

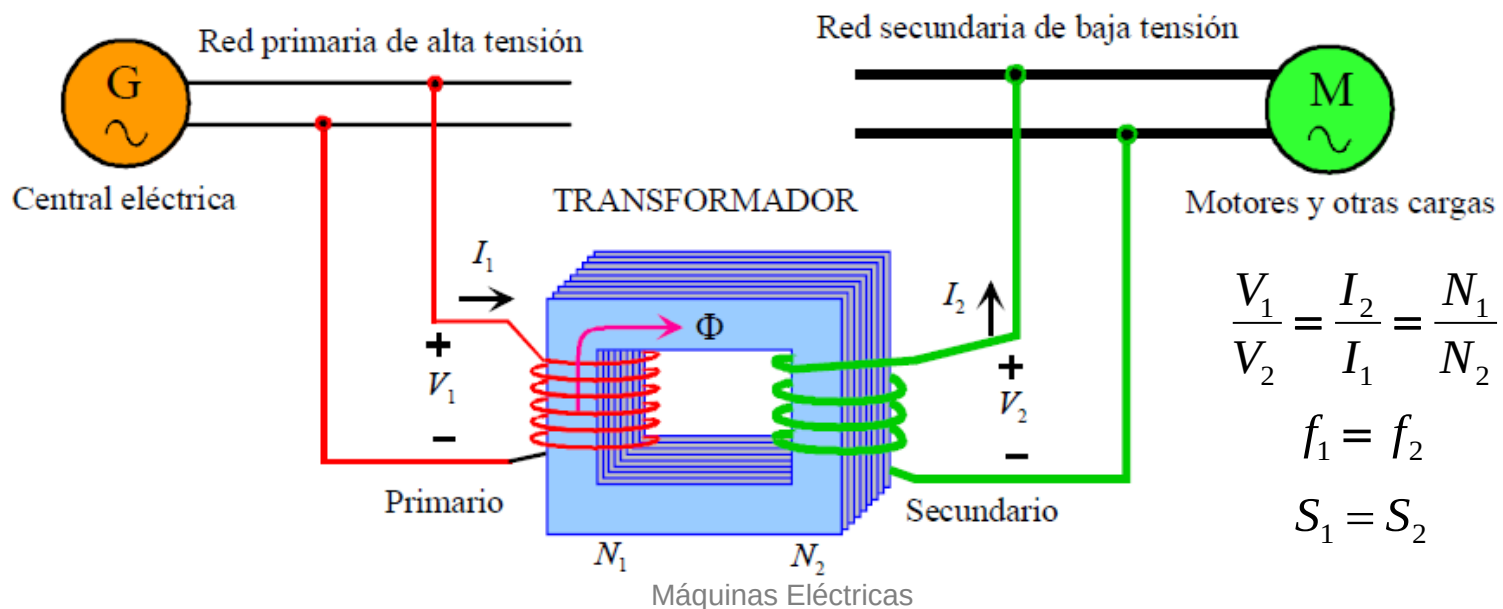
Tema 2. Transformadores

Índice

- 01 Máquinas eléctricas estáticas
- 02 Transformador ideal y real
- 03 Circuitos equivalentes
- 04 Corriente de vacío y de conexión
- 05 Transformadores trifásicos
- 06 Tipos de conexiones
- 07 Otros transformadores

Máquinas eléctricas estáticas

- Un **transformador** es una máquina estática en la que se conecta una fuente de **CA** de frecuencia f_1 a un devanado inductor (primario) y entrega energía eléctrica de CA de frecuencia f_2 a un circuito conectado al inducido (secundario)
- La **potencia** de primario y secundario son **iguales**



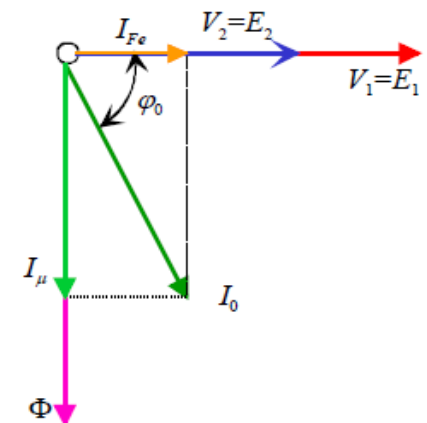
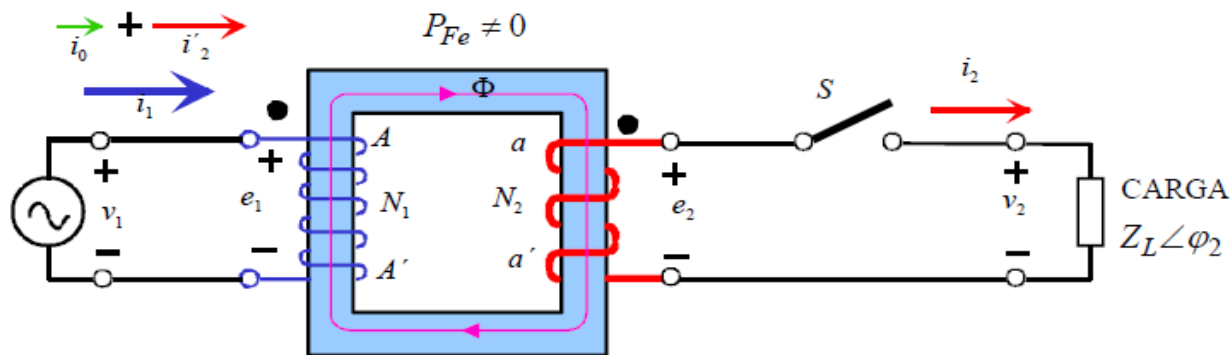
Transformador ideal

- Transformador con pérdidas en el hierro P_{Fe} y devanados ideales. Sin dispersión.

$$e_1 = v_1 = N_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} = N_1 \frac{\partial [\phi_p \sin(\omega t)]}{\partial t} \quad V_1 = 4,44 f N_1 \phi_p \quad \longrightarrow \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$e_2 = v_2 = N_2 \frac{\partial \phi}{\partial t} = N_2 \frac{\partial [\phi_p \sin(\omega t)]}{\partial t} \quad V_2 = 4,44 f N_2 \phi_p$$

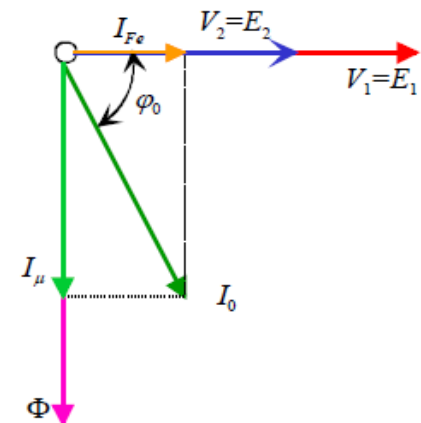
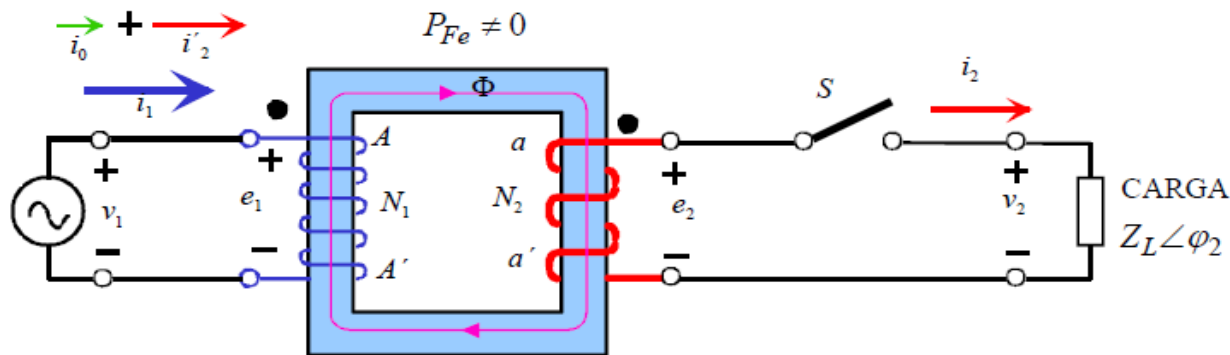
$$P_1 = V_1 \cdot I_1 = P_2 = V_2 \cdot I_2 \quad \longrightarrow \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$



Transformador ideal con carga

- Se cierra S. Aparece una f.m.m. que tiende a desmagnetizar el núcleo.
- Terminales correspondientes.

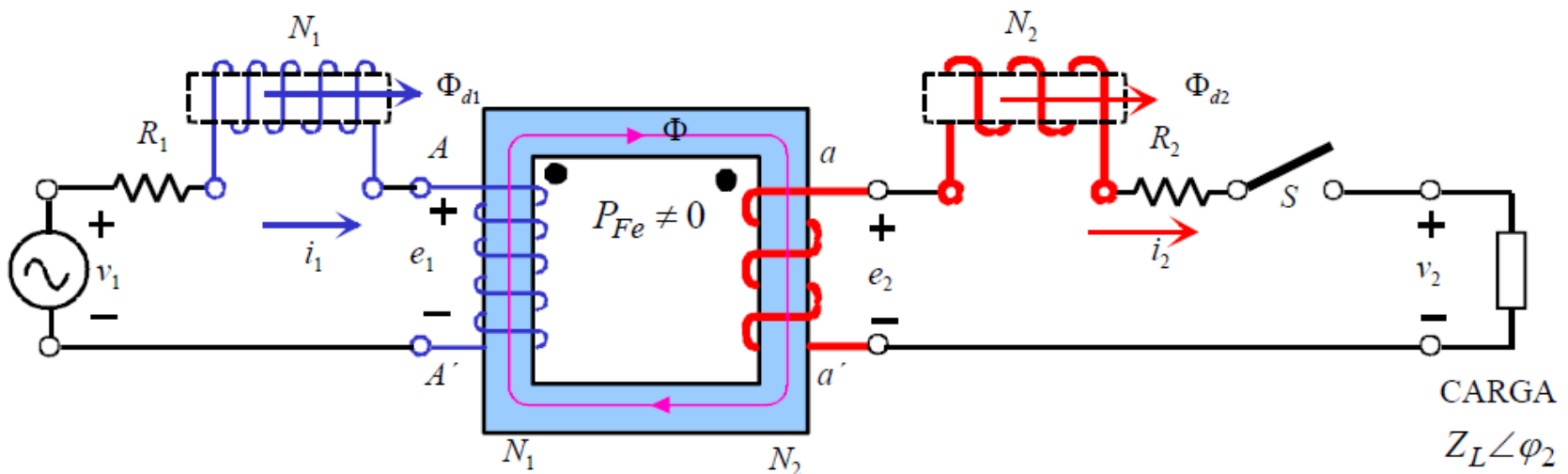
$$\mathcal{F}_2 = \frac{\mathcal{F}_2}{\mathcal{Z}_L} = \frac{E_2}{Z_L} \angle \varphi_2 \quad \Rightarrow \quad N_1 \cdot i_2' = N_2 \cdot i_2 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} i_1 = i_0 + i_2' = i_0 + i_2 \frac{N_2}{N_1} \\ \mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_0 + \mathcal{F}_2' = \mathcal{F}_0 + \mathcal{F}_2 \frac{N_2}{N_1} \end{array} \right.$$



Transformador real

- Transformador con pérdidas en el hierro P_{Fe} , flujo de dispersión y resistencia en los devanados

$$\begin{aligned}
 v_1 &= e_1 + R_1 i_1 + L_{d1} \frac{\partial i_1}{\partial t} \\
 v_2 &= e_2 + R_2 i_2 + L_{d2} \frac{\partial i_2}{\partial t}
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \begin{aligned}
 V_1 &\approx E_1 \\
 V_2 &\approx E_2
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



Circuito equivalente exacto

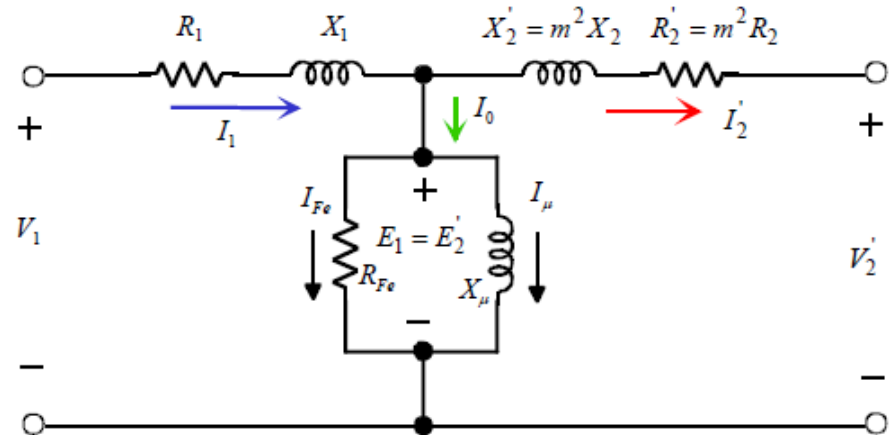
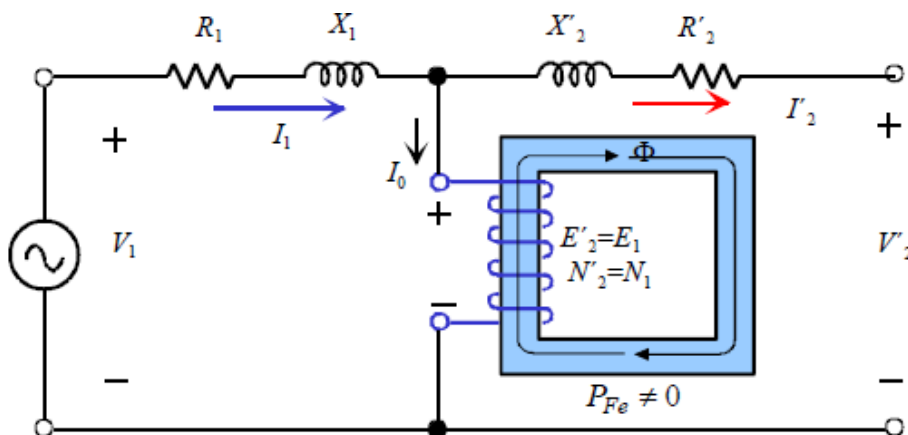
- Circuito equivalente **del trafo** exacto reducido al primario

$$\begin{aligned}
 N'_2 &= N_1 \\
 E'_2 &= E_1 \\
 \frac{E_1}{E_2} &= \frac{N_1}{N_2}
 \end{aligned}
 \longrightarrow
 \begin{cases}
 E'_2 = E_1 = \frac{N_1}{N_2} E_2 \\
 V'_2 = \frac{N_1}{N_2} V_2
 \end{cases}$$

$$S_2 = V_2 \cdot I_2 = V'_2 \cdot I'_2 \longrightarrow I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

$$R_2 \cdot I_2^2 = R'_2 \cdot I'^2_2 \longrightarrow R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

$$X_2 \cdot I_2^2 = X'_2 \cdot I'^2_2 \longrightarrow X'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 X_2$$

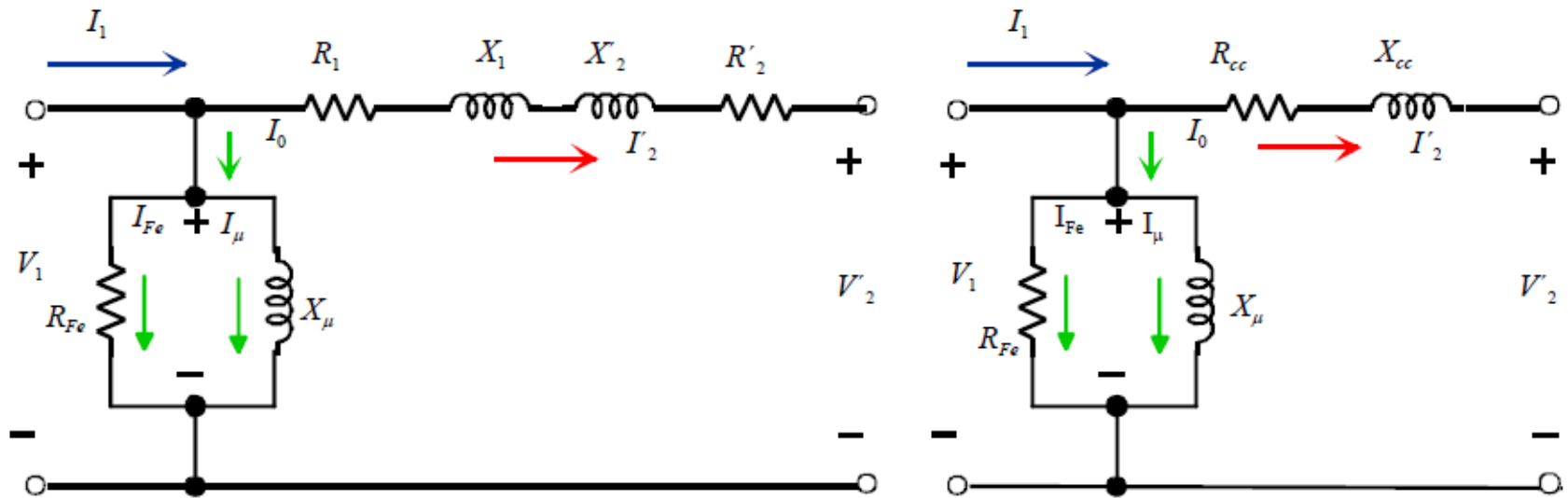


Circuito equivalente aproximado

- Circuito equivalente aproximado reducido al primario.
Errores aceptables y mayor simplicidad de cálculo

$$R_{cc} = R_1 + R_2'$$

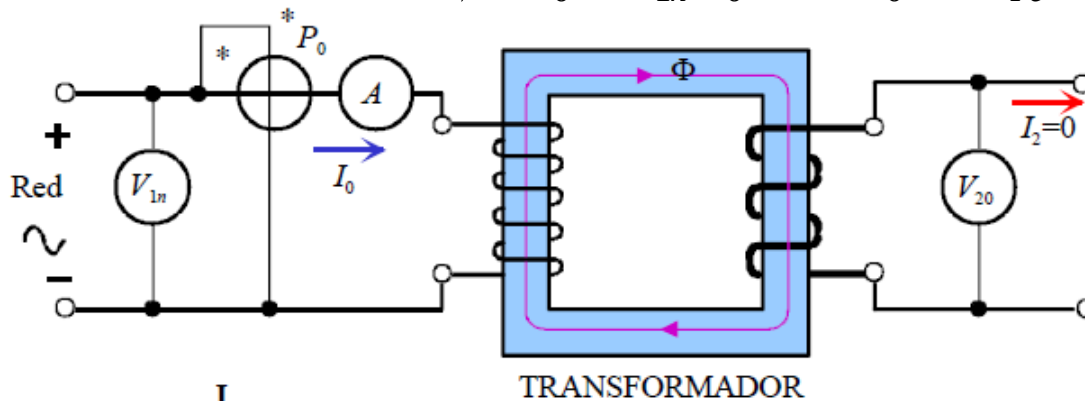
$$X_{cc} = X_1 + X_2'$$



Ensayo de vacío

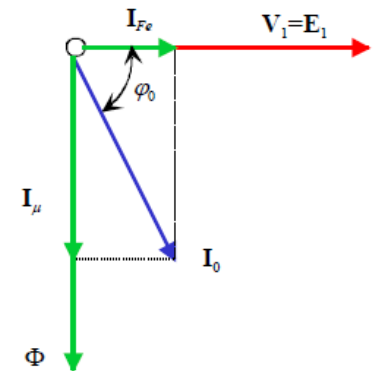
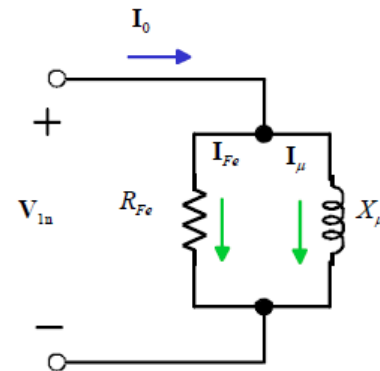
- La potencia absorbida en vacío coincide aprox. con las pérdidas en el hierro o núcleo.

$$R_1 \cdot I_0^2 \approx 0 \quad \Rightarrow \quad P_0 = V_{1n} \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi_0) = P_{Fe}$$



$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos(\varphi_0) \quad \Rightarrow \quad R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}}$$

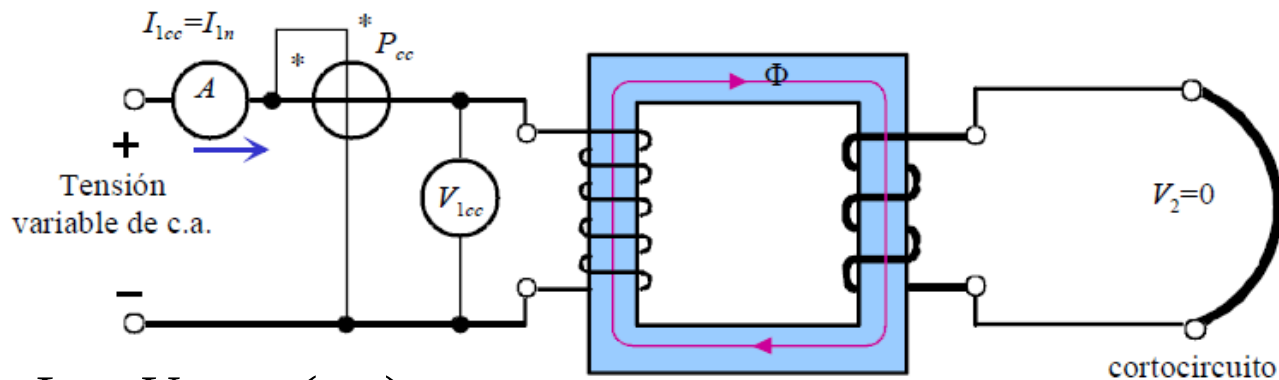
$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin(\varphi_0) \quad \Rightarrow \quad X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}}$$



Ensayo de cortocircuito

- La potencia absorbida en cortocircuito coincide aprox. con las pérdidas en el cobre (devanados)

$$I_{cc} = I_{1n} \gg I_0 \quad \Rightarrow \quad P_{cc} = V_{1cc} \cdot I_{1n} \cdot \cos(\varphi_{cc})$$



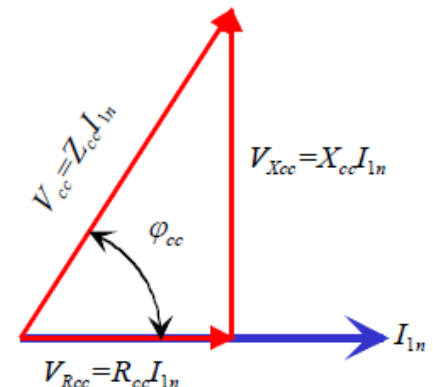
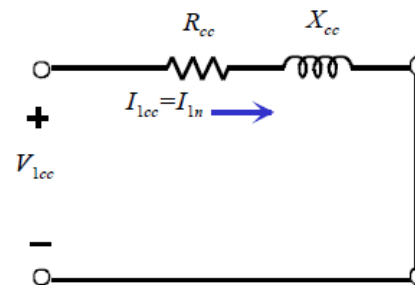
$$V_{Rcc} = R_{cc} \cdot I_{1n} = V_{1cc} \cos(\varphi_{cc})$$

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

$$V_{Xcc} = X_{cc} \cdot I_{1n} = V_{1cc} \sin(\varphi_{cc})$$

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

TRANSFORMADOR



Caída interna de tensión

- Caída relativa de tensión

$$\varepsilon_{cc} = \frac{I_{1n} Z_{cc}}{V_{1n}} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{I_{1n} R_{cc}}{V_{1n}} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_{Xcc} = \frac{I_{1n} X_{cc}}{V_{1n}} \cdot 100\%$$

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS SERIE 24kV
(SEGÚN NORMAS UNE 20.101 y CEI 76)

Potencia kVA	50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
Grupo de conexión	Yyn 0	Yyn 0	Yyn 0	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11
P ₀ (kW)	0,24	0,33	0,40	0,48	0,58	0,69	0,82	0,98	1,17	1,38	1,64	1,96	2,15
P _{cc} (kW)	1,39	1,87	2,20	2,53	2,97	3,49	4,10	4,86	5,80	6,89	8,22	10,24	13,3
ε _{cc} (%)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6
I ₀ en % I _{1n}	4,7	4,1	3,3	3	2,7	2,4	2,2	2,1	2	2	1,9	1,8	1,6
Long. (m)	0,8	0,9	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,7	1,9	2,0
Anch. (m)	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,2	1,3	1,3
Altura (m)	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,9
Peso (kg)	385	481	570	655	731	834	976	1100	1422	1640	1930	2267	2645

Caída interna de tensión

- Es la diferencia aritmética entre la tensión de salida de un transformador en vacío y en carga debido a la impedancia interna
- Se llama **regulación** a la caída de tensión interna expresada en % respecto de la tensión del secundario en vacío

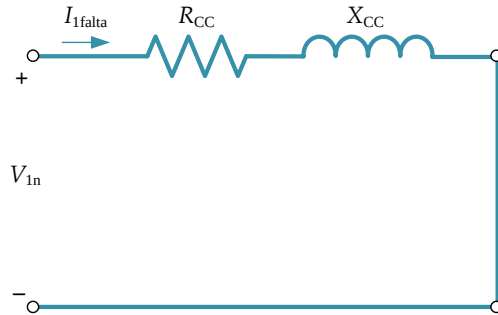
$$\varepsilon_c = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \cdot 100\% \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_c = \frac{V_{1n} - V_2'}{V_{1n}} \cdot 100\% \quad \approx \quad \varepsilon_c = C\varepsilon_{Rcc} \cos(\varphi_2) + C\varepsilon_{Xcc} \sin(\varphi_2)$$

φ_2 es el argumento entre V_2' e I_2'

- Si la carga tiene un f.d.p. capacitivo, pueden aparecer tensiones en la carga mayores que la tensión de vacío.
Efecto Ferranti

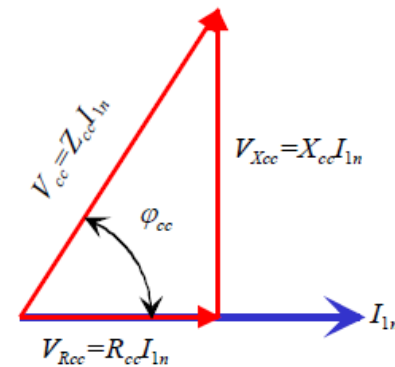
Falta o fallo de cortocircuito

- Cortocircuito a la salida en funcionamiento normal. Tensión nominal a la entrada.



$$I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{Z_{cc}}$$

$$I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{V_{1cc}} I_{1n} = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} I_{1n}$$



Pérdidas y rendimiento

- Pérdidas eléctricas en los devanados. Pérdidas en el Cu P_{Cu} por efecto Joule. Ensayo de cortocircuito

$$P_{Cu} = R_{cc} I_{2n}'^2$$

- Pérdidas en el hierro P_{Fe} . Histéresis y Foucault. Ensayo de vacío

$$P_{Fe} = P_0$$

- Pérdidas **fijas** P_{Fe} y **variables** P_{cu}
- Rendimiento **!!! Sólo de la potencia activa!!!!**

$$\eta = \frac{P_2}{P_{Total}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{pérdidas}} \quad \longrightarrow \quad \eta = \frac{V_2 \cdot I_{2n} \cos \varphi}{V_2 \cdot I_{2n} \cos \varphi + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

Pérdidas y rendimiento

- Índice de carga

$$C = \frac{S_2}{S_{2N}} = \frac{V_{2n} I_2}{V_{2n} I_{2n}} = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I_2'}{I_{2n}'} \quad \longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} P_{Cu} = R_{cc} I_{2n}'^2 = P_{cc} \\ \text{Para una corriente distinta de } I_{2n} \\ P_{Cu} = R_{cc} I_2'^2 = C^2 P_{cc} \end{array} \right.$$

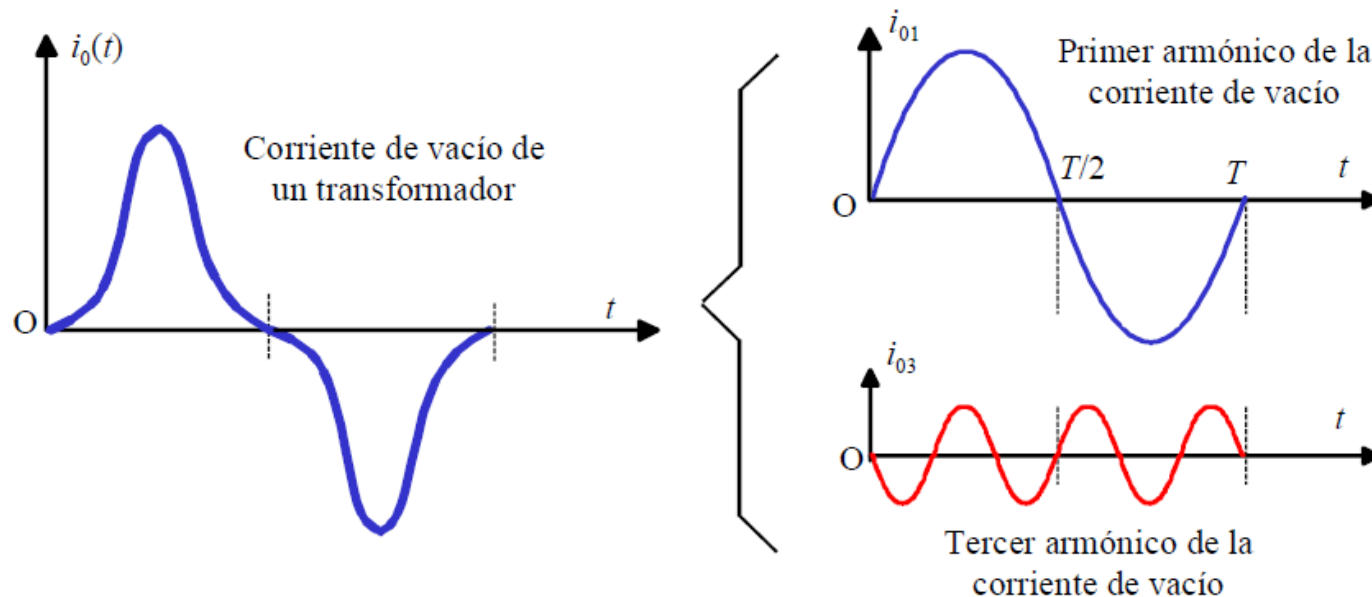
el rendimiento en función del índice de carga

$$\eta = \frac{C \cdot V_2 \cdot I_{2n} \cos \varphi}{C \cdot V_2 \cdot I_{2n} \cos \varphi + P_{Fe} + C^2 \cdot P_{cc}} \quad \longrightarrow \quad \eta_{\max} \Rightarrow P_{Fe} = P_{Cu} = C^2 \cdot P_{cc}$$

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{\text{Pérdidas fijas}}{\text{Pérdidas variables nominales}}} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{Cu}}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$$

Corriente de vacío

- Corriente de excitación de una bobina con núcleo magnético.
- Existen armónicos 3º, 5º y 7º principalmente.
- La corriente de vacío es del 5% al 8% de la corriente asignada, en régimen permanente.

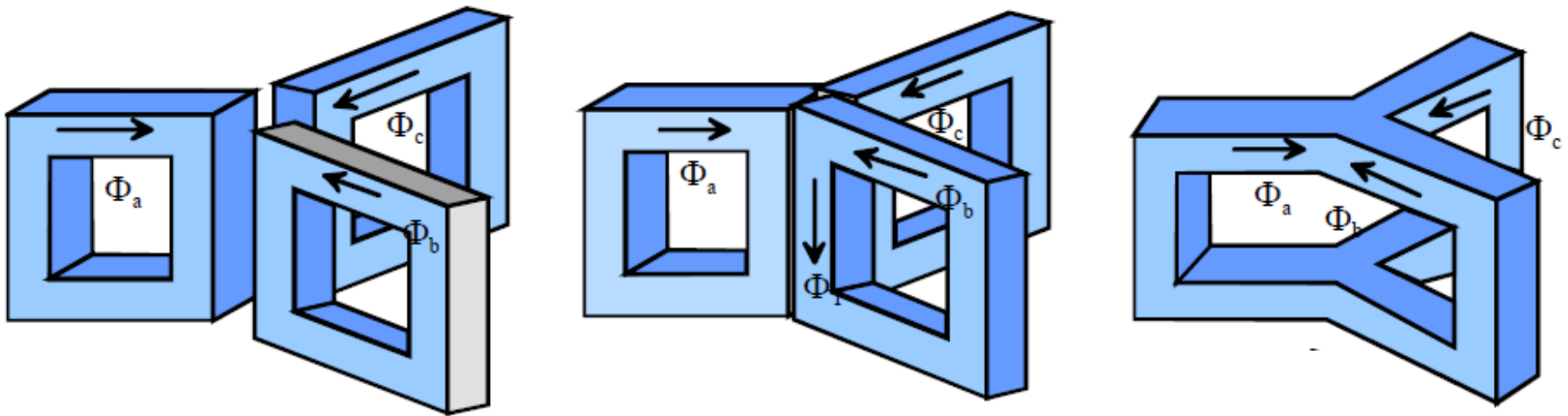


Corriente de conexión

- El transitorio de conexión depende del instante de conexión y puede ser que el flujo de conexión sea directamente el de régimen permanente o que llegue a ser de hasta 2,5 veces el flujo de régimen permanente. Esto, debido a la curva de imanación produce corrientes de 5 a 8 veces la corriente asignada.
- Produce fuerzas electrodinámicas en los conductores de 5^2 a 8^2 veces las nominales.
- Las protecciones deben soportar estos transitorios sin desconectar.

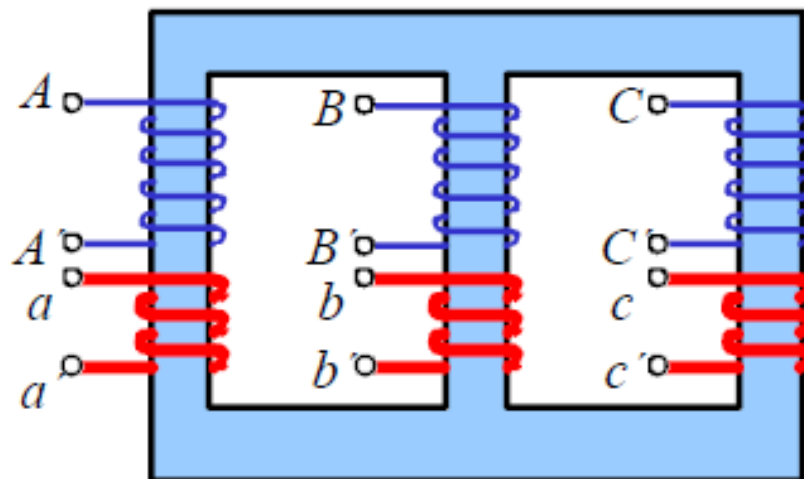
Transformadores trifásicos

- Se pueden emplear tres transformadores monofásicos. Antieconómico.
- Se puede reducir a un transformador de 3 columnas.



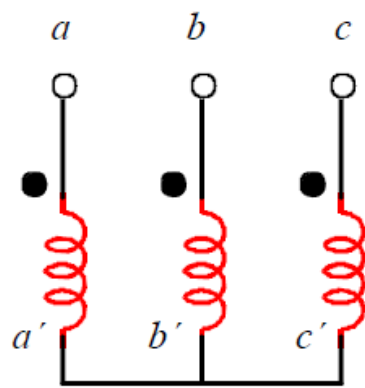
Transformadores trifásicos

- La columna central tiene menos reluctancia. Las corrientes de vacío será distintas en cada rama.
- Esta asimetría será despreciable en carga.
- Se considerará cada columna como un transformador monofásico. Magnitudes y relación de transformación en valores de fase para cada fase.

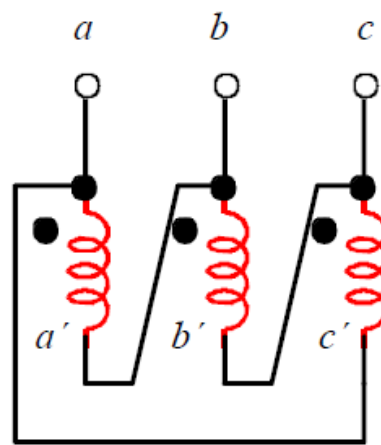


Tipos de conexiones

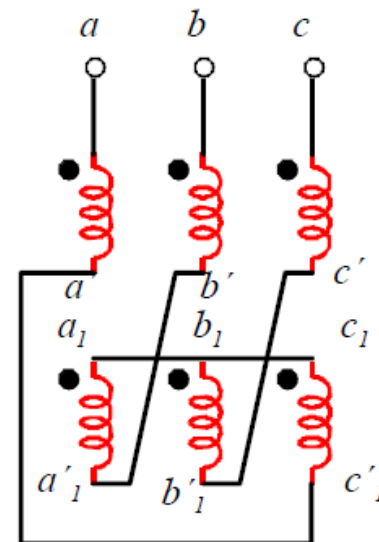
- Se conectan en estrella (con hilo de neutro o no) en triángulo y en zig-zag
- Designación habitual de terminales, mayúsculas para el lado de A.T. y minúsculas para el lado de B.T. (ABC, RST, UVW) y de conexiones Yy , Dd , Zz



a) Estrella



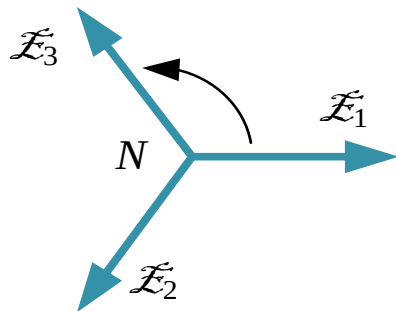
b) Triángulo



c) Zig-zag

Tipos de conexiones

- En función de la conexión habrá desfases entre las tensiones de línea de primario y secundario.
- **Índice horario.** Método de representación gráfica de este desfase expresado en múltiplos de 30° .
- Ángulos positivos son los de retraso del lado de menor tensión (B.T.) respecto del de mayor tensión (A.T.)



$$\mathcal{E}_1 = E \angle 0^\circ$$

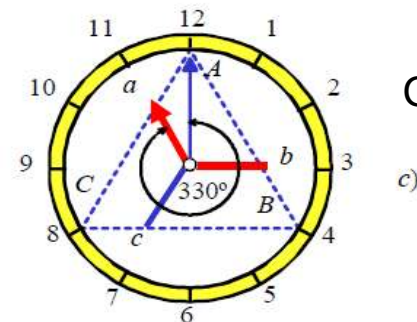
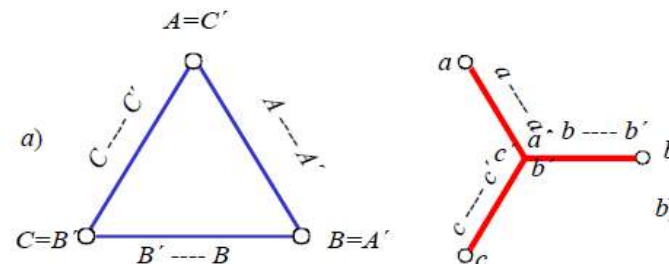
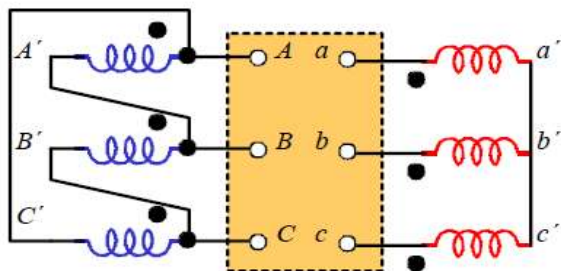
$$\mathcal{E}_2 = E \angle -120^\circ$$

$$\mathcal{E}_3 = E \angle +120^\circ$$

Aplicando el convenio de índice horario $\mathcal{E}_2$ tendría un índice 4 ($30^\circ \cdot 4 = 120^\circ$) respecto de $\mathcal{E}_1$, y $\mathcal{E}_3$ un índice 8 ($30^\circ \cdot 8 = 240^\circ$)

Tipos de conexiones

- Proceso de determinación de la conexión. Tipos preferidos
 - ✓ Se representan las tensiones (f.e.m.) de fase del devanado primario. Si está en triángulo o zig-zag, se representa su estrella equivalente equilibrada
 - ✓ Se representan las tensiones (f.e.m.) de fase del devanado secundario. Los devanados en la misma columna producen tensiones en fase.
 - ✓ Se superponen los diagramas. El ángulo horario es el que forman los dos vectores A-centro y a-centro.



Conexión Dy11

Conexiones de transformadores trifásicos

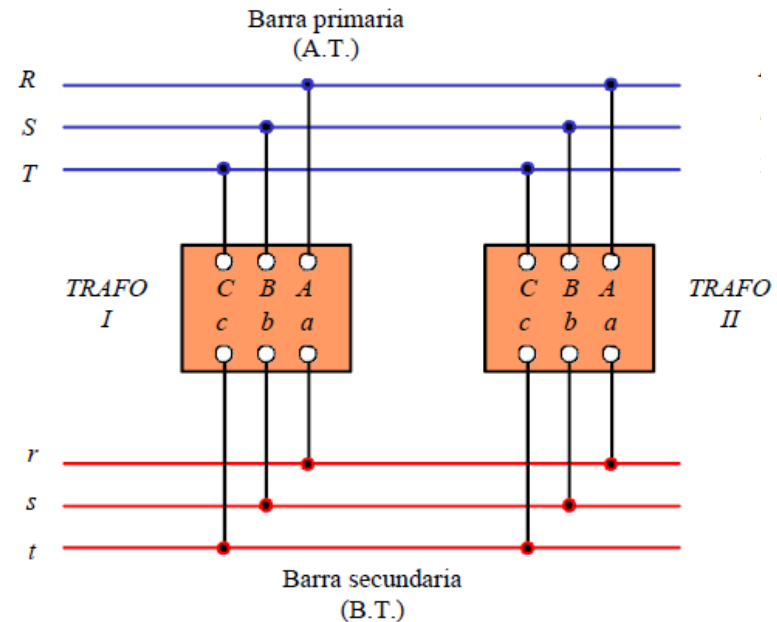
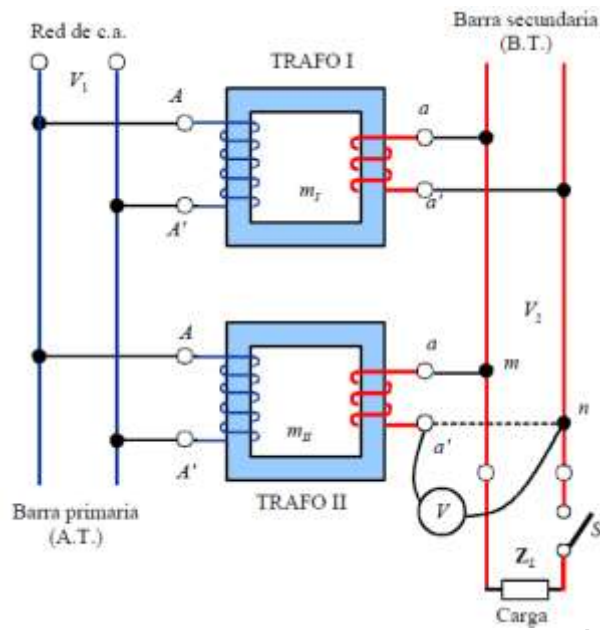
- Conexión Yy . Menos tensión y más corriente por los devanados que en D . Más rigidez mecánica. Bueno para A.T. Desequilibrio de tensiones con carga desequilibrada. Terceros armónicos de tensión.
- Conexión Yd . No tiene **armónicos de tensión** y trabaja bien con cargas desequilibradas. Las tensiones del secundario están desfasadas 30° de las del primario. *Trafos* de A.T. reductores al final de línea.

Conexiones de transformadores trifásicos

- Conexión Dy . Igual que Yd . Para trafos elevadores de A.T. por igual razones que Yy . Para trafos de distribución con la y en el lado de baja, para poder conectar cargas monofásicas. El primario en D , tiende a compensar los desequilibrios de carga
- Conexión Dd . Para transformadores de B.T., porque usan más espiras de menor sección que las conexiones Y . Bien ante cargas desequilibradas
- Conexión Yz . Para B.T. en distribución. Neutro accesible, bueno para desequilibrios pero necesita más material

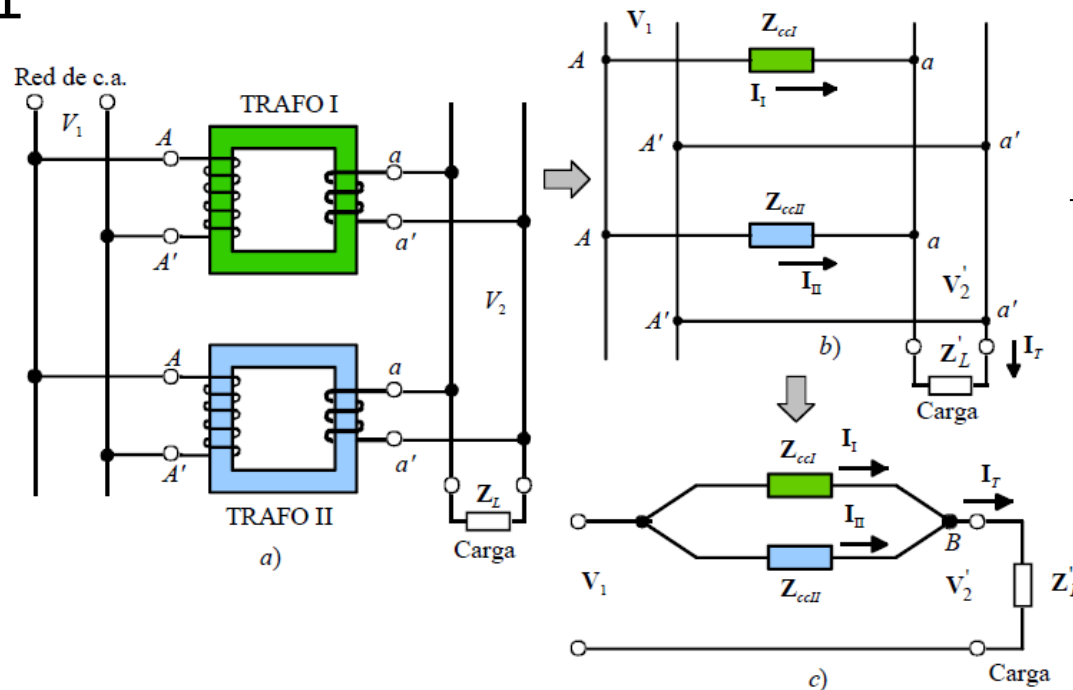
Acoplamiento en paralelo

- Ante aumento de demanda o fuertes variaciones estacionales de carga es más rentable tener varios *trafos* en paralelo que uno grande.
- Deben tener el mismo índice horario y la misma relación de transformación.



Acoplamiento en paralelo

- Deben tener idénticas tensiones relativas de cortocircuito ε_{cc} para que el reparto de carga sea proporcional a las potencias de cada transformador. Los índices de carga deben ser iguales.
- Son admisibles diferencias del 10% y relaciones de potencias 3:1

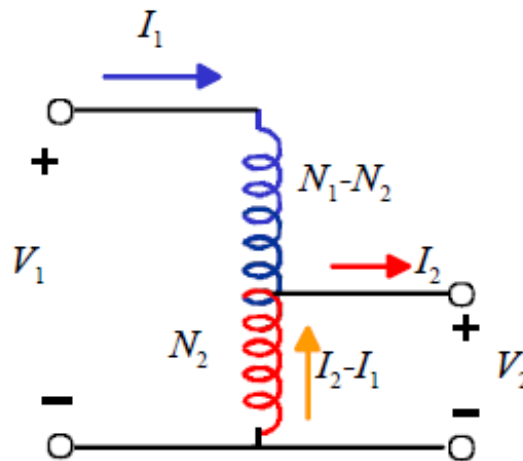


Máquinas Eléctricas

$$\begin{aligned}
 Z_{ccI} I_I &= Z_{ccII} I_{II} \\
 \downarrow \\
 \frac{I_I}{I_{In}} \frac{Z_{ccI} I_{In}}{V_{1n}} 100 &= \frac{I_{II}}{I_{II n}} \frac{Z_{ccII} I_{II n}}{V_{1n}} 100 \\
 \downarrow \\
 \frac{I_I}{I_{In}} \varepsilon_{ccI} &= \frac{I_{II}}{I_{II n}} \varepsilon_{ccII} \\
 \downarrow \\
 C_I \varepsilon_{ccI} &= C_{II} \varepsilon_{ccII}
 \end{aligned}$$

Autotransformadores

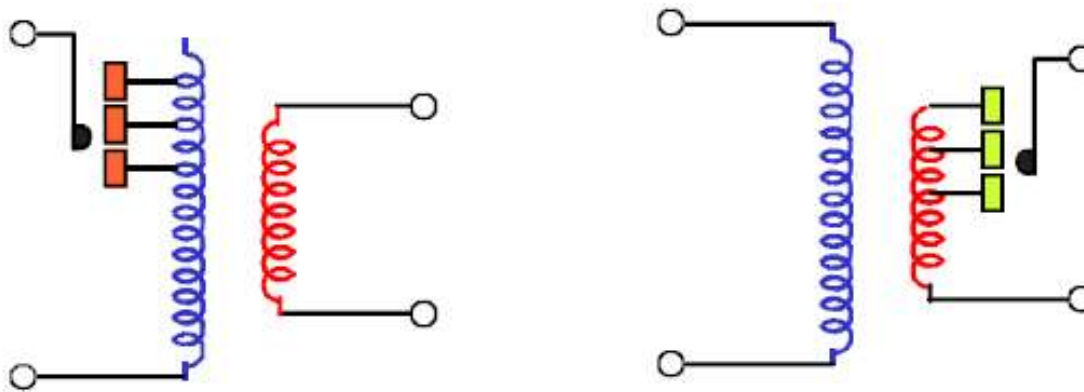
- Un solo devanado se utiliza como primario y secundario.
- Transferencia de energía por acoplamiento magnético y por conexión eléctrica.
- Ahorro de hierro y cobre, menores pérdidas, mayor rendimiento.
- Baja tensión relativa de cortocircuito ε_{cc} y falta de aislamiento galvánico.



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

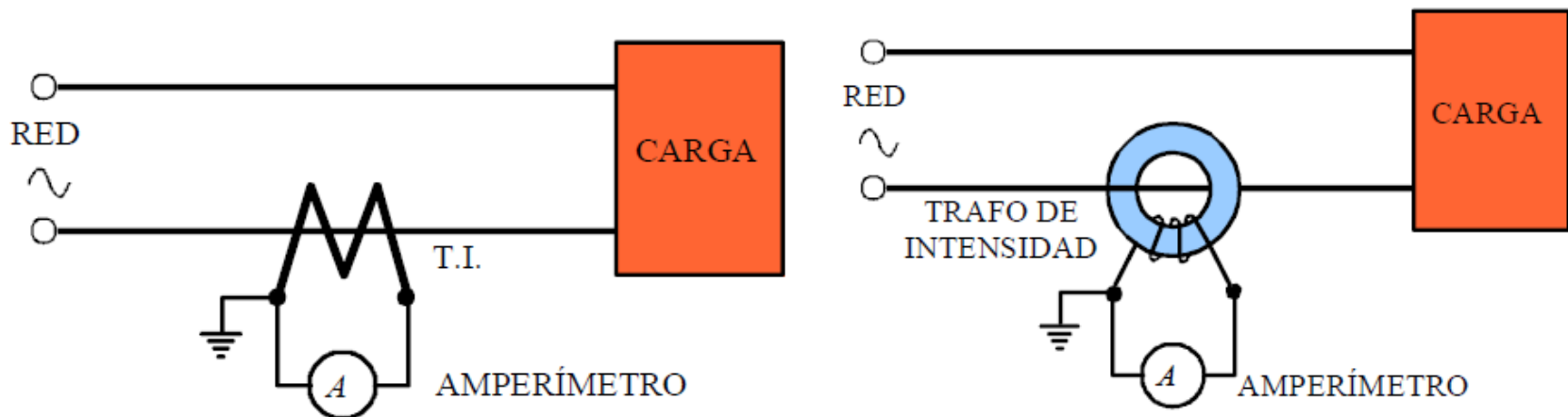
Transformadores con tomas

- Un transformador con varias derivaciones o **tomas** que se conmutan para regular la tensión de salida a intervalos discretos
- En función de la aplicación las tomas pueden ir en el lado de A.T. o de B.T.



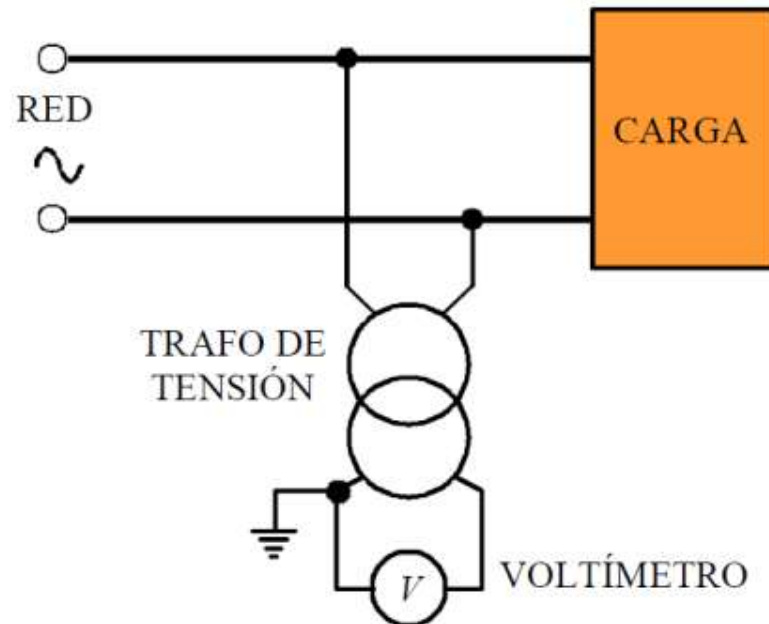
Transformadores de medida

- Transformadores para adaptar los niveles de tensión a los aparatos de medida.
- Transformadores de corriente. Se conectan en serie con la línea y el secundario en serie con el amperímetro. Diseñados para bajas inducciones ya que el amperímetro es casi un cortocircuito. No dejar abiertos, se queman.



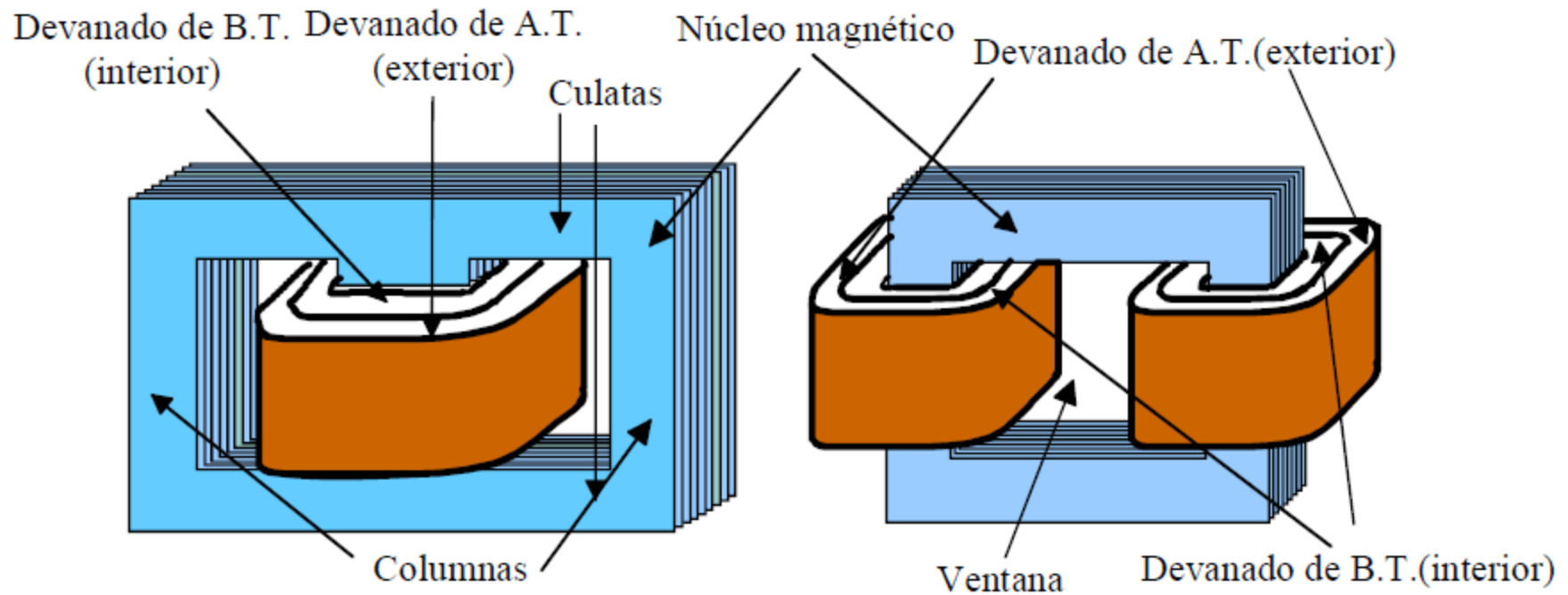
Transformadores de medida

- Transformadores de tensión. Deberán tener pocas caídas de tensión internas para reproducir fielmente la tensión de medida. Baja inductancia de dispersión, baja corriente de vacío.



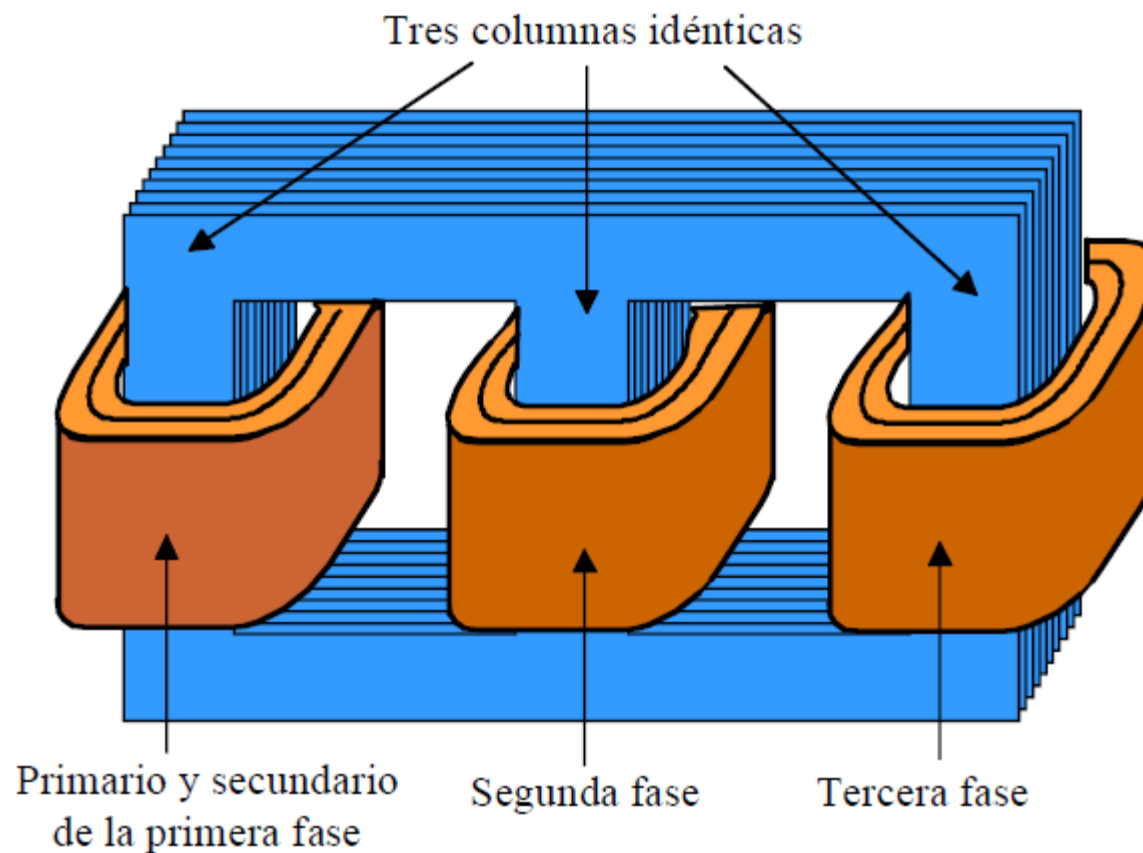
Aspectos constructivos

- Transformadores monofásicos



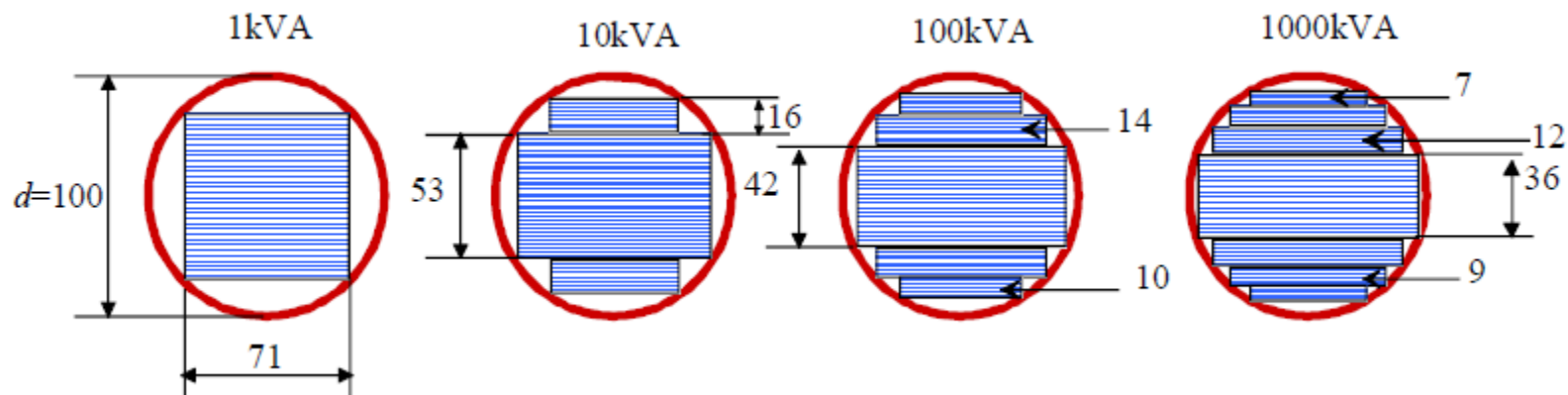
Aspectos constructivos

- Transformadores trifásicos

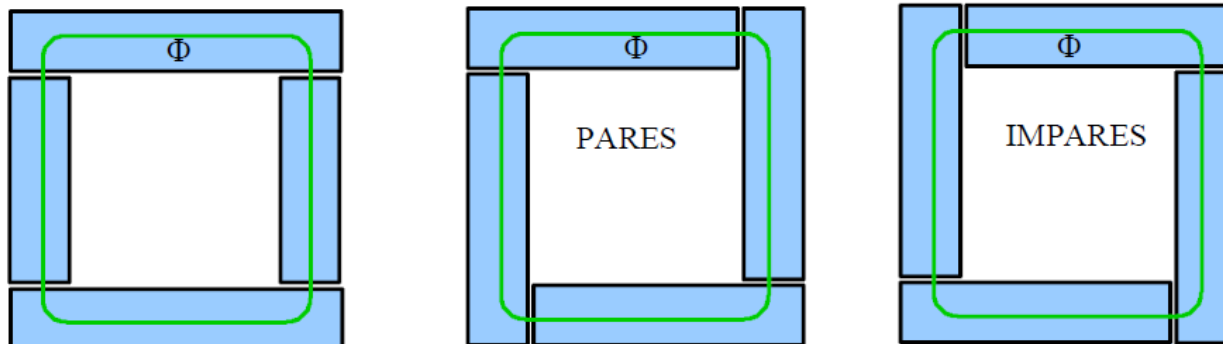


Aspectos constructivos

- Sección



- Apilamiento



- [621.313 FRA MAQ] Máquinas Eléctricas. Jesús Fraile Mora. McGraw-Hill. 6ª edición
- [621.3.049 MAR PRO] Prontuario para el diseño eléctrico y electrónico. Salvador Martínez García. Marcombo - Boixareu editores.
- [621.3.049 TEO DEC VOL. 1 y 2] Teoría de Circuitos. V. Parra, J. Ortega, A. Pastor, A. Pérez. UNED