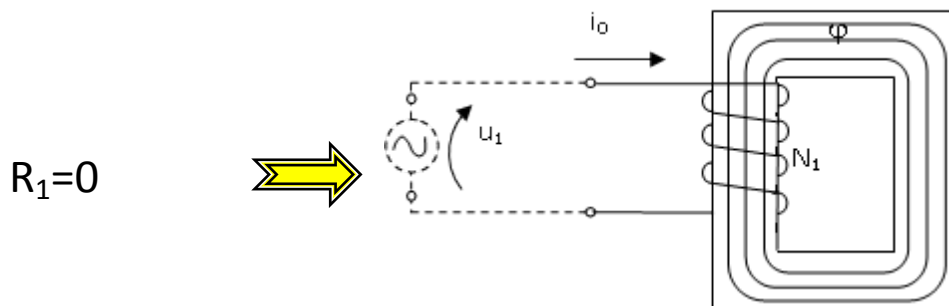


Tema III. Transformadores

3.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR	2
3.2. FINALIDAD Y UTILIZACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES.	3
3.3. TIPOS Y CONSTITUCIÓN	4
3.4. POTENCIA NOMINAL DE UN TRANSFORMADOR	6
3.5. CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR	6
3.6. ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR REAL	7
3.7. TRANSFORMADOR REAL EN CARGA	8
3.8. ESQUEMA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR: RESISTENCIA Y REACTANCIA DE CC.	8
3.9. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO. TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO	11
3.10. PÉRDIDAS Y RENDIMIENTOS DE UN TRANSFORMADOR	15
3.11. TRANSFORMADORES EN PARALELO	16
3.12. AUTOTRANSFORMADOR	17
3.13. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO: INTRODUCCIÓN	18
3.14. BANCO TRIFÁSICO A BASE DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	18
3.15. TRANSFORMADOR DE TRES COLUMNAS (UN SOLO NÚCLEO)	18
3.16. FUNCIONAMIENTO EN RÉGIMEN EQUILIBRADO ENSAYOS Y ESQUEMA EQUIVALENTE	20
3.17. CONEXIONES EN LOS TRANSFORMADORES.	22
3.18. CATÁLOGO DE TRANSFORMADORES	24
3.19. BIBLIOGRAFÍA	25

Tema III. Transformadores.

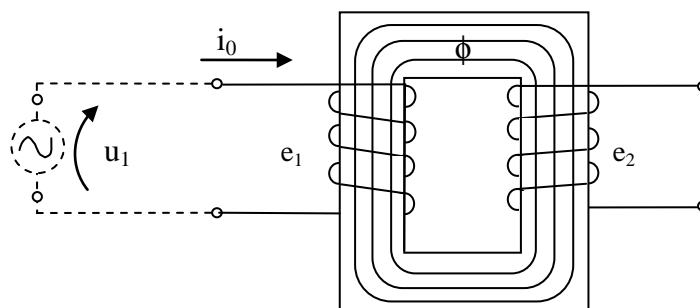
3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

$$\text{Ley de Faraday} \Rightarrow e_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$\bar{E}_1 = 4'44 \cdot f \cdot N_1 \cdot B_m \cdot S$$

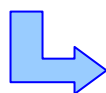


Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

$$\bar{E}_2 = 4'44 \cdot f \cdot N_2 \cdot B_m \cdot S$$

¿ $R_1 \neq 0$?

Relación de transformación nominal, con respecto a tensiones



$$r_{m1} = \frac{U_{1,nominal}}{U_{2,vacío}} \cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

3.1. Principio de funcionamiento del transformador (II).

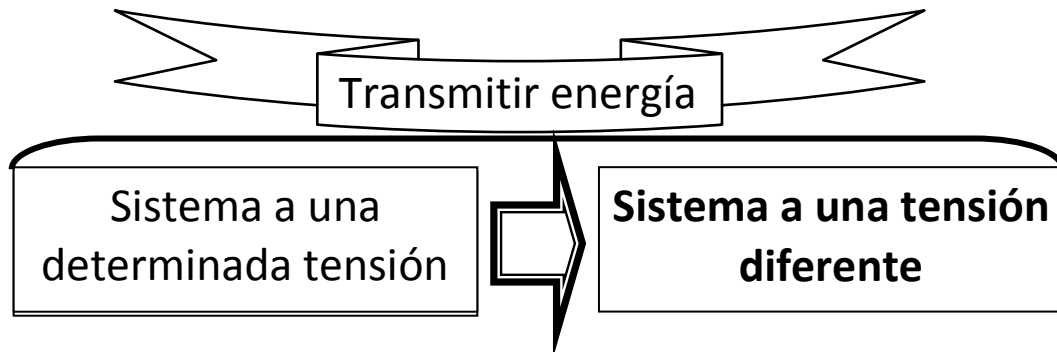
Con respecto a las Intensidades. Si se considera el trafo real

S_{nT}	rendimiento
10÷1000 kVA	96÷99%
10.000÷100.000 kVA	99÷99'7%

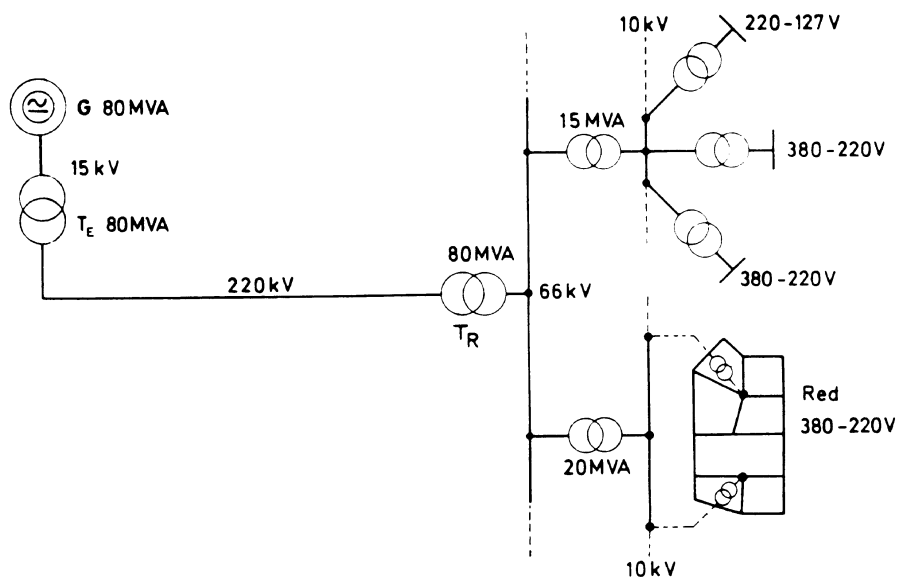
$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1}$$

3.2. FINALIDAD Y UTILIZACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES.

-Finalidad.



-Utilidades

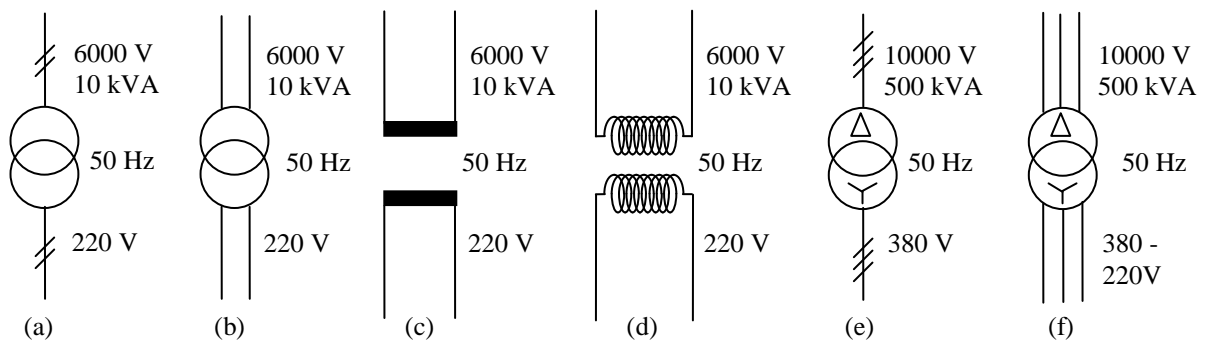


Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

3.3. TIPOS Y CONSTITUCIÓN.

- Tipos**
- Según la función.
 - Sistema de tensiones.
 - Según aumenten o reduzcan la tensión.
 - Según el refrigerante.
 - Según la refrigeración.

Principales símbolos

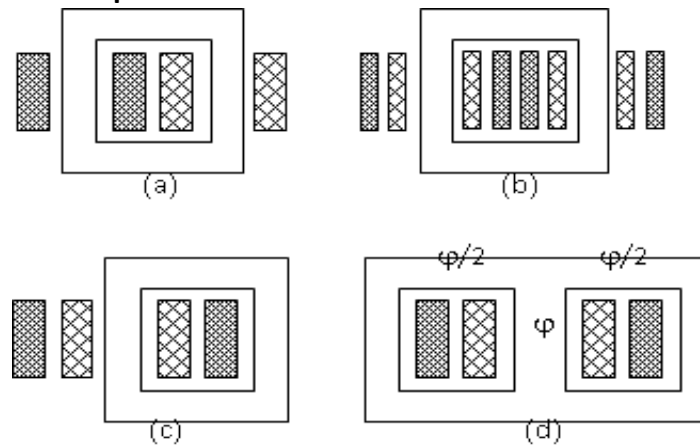


Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

- Constitución**
- a) Circuito eléctrico.
 - b) Circuito magnético.
 - c) Refrigeración.

a) Circuito eléctrico.

Posibles disposiciones de las bobinas.



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

3.3. Tipos y Constitución (II).

b) Circuito magnético.

Núcleo con chapas ferromagnéticas.

tipo de chapa	Pérdidas por histéresis y corrientes parásitas (W/kg)
chapa normal	0'8÷1'3 (50Hz,1 T)
grano orientado	0'4÷0'5 (50Hz,1 T.) 1÷1'2 (50Hz,1'5T.)

-Aislamiento (papel, barniz y carlita)

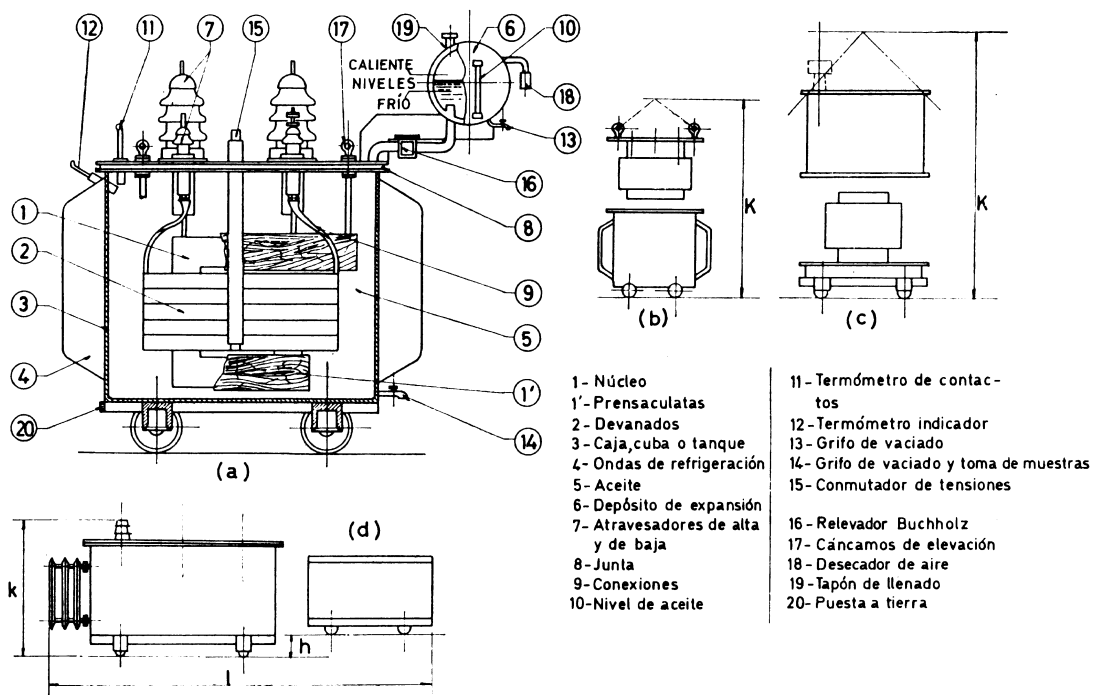
Ha repercutido en

-Factor de relleno o de aprovechamiento

(0'88 del papel → 0'95÷0'97 del carlita)

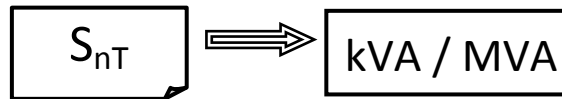
c) Refrigeración → Refrigerante

-Tipos de refrigeración.

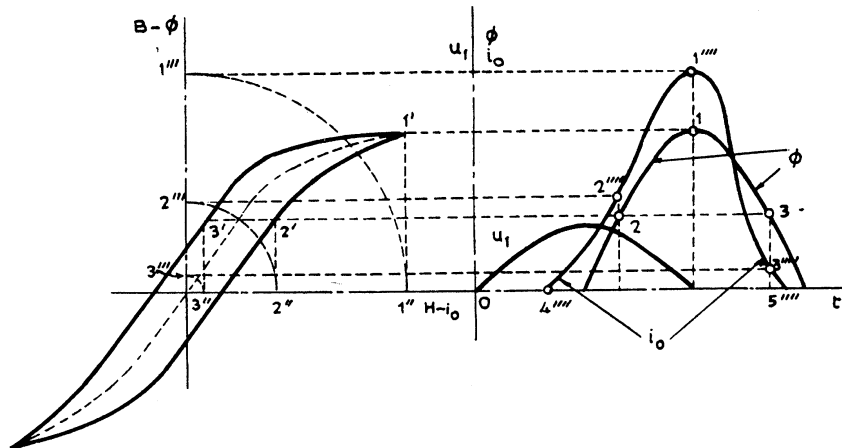


Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

3.4. POTENCIA NOMINAL DE UN TRANSFORMADOR.

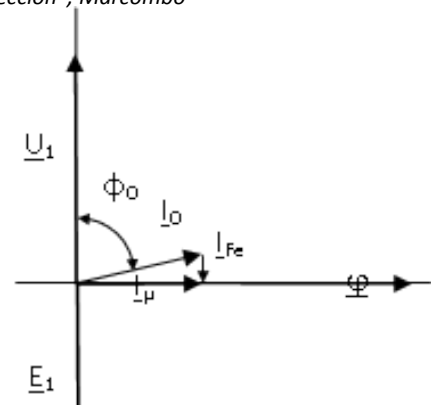


3.5. CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR.



Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

Supondremos i_0 senoidal, su diagrama fasorial, será.

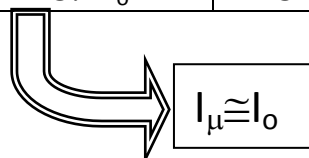


Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

Por lo tanto, la "Potencia Activa", llamada también ^(b) pérdidas en el núcleo ferromagnético.

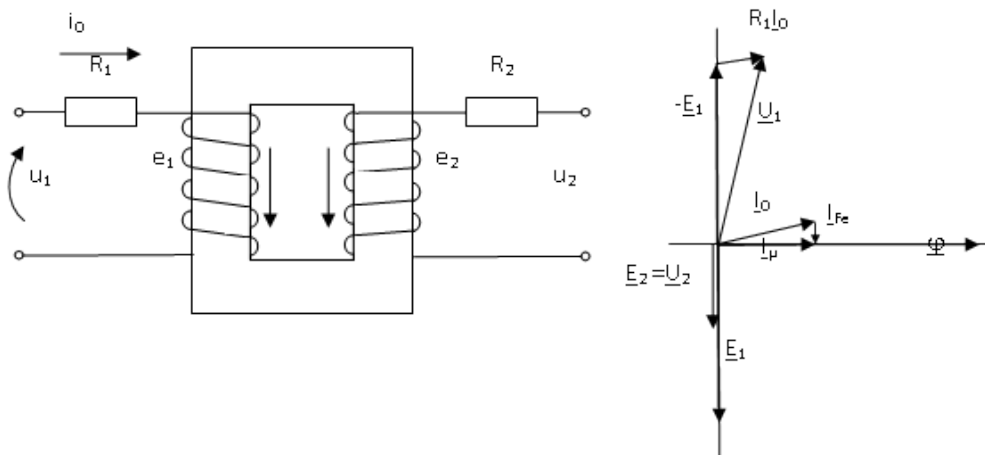
$$P = U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \phi_0 = U_1 \cdot I_{Fe}$$

	Trafo modernos	trafo antiguos
I_0	$0'6 \div 8\% \cdot I_{1n}$	$4 \div 14\% \cdot I_{1n}$
I_{Fe}	$1 \div 15\% \cdot I_0$	$5 \div 14\% \cdot I_0$



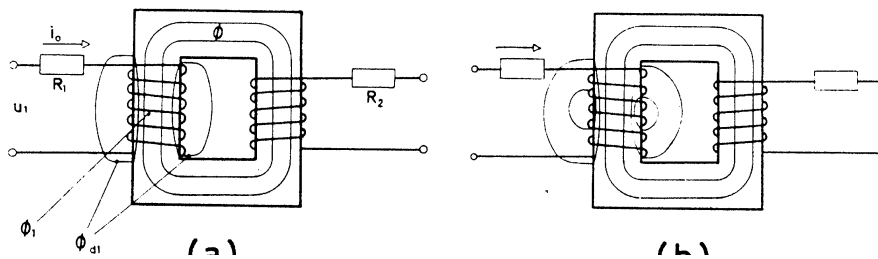
3.6. ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR REAL.

Caso A.- Consideración de la resistencia en el primario.

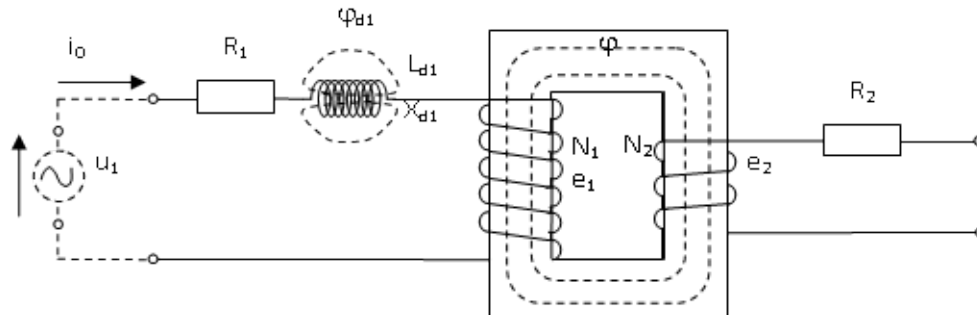


Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

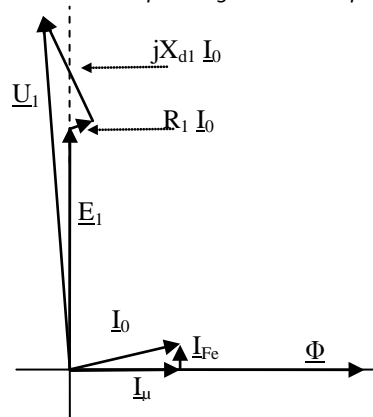
Caso B.- Consideración del flujo de dispersión.



Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo



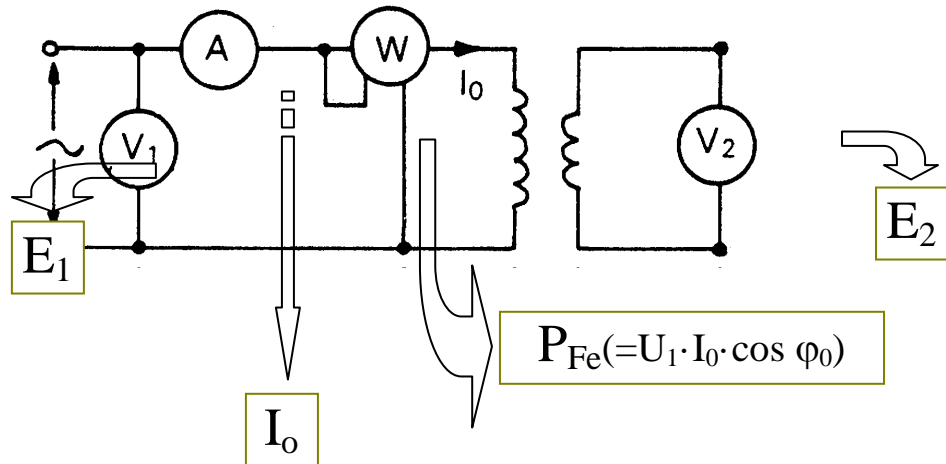
Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

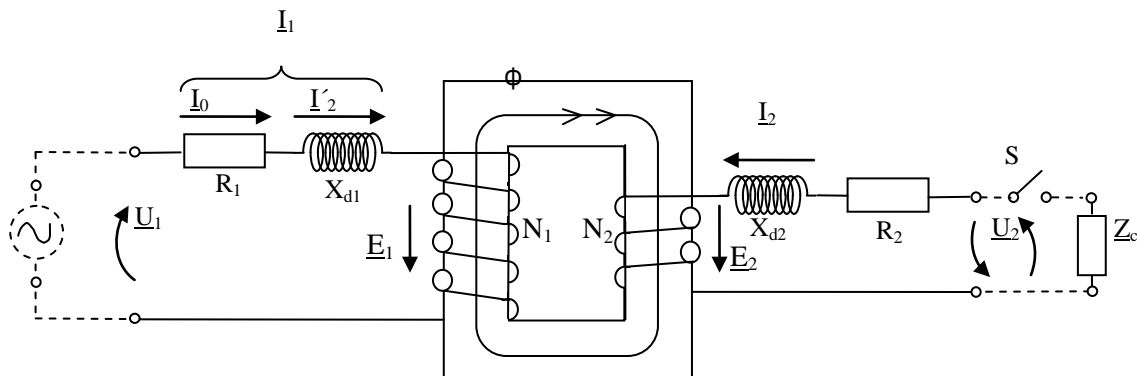
3.6. ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR REAL EN VACÍO (II).

Caso C.- Ensayo de vacío.



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

3.7. TRANSFORMADOR REAL EN CARGA.



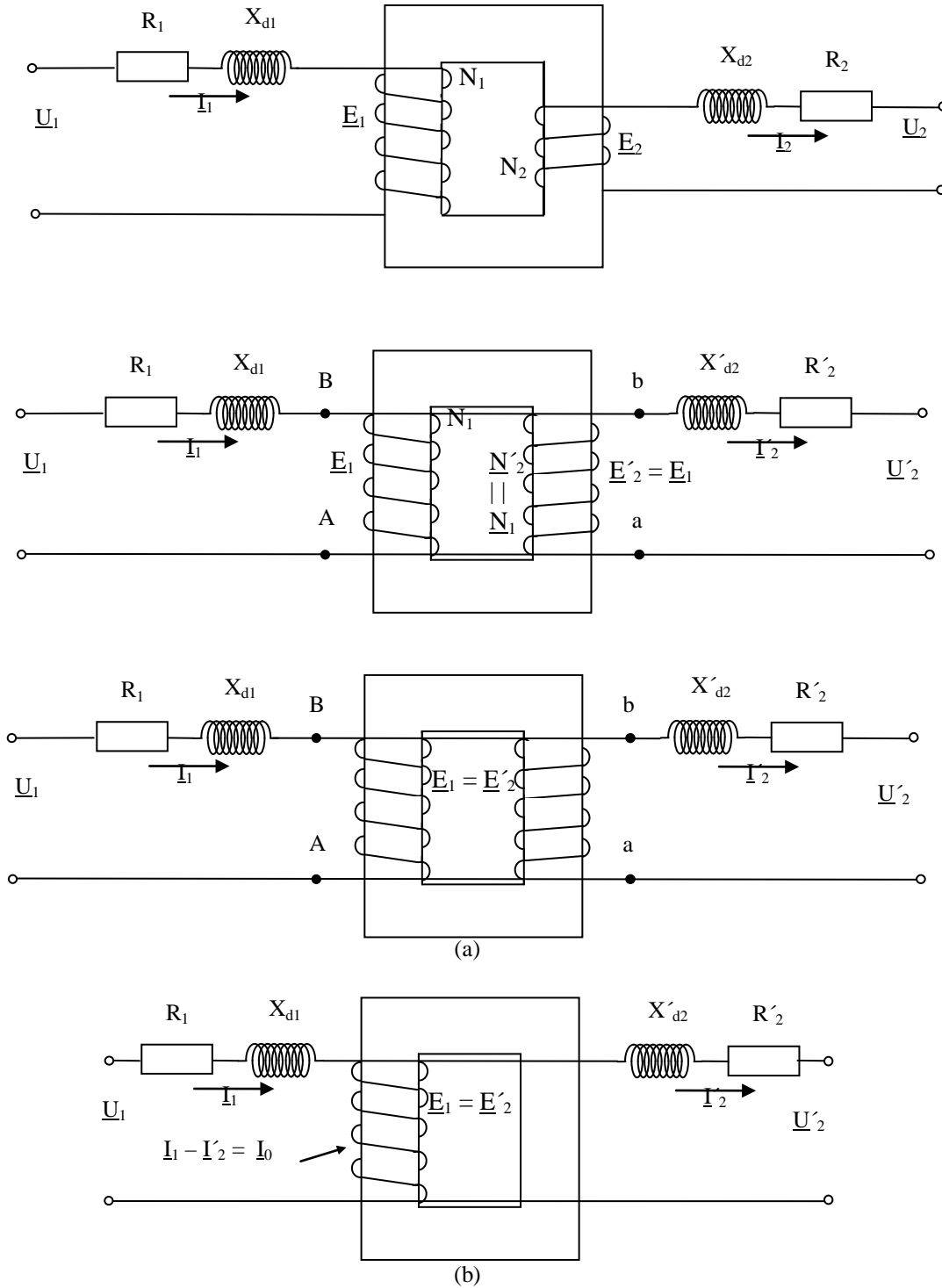
Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

3.8. ESQUEMA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR: RESISTENCIA Y REACTANCIA DE CORTOCIRCUITO.

A.- Reducción de los valores de un transformador del secundario al primario.

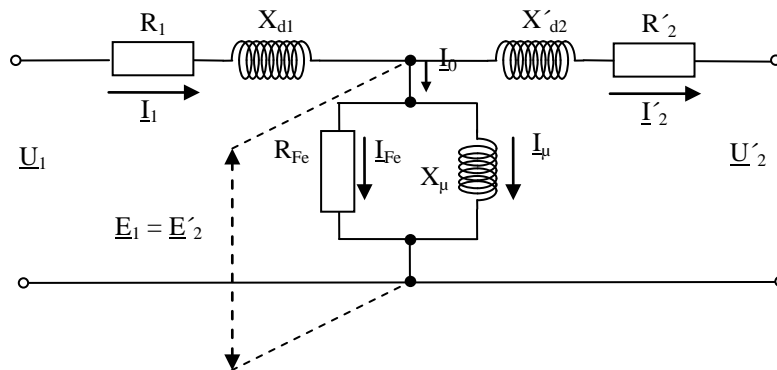
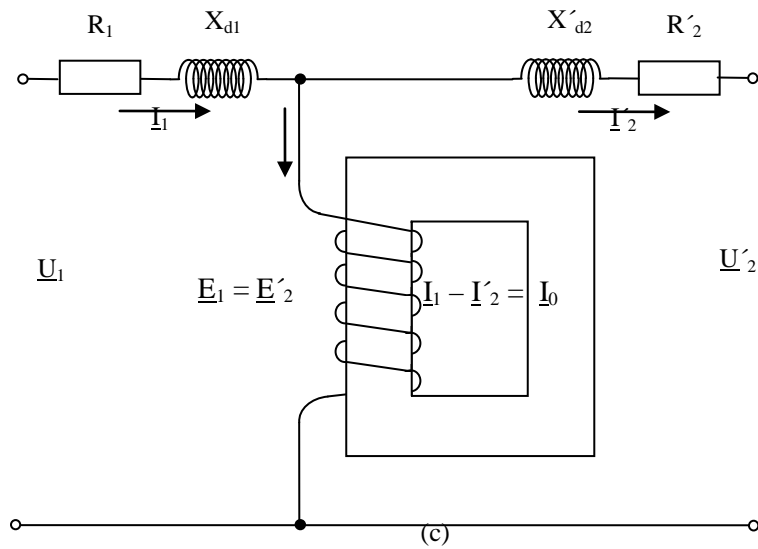
3.8.ESQUEMA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR: RESISTENCIA Y REACTANCIA DE CORTOCIRCUITO (II).

B.- Esquema equivalente.



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

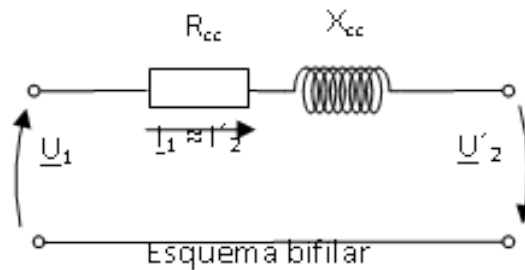
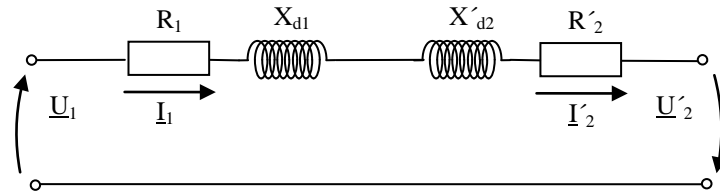
3.8. ESQUEMA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR: RESISTENCIA Y REACTANCIA DE CORTOCIRCUITO (II).



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

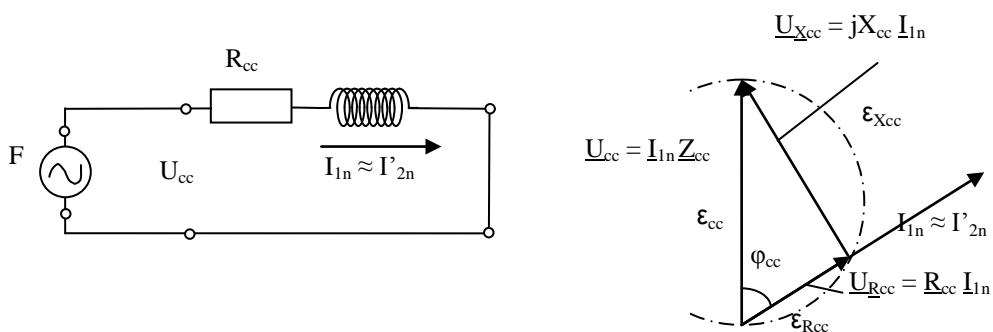
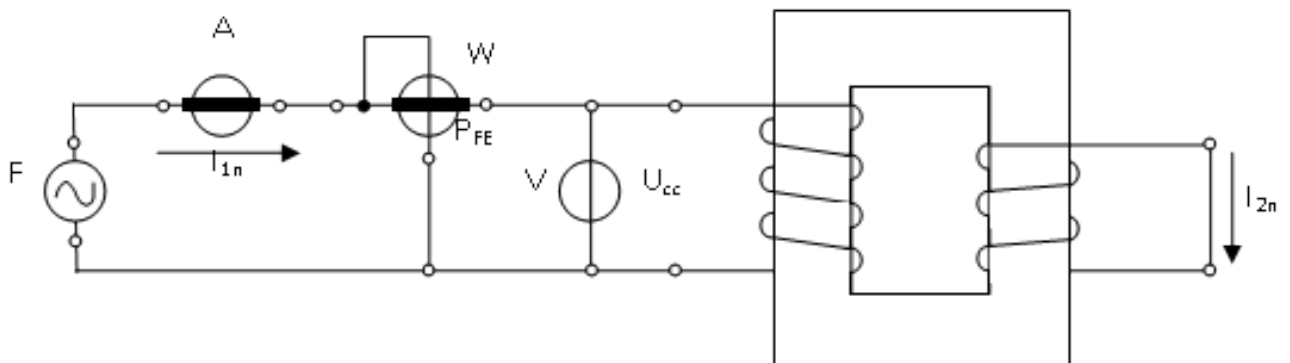
3.8. ESQUEMA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR: RESISTENCIA Y REACTANCIA DE CORTOCIRCUITO (III).

C.- Esquema equivalente simplificado. Resistencia y reactancia de cortocircuito de un transformador.



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

3.9. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO. TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO.

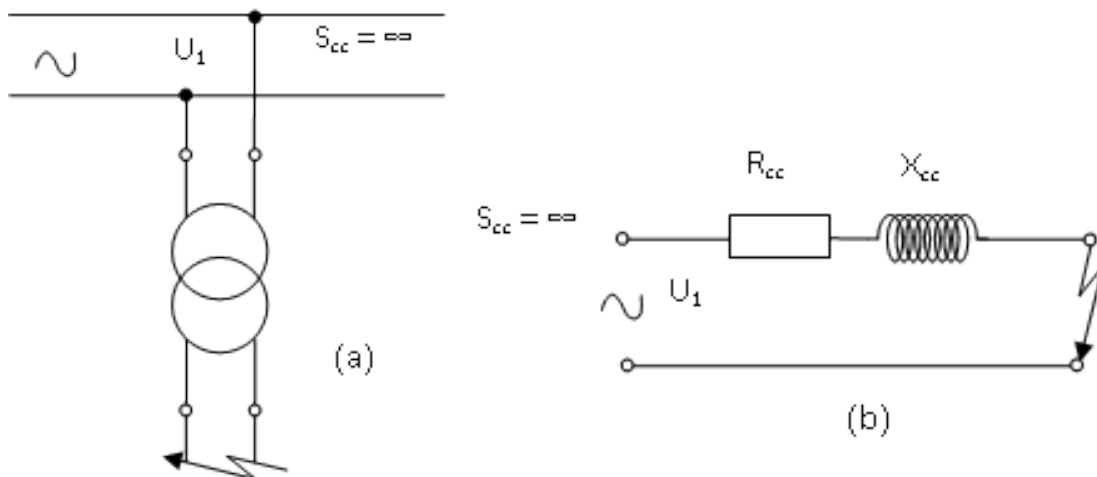


Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

3.9. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO. TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO (II).


RECOMENDACIÓN DE UNESA	
hasta 630 kVA y hasta 24 kV	4%
desde 630 kVA y 36 kV	4'5%
de 800 hasta 2.500 kVA y hasta 36 kV	6%

a) Corrientes de Cortocircuito.



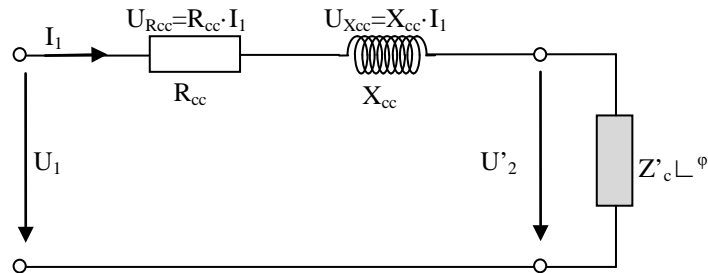
Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

¿Qué distingue el ensayo y el accidente de cc?

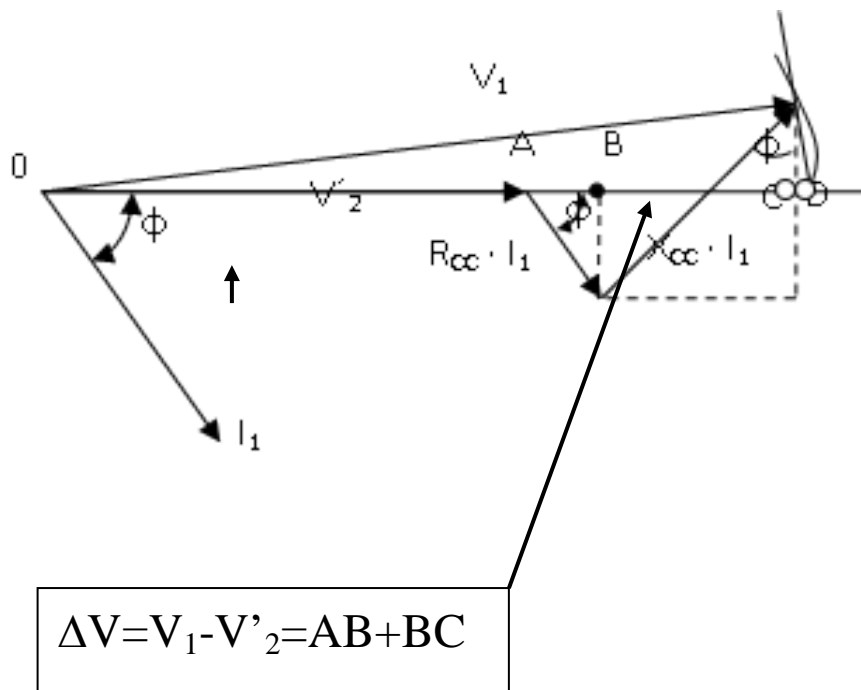
 Tensión aplicada \implies Corriente correspondiente

3.9. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO. TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO (III).

b) Caídas de tensión en el trafo.



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

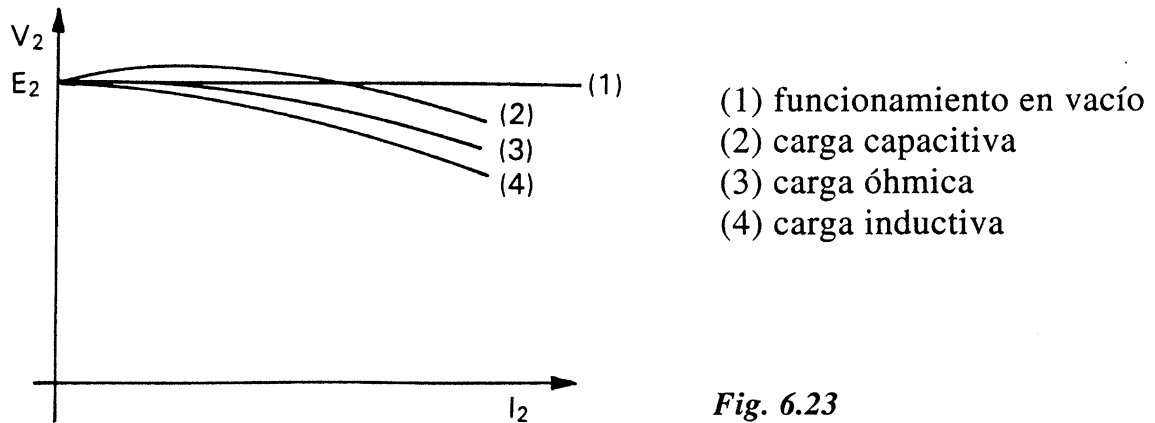


$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_1} = \frac{R_{cc} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi + X_{cc} \cdot I_1 \cdot \sin \varphi}{V_1} \cdot 100$$

$$\varepsilon = u_{Rcc} \cdot \cos \varphi + u_{Xcc} \cdot \sin \varphi$$

3.9. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO. TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO (IV).

¿Afecta la carga conectada al trafo en su valor de ε ?



Fuente: "Electrotecnia", Paraninfo.

S_{nT} (kVA)	Placa de característica
16	Tensión a plena carga y $\cos \varphi=1$
>16	$u_{cc}(\%)$

3.10. PÉRDIDAS Y RENDIMIENTOS DE UN TRANSFORMADOR.

¿Qué pérdidas consideraremos?

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu}}}$$

↓

$\eta = f(c)$

→ c = Índice de carga

- 👉 Recordar
- a) $P_{\text{Fe}} \approx K (P_{\text{Fe}} = P_o)$
 - b) $P_{\text{Cu}} = f(I^2) \rightarrow P_{\text{Cu}} = R_{cc} \cdot I_{2N}^2 \cdot c^2 = c^2 \cdot P_{cc}$

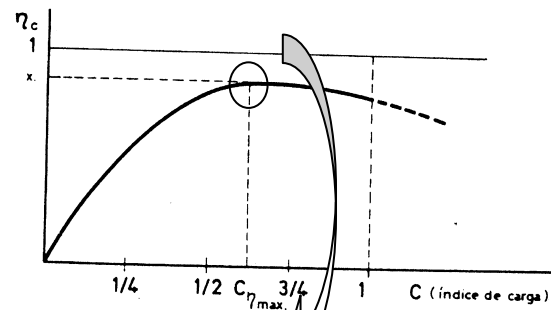
↓

Obtendremos η_c

↓

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_2 + P_o + c^2 \cdot P_{cc}} = \frac{U_2 \cdot c \cdot I_{2N} \cdot \cos\phi_2}{U_2 \cdot c \cdot I_{2N} \cdot \cos\phi_2 + P_o + c^2 \cdot P_{cc}}$$

- Conclusiones
- a) $c = \text{cte}$
 - b) $\cos\phi_2 = \text{cte}$



Fuente: "Electrotecnia", Paraninfo.

$$c = \sqrt{\frac{P_o}{P_{Cu}}}$$

¿ $\eta_{c\text{max}}$?

3.11. TRANSFORMADORES EN PARALELO.

Condiciones básicas

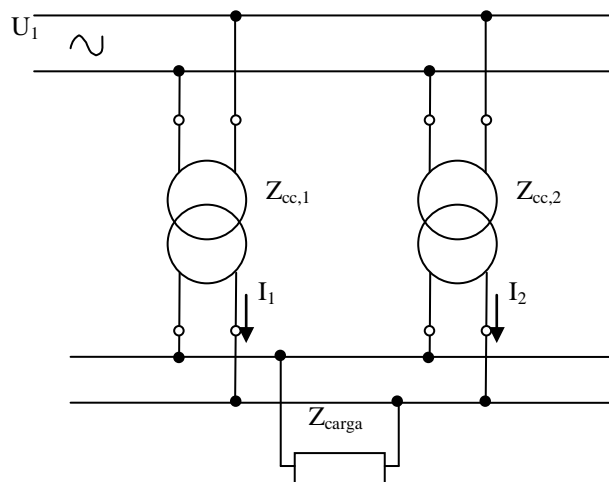
- Igualdad de tensiones nominales.
- Idéntica relación de transformación.
- Igualdad de tensiones de cortocircuito.

$$I_1 \cdot Z_{cc,1} = I_2 \cdot Z_{cc,2}$$

$$\frac{I_1}{I_{1n}} \cdot \frac{Z_{cc,1} \cdot I_{1n}}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{I_2}{I_{2n}} \cdot \frac{Z_{cc,2} \cdot I_{2n}}{U_{1n}} \cdot 100$$

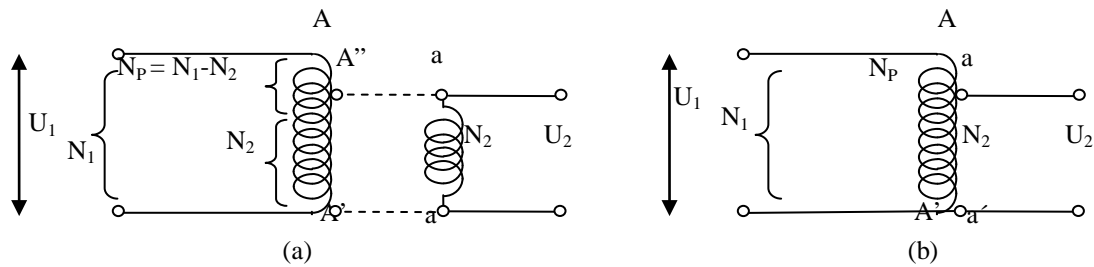
$$C_1 \cdot \mathcal{E}_{cc,1} = C_2 \cdot \mathcal{E}_{cc,2}$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\mathcal{E}_{cc,1}}{\mathcal{E}_{cc,2}}$$



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

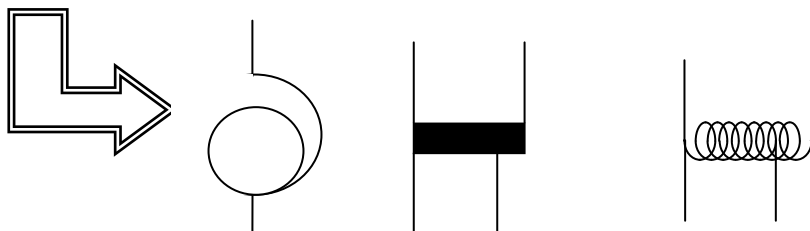
3.12. AUTOTRANSFORMADOR.



Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

- Ventajas
- a) sección ↓
 - b) Se elimina un devanado
 - b.1) Circuito magnético ↓
 - b.2) Flujo de dispersión ↓
 - c) I_o ↓
- Inconvenientes
- a) ¿ _____ ?
 - b) No hay aislamiento eléctrico $-U_2 \geq 0,75 \cdot U_1$
 - c) Dificultad para trabajar en paralelo

Símbolos según la CEI:



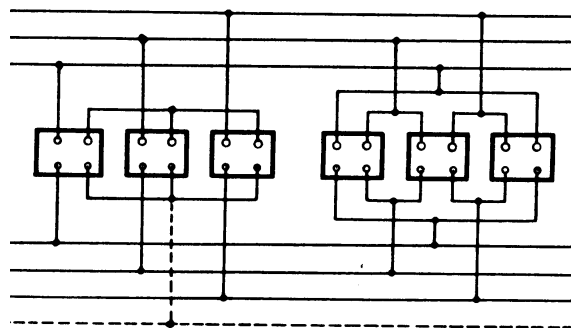
Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo

3.13. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO: INTRODUCCIÓN.

Dos tipos constructivos $\left(\begin{array}{l} \text{Trafo monofásicos} \\ \text{Un solo núcleo} \end{array} \right.$

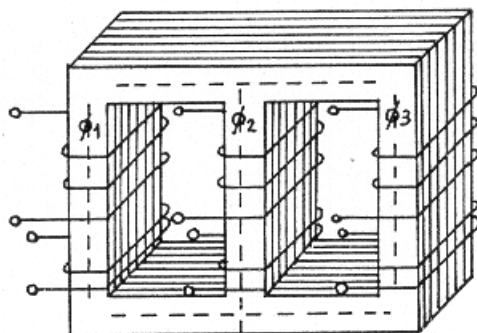
3.14. BANCO TRIFÁSICO A BASE DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

Conexiones $\left\{ \begin{array}{l} \text{Estrella} \\ \text{Triángulo} \end{array} \right. \rightarrow \text{Relaciones de transformación}$

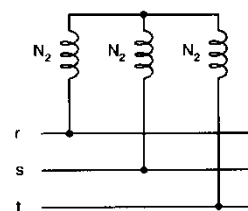
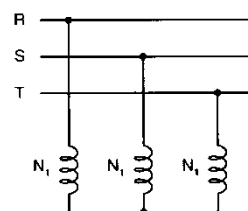


Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

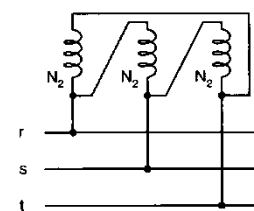
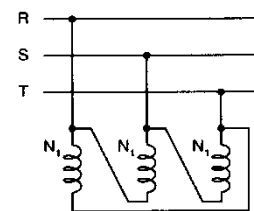
3.15. TRANSFORMADOR DE 3 COLUMNAS (UN SOLO NÚCLEO).



Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo



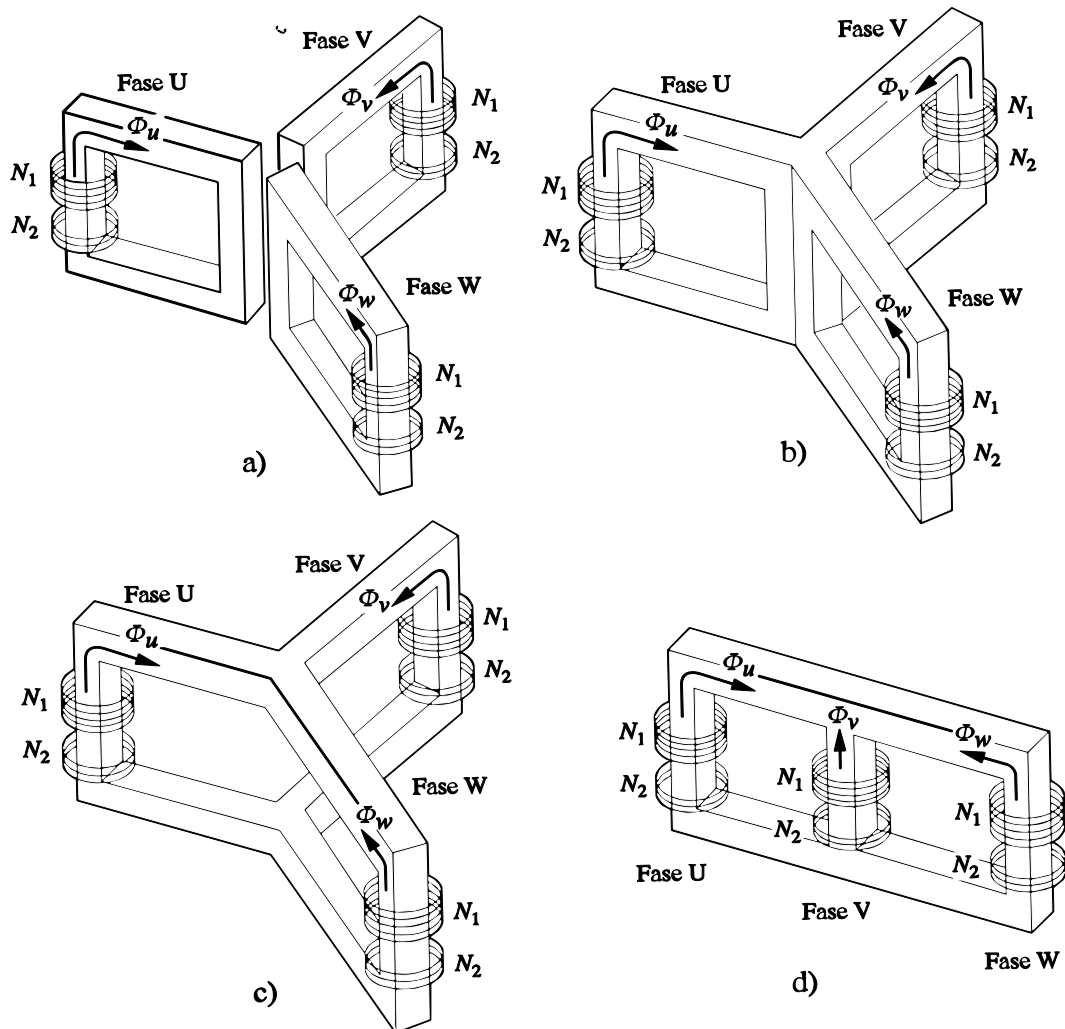
ESTRELLA-ESTRELLA



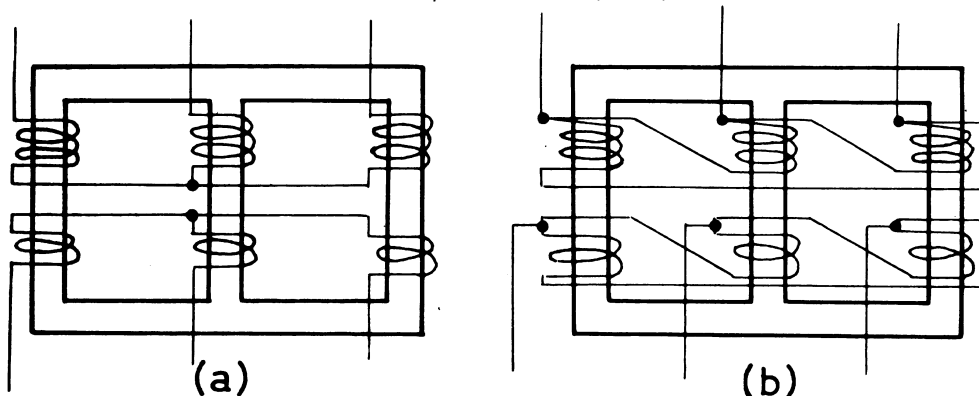
TRIANGULO-TRIANGULO

3.15. TRANSFORMADOR DE 3 COLUMNAS (UN SOLO NÚCLEO) (II).

-Constitución del núcleo trifásico.



Fuente: "Máquinas Eléctricas", Fraile, J.



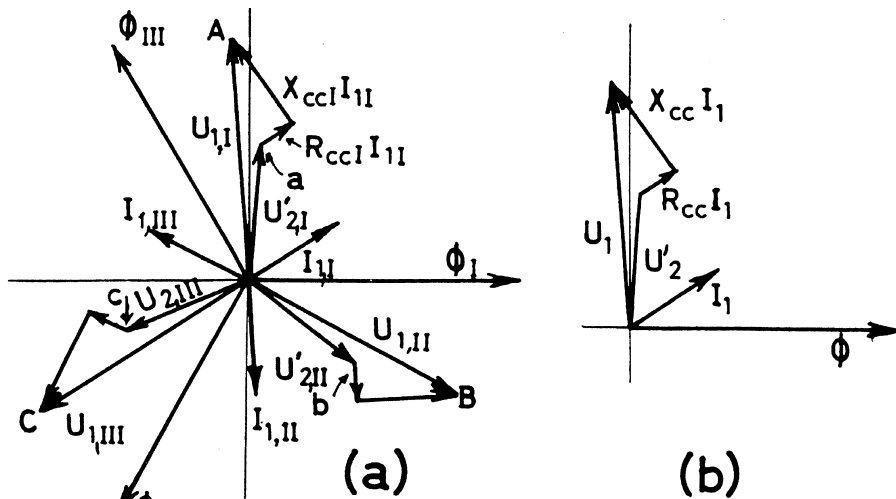
Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

Trafo de 3 columnas ↔ Banco de trafo monofásico

Ventajas e inconvenientes

3.16. FUNCIONAMIENTO EN RÉGIMEN EQUILIBRADO. ENSAYOS Y ESQUEMA EQUIVALENTE.

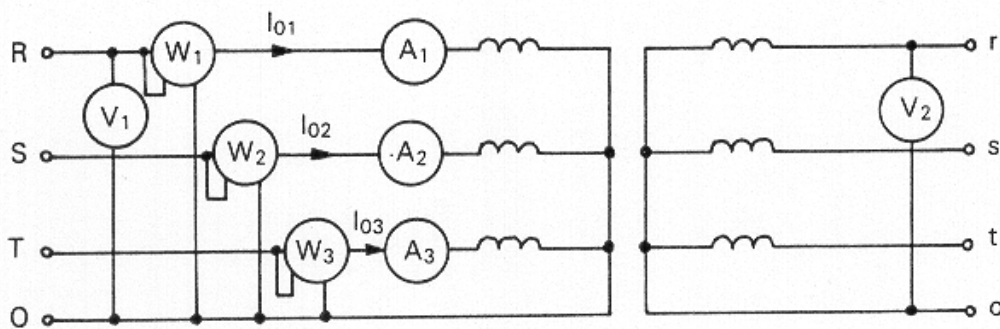
Se trabaja con tensiones simples



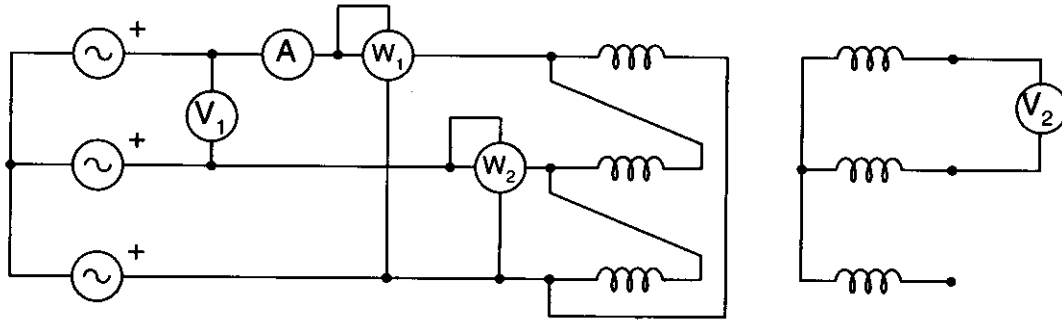
Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

Se puede tener en cuenta la conexión del transformador o no

Ensayo de vacío.

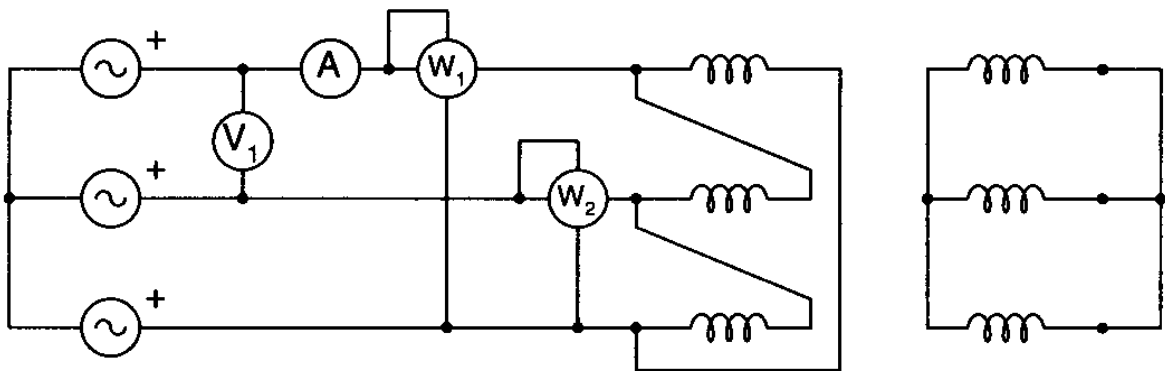
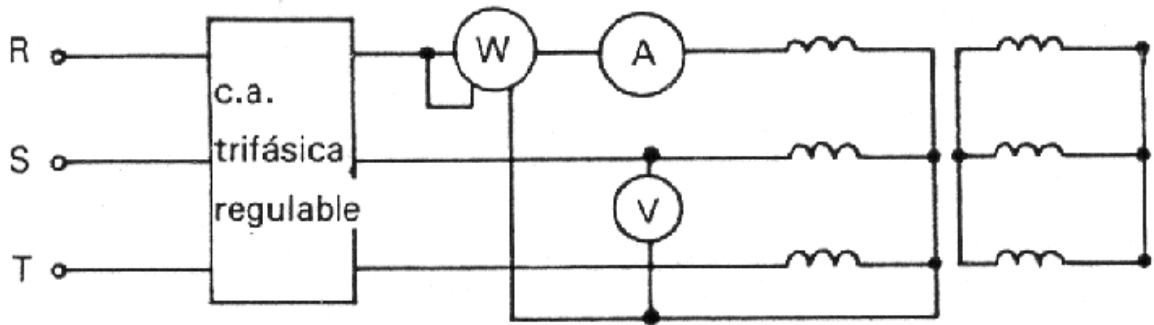


Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas", Marcombo



Fuente: "Electrotecnia", Paraninfo.

Ensayo de cortocircuito.



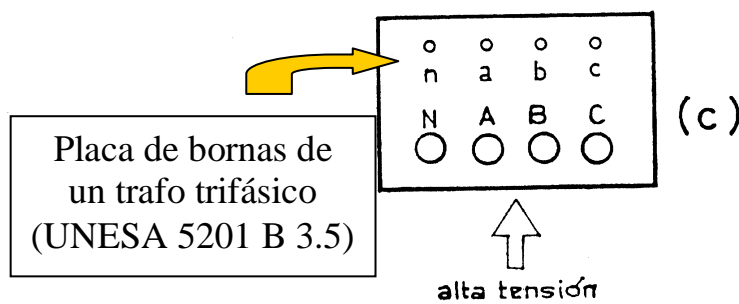
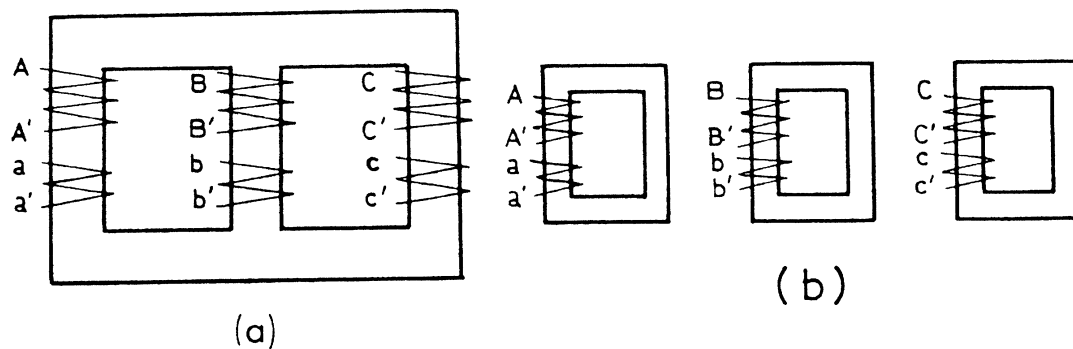
Fuente: "Electrotecnia", Paraninfo.

Esquema equivalente.

3.17. CONEXIONES EN LOS TRANSFORMADORES. TRIFÁSICOS.

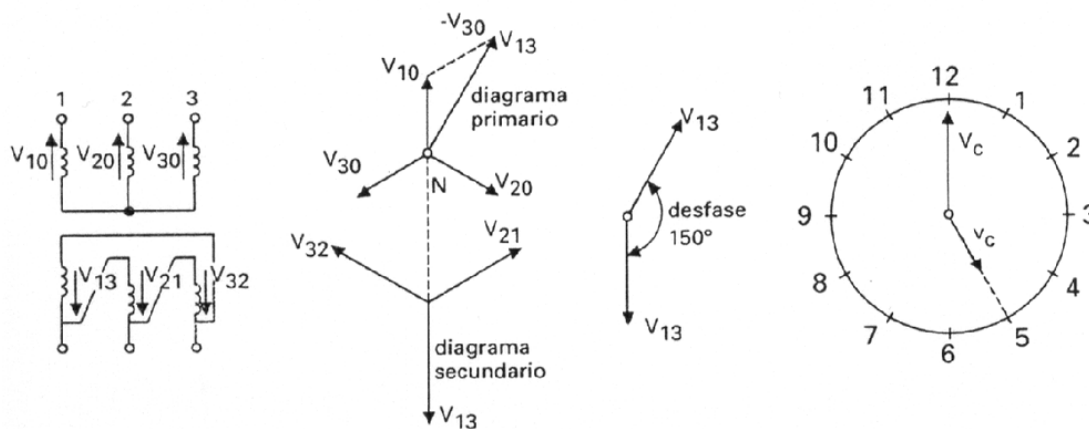
-Desfases

-Designaciones de polos y bornes



Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

-Índice de desfase (índice horario).



Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

-Símbolos de conexiones (CEI 76 transformadores de potencia).

-Aplicaciones de cada tipo de conexión.

3.17. CONEXIONES EN LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS (II).

-Diferentes tipos de conexiones.

GRUPOS DE CONEXIONES USUALES SEGÚN VDE 0532/11.71¹

Índice de desfase (horario)	SIMBOLO DE ACOPLAMIENTO O DE CONEXIONES	Esquema vectorial		Esquema de conexiones	Relación de transformación (2)
		mayor tensión	menor tensión		
0 (0°)	D d 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	(3) Y y 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 0				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	(3) D y 5				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 5				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 5				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
6 (180°)	D d 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Y y 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 6				$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
11 (330°) (-30°)	D y 11				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 11				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 11				$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$

Fuente: "Transformadores de Potencia, de medida y de protección", Marcombo

3.18. CATÁLOGO DE TRANSFORMADORES.

características eléctricas para el material hasta 24 kV de aislamiento

Potencia asignada (kVA)	25	50	100	160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	
tensión primaria asignada	de 6 kV hasta límite máximo de 24 kV incluida regulación													
tensión secundaria: B1	231 ó 242 V													
B2	400 ó 420 V													
regulación sin tensión	(±2.5%, ±5%), (±2.5%, + 5%, + 7.5%)													
grupo de conexión Yzn11	■	■	■											
Dyn11				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
pérdidas en vacío (W)	115	190	320	460	650	930	1300	1550	1700	2130	2600	3100	3800	
por carga a 75°C	700	1100	1750	2350	3250	4600	6500	8100	10500	13500	17000	20200	26500	
tensión de cortocircuito (%)	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	
corriente en vacío 100% Un	4.0	3.5	2.5	2.3	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	
110% Un	8.5	7.5	6.0	5.5	5.0	4.8	4.5	4.0	3.6	3.0	2.5	2.4	2.3	
caída de tensión a plena carga $\cos\phi = 1$	2.85	2.26	1.81	1.54	1.37	1.22	1.1	1.18	1.22	1.25	1.23	1.18	1.23	
$\cos\phi = 0.8$	3.96	3.77	3.58	3.43	3.33	3.25	3.18	4.44	4.47	4.49	4.48	4.44	4.48	
Rendimiento	carga 100% $\cos\phi = 1$	96.84	97.48	97.97	98.27	98.46	98.64	98.78	98.81	98.79	98.77	98.79	98.84	98.80
	$\cos\phi = 0.8$	96.08	96.88	97.48	97.85	98.09	98.30	98.47	98.52	98.50	98.46	98.50	98.56	98.51
	carga 75% $\cos\phi = 1$	97.36	97.89	98.29	98.53	98.70	98.84	98.96	99.00	99.00	98.97	99.00	99.04	99.01
	$\cos\phi = 0.8$	96.72	97.37	97.87	98.17	98.37	98.56	98.70	98.75	98.75	98.72	98.76	98.80	98.77
	carga 50% $\cos\phi = 1$	97.73	98.17	98.51	98.70	98.84	98.98	99.07	99.12	99.14	99.13	99.16	99.18	99.18
	$\cos\phi = 0.8$	97.18	97.73	98.14	98.38	98.56	98.72	98.84	98.91	98.93	98.91	98.95	98.98	98.97
	carga 25% $\cos\phi = 1$	97.52	97.97	98.31	98.51	98.65	98.80	98.93	98.98	99.07	99.06	99.09	99.14	99.13
	$\cos\phi = 0.8$	96.92	97.48	97.90	98.14	98.32	98.50	98.66	98.73	98.84	98.82	98.87	98.92	98.92
ruido potencia acústica Lwa dB(A)	52	49	53	59	62	65	67	68	68	70	71	73	75	

Fuente: Schneider Electric, SA

Bibliografía

F.A. Ruz, F.J. Cánovas y J.M. Molina,, FUNDAMENTOS DE ELECTROTECNIA PARA INGENIEROS: MÁQUINAS ELÉCTRICAS, Marcombo SA

Capítulo 15 y 16. Transformador monofásico y trifásico

Jesús Fraile Mora, MÁQUINAS ELÉCTRICAS (6ª edición), ISBN: 978-84-481-6112-5

Capítulo 3. Transformadores. Página 181.

Con el fin, de que los aspectos teóricos de tema queden más claro, querría destacar los siguientes apartados de este capítulo, el:

-3.3. Principio de funcionamiento de un trafo ideal (pág. 193).

-3.4 y 3.5, sigue profundizando en su funcionamiento y circuito equivalente.

-3.6. Ensayos (pág. 207). Entra en detalle en la teoría que nos define los ensayos de vacío y cortocircuito.

-3.7. Caída de tensión en un trafo (pág. 218), y por último,

-3.8. Pérdidas y rendimiento de un transformador (pág. 224).

Cabe destacar alguno de los ejemplos de aplicación que se anexa a cada uno de los apartados teóricos, para aclarar estos contenidos.

En el apartado 3.13, se definen que son los autotransformadores.

Al final de dicho capítulo, hay una serie de enunciado de problemas, con solución que puede ayudar a seguir el tema. Recuerdo que nosotros tratamos en este tema los transformadores monofásicos.

José García Trasancos, ELECTROTECNIA (6ª edición), ISBN: 84-283-2284-8

Capítulo 6. Transformadores. Página 141.

Para darte una visión muy rápida del tema de transformadores, leería hasta la página 154, están resueltos algunos de los problemas del listado.

Enrique Ras, TRANSFORMADORES DE POTENCIA, DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN, ISBN: 84-267-0690-8.

Este libro es ideal para profundizar en los transformadores, pero tal vez, se llegue a un nivel en muchos aspectos que no es requerido a lo largo de este curso.

Enríquez Harper, Curso de TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCIÓN, Limusa Noriega Editores