m} = I_0 + I_2'$$

$$m = \alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

m o α es la relación de transformación.



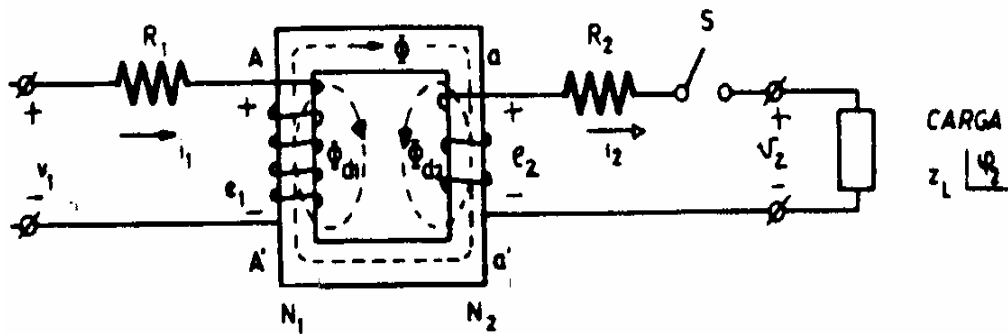
TRANSFORMADORES

Transformador real

Ecuaciones temporales

$$v_1 = e_1 + R_1 i_1 + L_{d1} \frac{di_1}{dt}$$

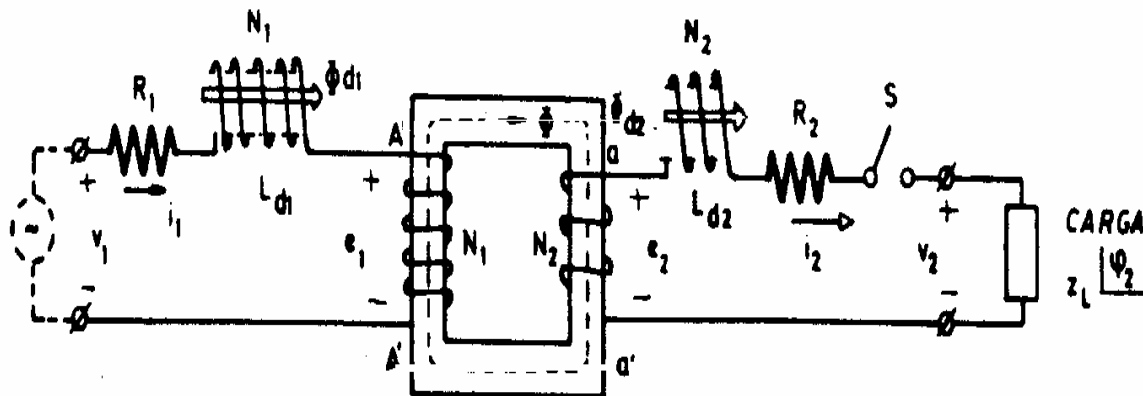
$$e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_{d2} \frac{di_2}{dt}$$



Ecuaciones vectoriales

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{E}_1 + \mathbf{R}_1 \mathbf{I}_1 + j\mathbf{X}_1 \mathbf{I}_1$$

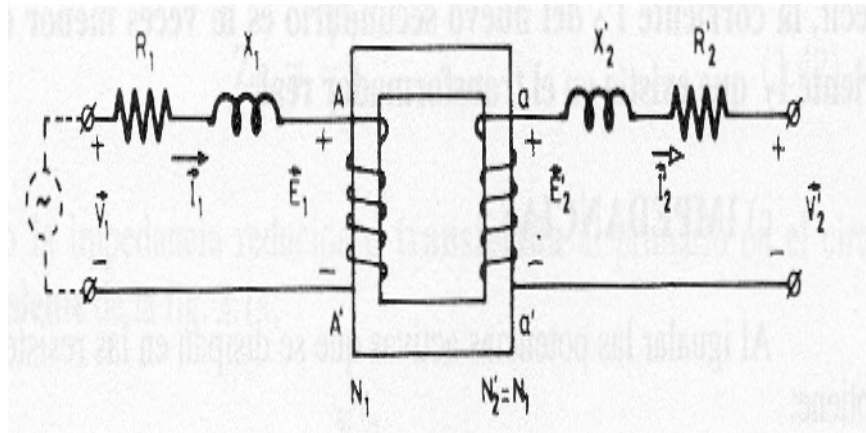
$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{V}_2 + \mathbf{R}_2 \mathbf{I}_2 + j\mathbf{X}_2 \mathbf{I}_2$$





TRANSFORMADORES

Aproximación al circuito equivalente. Nuevo secundario equivalente al original.
Igualdad de magnitudes: f.e.m., corrientes, tensiones, Potencias activas y reactivas.





TRANSFORMADORES

Circuito equivalente exacto del transformador reducido a primario

transformador real =
transformador equivalente

$$I'_2 = \frac{I_2}{m}$$

$$V'_2 = mV_2$$

$$R'_2 = m^2 R_2$$

$$X'_2 = m^2 X_2$$

$$Z'_2 = m^2 Z_2$$

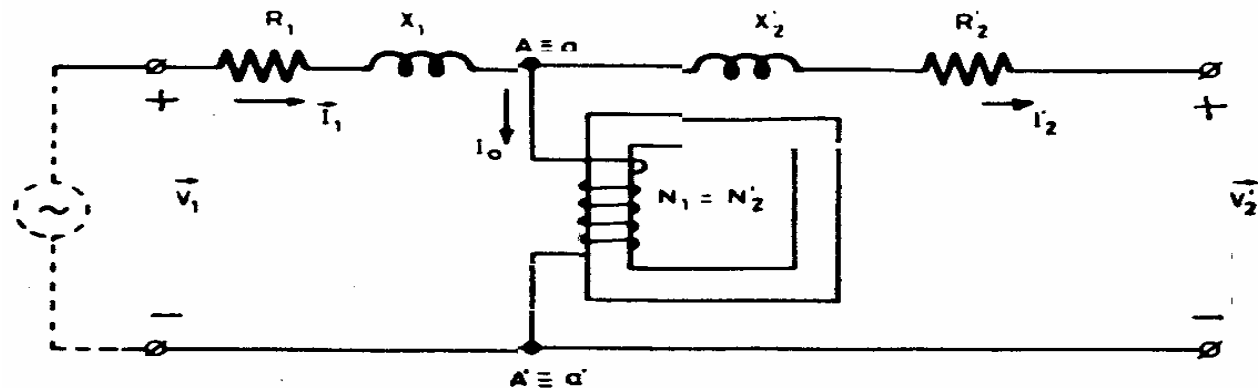
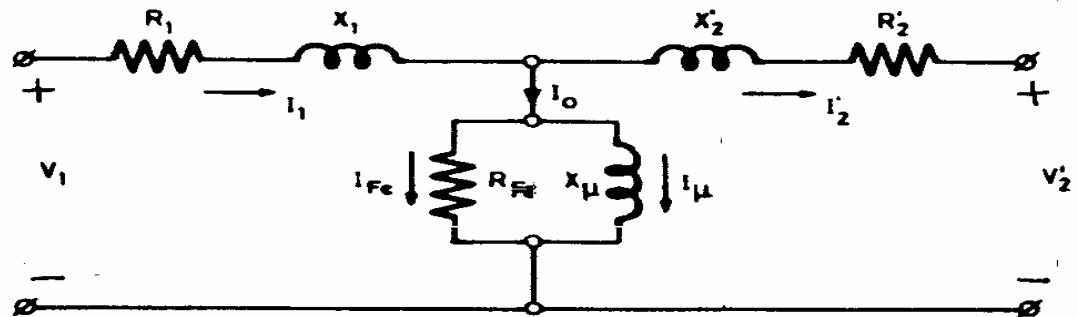


Fig. 3.15





TRANSFORMADORES

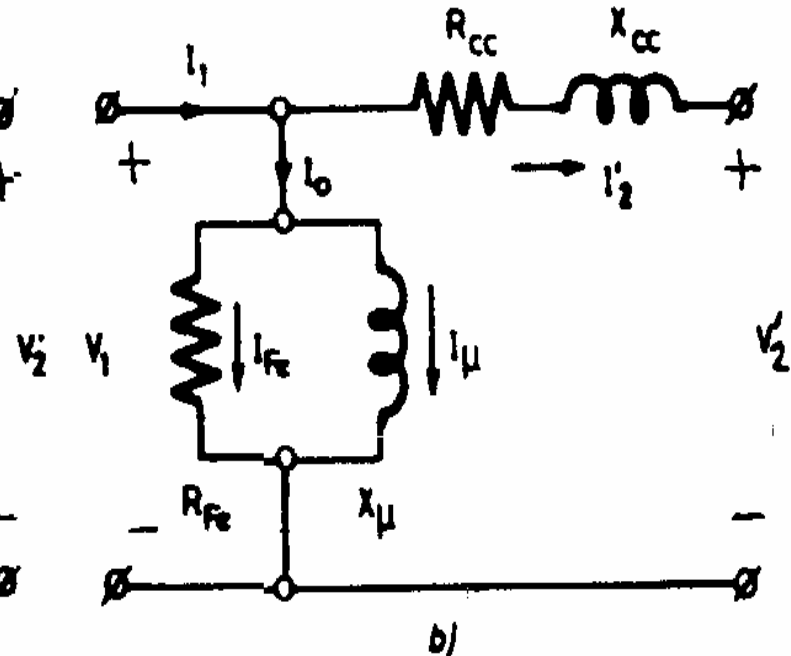
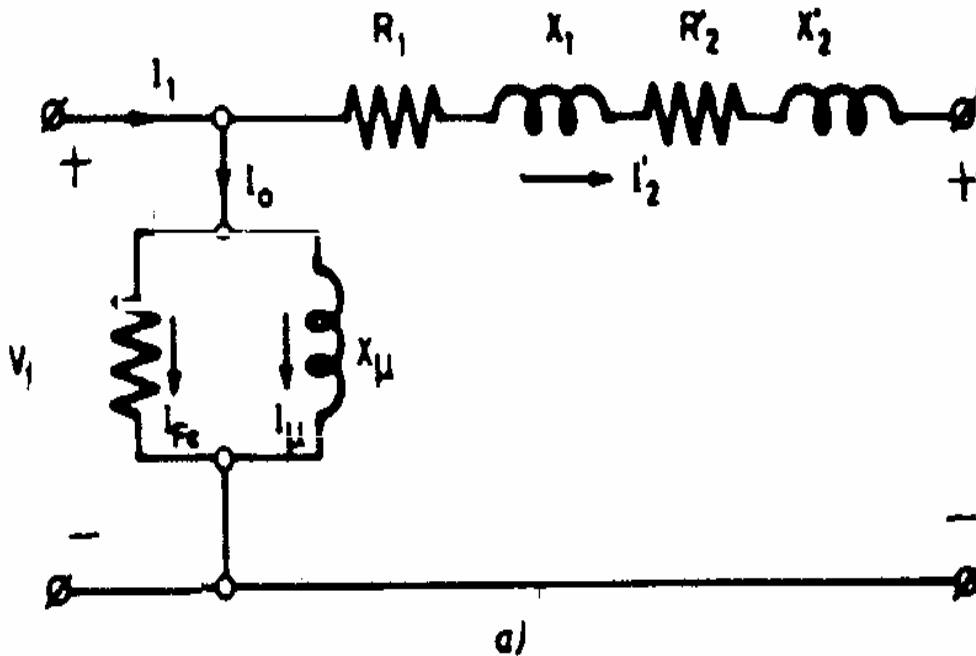
Circuito equivalente aproximado del transformador reducido a primario

Resistencia de cortocircuito

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = R_1 + m^2 R_2$$

Reactancia de cortocircuito

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = X_1 + m^2 X_2$$





TRANSFORMADORES

Ensayo en vacío

Sirve para determinar los parámetros del c.e. de la rama en paralelo

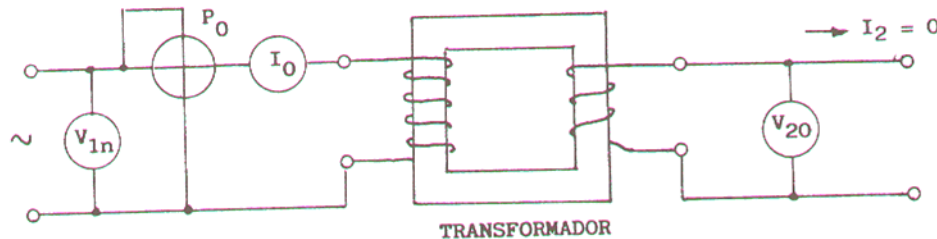
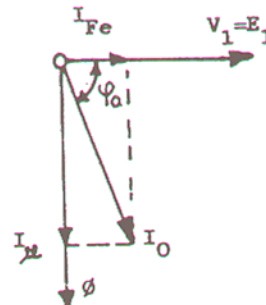
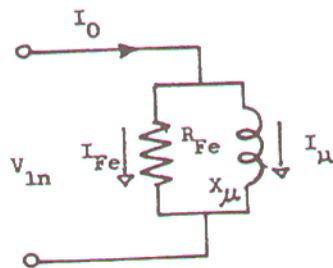


Fig. 3.20



$$P_0 = V_{1n} I_0 \cos \varphi_0 = P_{Fe}$$

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0$$

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}}$$

$$X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}}$$



TRANSFORMADORES

Ensayo en cortocircuito

Sirve para determinar los valores de

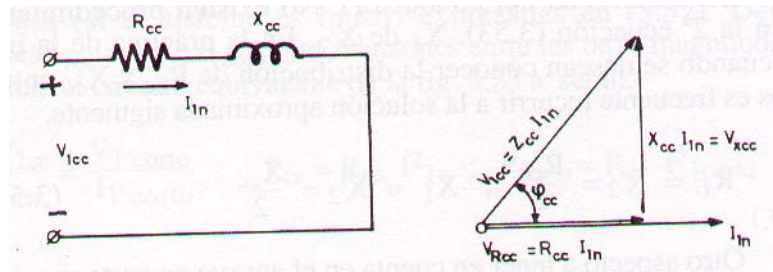
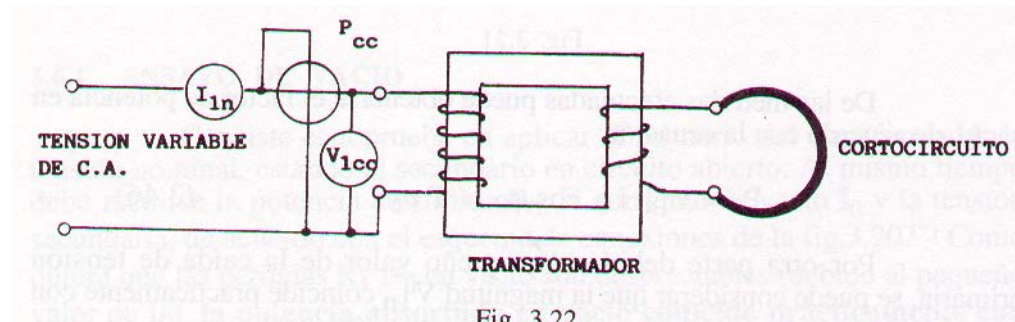
$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = R_1 + m^2 R_2$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = X_1 + m^2 X_2$$

$$P_{cc} = V_{1cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc}$$

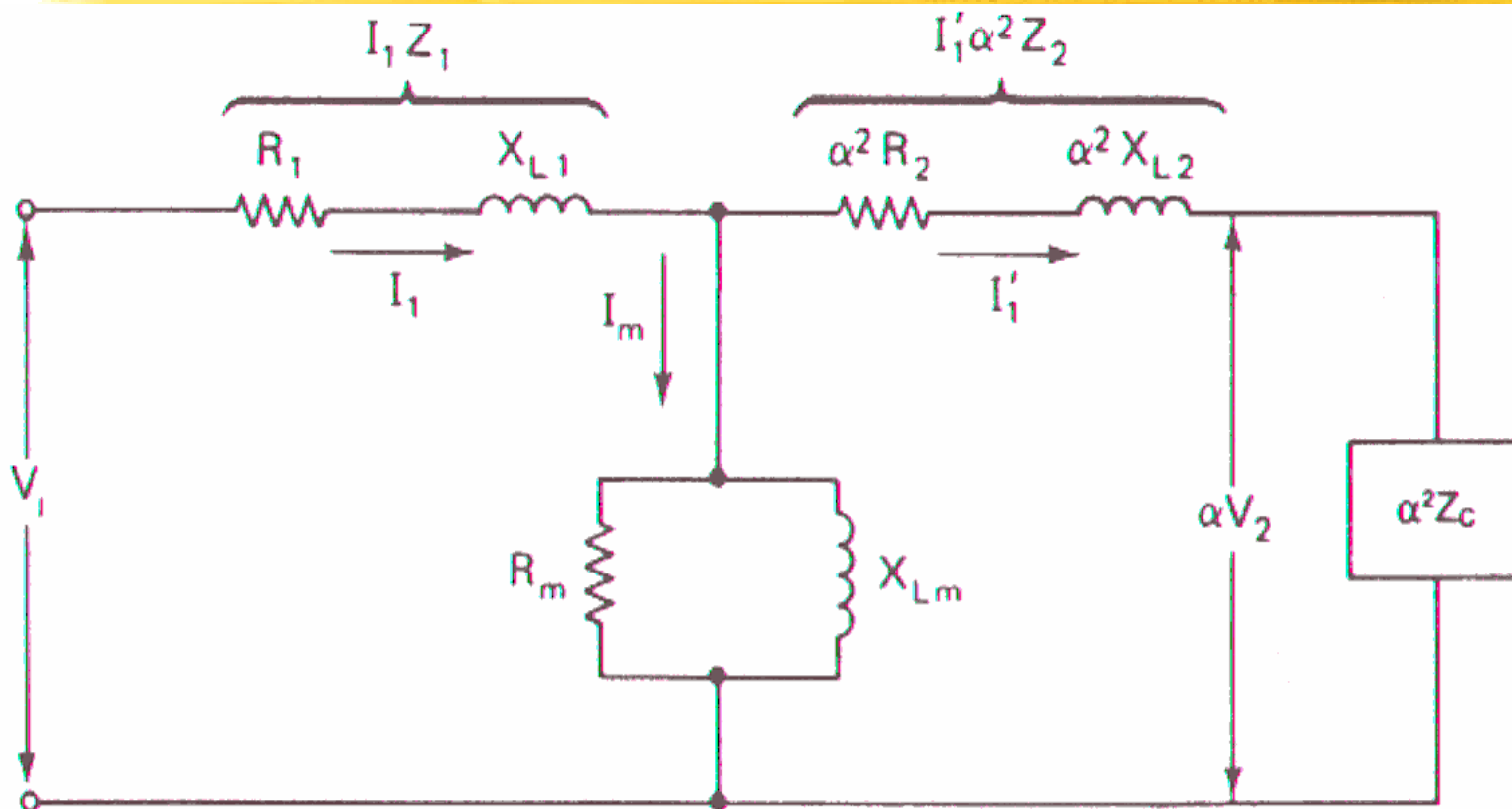
$$R_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc}$$

$$X_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc}$$





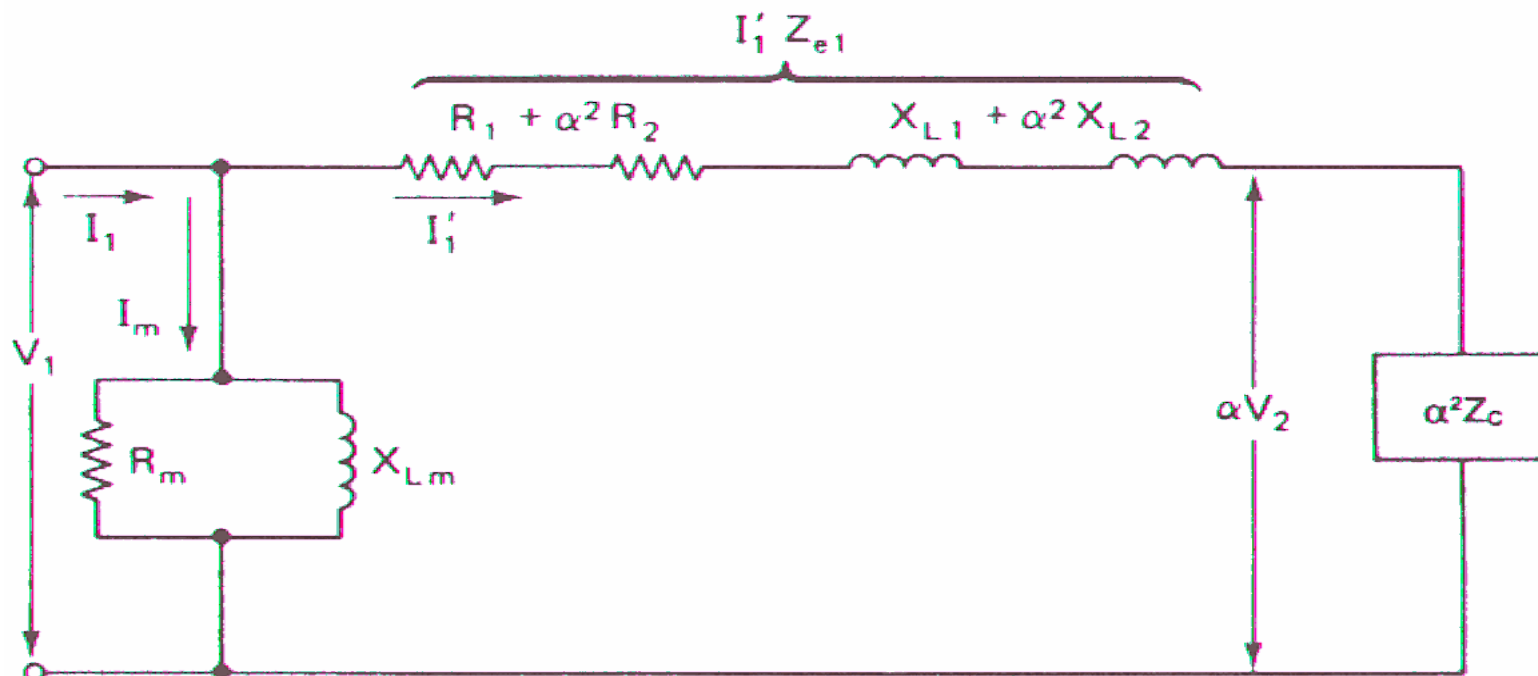
TRANSFORMADORES



(a) Circuito equivalente de un transformador de potencia con carga



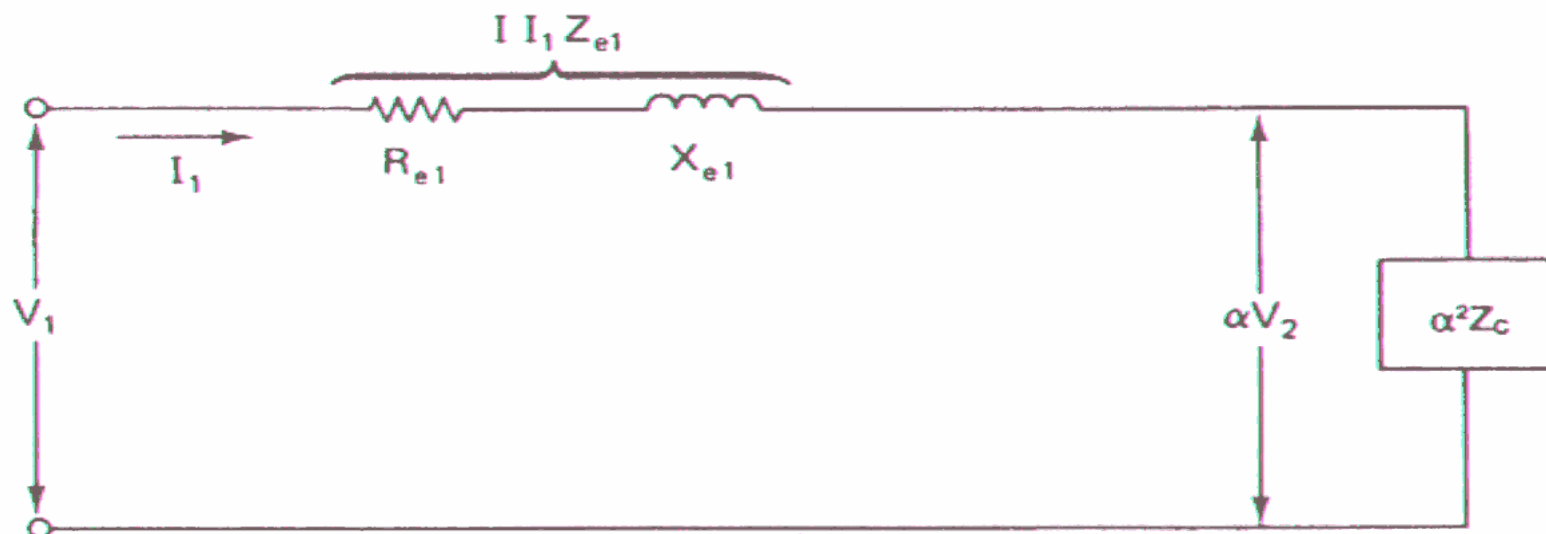
TRANSFORMADORES



(b) Aproximación de circuito equivalente
con impedancias de primario y reflejada
de secundario combinadas



TRANSFORMADORES

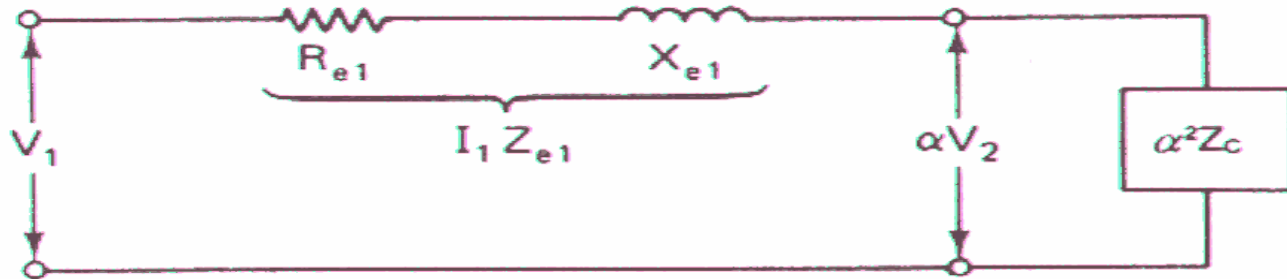


(c) Circuito equivalente simplificado
con corriente magnetizante I_m
considerada como despreciable

Figura 16-1. Circuito equivalente de transformadores de potencia prácticos.

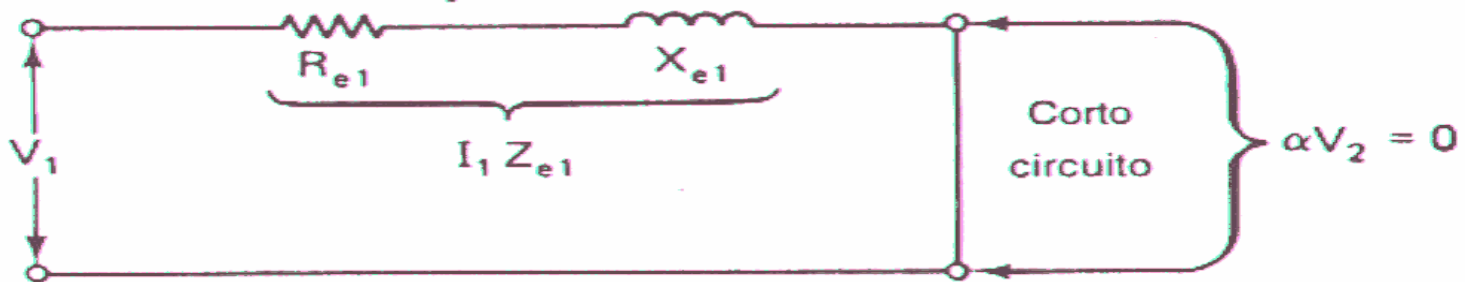


TRANSFORMADORES



Nota: Esto es lo mismo que la figura 15-1c

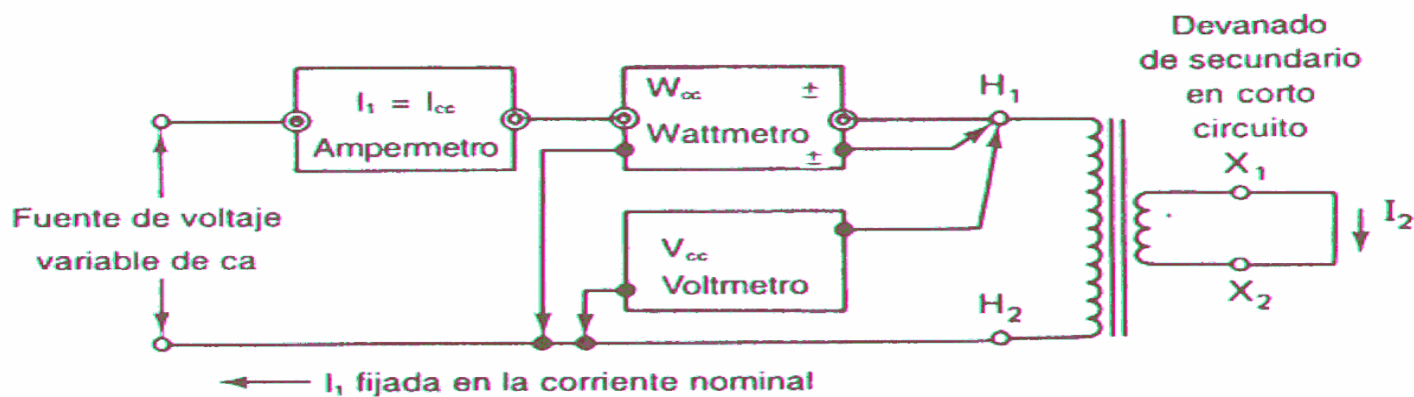
(a) Circuito equivalente simplificado, transformador con carga



(b) Secundario en cortocircuito, circuito equivalente



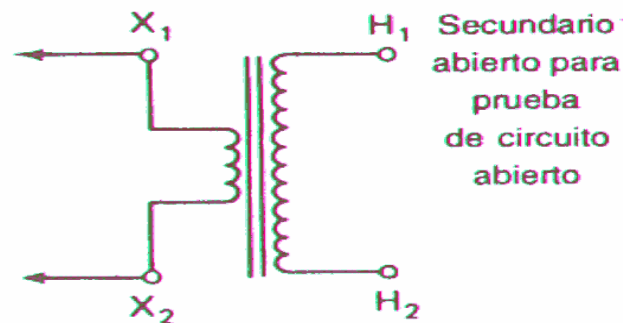
TRANSFORMADORES



(c) Circuito para prueba de cortocircuito

Use suministro de voltaje nominal V_o .

Al mismo tipo de circuito de medidores que en (c)



(d) Cambios para prueba de circuito abierto

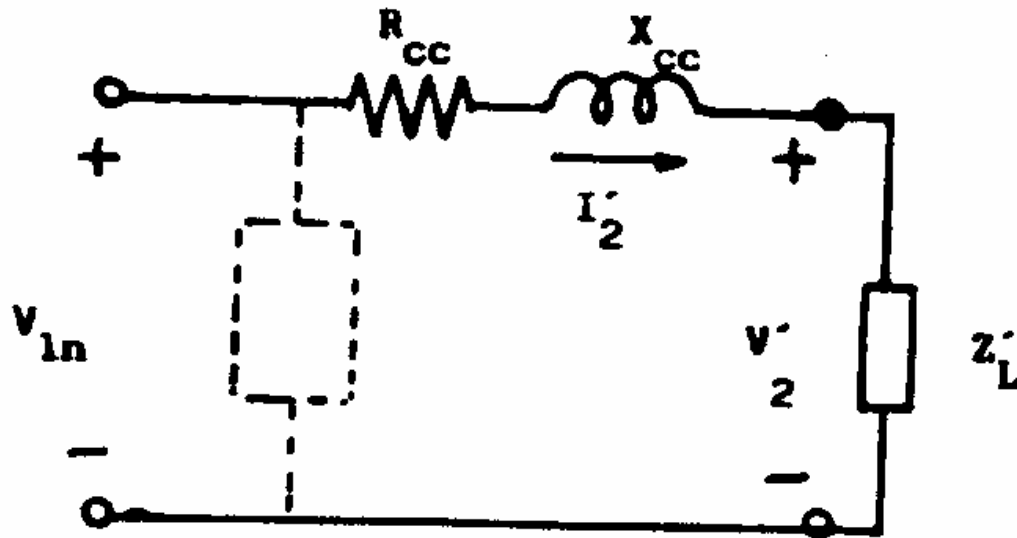
Figura 16-3. Prueba de cortocircuito para transformadores.



TRANSFORMADORES

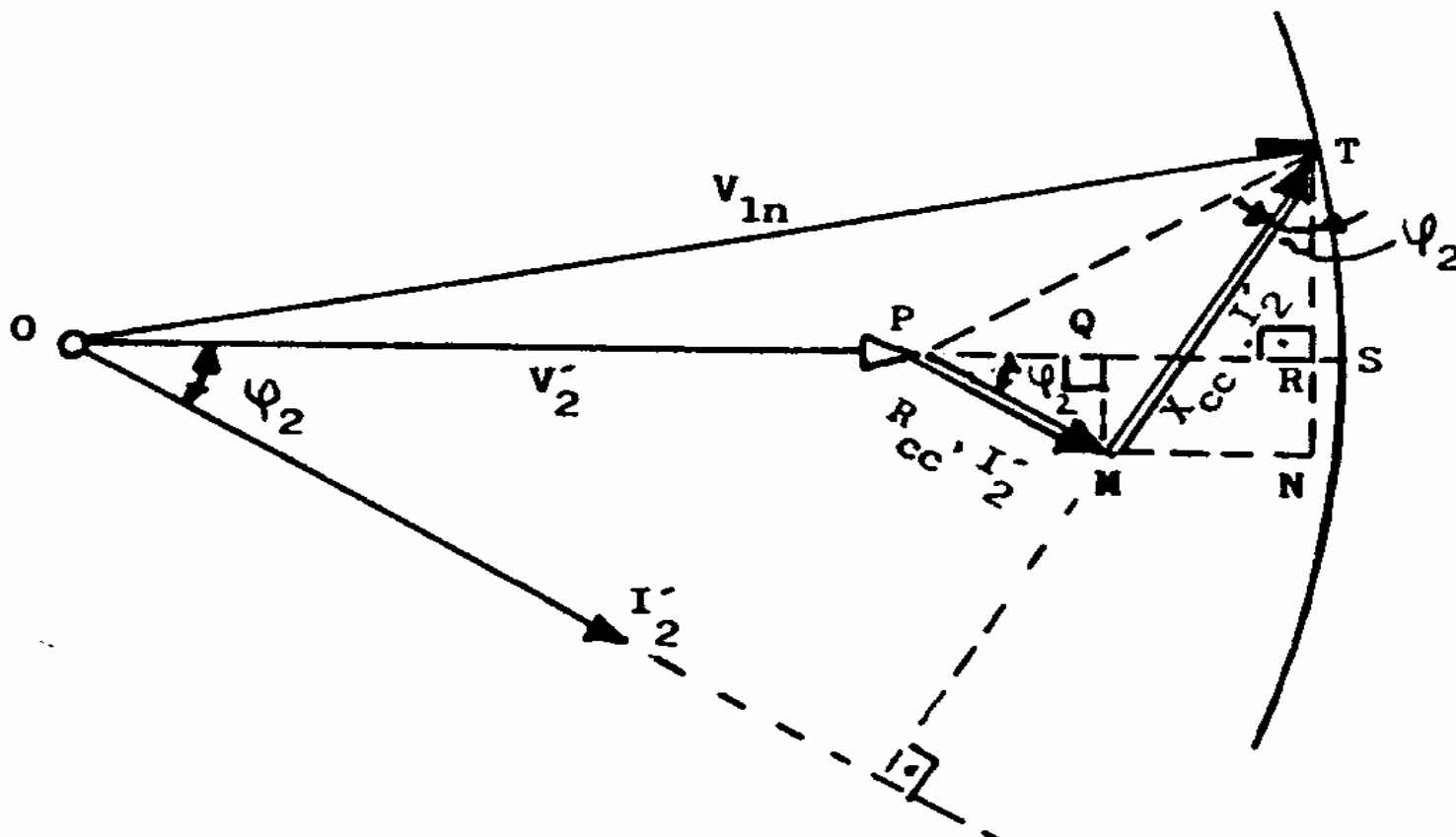
Caída de tensión en un transformador. Diagrama de Kapp.

$$V_{1n} = V'_2 + (R_{cc} + j X_{cc}) I'_2$$





TRANSFORMADORES





TRANSFORMADORES

✍ Regulación.

$$\varepsilon_C = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} 100 = \frac{V_{1n} - V'_2}{V_{1n}} 100$$

✍ A partir del diagrama de Kapp

$$\varepsilon_C = \frac{|PS|}{|OT|} \cong \frac{|PR|}{|OT|} = C\varepsilon_{Rcc} \cos \varphi_2 + C\varepsilon_{Xcc} \sin \varphi_2$$

C es el índice de carga $C = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I'_2}{I'_{2n}} \cong \frac{I_1}{I_{1n}}$

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{V_{1n}} 100 \cong \frac{R_{cc} I'_{2n}}{V_{1n}} 100$$

$$\varepsilon_{Xcc} = \frac{X_{cc} I_{1n}}{V_{1n}} 100 \cong \frac{X_{cc} I'_{2n}}{V_{1n}} 100$$



TRANSFORMADORES

Rendimiento de un transformador.

a o C es el índice de carga.

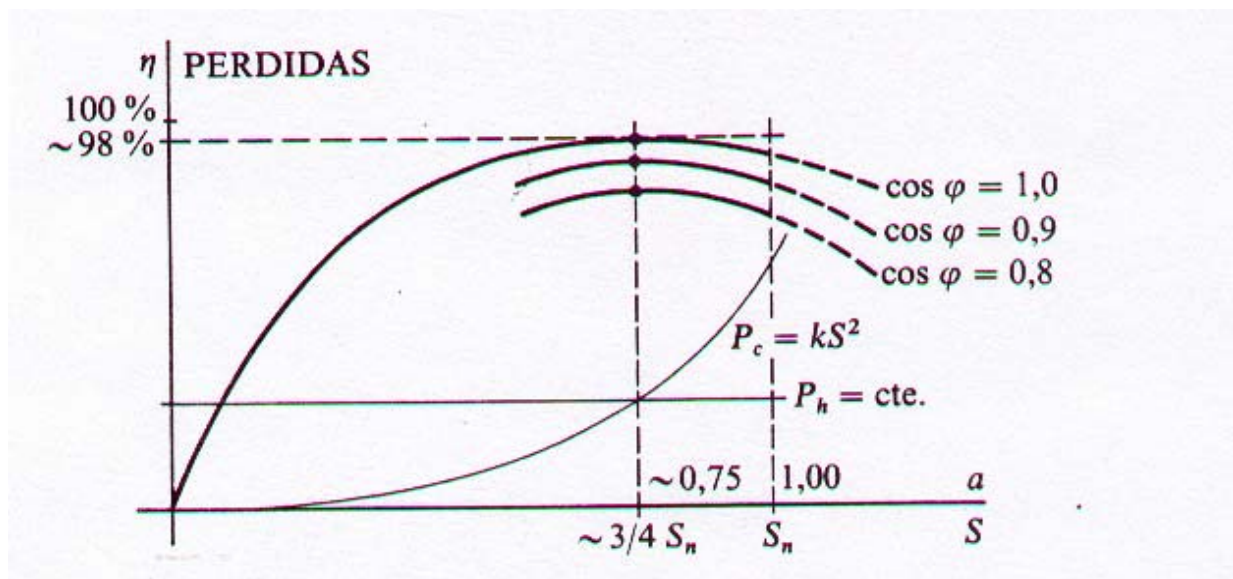
S es la potencia aparente

El subíndice n indica condiciones nominales

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia útil} + \text{Pérdidas}} = \frac{CV_2 I_{2n} \cos \varphi_2}{CV_2 I_{2n} \cos \varphi_2 + P_{Fe} + C^2 P_{cc}}$$

$$a = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I'_2}{I'_{2n}} = \frac{I_1}{I_{1n}}$$









$$a_{opt} = \sqrt{\frac{P_o}{P_{cc}}}$$





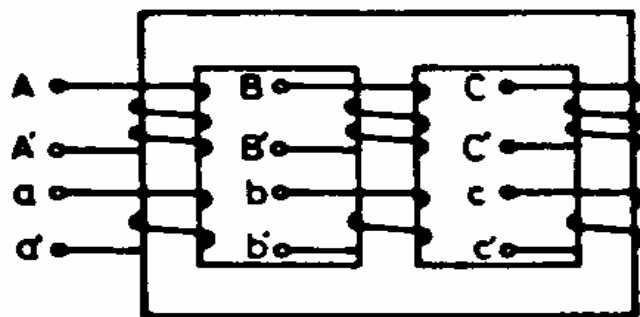
TRANSFORMADORES

Aspectos constructivos.

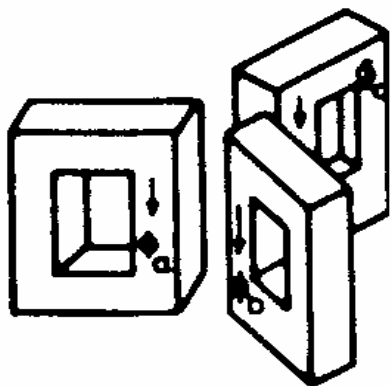
-  a) Núcleo. Circuito magnético. Chapas de acero al silicio.
-  b) Devanados.
-  c) Sistema de refrigeración.
-  d) Aisladores pasantes de salida.
-  Placa de características.
-  Transformadores trifásicos.
-  Autotransformadores.
- 



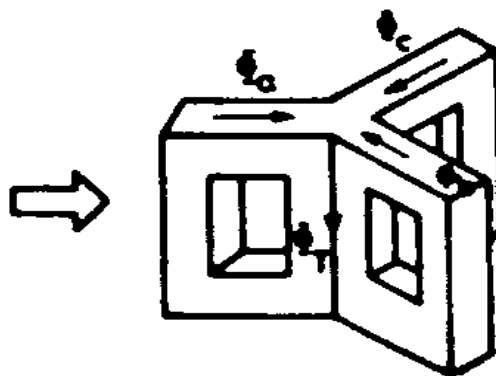
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



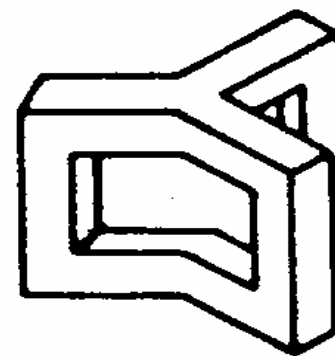
a)



b)



c)

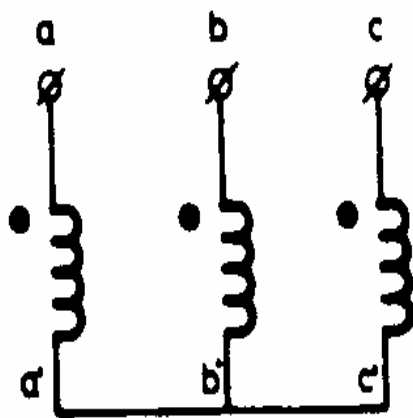


d)

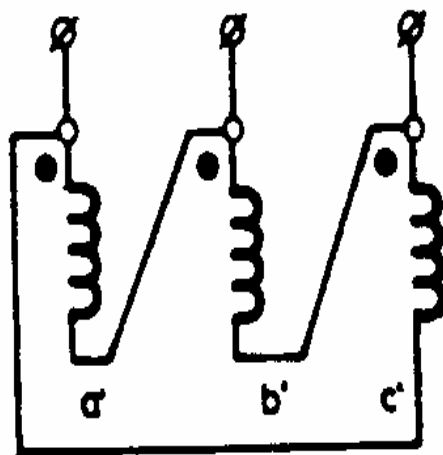


TRANSFORMADORES

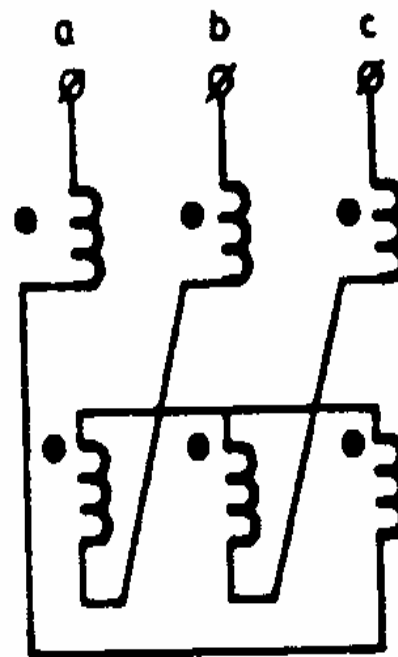
Tipos de conexiones en el lado de baja tensión



a) ESTRELLA



b) TRIANGULO



c) ZIG - ZAG



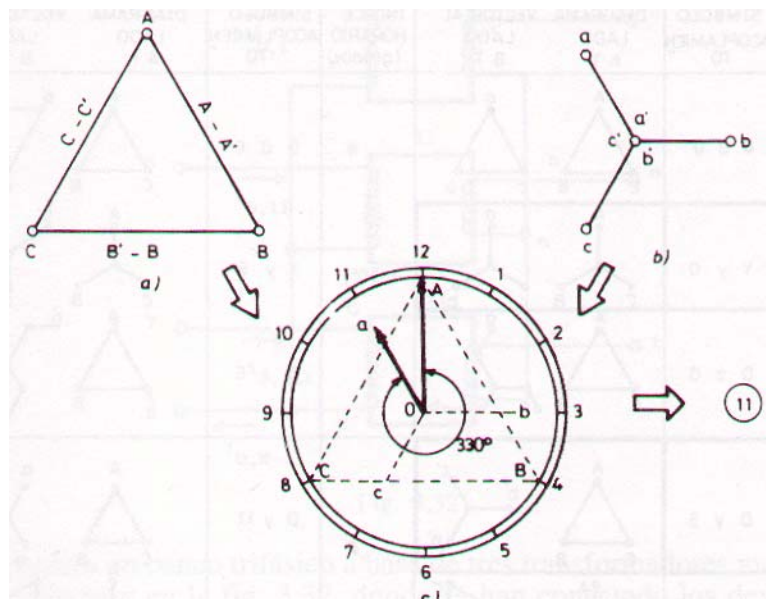
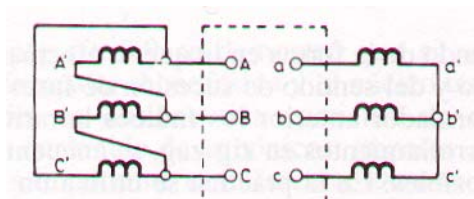
TRANSFORMADORES

INDICE HORARIO (grados)	SIMBOLO ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA LADO A.T.	VECTORIAL LADO B.T.	INDICE HORARIO (grados)	SIMBOLO ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA LADO A.T.	VECTORIAL LADO B.T.
0 (0°)	D d 0			6 (180°)	D d 6		
	Y y 0				Y y 6		
	D z 0				D z 6		
5 (150°)	D y 5			11 (330°)	D y 11		
	Y d 5				Y d 11		
	Y z 5				Y z 11		

TABLA N° 3



TRANSFORMADORES





TRANSFORMADORES

Transformadores de tensión y corriente

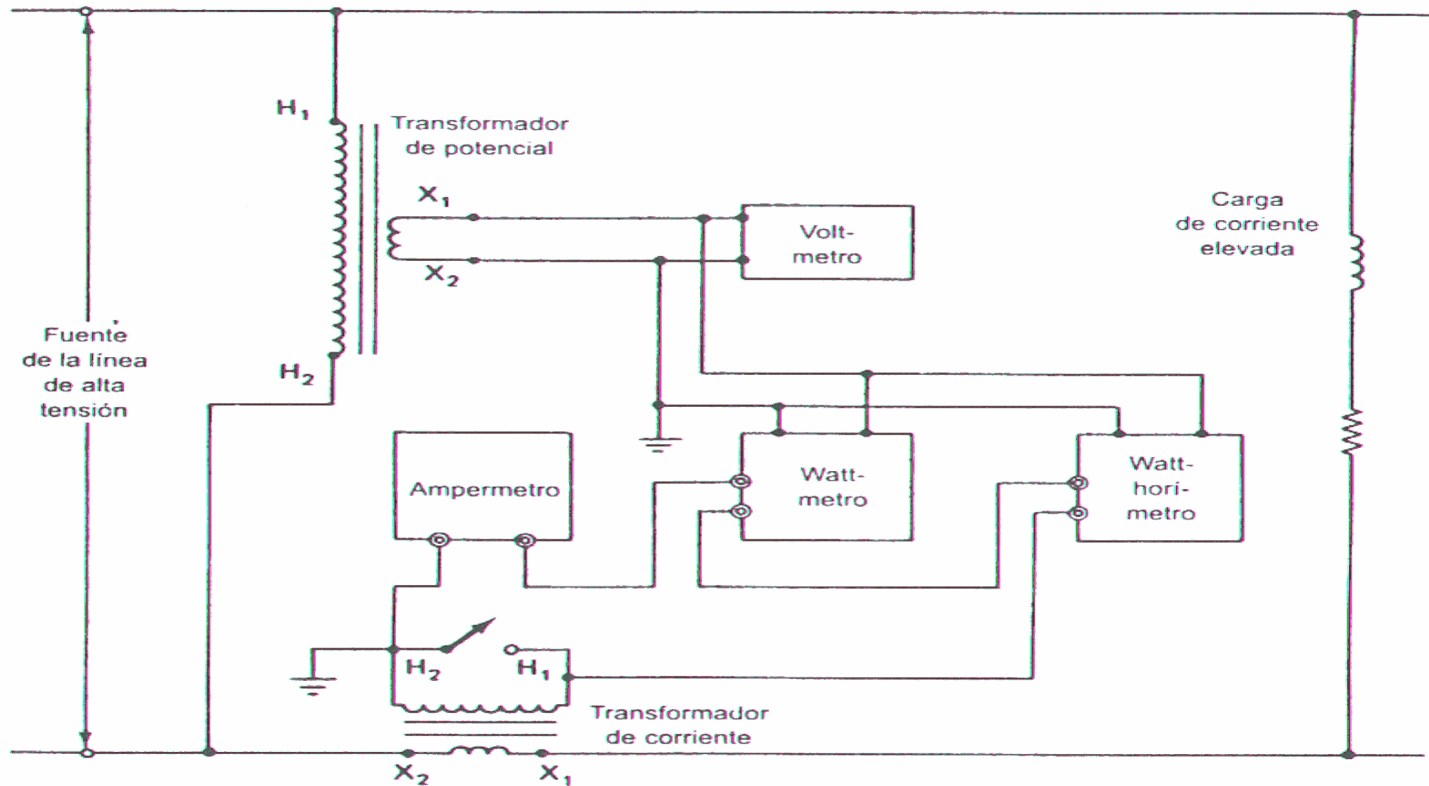


Figura 17-4. Circuitos de transformador de instrumentación.

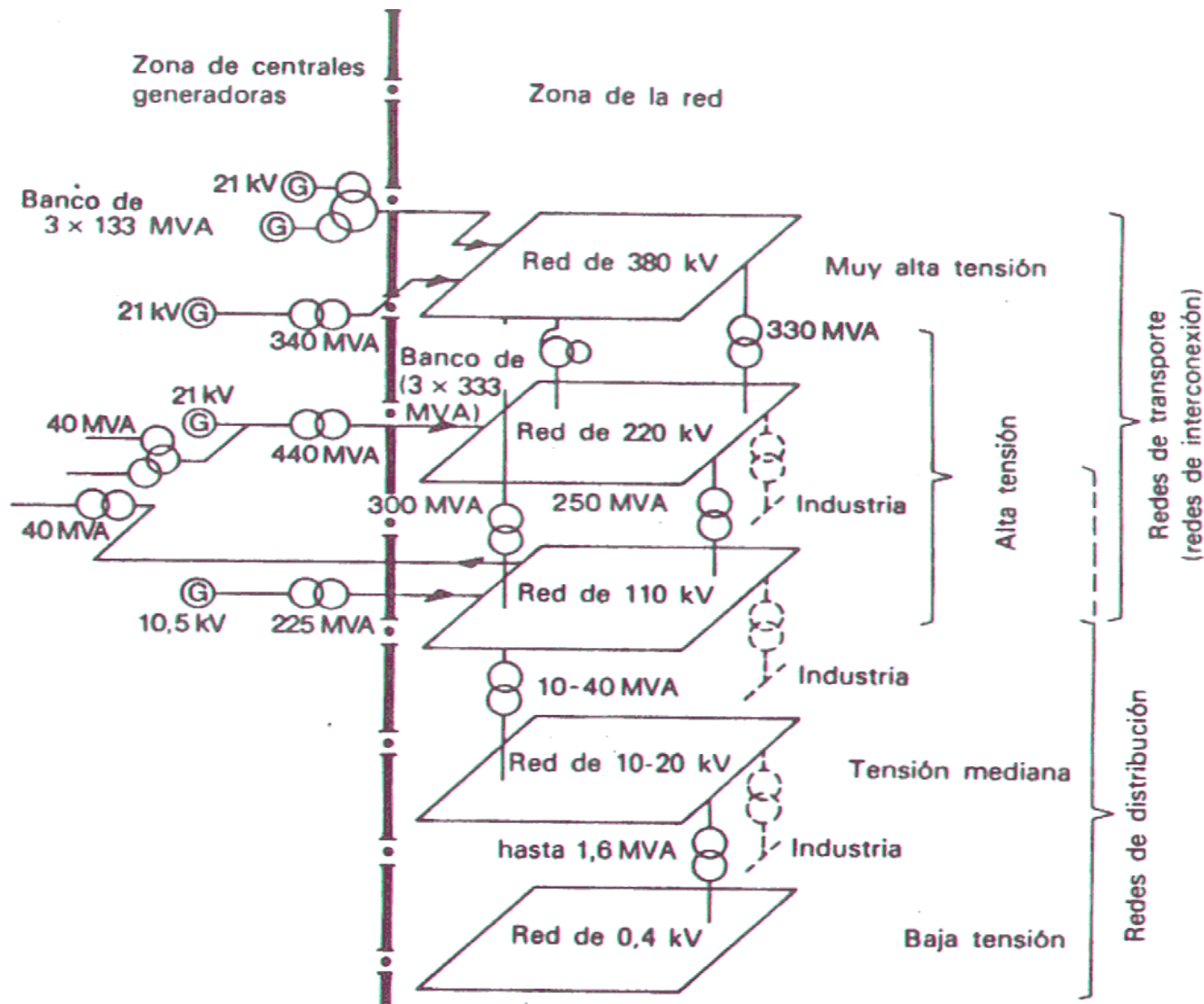
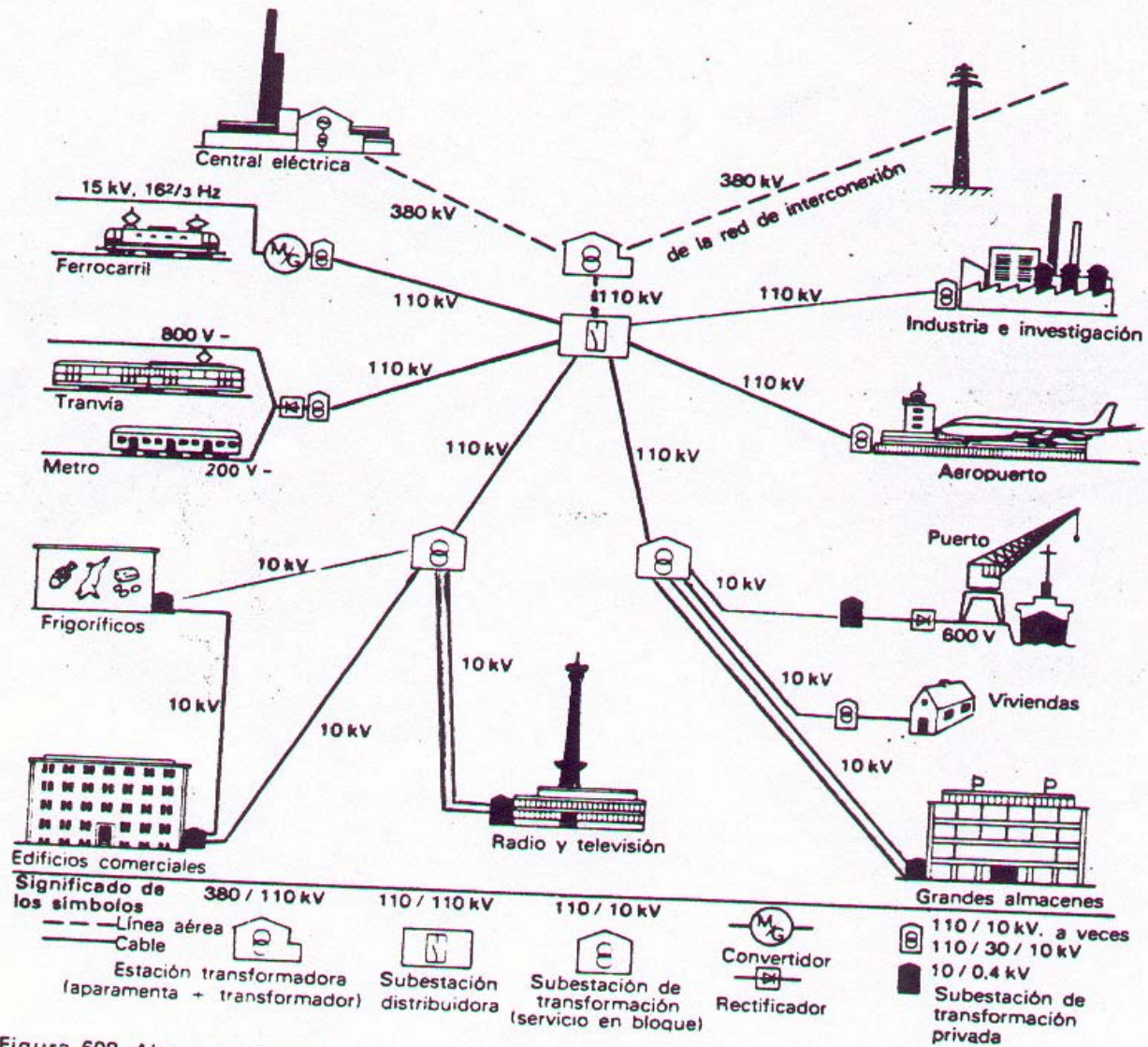
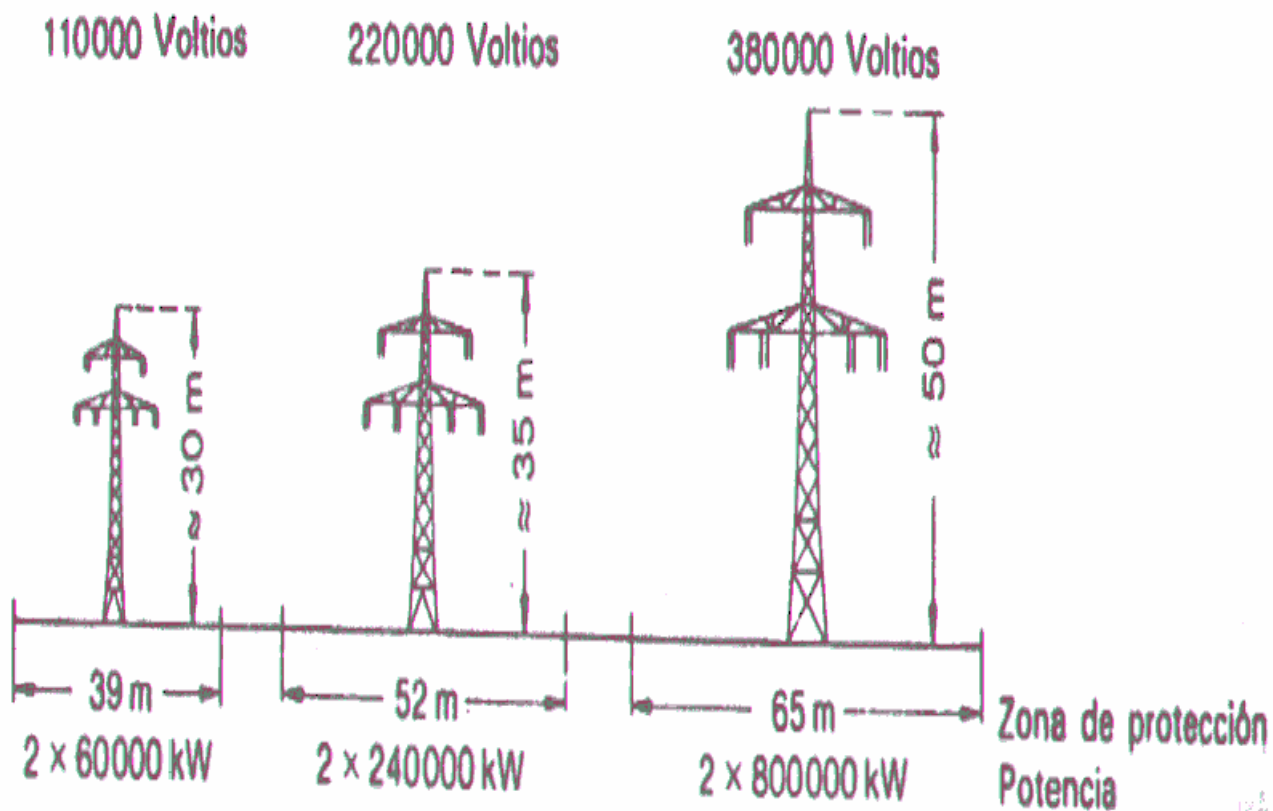


Figura 612: Abastecimiento de energía a través de las redes de muy alta, alta, mediana y baja tensión en la República Federal de Alemania.





Capacidad de transporte según las alturas de las torres



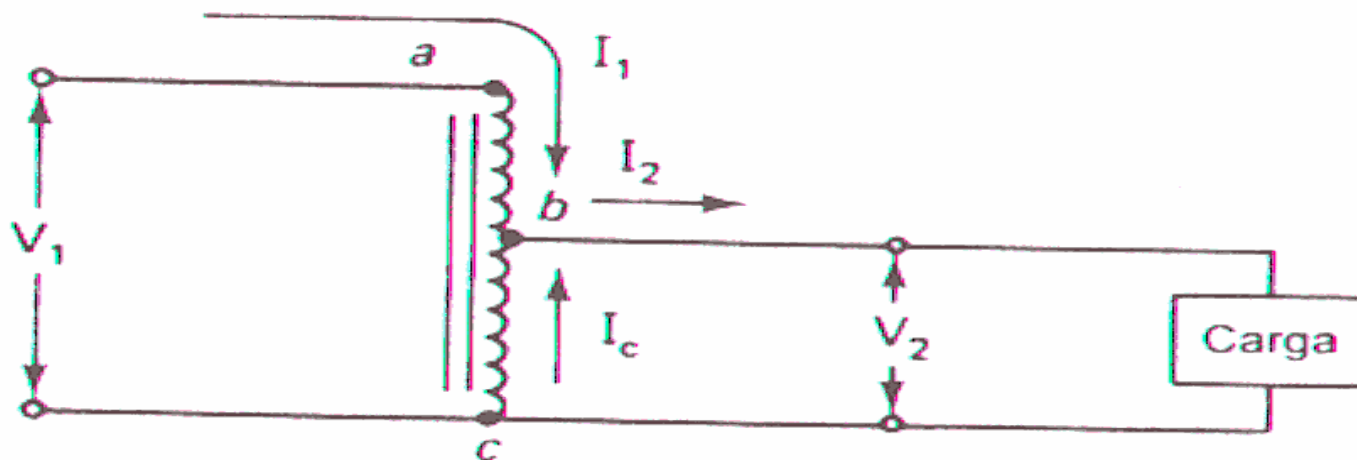
TRANSFORMADORES

NATURALEZA DEL REFRIGERANTE	SIMBOLO	NATURALEZA DE LA CIRCULACION	SIMBOLO
ACEITE MINERAL	O	NATURAL	N
PYRALENO	L	FORZADA	F
GAS	G		
AGUA	W		
AIRE	A		
AISLANTE SOLIDO	S		

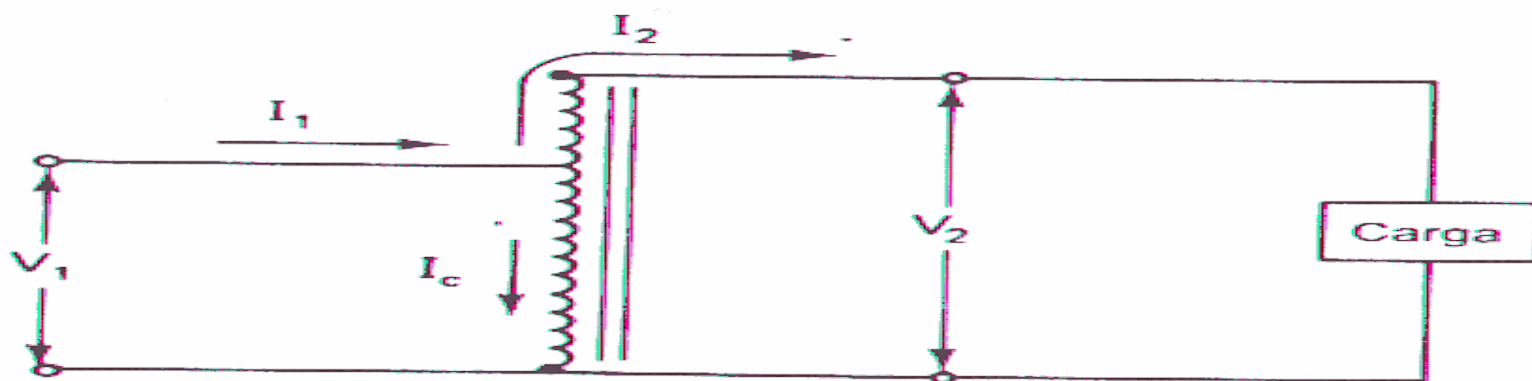
Denominación	Densidad kg/m^3	Conductividad Térmica $\text{W/m } ^\circ\text{C}$	Permitivilidad dieléctrica ϵ_r	Rigidez dieléctrica kV/cm
Hidrocarburos puros (aceite de transf)	900	0,16	2,2	200
Pyralenos	1820	0,1	4,5	290
Aceite de silicio	960	0,15	2,56	200 a 300
Aire	1,293	0,024	1	32



TRANSFORMADORES



(a) Autotransformador reductor



(b) Autotransformador elevador