Javier Pereda
Profesor
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Pontificia Universidad Católica de Chile

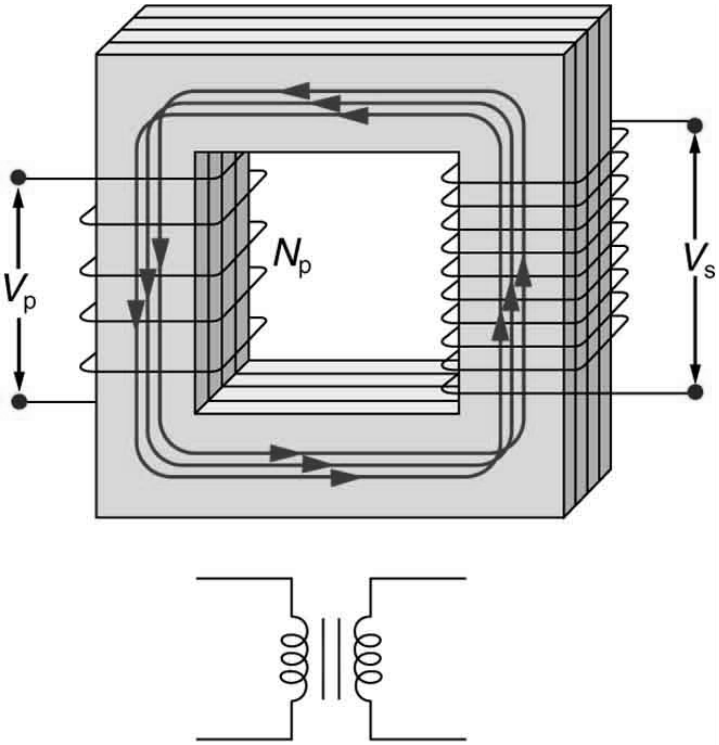


IEE 2213
Máquinas Eléctricas

3. Transformadores

Principio de funcionamiento del trafo ideal; operación en régimen sinusoidal; polaridad; trafo real y circuito equivalente; pruebas en c.a y c.c; regulación de voltaje; pérdidas, eficiencia, aislación y refrigeración; conexión en paralelo y serie; autotransformador y taps; corriente de excitación y armónicos; trafos de medida; trafos trifásicos (características, conexiones, diagrama fasorial y armónicos); Características y transporte

Transformador Ideal



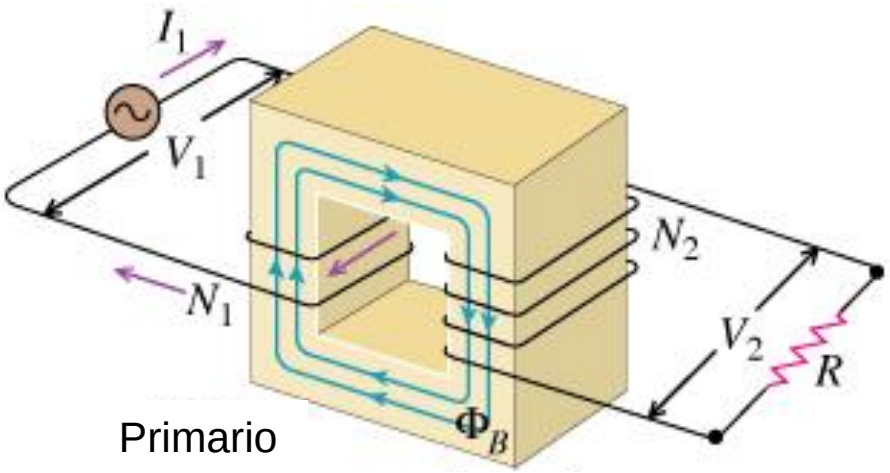
Transformador Ideal

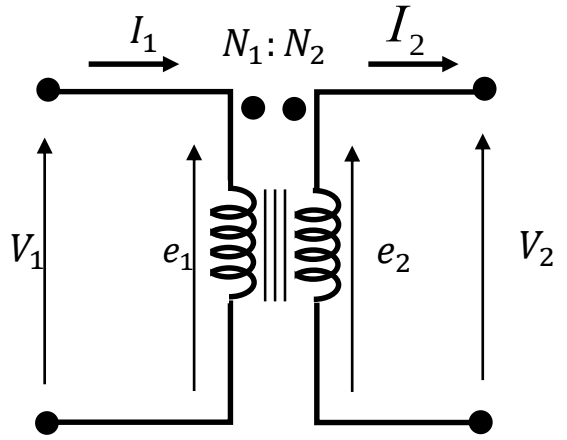
Principio de Funcionamiento

El transformador es un circuito eléctrico acoplado magnéticamente que generalmente consta de un primario (bobina que entrega energía al circuito magnético) y un secundario (bobina que entrega energía al circuito eléctrico).

En un **transformador ideal** se realizan 4 suposiciones:

1. **Permeabilidad** μ del núcleo infinita (Reluctancia del fierro nula = integral cerrada de H igual a cero).
2. Todo el flujo está confinado al núcleo (no hay **dispersión**, reluctancia del aire ∞).
3. Pérdidas del núcleo nulas (no hay **histéresis** ni corrientes **parásitas**).
4. Pérdida en las **resistencias** de devanados nula (cables sin resistencia).





Transformador Ideal

Principio de Funcionamiento

Luego, por **Ley de Faraday** tenemos:

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

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

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Y por **Ley de Ampère** tenemos:

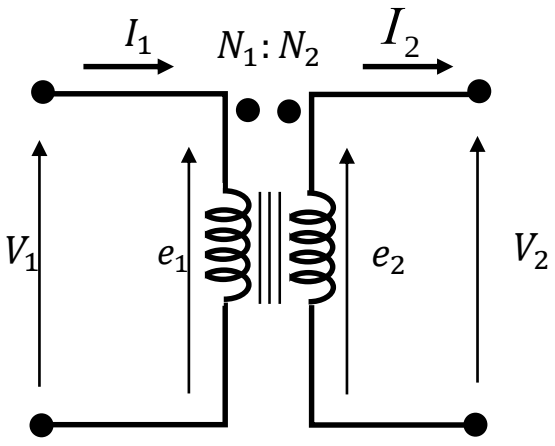
$$\oint_C H \cdot dl = i \quad \Rightarrow \quad \oint_C H \cdot dl = N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

Suponiendo el transformador ideal la eficiencia es 100%:

$$S_1 = V_1 \cdot I_1^* = \frac{N_1}{N_2} \cdot V_2 \times \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2^* = V_2 \cdot I_2^* = S_2$$

$$P_1 = P_2$$

$$Q_1 = Q_2$$



Transformador Ideal

Operación en Régimen Sinusoidal

Al excitar el transformador con una **tensión sinusoidal** de frecuencia "f", el flujo al interior del mismo tendrá esta misma forma sinusoidal, así:



$$\Phi = \Phi_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Este flujo, idealmente, en su totalidad atravesará ambos bobinados e inducirá una **tensión** dada por:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \cdot \Phi_{max} \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \xrightarrow{rms} \mathrm{E}_1 = \frac{\mathrm{N}_1 \cdot \Phi_{max} \cdot 2\pi \cdot f}{\sqrt{2}}$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \cdot \Phi_{max} \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \xrightarrow{rms} \mathrm{E}_2 = \frac{\mathrm{N}_2 \cdot \Phi_{max} \cdot 2\pi \cdot f}{\sqrt{2}}$$

Estos resultados indican que el voltaje en los bobinados está adelantado 90° respecto al flujo magnético al interior del transformador y su magnitud depende no sólo de la cantidad de vueltas, sino también de la frecuencia aplicada y el flujo máximo que atraviesa el núcleo. De forma generalizada podemos plantear:

$$\mathrm{E}_i = \frac{\mathrm{N}_i \cdot \Phi_{max} \cdot 2\pi \cdot f}{\sqrt{2}} \Rightarrow \mathrm{E}_i = 4.44 \cdot f \cdot N_i \cdot \Phi_{max}$$

Transformadores
Ecuación de Diseño

Tarea: Encuentre la ecuación de diseño para un trafo con un voltaje de onda cuadrada. Luego calcule la relación N*A que se debe cumplir si se opera a 10kHz, 300 VDCmax y el material tiene una densidad de flujo máximo de 0.2T.

La ecuación anterior (E_i) se conoce como **"Ecuación de Diseño"** para transformadores porque relaciona prácticamente todos los aspectos mecánicos y electromagnéticos:

- Frecuencia (f)
- Tensión Nominal (E_i)
- Flujo y Campo Magnético Máximos (B_{max}) $\Phi = B \cdot A$
- Área transversal del Núcleo (A).
- Cantidad de Vueltas por Enrollado (N_i).

$$E_i = \frac{N_i \cdot \Phi_{max} \cdot 2\pi \cdot f}{\sqrt{2}} \Rightarrow E_i = \frac{N_i \cdot B_{max} \cdot A \cdot 2\pi \cdot f}{\sqrt{2}}$$

El **voltaje**, la **frecuencia** y **potencia** son parámetros a priori en la mayoría de los casos (son necesidades de la aplicación) y definirán el material y forma del núcleo.

Se debe optar por un núcleo con campo máximo (**B_{MAX}**) en o bajo el codo de saturación.

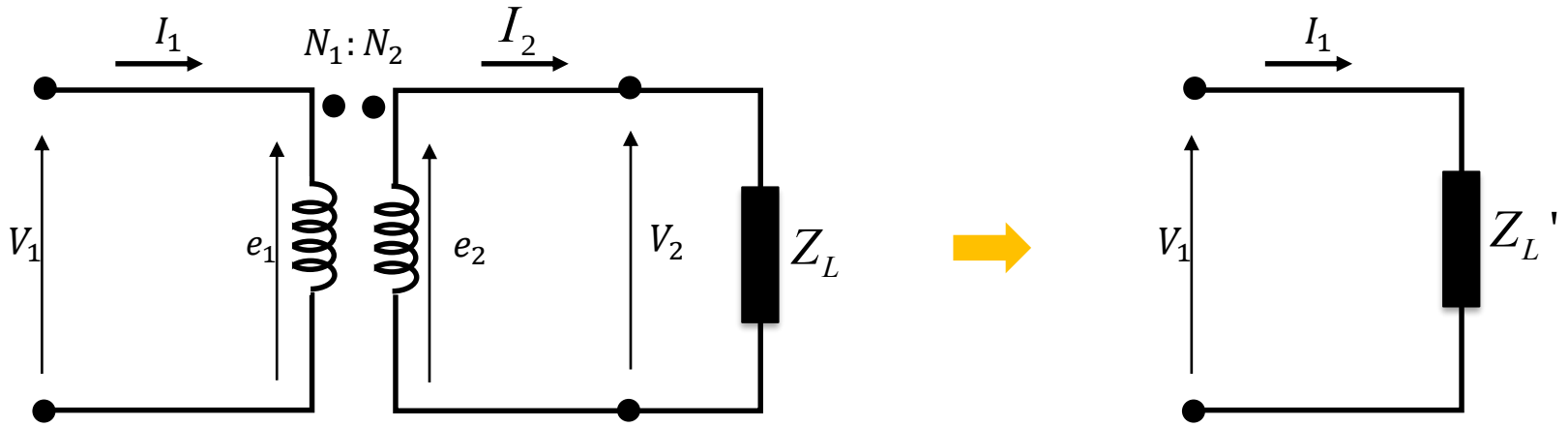
El área transversal (**A**) dependerá de las dimensiones de la chapa utilizada en el diseño. Hay tabulación para los distintos tipos.

El número de vueltas (**N_i**) definirá la resistencia de los enrollados. También se debe tomar en cuanta la sección necesaria de los conductores y el espacio que utilizan.

Transformador Ideal

Reflexión de Impedancias

El transformador convierte magnitudes de corriente y voltaje conservando la potencia. Esto lleva a pensar que es posible reflejar elementos de un lado a otro.



$$\vec{Z}_L = \frac{\vec{e}_2}{\vec{i}_2} = \frac{\vec{V}_2}{\vec{i}_2} \qquad \vec{Z}_L' = \frac{\vec{e}_1}{\vec{i}_1} = \frac{\vec{V}_1}{\vec{i}_1} \rightarrow \frac{\vec{V}_1}{\vec{i}_1} = \frac{a\vec{V}_2}{\frac{1}{a}\vec{i}_2} = \frac{a^2\vec{V}_2}{\vec{i}_2} \rightarrow \vec{Z}_L' = a^2\vec{Z}_L$$

Lo que implica que la carga se refleja al primario multiplicando su impedancia en el lado secundario por la razón de vueltas al cuadrado. Para reflejar al secundario, se divide por la razón al cuadrado.

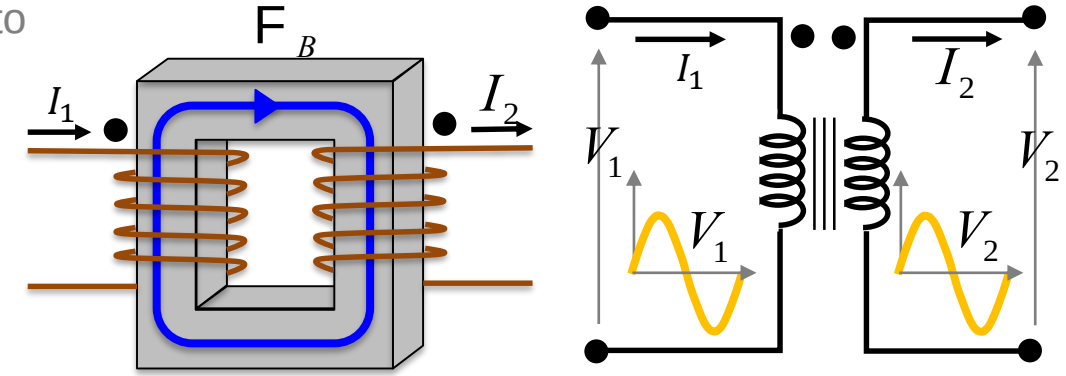
Transformadores

Polaridad

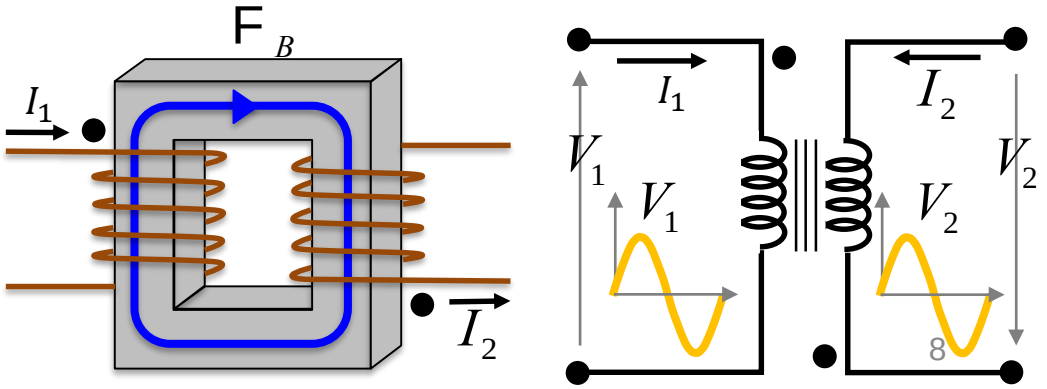
La polaridad está determinada en la forma como están bobinados el primario y secundario y de esto depende si el voltaje primario y secundario están en fase o contrafase (polaridad sustractiva o aditiva).

NOTA: para que las ecuaciones anteriores se cumplan:
i_1 entra por punto ➔ i_2 sale por punto (viceversa)
V_1 y V_2 tienen igual polaridad en punto

Polaridad sustractiva: El voltaje primario y secundario están en fase (igual para las corrientes). Ambos “puntos” se encuentran alineados (arriba o abajo).



Polaridad aditiva: El voltaje primario y secundario están en contrafase (igual para las corrientes). Se debe tomar en cuenta en las ecuaciones o invertir la dirección de la corriente y polaridad del voltaje en el dibujo.

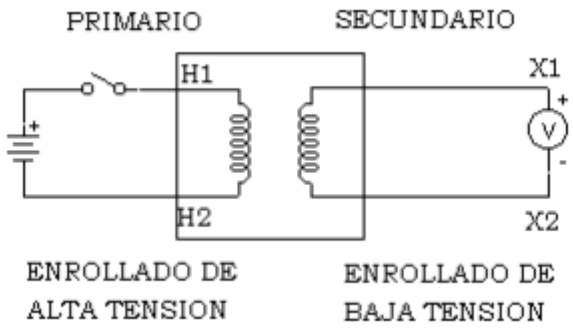


Transformadores

Prueba de Polaridad

¿Qué pasa cuando tenemos un transformador que no tiene sus terminales debidamente identificados? Debemos realizar una prueba de polaridad antes de poder conectarlo en paralelo con otro(s). Para esto existen 2 pruebas:

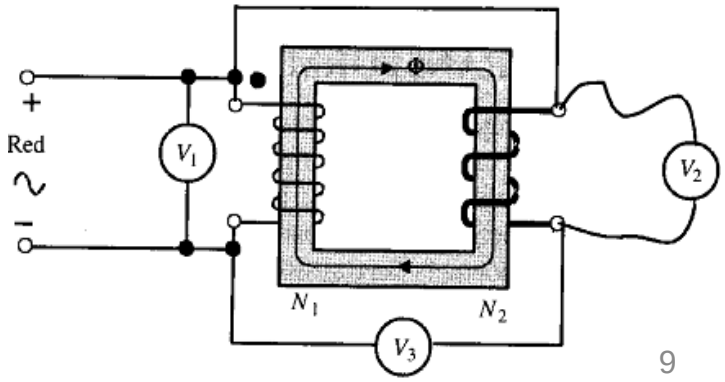
Prueba con corriente continua: requiere una batería y un voltímetro de aguja. Se asume una polaridad para el secundario y se mide su tensión cuando se alimenta el primario con la batería. Si la aguja se deflecta al lado positivo, la polaridad asumida es correcta; y si lo hace al negativo, el supuesto fue erróneo.



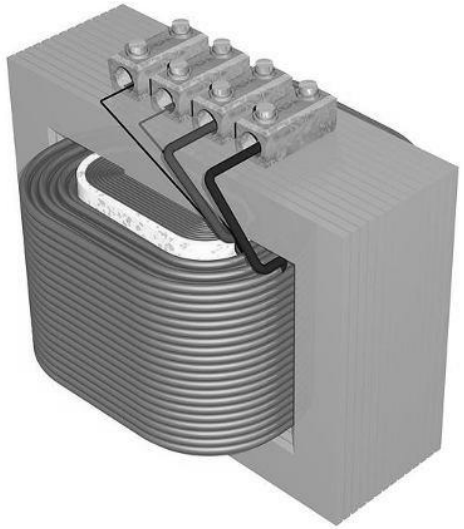
Prueba con corriente alterna: alimenta el primario con una tensión baja (V_1), se conecta un terminal primario con uno secundario y se mide el voltaje tanto en el devanado secundario (V_2) como en los terminales no conectados del transformador (V_3):

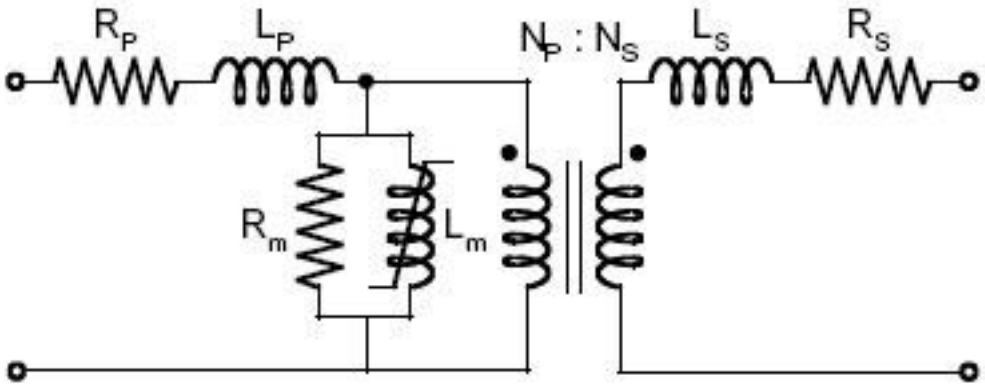
Si $V_3=V_1-V_2$, el transformador es sustractivo.

Si $V_3=V_1+V_2$, el transformador es aditivo.



Transformador Real





Transformador Real
Supuestos

En la realidad el transformador carece de las cuatro idealizaciones del transformador ideal ya que:

1. Los devanados no confinan todo el flujo al interior del núcleo, hay **dispersión de flujo** una parte en el aire.
2. La **resistencia** de los devanados no es despreciable.
3. Hay pérdidas por **histéresis** y **corrientes parásitas** en el núcleo
4. La **reluctancia** del núcleo no es despreciable.

Transformador Real

1. Dispersión del Flujo

El flujo total que pasa por la bobina del primario y secundario (recordar que el secundario crea un flujo que se opone) es:

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{L1} \qquad \Phi_2 = \Phi_{21} - \Phi_{L2}$$

$$V_1 = N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_{L1}}{dt}$$

$$V_2 = N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} - N_2 \frac{d\Phi_{L2}}{dt}$$

$$e_i = N_i \frac{d\Phi}{dt}$$

$$V_1 = e_1 + N_1 \frac{d\Phi_{L1}}{dt}$$

$$V_2 = e_2 - N_2 \frac{d\Phi_{L2}}{dt}$$

Con esto demostramos que:

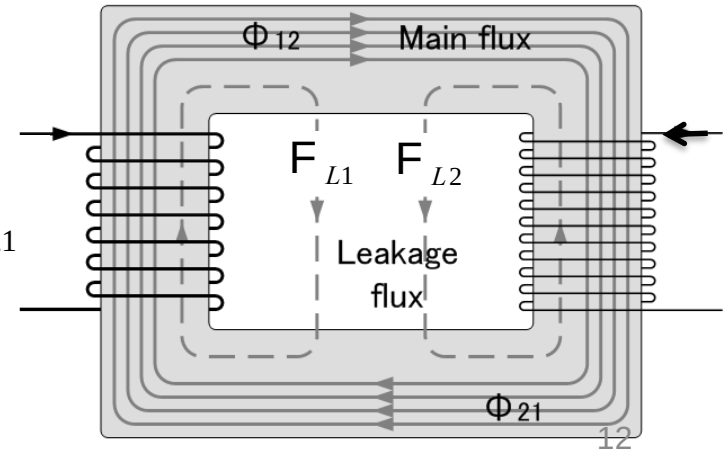
$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \neq \frac{V_1}{V_2}$$

Flujo Mutuo

$$F = F_{12} = F_{21}$$

Flujo de Fuga

$$F_{L1} \quad F_{L2}$$



Transformador Real

1. Dispersión del Flujo

Utilizamos la ecuación anterior y remplazamos el flujo de fuga y número de vueltas por la respectiva inductancia de fuga y la corriente de la bobina respectiva (además utilizamos derivadas parciales).

$$V_1 = e_1 + N_1 \frac{d\Phi_{L1}}{dt} \qquad V_2 = e_2 - N_2 \frac{d\Phi_{L2}}{dt}$$

$$N \cdot \Phi = L \cdot i$$

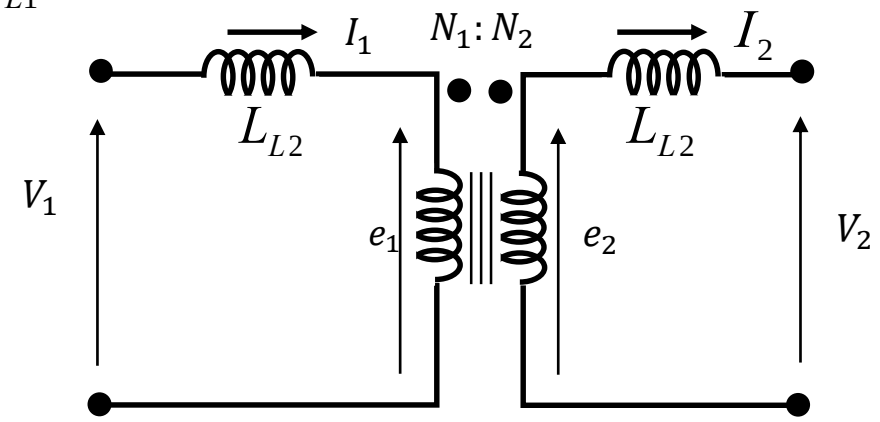
$$V_1 = e_1 + \left(\frac{dL_{L1}}{dt} i_1 + L_{L1} \frac{di_1}{dt} \right)$$

$$V_2 = e_2 - \left(\frac{dL_{L2}}{dt} i_2 + L_{L2} \frac{di_2}{dt} \right)$$

Además, se puede asumir que las inductancias de fuga son constantes, con lo que se tiene finalmente: $L_{L2} = cte \quad L_{L1} = cte$

$$V_1 = e_1 + L_{L1} \frac{di_1}{dt}$$

$$V_2 = e_2 - L_{L2} \frac{di_2}{dt}$$



Transformador Real

2. Bobinas Resistivas

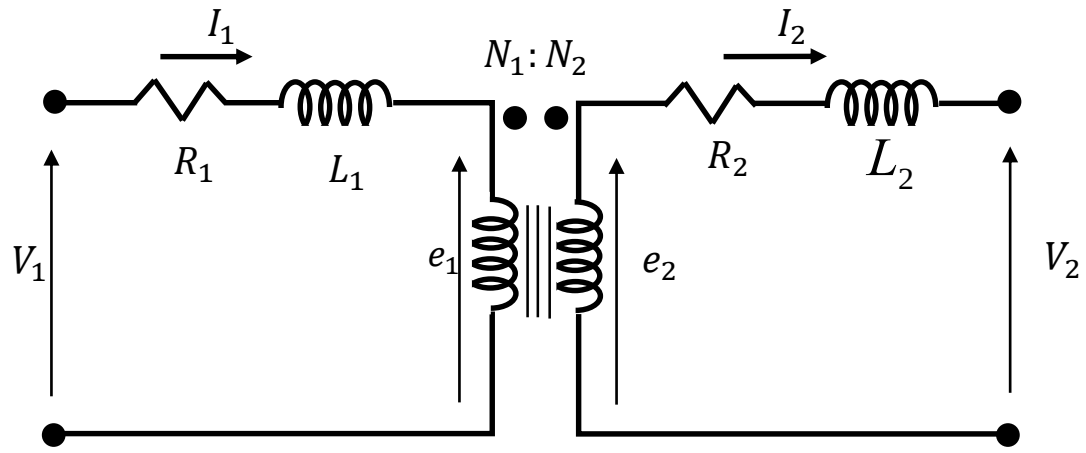
Ahora, al modelo recién encontrado debemos añadir la **resistencia** de los bobinados (R_1 y R_2).

Estas resistencias son importantes en el concepto de **regulación de carga** del transformador, pues ante cargas altas dan cuenta de caídas de tensión internas grandes, empeorando la **eficacia** y la **eficiencia** del mismo.

Se disponen en **serie** con las inductancias de fuga L_1 y L_2:

$$V_1 = e_1 + L_{L1}\frac{di_1}{dt} + R_1 \cdot i_1$$

$$V_2 = e_2 - L_{L2}\frac{di_2}{dt} - R_2 \cdot i_2$$



Transformador Real

3. Pérdidas en el núcleo

En la lectura de “electromagnetismo” se vio que al interior de un núcleo ferromagnético alimentado con AC se producen pérdidas por **histéresis** y corrientes de **Foucault**.

En el modelo real, también hay una representación para estas pérdidas.

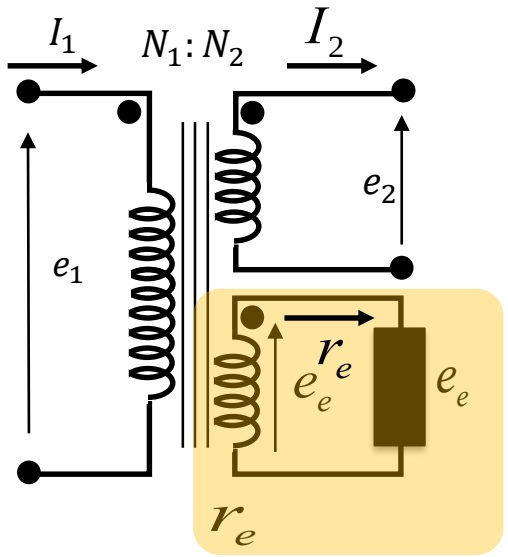
En el diagrama ahora consideremos la circulación de corrientes parásitas en el núcleo. Y también representaremos las pérdidas de histéresis.

Usamos la Ley de Ampère despreciando la reluctancia del núcleo:

$$\sum N_i \cdot I_i = 0 \quad \Rightarrow \quad N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 - N_e \cdot I_e = 0$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 + \frac{N_e}{N_1} I_e = I_2' + I_P$$

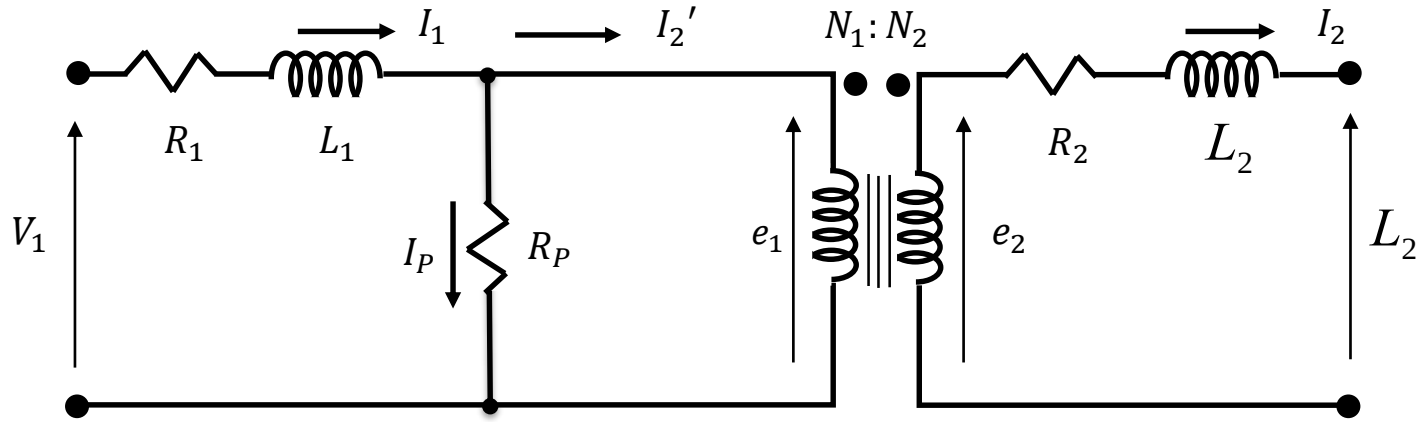
I_p es la corriente de pérdidas I_e en el núcleo referida al primario.



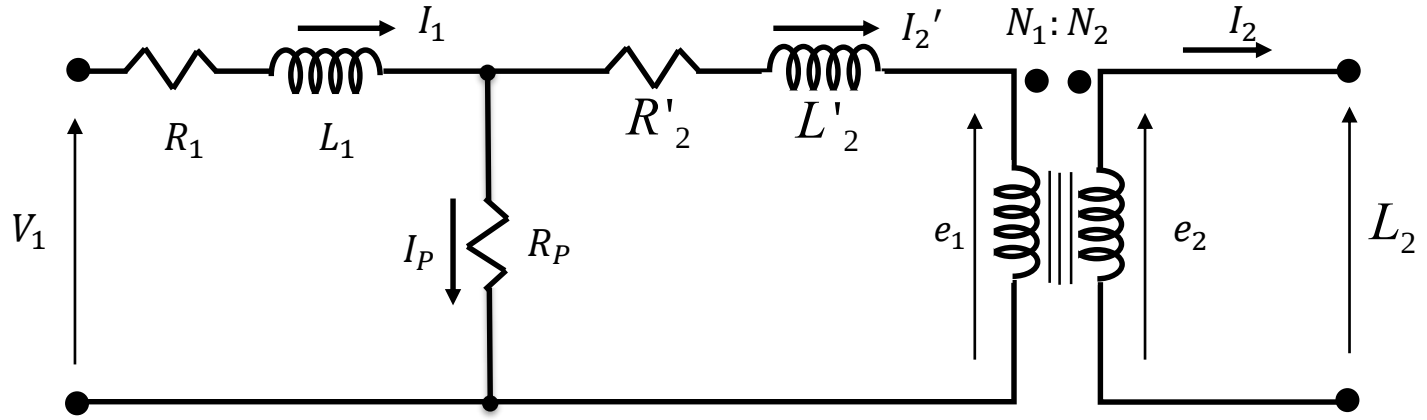
Transformador Real

3. Pérdidas en el núcleo

Por lo tanto, el circuito equivalente ahora es:



Recordemos que la corriente y las impedancias referidas al primario son:



$$I_2' = \frac{1}{a} I_2$$

$$Z_2' = a^2 Z_2$$

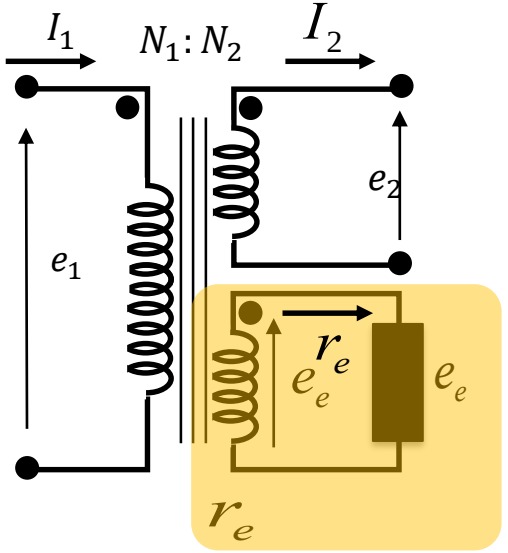
Transformador Real

4. Reluctancia del núcleo no despreciable

Formulamos y desarrollamos la misma ecuación por Ley de Ampére del análisis anterior, esta vez tomando en cuenta la **reluctancia**:

$$\sum N_i \cdot I_i = \Re \cdot \Phi \quad \Rightarrow \quad N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 - N_e \cdot I_e = \Re \cdot \Phi$$

$$\Phi = \frac{N_1}{\Re}\left(I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 - \frac{N_e}{N_1} I_e\right) \quad \Rightarrow \quad \Phi = \frac{N_1}{\Re}(I_1 - I_2' - I_P)$$



Del circuito equivalente anterior vemos que por Ley de nodos I_1-I'_2-I_p=0, pero según la ecuación anterior generaría un flujo nulo. Por lo tanto debe haber una corriente que llamaremos de magnetización I_m:

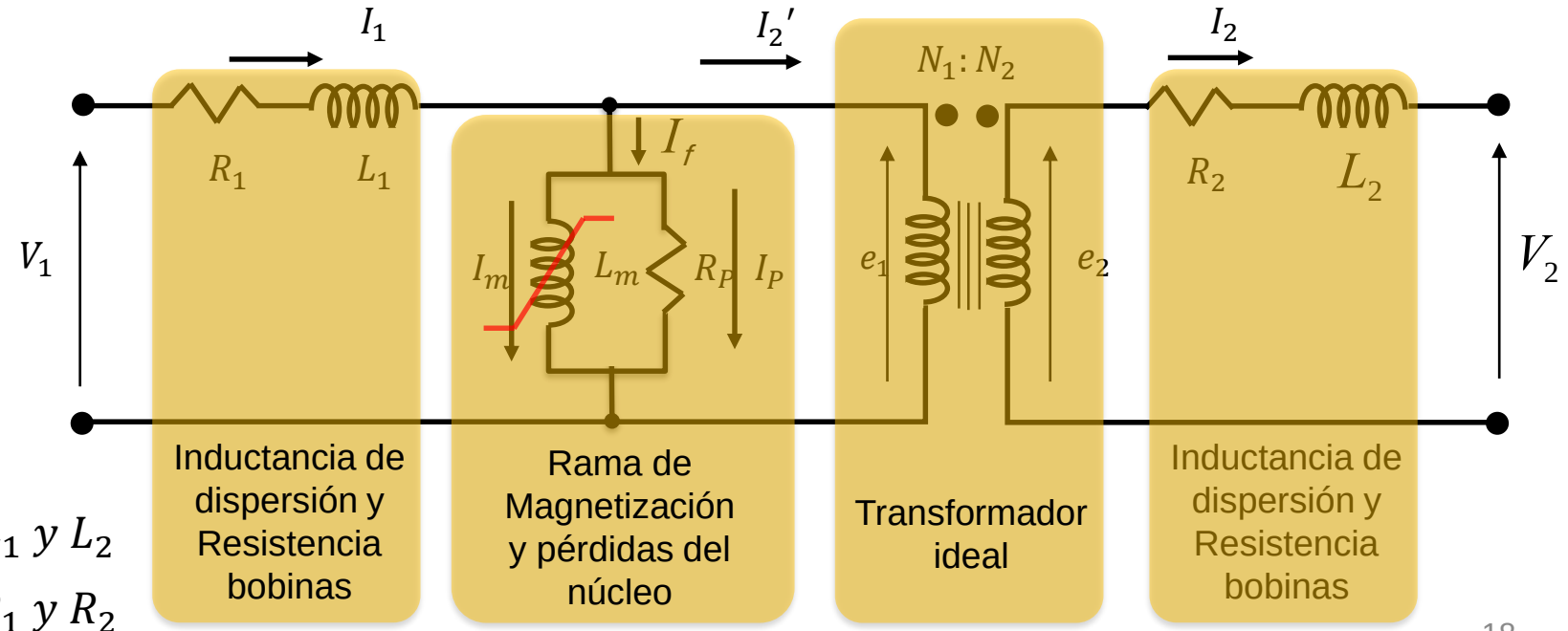
$$I_m = I_1 - I_2' - I_P \quad \Rightarrow \quad \Phi = \frac{N_1}{\Re} I_m \quad \xrightarrow{*N_1} \quad N_1 \cdot \Phi = \frac{N_1^2}{\Re} I_m$$

$$N_1 \cdot \Phi = L_m \cdot I_m \quad \xrightarrow{d/dt} \quad N_1 \frac{d\Phi}{dt} = L_m \frac{dI_m}{dt} \quad \Rightarrow \quad e_1 = L_m \frac{dI_m}{dt}$$

Transformador Real
Circuito Final Exacto

Del desarrollo anterior se observa que la inductancia de magnetización está sometida a la misma tensión que la del bobinado primario. Ahora podemos formular el circuito equivalente exacto del transformador real considerando:

3. Resistencia para la representación de las pérdidas (potencia activa)
4. Inductancia para la corriente de magnetización (potencia reactiva)



$L_m \gg L_1 \; y \; L_2$

$R_p \gg R_1 \; y \; R_2$

Transformadores

Circuito Equivalente Aproximado

El circuito exacto es **poco práctico** debido a la rama de excitación, pero se puede simplificar a un modelo "aproximado" que facilita los cálculos introduciendo un **error inferior al 5%** respecto al modelo exacto.

Este modelo sólo cambia la posición de la **rama de excitación**, y con ello simplifica el cálculo para efectos de análisis práctico.

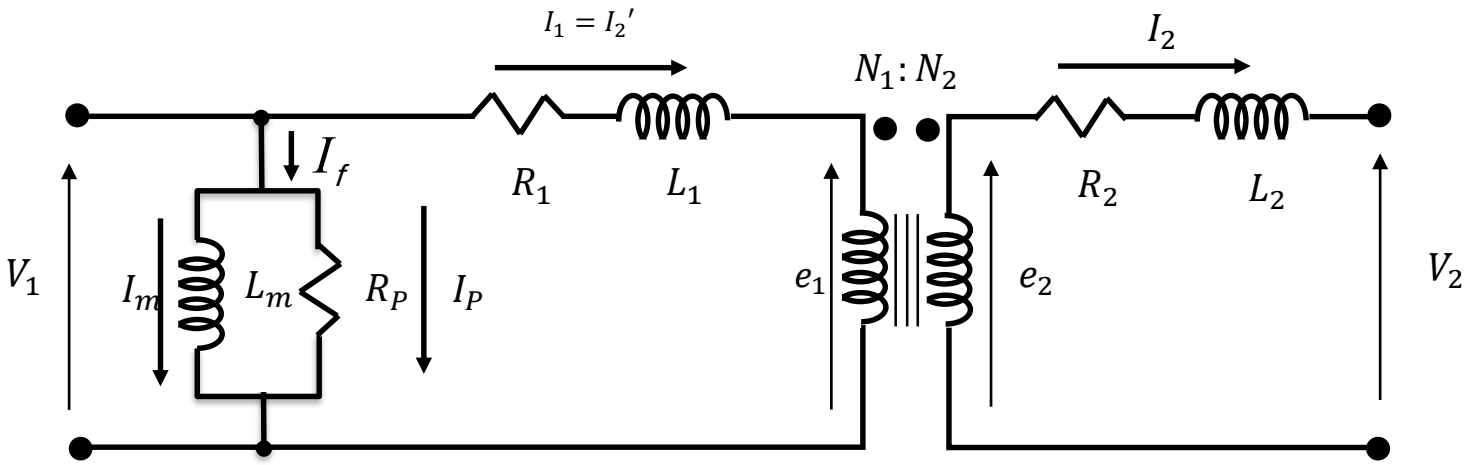
En general utilizaremos este modelo aproximado del transformador

$$I_\phi = I_m + I_P$$

I_Φ corriente de excitación

I_m corriente de magnetización

I_p corriente de pérdidas en el núcleo

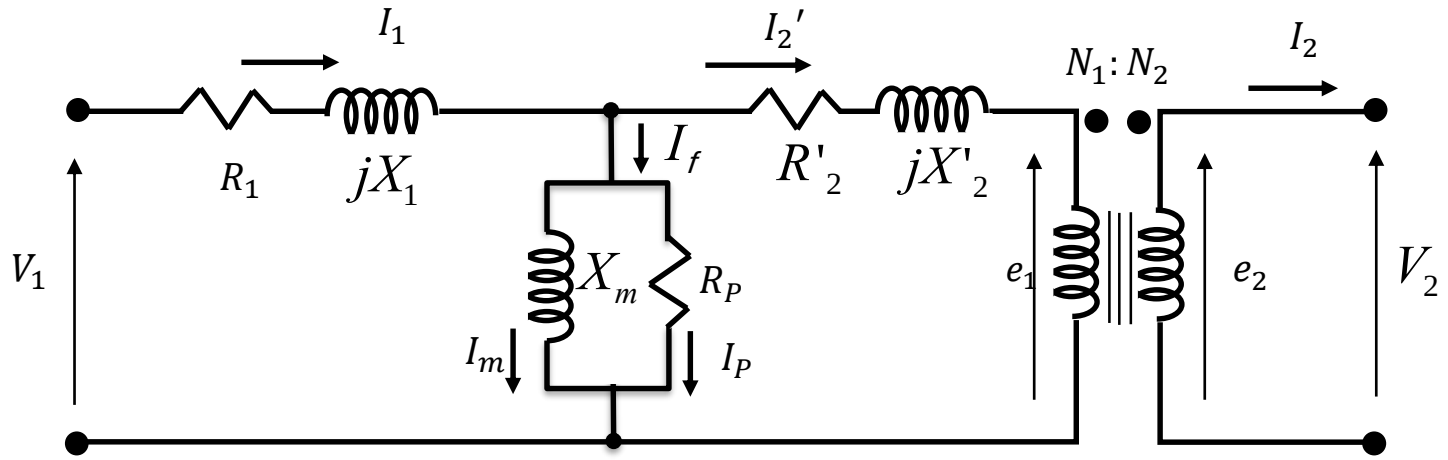


Transforma Real

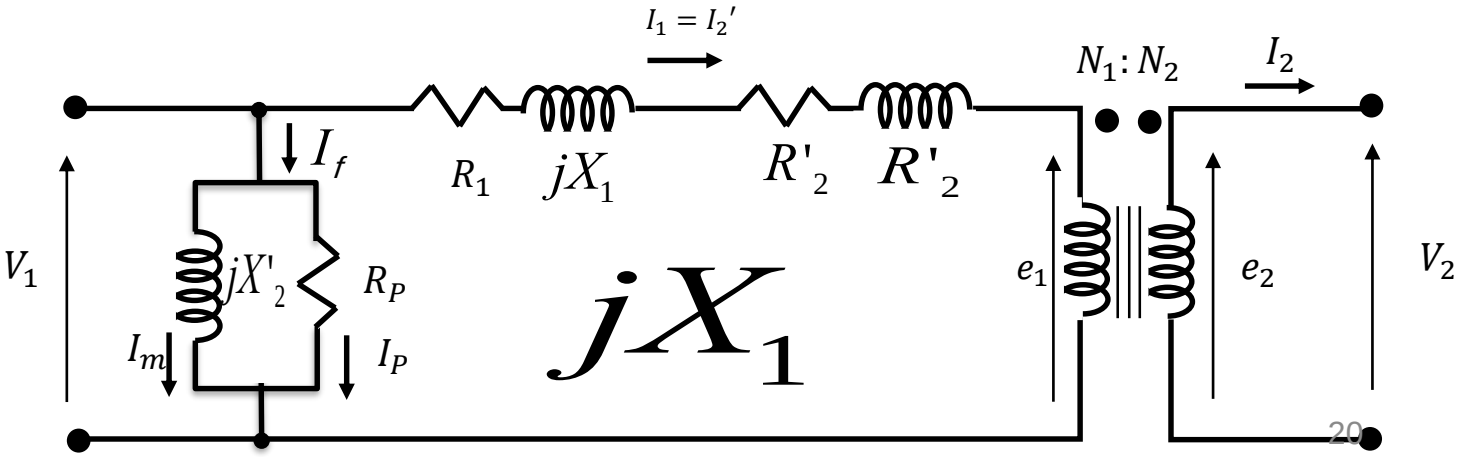
Resumen de Circuitos Equivalentes

$$X_1 = \omega L_1$$
$$X_2 = \omega L_2$$
$$X_m = \omega L_m$$

Circuito Exacto referido al primario



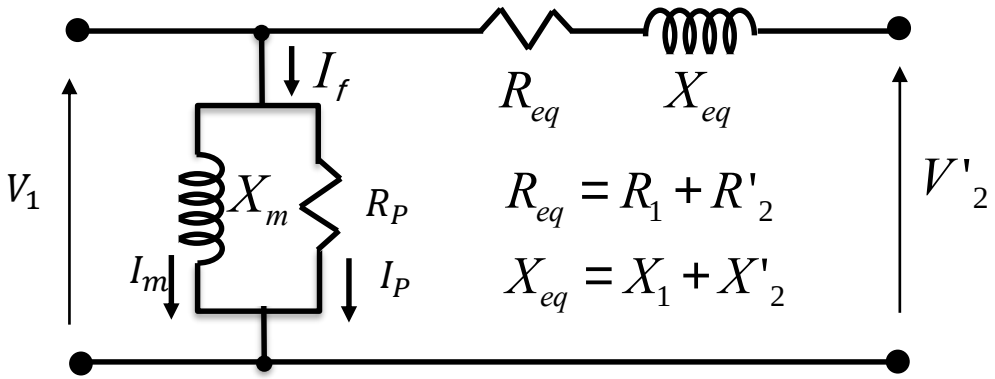
Circuito Aproximado referido al primario



Transforma Real

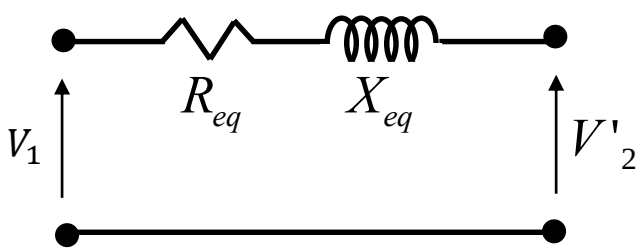
Resumen de Circuitos Equivalentes

Circuito Aproximado



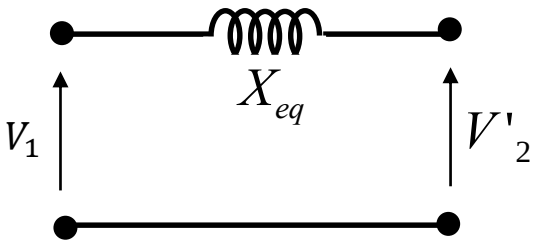
Sistemas medianos (circuito aproximado)

Circuito Aproximado



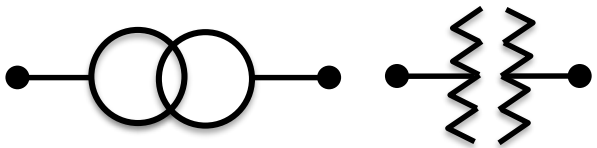
Sistemas relativamente grandes

Circuito Aproximado

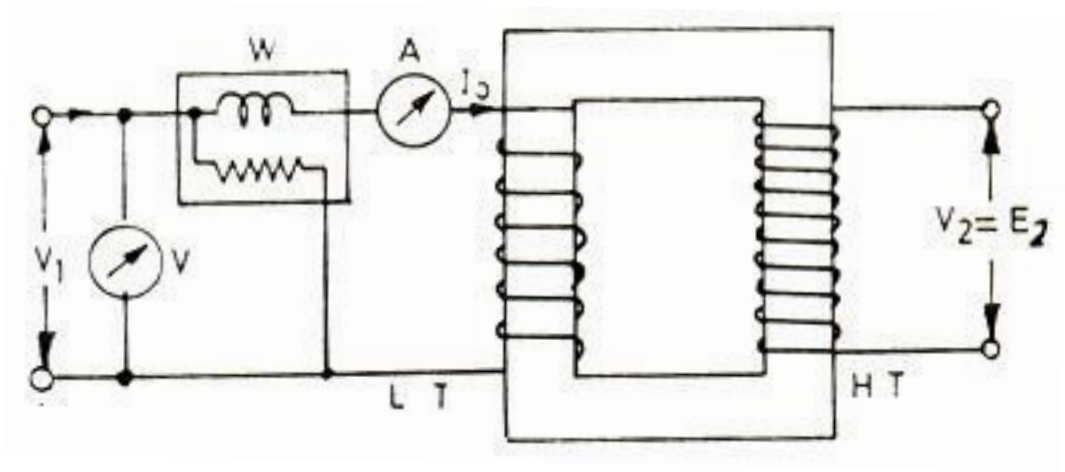


Sistemas grandes donde se supone trafo sin pérdidas.

Circuito Unilinial



Pruebas en C.A. C.C.
y
Regulación de Voltaje



Transformadores

Pruebas de C.A. y C.C.

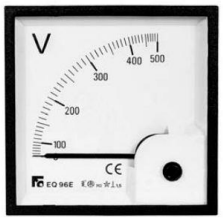
Los métodos para determinar los parámetros de un transformador son dos:

- **Prueba de Circuito Abierto (C.A.)**
- **Prueba de Cortocircuito (C.C.)**

Estas pruebas se realizan con los instrumentos:

- Voltímetro
- Amperímetro
- Wattmetro













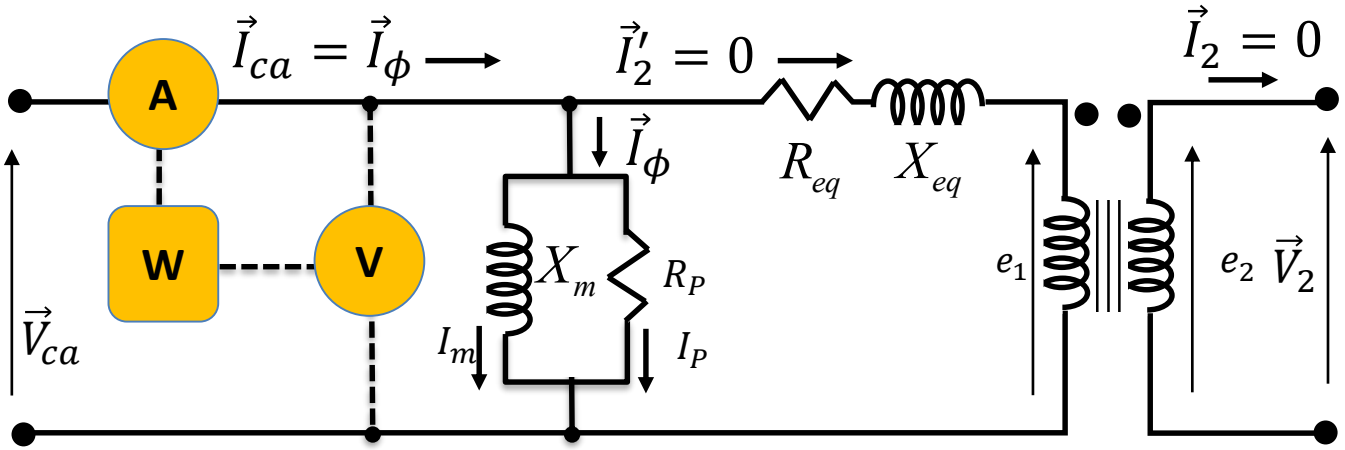
Transformadores

Prueba de Circuito Abierto (C.A.)

Prueba para determinar los parámetros de la **rama de excitación** (núcleo); **R_P** y **X_m**.

- El lado de BT se alimenta a **voltaje nominal**.
- El lado de AT se deja en **circuito abierto**.
- Se mide en el lado de BT el voltaje de entrada (**V_{nom}**), la corriente (**I_0**) y la potencia (**P_0**).

En el circuito **aproximado** se puede ver que toda la corriente va a la rama de excitación debido a que el trafo está en C.A. y sólo se está magnetizando el núcleo.



$$\vec{Y}_\phi = \frac{1}{R_P} + \frac{1}{jX_m}$$

$$\vec{Y}_\phi = G_p - jB_m$$

Y: admitancia
B: suceptancia
G: conductancia

$$G_p = \frac{P_{ca}}{V_{ca}^2}$$

$$\vec{Y}_\phi = \frac{I_{ca}}{V_{ca}} \angle -\varphi$$

$$\phi = \arccos \frac{P_{ca}}{V_{ca} \cdot I_{ca}}$$

$$B_m = \sqrt{|Y_\phi|^2 - G_p{}^2}$$

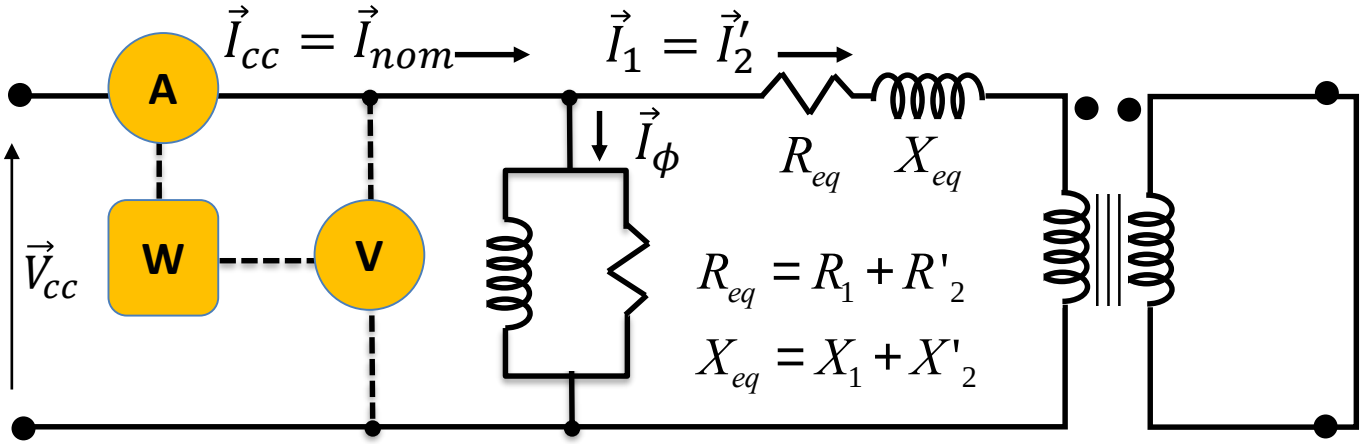
Transformadores

Prueba de Cortocircuito (C.C.)

Prueba para determinar los parámetros del primario y secundario (**R_1**, **X_1**, **R_2**, **X_2**).

- El lado de AT se **cortocircuita**.
- El lado de BT se alimenta con un voltaje bajo que genere **corriente nominal**.
- Se mide en el lado de BT voltaje de entrada (**V_{cc}**), la corriente (**I_{nom}**) y la potencia (**P_{cc}**).

Se utiliza el circuito **aproximado** (en ocaciones se desprecia la corriente de excitación frente a la corriente de las bobinas porque es muy baja en comparación).



Aproximación con sustento!

¿Por qué?

$R_1 = R_2' = R_{eq}/2$

$X_1 = X_2' = X_{eq}/2$

Despreciando I_Φ

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \qquad |Z_{eq}| = \frac{|V_{cc}|}{|I_{cc}|} \qquad X_{eq} = \sqrt{|Z_{eq}|^2 - R_{eq}^2}$$

Sin despreciar I_Φ

$$\vec{Z}_{eq} = \frac{V_{cc}\angle 0°}{\vec{I}_{cc} - \vec{I}_\phi} \qquad \vec{I}_\phi = V_{cc}\angle 0° \cdot \vec{Y}_\phi \qquad \vec{I}_{cc} = I_{cc}\angle -\varphi$$

Transformadores

Regulación de Tensión

Las **resistencias de las bobinas** y las **inductancias de fuga** producen que el voltaje a la salida del transformador varíe según la carga (sin variar V_1)

La caída interna del dispositivo es muy importante cuando se opera con cargas altas y se necesita tener una tensión de salida estabilizada o al menos dentro de un margen de operación nominal y normal.

Se define **regulación de un transformador** como la razón entre la caída de voltaje con carga (respecto a sin carga) y el voltaje a plena carga, expresada en porcentaje (operando con voltaje y carga nominal):

$$Reg = \frac{V_0 - V_L}{V_L} * 100\%$$

V_0: voltaje en vacío (generalmente secundario)

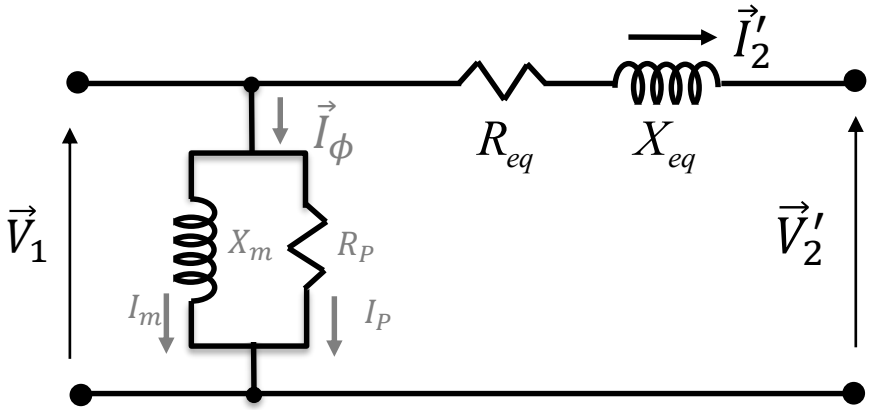
V_L: voltaje a plena carga (generalmente secundario)

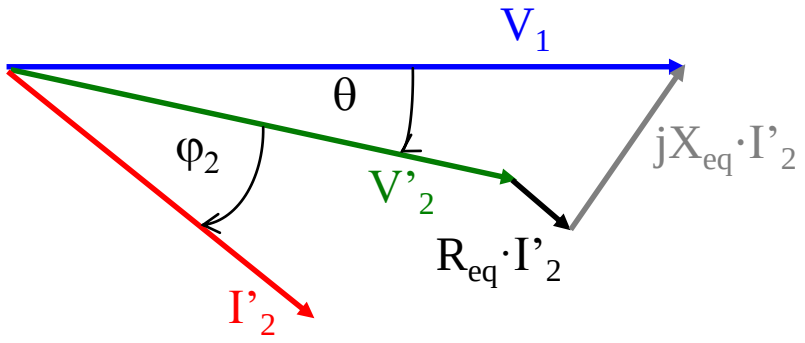
La **regulación ideal es cero para cualquier carga**, sin embargo en la realidad se tienen valores positivos (cargas inductivas/resistivas) o negativos (cargas capacitivas). Para cumplir con las normas se utilizan **Taps, capacitancias o inductancias**.

Transformadores

Regulación de Tensión

La regulación de tensión depende de la característica de la carga. Si la carga es resistiva e inductiva la regulación es positiva y si es capacitiva ($\varphi_2 < 0$) puede ser nula o negativa.





$$\theta = 1 - 2° \approx 0° \quad \Rightarrow \quad V_1 = V'_2 + R_{eq} I'_2 \cos\varphi_2 + X_{eq} I'_2 \sin\varphi_2$$

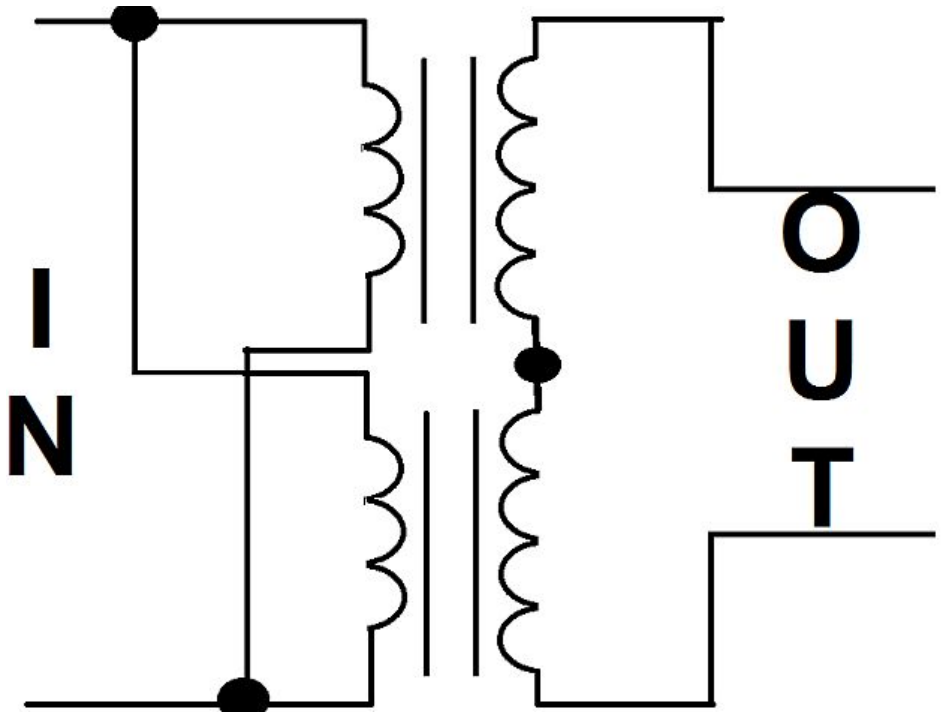
$$I'_{02} = 0 \quad \Rightarrow \quad V'_{02} = V_1 \quad \Rightarrow \quad V'_{02} - V'_2 = R_{eq} I'_2 \cos\varphi_2 + X_{eq} I'_2 \sin\varphi_2$$

$$Reg = \frac{V_0 - V_L}{V_L} * 100\% \quad \Rightarrow$$

$$Reg = \frac{1}{V'_2}\left(R_{eq} I'_2 \cos\varphi_2 + X_{eq} I'_2 \sin\varphi_2\right)$$

$$Reg = \frac{1}{V'^2_2}\left(R_{eq} P_2 + X_{eq} Q_2\right)$$

Conexión en Paralelo y Serie



Transformadores

Conexión en Paralelo

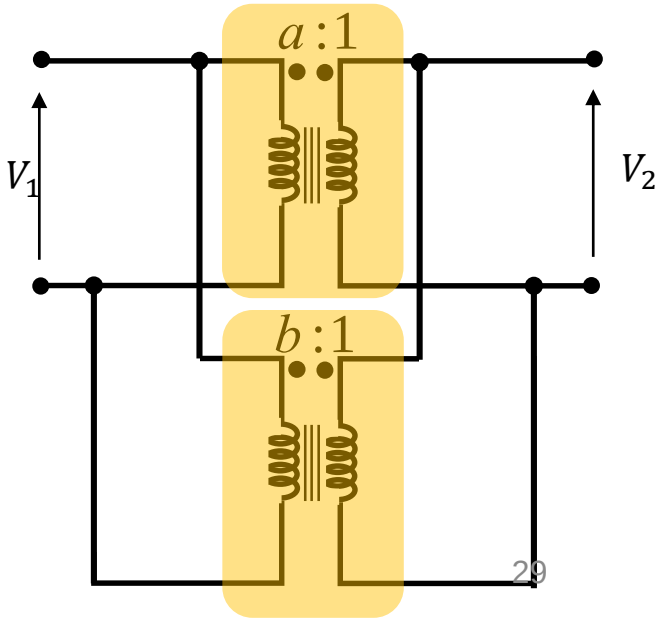
La conexión en paralelo de transformadores puede ser extremadamente útil y una solución económica en algunos casos, como cuando:

- La carga aumenta y el transformador no es capaz de abastecerla.
- La carga es crítica y requiere redundancia para asegurar la alimentación ante fallas o mantenimientos.

La conexión paralelo permite aumentar la capacidad de corriente transferida (potencia) manteniendo la tensión nominal en lado de alta y baja tensión.

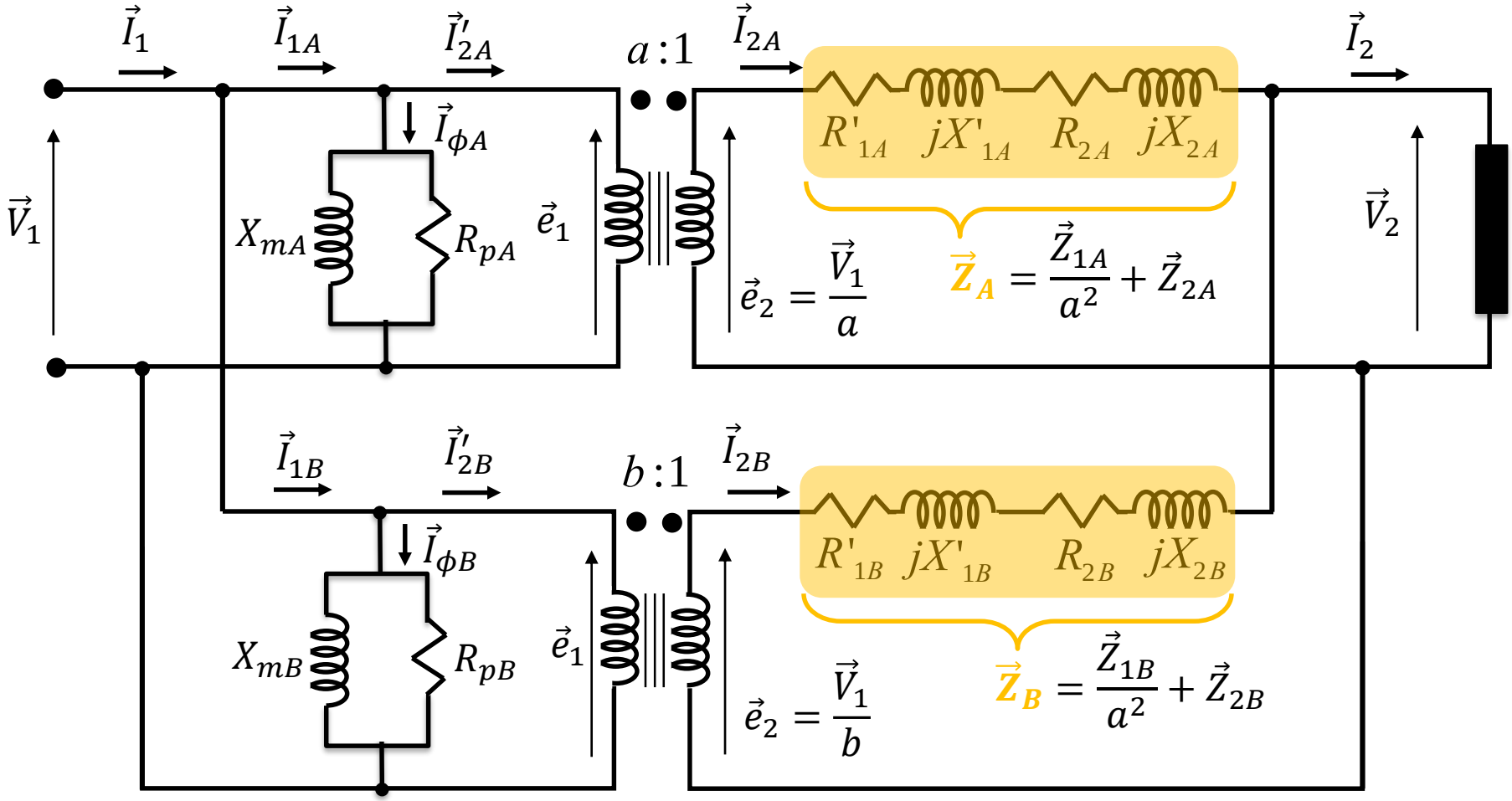
Para conectar transformadores en paralelo se requiere cumplir algunas condiciones:

- Tensiones secundarias en Fase (**Polaridad**).
- Tensiones primarias y secundarias iguales (**Relación de tensiones idénticas**).
- **Impedancias** de cortocircuito idénticas (idealmente pero no es condicionante).



Transformadores

Conexión en Paralelo



Transformadores

Conexión en Paralelo

Del circuito anterior tenemos:

$$\vec{I}_{2B} = \vec{I}_2 - \vec{I}_{2A} \qquad \vec{I}_{2A} = \frac{\vec{V}_1/a - \vec{V}_2}{\vec{Z}_A}$$

$$\vec{I}_{2B} = \vec{I}_2 - \frac{\vec{V}_1/a - \vec{V}_2}{\vec{Z}_A} \qquad \vec{V}_2 = \frac{\vec{V}_1}{b} - \vec{Z}_B\vec{I}_{2B}$$

$$\vec{I}_{2B} = \vec{I}_2 - \frac{\vec{V}_1/a - \vec{V}_1/b + \vec{Z}_B\vec{I}_{2B}}{\vec{Z}_A}$$

$$\vec{I}_{2B} = \vec{I}_2 - \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_A}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right) - \frac{\vec{Z}_B}{\vec{Z}_A}\vec{I}_{2B} \qquad \vec{I}_{2B}\left(1 + \frac{\vec{Z}_B}{\vec{Z}_A}\right) = \vec{I}_2 - \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_A}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$$

$$\vec{I}_{2B} = \left(\frac{\vec{Z}_A}{\vec{Z}_A + \vec{Z}_B}\right)\vec{I}_2 - \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_A + \vec{Z}_B}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$$

Transformadores

Conexión en Paralelo

Despejamos y obtenemos la corriente de B (se hace lo mismo para A):

$$\vec{I}_{2B} = \left(\frac{\vec{Z}_A}{\vec{Z}_A + \vec{Z}_B}\right)\vec{I}_2 - \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_A + \vec{Z}_B}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$$

Corriente aportada por B a la carga | **Corriente circulante**

$$\vec{I}_{2A} = \left(\frac{\vec{Z}_B}{\vec{Z}_A + \vec{Z}_B}\right)\vec{I}_2 + \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_A + \vec{Z}_B}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$$

Corriente aportada por A a la carga | **Corriente circulante**

Se puede ver que hay una **corriente circulante** entre ambos transformadores que sólo se elimina cuando la razón de vueltas es idéntica (**a=b**).

$$\frac{\vec{I}_{2A}}{\vec{I}_{2B}} = \frac{\vec{Z}_B}{\vec{Z}_A}$$

Si además despreciamos la rama de excitación tenemos la siguiente relación de potencias:

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{\vec{V}_1 \cdot \vec{I}_{1A}^*}{\vec{V}_1 \cdot \vec{I}_{1B}^*} = \frac{\vec{I}_{1A}^*}{\vec{I}_{1B}^*} = \frac{\vec{Z}_B}{\vec{Z}_A}$$

Transformadores

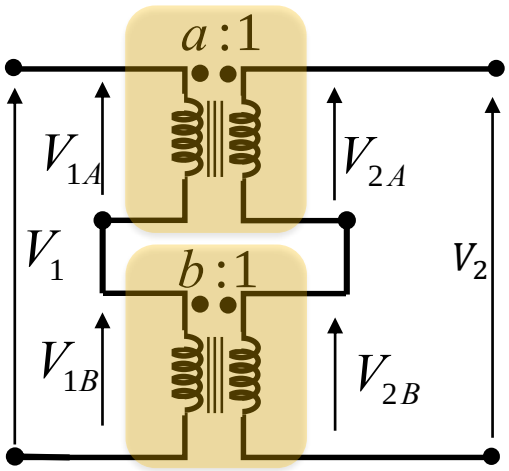
Conexión en Serie y Paralelo-Serie

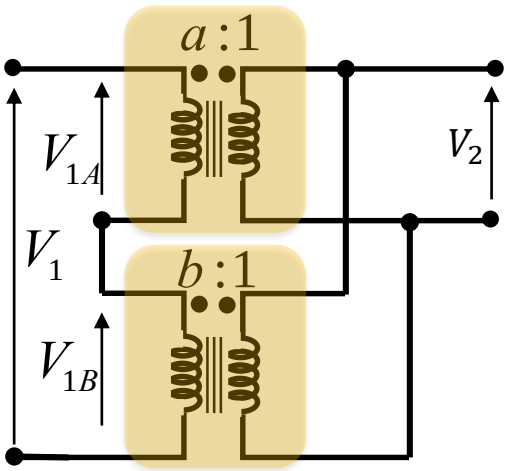
La conexión en serie de transformadores permite cambiar el voltaje en el secundario y es un tipo de conexión muy poco común (no se utiliza en sistemas planificados) pero puede ser una solución para aplicaciones muy específicas.

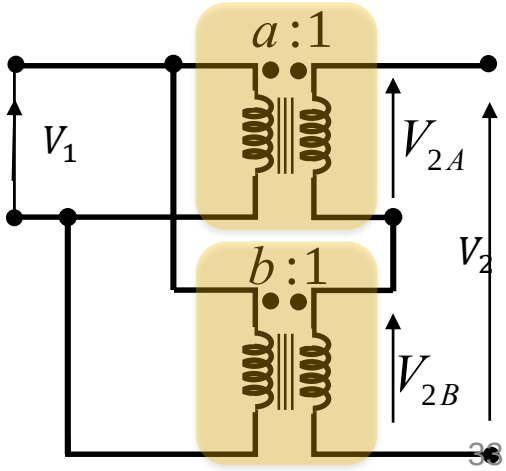
- Primarios en serie – Secundarios en serie (¿a=b?)
- Primarios en serie – Secundarios en paralelo
- Primarios en paralelo – Secundarios en Serie

Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tensión del primario y la tensión que se obtendrá en el secundario
- Impedancias de los transformadores y corrientes nominales
- Impedancias de cortocircuito (ideal que sean idénticas pero no es condicionante)







Autotransformador y Taps



Autotransformadores

Características

El Autotransformador conecta los devanados primarios y secundarios **(se pierde la aislación**) resultando en una mayor capacidad (potencia) del transformador y muy útil cuando se interconectan redes de tensiones similares (*a* cercano a 1).

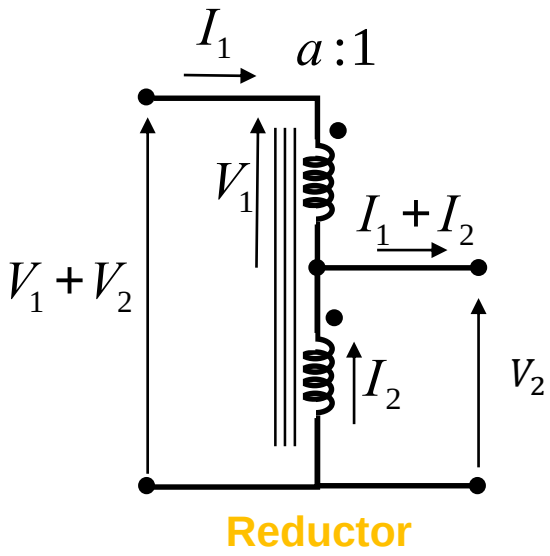
Los bobinados primario y secundario pueden ser conectados de forma **aditiva** o **sustractiva** para elevar o disminuir la tensión de salida respectivamente.

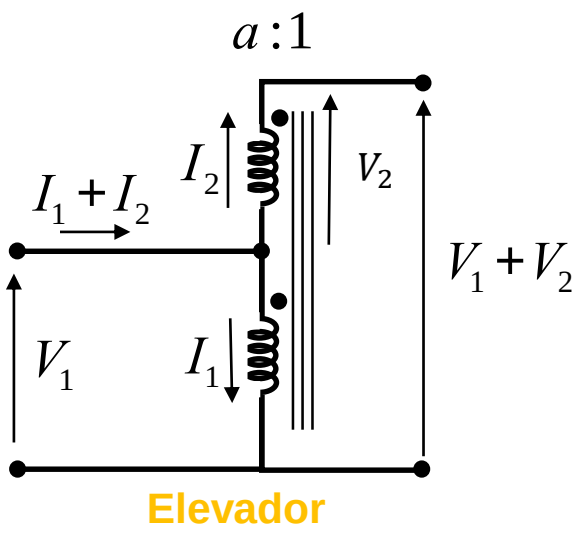
Se pierde la aislación eléctrica y la aislación interna debe ser mejor pero se requiere menos fierro y cobre dado que basta una sola bobina con 3 tomas, lo que se traduce en:

- Menor costo, peso y volumen a igual potencia (mayor capacidad)
- Mejor eficiencia y regulación (menor resistencia e impedancia)

La corriente de salida tiene una componente aportada por **conducción** directa y otra por **inducción** electromagnética.

La corriente cortocircuito es mayor que la nominal del trafo.





Autotransformadores

Reductor

Consideremos un transformador convencional conectado como autotransformador reductor y calculemos la nueva relación de transformación a':

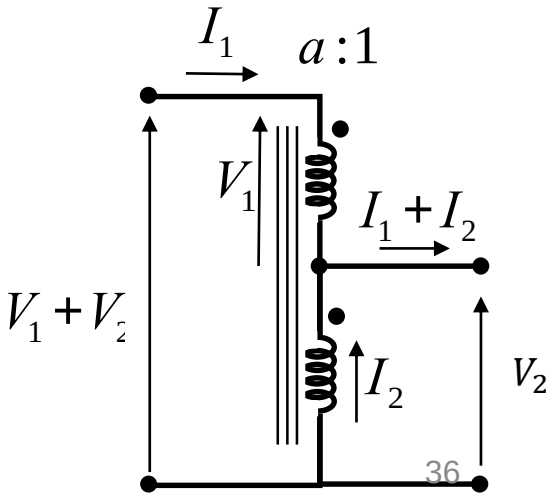
$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{V_1 + V_2}{V_2} = 1 + \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 + \frac{N_1}{N_2} = a' \Rightarrow a' = 1 + a$$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{I_1 + I_2}{I_1} = 1 + \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \frac{I_{out}}{I_{in}} = 1 + \frac{N_1}{N_2} = a' \Rightarrow \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{a'}$$

Veamos la relación de potencia entre el transformador convencional y el auto-transformador (suponiendo que no hay pérdidas):

$$S_{auto} = (V_1 + V_2)I_1 = V_2(I_1 + I_2)$$
$$S_{trafo} = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$\frac{S_{auto}}{S_{trafo}} = 1 + \frac{1}{a} = 1 + \frac{1}{a' - 1}$$



Resumen AT reductor: reduce el voltaje independiente de *a* pero proporcional a este. Si **a'≈1** la capacidad se dispara (si *a'* >>1 se pierden las ventajas)

Autotransformadores

Elevador

Consideremos un transformador convencional conectado como autotransformador elevador y calculemos la nueva relación de transformación a':

$$\frac{I_{in}}{I_{out}} = \frac{I_1 + I_2}{I_2} = 1 + \frac{I_1}{I_2} \Rightarrow \frac{I_{in}}{I_{out}} = 1 + \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{I_{in}}{I_{out}} = \frac{1}{a'}$$

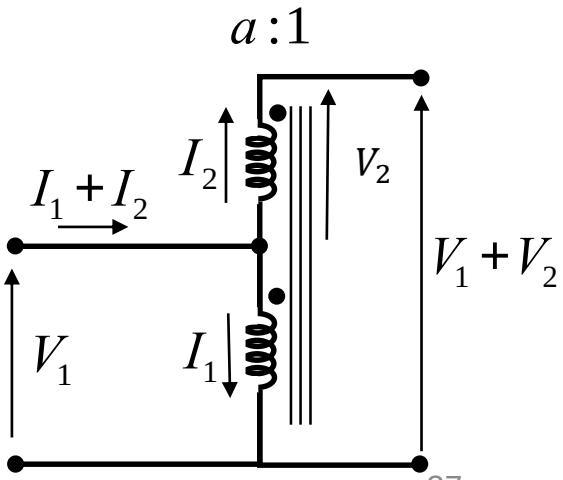
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_1 + V_2}{V_1} = 1 + \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow a' = \frac{a}{1+a}$$

Veamos la relación de potencia entre el transformador convencional y el auto-transformador (suponiendo que no hay pérdidas):

$$S_{auto} = V_1(I_1 + I_2) = (V_1 + V_2)I_2$$

$$S_{trafo} = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$\frac{S_{auto}}{S_{trafo}} = 1 + a$$



Resumen AT elevador: aumenta el voltaje independiente de *a pero si a* es menor que uno la elevación aumenta mucho más. La capacidad aumenta bastante si a es alto (**a'≈1**) y levemente si *a* es bajo.

Transformadores

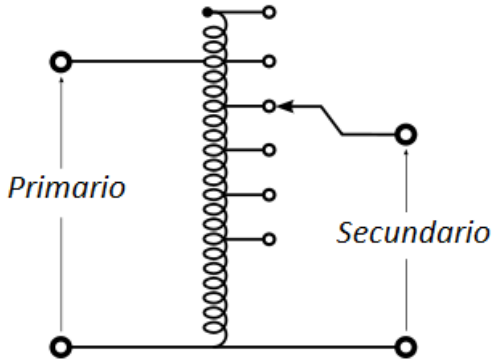
Taps

En los sistemas de potencia se utilizan transformadores y autotransformadores con múltiples tomas de conexión (**Taps**) para disminuir o aumentar el voltaje de salida. Esto permite obtener una relación de transformación variable.

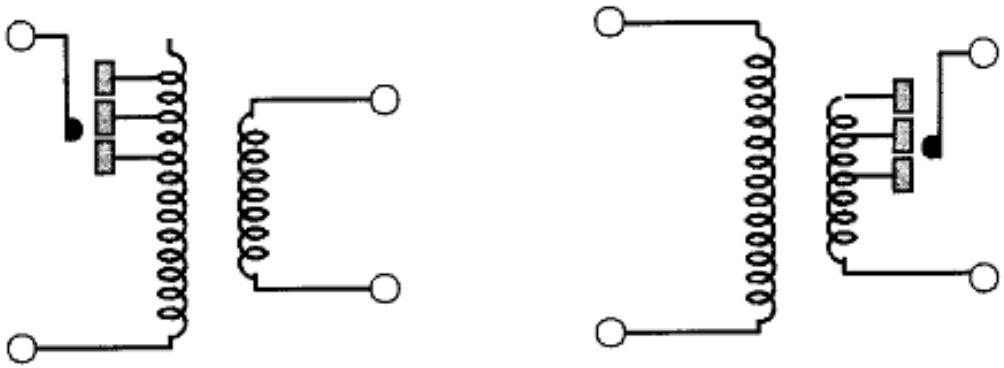
En los sistemas de potencia se buscan variaciones leves de voltaje para regular la tensión a su valor nominal (los taps se ajustan automática o manualmente, generalmente según la estación del año siguiendo el comportamiento del consumo).

Considerando las magnitudes en un sistema de potencia de distribución, los taps se suelen dejar en el lado primario donde la corriente es menor.

En otras aplicaciones (menor potencia) se dejan en el secundario y las variaciones pueden ser muy amplias y continuas (autotransformador variable para laboratorio).



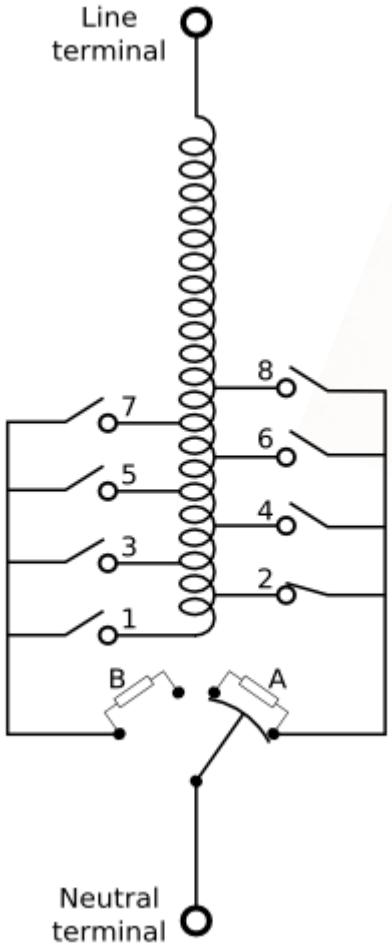
Taps en un Autotransformador



Transformador con tomas en el primario o en el secundario.

Transformadores

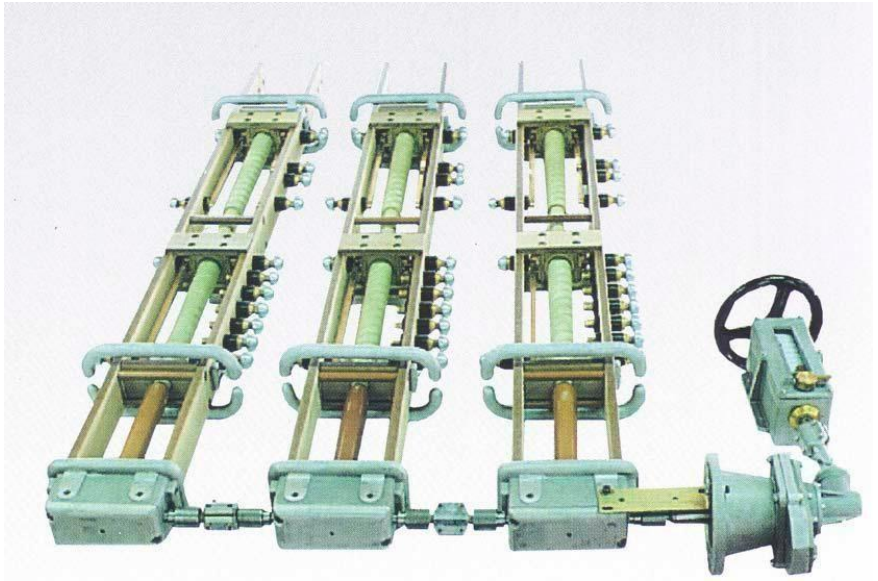
Taps







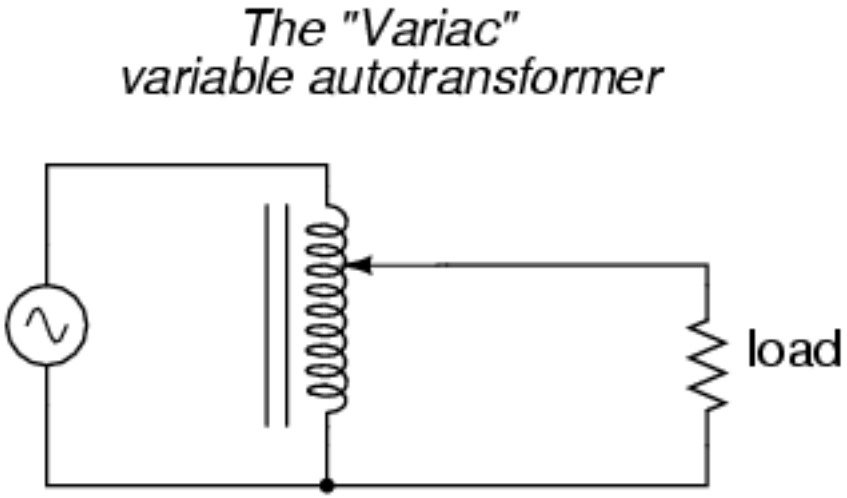




Autotransformadores

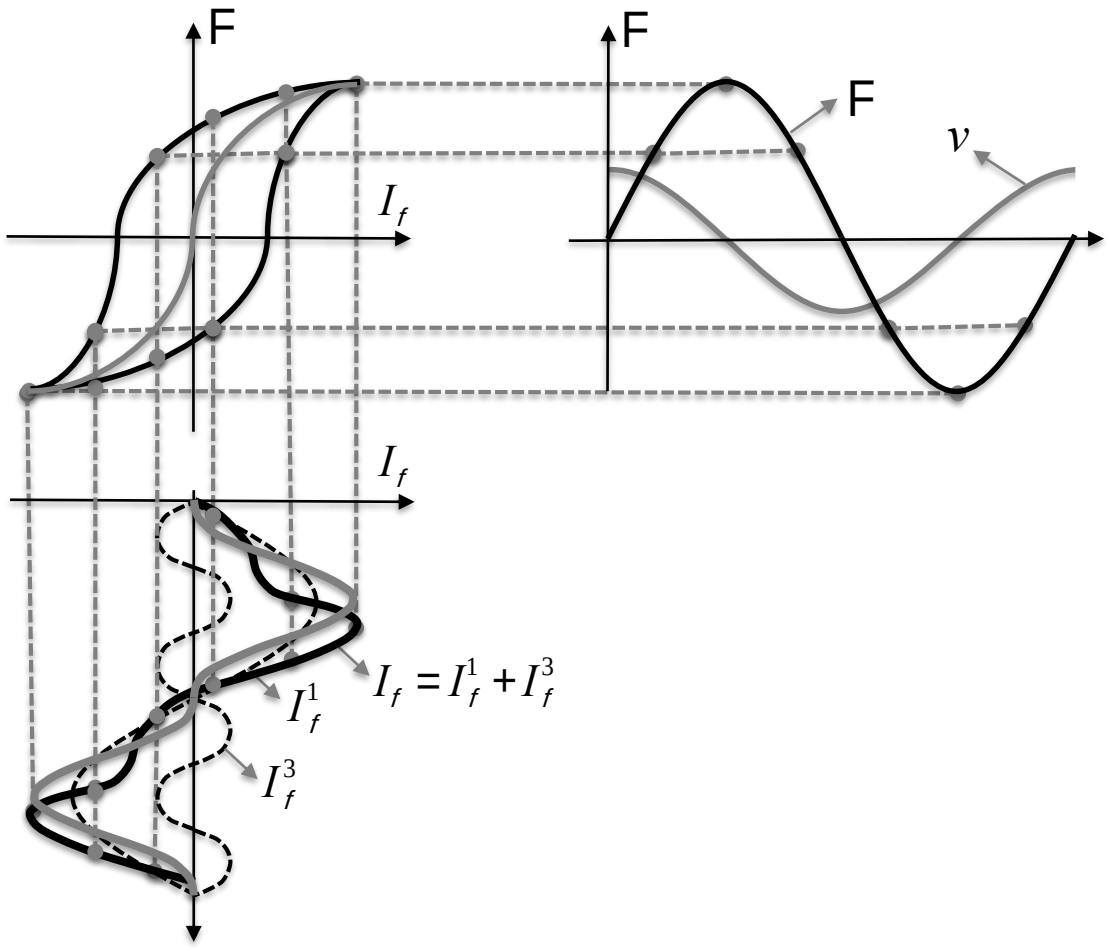
Taps continuo







Armónicos: Histéresis y Corriente de excitación



Transformadores
Corriente de Excitación

En un transformador se deben cumplir la **Ley de Faraday**:

$$e = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$ *e es sinusoidal ➔ Φ es sinusoidal*

También se deben cumplir la **Ley de Ampère**:

$$N \cdot I_m = \Re \cdot \Phi$$ *Φ es sinusoidal ➔ I será sinusoidal si Rel. es cte.*

Pero sabemos que el núcleo ferromagnético presenta un ciclo de histéresis y saturación, por lo tanto su reluctancia es variable. Por lo tanto, en la realidad la relación entre corriente y flujo no es lineal.
En conclusión tenemos dos posibles escenarios:

- El voltaje es sinusoidal ➔ flujo sinusoidal ➔ corriente NO sinusoidal
- La corriente es sinusoidal ➔ flujo No sinusoidal ➔ voltaje NO sinusoidal

En la realidad los transformadores son alimentados por voltajes sinusoidales, por lo tanto su **corriente de magnetización (i_m) no es sinusoidal**, y por consiguiente su **corriente de excitación (i_φ) tampoco es sinusoidal**.

Transformadores

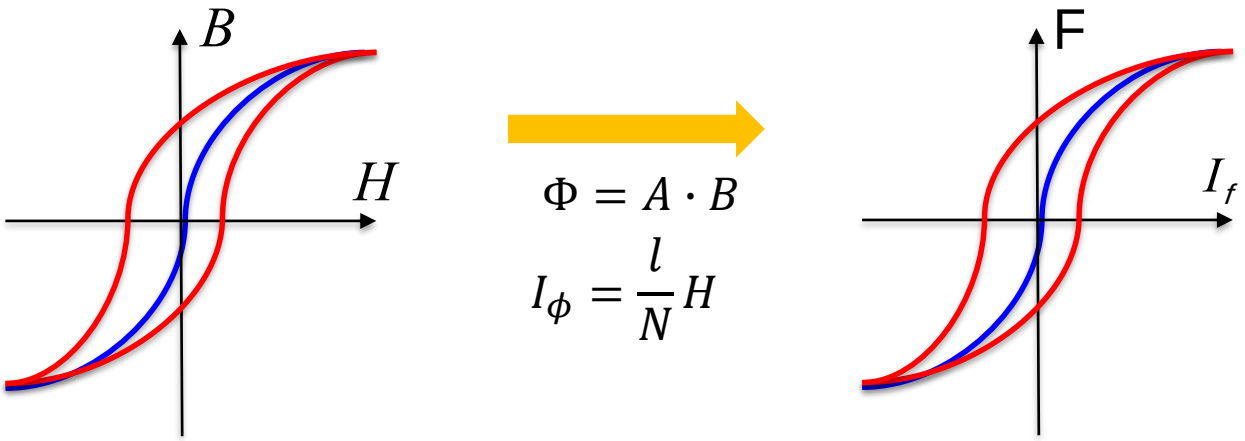
Corriente de Excitación

La corriente tiene una frecuencia fundamental coincidente con el voltaje pero no será sinusoidal. La única forma de obtener una corriente sinusoidal es distorsionando el voltaje y flujo (no es práctico).

El análisis de Fourier normalmente muestra un contenido armónico que incluye únicamente componentes impares:

- 45% 3ª Armónica
- 15% 5ª Armónica
- <15% Armónicas Superiores.

Se puede derivar la forma de la corriente desde la curva de magnetización:



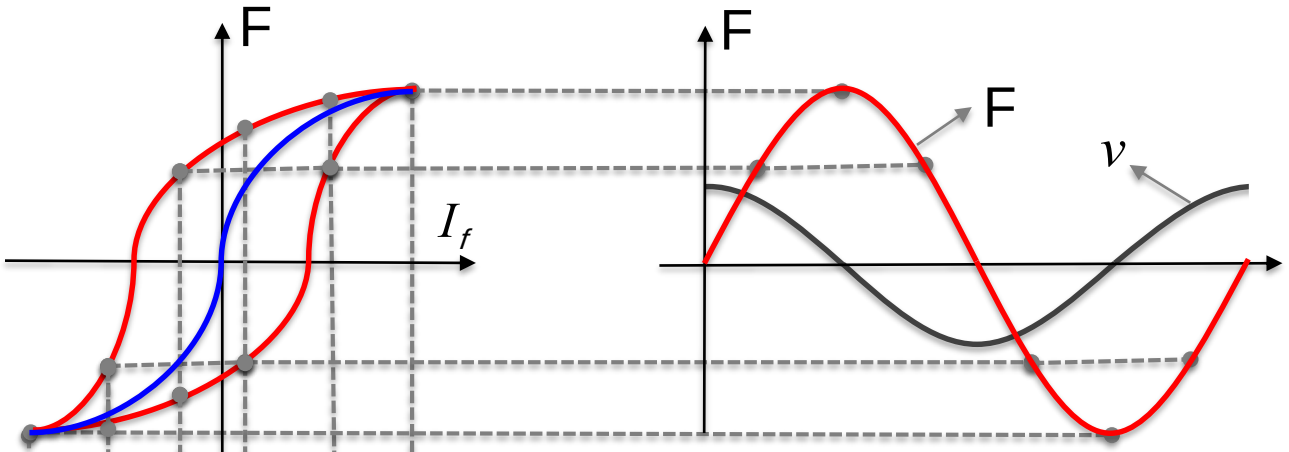
Circuitos Magnéticos

Circuito Magnético alimentado con AC

Circuito con curva B-H no lineal

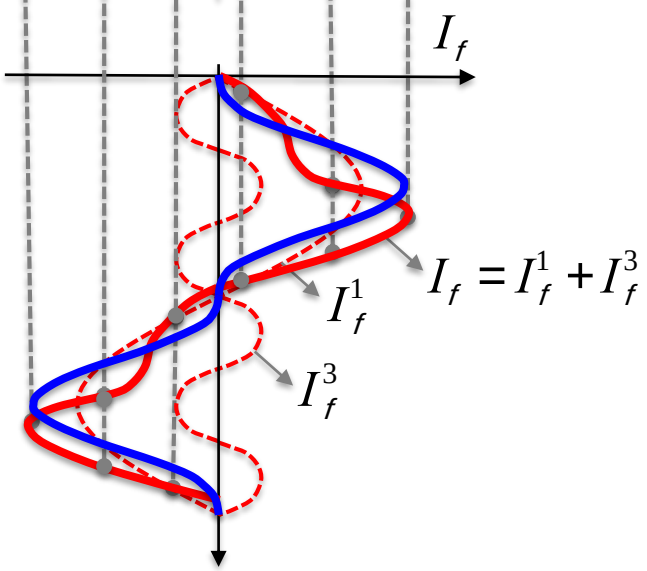
Con histéresis (Núcleo con pérdidas)

Sin histéresis (Núcleo sin pérdidas*)



Distorsión Asimétrica

Distorsión Simétrica



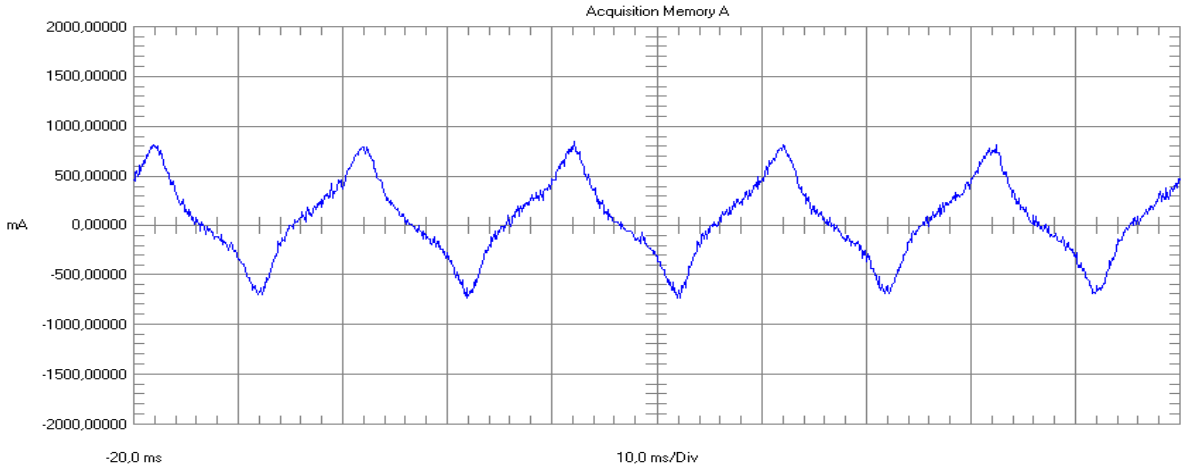
La **corriente** presenta armónicos impares y es asimétrica. La **tercera armónica** continua siendo la más relevante.

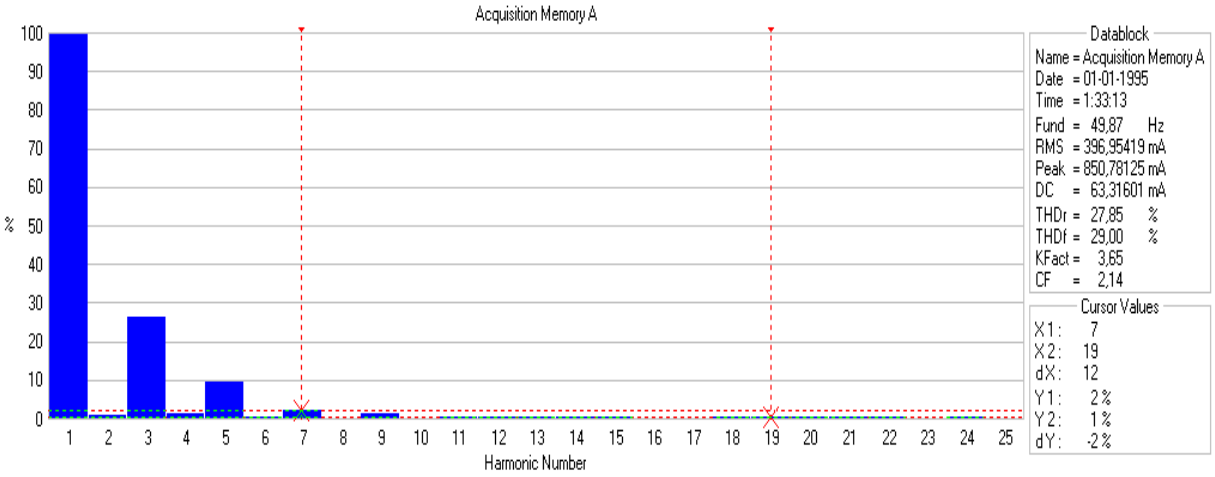
Si queremos **corriente sinusoidal**, el flujo (y **voltaje**) deben ser **distorsionados**.

Transformadores

Medición Experimental de Armónicos

Datos tomados de un Transformador Monofásico (IEE2273 Lab. de Máquinas Eléctricas)



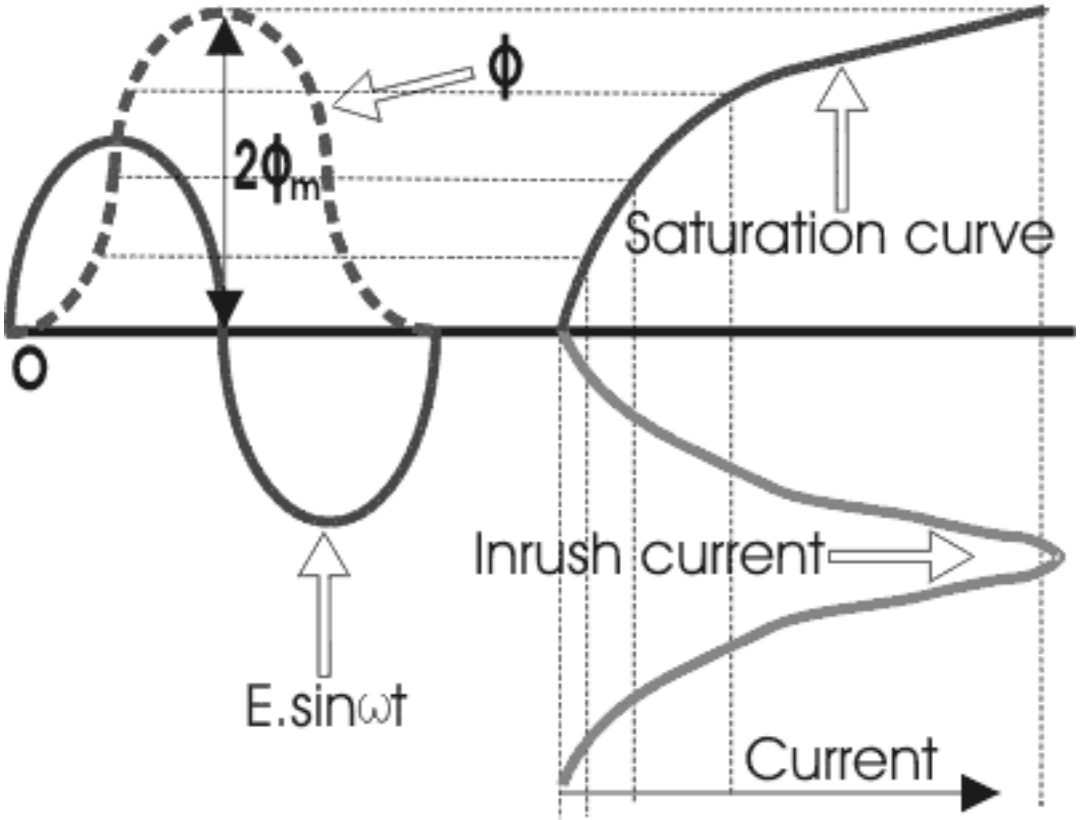


Oscilograma de la Corriente de Magnetización en una Prueba de Vacío

Nota: la corriente de excitación es **muy baja** en comparación a la nominal (armónica de corriente no es problema en trafo monofásico).

Análisis en Frecuencia del Oscilograma de Corriente

Inrush



Transformador
Inrush

Corriente de Inrush:

Es la corriente instantánea máxima transitoria cuando un componente es conectado.

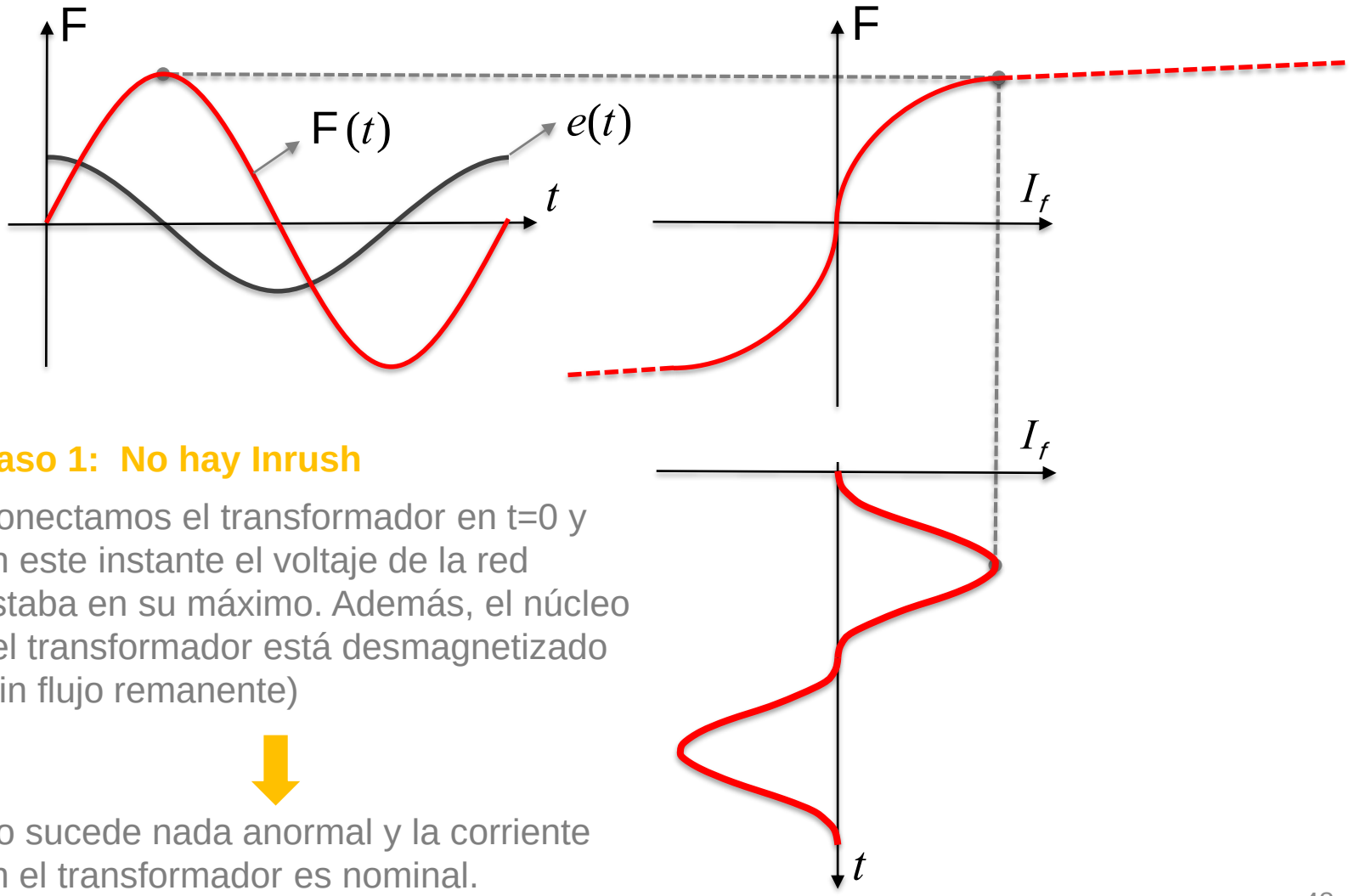
En el caso de los transformadores, es específicamente un fenómeno transitorio que puede ocurrir o no dependiendo de las condiciones iniciales del núcleo magnético (**flujo remanente**) y del instante en que se conecta el transformador a la fuente de alimentación AC.

La corriente de inrush puede ser levemente mayor a la nominal o inclusive más de **100 veces la nominal**, lo que es considerado equivalente a la corriente de cortocircuito.

El fenómeno depende de determinadas condiciones de voltaje inicial y flujo remanente, por lo que es poco común que suceda debido a que los transformadores funcionan de forma continua y rara vez son desconectados.

Este fenómeno se traduce en un problema al momento de dimensionar las protecciones del transformador por sobre-corrientes.

Transformador
Inrush

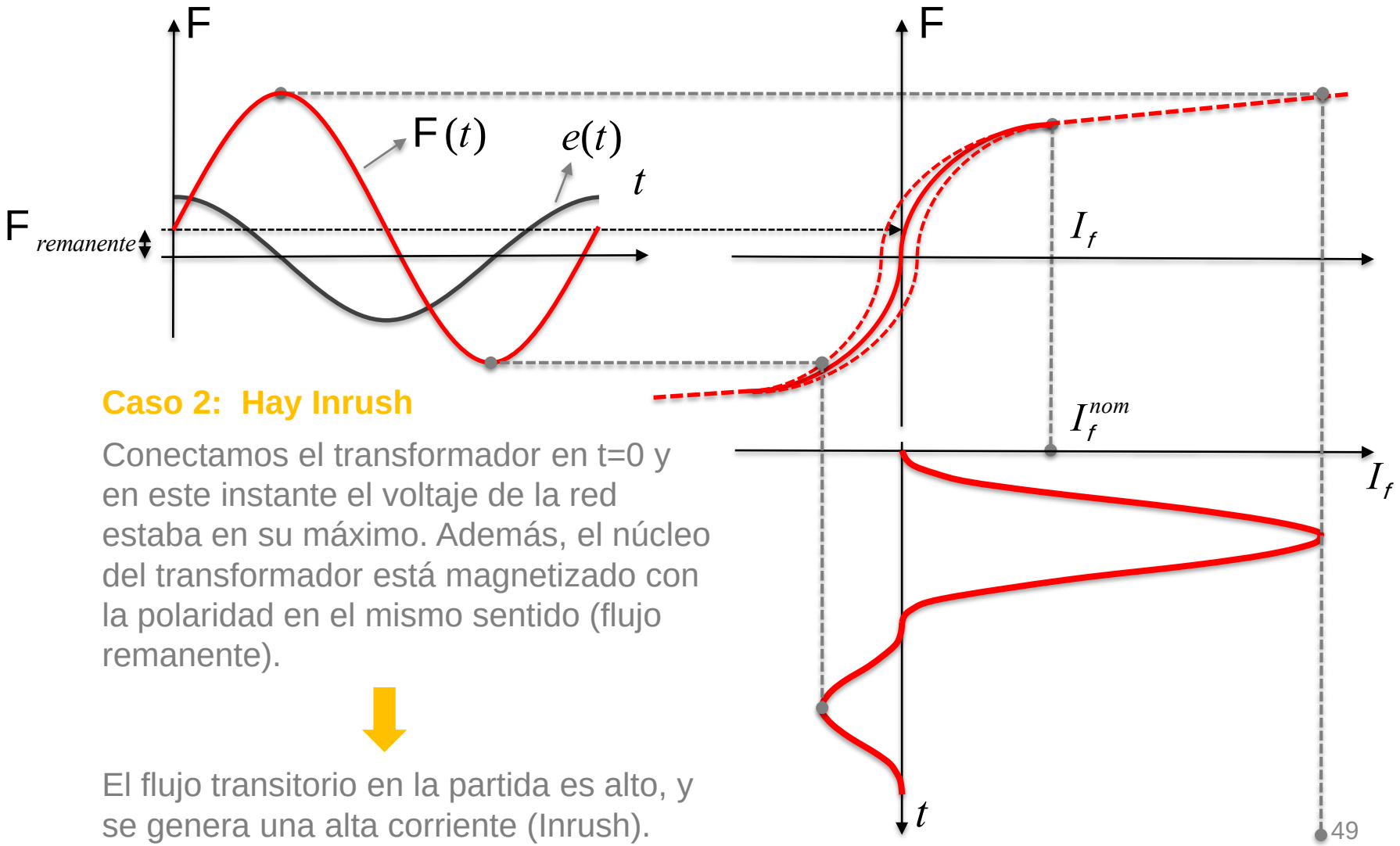


Caso 1: No hay Inrush

Conectamos el transformador en t=0 y en este instante el voltaje de la red estaba en su máximo. Además, el núcleo del transformador está desmagnetizado (sin flujo remanente)

No sucede nada anormal y la corriente en el transformador es nominal.

Transformador
Inrush



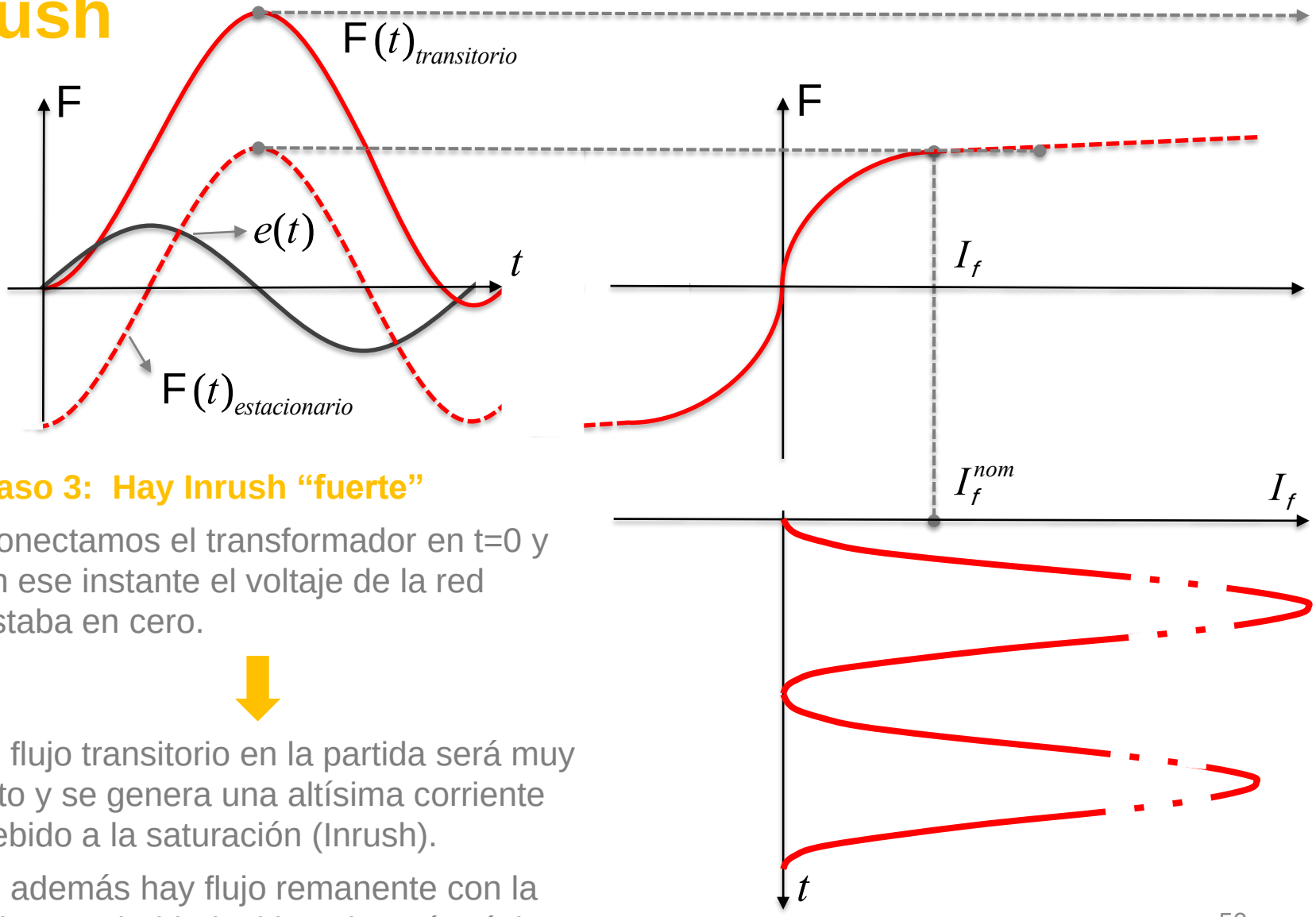
Caso 2: Hay Inrush

Conectamos el transformador en t=0 y en este instante el voltaje de la red estaba en su máximo. Además, el núcleo del transformador está magnetizado con la polaridad en el mismo sentido (flujo remanente).

El flujo transitorio en la partida es alto, y se genera una alta corriente (Inrush).

Transformador

Inrush



Caso 3: Hay Inrush "fuerte"

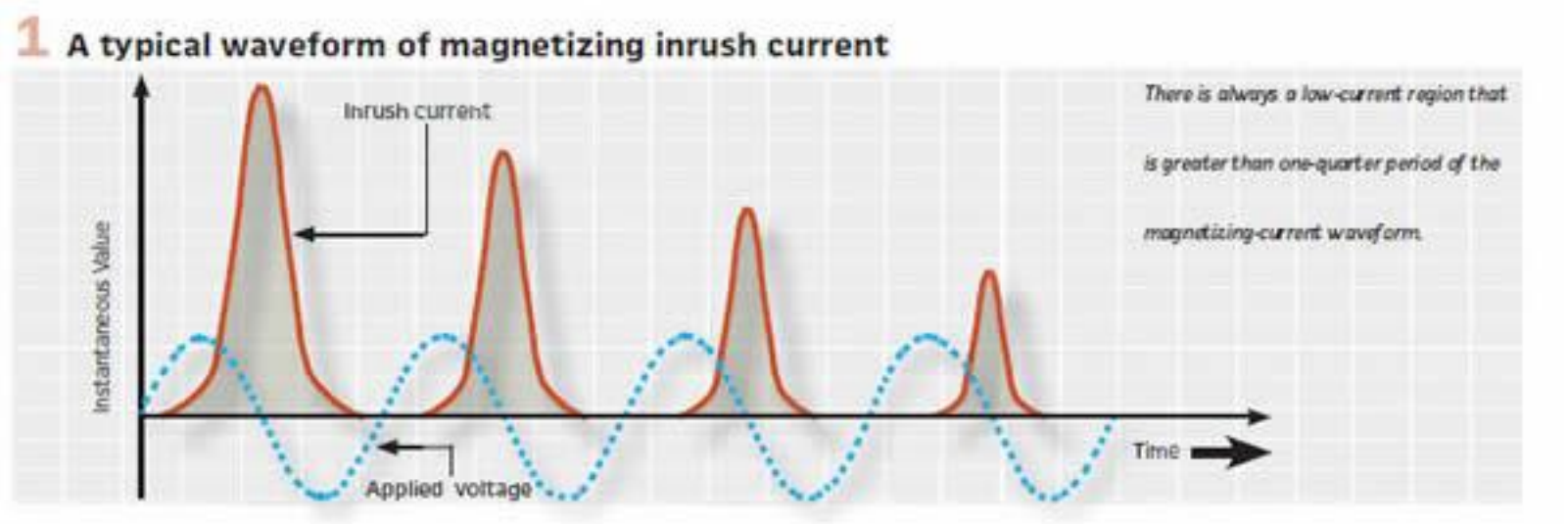
Conectamos el transformador en t=0 y en ese instante el voltaje de la red estaba en cero.

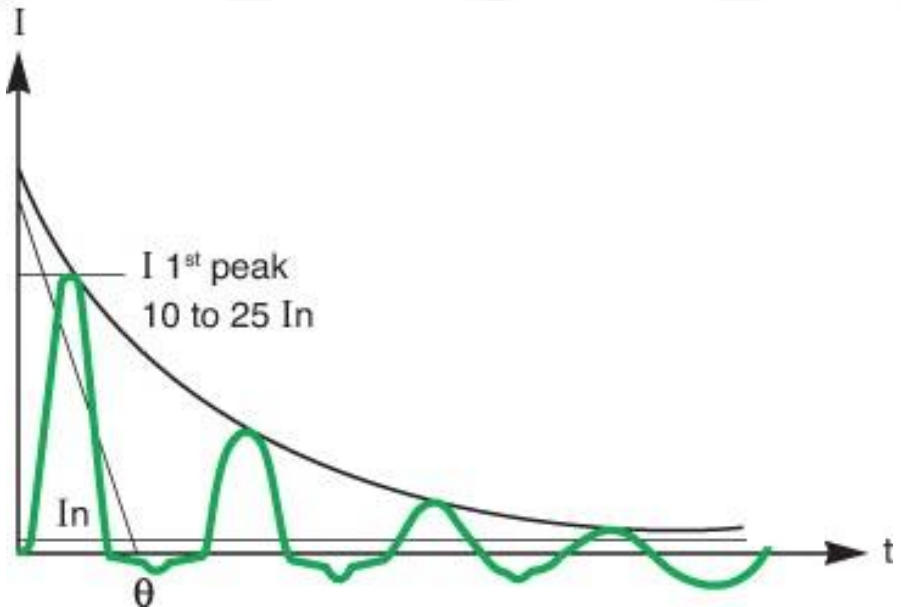
El flujo transitorio en la partida será muy alto y se genera una altísima corriente debido a la saturación (Inrush).

Si además hay flujo remanente con la misma polaridad, el inrush será máximo.

Transformador

Inrush





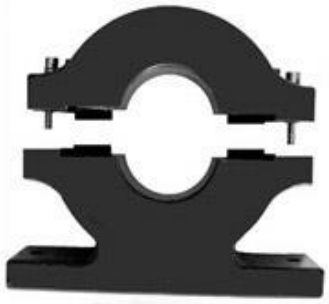
Transformadores de medida



MSQ-60



CA62/40



LMZC-0.5



RCT-35CT



SR, PR



LMZ1-0.5

Transformadores

Transformadores de Medida (TT/MM)

Cuando se opera con tensiones y/o corrientes muy elevadas que deben ser monitoreadas para fines operativos, de regulación y de protección, no es fácil conectar los equipos de medición y protección de forma directa.

La Generación y la Transmisión de energía eléctrica se realiza a varios incluso cientos de kV y kA. Por el contrario, la mayoría de los equipos de medición trabajan con magnitudes 10 y hasta 1000 veces menores.

Para estos casos se utilizan los “Transformadores de Medida” que se encargan de reflejar la corriente y voltaje en el secundario con una alta precisión aceptable.

Sus usos más recurrentes son:

- Aislamiento de Circuitos
- Normalización de Niveles
- Medición Remota
- Medición de Consumos
- Protecciones





Transformadores

Transformador de Voltaje (TT/VV)

Hablar de un transformador de voltaje podría ser absurdo si el transformador más común ya lo hace.

¿Qué diferencia hay respecto al convencional?

Respondamos esto con otras preguntas:

¿Cómo debiera ser la regulación de este transformador?

¿Qué elementos de su modelo impiden que se alcance dicho valor?

¿Qué pasa con la razón de vueltas?

Los fabricantes buscan reducir la influencia de la carga en la razón de transformación efectiva mediante los siguientes métodos:

- Utilizan un núcleo específico (acorazado), lo sobredimensionan y utilizan un bobinado especial (**minimizar las inductancias de fugas**).
- Emplean conductores de mayor sección (**reducen la resistencia**).

Inevitablemente siempre va a haber un error asociado, pero está normalizado en base a cargas predefinidas.

Transformadores

Transformador de Corriente (TT/CC)

Así como las impedancias de fuga afectan al voltaje…

¿Qué variable afecta la conversión precisa de la corriente en un trafo?

Recordemos las “perdidas del núcleo” y la “reluctancia no despreciable” de la derivación del modelo del transformador real:

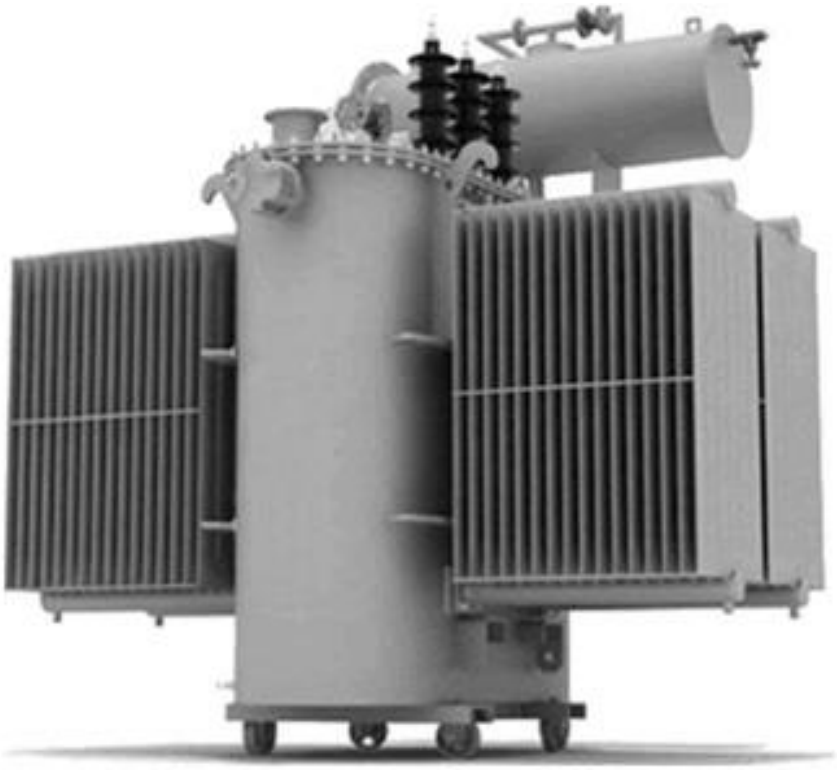
$$\sum N_i \cdot I_i = \Re \cdot \Phi \Rightarrow \Phi = \frac{N_1}{\Re}(I_1 - I_2' - I_P) \xrightarrow[\Phi \neq 0]{} I_m = I_1 - I_2' - I_P \Rightarrow \Phi = \frac{N_1}{\Re} I_m$$

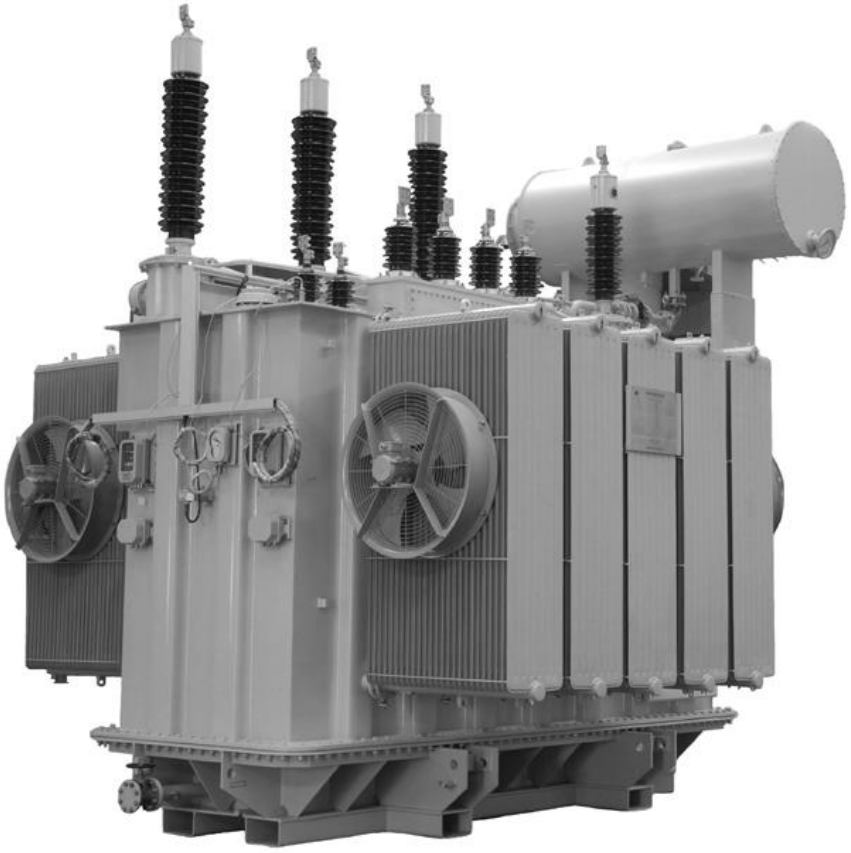
La conversión ideal se cumple sólo si **I_p (pérdida)** y **I_m (magnetización)** son nulas. Pero siempre hay pérdidas en el núcleo e I_m es requisito para tener Φ. Además, la magnitud y factor de potencia de la carga también alteran el valor de la corriente por la rama de núcleo (ver modelo exacto del trafo).

Solución: Para lograr la máxima precisión en esos transformadores hay que fabricar núcleos de bajísima histéresis, alta resistencia y operarlos con densidades de flujo bajas para **minimizar la corriente de excitación.**

Siempre habrá error, pero está normalizado en base a cargas predefinidas (ANSI, VDE, entre otras).

Transformadores Trifásicos





Transformadores Trifásicos
Características

Los transformadores trifásicos son indispensables en los sistemas de transmisión y distribución. También son muy utilizados en la industria para alimentar cargas especificas y reducir los armónicos generados por sistemas electrónicos mediante conexiones especiales.

Los transformadores trifásicos tienen **ventajas** sobre los monofásicos:

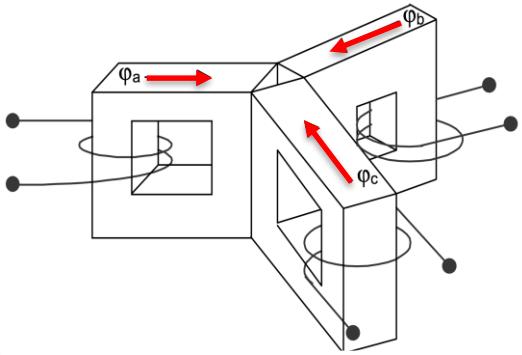
- Tienen menor **peso y volumen** a igual capacidad (los flujos se distribuyen de mejor forma en el nucleo).
- Tienen **menor costo** a igual capacidad.
- Algunas conexiones permiten **eliminar los armónicos** generados.

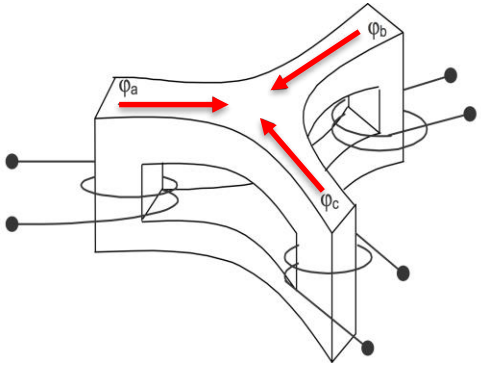
Los transformadores trifásicos se pueden obtener de dos formas:

- Diseño como transformadores trifásicos (núcleo trifásico).
- Utilizando un banco de transformadores monofásicos.

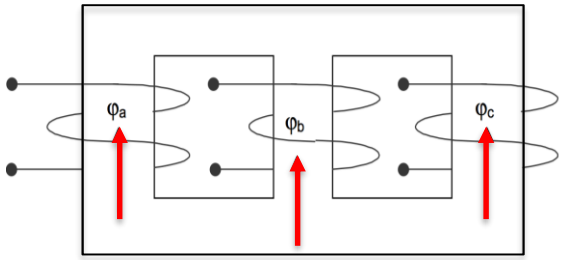
Transformadores Trifásicos
Características del Núcleo

Tipo Núcleo: Si el sistema es equilibrado no se requiere pierna central. Por lo tanto este tipo de núcleo dificulta la circulación de 3ª armónica en el flujo (encuentra camino por el aire) ➔ el voltaje tampoco tendra 3ª armónica (será sinusoidal).

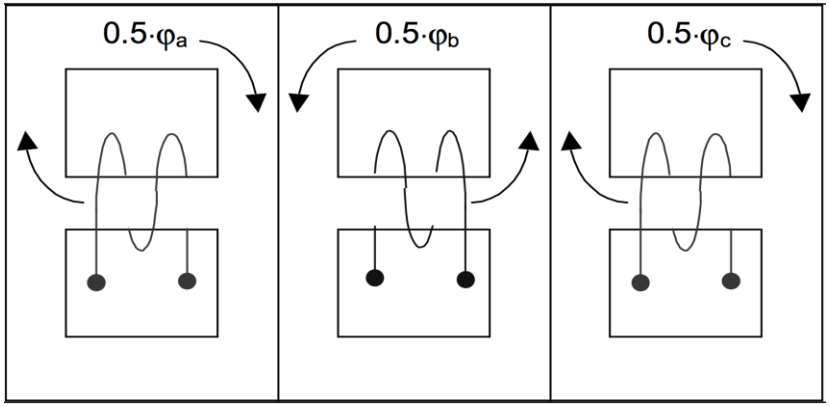




$$F_A + F_B + F_C = 0$$



Tipo Acorazado: La disposición de la bobina central invertida permite una mejor distribución de los flujos (reducción de fierro ➔ menor costo, peso y volumen).

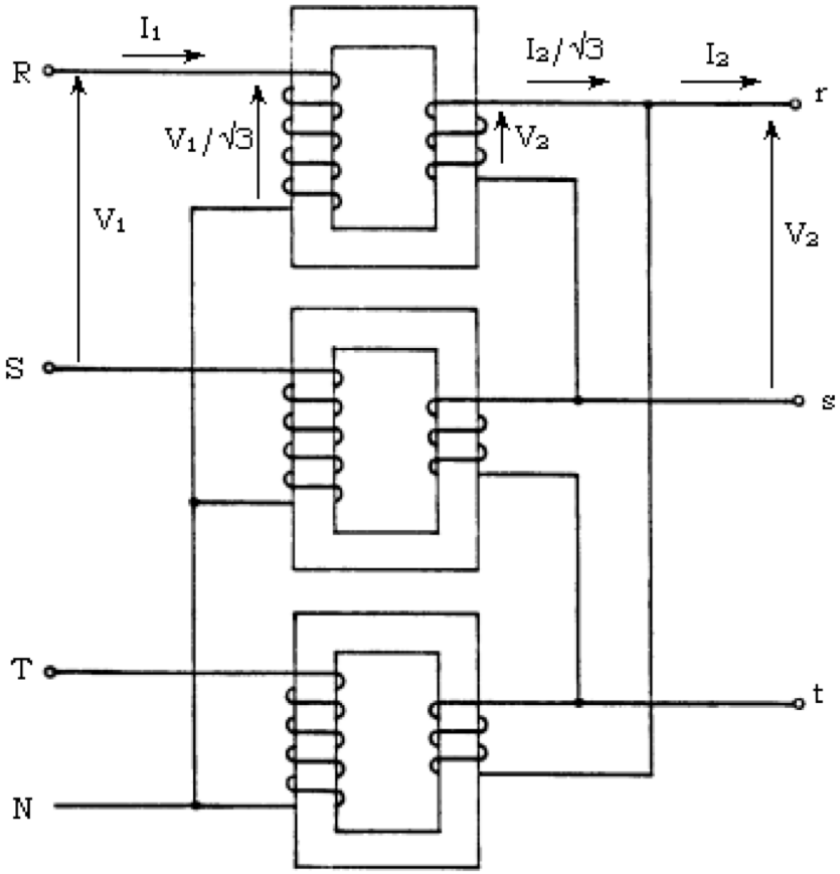


Transformadores Trifásicos
Características del Núcleo

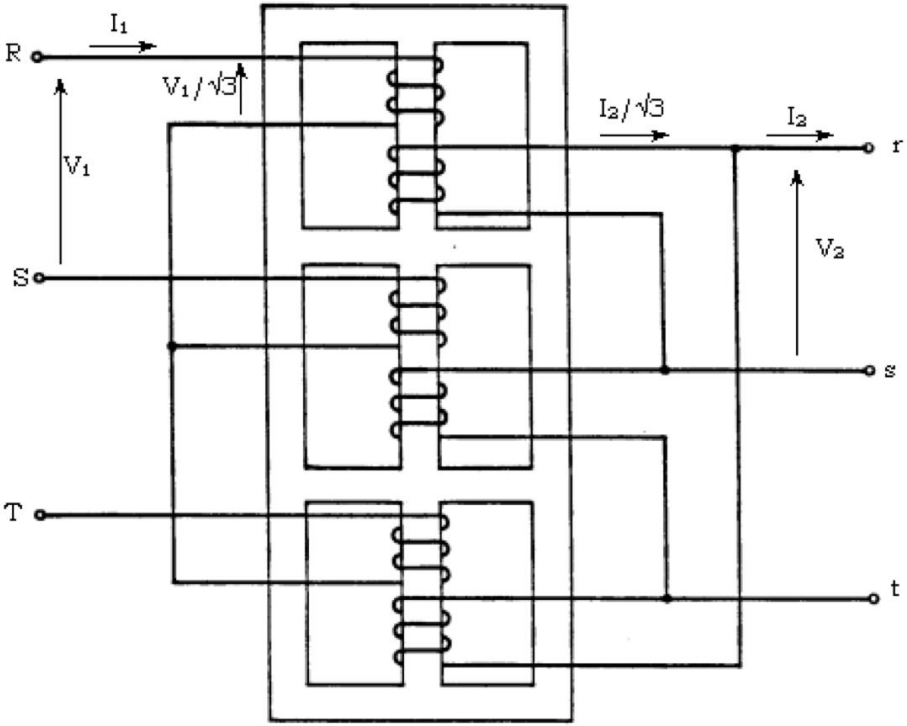
$$a_{3\phi} = \frac{V_{ff}^{prim}}{V_{ff}^{sec}} = \frac{V_{ff}^{prim}}{\frac{V_{ff}^{prim}}{a_{1\phi}\sqrt{3}}} = a_{1\phi}\sqrt{3}$$

Ojo con las conexiones trifásicas!

3 transformadores monofásico:
Conexión YΔ

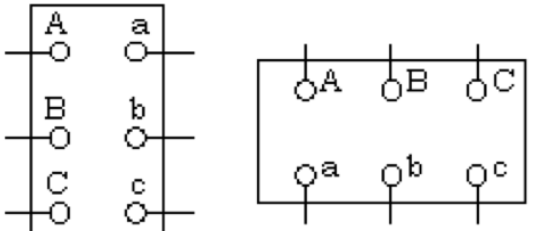
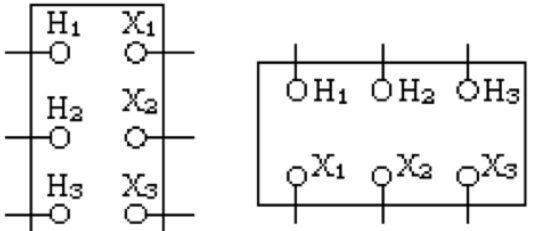
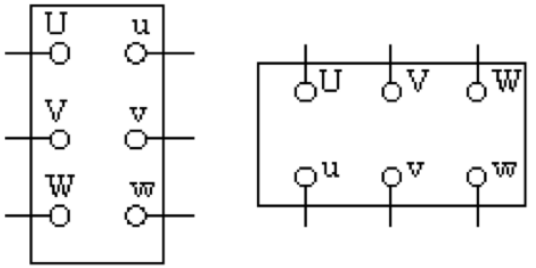


Acorazado trifásico:
Conexión YΔ



Transformadores Trifásicos

Nomenclatura de los terminales

Norma	Bornes de A.T.	Bornes de B.T.	Disposición de los bornes y del esquema
I.E.C. N.CH. B.S.	A, B, C	a, b, c	
A.S.A.	H_1, H_2, H_3	X_1, X_2, X_3	
V.D.E.	U, V, W o también R, S, T	u, v, w o tambien r, s, t	

Transformadores Trifásicos

Conexiones

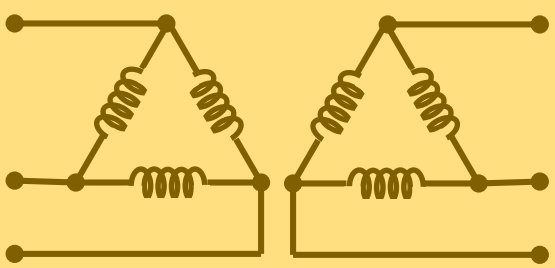
Los debanados primarios y secundarios de los transformadores trifásicos se pueden conectar en:

- Estrella (Y).
- Delta (Δ).
- ZigZag (Z).

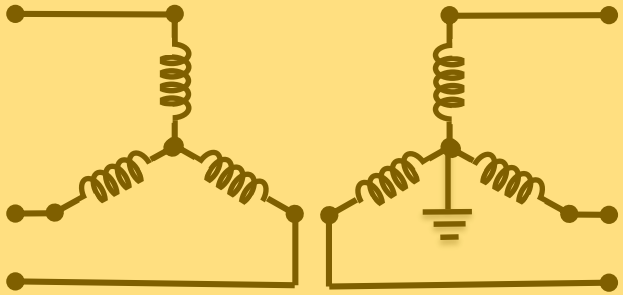
La mayoria de las conexiones se realiza en Y o Δ, dejando reservado la conexión Z para casos especificos. Las conexiones tipicas son:

- Y-Y [YY YtYt YtY YYt]
- Y-Δ [YΔ YtΔ]
- Δ-Y [ΔY ΔYt]
- Δ-Δ [ΔΔ VV]

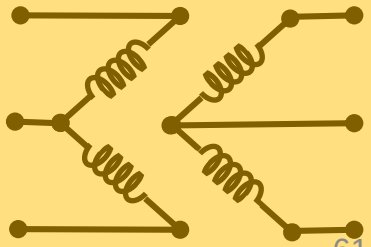
Conexión ΔΔ



Conexión YYt



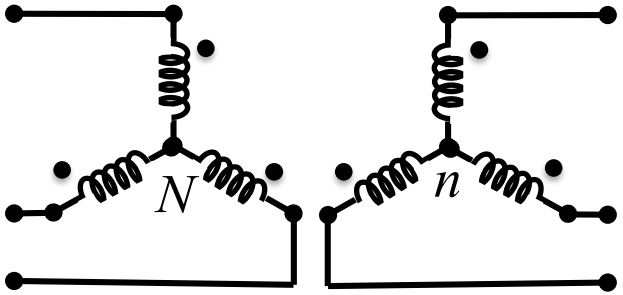
Conexión VV

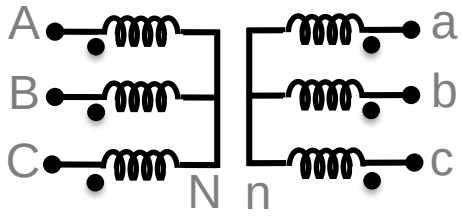


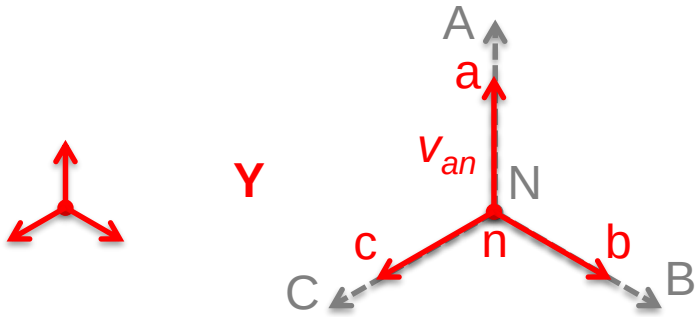
Transformadores Trifásicos

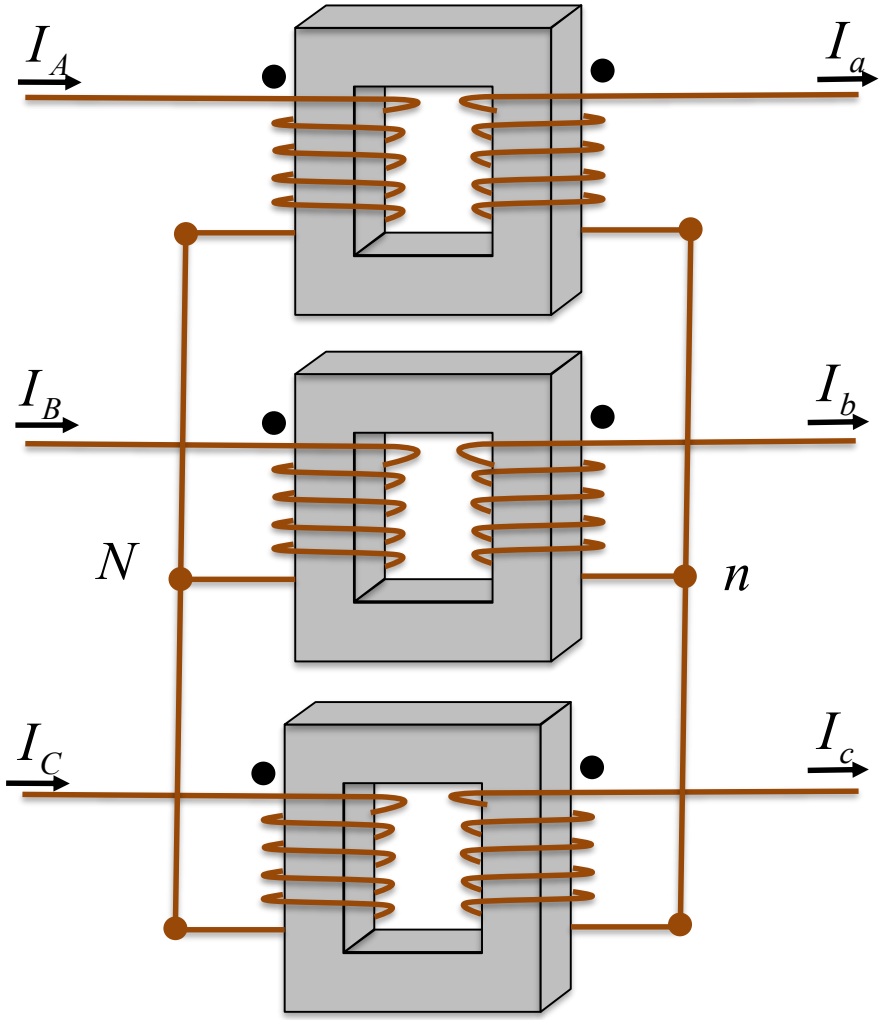
Conexiones

Conexión YY





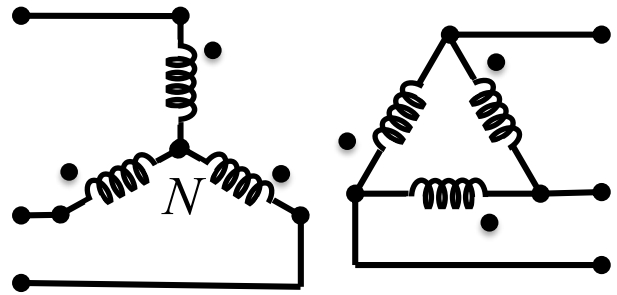


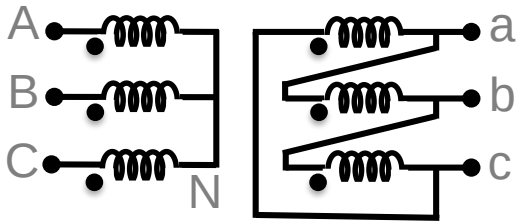


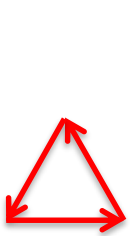
Transformadores Trifásicos

Conexiones

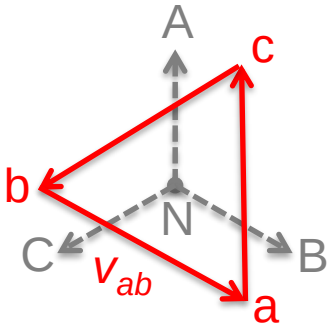
Conexión YD

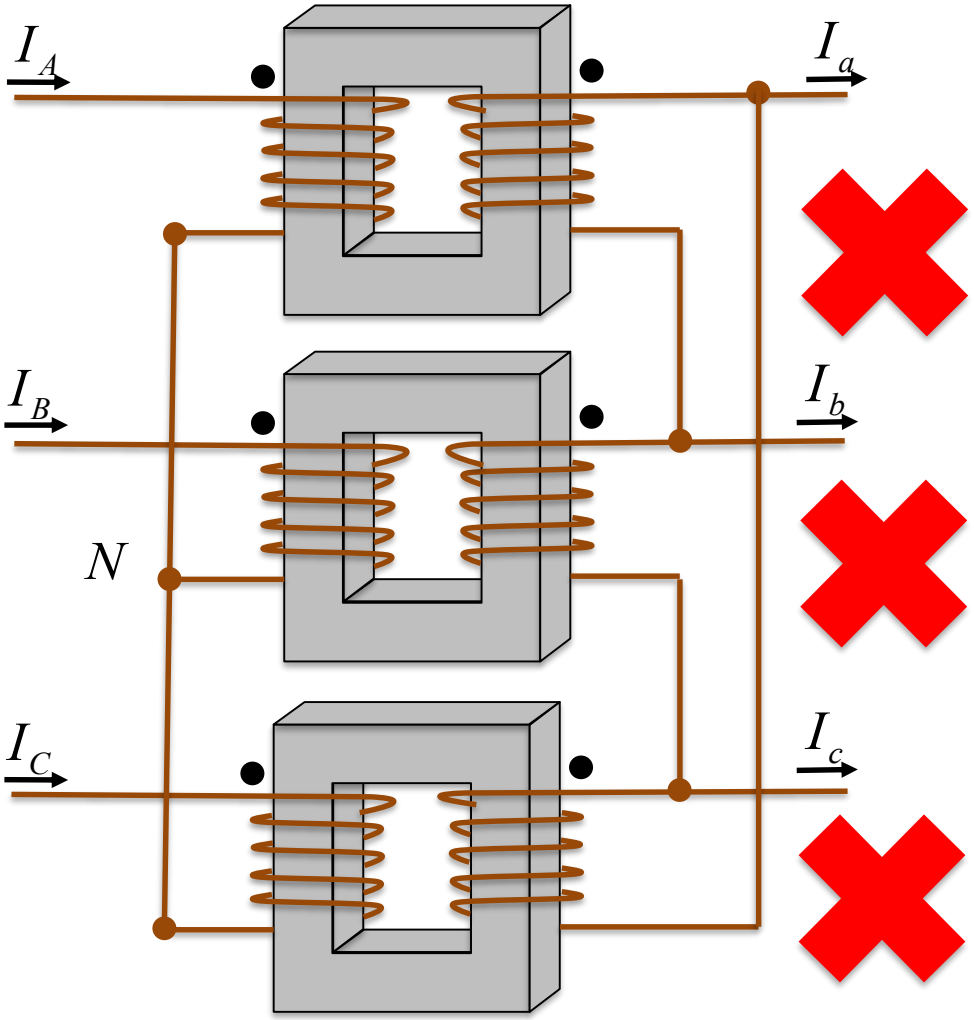






Δ

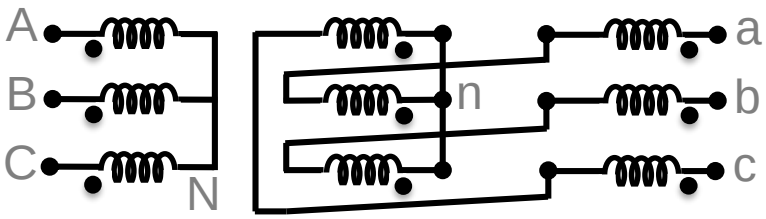


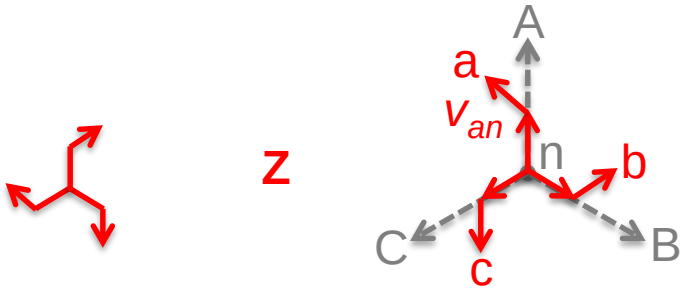


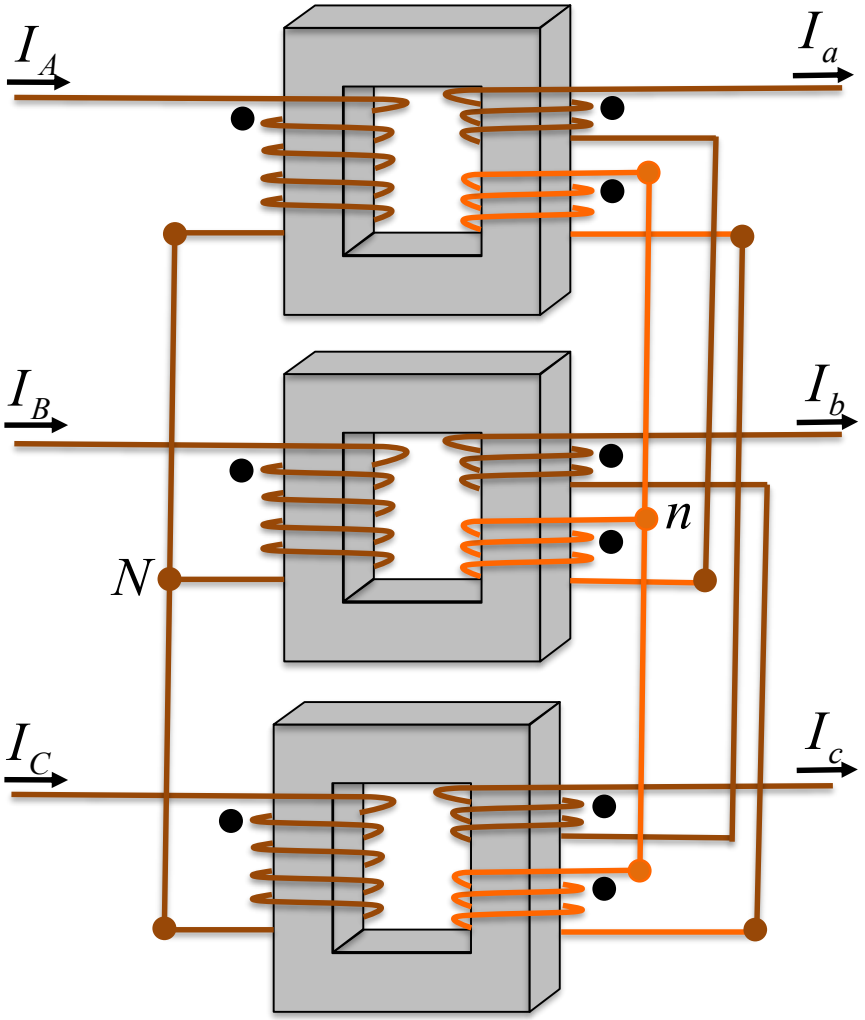
Transformadores Trifásicos

Conexiones

Conexión YZ

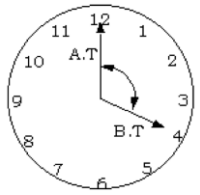


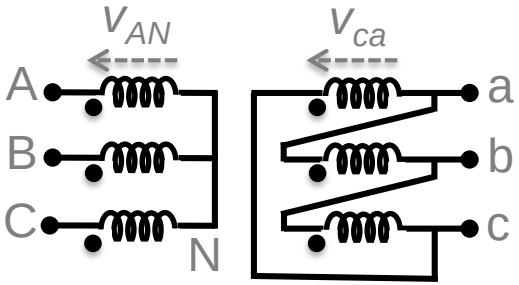




Transformadores Trifásicos
Notación, Conexión y Diagrama

La gran variedad de combinaciones posibles hace necesaria una notación para identificar cada tipo de **conexión** y el **desfase** generado por está. Consideremos la conexión Yd5 como ejemplo:



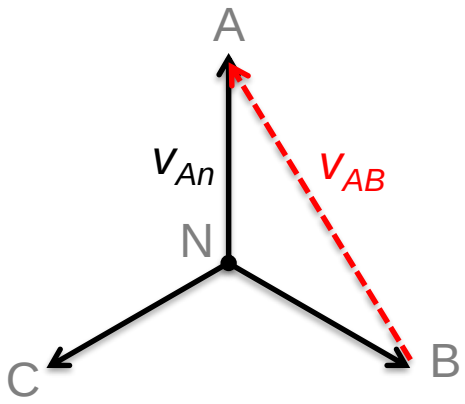


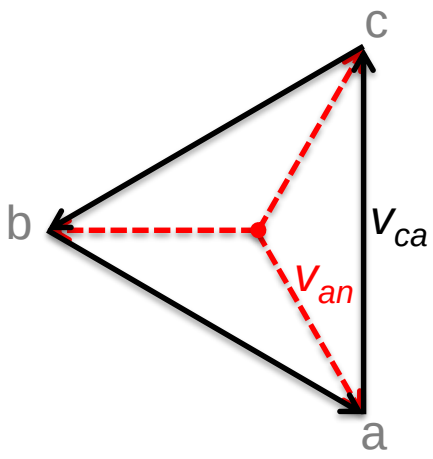
Conexión **Primaria** en Mayúscula

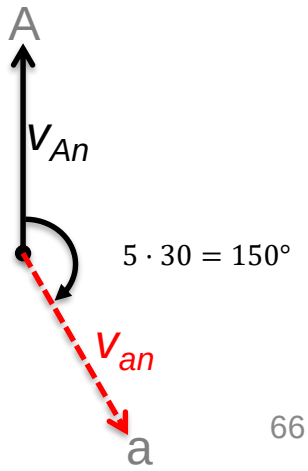
Yd5

Conexión **Secundaria** en minúscula

Desfase del secundario respecto al Primario en **múltiplos de 30°** en sentido horario (siempre positivo).

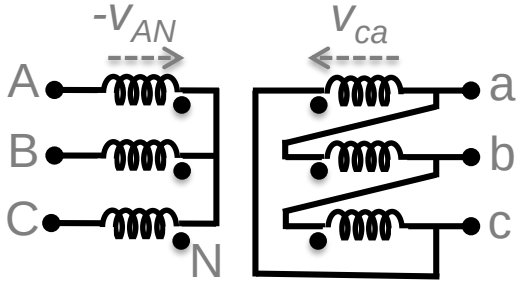




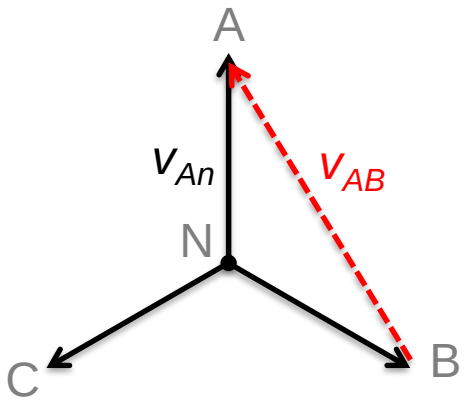


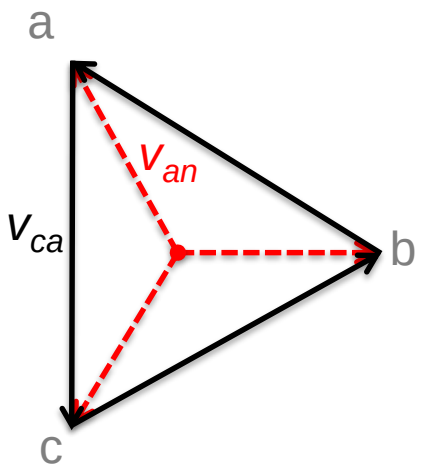
Transformadores Trifásicos
Notación, Conexión y Diagrama

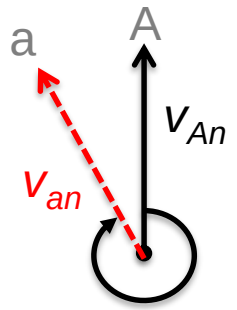
Tarea: demostrar que si cambio las polaridades de los secundarios obtengo un desfase de 330º (-30º), es decir, obtengo la conexión **Yd11**:



Yd11



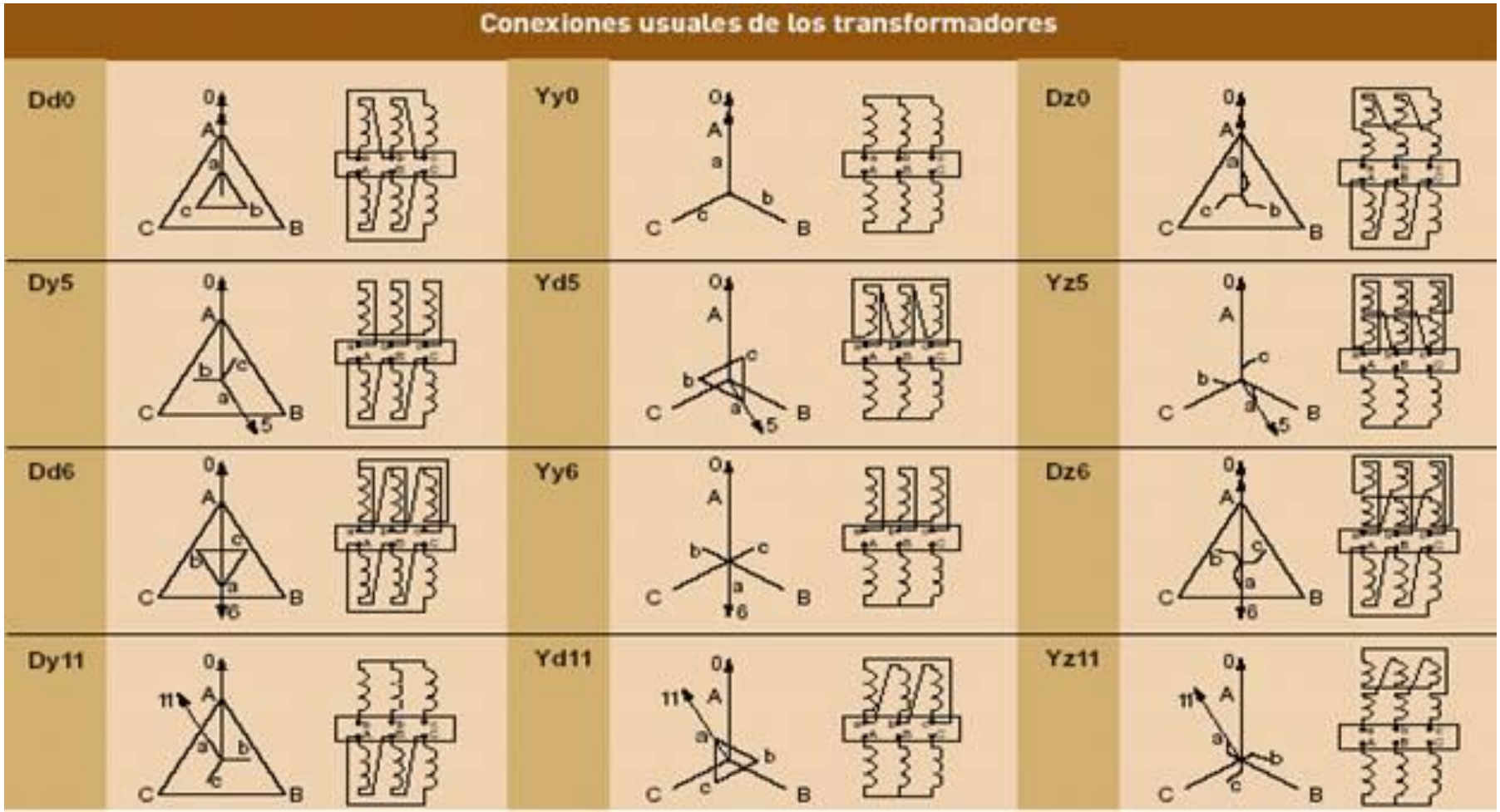




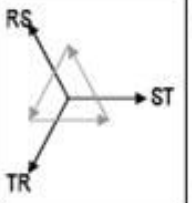
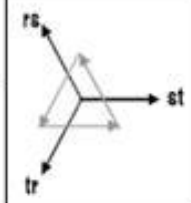
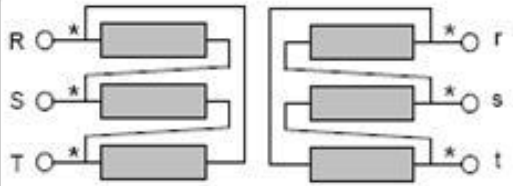
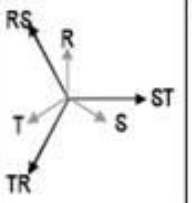
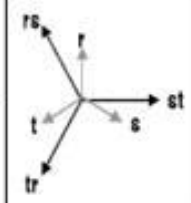
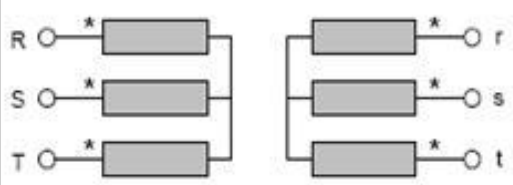
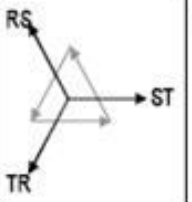
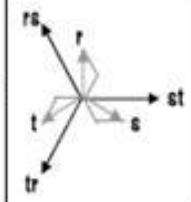
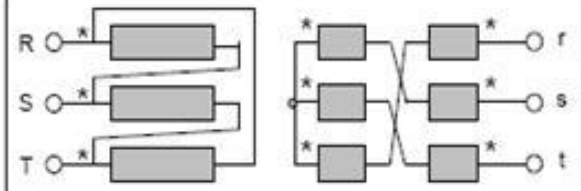
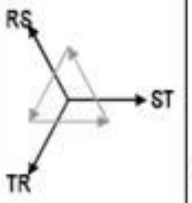
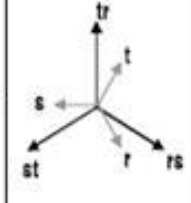
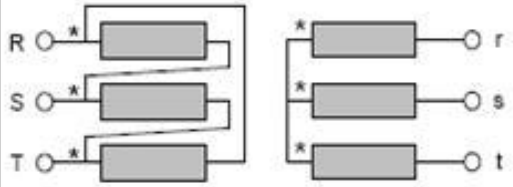
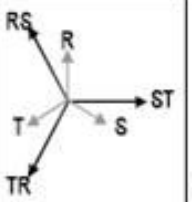
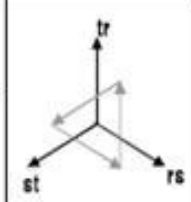
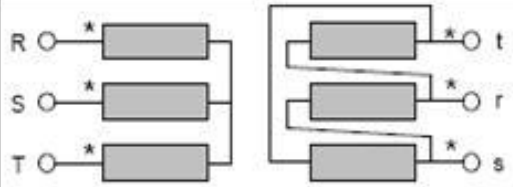
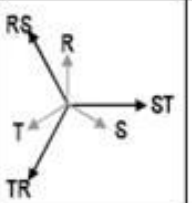
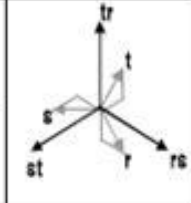
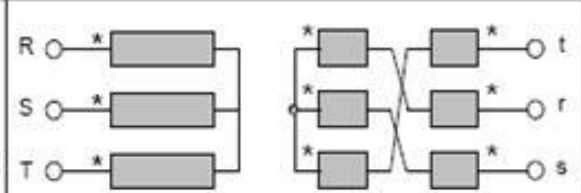
$11 \times 30^{o} = 330^{\circ} = -30^{o}$

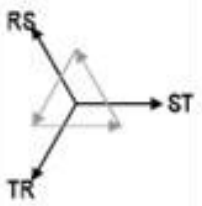
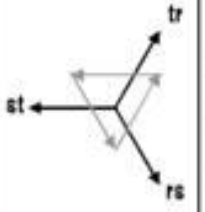
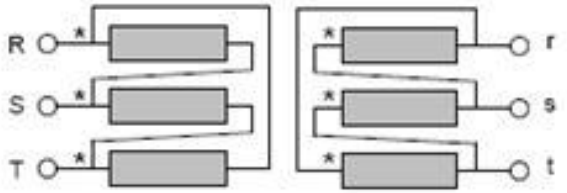
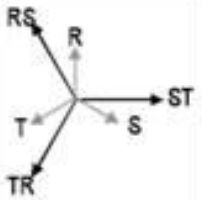
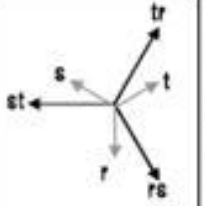
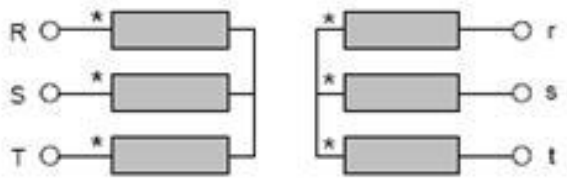
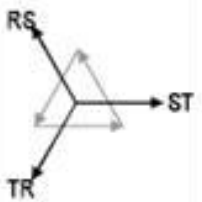
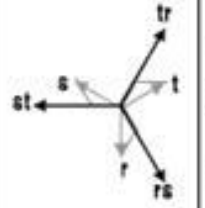
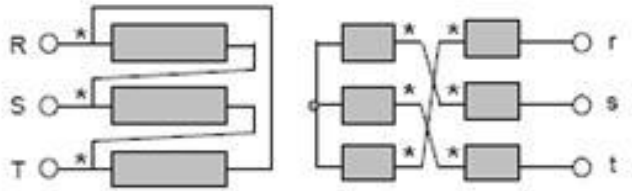
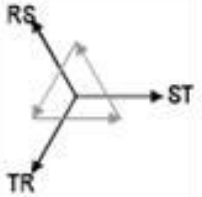
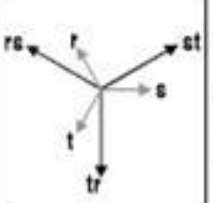
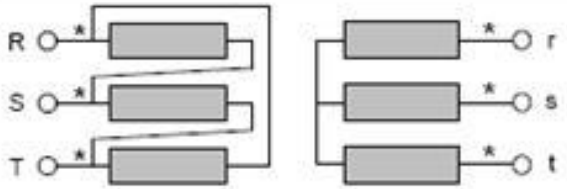
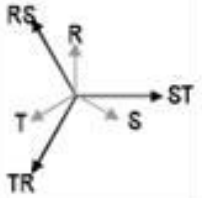
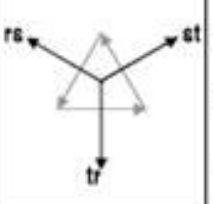
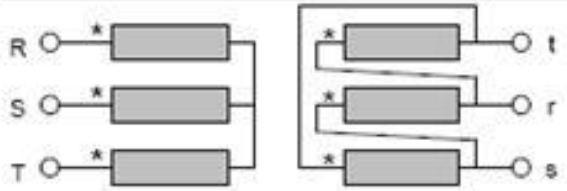
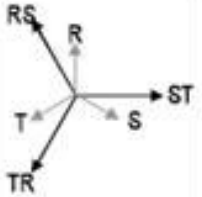
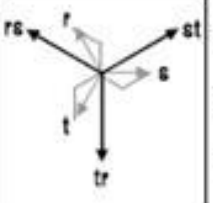
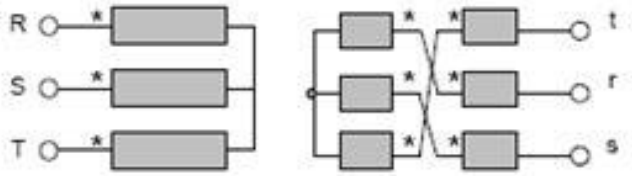
Transformadores Trifásicos

Notación, Conexión y Diagrama



Conexión en Paralelo de Trafos trifásicos: se deben cumplir las mismas condiciones de los transformadores monofásicos y además el mismo desfase.

INDICE DE DESFASAJE	SÍMBOLO DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA FASORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACION DE TRANSFORMACION
		ALTA TENSION	BAJA TENSIÓN		
0 (0°)	Dd0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0				$\frac{2}{3}\frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	Dy5				$\frac{1}{\sqrt{3}}\frac{N_1}{N_2}$
	Yd5				$\sqrt{3}\frac{N_1}{N_2}$
	Yz5				$\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{N_1}{N_2}$

INDICE DE DESFASAJE	SÍMBOLO DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA FASORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACION DE TRANSFORMACION
		ALTA TENSION	BAJA TENSIÓN		
6 (180°)	Dd6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz6				$\frac{2}{3}\frac{N_1}{N_2}$
11 (330°) (-30°)	Dy11				$\frac{1}{\sqrt{3}}\frac{N_1}{N_2}$
	Yd11				$\sqrt{3}\frac{N_1}{N_2}$
	Yz11				$\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{N_1}{N_2}$

Transformadores Trifásicos

Tarea: Diagrama Fasorial

Tenemos 3 transformadores monofásicos idénticos y se pide construir un grupo trifásico determinado siguiendo estos 4 pasos:

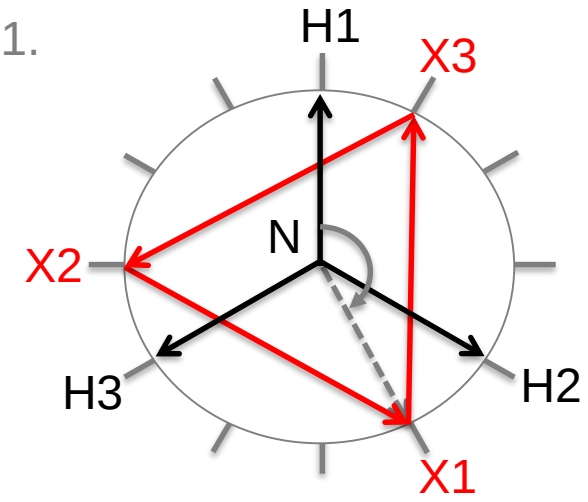
1. Dibujar un reloj con 12 marcas (horas) y en su interior dibujar los diagramas fasoriales primario y secundario, con sus respectivos terminales.
2. Determinar los fasores que sean paralelos. Éstos definirán una pierna del transformador.
3. Diagramar las 3 piernas del transformador, con su pareja de bobinados (bobinados acoplados) alineados, y asignar los terminales de fasores paralelos a una de ellas.
4. Conectar los terminales restantes siguiendo los diagramas fasoriales del diagrama reloj.

Haremos un diagrama de ejemplo.

Transformadores Trifásicos

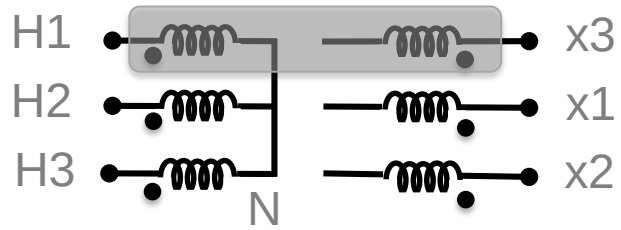
Tarea: Ejemplo conexión Yd5

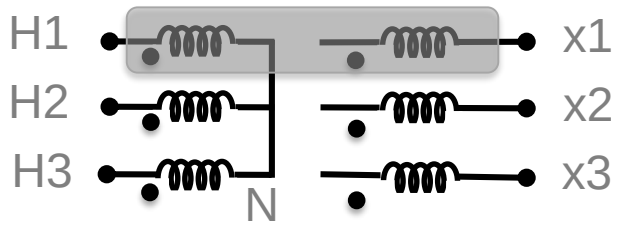
1.



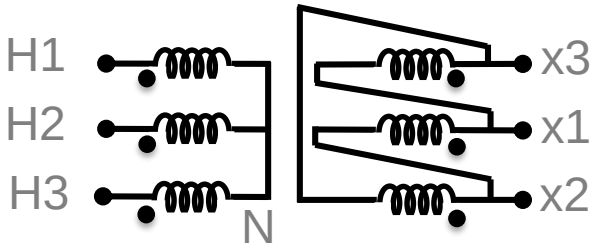
2. Del diagrama anterior se ve que los fasores H1-N y X3-X1 tienen la misma dirección y sentido por lo que deben ser ubicados en la misma pierna, teniendo cuidado de la polaridad.

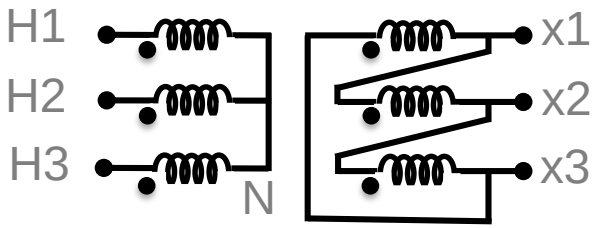
3.





4.





Transformadores Trifásicos

Tarea:

Dados 3 transformadores monofásicos con una razón de voltajes primario a secundario de 2:1 (reductores), considere los siguientes grupos de conexiones:

1. Yd3
2. Dy5
3. Dy11

Para cada uno de ellos:

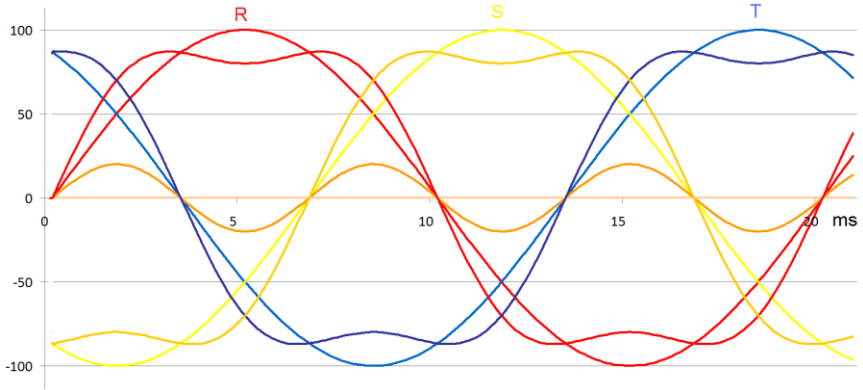
- **Dibuje el diagrama fasorial respectivo** en papel milimetrado teniendo en cuenta la razón de transformación de los transformadores.
- **Arme el grupo de transformación trifásica** siguiendo el método descrito en las diapositivas anteriores, manteniendo la notación H-X para los bobinados primario y secundario respectivamente.

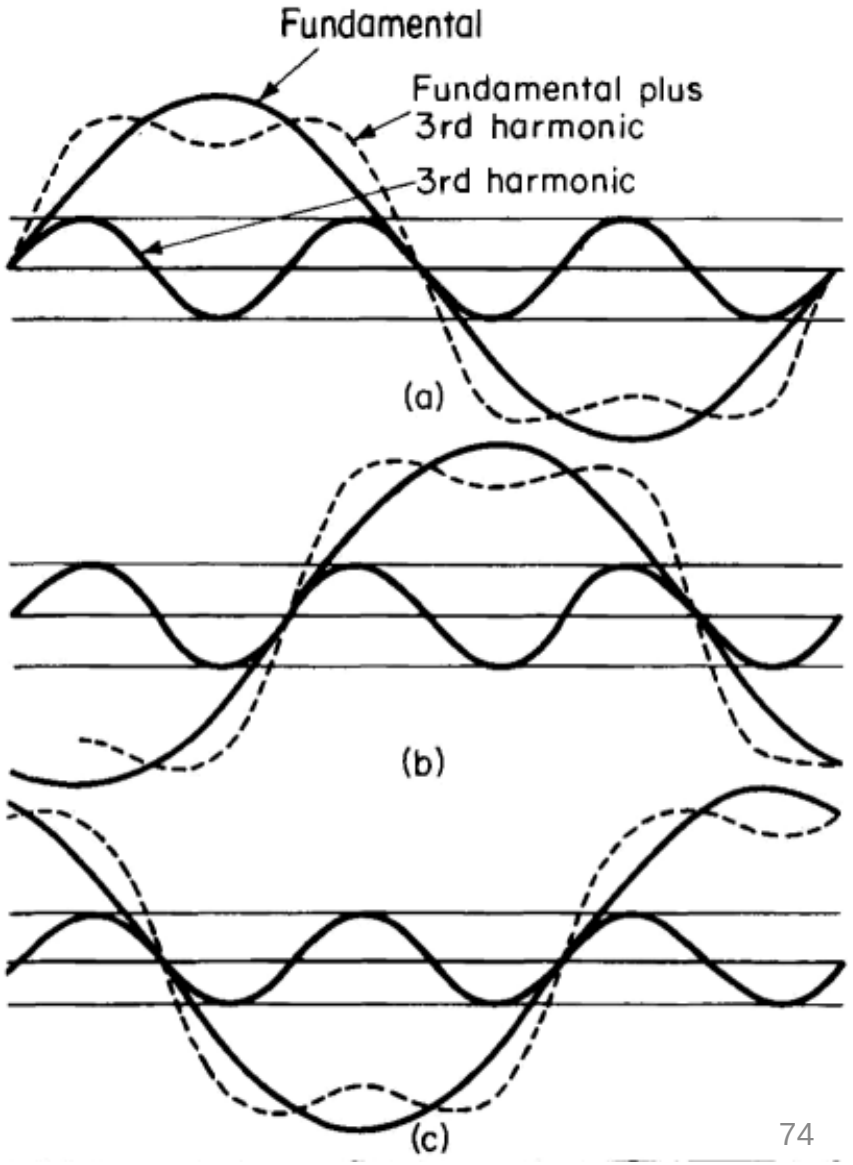
Transformadores Trifásicos

3ª Armónica

Los transformadores trifásicos tienen tres bobinas en el primario que son alimentadas con voltajes desfasados en 120º, lo que genera **corrientes desfasadas en 120º**.

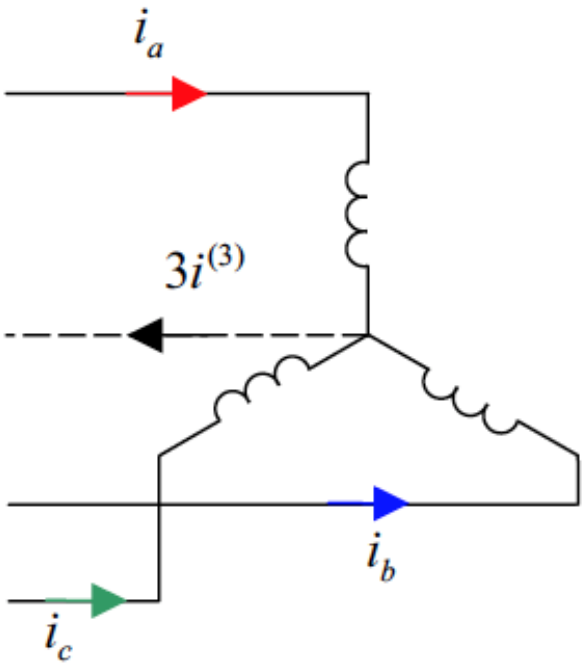
Estas corrientes poseen una componente de **3ª armónica** que que está **en fase** en los tres devanados.

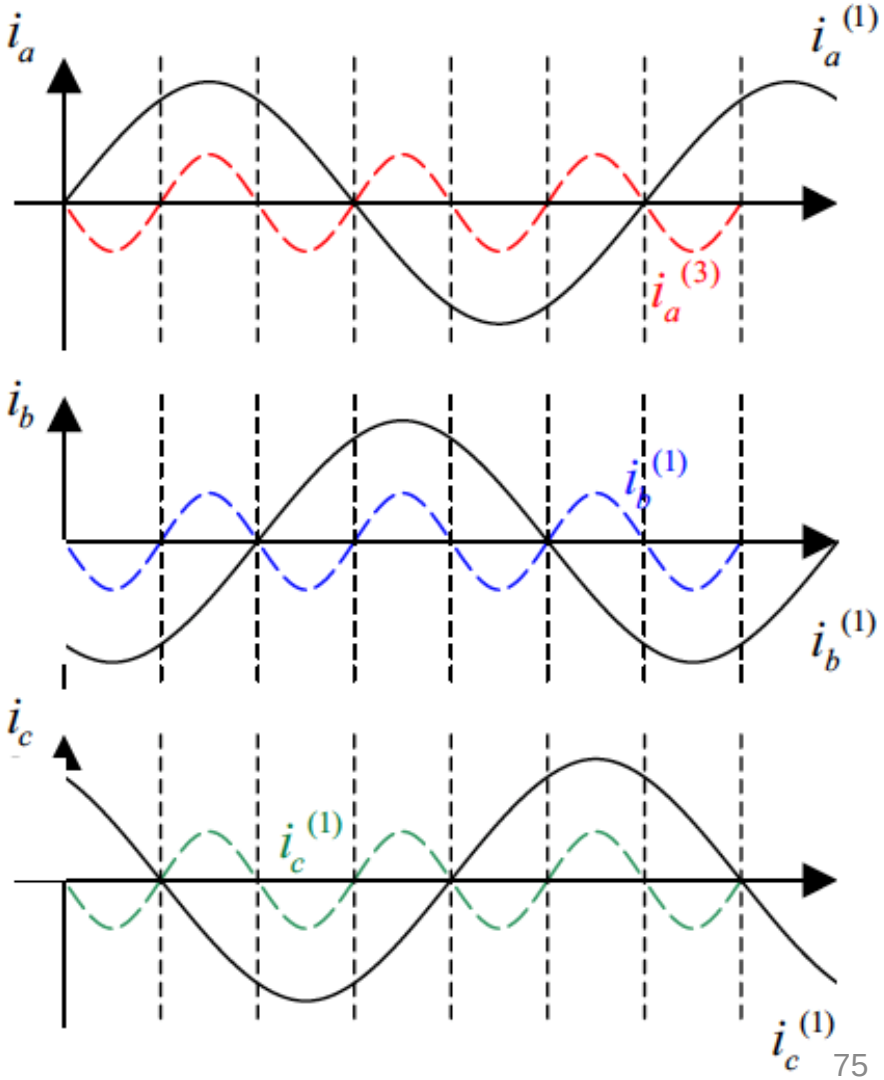




Transformadores Trifásicos

3ª Armónica





Transformadores Trifásicos

3ª Armónica

En el **transformador monofásico** la corriente armónica es muy pequeña y no genera inconvenientes pero en los **transformadores trifásicos** es un aspecto importante a considerar porque en determinadas conexiones no es posible que circule esta corriente y puede producir importantes inconvenientes:

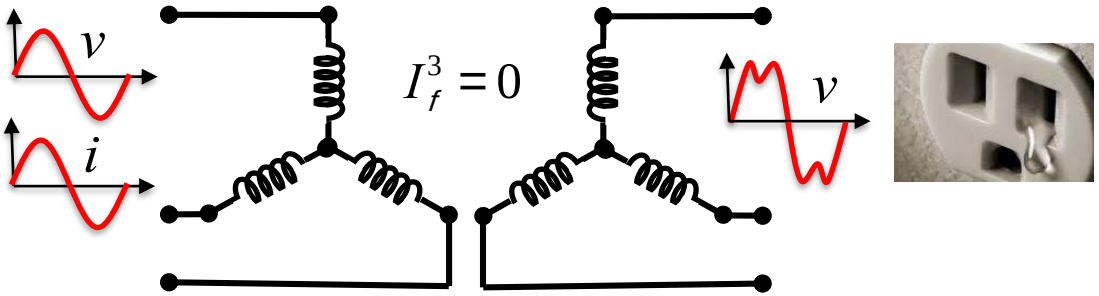
- **Sobre-voltajes** (riesgo para el dispositivo y las cargas)
- **Voltaje de red deformado**
- **Neutro oscilante**

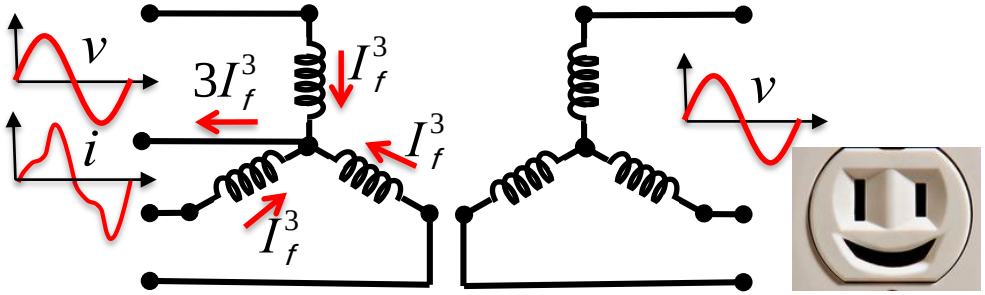
Para evitar este problema se suele:

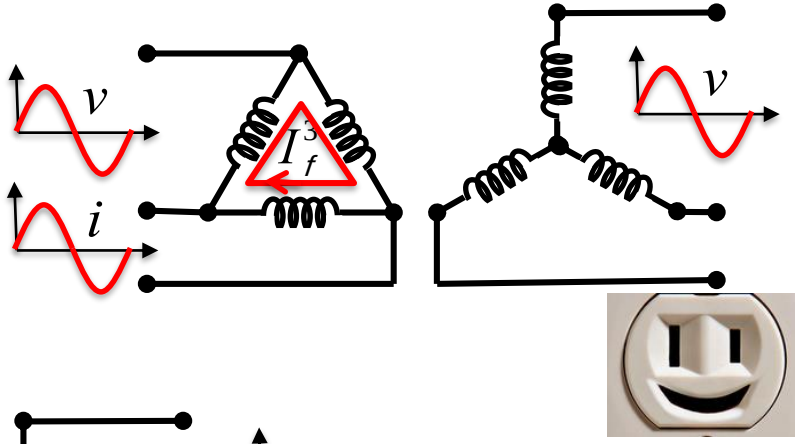
- **Limitar la operación bajo el codo de histéresis** para trabajar en la zona más lineal y evitar deformaciones mayores.
- **Conectar el neutro a tierra** para que la corriente de 3ª armónica pueda circular por el cable a tierra y así eliminar la oscilación del neutro (voltajes sinusoidales).
- **Emplear núcleo trifásico** (no permite flujos de 3ª armónica), en lugar de 3 núcleos monofásicos.
- **Emplear conexión Delta**, que permite la circulación interna de la corriente de 3ª Armónica.

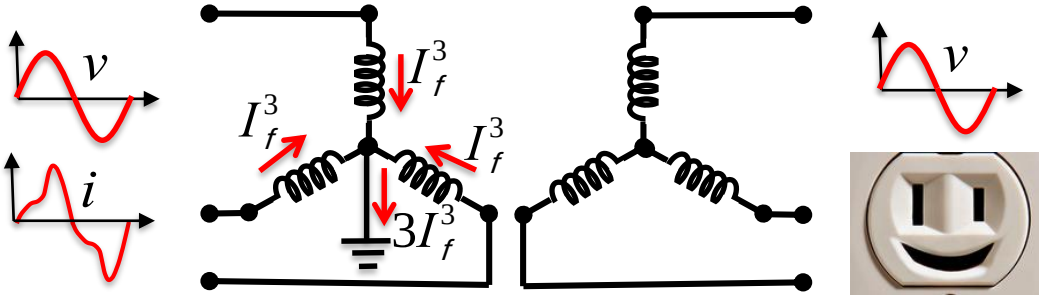
Transformadores Trifásicos

3ª Armónica y Conexiones



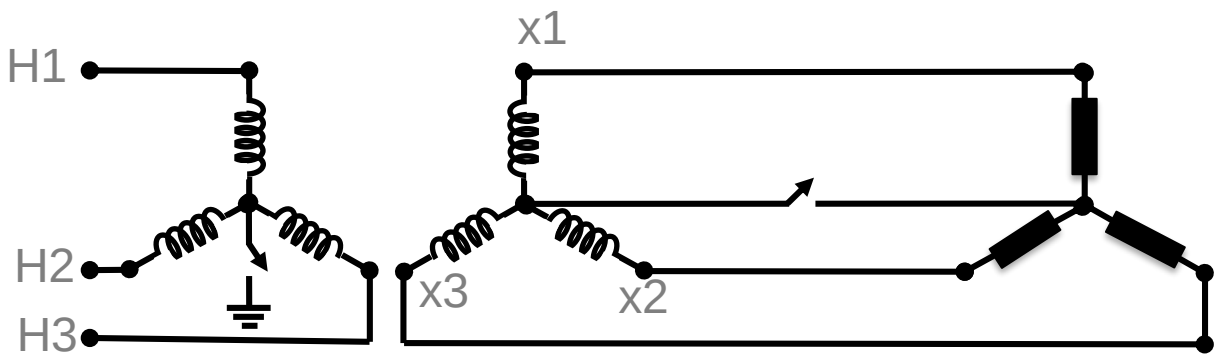






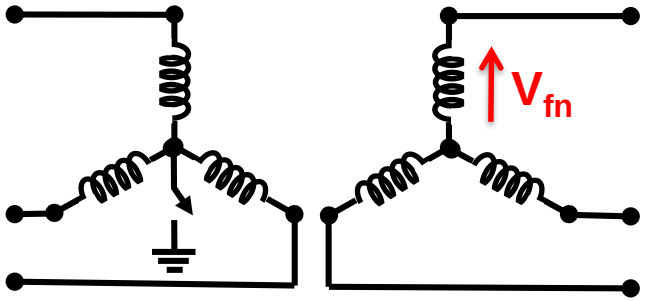
Transformadores Trifásicos
3ª Armónica

Consideremos un transformador trifásico en vacío con grupo de conexiones **Yy0**, y neutro primario conectado a tierra a través de un Switch.



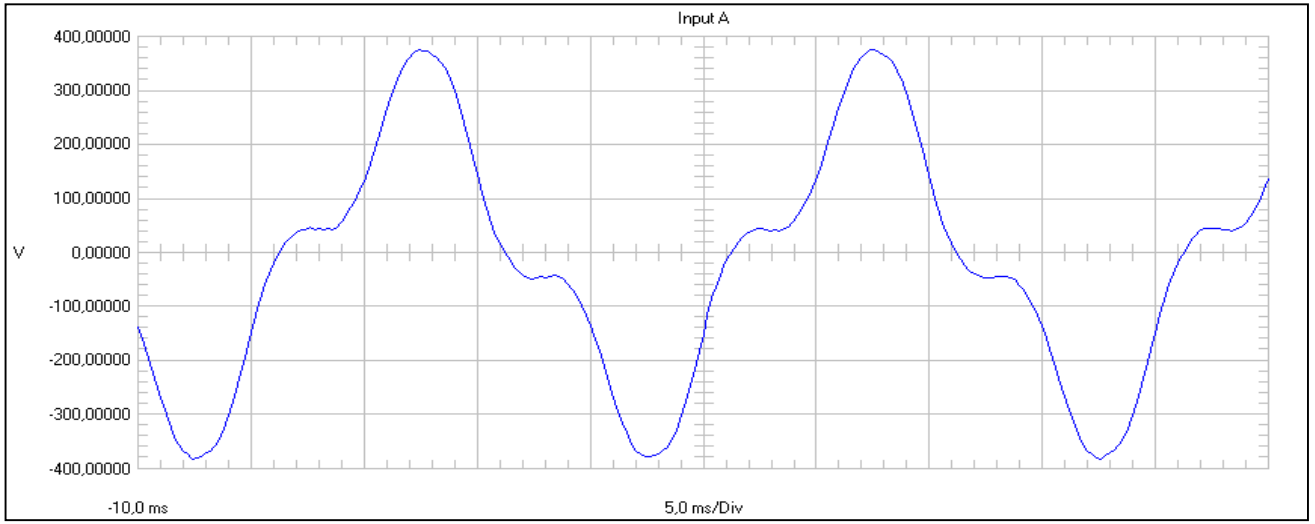
Transformadores Trifásicos

3ª Armónica

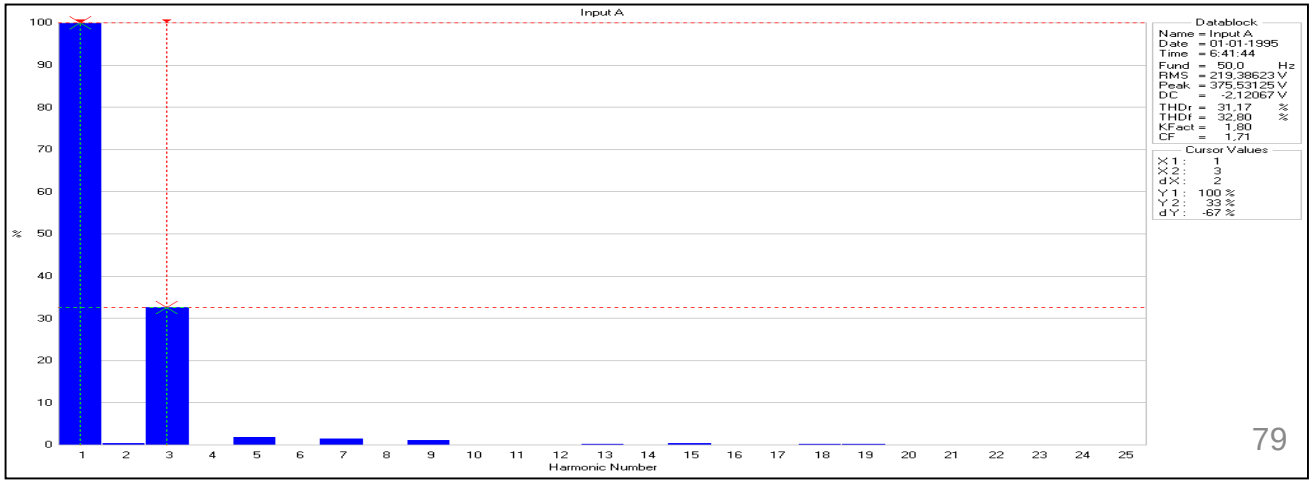


CASO 1: Sin carga (vacío) y switch a tierra abierto.

V_{fn} secundario (50 Hz)

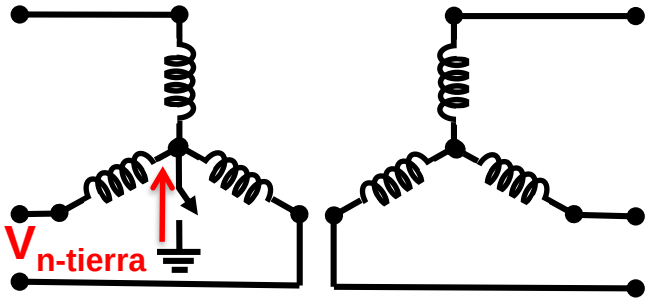


V_{fn} secundario (50 Hz)



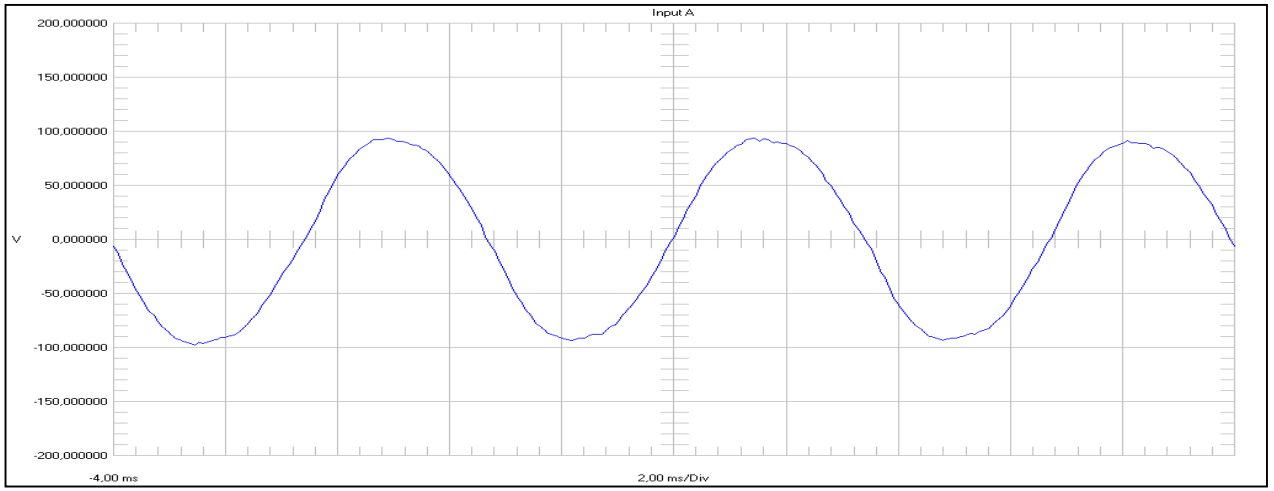
Transformadores Trifásicos

3ª Armónica

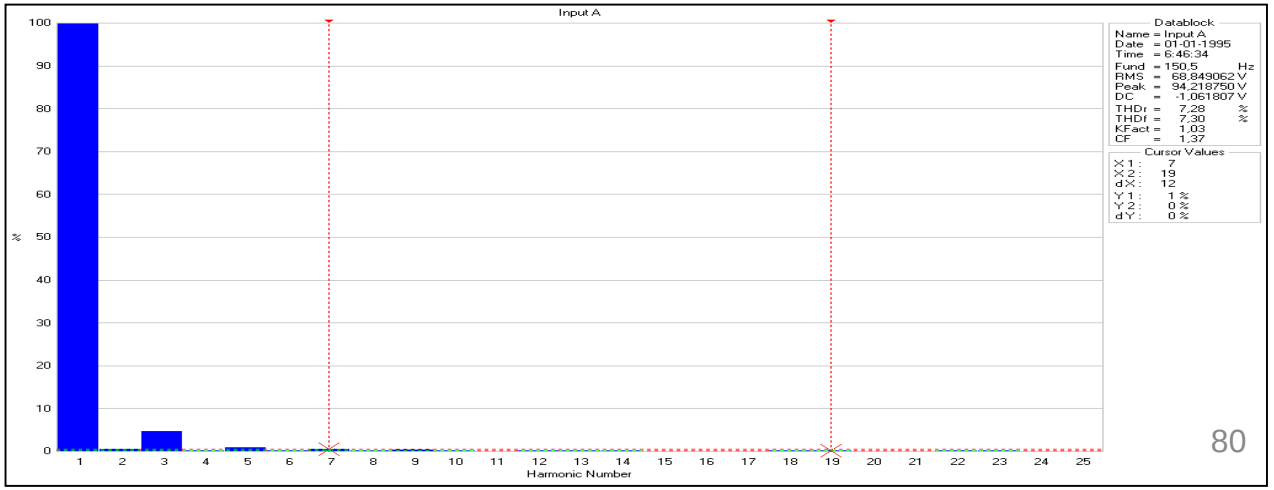


CASO 1: Sin carga (vacío) y switch a tierra abierto.

$V_{n\text{-}tierra}$ primario (150 Hz)

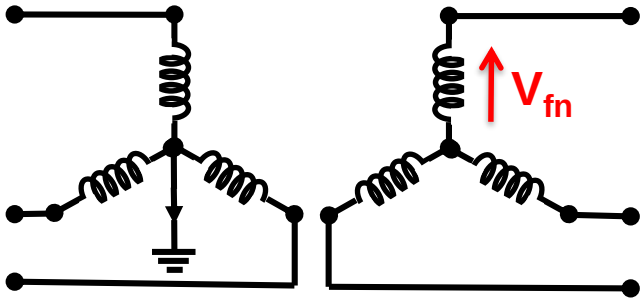


$V_{n\text{-}tierra}$ primario (150 Hz)



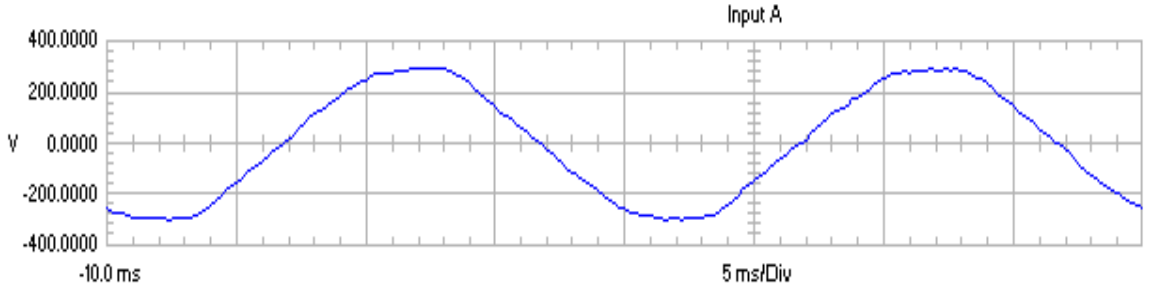
Transformadores Trifásicos

3ª Armónica

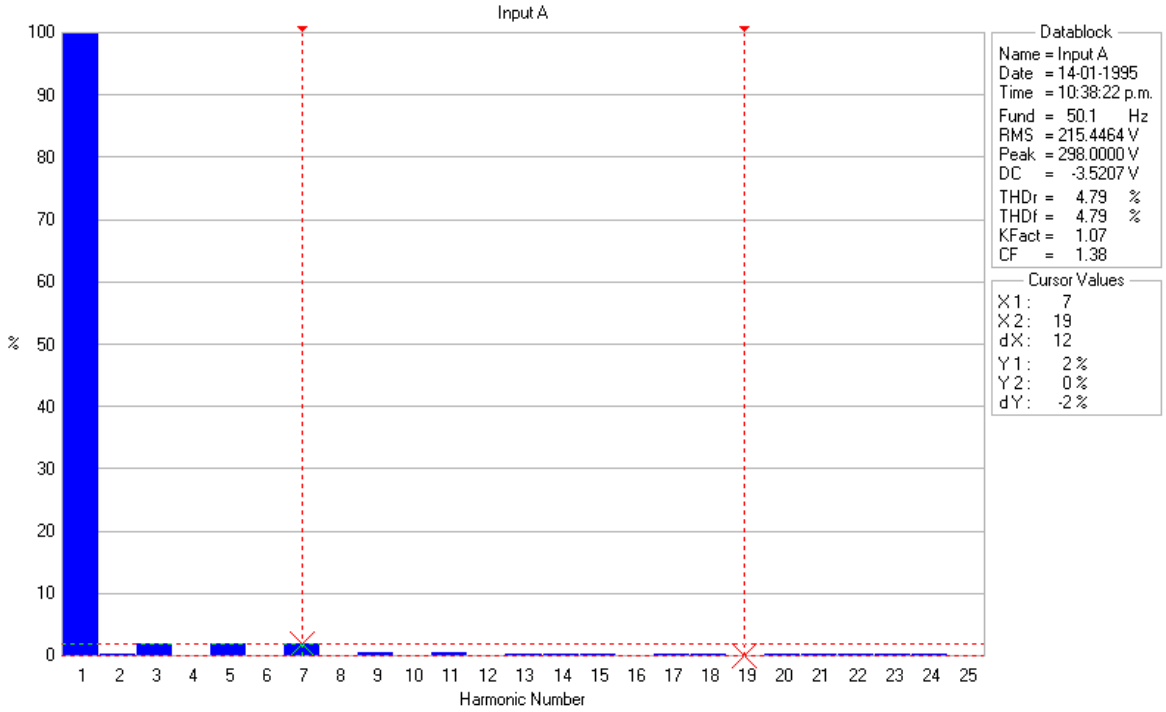


CASO 2: Sin carga (vacío) y switch a tierra cerrado.

V_{fn} secundario (50 Hz)

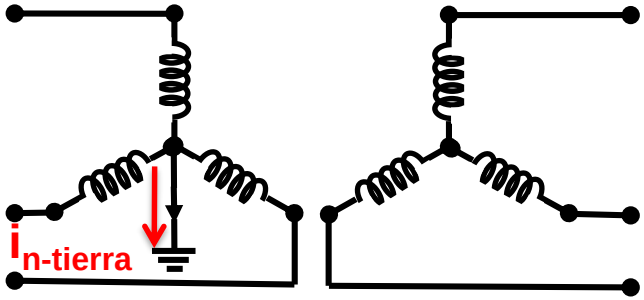


V_{fn} secundario (50 Hz)



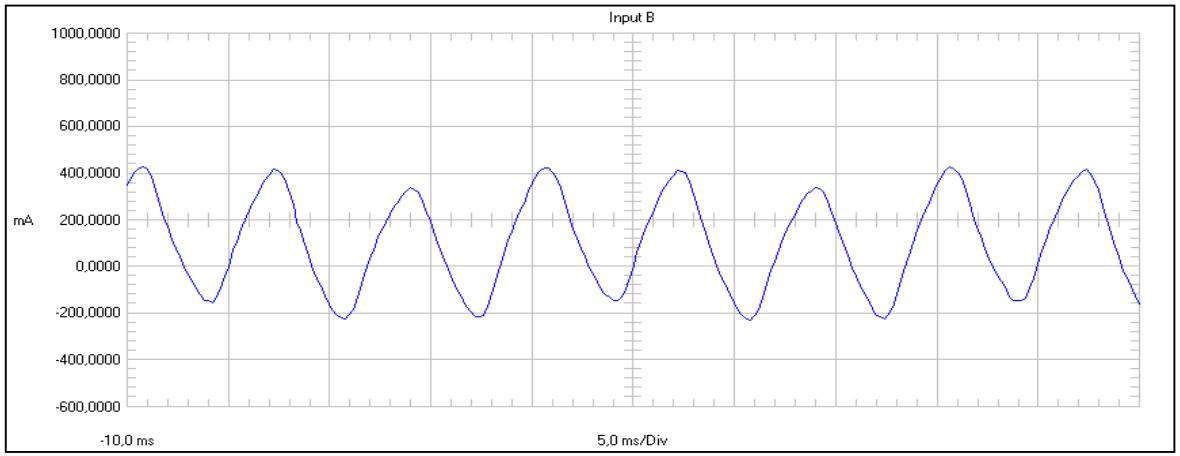
Transformadores Trifásicos

3ª Armónica

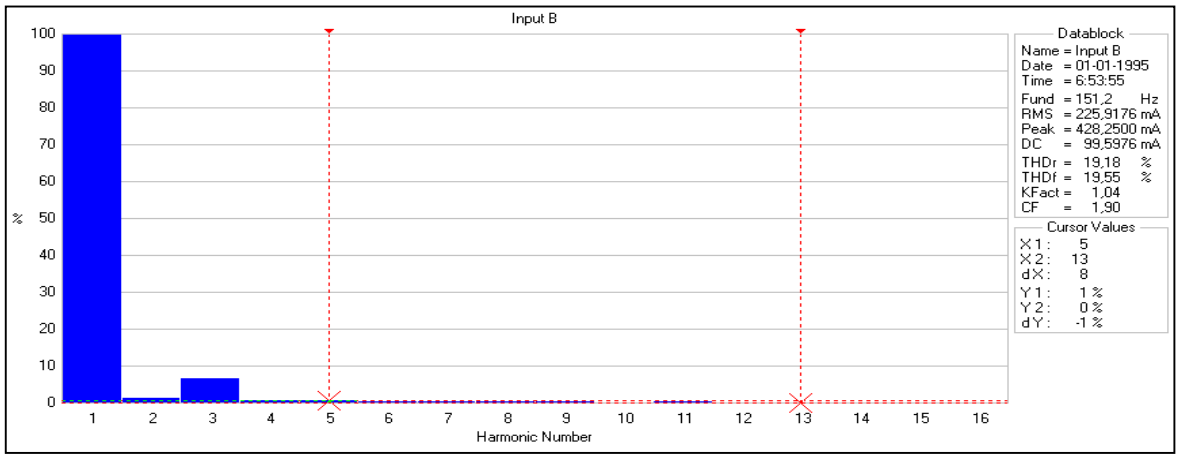


CASO 2: Sin carga (vacío) y switch a tierra cerrado.

$I_{n\text{-}tierra}$ (150 Hz)



$I_{n\text{-}tierra}$ (150 Hz)

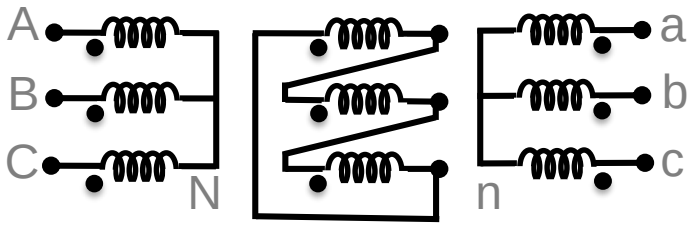


Transformadores Trifásicos
Resumen Grupo de Conexión

Yy

Estrella-Estrella (Yy) (desfase 2n, n = 0,…,5)

- **No es muy utilizado** a menos que tenga tripe devanado en Δ.
- Adecuado para **tensiones altas** ($V_{ff} = \sqrt{3}V_{bobina}$ pero mayor corriente).
- Muy mala operación en sistema **desbalanceados**.
- Configuración de **menor costo** (cables gruesos con menos vueltas, lo que asegura un bobinado más robusto, mejor uso del espacio y aislación).
- Posee **neutro** lo que permite conexión a tierra para protección, conducción de 3ª armónica, alimentar cargas monofásicas y fijar el neutro reduciendo sobretensiones por “neutro inquieto”.
- Con **neutro flotante** no puede alimentar cargas monofásicas, se distorsiona la tensión fase-neutro porque no permite circular corrientes de 3ª armónica, lo que es deseable en líneas de transmisión y de distribución para no alterar las redes de comunicación vecinas (la 3º armónica debe circular por otro lado).
- La conexión YY es muy utilizada con un **devanado auxiliar en Δ** en vacío o conectada para alimentar los sistemas auxiliares de la S/E, ya que permite la circulación de 3ª armónica y mejora la operación ante desbalances.



Y-dy (Yy con devanado terciario): Los trafos con núcleos trifásicos no permiten la circulación de flujo con tercer armónico, así que este se cierra por el aire (distorsión del voltaje pero pequeña). Por lo tanto, una solución usada es el devanado Δ terciario.

Transformadores Trifásicos

Resumen Grupo de Conexión **Dy (Yd)**

Estrella-Delta (Dy, Yd) (desfase 2n+1, n = 0,…,5)

- Δ tiene un buen comportamiento ante **desbalances**.
- Tiene un **costo levemente mayor** al Yy
- Δ permite la circulación de la **3ª armónica** en el triangulo.
- Sin **neutro** en Δ (no es posible conexión a tierra ni alimentar cargas monofásicas).
- Muy usada en los extremos de las **líneas de transmisión (Dy ------> Yd)**:
  - Δ en B.T (lado generador) y Y en A.T (linea de transmisión) con neutro a tierra para fijarlo y asegurar sobretensiones por “neutro inquieto”.
  - Y en el lado de A.T (linea de transmisión) y Δ en B.T (distribución).
- Se genera un **desfase** de al menos 30º, lo que se debe tener en cuenta al conectar otros transformadores en paralelo (deben tener igual desfase).
- **Dy** muy usado en redes de **distribución** en la última fase (antes de llegar al consumidor), ya que permite la conexión de neutro a tierra o alimentar cargas monofásicas.

Transformadores Trifásicos

Resumen Grupo de Conexión

Dd

Delta-Delta (Dd) (desfase 2n, n = 0,…,5)

- Se utiliza para conectar redes de B.T (distribución).
- Para tensión media y potencias bajas.
- No puede alimentar cargas monofásicas.
- Buen comportamiento ante desbalances.
- Puede funcionar con una fase fallada al $1/\sqrt{3}$ de la potencia (conexión VV o delta abierta).

Yz

Estrella-ZigZag (Yz) (desfase muy flexible)

- Se utiliza para conectar las redes de distribución al consumo (igual que Dy).
- Para tensión media y potencias bajas.
- Puede alimentar cargas monofásicas
- Buen comportamiento ante desbalances.
- Usado para eliminar armónicos introducidos por grandes sistemas electrónicos (rectificadores, hornos de inducción, variadores de frecuencia, etc.) mediante la conexión estratégica de varias unidades.

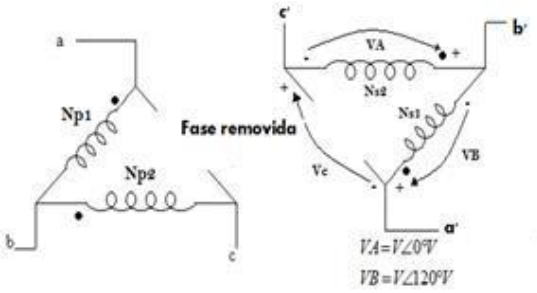
Transformadores Trifásicos

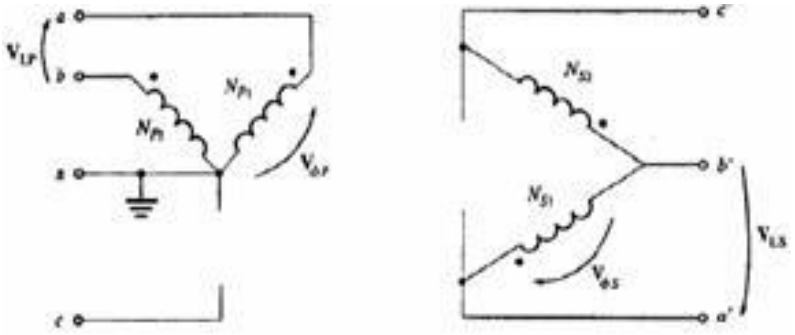
Resumen Grupo de Conexión

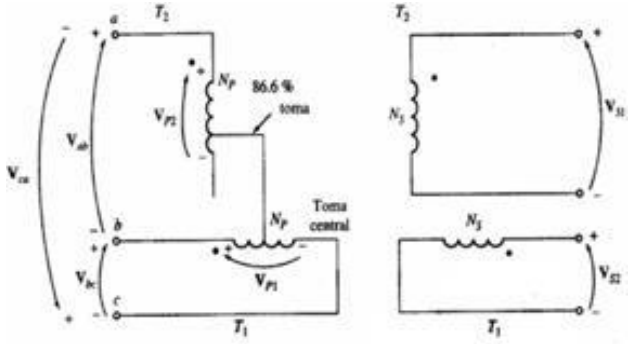
Transformadores abiertos

Se utilizan en zonas rurales donde no hay un sistema trifásico o es más económico utilizar dos transformadores monofásicos para crear uno trifásico (obs: deben estar sobredimensionados en potencia).

- **Dd abierto:** Delta ante falla o uso de dos transformadores para sistema trifásico.
- **Yd abierto:** Genera un sistema trifásico desde dos fases. Y requiere neutro de retorno de alta capacidad en corriente
- **Scott T:** Para obtener un sistema bifásico (90°) desde uno trifásico.

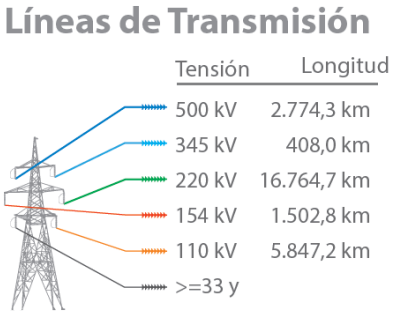






Transformadores Trifásicos

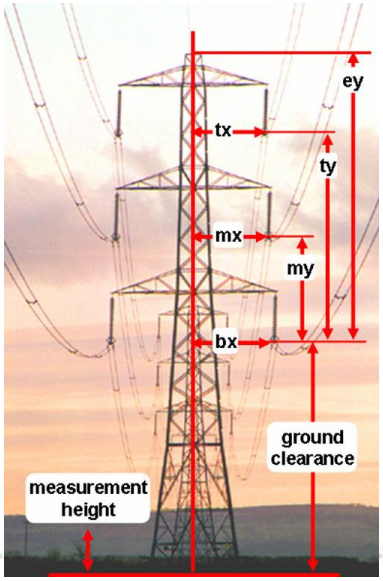
Conexiones



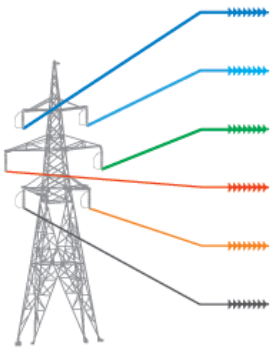
Baja Tensión: 0-1 kV
(110, 120, 220, 380, 480 V)
Media Tensión: 1-60 kV
(4.16, 6, 12, 13.2, 13.8, 15, 17, 23, 25, 33, 45 kV)
Alta Tensión: 60-220 kV
(66, 85, 110, 154 kV)
Muy alta Tensión: 220-750 kV
(220, 345, 500, 750*, 1000* kV)

Red de Transmisión
Líneas de AT en Chile





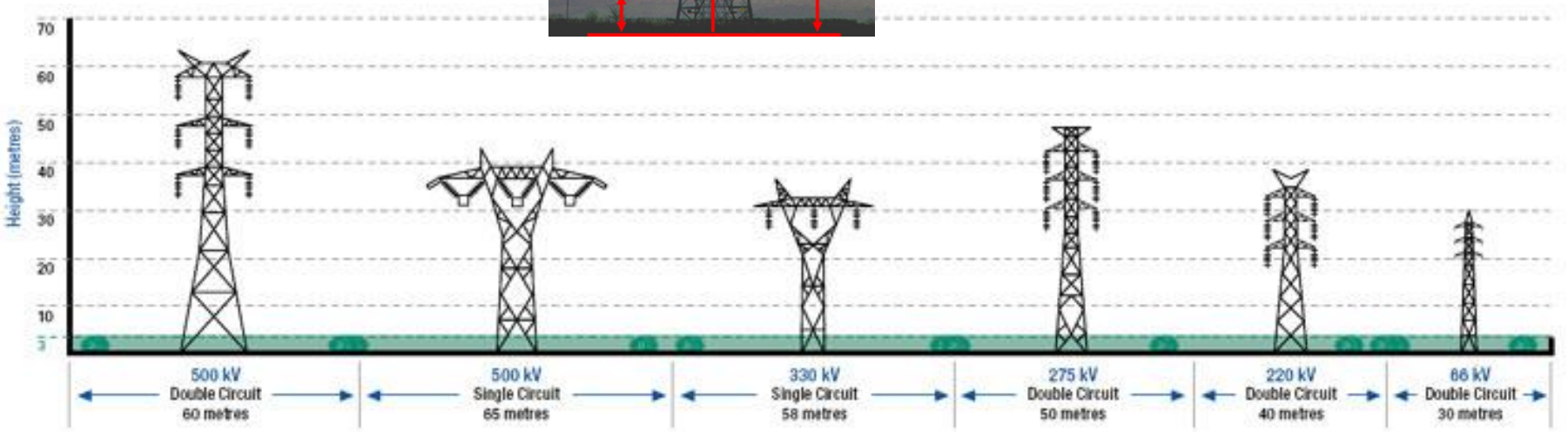
Líneas de Transmisión



Tensión	Longitud
500 kV	2.774,3 km
345 kV	408,0 km
220 kV	16.764,7 km
154 kV	1.502,8 km
110 kV	5.847,2 km
>=33 y < de 110 kV	5.800,4 km

TOTAL: 33.097,4 km

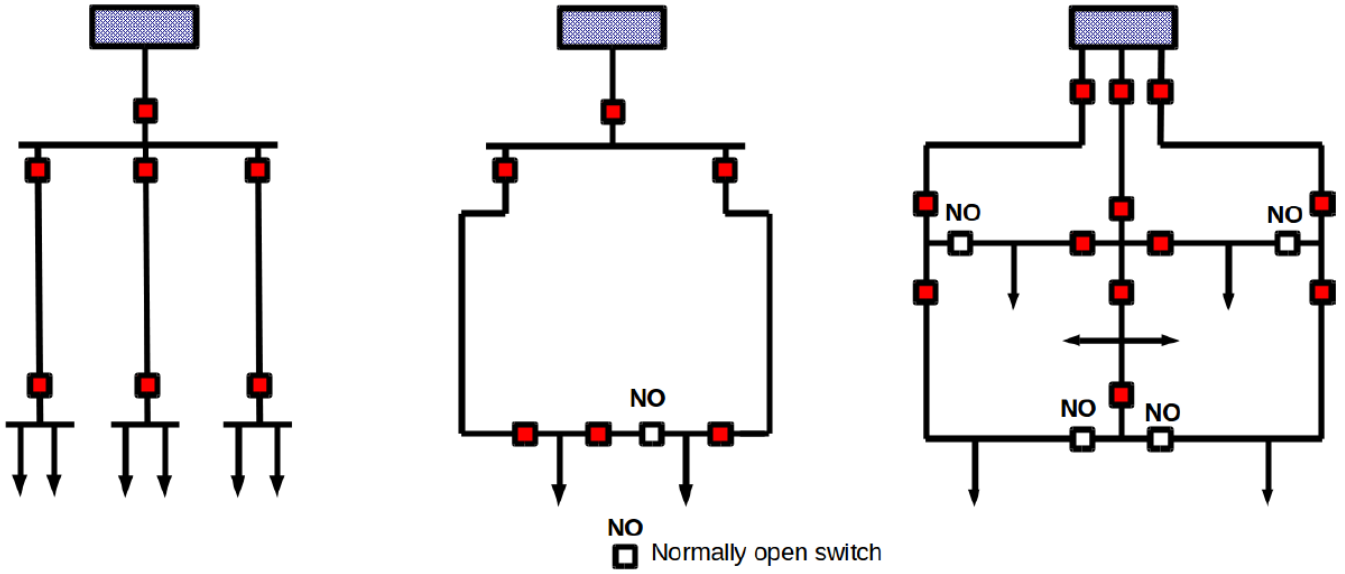
* Suma total de largos por circuitos



Red de distribución
Compleja y actualmente sin tecnología

Tipos de redes:

- Radial
- Anillo
- Enmallada

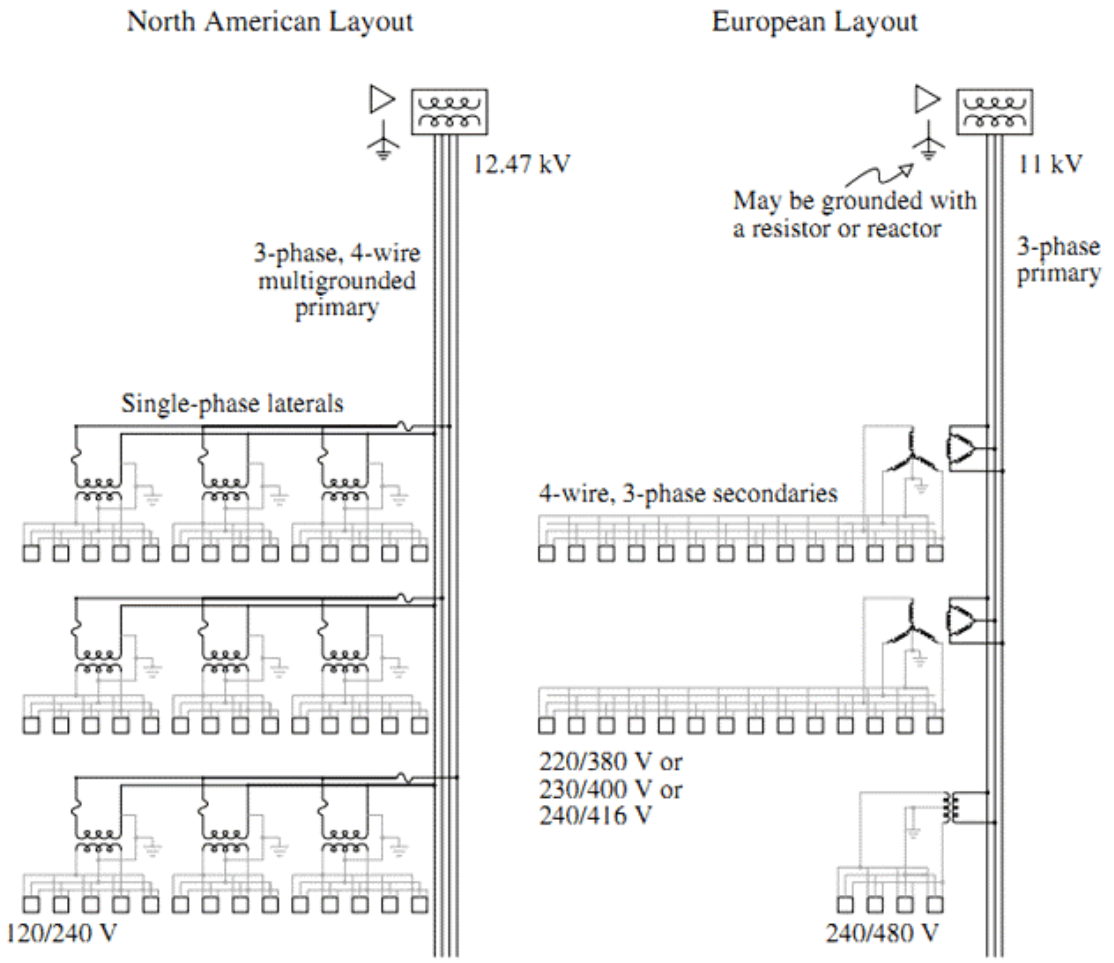


Fuente: Minh-Quan Dang, 2016

Red de distribución
EE.UU y Europea

EE.UU:
- 120/240* V
- Muchos trafos (pequeños)
- Trafos monofásicos

Europa:
- 240/480* V
- Menos trafos (grandes)
- Trafos trifásicos



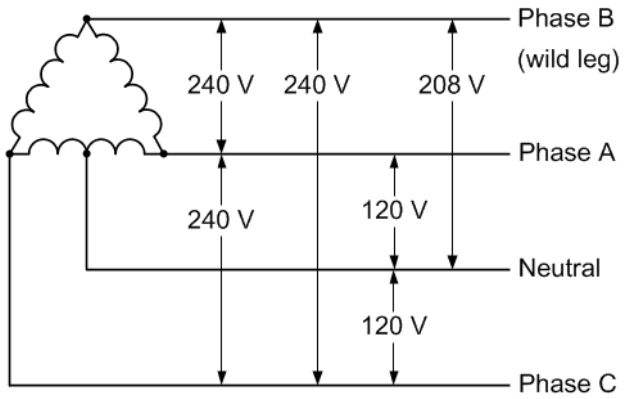
Fuente: Minh-Quan Dang, 2016

El cuarto cable en circuitos delta (4WD)

EE.UU y Europea

EE.UU

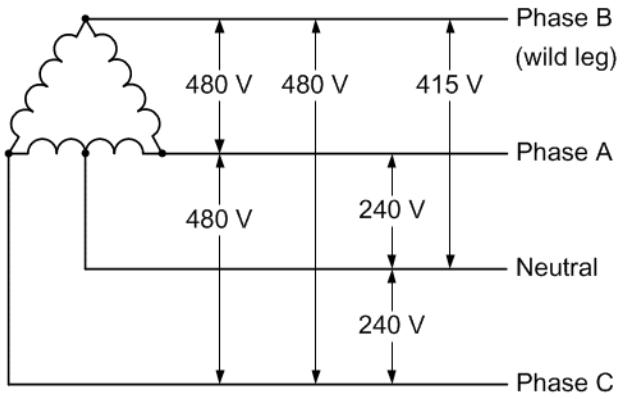
120/208/240 V



120V=Van, Vcn
240V=Vab, Vcb, Vca
208V=Vbn

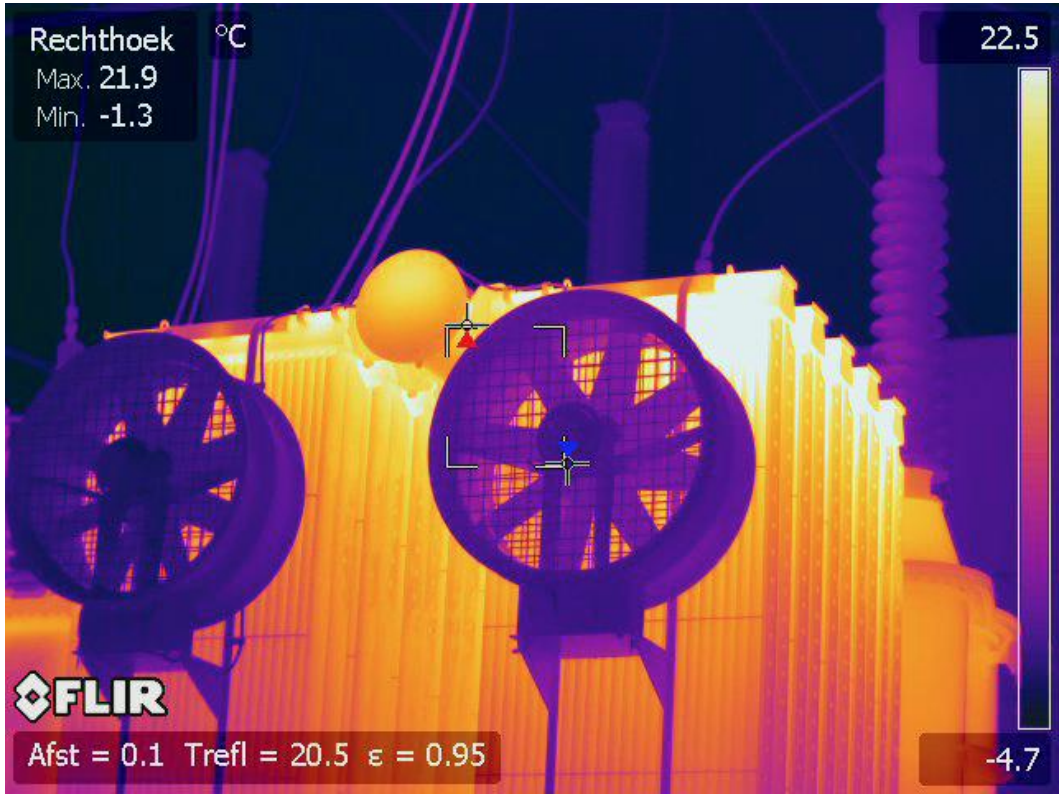
Europa

220/415/240 V



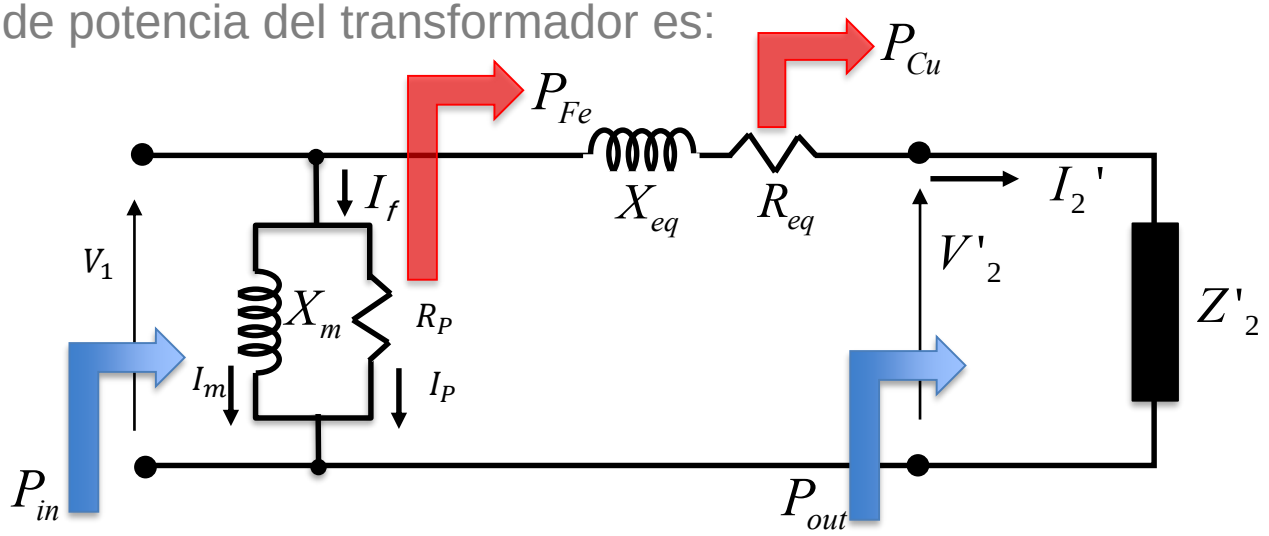
240V=Van, Vcn
480V=Vab, Vcb, Vca
415V=Vbn

Pérdidas y Eficiencia



Transformadores
Pérdidas y Eficiencia

El balance de potencia del transformador es:



$$P_{in} = P_{out} + P_{perdidas} \qquad P_{out} = V'_2 I'_2 \cos j_2$$

Las pérdidas se asocian al **fierro** (corrientes de Foucault e histéresis) que son fijas en el circuito aprox. y a los **devanados** debido a la resistencia del cable (pérdidas variables dependientes del consumo).

$$P_{perdidas} = P_{Fe} + P_{Cu} \begin{cases} P_{Fe} = P_0 = R_p I_p^2 \\ P_{cu} = R_{eq} I'^2_2 \end{cases}$$

Transformadores

Pérdidas y Eficiencia

La eficiencia en los transformadores dependerá de la carga y mide su capacidad de transferencia de “potencia activa” a una carga considerando las pérdidas:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_2' I_2' \cos\varphi_2}{V_1 I_1 \cos\varphi_1}$$

Podemos calcular el punto de eficiencia optima (usar “derivada del cociente”):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{pérdidas}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{V_2' I_2' \cos\varphi_2}{V_2' I_2' \cos\varphi_2 + R_{eq} I_2'^2 + R_p I_p^2}$$

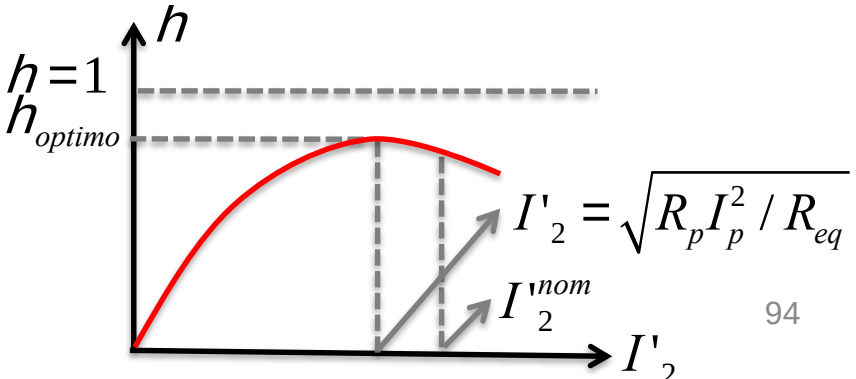
$$\frac{d\eta}{dI_2'} = \frac{V_2' \cos\varphi_2 \left(\cancel{V_2' I_2' \cos\varphi_2} + \cancel{R_{eq} I_2'^2} + R_p I_p^2\right) - V_2' I_2' \cos\varphi_2 \left(\cancel{V_2' \cos\varphi_2} + \cancel{2} R_{eq} I_2'\right)}{\left(V_2' I_2' \cos\varphi_2 + R_{eq} I_2'^2 + R_p I_p^2\right)^2}$$

$$\frac{d\eta}{dI_2'} = 0 \quad \Rightarrow$$

η máximo

$$R_p I_p^2 = R_{eq} I_2'^2$$

$$P_{Fe} = P_{Cu}$$

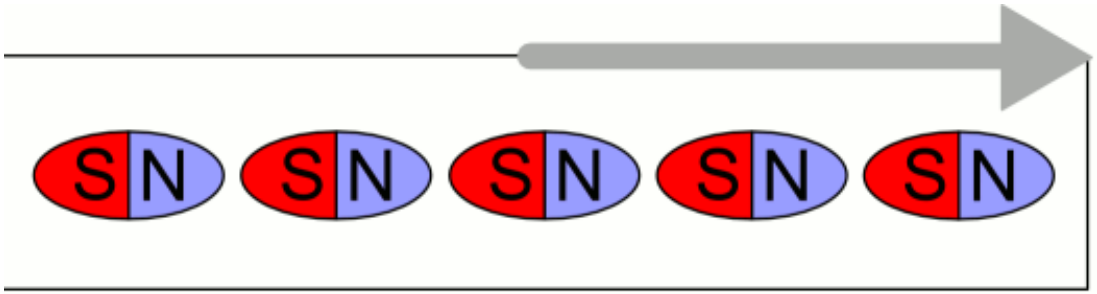


Transformadores

Ruido

Ruido en Núcleo: Los transformadores generan un ruido producido por el fenómeno de **magnetostricción** (propiedad de los materiales magnéticos que hace que estos cambien de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético). Por lo tanto, se genera un ruido del **doble de la frecuencia** del campo magnético (100 Hz para un transformador de 50 Hz) generado en el núcleo ferromagnético. El cual sufre cambios en la longitud.

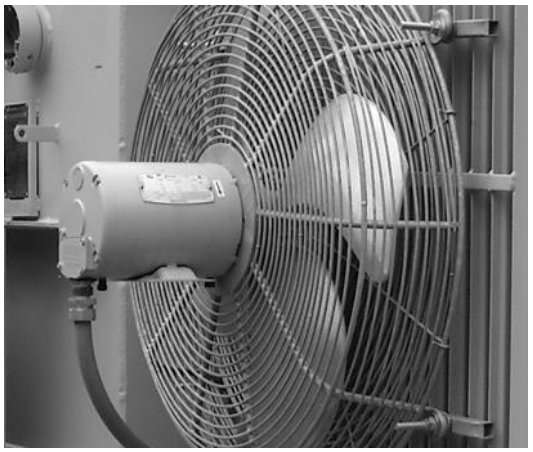
Ruido en Bobinas: Otro ruido se genera en los devanados debido a que se generan fuerzas repulsivas entre las bobinas del primario y secundario (primario genera una f.m.m y el secundario se opone al cambio). Este ruido tiene una intensidad proporcional a la magnitud de la corriente. Esto debe ser tomado en cuenta en el diseño, ya que estos movimientos pueden dañar la aislación (esmalte) de las bobinas (falla recurrente).





Refrigeración y Aislación







Transformadores

Aislación



La aislación es fundamental y un tema delicado en transformadores de alto voltaje donde se alcanzan tensión de varios kV en separaciones pequeñas, donde el aire es un posible conductor dejando de actuar como dieléctrico.

Aislación Eléctrica en Terminales: Los terminales de conexión se levantan a cierta altura y se utilizan aisladores de porcelana para impedir arcos eléctricos bajo cualquier condición ambiental.





Transformadores

Aislación y Temperatura

Aislación Eléctrica: Los cables de las espiras deben estar aislados para evitar cortocircuitos entre ellos, para lo cual se impregnan en una sustancia aislante (barniz eléctrico principalmente). Lamentablemente este barniz se daña a altas temperaturas y suele ser una de las fallas más comunes o la limitación de la vida útil del transformador.



Clases de Aislación: Los transformadores están diseñados para soportar diferentes temperaturas, lo que esta normado y es dato de placa:

- Clase A 65ºC (40ºC de temperatura ambiente).
- Clase C 80ºC (40ºC de temperatura ambiente).
- Clase B 90ºC (40ºC de temperatura ambiente).
- Clase F 115ºC (40ºC de temperatura ambiente).
- Clase H 150ºC (40ºC de temperatura ambiente).

Aislación Térmica: Se utilizan aisladores térmicos y eléctricos que soportan altas Tº como el cartón prespán, la Mica, el Asbesto y la Loza.

Transformadores
Refrigeración

Refrigeración: Los transformadores de altas potencias tienen el núcleo sumergido en aceite, el cual actúa como refrigerante y aislante. Cuando decaen sus propiedades dieléctricas debe ser remplazado.

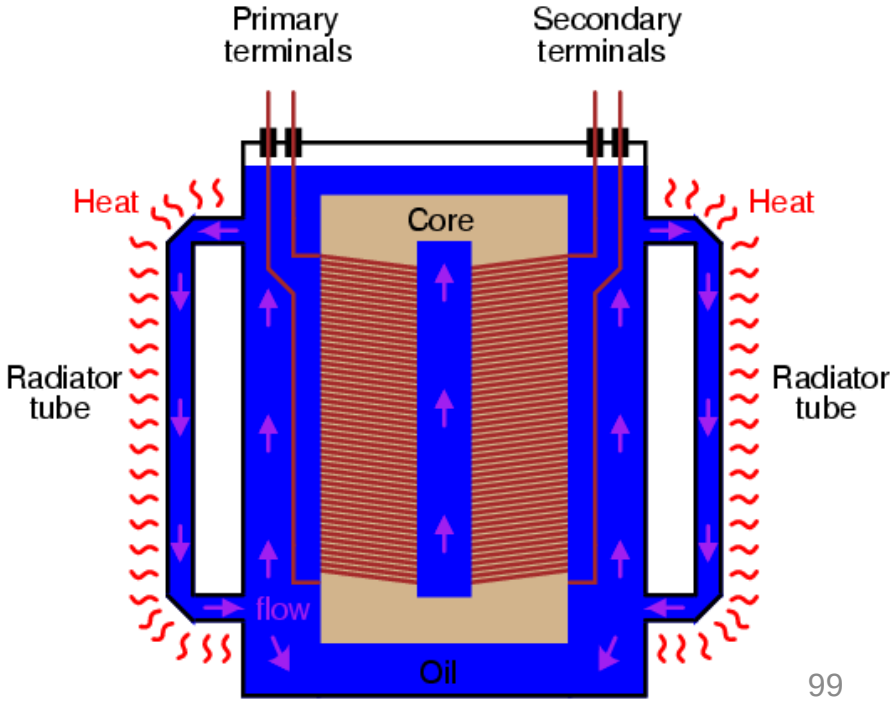
Tipos de ventilación y refrigeración:

- Convección Natural (N)
- Ventilación Forzada (F)

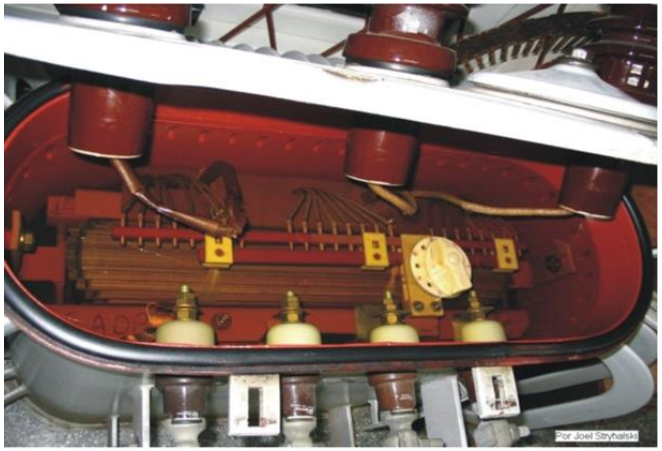
Tipos de refrigerantes:

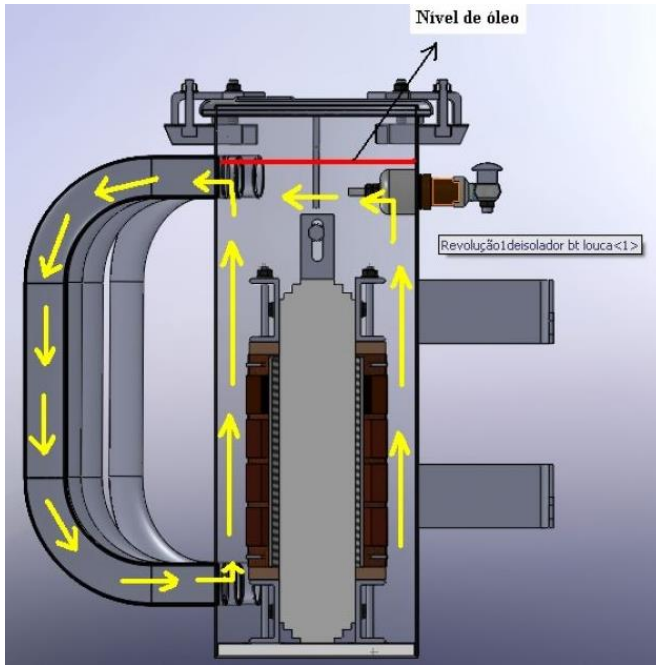
- Aceite (O)
- Agua (W)
- Gas (G)

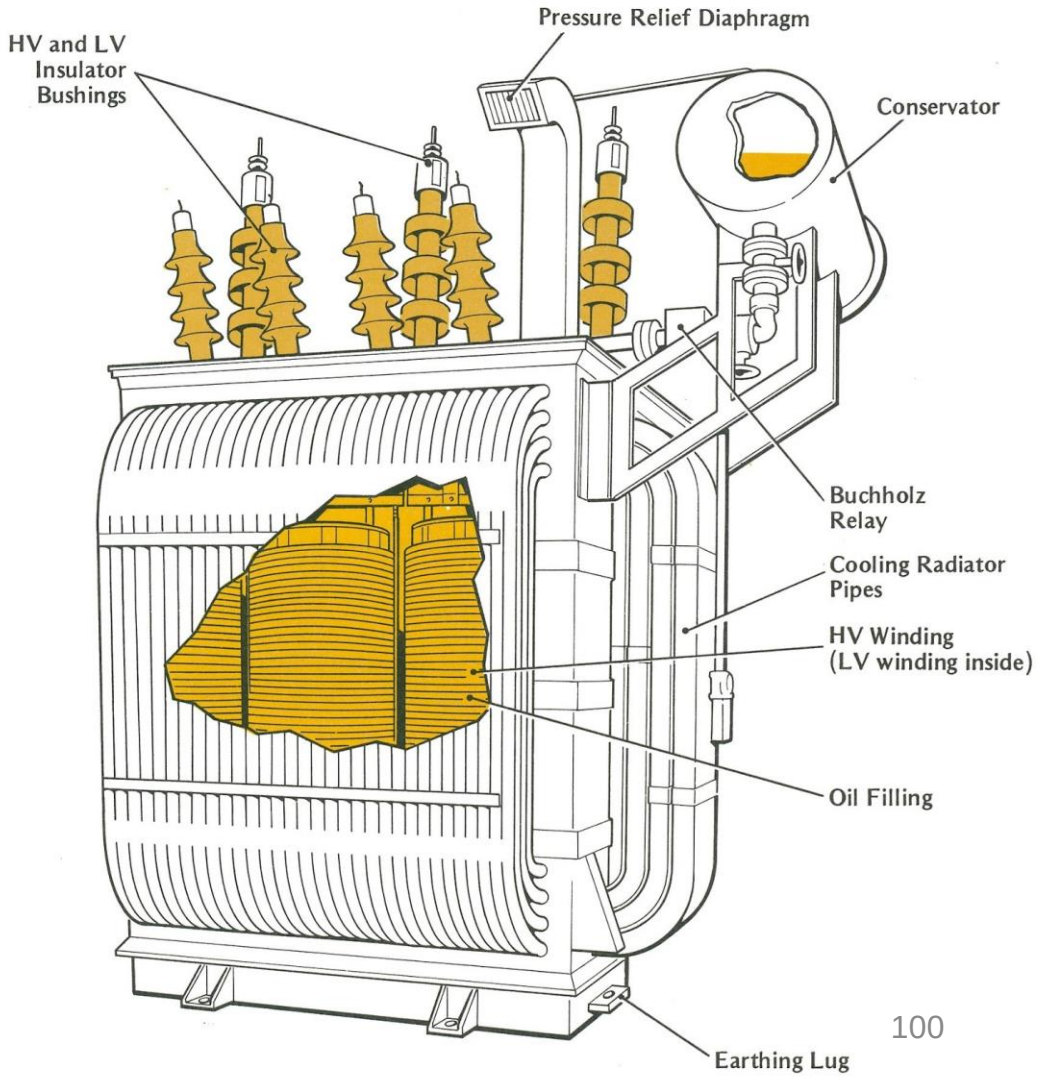




Transformadores
Refrigeración

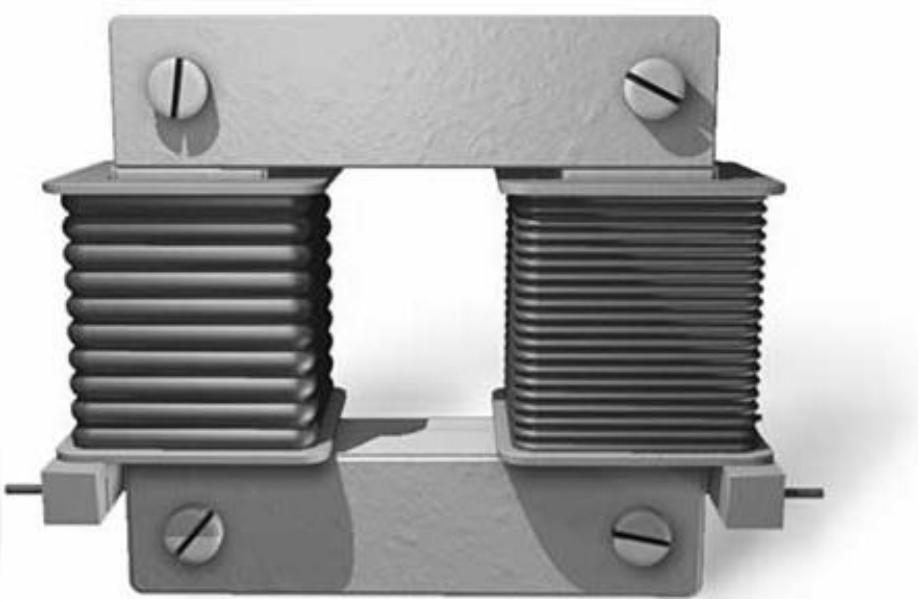






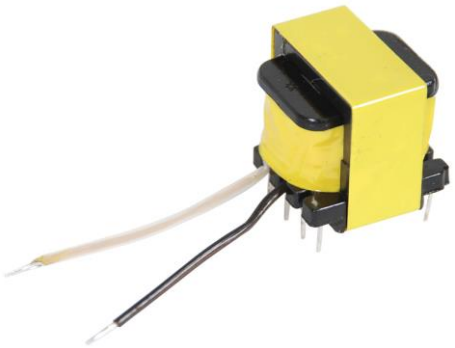
Características



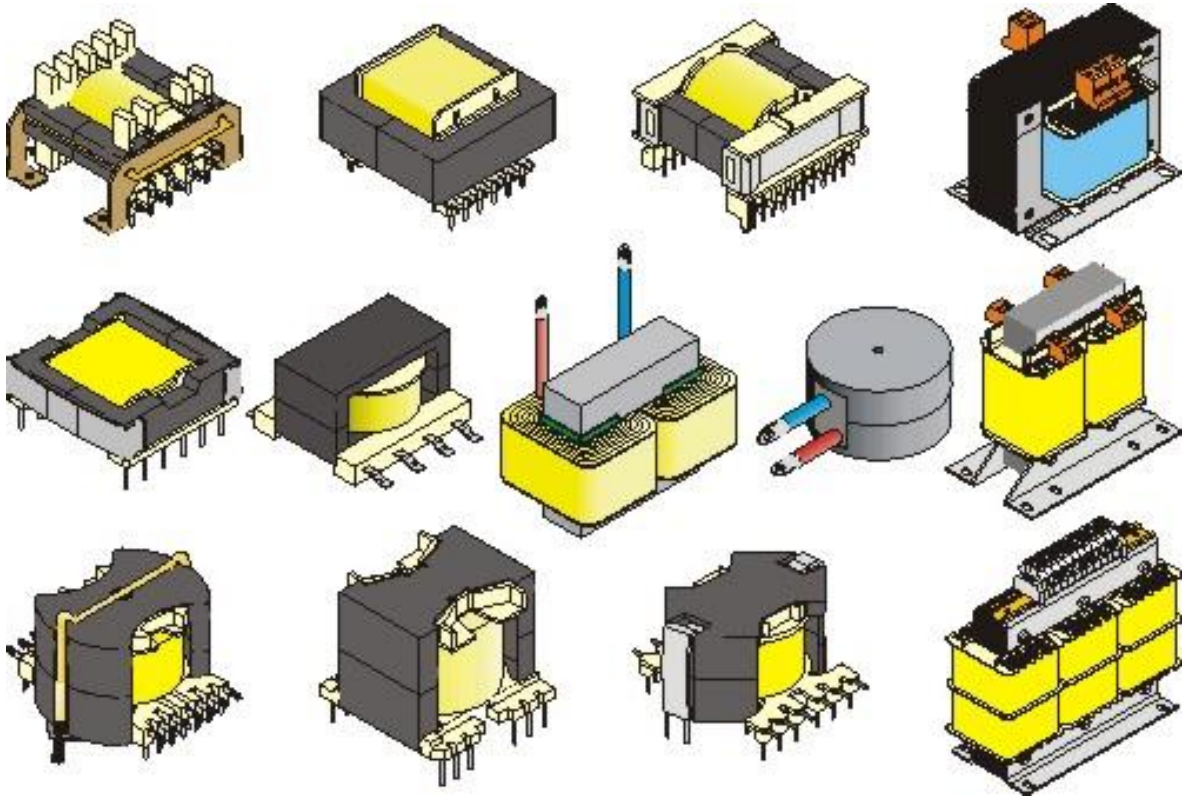


Transformadores Pequeños

Características Constructivas

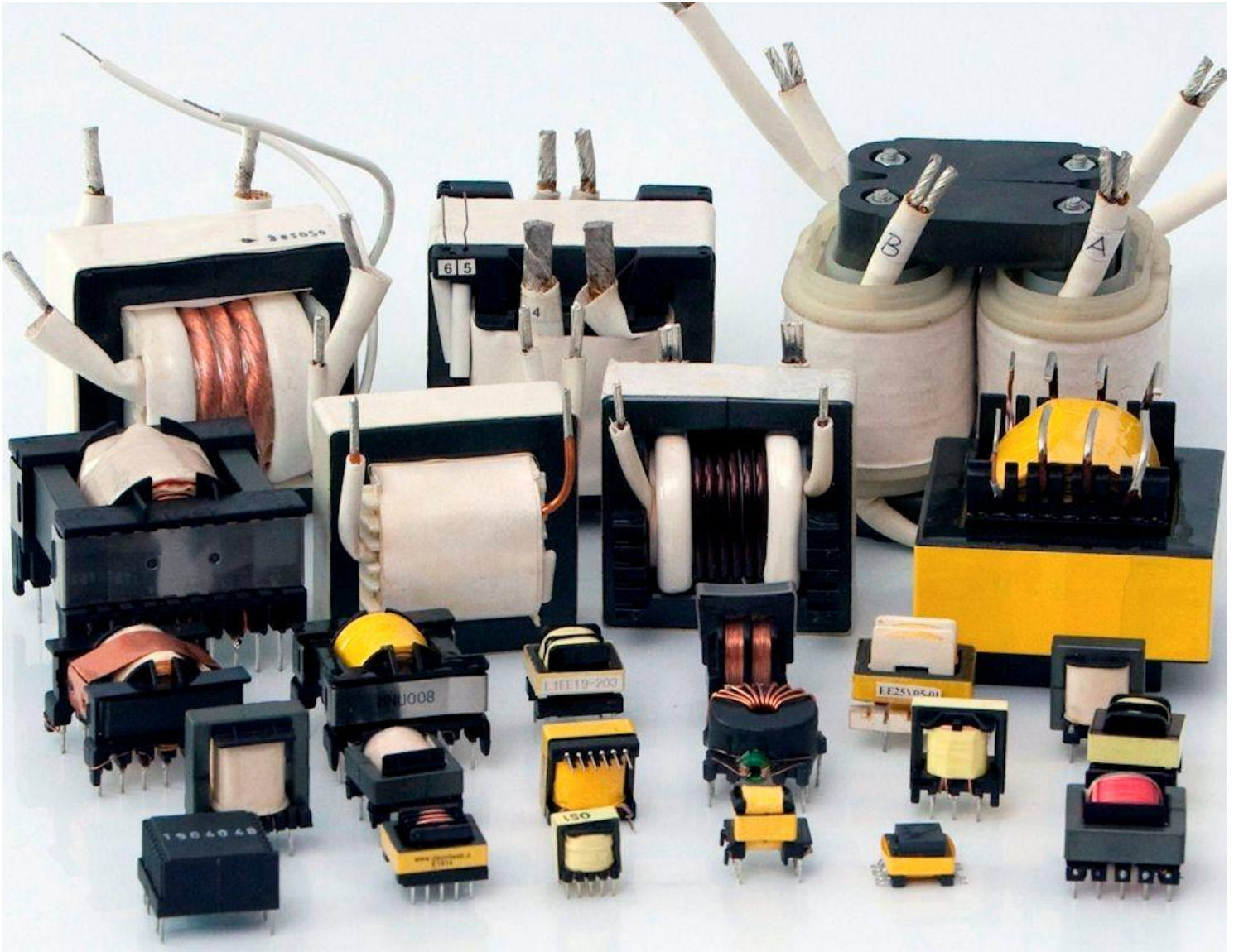






Transformadores Pequeños

Características Constructivas



Transformadores Grandes

Características Constructivas





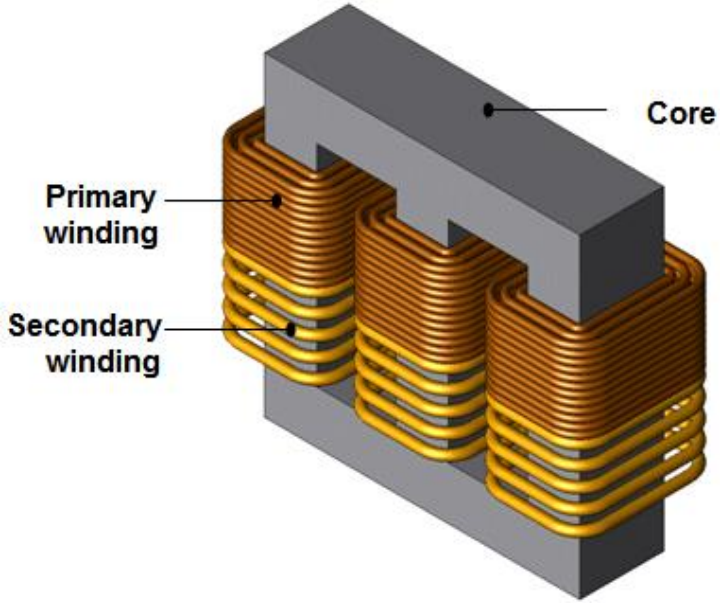
Transformadores

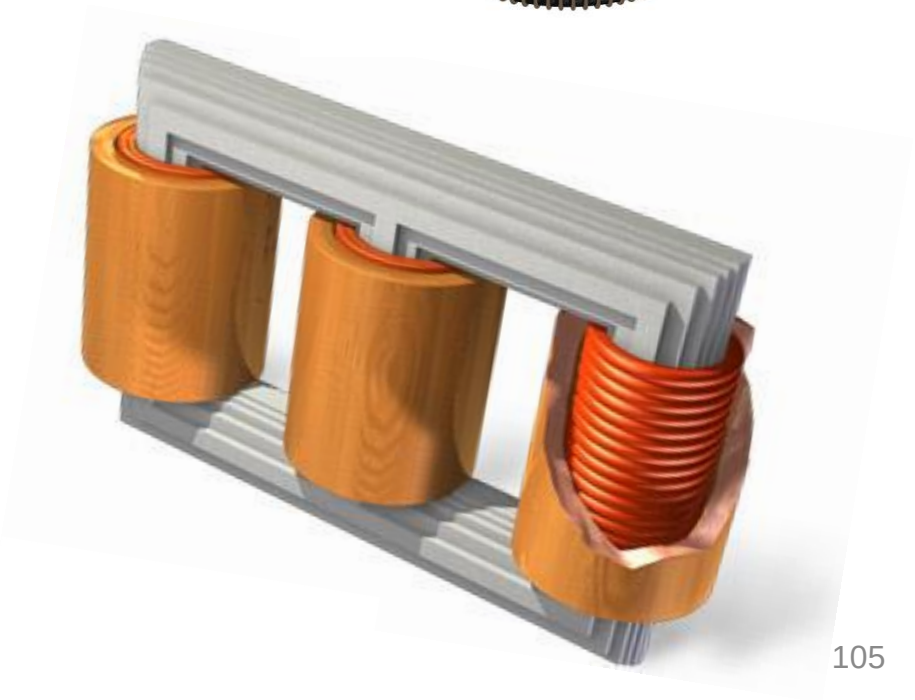
Características Constructivas

En términos constructivos, los transformadores se constituyen por:

- Núcleo
- Enrollados o Devanados
- Sistema de Refrigeración
- Aislación







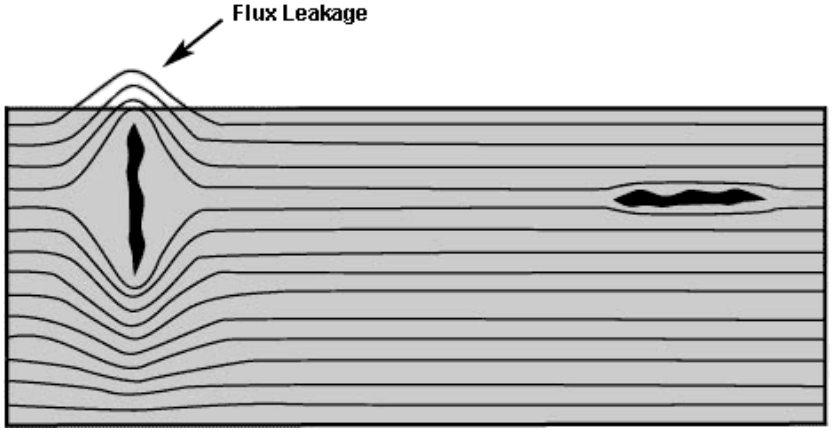
Transformadores

Características Constructivas

Las **pérdidas** se traducen en un aumento de la **temperatura**, lo que es un tema muy delicado en transformadores de altas potencias (sobre 10kVA) ya que produce daño en las aislaciones.

La temperatura de operación debe ser controlada rigurosamente durante la operación teniendo en cuenta principios de diseño y operación como:

- Reducir al mínimo las corrientes parásitas: enchapado y material especial (**fierro silicoso**: el silicio va de 0-6.5% y aumenta la resistencia del núcleo).
- Reducir la saturación del núcleo (fierro silicoso de **grano orientado**: 30% más de flujo).
- No operar el transformador sobre su capacidad nominal.





Transformadores

Tipos de Núcleo

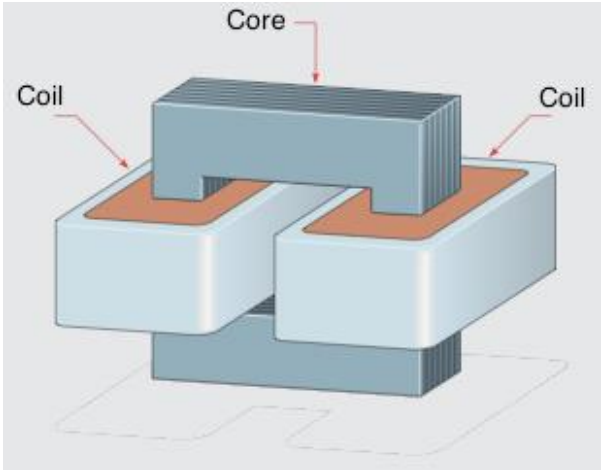
El núcleo es el confinador del flujo magnético y constituye el circuito magnético del mismo.

Se fabrica con chapas de acero al silicio (**acero eléctrico**) recubiertas por una capa aislante muy fina para minimizar las pérdidas por corrientes de Foucault.

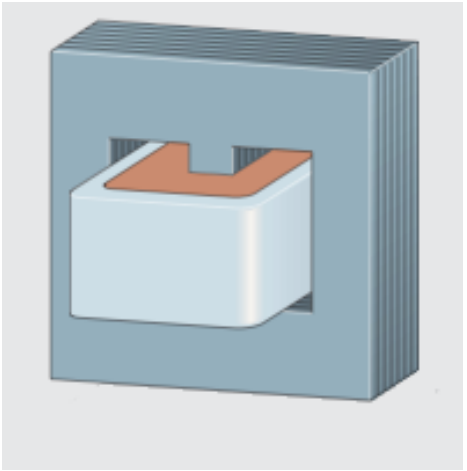
Además, el acero eléctrico tiene una curva de histéresis pequeña para reducir la energía disipada por ciclo.

Según su estructura se puede clasificar en:

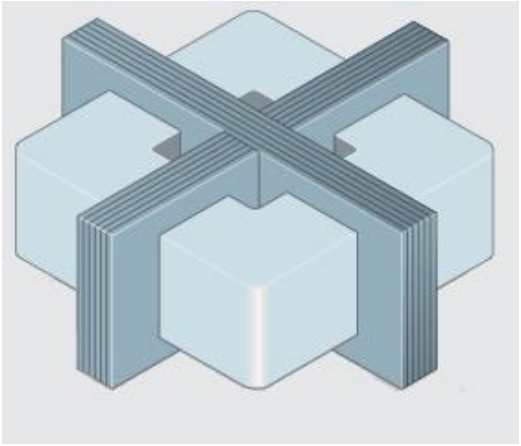
- Acorazado
- Pierna o de columnas
- Anular o toroidal (nucleo de ferrita solida)



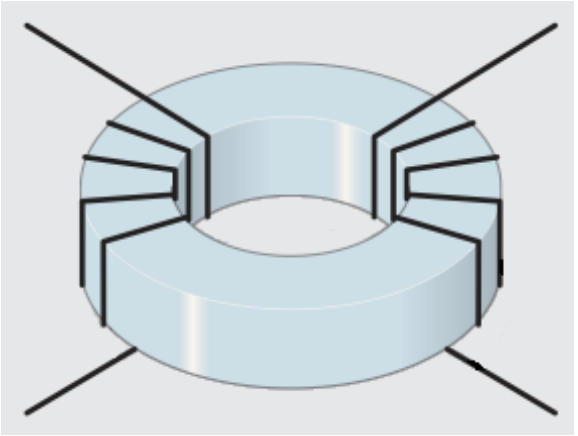
Pierna, Columna ó Núcleo



Acorazado



Tipo H
(Acorazado doble)



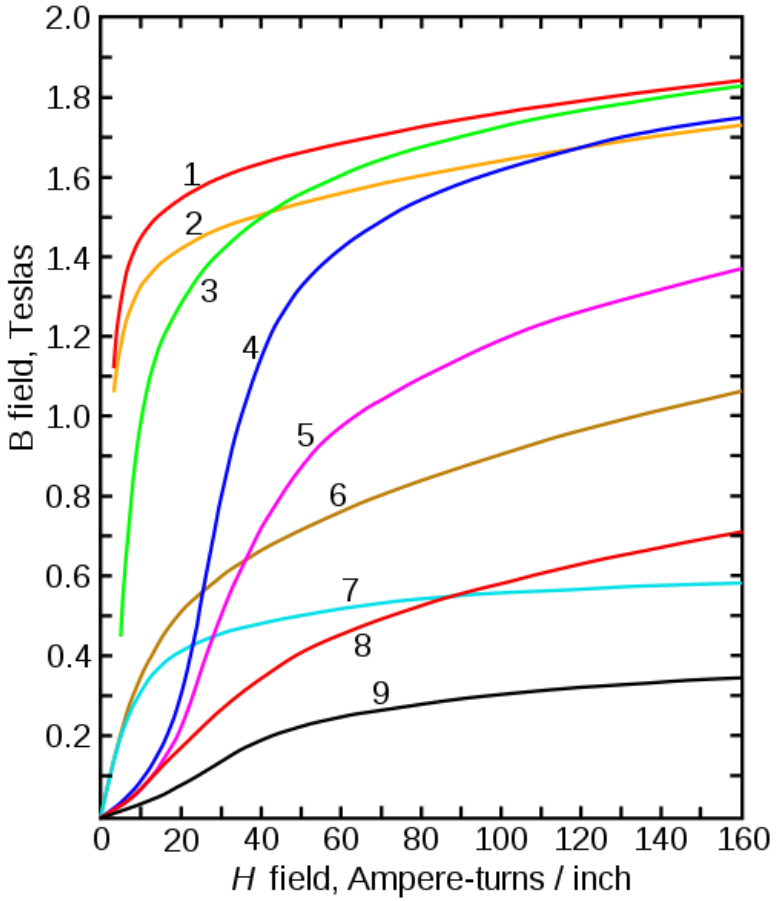
Toroidal

Transformadores

Material del Núcleo

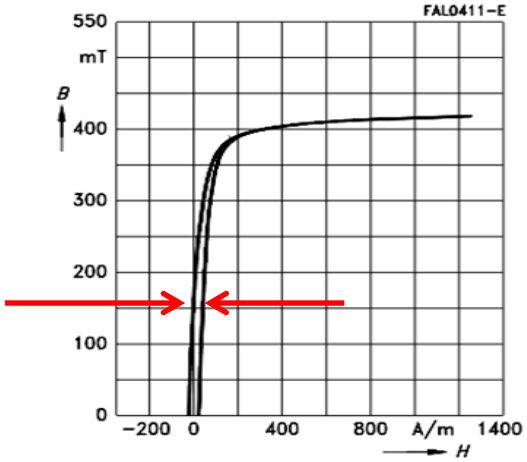
Curva de Magnetización:

1. Hoja de acero
2. Acero al silicio
3. Acero crucible (de crisol)
4. Acero al tungsteno
5. Acero magnético
6. Hierro crucible (de crisol)
7. Níquel
8. Cobalto
9. Magnetita



Se utilizan materiales con curva de histéresis pequeña para minimizar las pérdidas por ciclo. Otra variable es la saturación y la resistencia eléctrica y mecánica del material.

Un ejemplo es el lazo de la ferrita **"SIFERRIT EPCOS N27".**

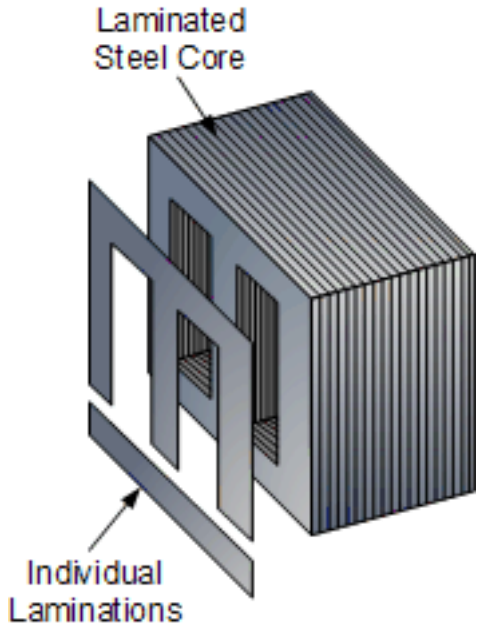


Dynamic magnetization curves
(typical values)
(f = 10 kHz, T = 100 °C)

Transformadores
Construcción del Núcleo

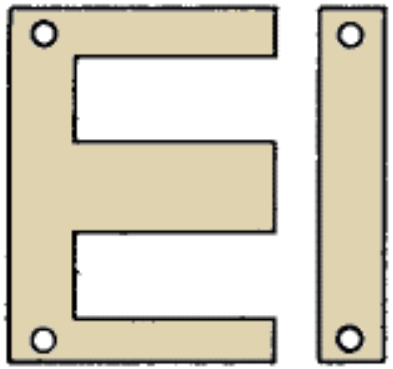
Las “chapas” para la laminación del núcleo tienen estructuras normalizadas, con dimensiones tabuladas, por convención (DIN, entre otras), y su elección depende de la potencia y frecuencia de operación del transformador.



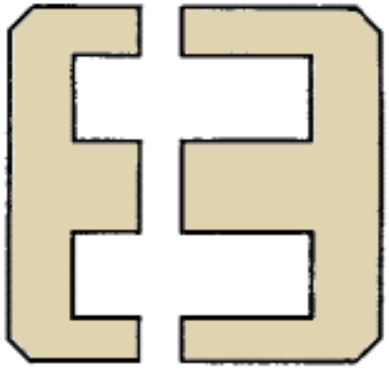


Transformadores

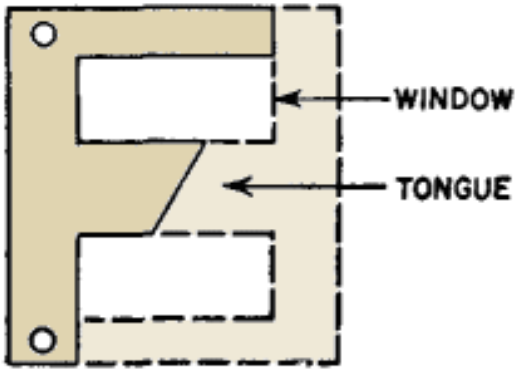
Construcción del Núcleo



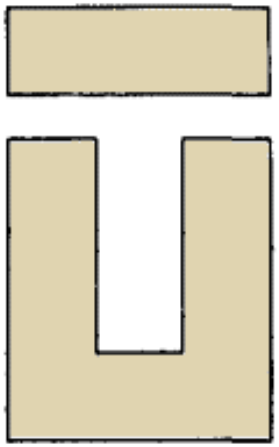
E-I



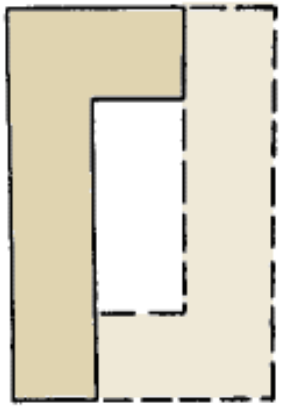
E-E



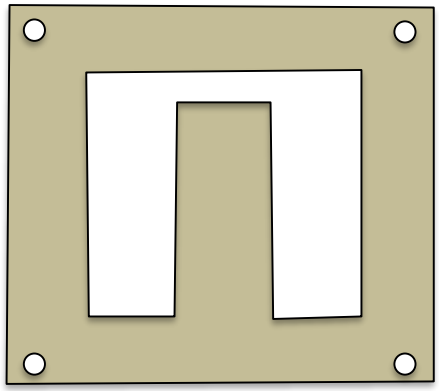
F



U-I



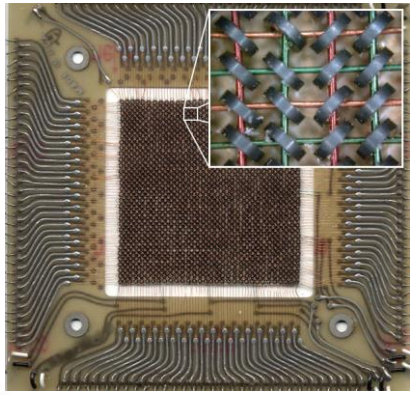
L



M

Transformadores

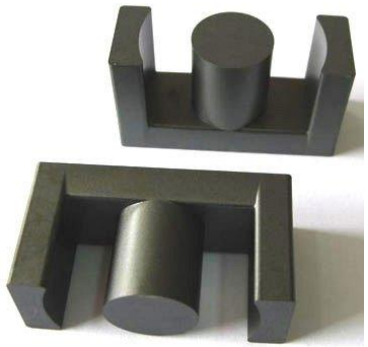
Núcleos de Ferrita

















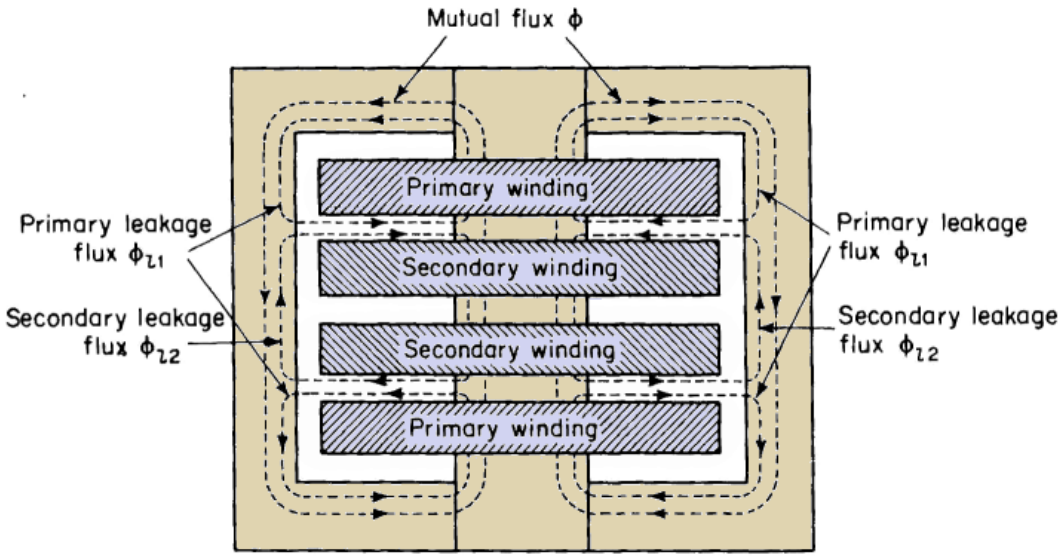


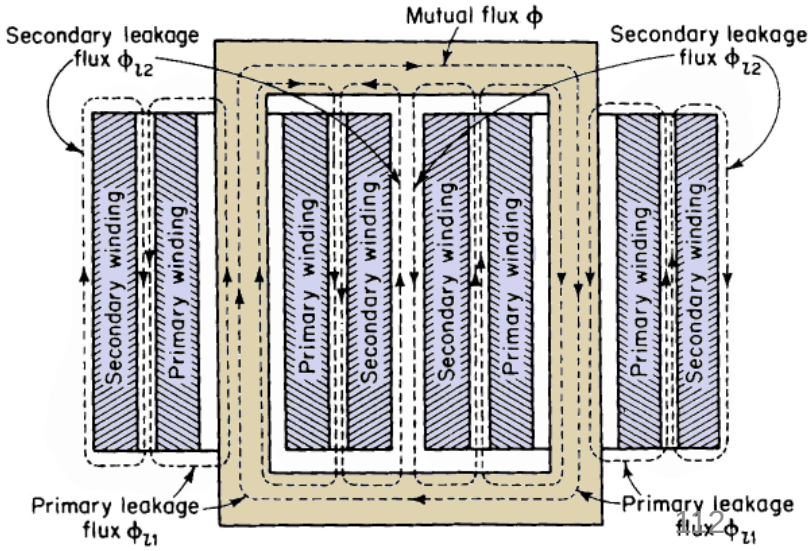
Transformadores

Disposición de los Devanados

La disposición de los devanados se realiza en las columnas del núcleo y depende del tipo de núcleo utilizado. Sin embargo se pueden clasificar en dos tipos principales de disposición:

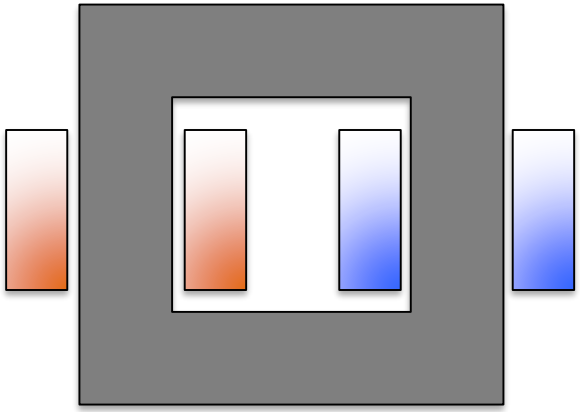
- **Devanados concéntricos:** comparten la misma columna (una o más) y se dispone uno sobre otro (bajo flujo de fuga y resistencia mayor en devanado externo).
- **Devanados alternados:** se cierran como discos sobre una columna.
- **Devanados independientes:** devanados en columnas independientes.



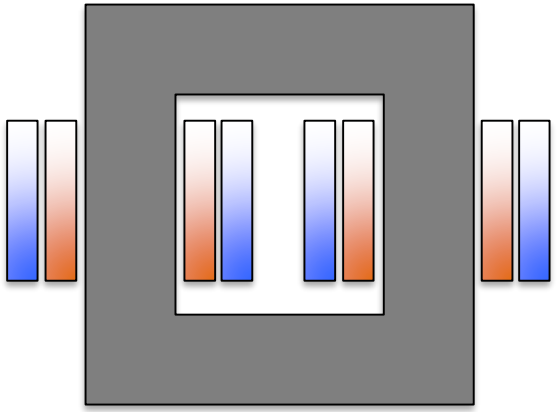


Transformadores

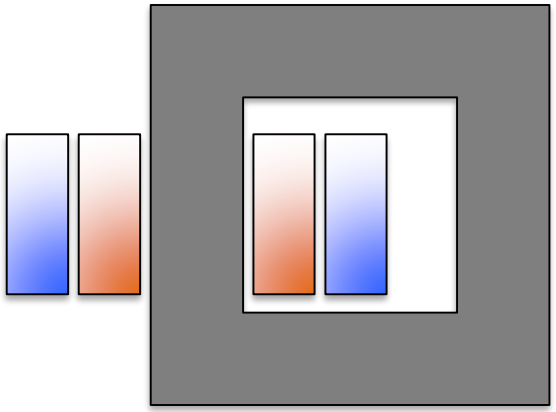
Disposición de los Devanados



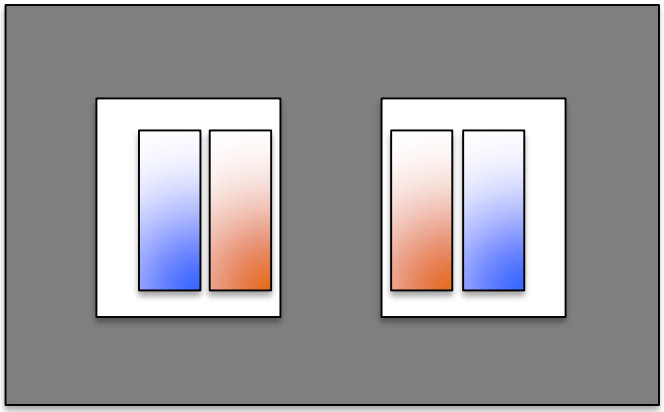
Alto flujo de fuga (2 carretes)



Bajo flujo de fuga y resistencia devanado AT mayor (2 carretes)



Bajo flujo de fuga y resistencia devanado AT mayor (1 carrete)



Muy bajo flujo de fuga y resistencia devanado AT mayor (1 carrete)

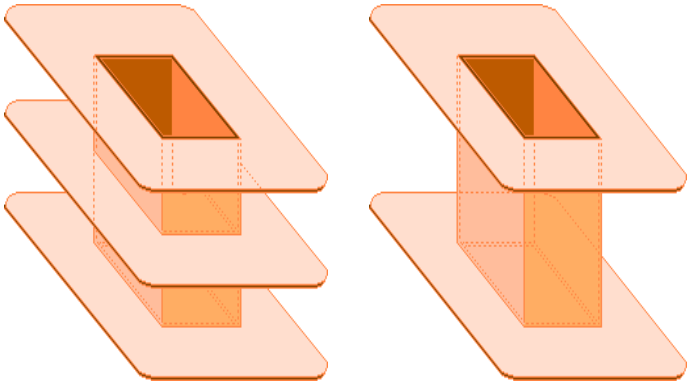
Transformadores

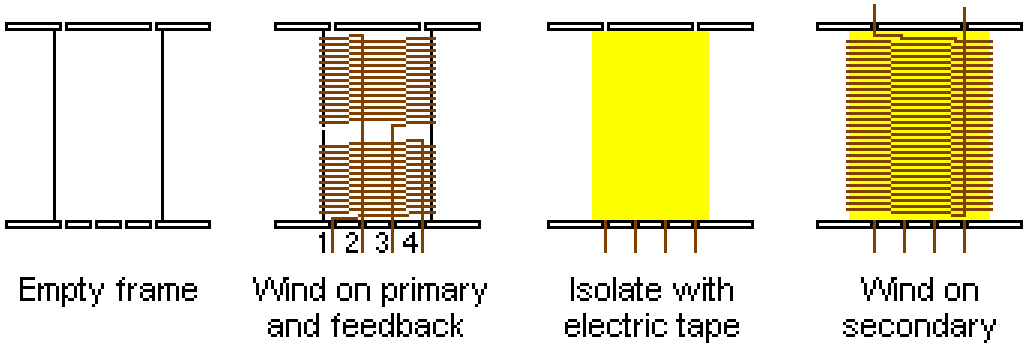
Bobinado de los Devanados

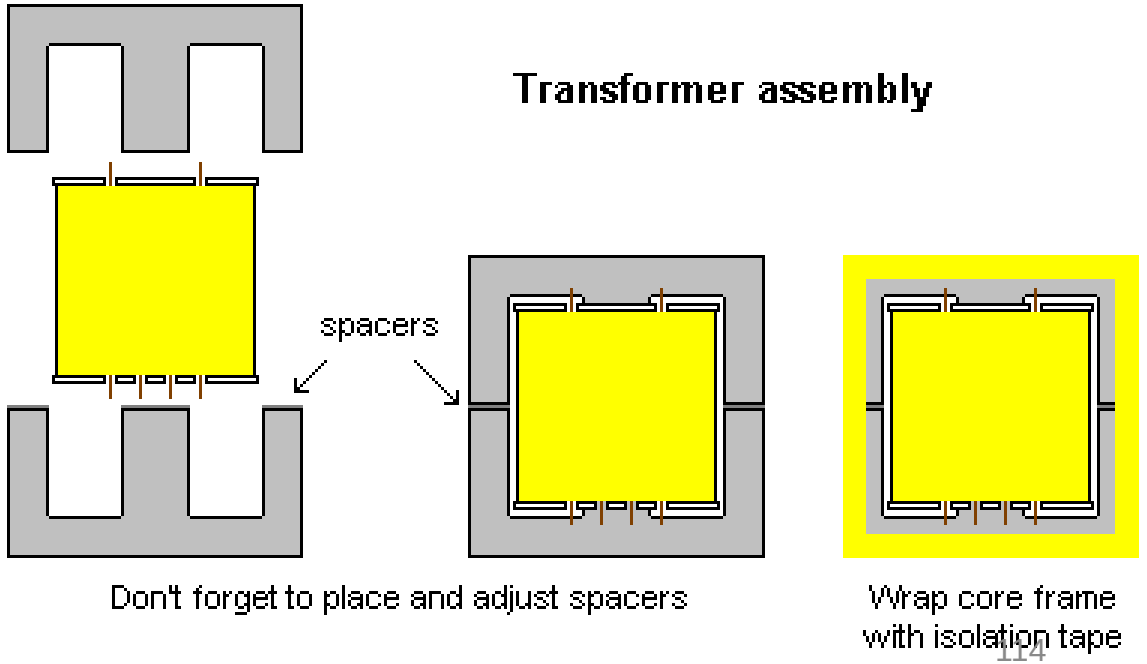
Los conductores son de **cobre** o **aluminio** bañados en barniz aislante, de sección redonda, “spaghetti” o incluso por plancha (Aluminio).

El bobinado se realiza en una **formaleta** o **carrete** y luego se agrega al núcleo.

Se añade una capa de papel aislante entre diferentes bobinados para la aislación.

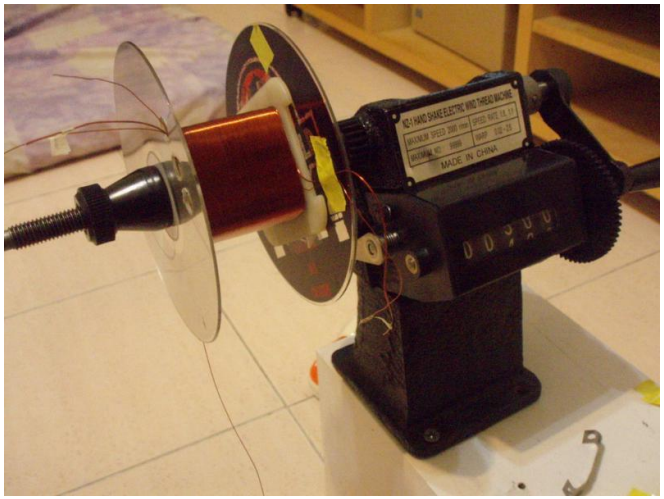


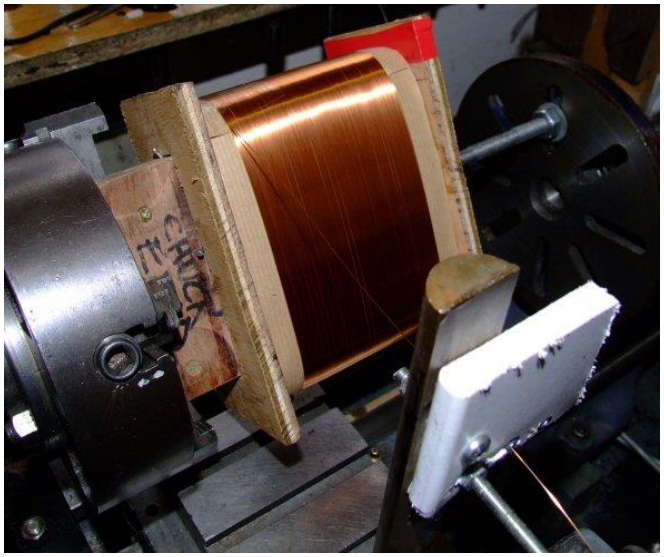


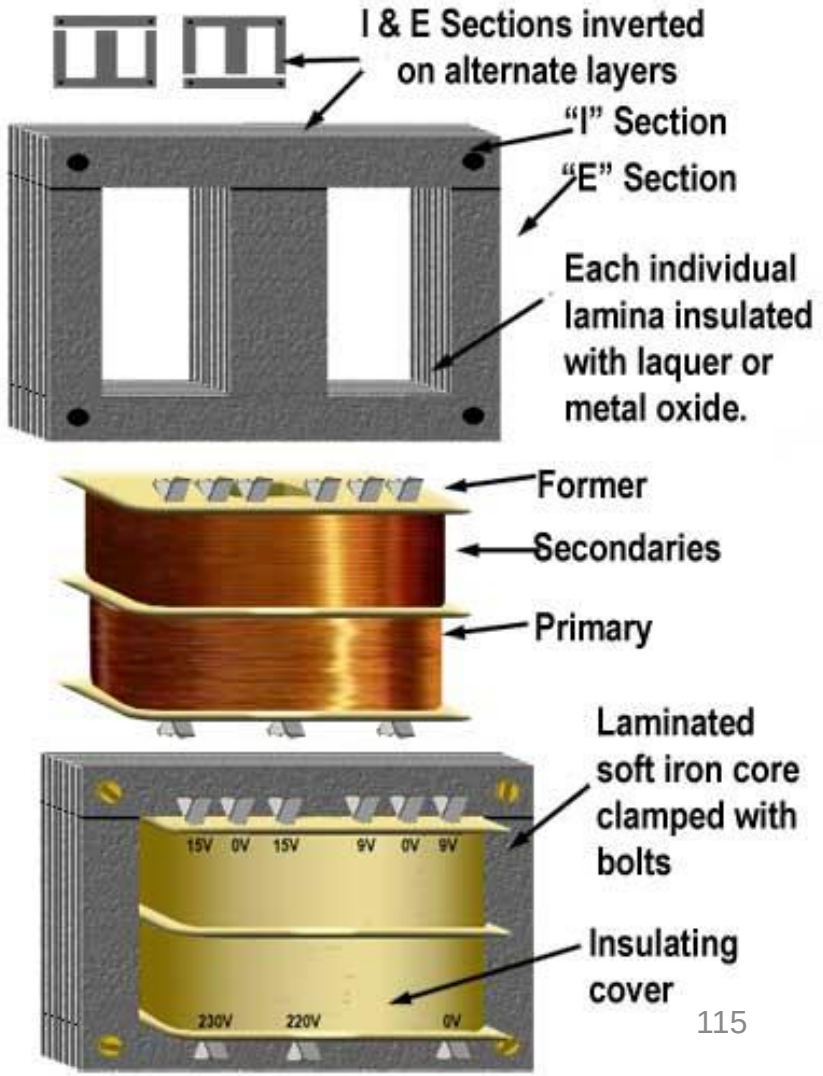


Transformadores

Bobinado de los Devanados



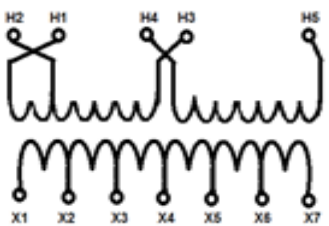




Transformadores

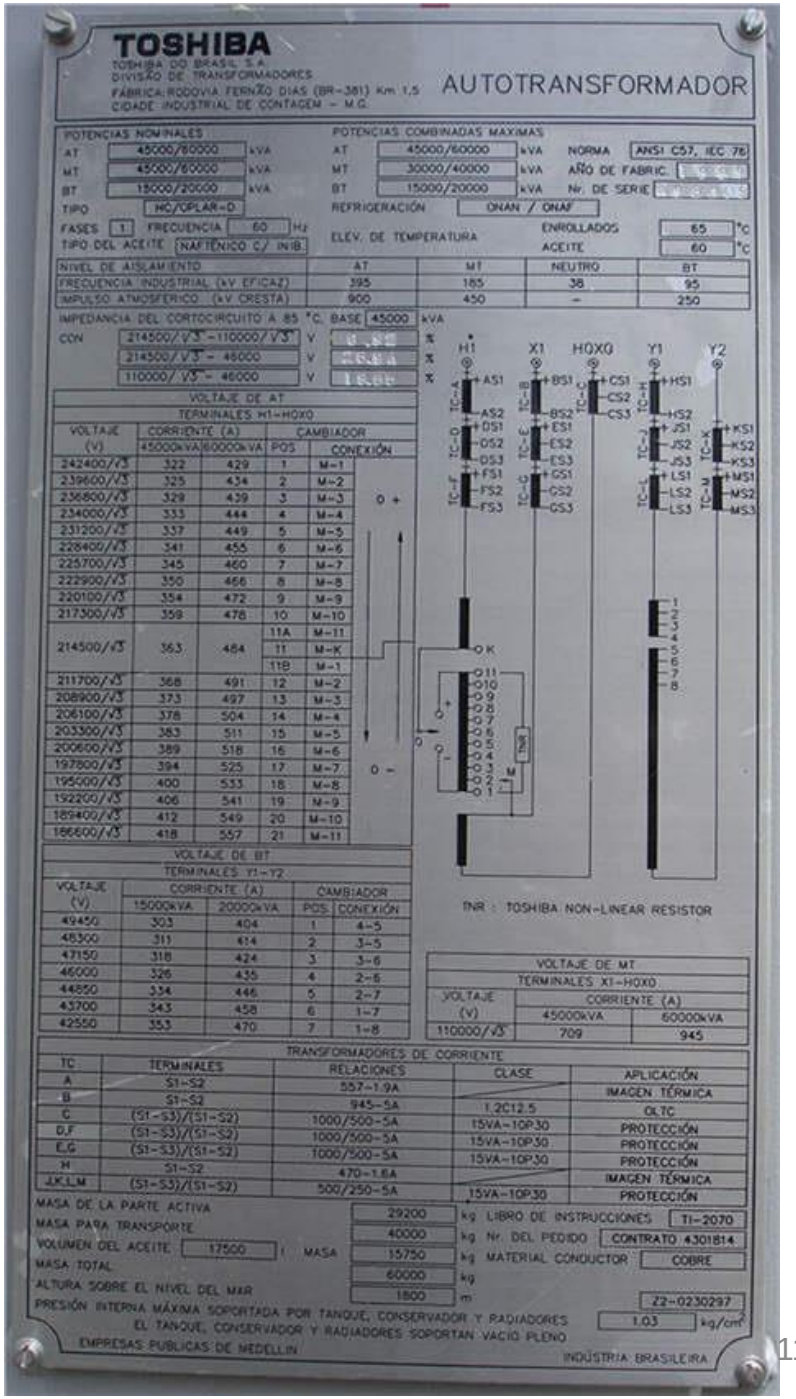
Datos de Placa de un “Transformador Tipo”

Tomado de un Transformador Monofásico Experimental
IEE2273 Laboratorio de Máquinas Eléctricas

		WESTINGHOUSE			
Serial		Dry Type			Single Phase
61D302		Laboratory			Subtractive Polarity
Style		TRANSFORMER			50/60 Cycles
1609342		Class B Insulation			
		VOLTS	CONNECT	LINE LEADS	
		220	H3 TO H4	H1-H5	
	HIGH	220/110*	H3 TO H4	H1-H3-H5	3 KVA
		191**	H3 TO H4	H2-H5	Continuous
		110	H1TO H4	H1-H5	80ºC Temp. Rise
			H3 TO H5		
					
		110		X1-X7	
		110/55*		X1-X5-X7	2.8 %
	LOW	95.5**		X1-X6	Impedance at 75ºC
		55		X1-X5	60 Cycles
		22		X1-X4	
		11		X1-X3	
		5,5		X1-X2	
	* Three Wire Operation **Scott taps				
	All Taps except Scott are reduce capacity				
63926-A	WESTINHOUSE ELECTRIC CORPORATION U.S.A				Made in USA

Autotransformadores

Datos de Placa

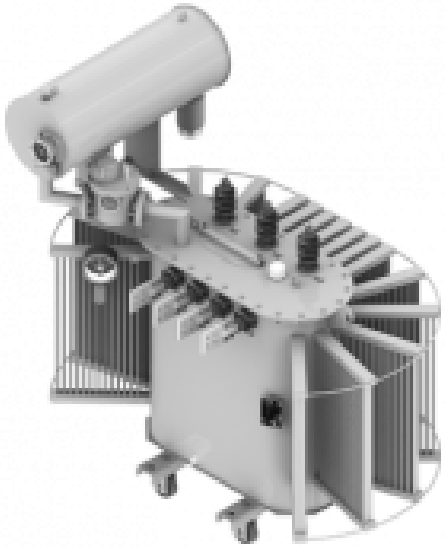


Construcción de Grandes Transformadores







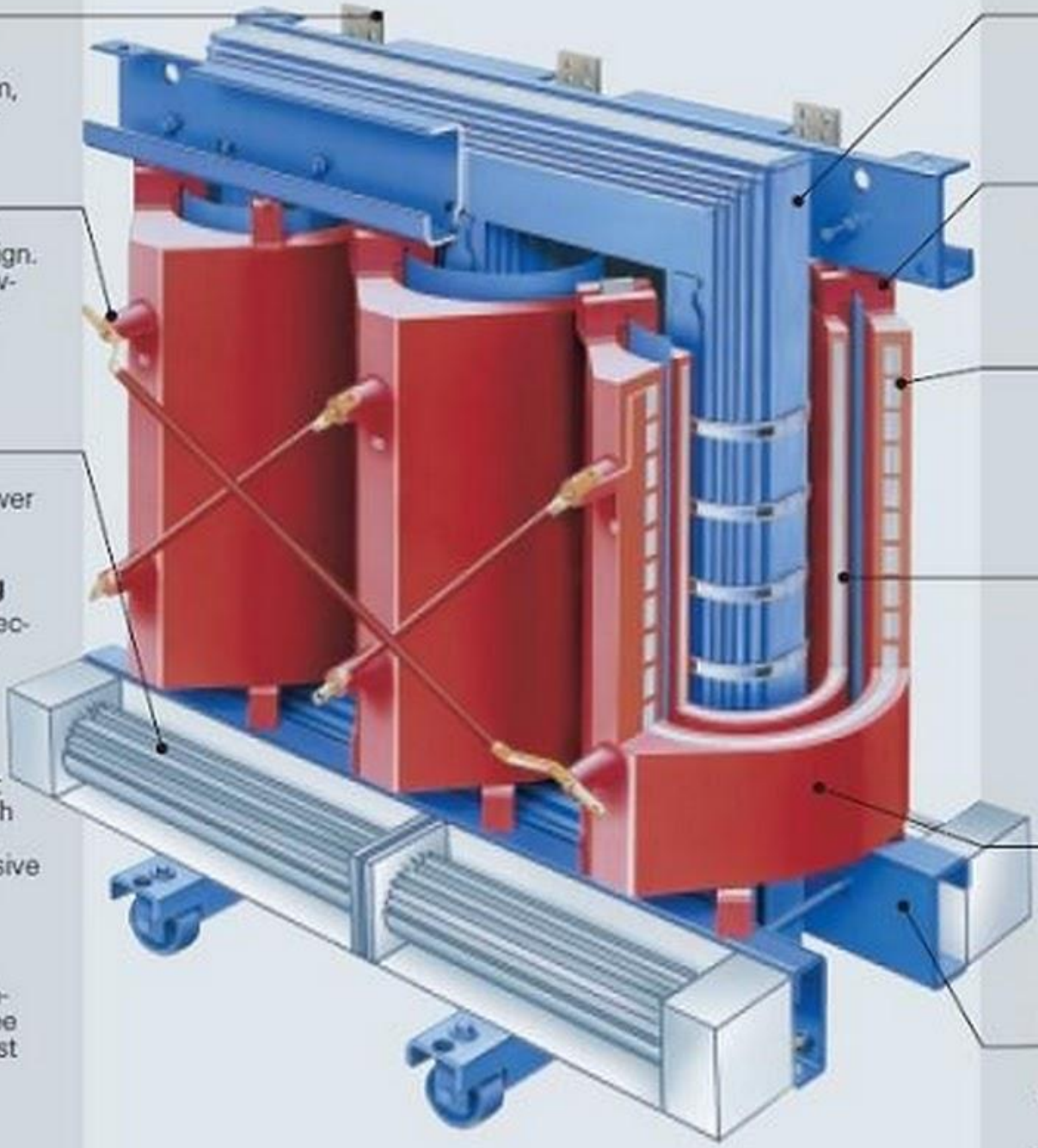


Transformadores Trifásicos

Transformador Seco







LV terminals

Normal arrangement: Top, rear
Special version: Bottom, available on request at extra charge

HV terminals

Variable arrangements, for optimal station design. HV tapping links on low-voltage side for adjustment to system conditions, reconnectable in de-energized state

Cross-flow fans

Permitting a 50% increase in the rated power

Temperature monitoring

By PTC thermistor detectors in the LV winding

Paint finish on steel parts

Multiple coating, RAL 5009. On request: Two-component varnish or hot-dip galvanizing (for particularly aggressive environments)

Ambient class E2

Climatic category C2 (If the transformer is installed outdoors, degree of protection IP 23 must be assured)

Fire class F1

Three-leg core

Made of grain-oriented, low-loss electrolaminations insulated on both sides

Resilient spacers

To insulate core and windings from mechanical vibrations, resulting in low noise emissions

HV winding

Consisting of vacuum-potted single foil-type aluminum coils.

LV winding

Made of aluminum strip. Turns firmly glued together by means of insulating sheet wrapper material

Insulation: Mixture of epoxy resin and quartz powder

Makes the transformer maintenance-free, moisture-proof, tropicalized, flame-resistant and self-extinguishing

Clamping frame and truck

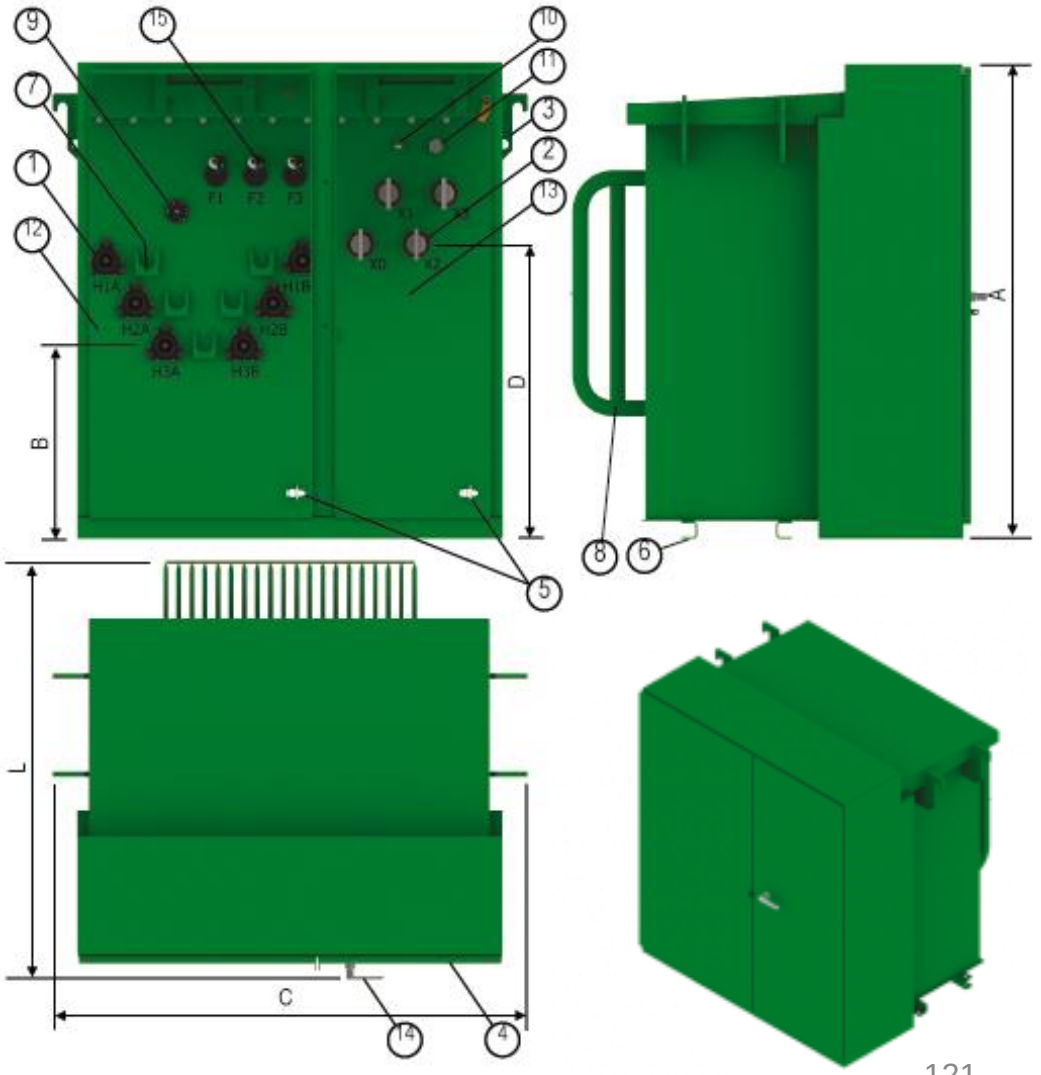
Rollers can be swung around for lengthways or sideways travel

* on-load tap changers on request.

Transformadores Trifásicos
Tipo pedestal



1 Aislador de alta tensión
2 Aislador de baja tensión
3 Gancho para izar
4 Placa de características
5 Conector de Puesta a tierra
6 Estructura de apoyo y fijación
7 Soporte para desconectables
8 Radiadores
9 Mando Externo del conmutador
10 Válvula de sobrepresión
11 Dispositivo de llenado
12 Compartimiento de tensión superior
13 Compartimiento de tensión inferior
14 Manilla de las puertas
15 Fusible bayoneta

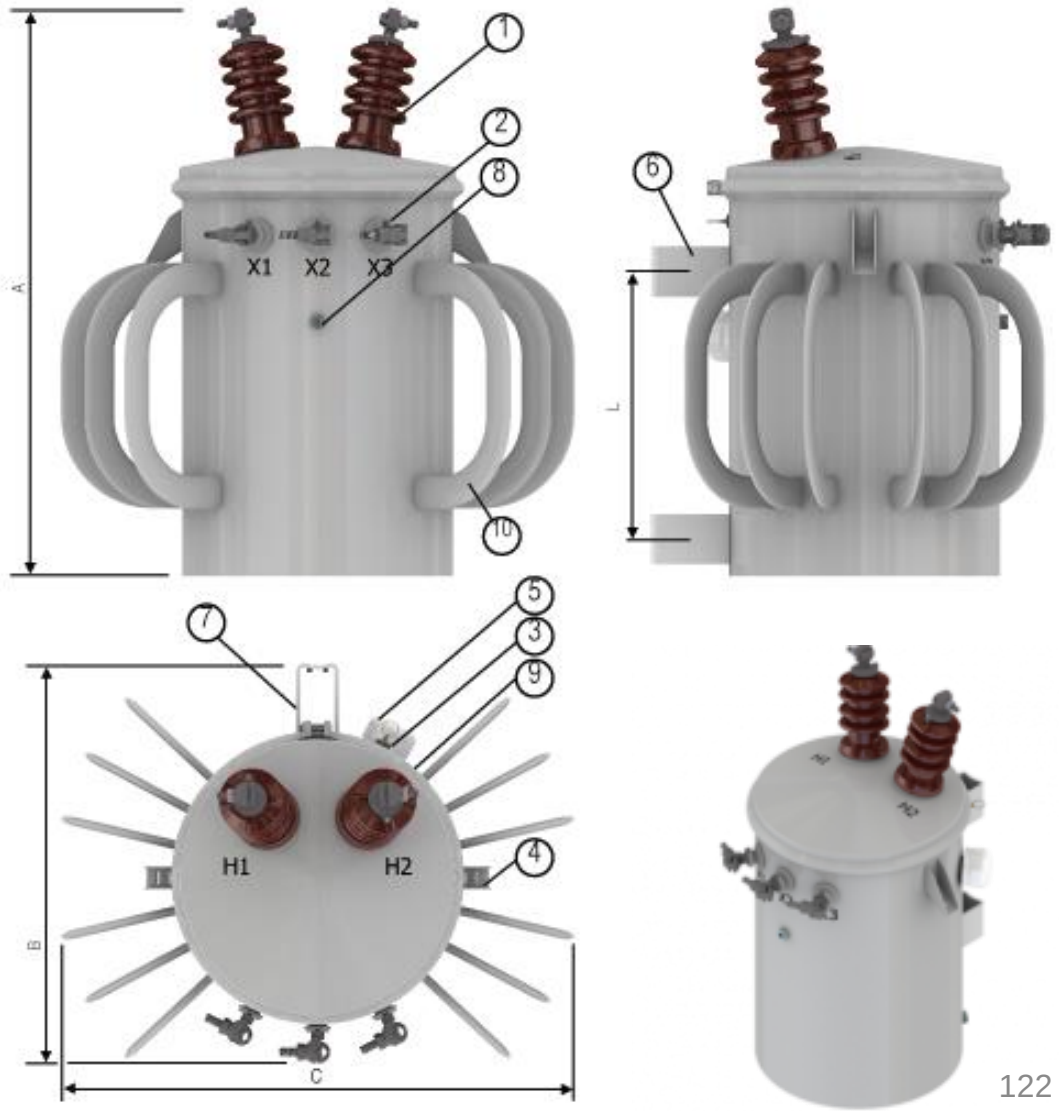


Transformador Monofásico

Distribución en poste

① Aislador de alta tensión
② Aislador de baja tensión
③ Válvula de alivio de sobrepresión
④ Gancho para izar
⑤ Mando externo del conmutador
⑥ Soporte de fijación
⑦ Placa de características
⑧ Aterramiento - X2
⑨ Provisión para puesta a tierra
⑩ Radiadores

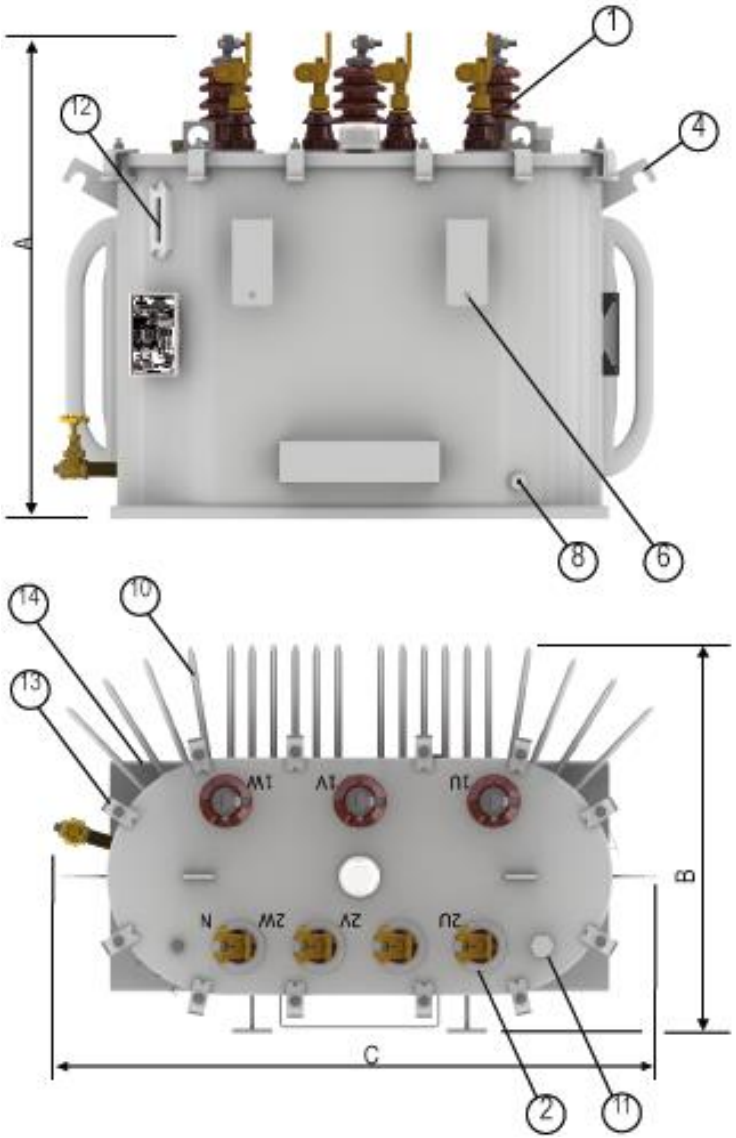


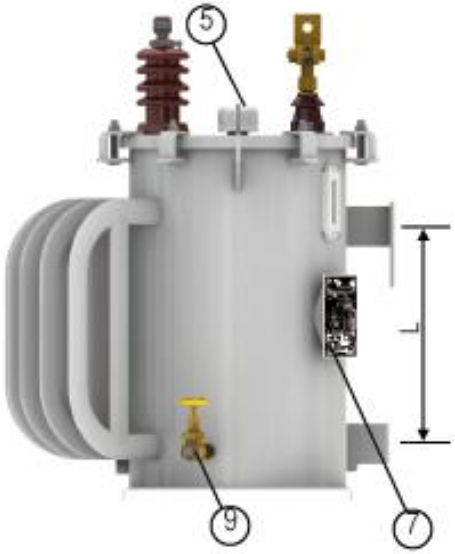


Transformadores Trifásicos

Distribución en poste

1 Aislador de alta tensión
2 Aislador de baja tensión
3 Válvula de alivio de sobrepresión
4 Gancho para izar
5 Mando externo del conmutador
6 Soporte de fijación
7 Placa de características
8 Conector de Puesta a tierra
9 Dispositivo de vaciado y toma de muestras
10 Radiadores
11 Dispositivos de llenado
12 Indicadores de nivel de aceite
13 Pieza de fijación de la tapa
14 Cáncamo para desencubado y suspensión del transformador



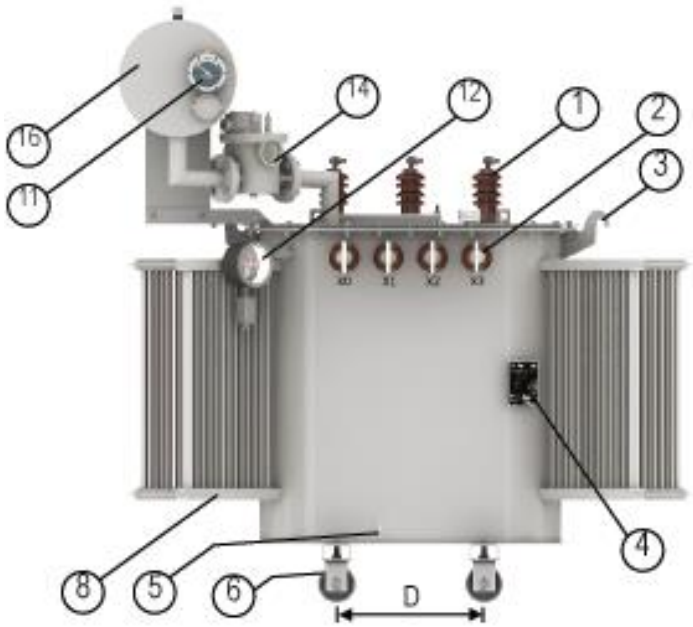


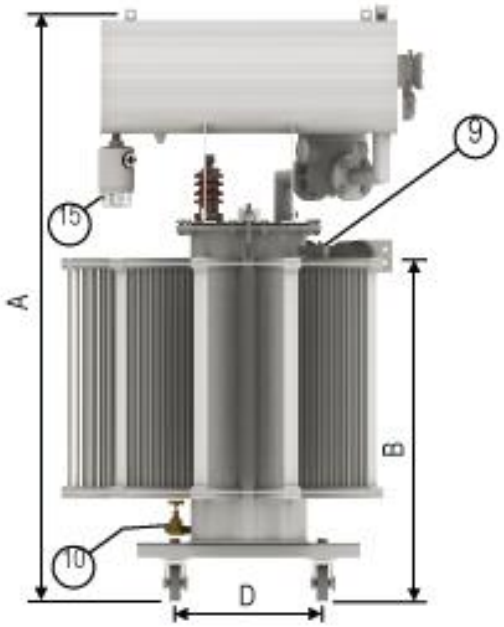


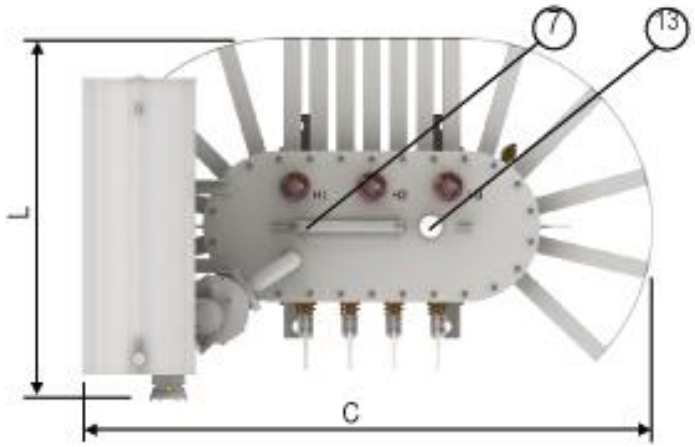
Transformadores Trifásicos

Distribución tipo piso

1 Aislador de alta tensión
2 Aislador de baja tensión
3 Gancho para izar
4 Placa de características
5 Conector de Puesta a tierra
6 Ruedas orientables
7 Ventana de inspección
8 Radiadores
9 Dispositivo de ligación de filtro
10 Dispositivo de vaciado y ligación de filtro
11 Indicador de nível de aceite
12 Termómetro
13 Mando externo del conmutador
14 Rele de Gás buchholz
15 Secador de aire
16 Conservador de aceite



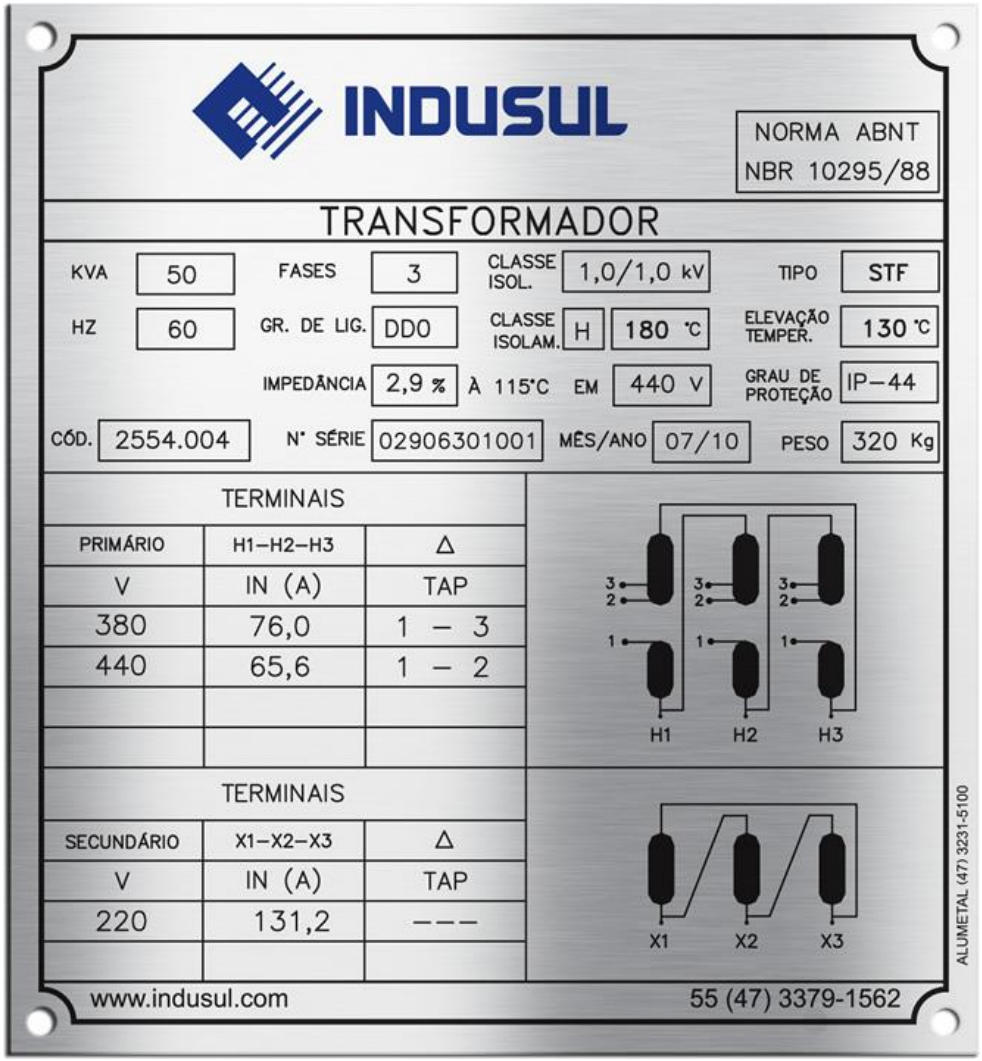




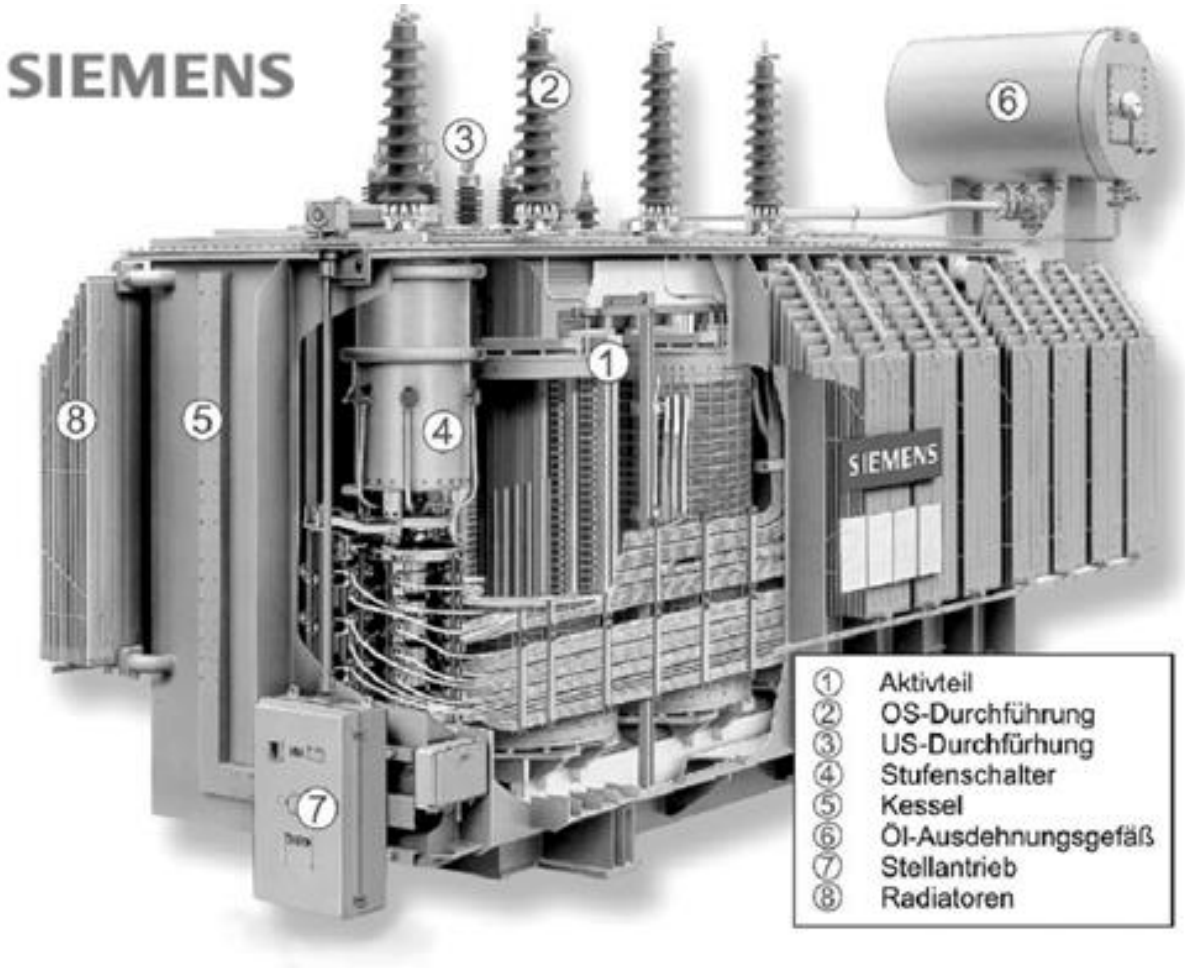


Transformadores Trifásicos

Placa de datos

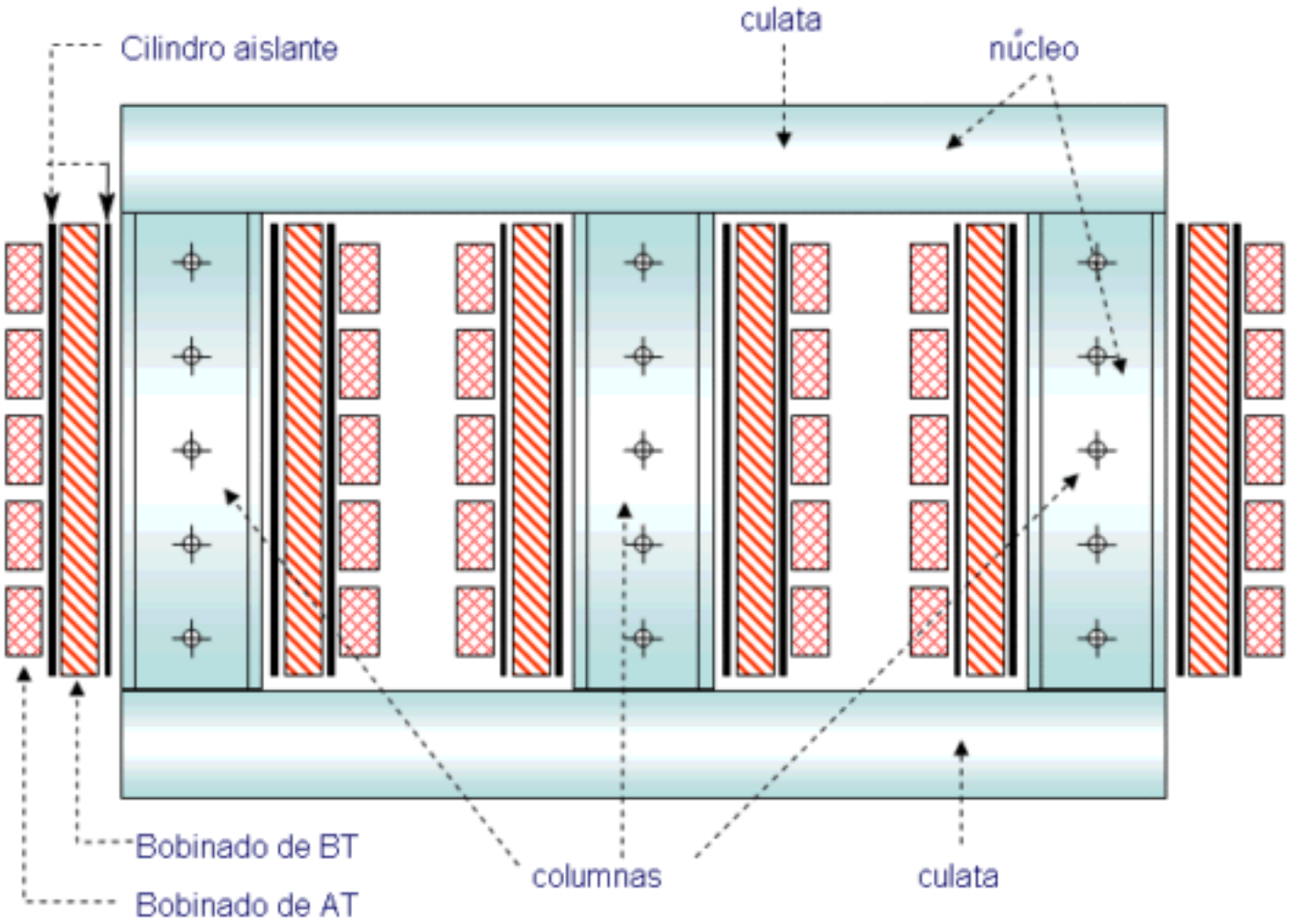


Construcción de Transformadores muy Grandes

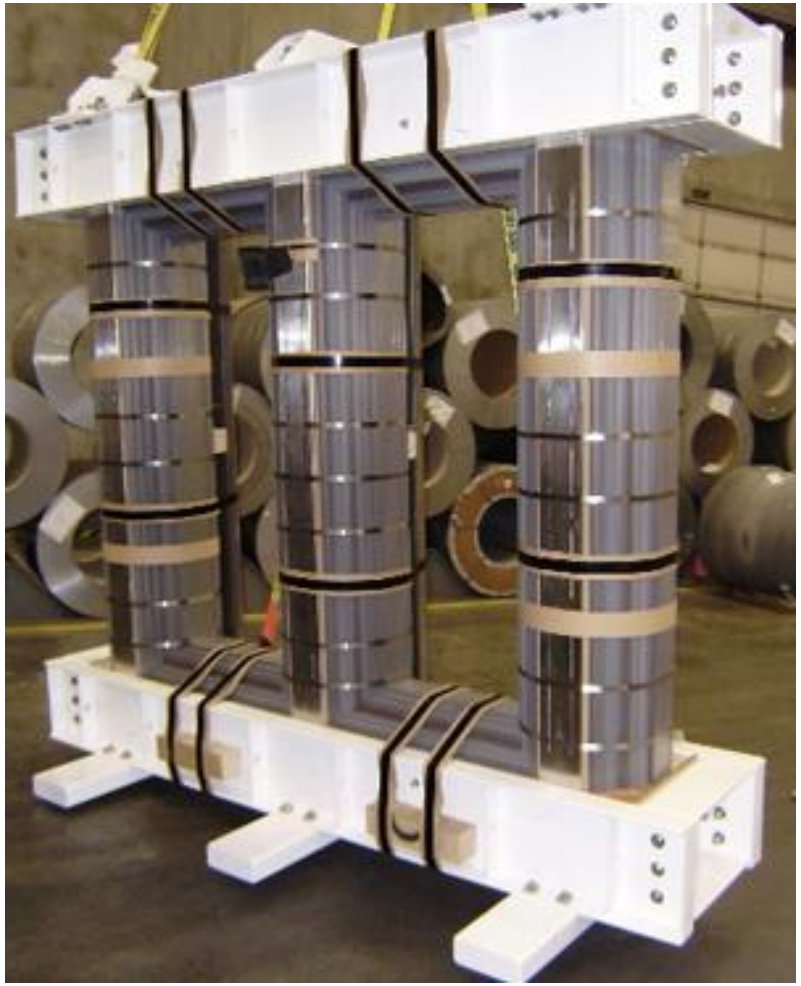


Transformadores Trifásicos

Disposición de los Devanados



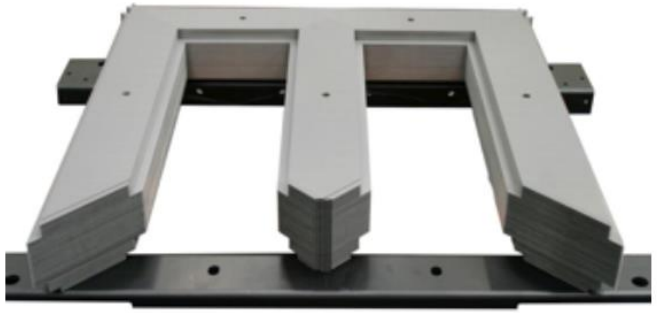
Transformadores Trifásicos
Construcción del Núcleo

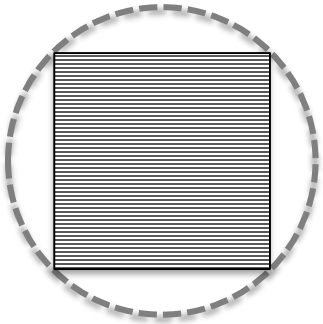




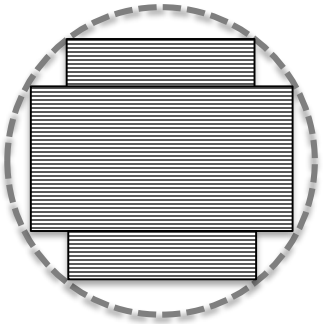
Transformadores Trifásicos

Corte transversal del núcle

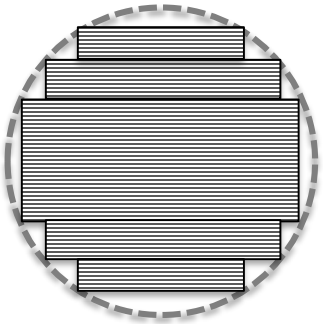




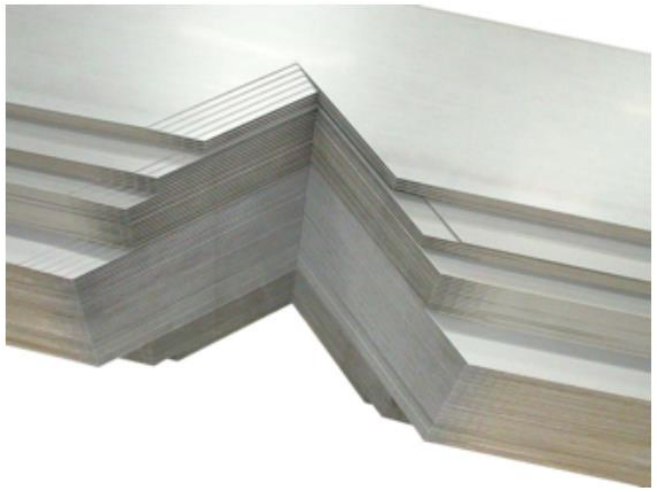
1kVA

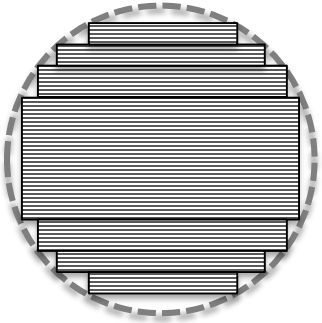


10kVA

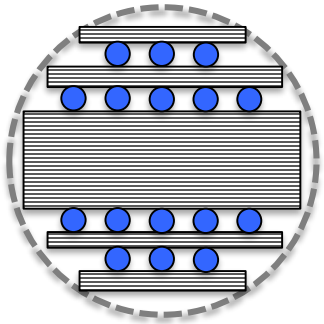


100 kVA

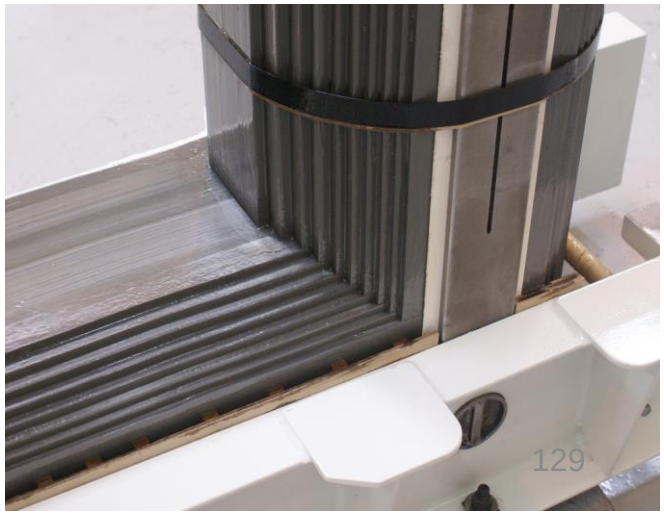




1.000 kVA



Canales de ventilación intermedios

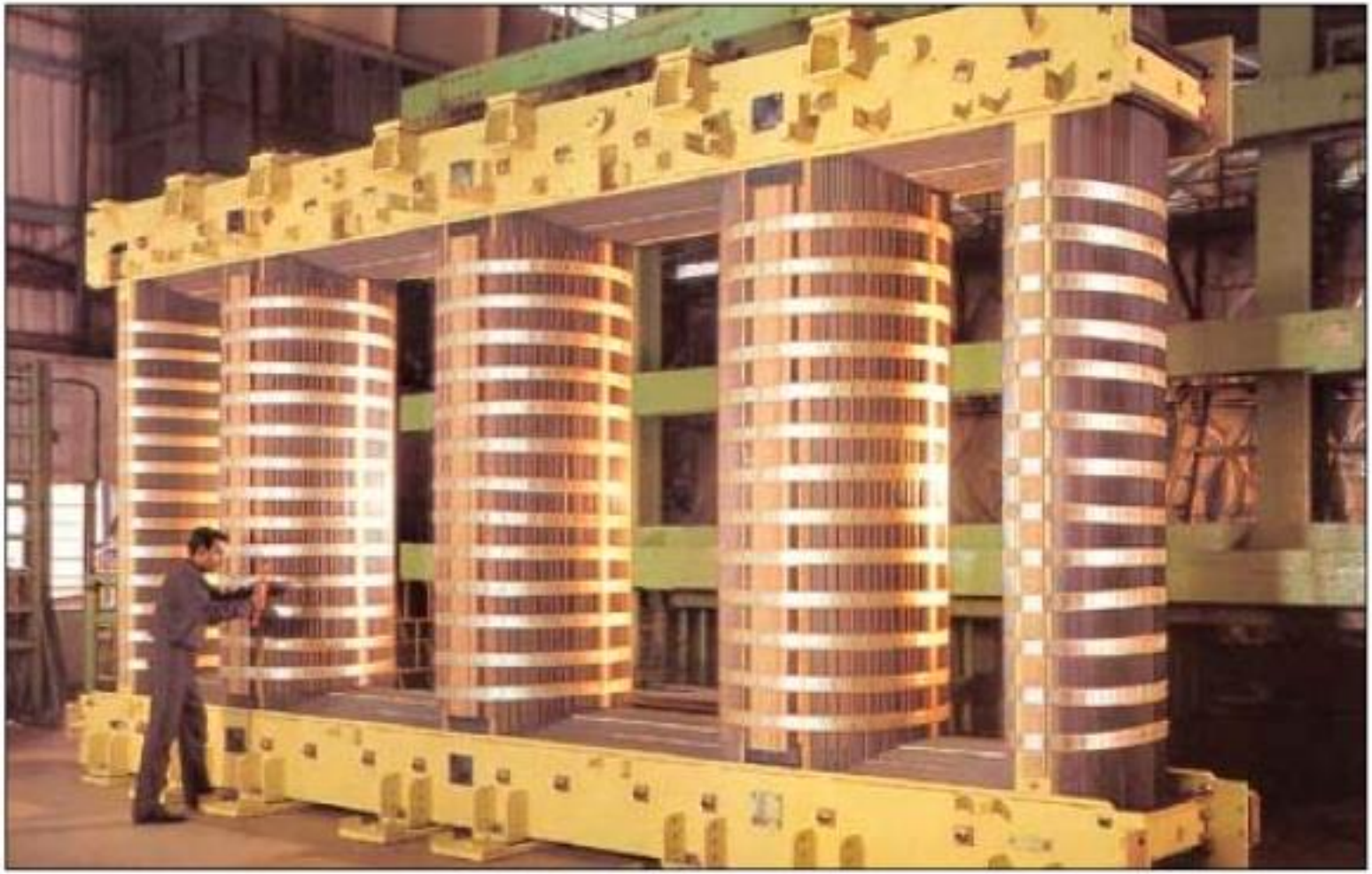


Transformadores Trifásicos

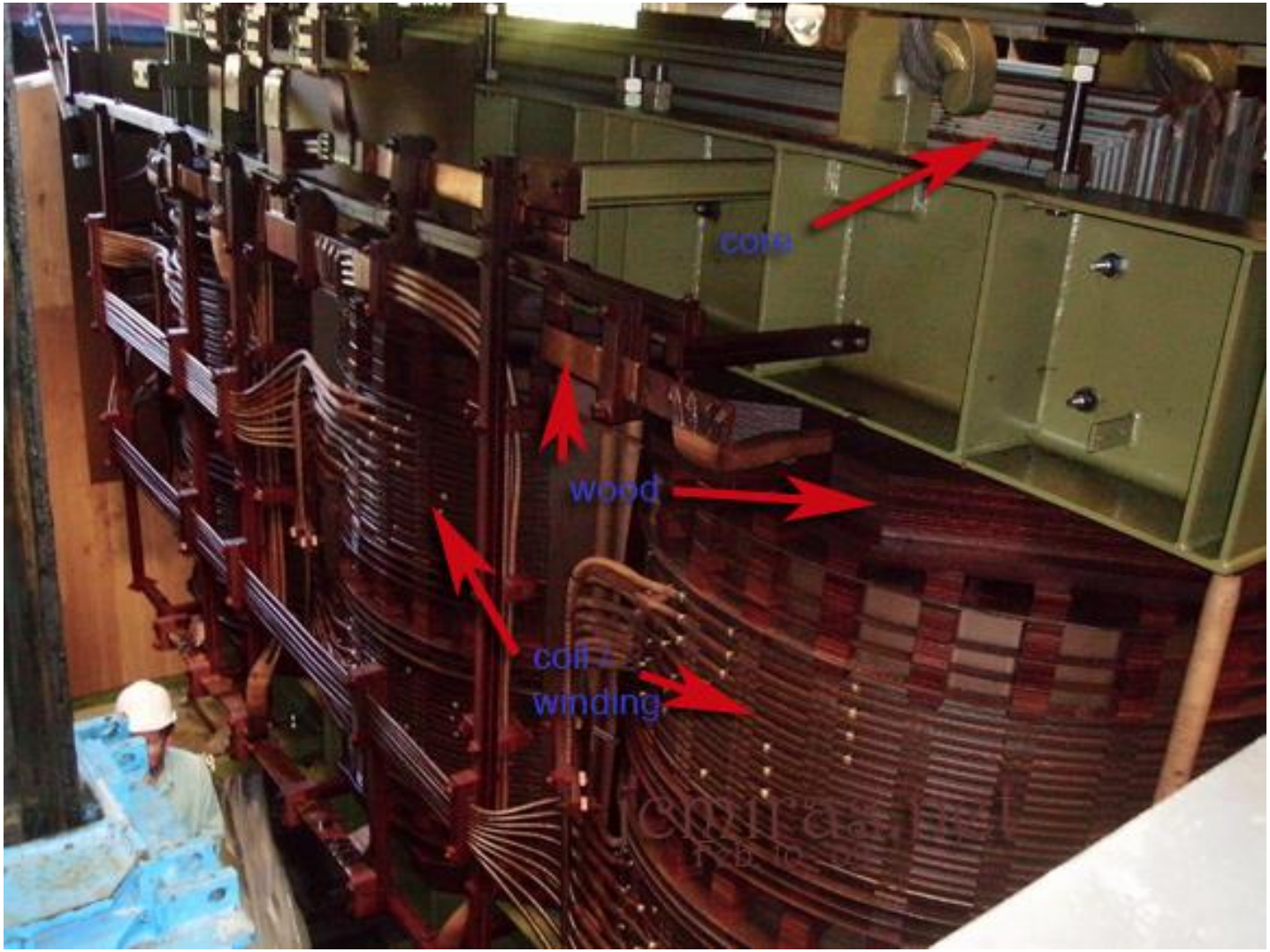
Construcción del Núcleo

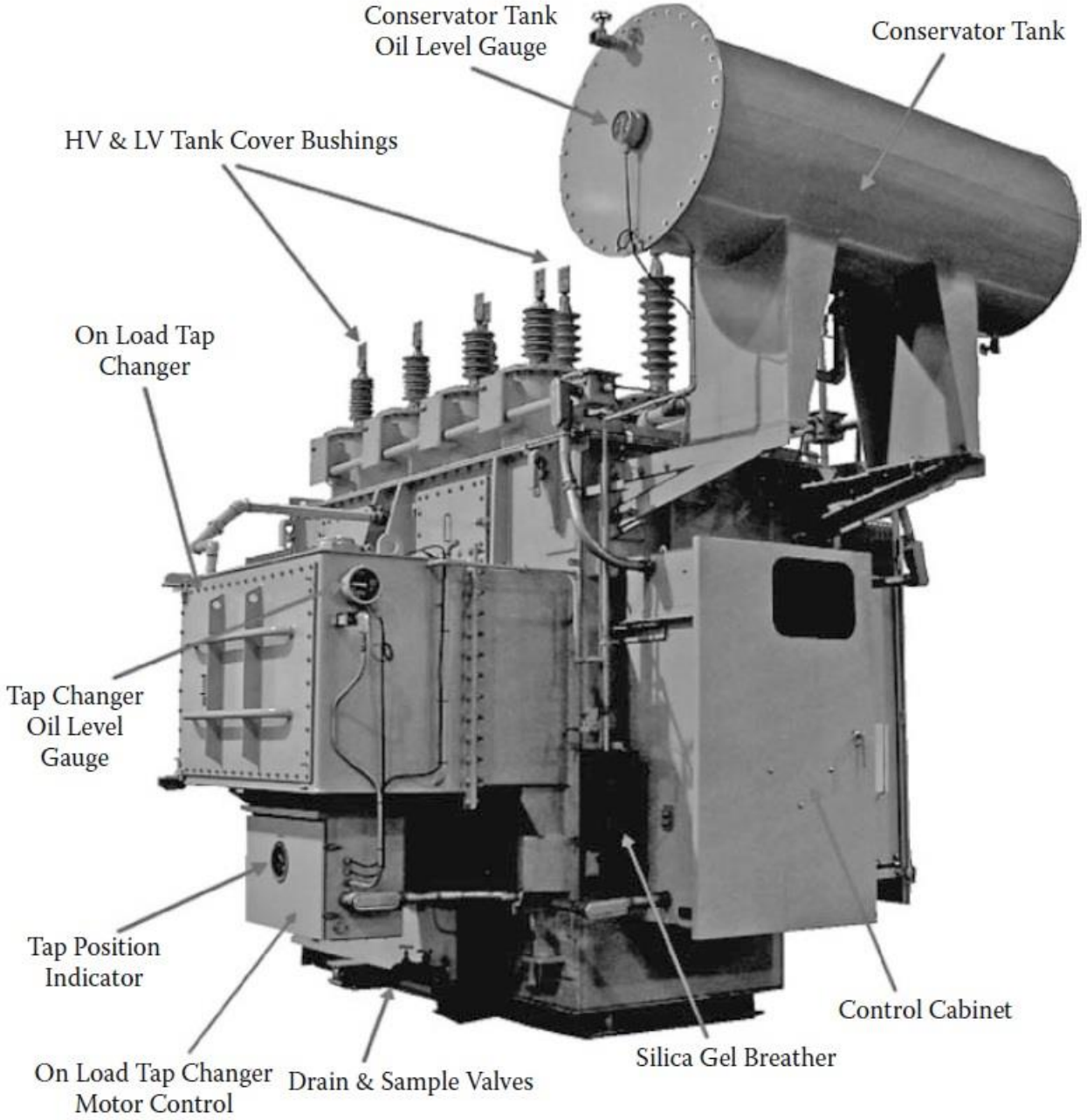


Transformadores Trifásicos
Construcción del Núcleo



Transformadores Trifásicos
Construcción





Conservator design 15/20 MVA 72kV–25kV

Transformadores Trifásicos

Características

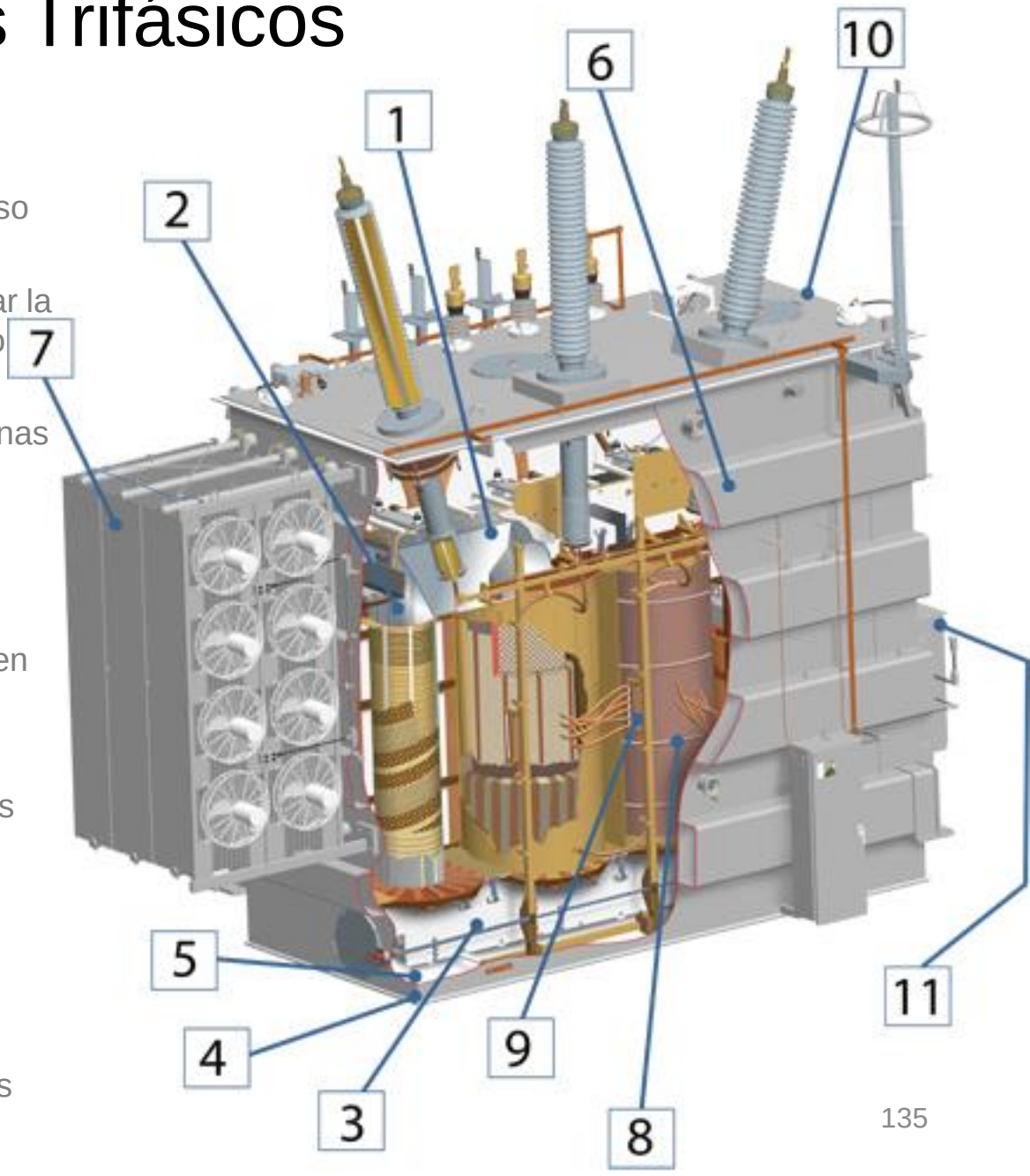
1. Tanque contenedor
2. Aisladores de alto voltaje para conexión de los primarios
3. Aisladores de “bajo voltaje” para conexión de los secundarios
4. Radiadores
5. Ventiladores
6. Tanque de aceite
7. Sistema de conexión a tierra.



Transformadores Trifásicos

Características

1. Núcleo: Pérdidas minimizadas por el uso de placas orientadas por laser.
2. Pierna de núcleo circular para aumentar la eficiencia en el uso de materiales (trafo más liviano y compacto).
3. Marco de alta resistencia para las bobinas para distribuir fuerzas de sujeción.
4. Soldadura al arco sumergido para penetración profunda y eliminación de fugas en las junturas del tanque.
5. Tanque contenedor pintado de blanco en su interior para mejor inspección.
6. Tanque exterior de alta resistencia
7. Radiadores y ventiladores galvanizados (anticorrosión).
8. Estabilizadores de presión para las bobinas
9. Taps
10. Caja de Control (acceso a equipo de monitoreo de refrigeración, calefactores anti-condensación, etc.)



Transporte



¿Por qué es importante construir trafos de menor volumen y peso?



¿Por qué es importante construir trafos de menor volumen y peso?



Antonov: 155 Ton desde San Paulo a Santiago (ABB para Colbún 335 MVA- 230 kV). 2° record mundial




SOCORRO
CARVALHO


www.FELBERMAY


HEPX 200
hydro one

Conclusiones

Lectura 3: **Transformadores**

Conceptos básicos

Permite convertir la amplitud de voltaje y corriente AC para adaptar la energía eléctrica con fin de transmitirla a larga distancias, distribuirla y consumirla de forma muy eficiente. Este aparato es altamente eficiente (99,7% en grandes transformadores) y el actual sistema eléctrico se sustenta en él.

Características

Un transformador real posee dispersión de flujo, resistencia eléctrica, histéresis magnética y corriente parásitas (estas tres últimas son las responsables de las pérdidas del transformador). Es importante manejar los conceptos de polaridad, regulación de voltaje, conexión en paralelo y serie, y autotransformador.

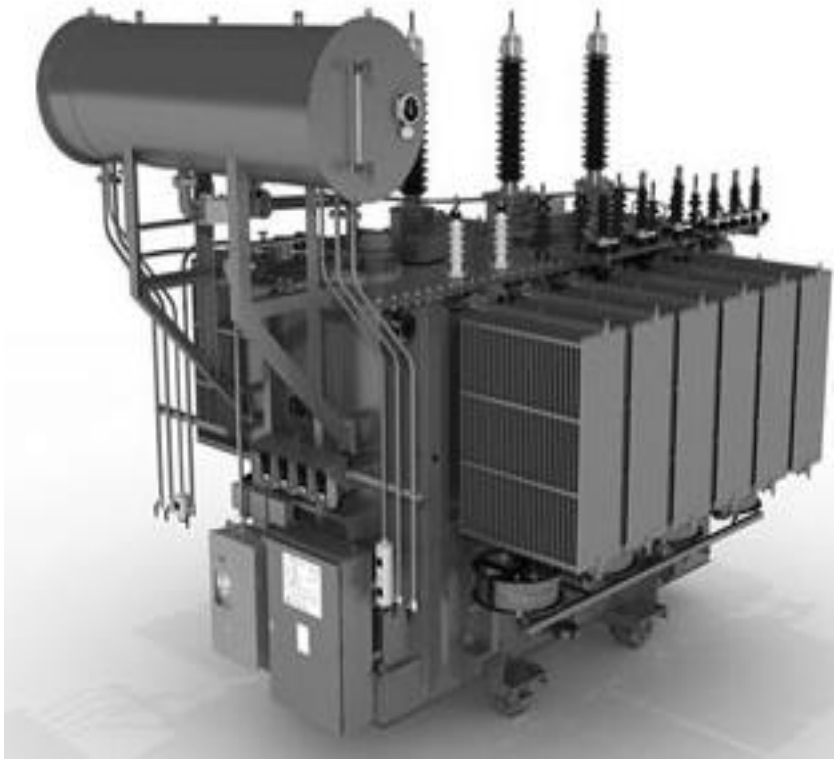
Armónicos

La curva de histéresis genera corrientes con armónicos impares en la rama de excitación. Estas corrientes son pequeñas y despreciables bajo carga en transformadores monofásicos. Sin embargo en trafos trifásicos pueden generar grandes distorsiones y sobretensiones, por lo que es importante utilizar una conexión trifásica adecuada para eliminar toda distorsión y sobretensión.

Construcción

Aún cuando su principio de funcionamiento es básico, su diseño y construcción implica un reto técnico no menor (materiales, aislación, refrigeración, etc.).

Fin Lectura 3



Próxima Lectura

Lectura 4
Energía y Conversión Electromecánica

