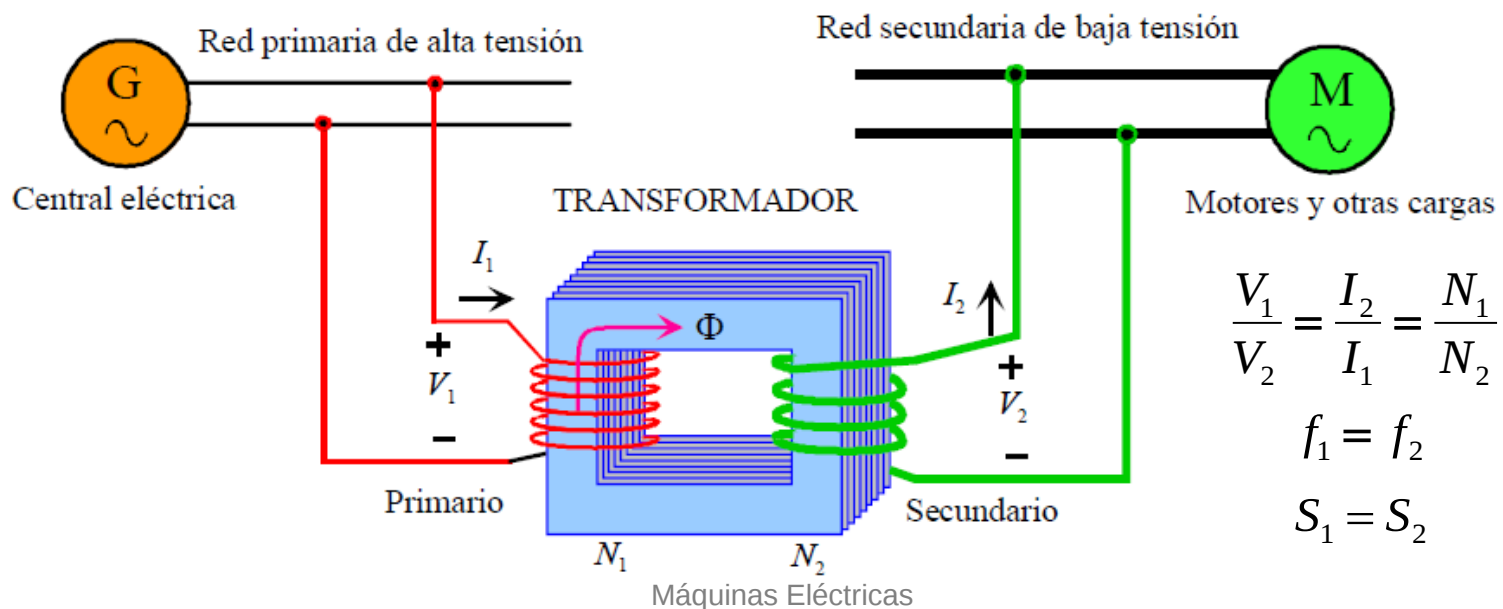


Tema 2. Transformadores

Máquinas eléctricas estáticas

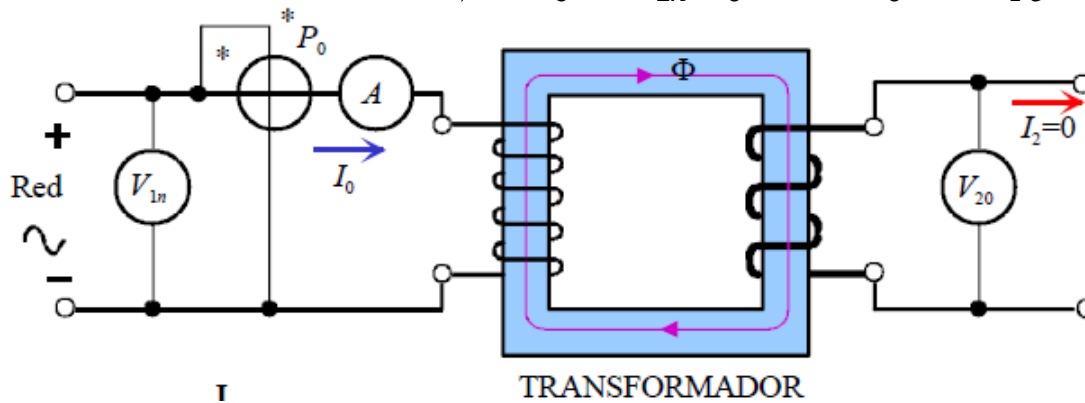
- Un **transformador** es una máquina estática en la que se conecta una fuente de **CA** de frecuencia f_1 a un devanado inductor (primario) y entrega energía eléctrica de CA de frecuencia f_2 a un circuito conectado al inducido (secundario)
- La **potencia** de primario y secundario son **iguales**



Ensayo de vacío

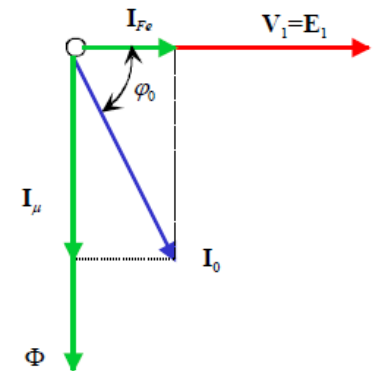
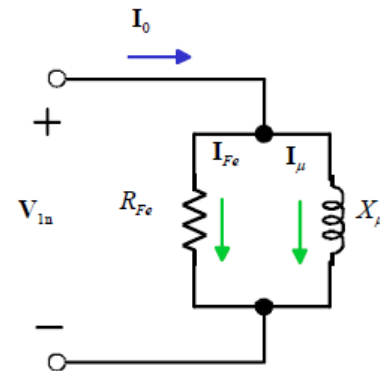
- La potencia absorbida en vacío coincide aprox. con las pérdidas en el hierro o núcleo.

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



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

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



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

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

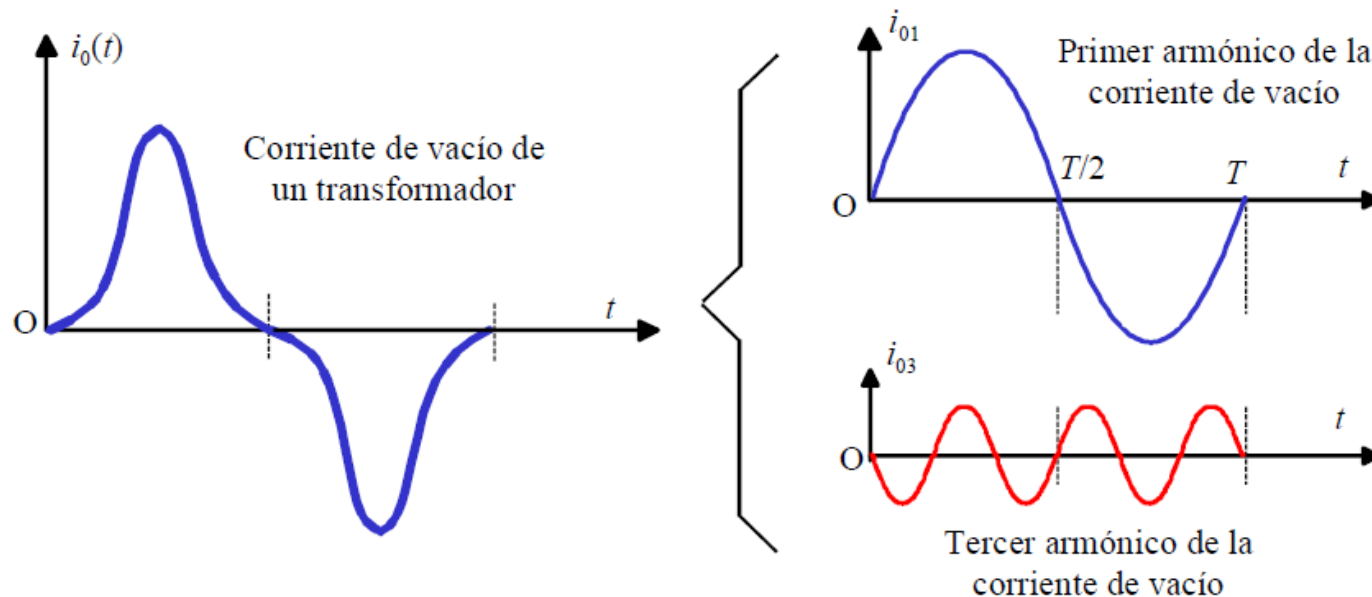
el rendimiento en función del índice de carga

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

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

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.

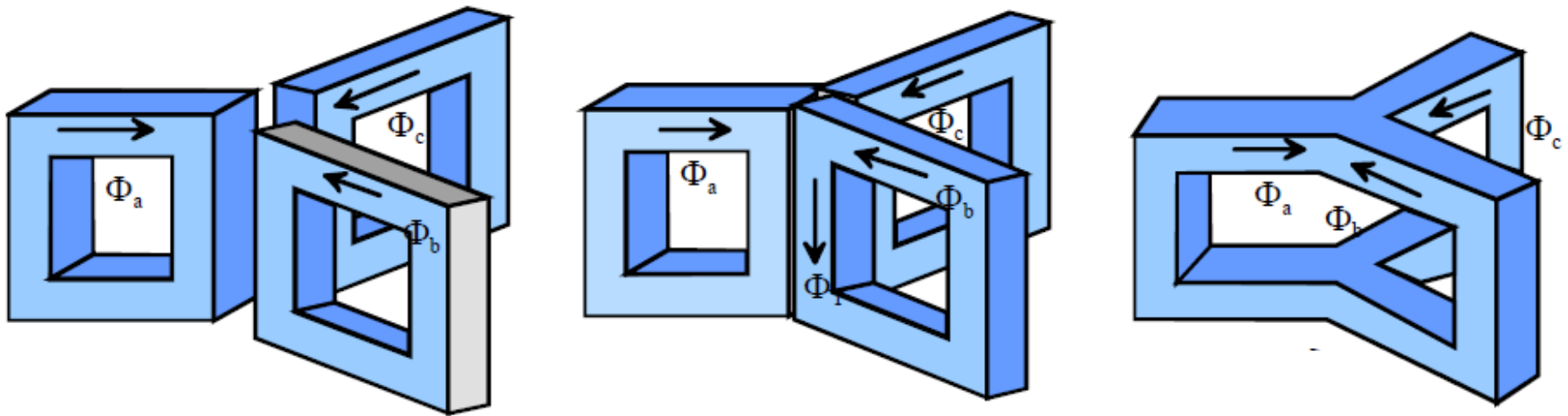


Corriente de conexión

- 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.

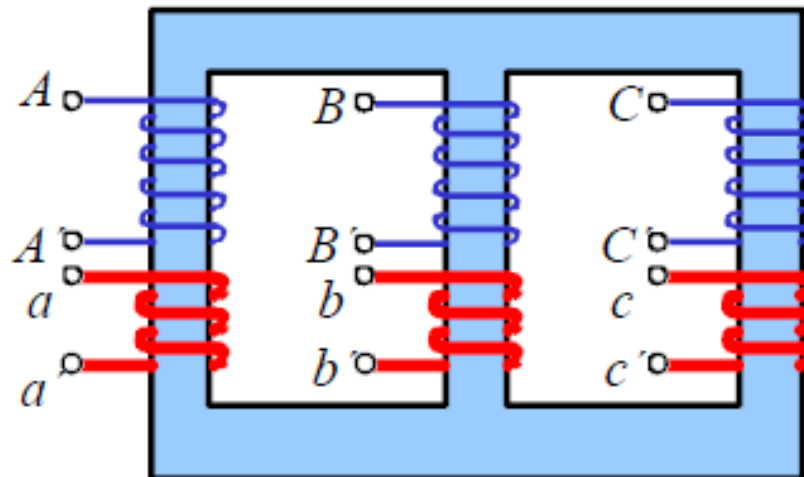
Transformadores trifásicos

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



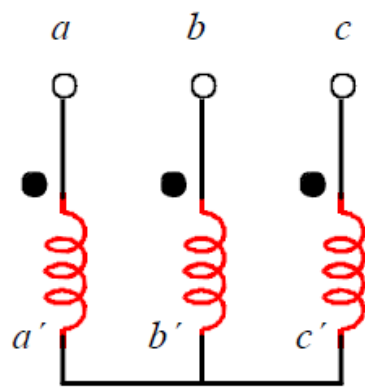
Transformadores trifásicos

- 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.

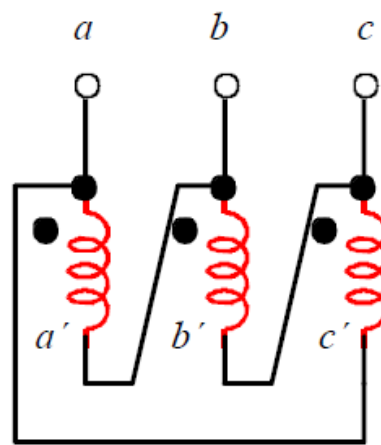


Tipos de conexiones

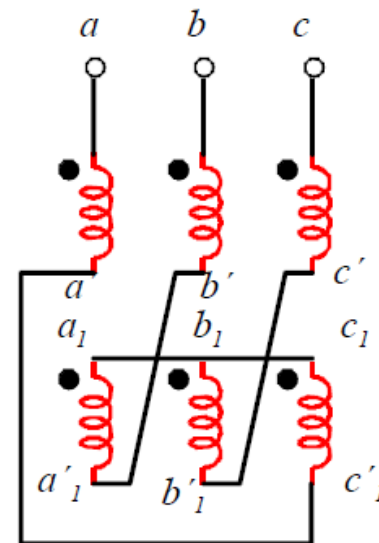
- Se conectan en estrella (con hilo de neutro o no) en triángulo y en zig-zag
- Designación habitual de terminales, mayúsculas para el lado de A.T. y minúsculas para el lado de B.T. (ABC, RST, UVW) y de conexiones Yy , Dd , Zz



a) Estrella



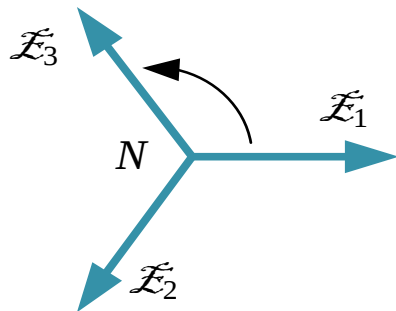
b) Triángulo



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.)



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

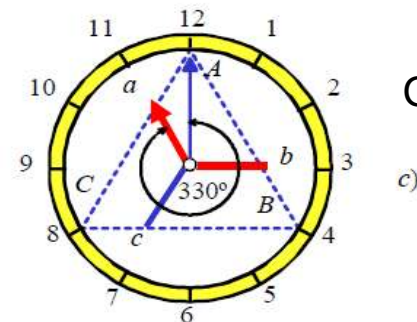
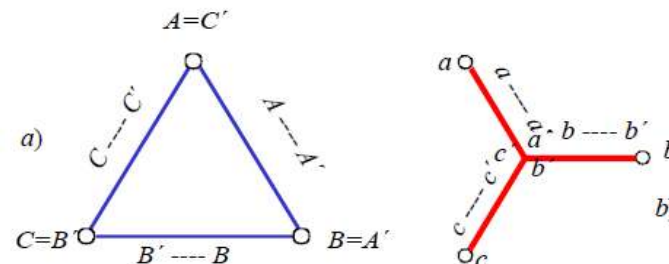
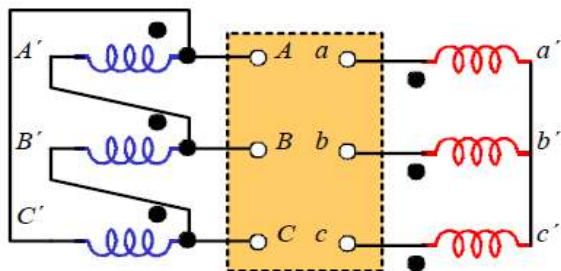
$$\mathcal{E}_2 = E \angle -120^\circ$$

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

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

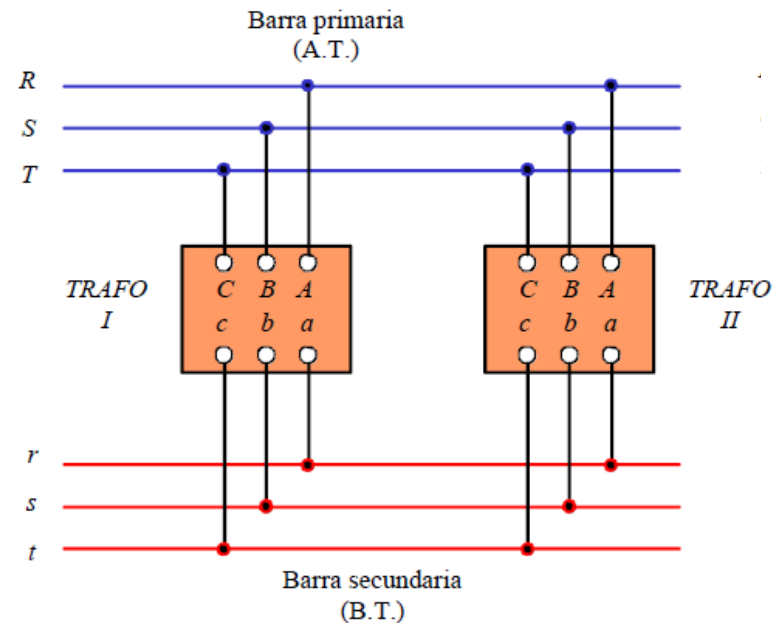
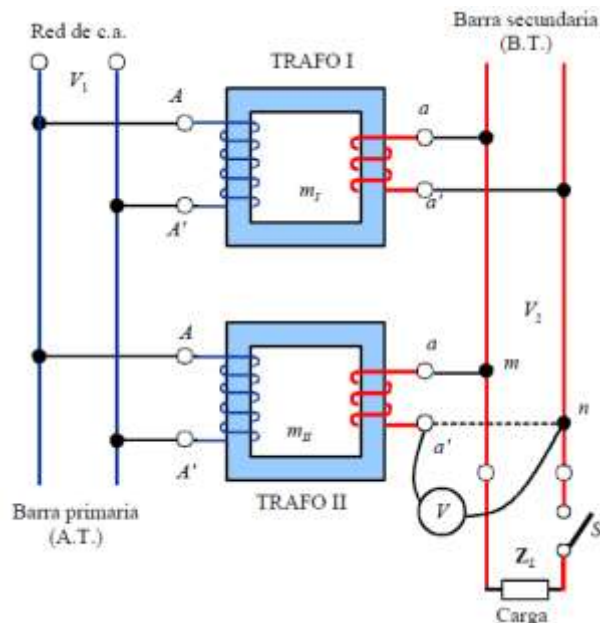
- Conexión Yy . Menos tensión y más corriente por los devanados que en D . Más rigidez mecánica. Bueno para A.T. Desequilibrio de tensiones con carga desequilibrada. Terceros armónicos de tensión.
- Conexión Yd . No tiene **armónicos de tensión** y trabaja bien con cargas desequilibradas. Las tensiones 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

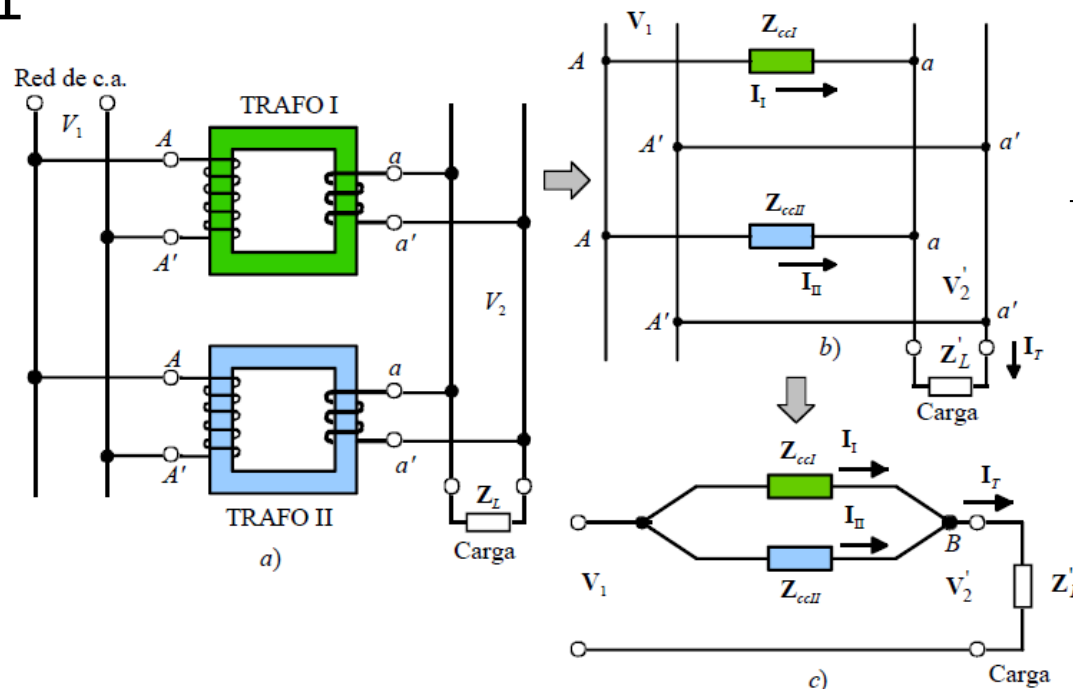
Acoplamiento en paralelo

- 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

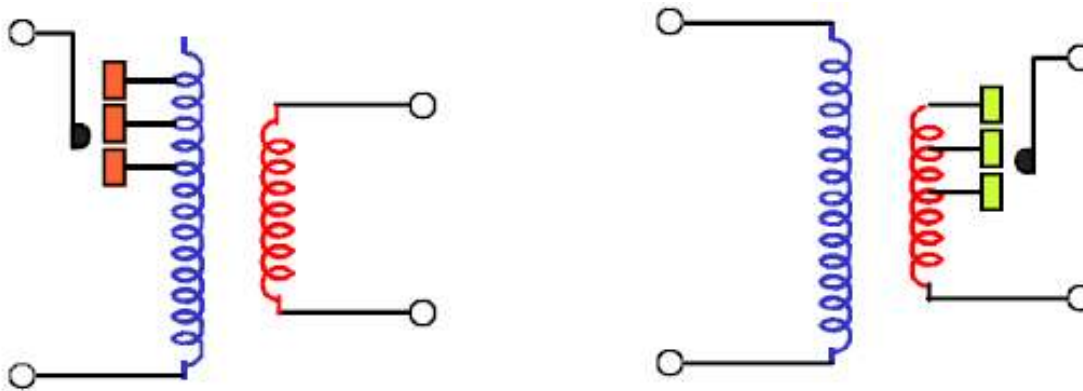


Máquinas Eléctricas

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

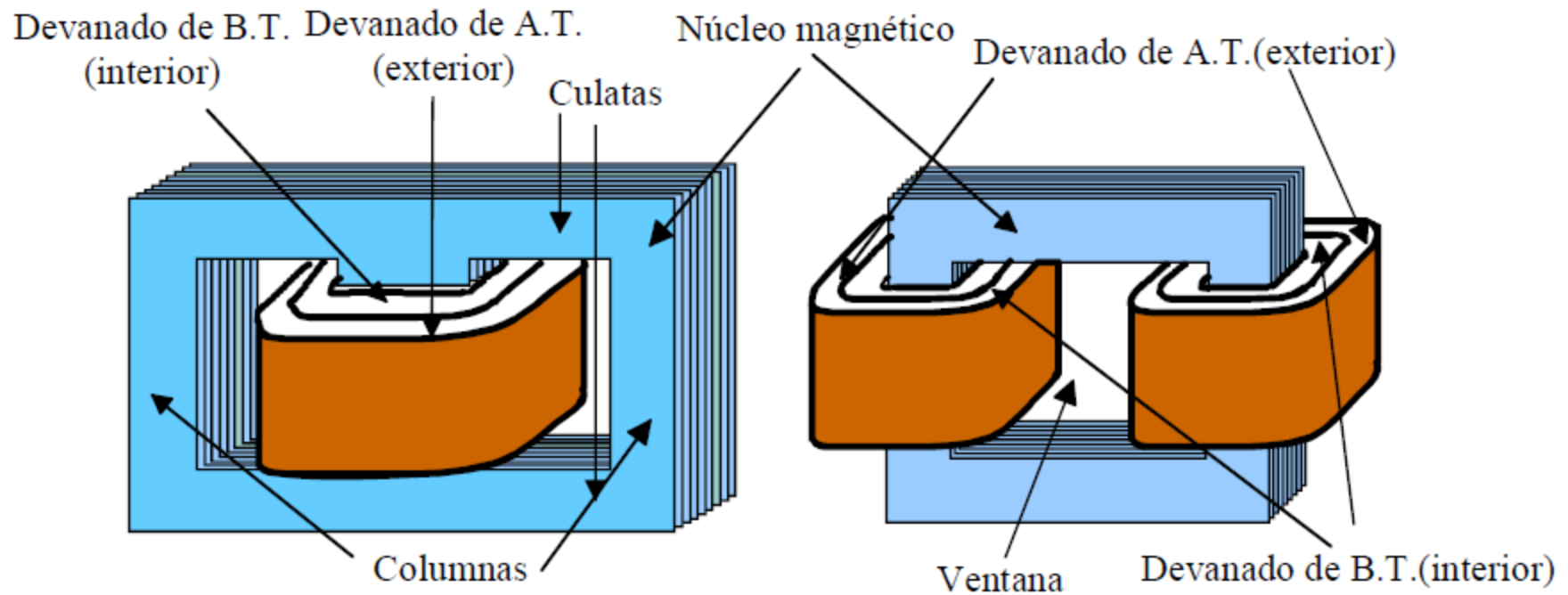
Transformadores con tomas

- 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.



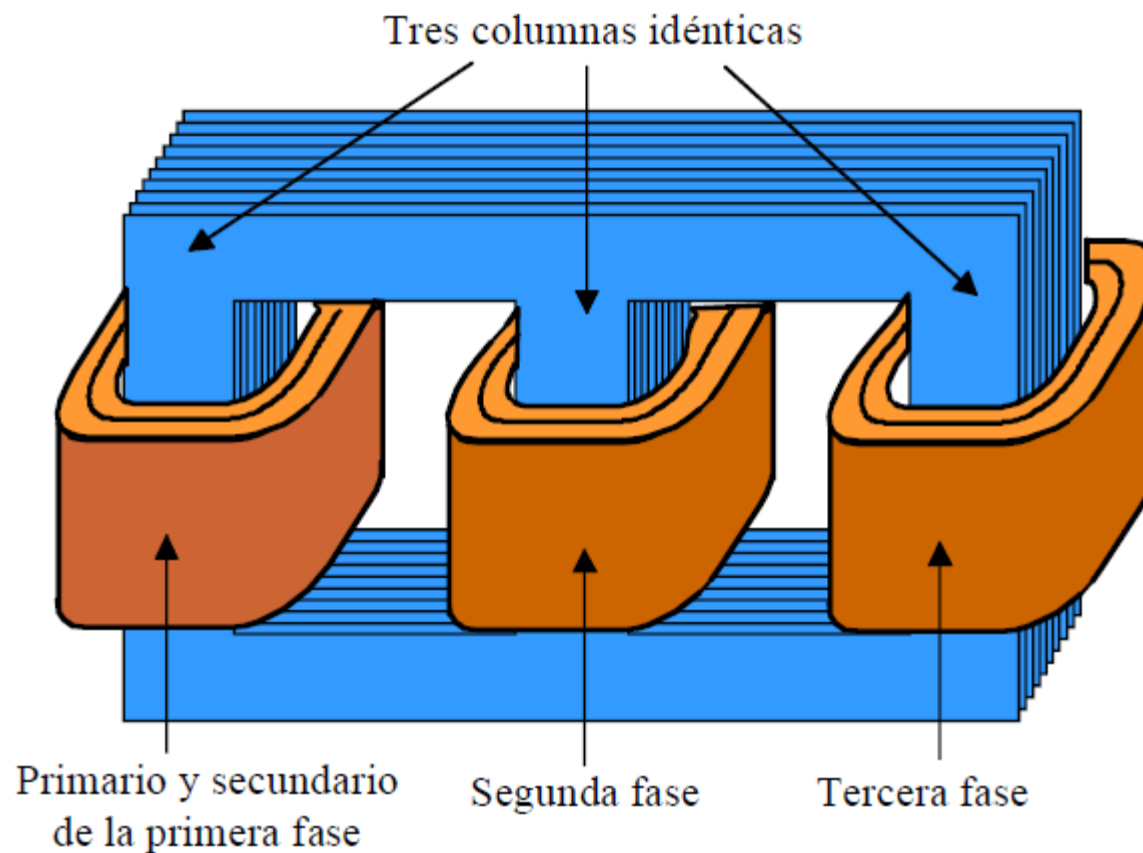
Aspectos constructivos

- Transformadores monofásicos



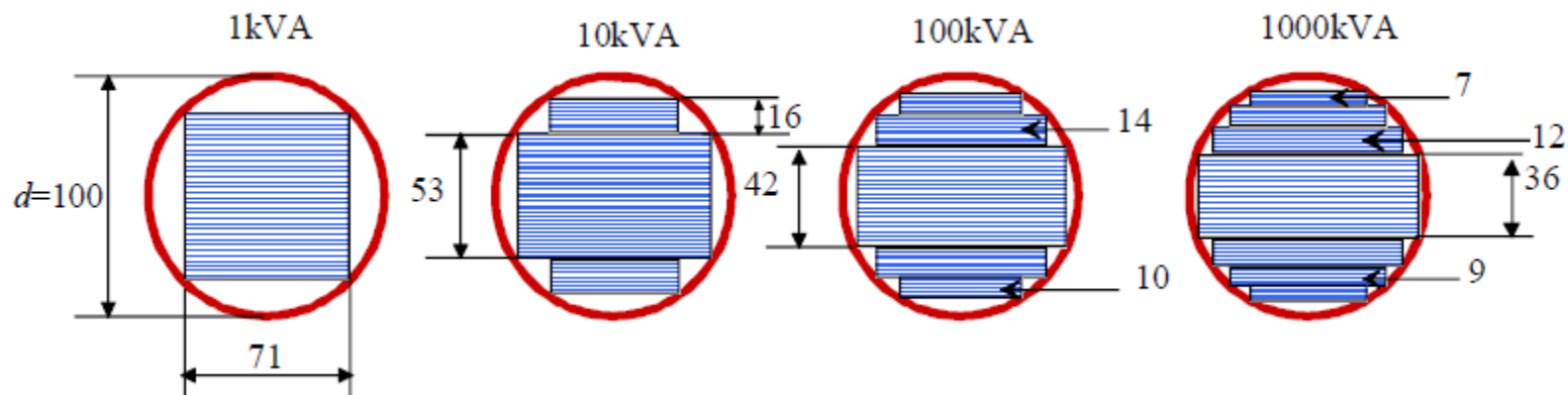
Aspectos constructivos

- Transformadores trifásicos

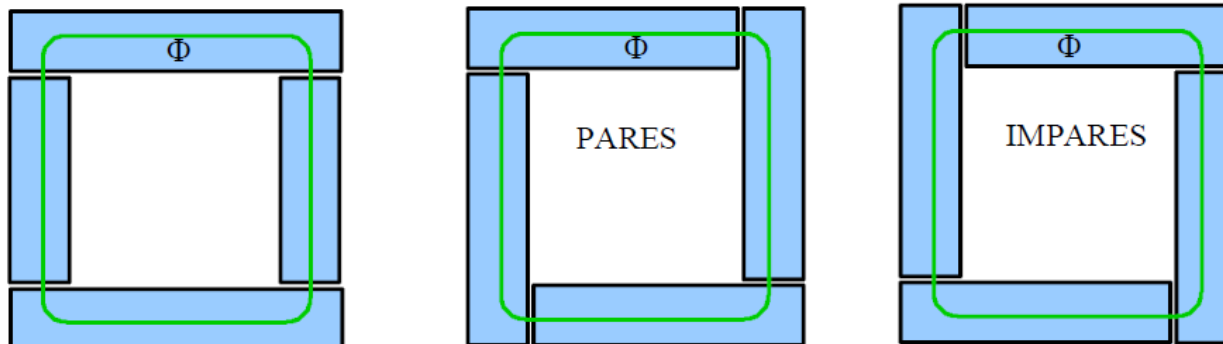


Aspectos constructivos

- 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