



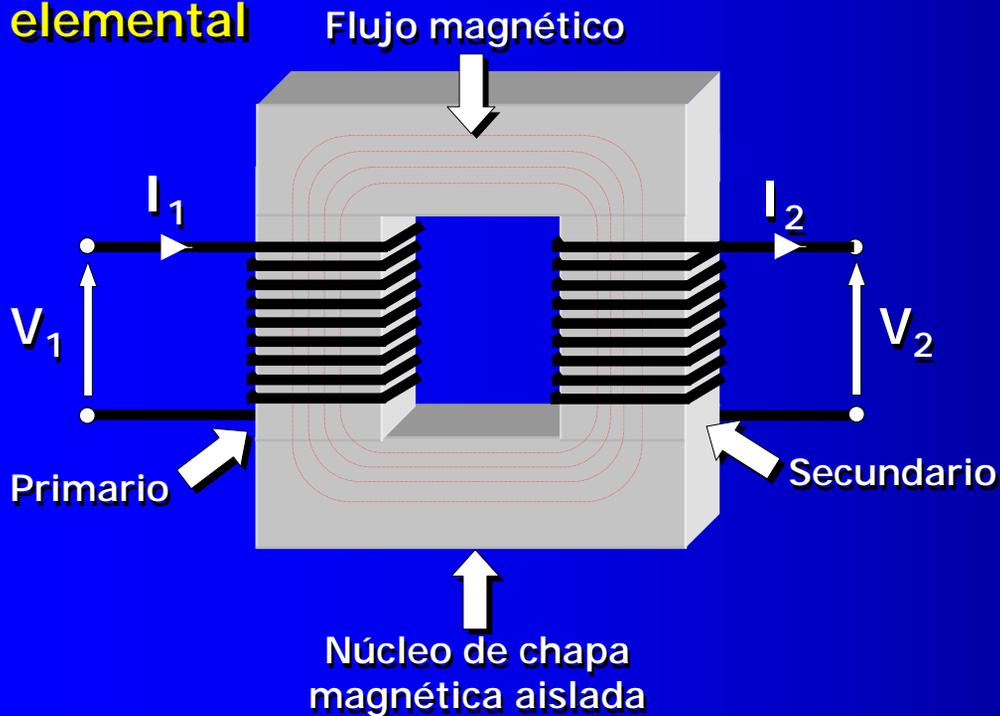
Universidad de Oviedo

Tema IV: Transformadores

***Dpto. de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica de Computadores y
Sistemas***

4.1 Generalidades

Transformador elemental



Se utilizan en redes eléctricas para convertir un sistema de tensiones (mono - trifásico) en otro de igual frecuencia y $> o <$ tensión

La conversión se realiza prácticamente sin pérdidas
 $Pot_{entrada} \cong Potencia_{salida}$

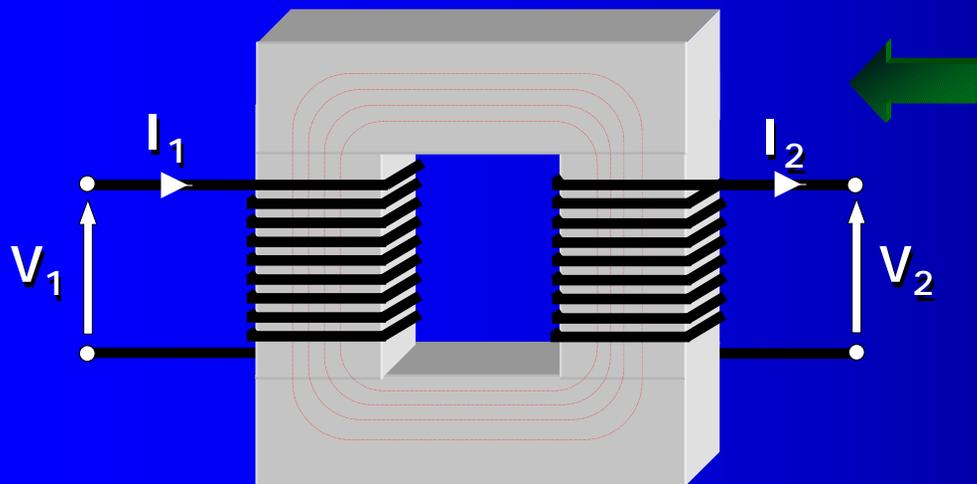
Las intensidades son inversamente proporcionales a las tensiones en cada lado

Transformador elevador: $V_2 > V_1, I_2 < I_1$

Transformador reductor: $V_2 < V_1, I_2 > I_1$

Los valores nominales que definen a un transformador son: Potencia aparente (S), Tensión (U), I (corriente) y frecuencia (f)

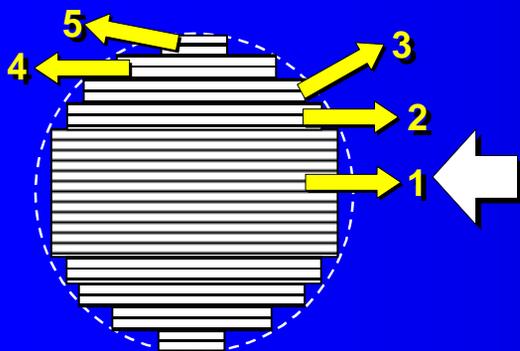
4.2 Aspectos constructivos: circuito magnético I



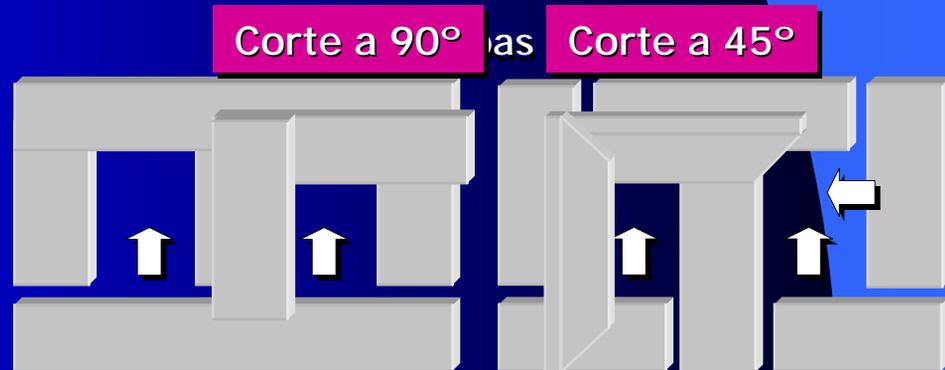
En la construcción del núcleo se utilizan chapas de acero aleadas con Silicio de muy bajo espesor (0,3 mm) aprox.

El Si incrementa la resistividad del material y reduce las corrientes parásitas

La chapa se aísla mediante un tratamiento químico (Carlite) y se obtiene por LAMINACIÓN EN FRÍO: aumenta la permeabilidad. Mediante este procedimiento se obtienen factores de relleno del 95-98%



El núcleo puede tener sección cuadrada. Pero es más frecuente aproximarlo a la circular



4.3 Aspectos constructivos: devanados y aislamiento I

600-5000 V

Barrel wound



4,5 - 60 kV

Section wound



> 60 kV

Disk wound



Diferentes formas constructivas de devanados según tensión y potencia

Los conductores de los devanados están aislados entre sí: En transformadores de baja potencia y tensión se utilizan hilos esmaltados. En máquinas grandes se emplean pletinas rectangulares encintadas con papel impregnado en aceite

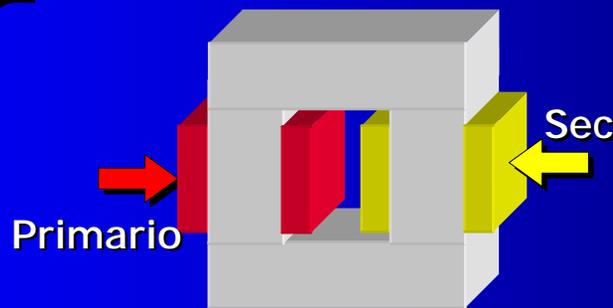
El aislamiento entre devanados se realiza dejando espacios de aire o de aceite entre ellos

La forma de los devanados es normalmente circular

El núcleo está siempre conectado a tierra. Para evitar elevados gradientes de potencial, el devanado de baja tensión se dispone el más cercano al núcleo

4.3 Aspectos constructivos: devanados y aislamiento II

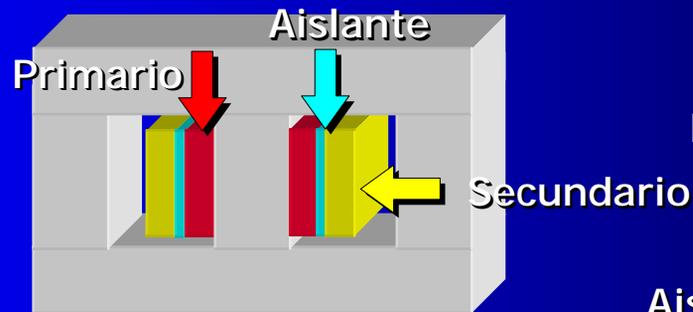
Estructura
devanados:
trafo
monofásico



Núcleo con 2 columnas



Núcleo con 3
columnas



Concéntrico



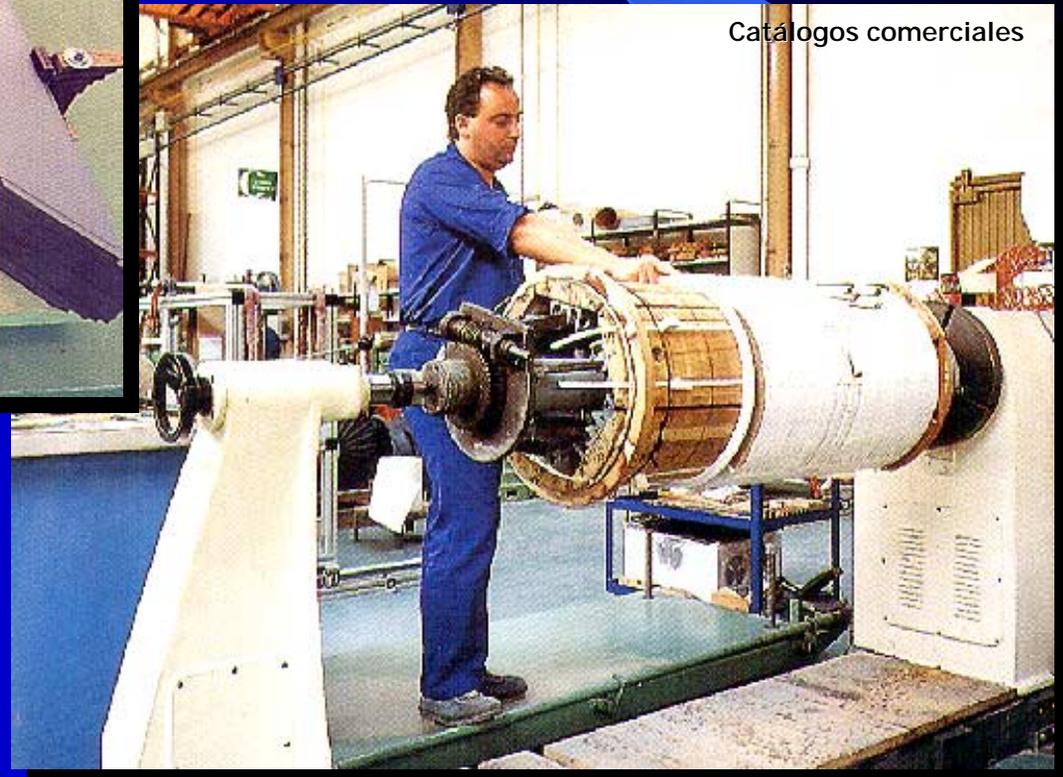
Alternado

4.3 Aspectos constructivos: devanados y aislamiento III

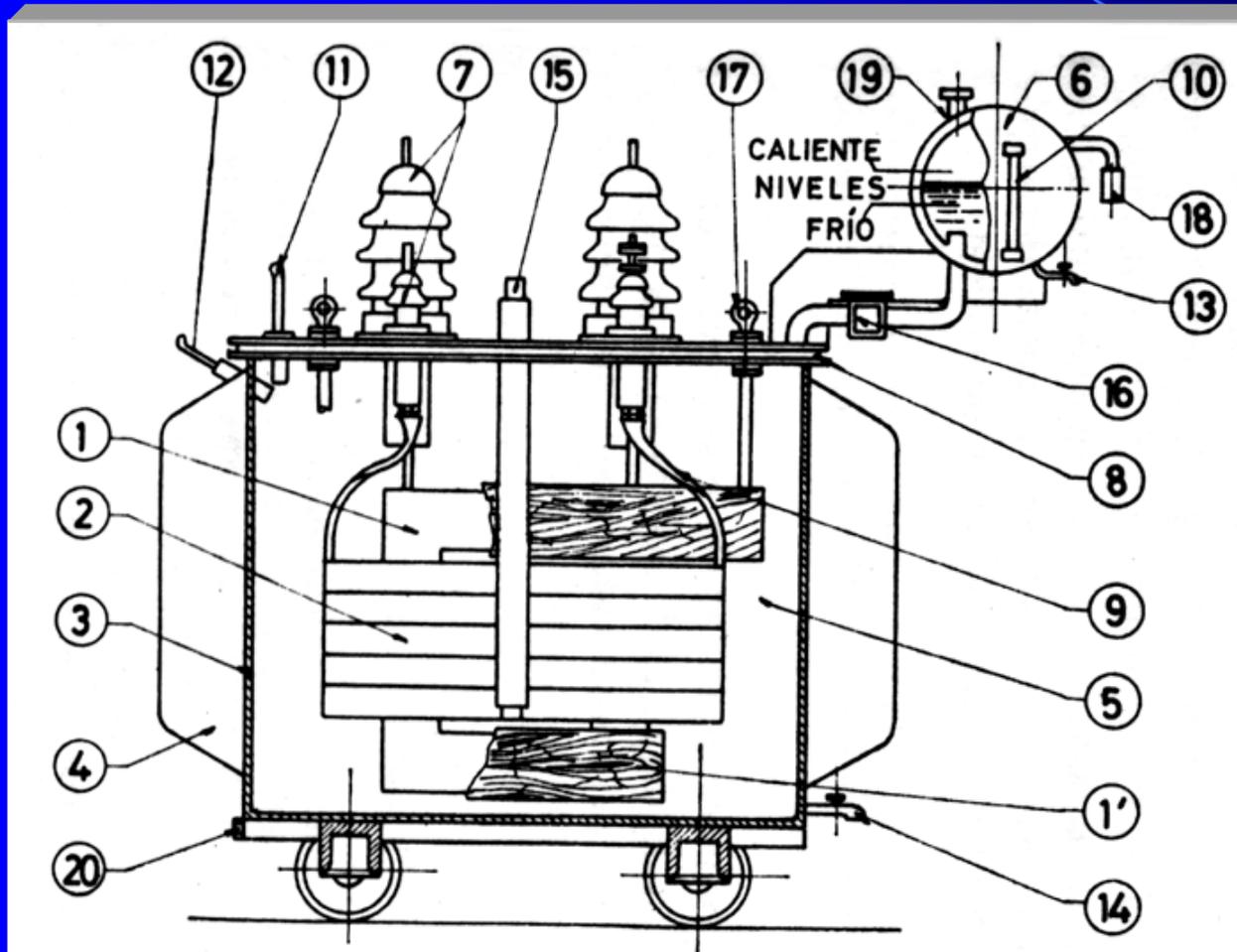


Fabricación núcleo:
chapas magnéticas

Conformado conductores
devanados



4.3 Aspectos constructivos: refrigeración

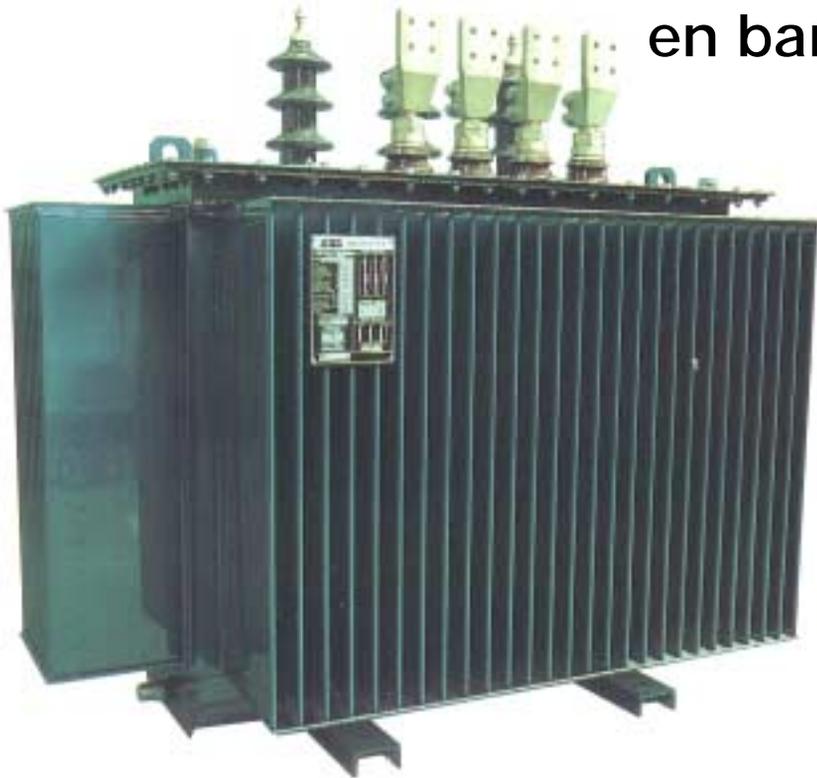


- 1 Núcleo
- 1' Prensaculatas
- 2 Devanados
- 3 Cuba
- 4 Aletas refrigeración
- 5 Aceite
- 6 Depósito expansión
- 7 Aisladores (BT y AT)
- 8 Junta
- 9 Conexiones
- 10 Nivel aceite
- 11 - 12 Termómetro
- 13 - 14 Grifo de vaciado
- 15 Cambio tensión
- 16 Relé Buchholz
- 17 Cánamos transporte
- 18 Desecador aire
- 19 Tapón llenado
- 20 Puesta a tierra

4.3 Aspectos constructivos: trafos trifásicos I

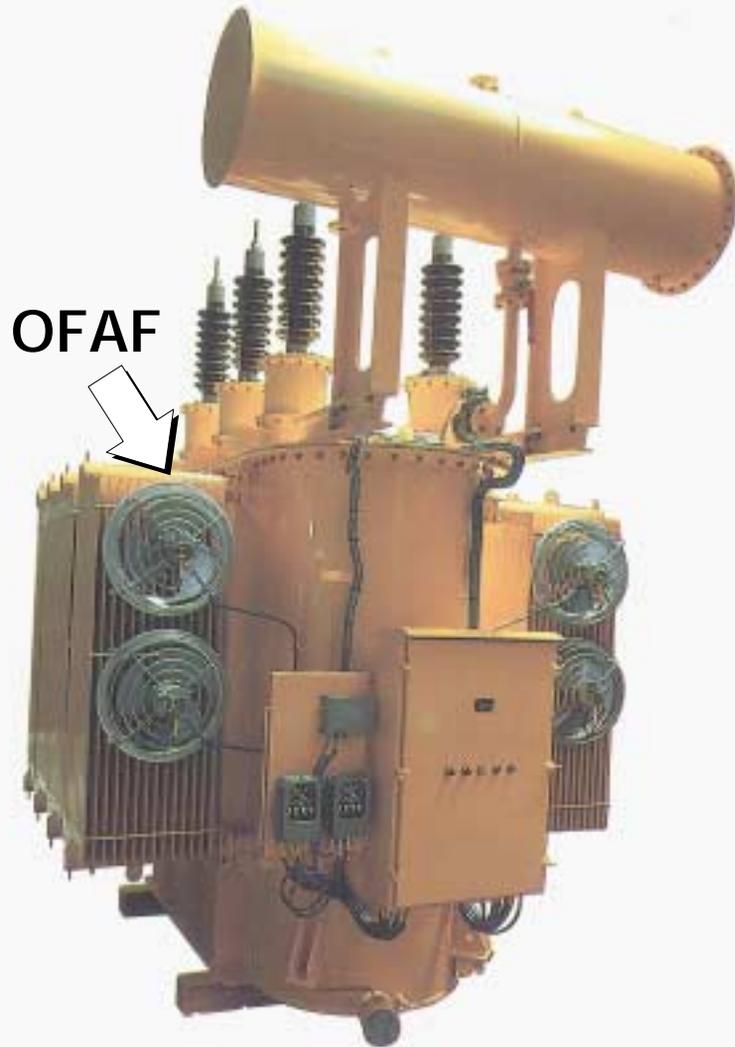
Catálogos comerciales

Transformadores
en baño de aceite



4.3 Aspectos constructivos: trafos trifásicos II

Catálogos comerciales



Transformador
seco

4.3 Aspectos constructivos: trafos trifásicos III



5000 kVA
Baño de
aceite



2500 kVA
Baño de aceite

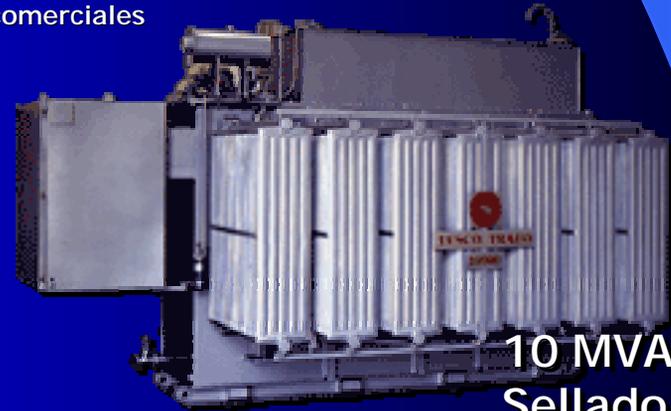


1250 kVA
Baño de aceite



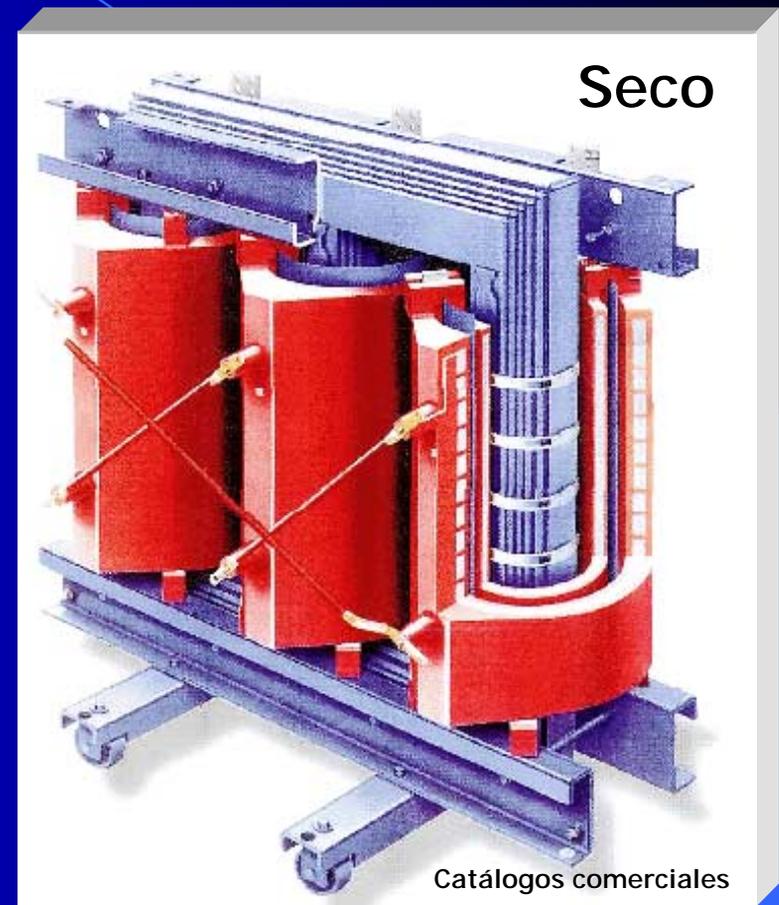
10 MVA
Sellado con N₂

Catálogos comerciales



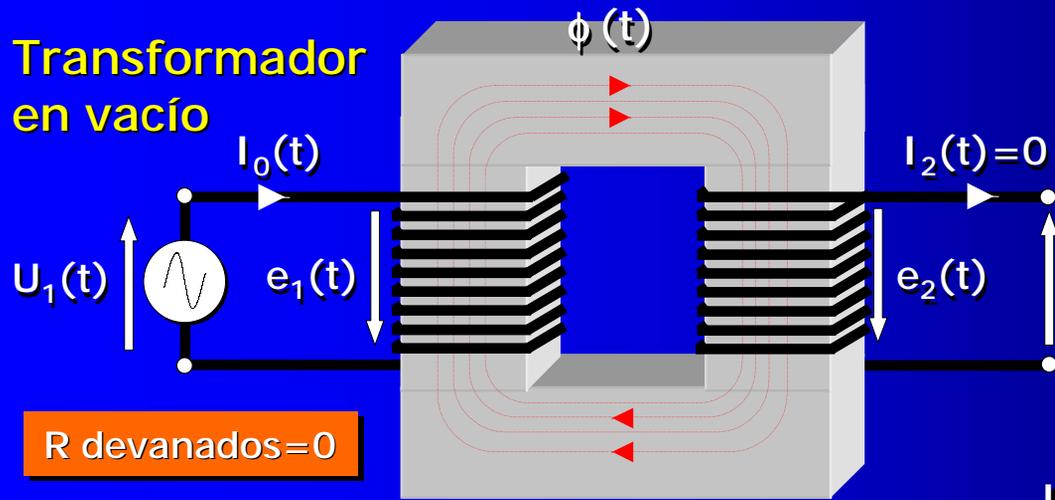
10 MVA
Sellado con N₂

4.3 Aspectos constructivos: trafos trifásicos IV



Secciones de transformadores
en aceite y secos

4.4 Principio de funcionamiento (vacío)



LTK primario: $\rightarrow U_1(t) + e_1(t) = 0$

Ley de Lenz: $\rightarrow U_1(t) = -e_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$

El flujo es senoidal $\rightarrow \phi(t) = \phi_m \cdot \text{Sen}\omega t$

$U_1(t) = U_m \cdot \text{Cos}\omega t = N_1 \cdot \phi_m \cdot \omega \cdot \text{Cos}\omega t$

Tensión máxima

$U_m = N_1 \cdot 2\pi f \cdot \phi_m$

Tensión eficaz

$U_{1\text{ef}} = E_{1\text{ef}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi f \cdot N_1 \cdot \phi_m = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_m$

Fem eficaz

$E_{1\text{ef}} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot S \cdot B_m$

Repitiendo el proceso para el secundario

$e_2(t) = -N_2 \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$

$E_{2\text{ef}} = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot S \cdot B_m$

$r_t = \frac{E_{1\text{ef}}}{E_{2\text{ef}}} = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{U_{1\text{ef}}}{U_{2(\text{vacío})}}$

La tensión aplicada determina el flujo máximo de la máquina

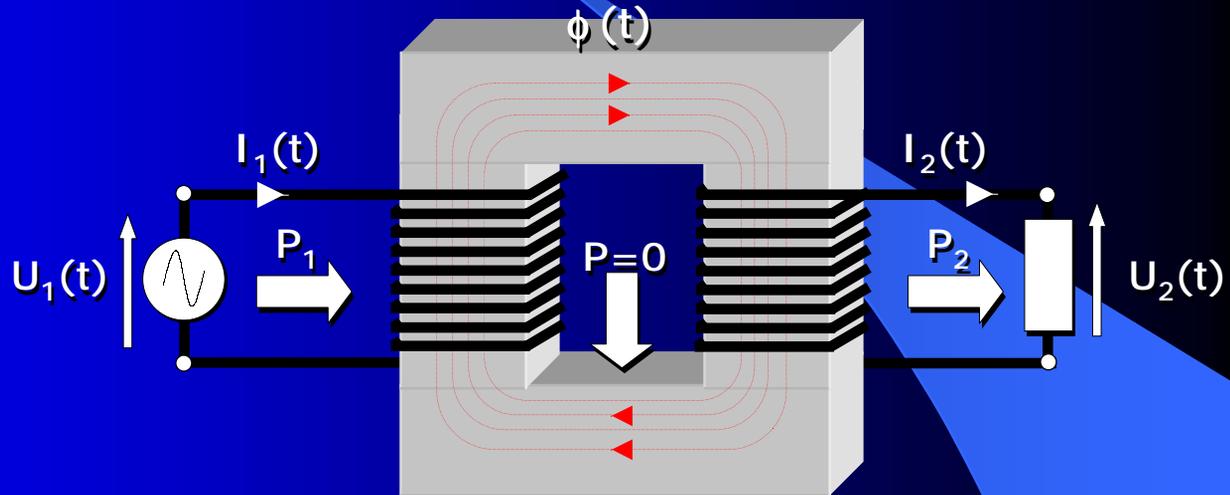
4.4 Principio de funcionamiento: relación entre corrientes

Considerando que la conversión se realiza prácticamente sin pérdidas:

$$Pot_{\text{entrada}} \cong Pot_{\text{salida}}$$

Considerando que la tensión del secundario en carga es la misma que en vacío:

$$U_{2\text{vacío}} \cong U_{2\text{carga}}$$



$$P_1 \cong P_2: U_1 * I_1 = U_2 * I_2$$

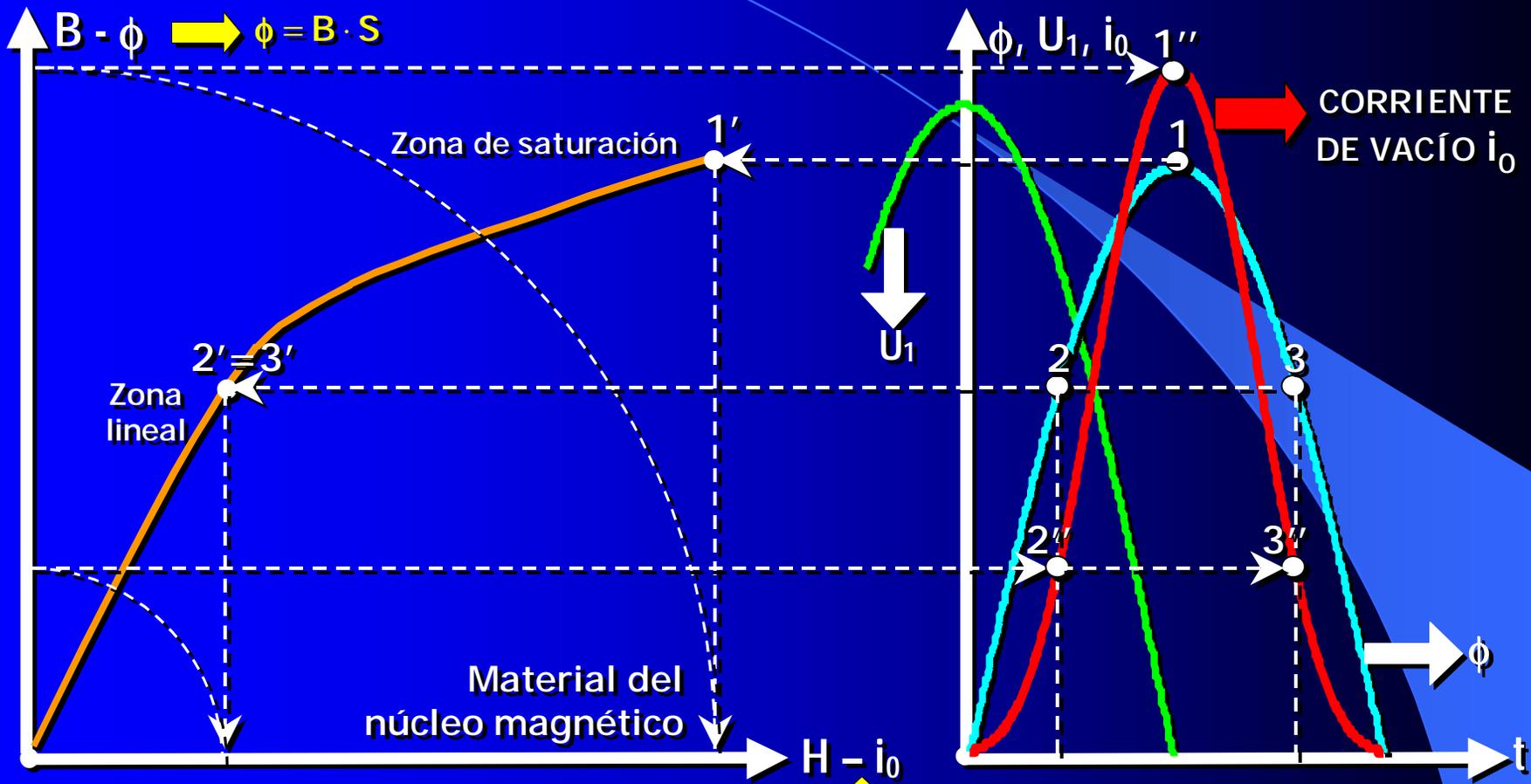
$$\Rightarrow r_t = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$\frac{I_1}{I_2} \cong \frac{1}{r_t}$$

Las relaciones de tensiones y corrientes son INVERSAS

El transformador no modifica la potencia que se transfiere, tan solo altera la relación entre tensiones y corrientes

4.5 Corriente de vacío I



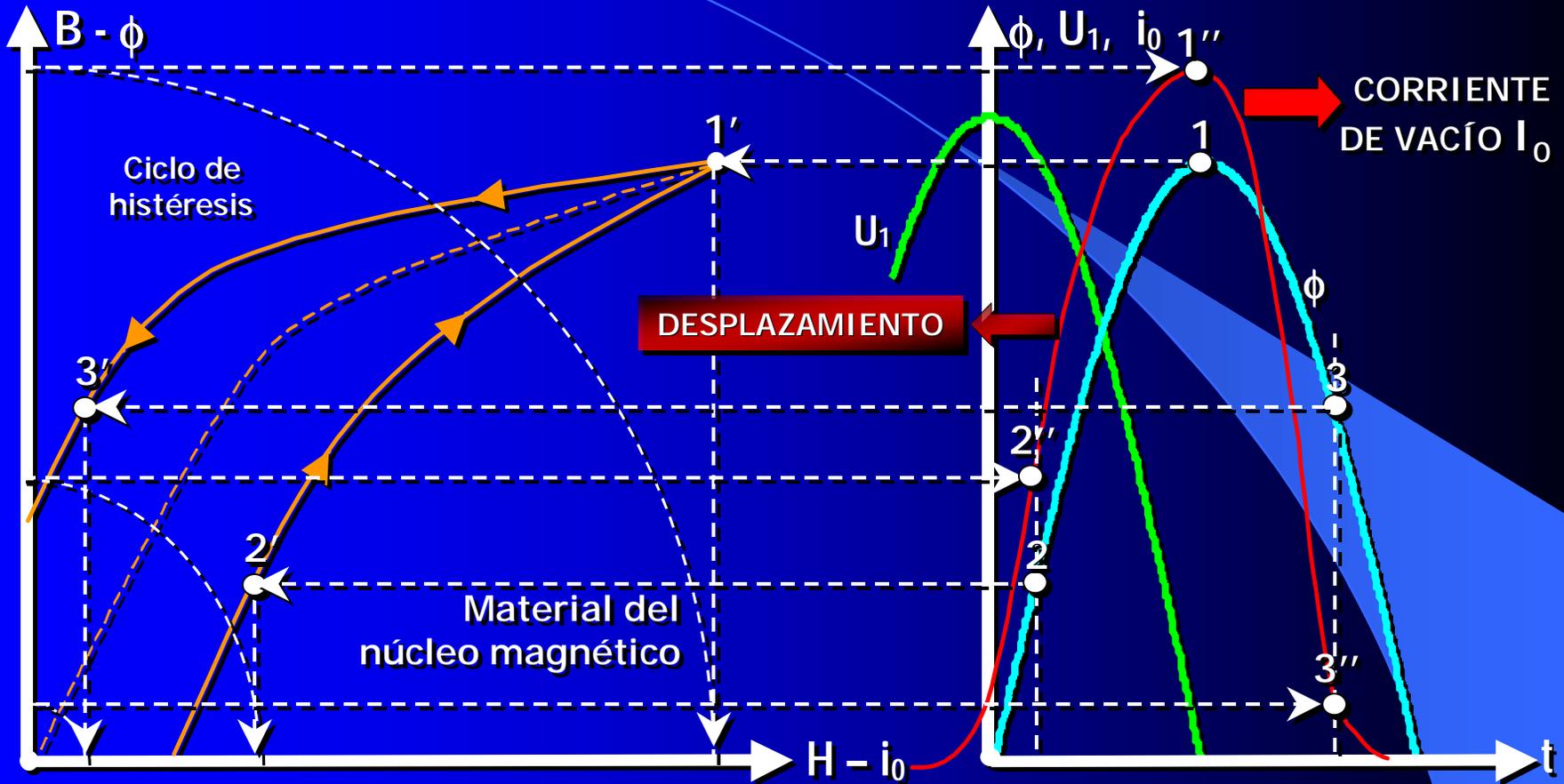
NO se considera el ciclo de histéresis

$$U_1(t) = -e_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$$

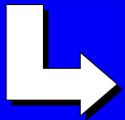
CON EL FLUJO Y LA CURVA BH SE PUEDE OBTENER LA CORRIENTE

DEBIDO A LA SATURACIÓN DEL MATERIAL LA CORRIENTE QUE ABSORBE EL TRANSFORMADOR EN VACÍO NO ES SENOIDAL

4.5 Corriente de vacío II



SÍ se considera el ciclo de histéresis

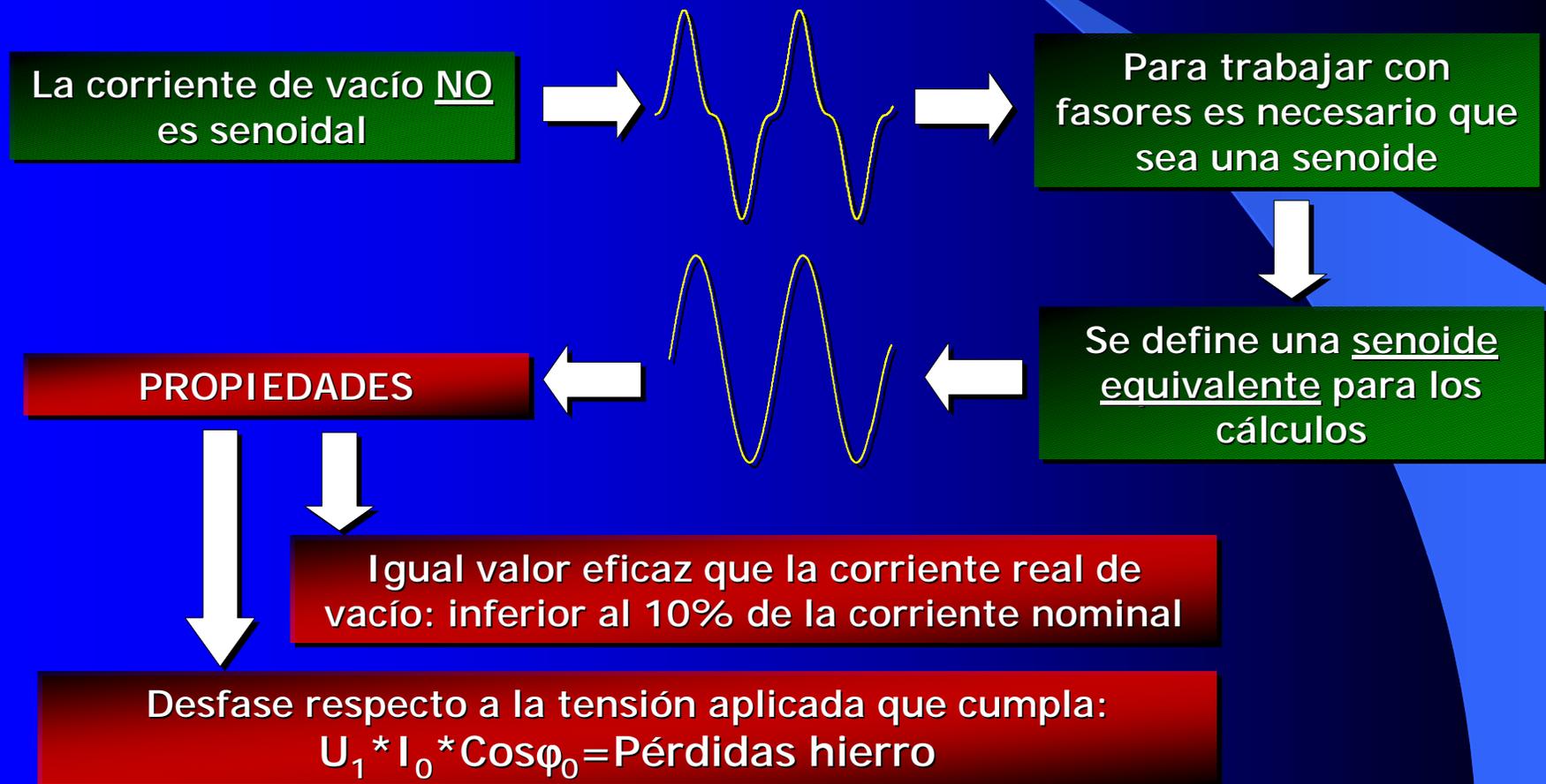


El valor máximo se mantiene pero la corriente se desplaza hacia el origen.

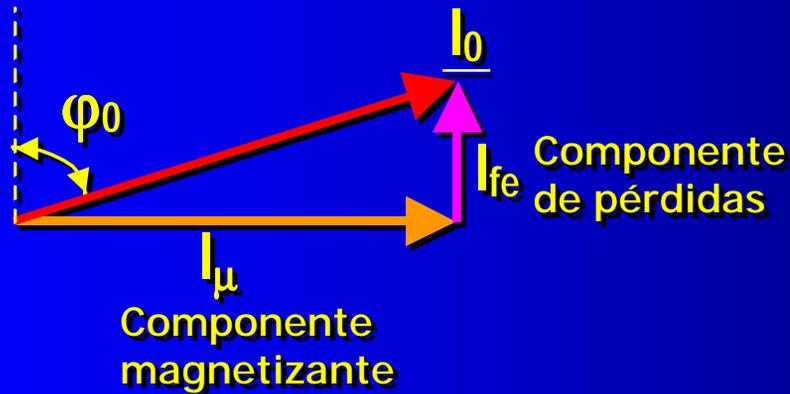
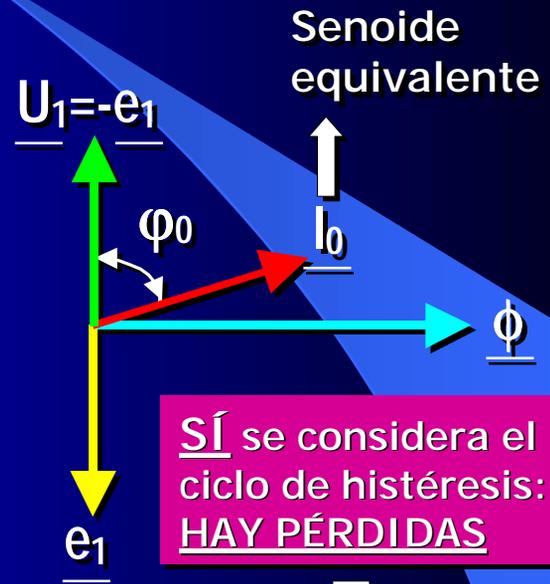
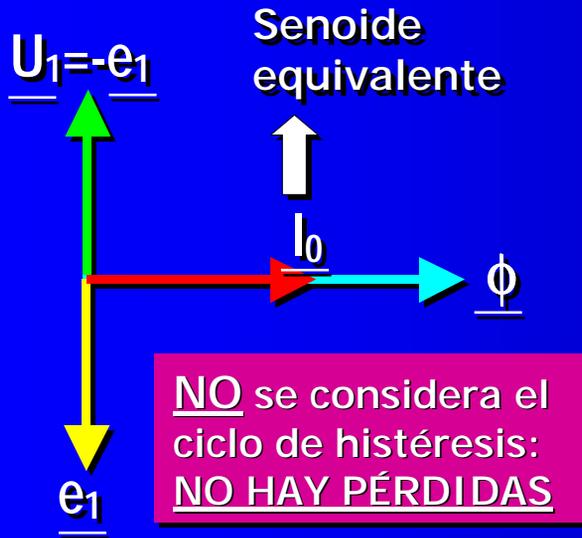


DEBIDO AL CICLO DE HISTÉRESIS LA CORRIENTE ADELANTA LIGERAMENTE AL FLUJO

4.5 Corriente de vacío III: senoide equivalente



4.5 Corriente de vacío I_0 : pérdidas y diagrama fasorial

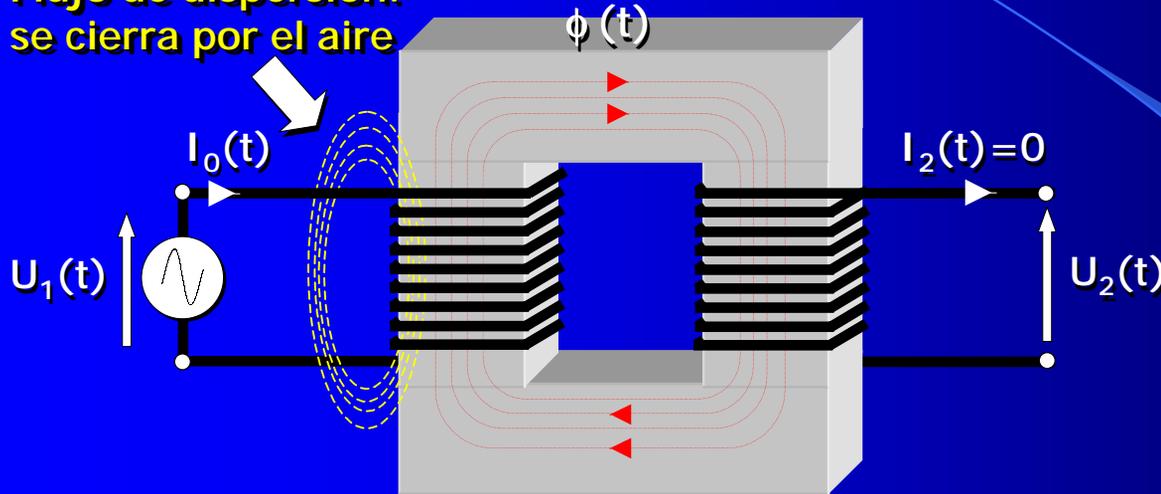


$$P = U \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

P = pérdidas por histéresis en el núcleo

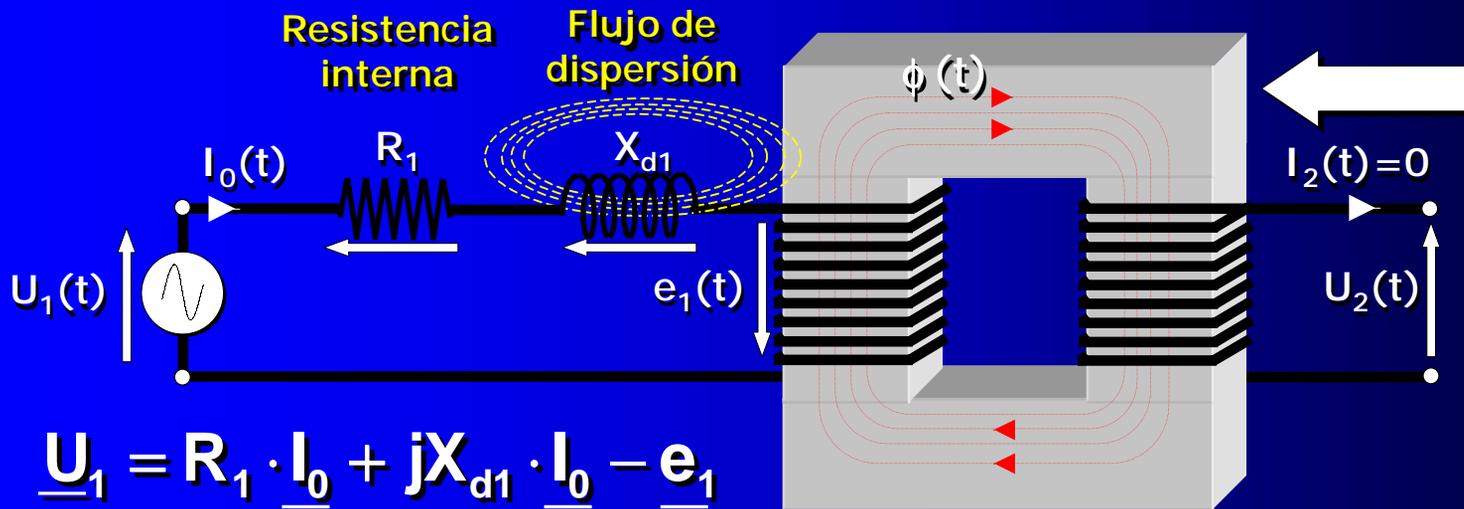
4.6 Flujo de dispersión

Flujo de dispersión:
se cierra por el aire



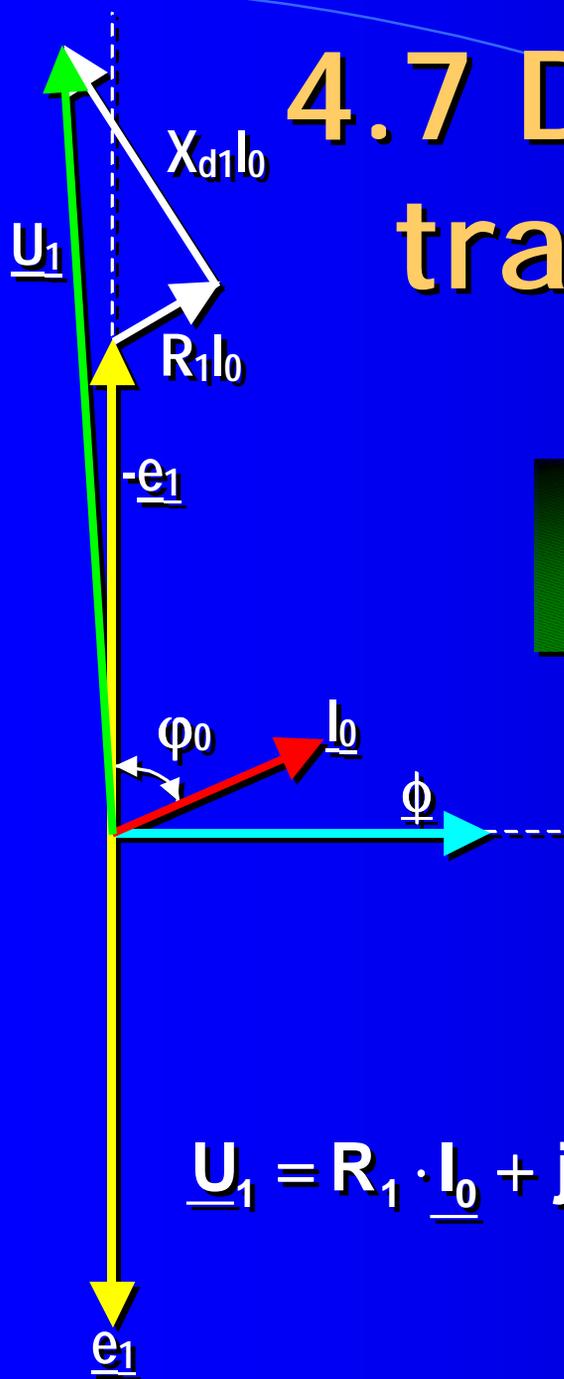
Representación
simplificada del flujo de
dispersión (primario)

En vacío no circula
corriente por el
secundario y, por
tanto, no produce
flujo de dispersión



En serie con
el primario
se colocará
una bobina
que será la
que genere
el flujo de
dispersión

4.7 Diagrama fasorial del transformador en vacío



Los caídas de tensión en R_1 y X_{d1} son prácticamente despreciables (del orden del 0,2 al 6% de U_1)

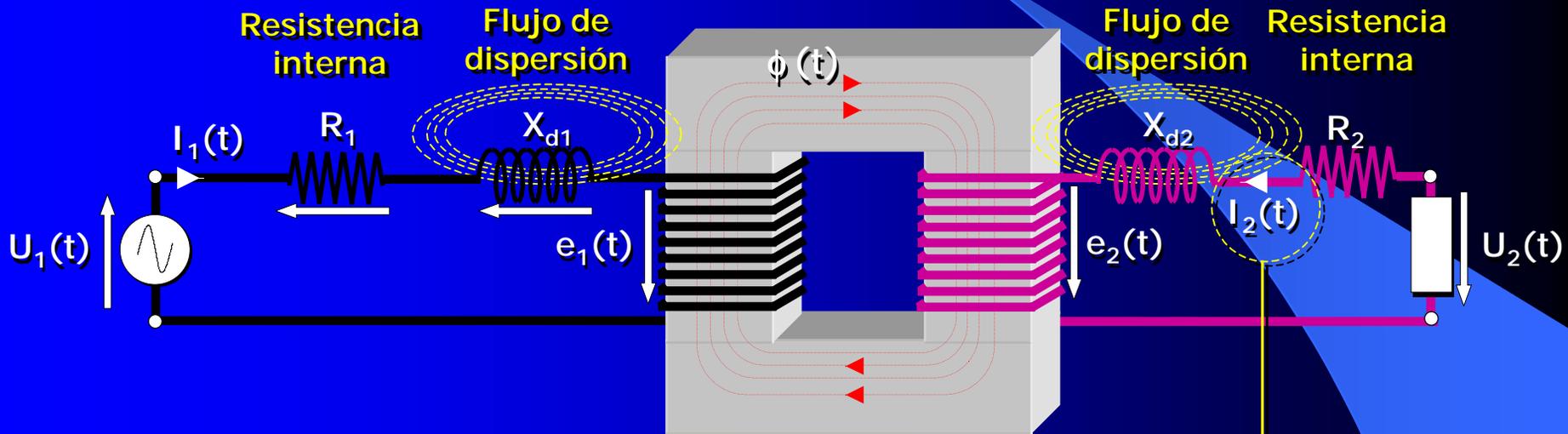
Las pérdidas por efecto Joule en R_1 son también muy bajas

$$U_1 \cong e_1$$

$$U_1 * I_0 * \cos \varphi_0 \cong \text{Pérdidas Fe}$$

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_0 + jX_{d1} \cdot \underline{I}_0 - \underline{e}_1$$

4.8 El transformador en carga I

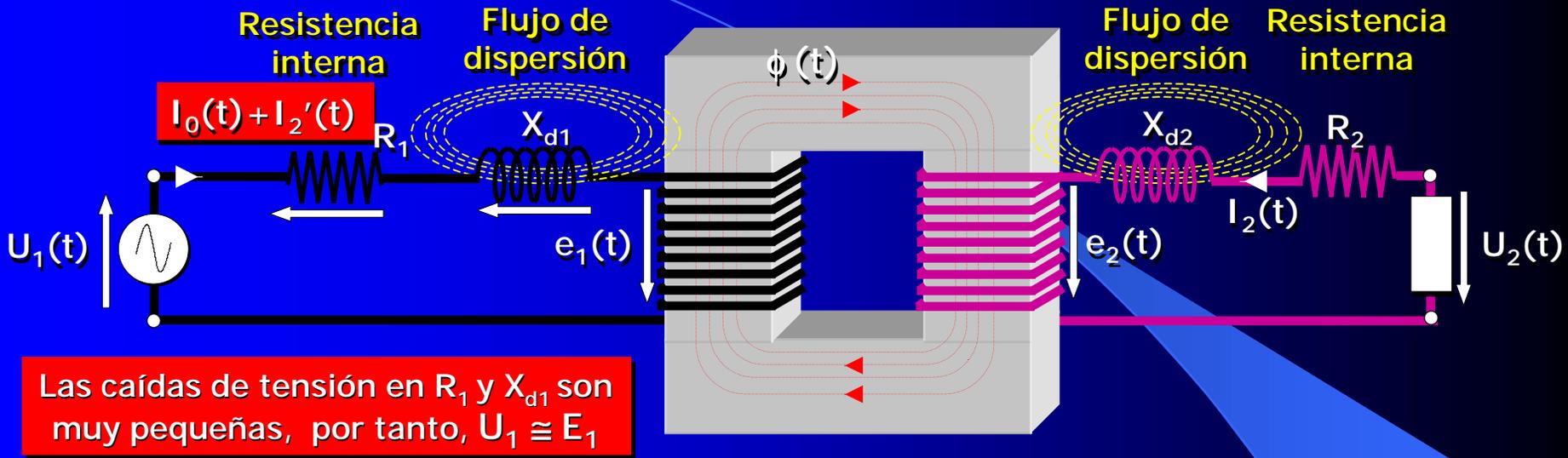


El secundario del transformador presentará una resistencia interna y una reactancia de dispersión como el primario

Se ha invertido el sentido de $I_2(t)$ para que en el diagrama fasorial $I_1(t)$ e $I_2(t)$ NO APAREZCAN SUPERPUESTAS

Las caídas de tensión EN CARGA en las resistencias y reactancias parásitas son muy pequeñas: del 0,2 al 6% de U_1

4.9 El transformador en carga II



Al cerrarse el secundario circulará por él una corriente $I_2(t)$ que creará una nueva fuerza magnetomotriz $N_2 \cdot I_2(t)$

La nueva fmm NO podrá alterar el flujo, ya que si así fuera se modificaría E_1 que está fijada por U_1

Nueva corriente primario

$I_1 = I_0 + I_2'$

$I_2' = -\frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = -\frac{I_2}{r_t}$

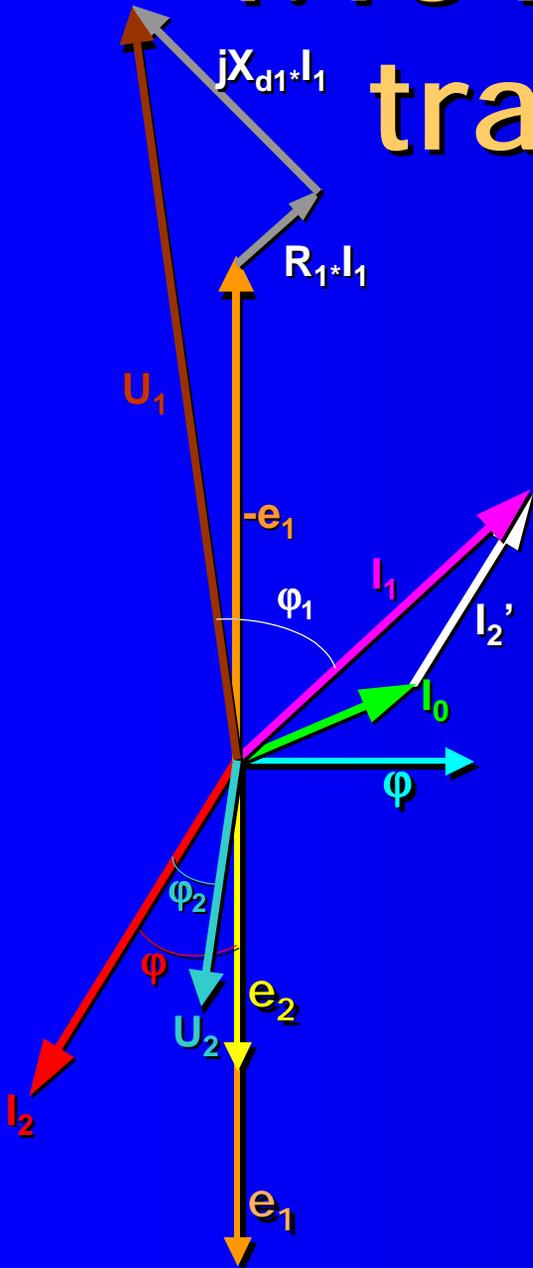
Esto sólo es posible si en el primario aparece una corriente $I_2'(t)$ que verifique:

Flujo y fmm son iguales que en vacío (los fija $U_1(t)$)

$N_1 \cdot I_0 + N_1 \cdot I_2' + N_2 \cdot I_2 = N_1 \cdot I_0$

$N_1 \cdot I_2' = -N_2 \cdot I_2$

4.10 Diagrama fasorial del transformador en carga



$$\underline{e}_2 = \underline{I}_2 \cdot [R_2 + jX_{d2}] + \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_c \cdot \underline{I}_2$$

Suponiendo carga inductiva:
 $Z_c = Z_c \angle \varphi_2 \rightarrow I_2$ estará retrasada
 respecto de e_2 un ángulo φ :

$$\varphi = \text{atg} \left[\frac{Z_c \cdot \text{Sen} \varphi_2 + X_{d2}}{R_2 + Z_c \cdot \text{Cos} \varphi_2} \right]$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2' = \underline{I}_0 - \frac{\underline{I}_2}{r_t}$$

$$\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \cdot [R_1 + jX_{d1}] + \underline{e}_1 = 0$$

$$\underline{U}_1 = -\underline{e}_1 + \underline{I}_1 \cdot [R_1 + jX_{d1}]$$

U_2 estará adelantada un ángulo φ_2 respecto a I_2

Las caídas de tensión en R_1 y X_{d1} están aumentadas. En la práctica son casi despreciables

Las caídas de tensión en R_2 y X_{d2} también son casi nulas

4.11 Reducción del secundario al primario

Si la relación de transformación es elevada existe una diferencia importante entre las magnitudes primarias y secundarias. La representación vectorial se complica

El problema se resuelve mediante la reducción del secundario al primario

Impedancia cualquiera en el secundario

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{\underline{U}_2'}{r_t \cdot \underline{I}_2'} = \frac{\underline{U}_2'}{\underline{I}_2'} \cdot \frac{1}{r_t^2} = \underline{Z}_2' \cdot \frac{1}{r_t^2}$$

Magnitudes reducidas al primario

$$\underline{Z}_2' = \underline{Z}_2 \cdot r_t^2$$

$$S_2 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2 \rightarrow S_2 = \frac{\underline{U}_2'}{r_t} \cdot \underline{I}_2' \cdot r_t = \underline{U}_2' \cdot \underline{I}_2' = S_2'$$

$$\underline{e}_2' = \underline{e}_2 \cdot r_t$$

$$\underline{U}_2' = \underline{U}_2 \cdot r_t$$

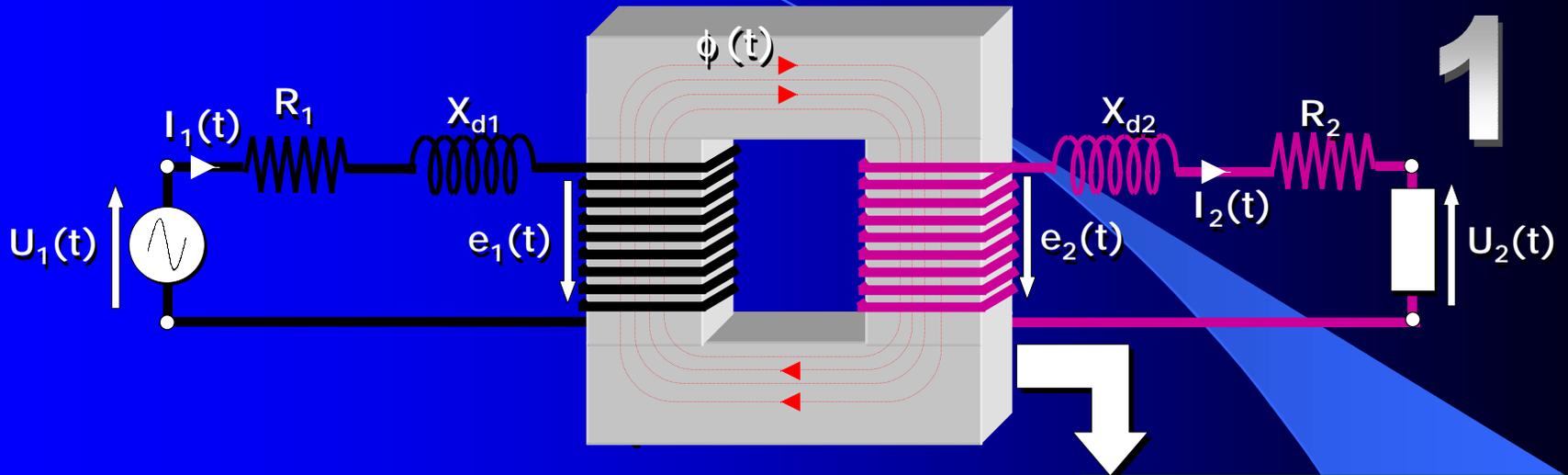
$$\underline{U}_{R2}' = \underline{U}_{R2} \cdot r_t$$

$$\underline{U}_{X2}' = \underline{U}_{X2} \cdot r_t$$

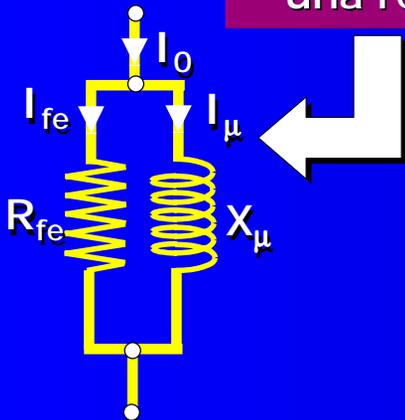
$$\underline{I}_2' = \frac{\underline{I}_2}{r_t}$$

Se mantiene la potencia aparente, la potencia activa y reactiva, los ángulos, las pérdidas y el rendimiento

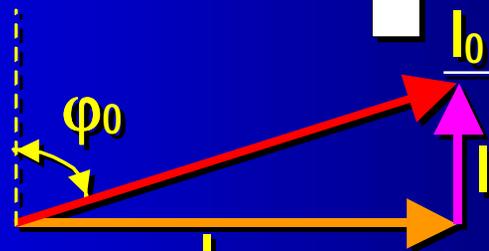
4.12 Circuito equivalente I



Este efecto puede emularse mediante una resistencia y una reactancia en paralelo



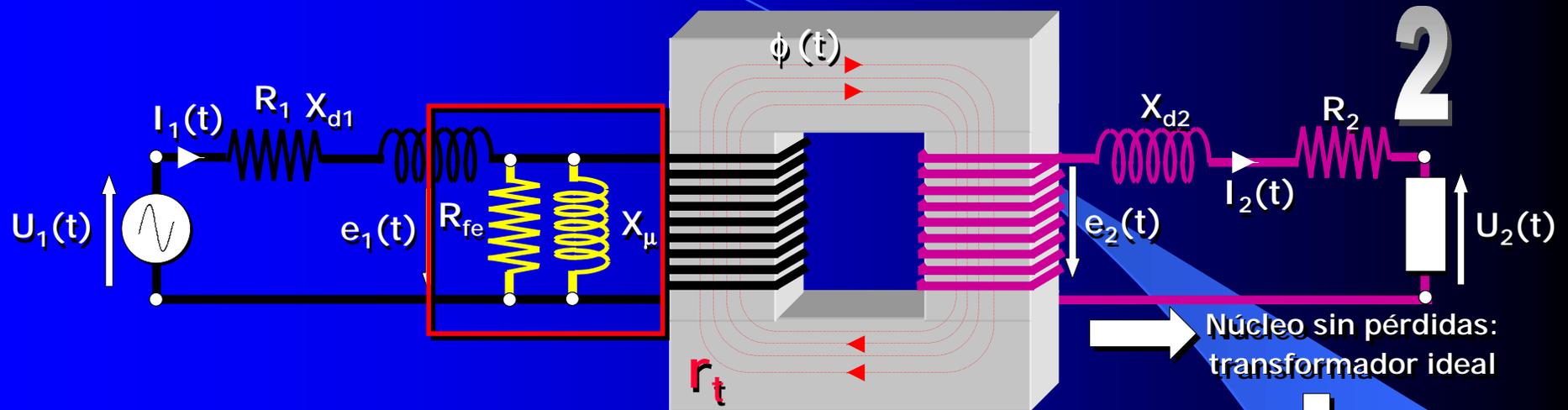
El núcleo tiene pérdidas que se reflejan en la aparición de las dos componentes de la corriente de vacío



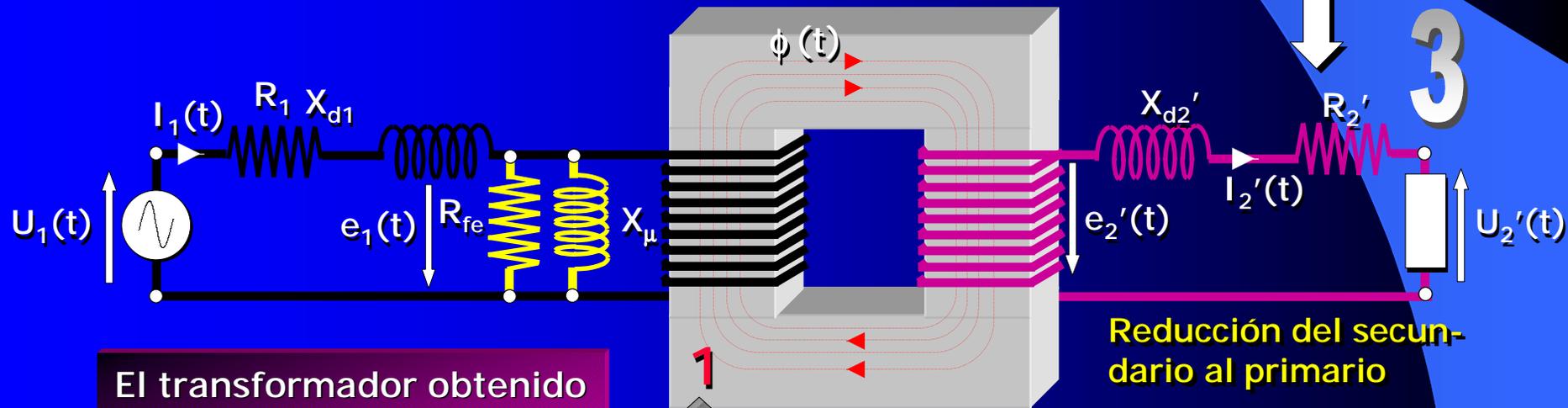
Componente magnetizante

Componente de pérdidas

4.12 Circuito equivalente II



Núcleo sin pérdidas:
transformador ideal



Reducción del secundario al primario

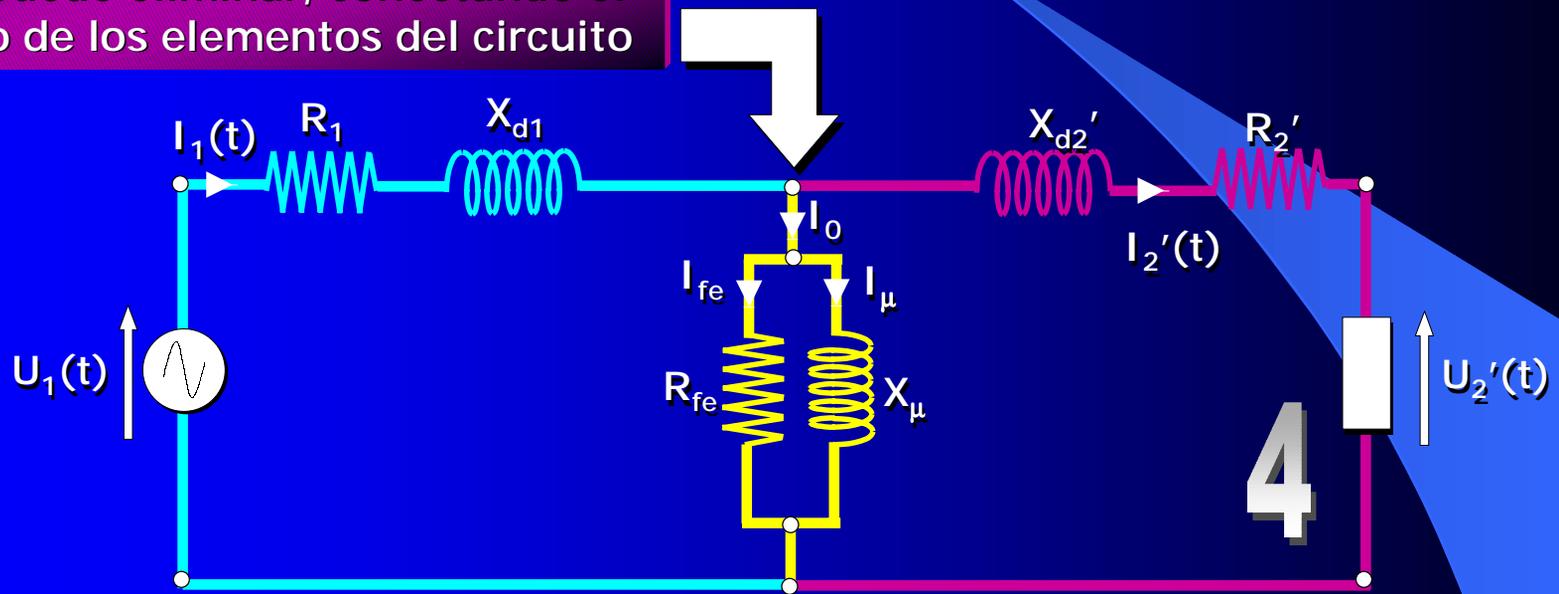
El transformador obtenido después de reducir al primario es de:
 $r_t = 1: e_2' = e_2 \cdot r_t = e_1$

$$e_2' = e_2 \cdot r_t \quad U_2' = U_2 \cdot r_t$$

$$I_2' = \frac{I_2}{r_t} \quad R_2' = R_2 \cdot r_t^2 \quad X_{d2}' = X_{d2} \cdot r_t^2$$

4.13 Circuito equivalente III

Como el transformador de 3 es de relación unidad y no tiene pérdidas se puede eliminar, conectando el resto de los elementos del circuito



Circuito equivalente de un transformador real

El circuito equivalente permite calcular todas las variables incluidas pérdidas y rendimiento

Los elementos del circuito equivalente se obtienen mediante ensayos normalizados

Una vez resuelto el circuito equivalente los valores reales se calculan deshaciendo la reducción al primario

4.14 Ensayos del transformador: obtención del circuito equivalente

Existen dos ensayos normalizados que permiten obtener las caídas de tensión, pérdidas y parámetros del circuito equivalente del transformador

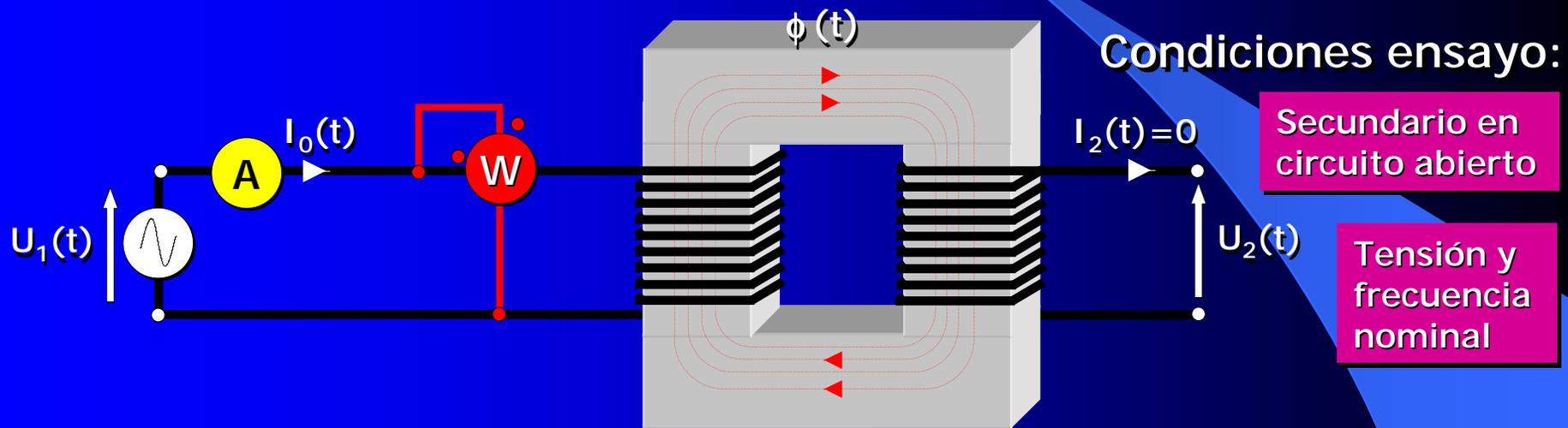


Ensayo de vacío

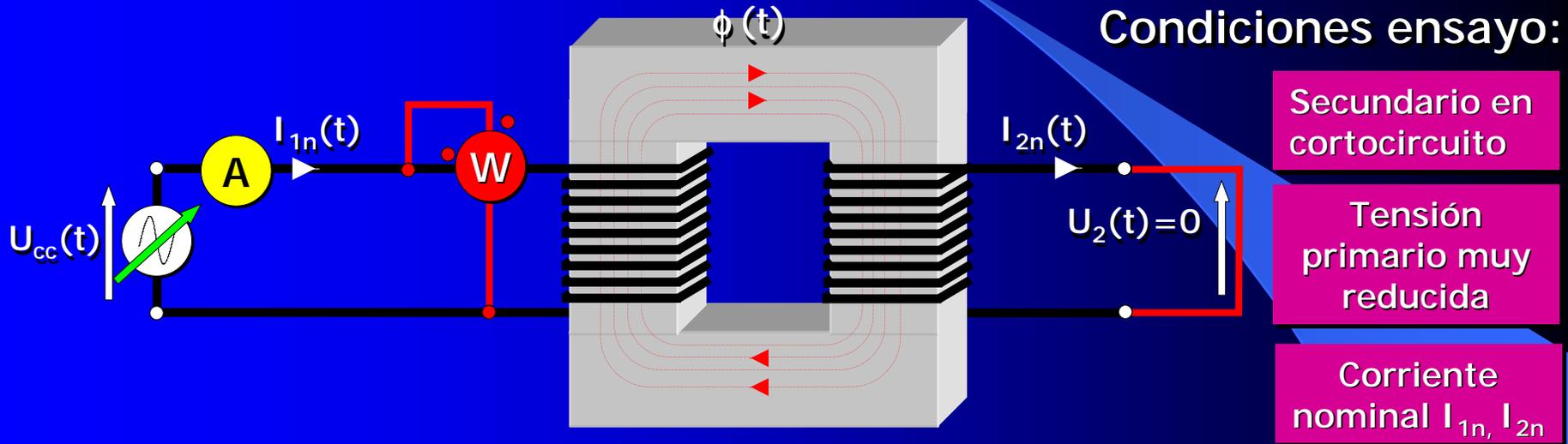
Ensayo de cortocircuito

En ambos ensayos se miden tensiones, corrientes y potencias. A partir del resultado de las mediciones es posible estimar las pérdidas y reconstruir el circuito equivalente con todos sus elementos

4.14.1 Ensayo del transformador en vacío



4.14.2 Ensayo de cortocircuito

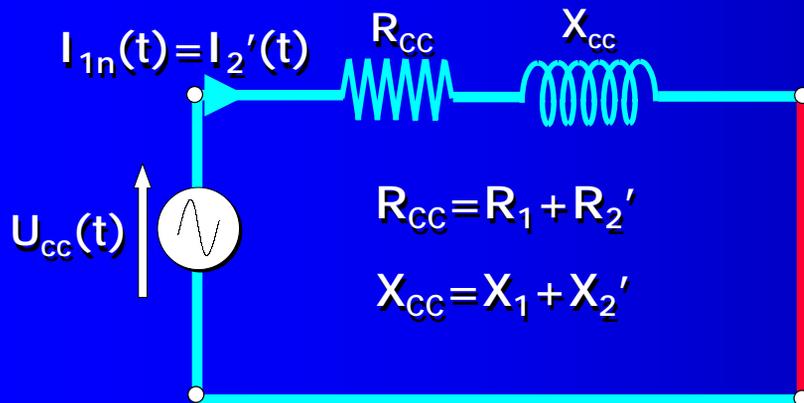
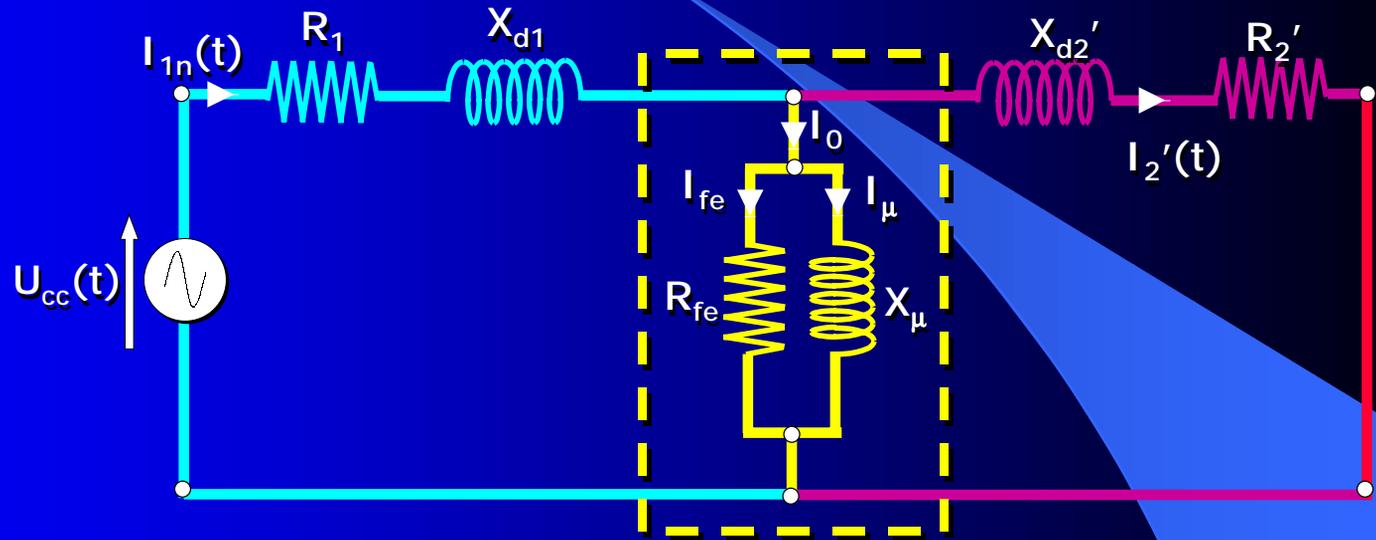


Al ser la tensión del ensayo muy baja habrá muy poco flujo y, por tanto, las pérdidas en el hierro serán despreciables ($P_{fe} = kB_m^2$)



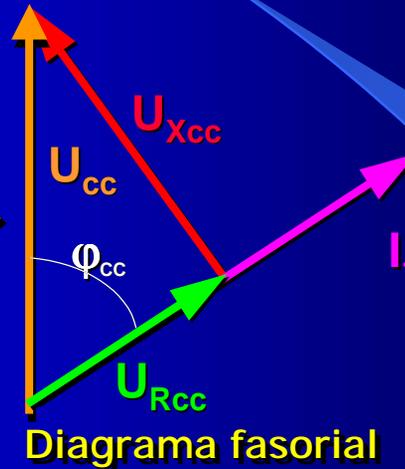
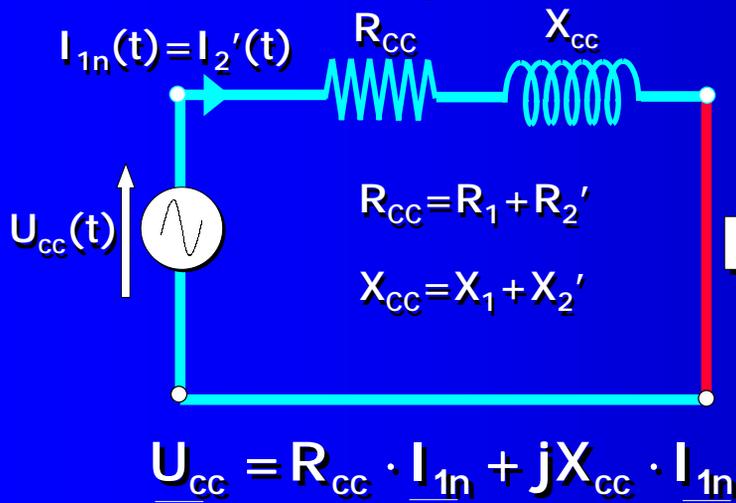
4.15 El transformador en el ensayo de cortocircuito I

Al ser el flujo muy bajo respecto al nominal I_0 es despreciable



Al estar el secundario en cortocircuito se puede despreciar la rama en paralelo

4.15 El transformador en el ensayo de cortocircuito II



$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} \cdot I_{1n}}$$

$$U_{R_{cc}} = U_{cc} \cdot \cos\varphi_{cc}$$

$$U_{X_{cc}} = U_{cc} \cdot \text{Sen}\varphi_{cc}$$

$$\underline{U}_{cc} = \underline{Z}_{cc} \cdot \underline{I}_{1n}$$

$$\epsilon_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{1n}} = \frac{I_{1n} \cdot Z_{cc}}{U_{1n}}$$

$$\epsilon_{R_{cc}} = \frac{U_{R_{cc}}}{U_{1n}} = \frac{I_{1n} \cdot R_{cc}}{U_{1n}}$$

$$\epsilon_{X_{cc}} = \frac{U_{X_{cc}}}{U_{1n}} = \frac{I_{1n} \cdot X_{cc}}{U_{1n}}$$

P_{cc} son las pérdidas totales en el Cu
Las de Fe son despreciables en corto

Tensiones relativas de cortocircuito: se expresan porcentualmente

$$\epsilon_{cc} \Rightarrow 5\% - 10\%$$

$$\epsilon_{X_{cc}} \gg \epsilon_{R_{cc}}$$

Para un trafo de potencia aparente S_n

$$\epsilon_{cc} = \frac{I_{1n}^2 \cdot Z_{cc}}{S_n}$$

4.16 Caídas de tensión en un transformador en carga I

Un transformador alimentado con la tensión nominal U_{1n} dará en el secundario en vacío la tensión U_{2n}

Cuando trabaje en carga, se producirán caídas de tensión. En el secundario aparece U_{2c}

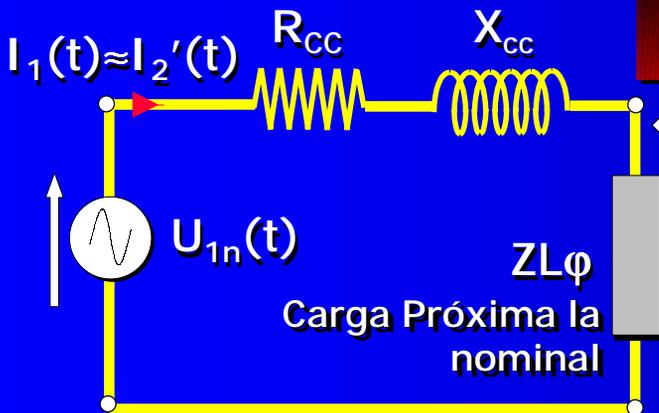
$$\Delta U_2 = U_{2n} - U_{2c}$$

Caída de tensión

Normalmente se expresa en %

$$\epsilon_c(\%) = \frac{U_{2n} - U_{2c}}{U_{2n}}$$

Se puede referir a primario o secundario (sólo hay que multiplicar por r_t)



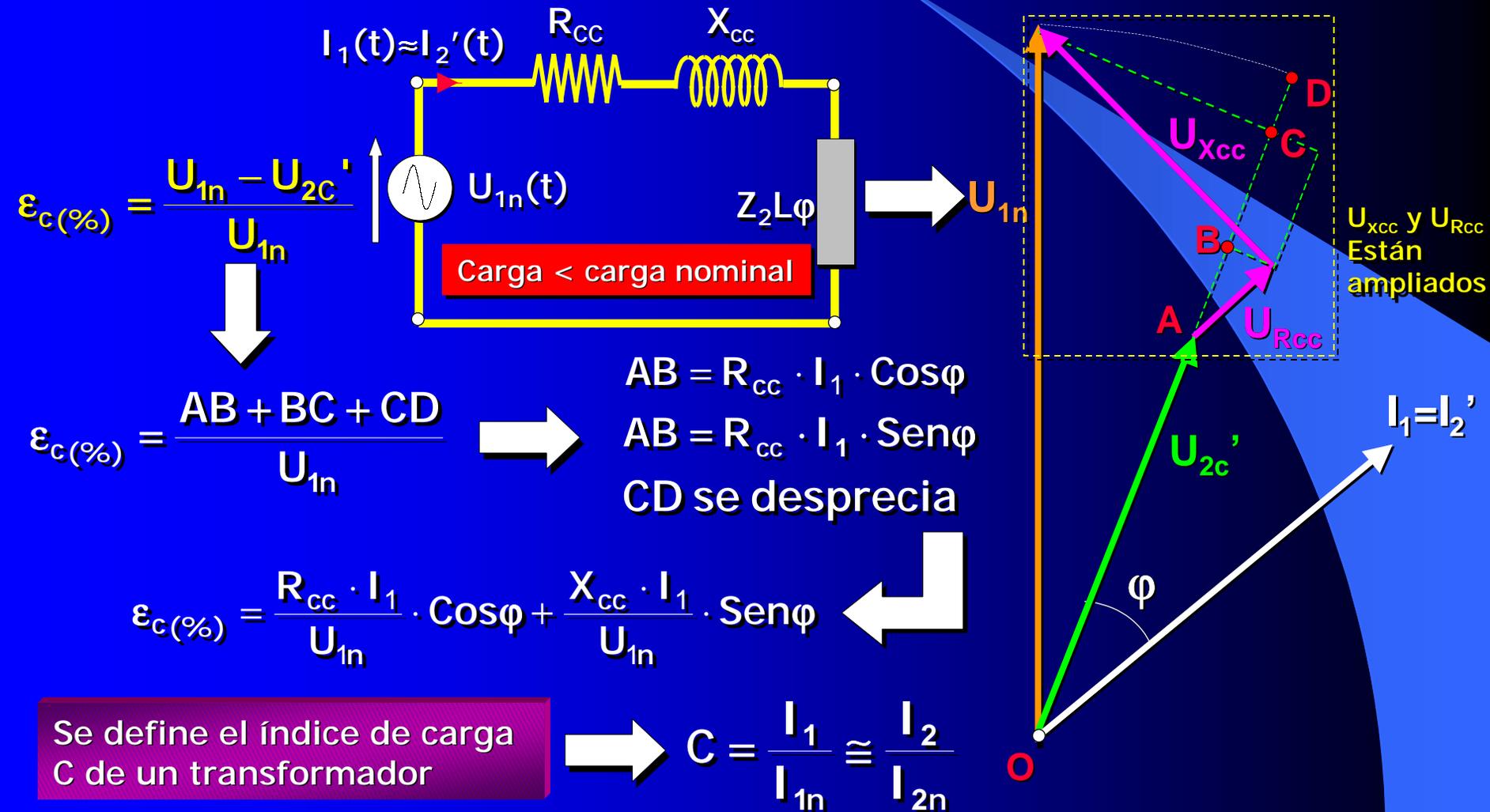
LAS CAÍDAS DE TENSIÓN DEPENDEN DE LA CARGA

$$\epsilon_c(\%) = \frac{U_{1n} - U_{2c}'}{U_{1n}}$$

Para hacer el análisis fasorial se puede eliminar la rama en paralelo ($I_0 \ll I_2$)

La simplificación es válida sólo si la carga es próxima a la nominal

4.16 Caídas de tensión en un transformador en carga II



4.16 Caídas de tensión en un transformador en carga III

$$\varepsilon_c(\%) = \frac{R_{cc} \cdot I_1 \cdot \cos\varphi}{U_{1n}} + \frac{X_{cc} \cdot I_1 \cdot \text{Sen}\varphi}{U_{1n}}$$

Multiplicando por: $\frac{I_{1n}}{I_{1n}}$

$$\varepsilon_c(\%) = \frac{R_{cc} \cdot I_1 \cdot I_{1n}}{U_{1n} \cdot I_{1n}} \cdot \cos\varphi + \frac{X_{cc} \cdot I_1 \cdot I_{1n}}{U_{1n} \cdot I_{1n}} \cdot \text{Sen}\varphi$$

ε_{RCC}

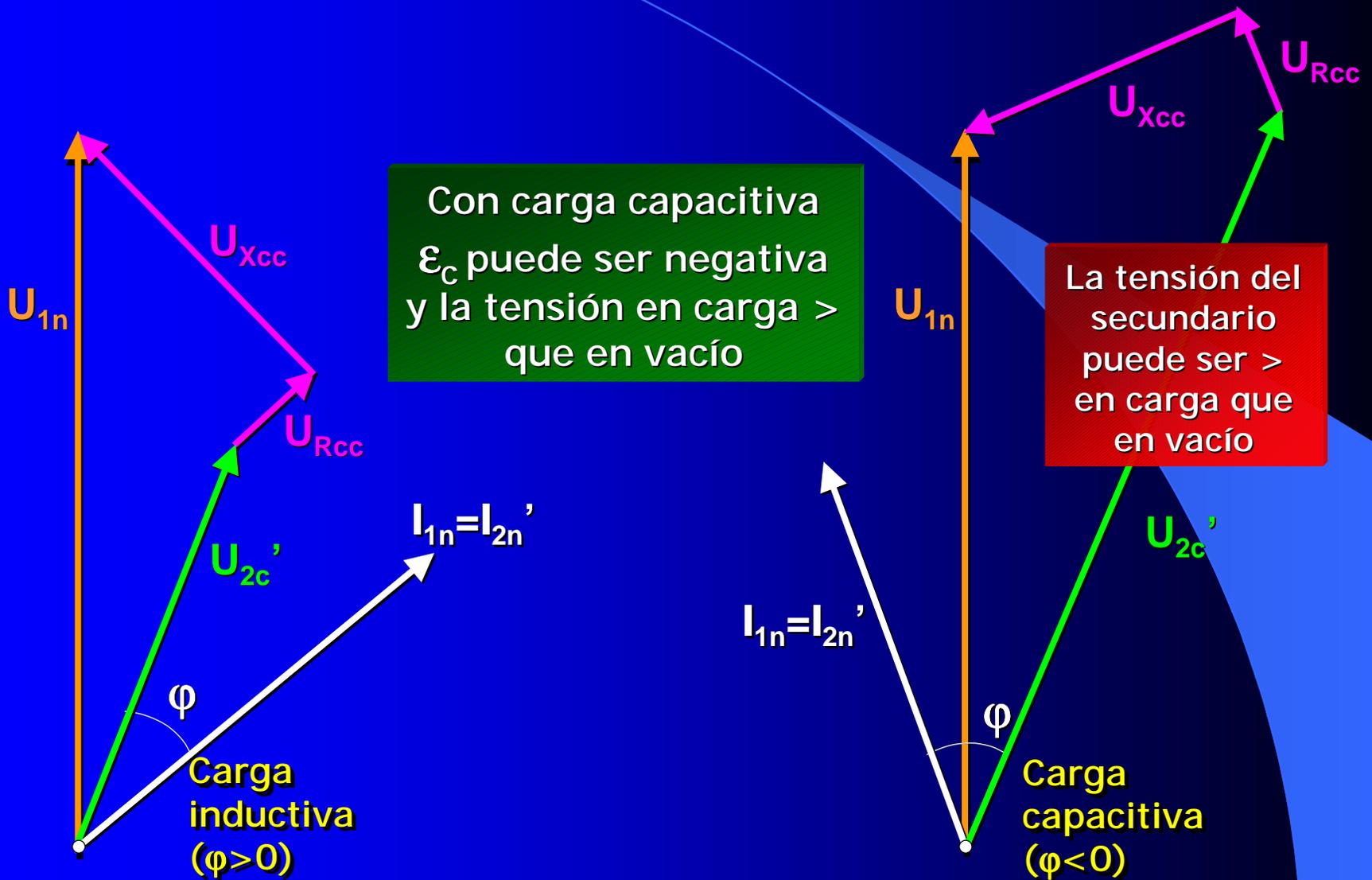
C

$$\varepsilon_c(\%) = C \cdot [\varepsilon_{RCC} \cdot \cos\varphi + \varepsilon_{XCC} \cdot \text{Sen}\varphi]$$

EFFECTO FERRANTI

Si $\varphi < 0 \Rightarrow \text{Sen}\varphi < 0 \Rightarrow \varepsilon_c$ puede ser $< 0 \Rightarrow U_{2c}' > U_{1n} \Rightarrow U_{2c} > U_{2n}$

4.17 Efecto Ferranti



4.18 Rendimiento del transformador

$$\eta = \frac{P_{\text{cedida}}}{P_{\text{absorbida}}} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\longrightarrow P_1 = P_2 + P_{fe} + P_{cu}$$

$$\longrightarrow \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{fe} + P_{cu}}$$

$$P_{cu} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \cong R_{cc} \cdot I_1^2 = R_{cc} \cdot I_{1n}^2 \cdot C^2 = P_{cc} \cdot C^2$$



$$\longrightarrow C = \frac{I_1}{I_{1n}} \cong \frac{I_2}{I_{2n}}$$

EL TRANSFORMADOR TRABAJA CON UN ÍNDICE DE CARGA C

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos\phi}{U_2 I_2 \cos\phi + P_0 + P_{cc} C^2} = \frac{C \cdot U_2 I_{2n} \cos\phi}{C \cdot U_2 I_{2n} \cos\phi + P_0 + P_{cc} C^2}$$



Ensayo de vacío

$$\epsilon_c(\%) = \frac{U_{2n} - U_{2c}}{U_{2n}} \longrightarrow U_{2c} = [1 - \epsilon_c] \cdot U_{2n}$$



$$\eta = \frac{C \cdot [1 - \epsilon_c] \cdot U_{2n} I_{2n} \cos\phi}{C \cdot [1 - \epsilon_c] \cdot U_{2n} I_{2n} \cos\phi + P_0 + P_{cc} C^2} \cong \frac{C \cdot [1 - \epsilon_c] \cdot S_n \cos\phi}{C \cdot [1 - \epsilon_c] \cdot S_n \cos\phi + P_0 + P_{cc} C^2}$$

4.19 Influencia del índice de carga y del $\cos\phi$ en el rendimiento

$$\eta = \frac{C \cdot [1 - \epsilon_c] \cdot S_n \cos\phi}{C \cdot [1 - \epsilon_c] \cdot S_n \cos\phi + P_0 + P_{cc} C^2}$$

Despreciando la caída de tensión

$$\eta = \frac{C \cdot S_n \cos\phi}{C \cdot S_n \cos\phi + P_0 + P_{cc} C^2}$$

$$\eta = \frac{C \cdot S_n}{C \cdot S_n + \frac{K}{\cos\phi}}$$

$C = \text{cte}$ $\cos\phi = \text{variable}$

$\cos\phi \uparrow \Rightarrow \eta \uparrow$

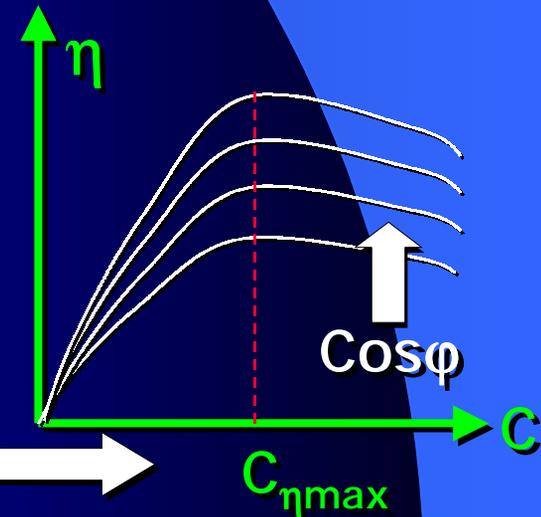
$C = \text{variable}$
 $\cos\phi = \text{Cte}$

$\eta \text{ max si } \frac{P_0 + P_{cc} C}{C} \text{ mín.}$

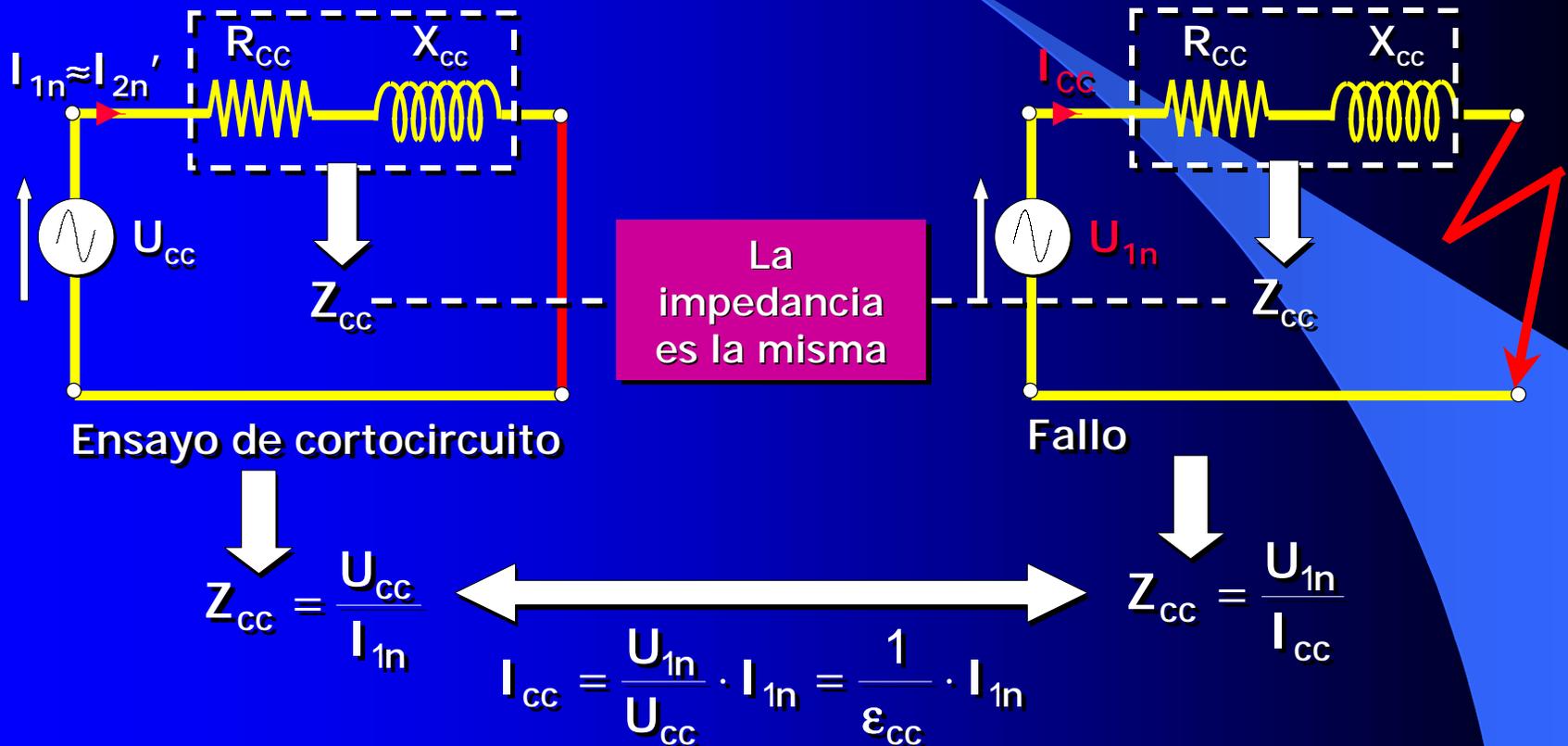
$$\eta = \frac{S_n \cos\phi}{S_n \cos\phi + \frac{P_0}{C} + P_{cc} C}$$

Derivando respecto a C e igualando a 0

$$C_{\eta \text{max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$$

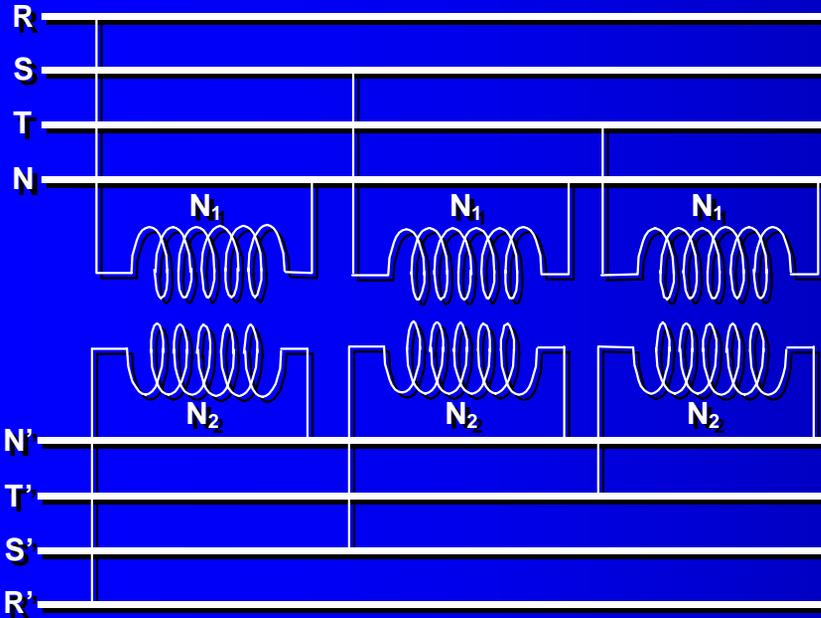


4.18 Corriente de cortocircuito



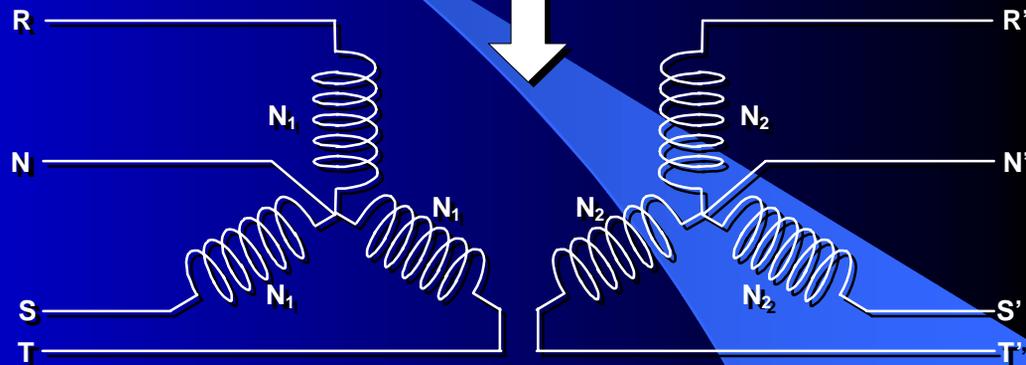
Para los valores habituales de ϵ_{cc} (5-10%) se obtienen corrientes de cortocircuito de 10 a 20 veces $>$ que I_{1n}

4.19 Trafos trifásicos I

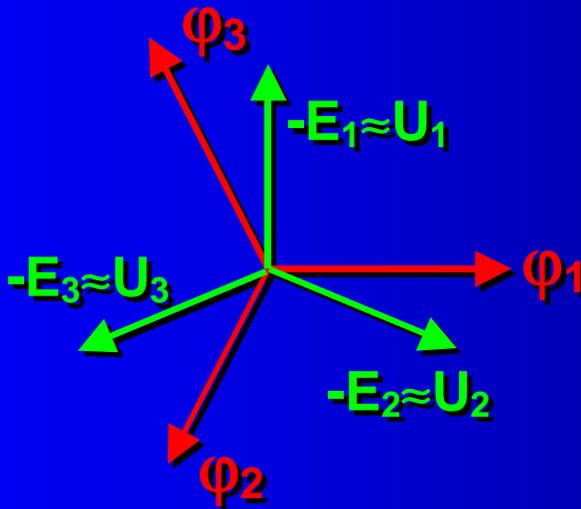


Banco trifásico de transformadores monofásicos

La forma más elemental de transformar un sistema trifásico consiste en transformar cada una de las tensiones de fase mediante un trafo monofásico.



Primarios y secundarios estarían conectados en estrella. Puede haber neutro o no.

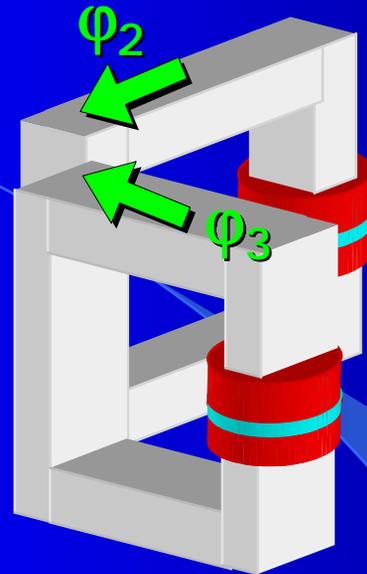
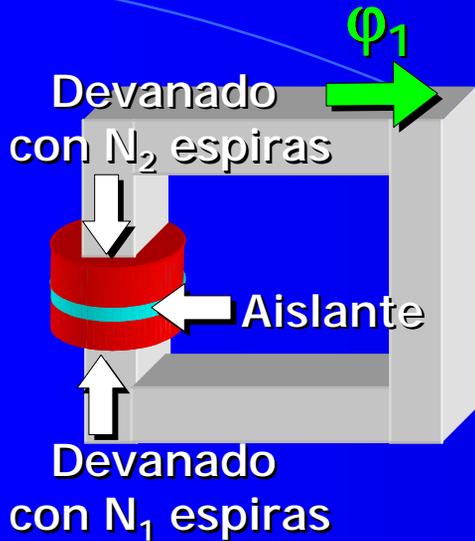


$$\underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 = 0$$

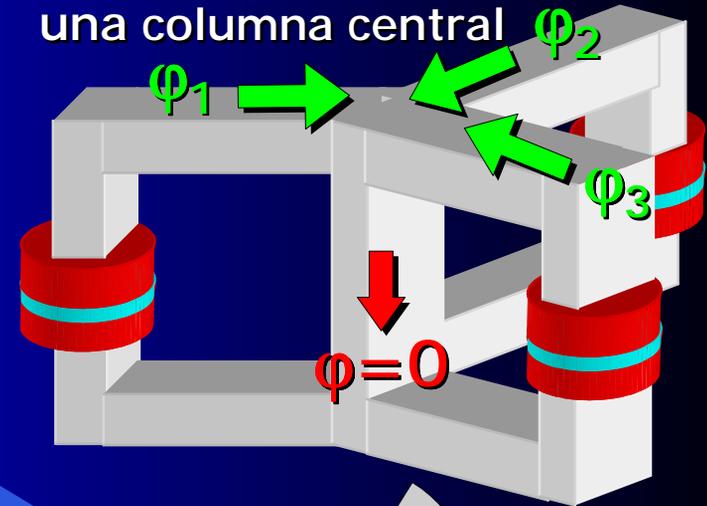
$$\underline{\varphi}_1 + \underline{\varphi}_2 + \underline{\varphi}_3 = 0$$

4.19 Trafos trifásicos II

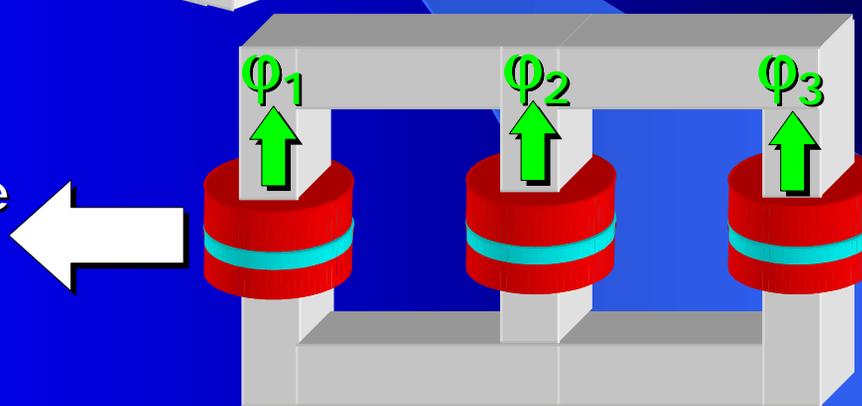
3 transformadores monofásicos



La suma de los tres flujos es 0: se pueden unir todas las columnas en una columna central



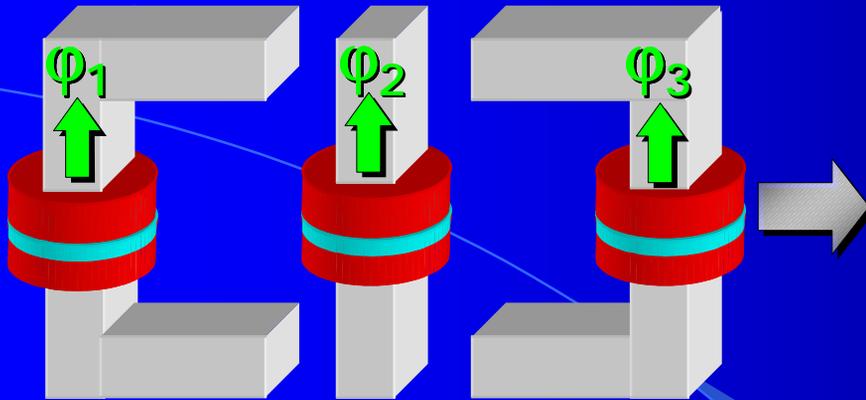
Eliminando la columna central se ahorra material y peso del transformador



Estructura básica de un transformador trifásico

Se puede suprimir la columna central

4.19 Trafos trifásicos III

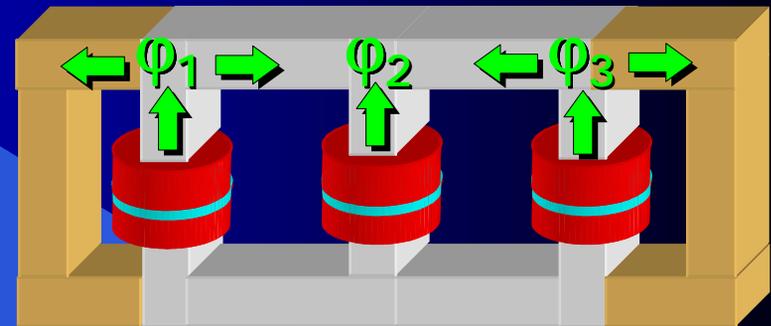


Transformador trifásico de 3 columnas

Las dos columnas laterales sirven como camino adicional al flujo. De este modo, es posible reducir la sección y, por tanto, la altura de la culata

En un transformador con tres columnas existe una pequeña asimetría del circuito magnético: el flujo de la columna central tiene un recorrido más corto y, por tanto, de menor reluctancia.

La corriente de magnetización de esa fase será ligeramente menor.

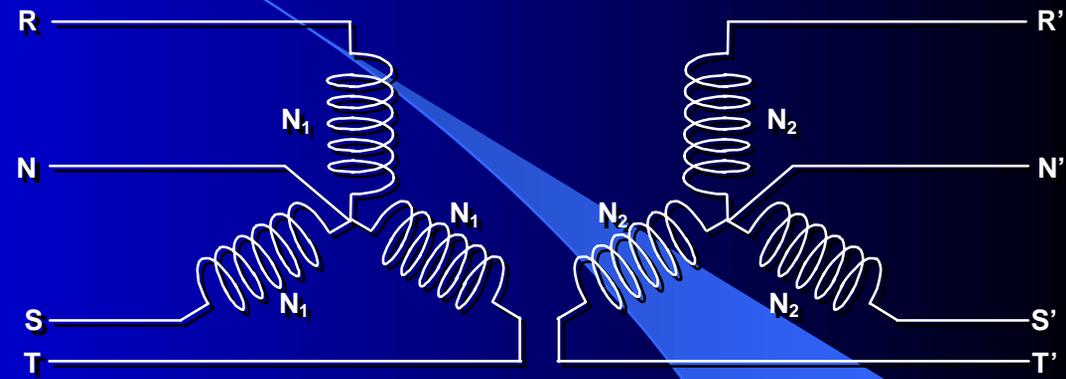
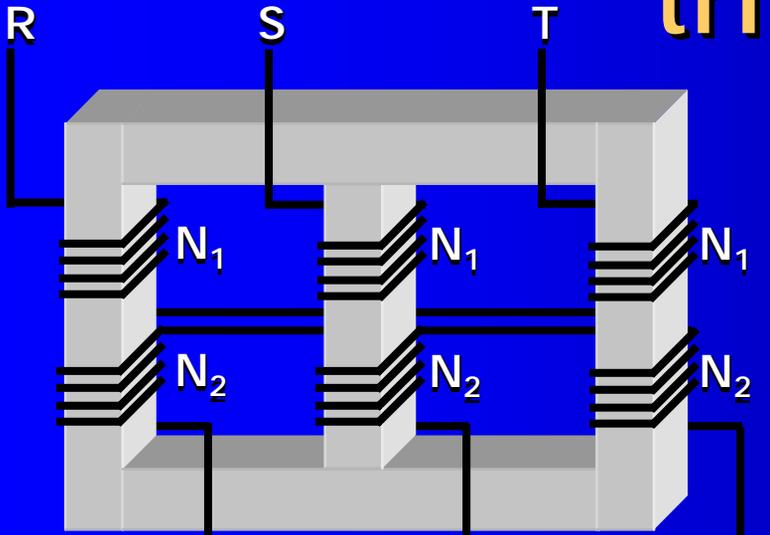


Transformador trifásico núcleo acorazado (5 columnas)

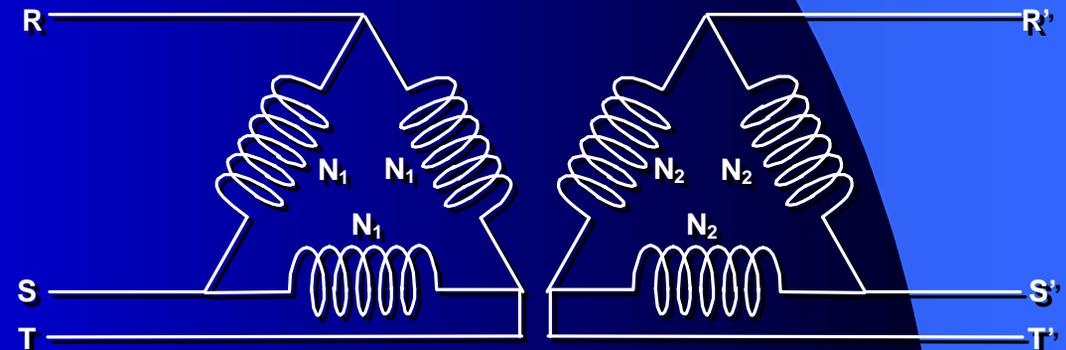
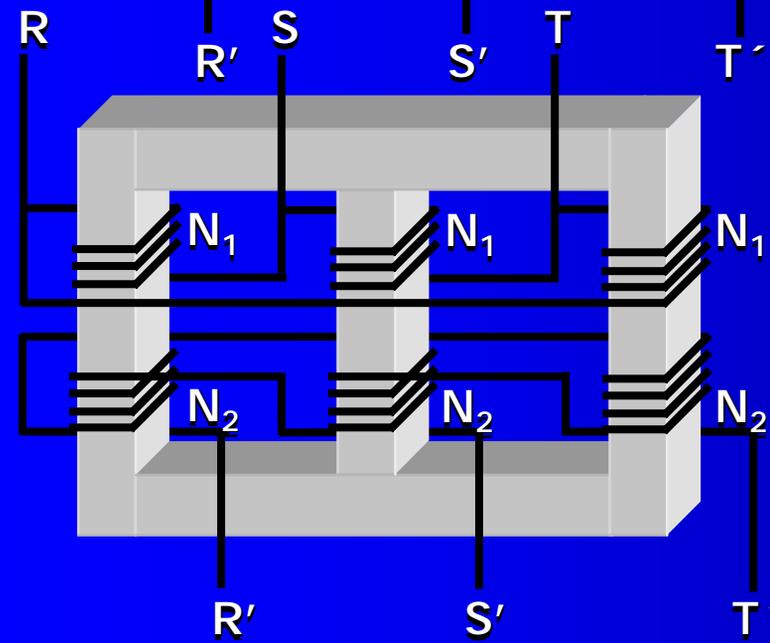
Si el sistema en el que trabaja el transformador es totalmente equilibrado su análisis se puede reducir al de una fase (las otras son = desfasadas 120° y 240°)

El circuito equivalente que se utiliza es el mismo, con la tensión de fase y la corriente de línea (equivalente a conexión estrella – estrella)

4.20 Conexiones en transformadores trifásicos I

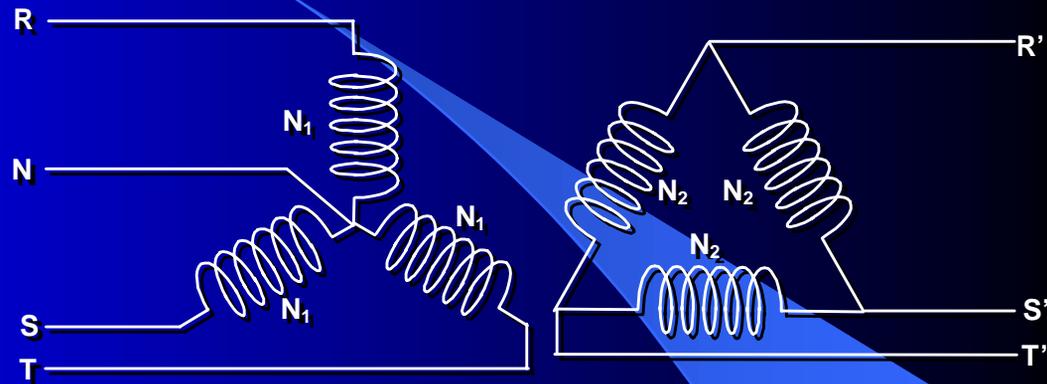
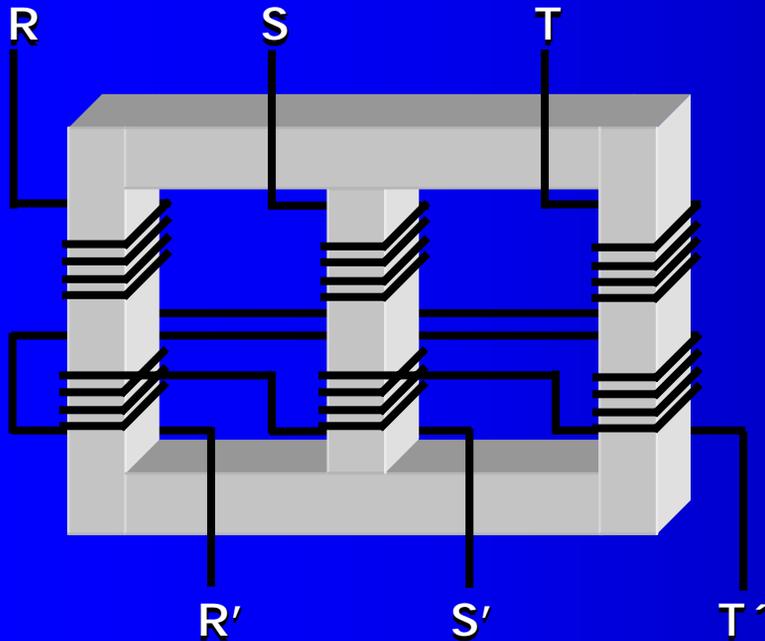


Conexión estrella – estrella: Yy



Conexión triángulo – triángulo: Dd

4.20 Conexiones en transformadores trifásicos II



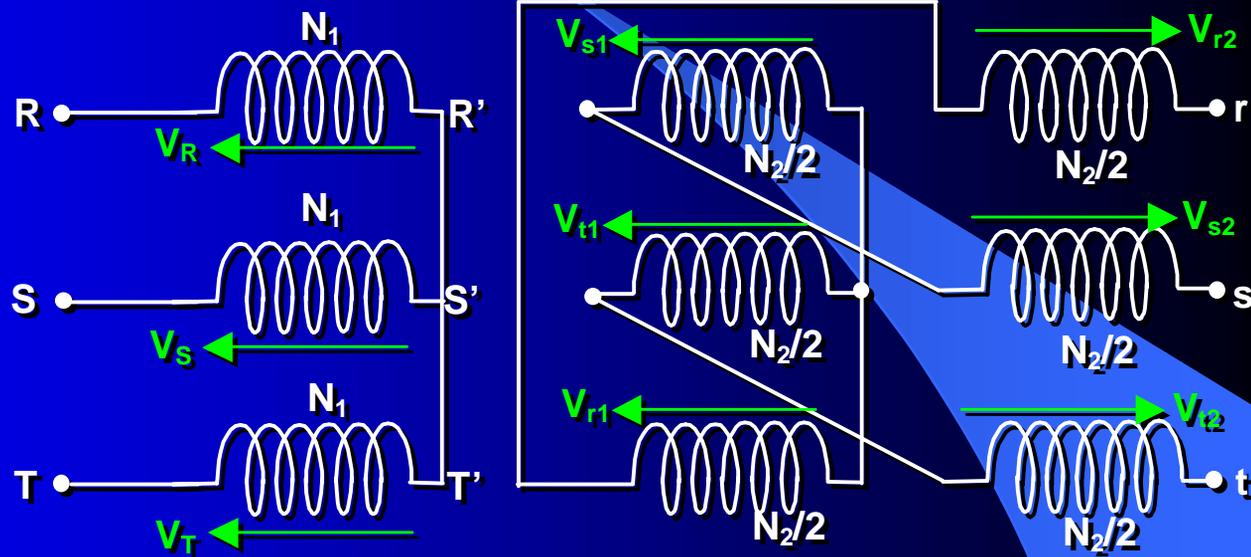
Conexión estrella – triángulo: Yd

La conexión Yy plantea problemas debidos a la circulación de corrientes homopolares (causadas por los armónicos de la corriente de vacío) por el neutro. En condiciones de carga desequilibrada entre fase y neutro aparecen sobretensiones

Cuando uno de los devanados está conectado en triángulo los flujos homopolares se anulan y los inconvenientes anteriores desaparecen. El único problema es la no disponibilidad del neutro en uno de los devanados

4.20 Conexiones en trafos trifásicos III

Si se quiere disponer de neutro en primario y secundario y no tener problemas de flujos homopolares o en carga desequilibrada se utiliza la conexión estrella – zigzag: Yz

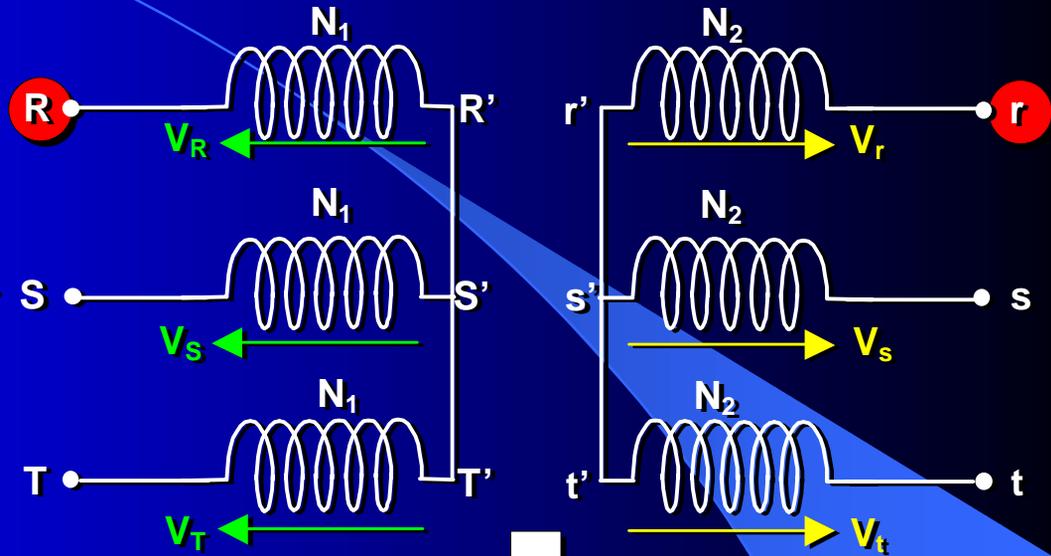


El secundario consta de dos semidevanados con igual número de espiras. La tensión secundaria de cada fase se obtiene como la suma de las tensiones inducidas en dos semidevanados situados en columnas diferentes

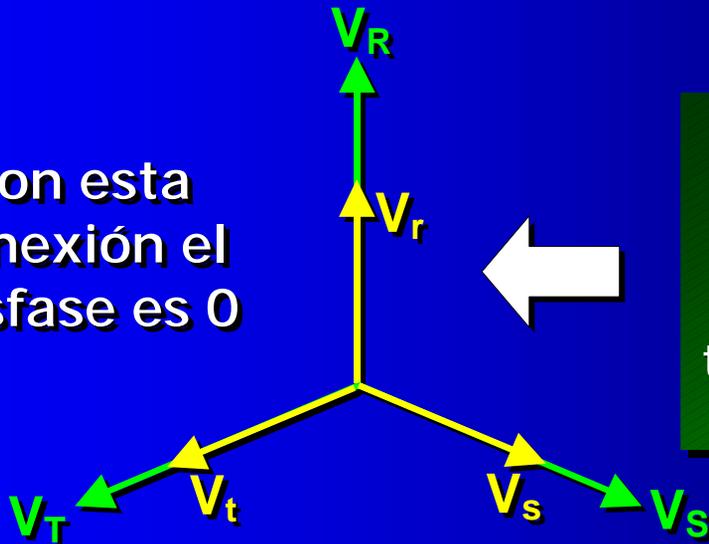
Los efectos producidos por los flujos homopolares se compensan sobre los dos semidevanados no influyendo en el funcionamiento del transformador

4.21 Índices horarios I

Los terminales de igual polaridad son los que simultáneamente, debido a un flujo común, presentan la misma tensión



Con esta conexión el desfase es 0



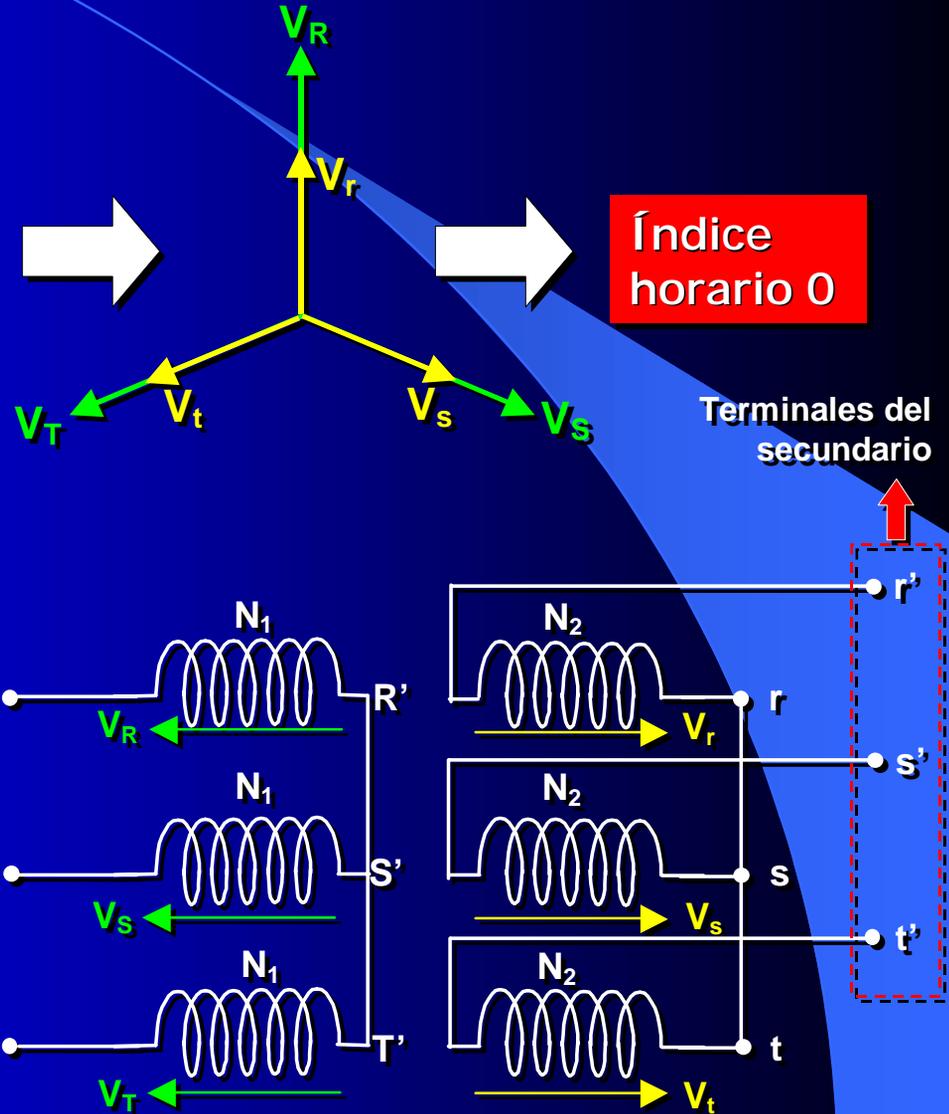
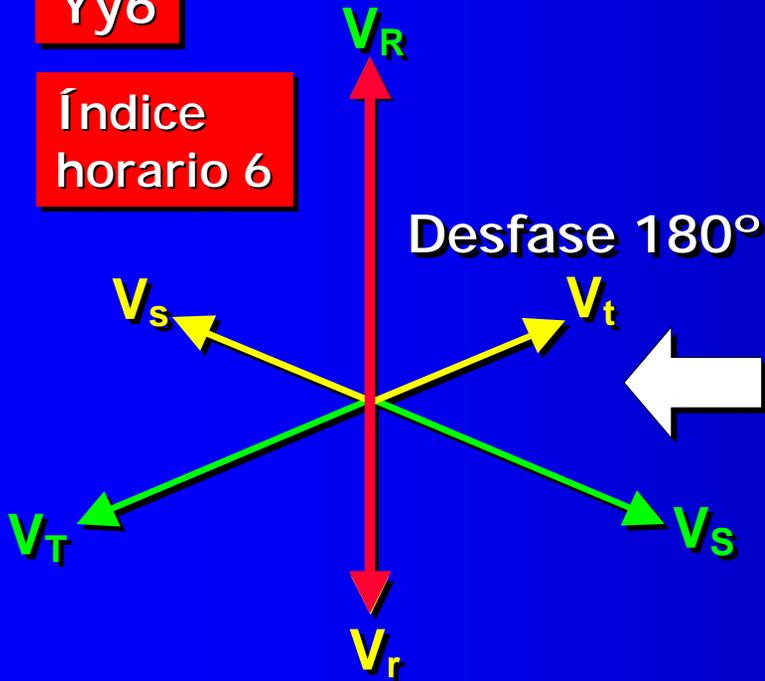
La existencia de conexiones Yd e Yz provoca la aparición de desfases entre las tensiones del primario y del secundario

4.21 Índices horarios II

El desfase se expresa en múltiplos de 30° , lo que equivale a expresar la hora que marcarían el fador de tensión de la fase R del primario (situado en las 12h) y el del secundario

Yy6

Índice horario 6



4.22 Conexión de transformadores en paralelo I

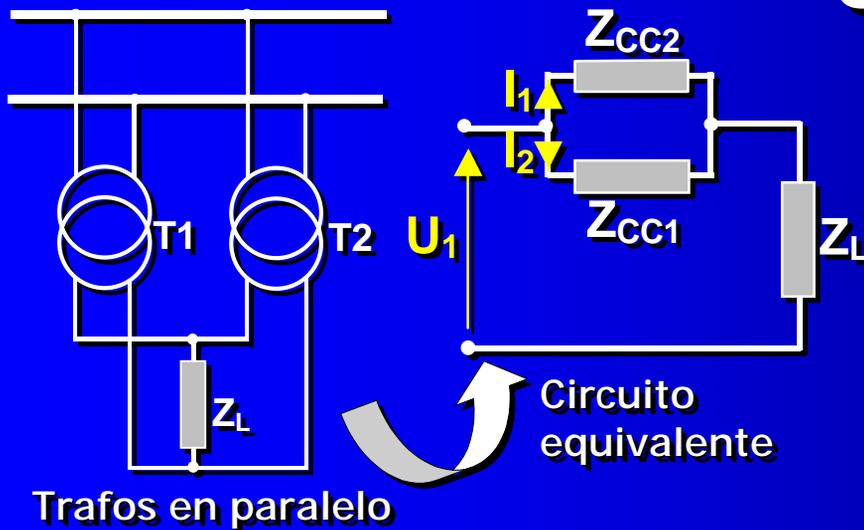
Condiciones para la conexión de transformadores monofásicos en paralelo

IGUAL r_t

Funcionamiento en vacío

IGUAL ϵ_{cc}

Distribución de cargas



$$I_1 \cdot Z_{cc1} = I_2 \cdot Z_{cc2}$$

$$I_1 \cdot Z_{cc1} \cdot \frac{I_{1n}}{I_{1n}} = I_2 \cdot Z_{cc2} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{2n}}$$

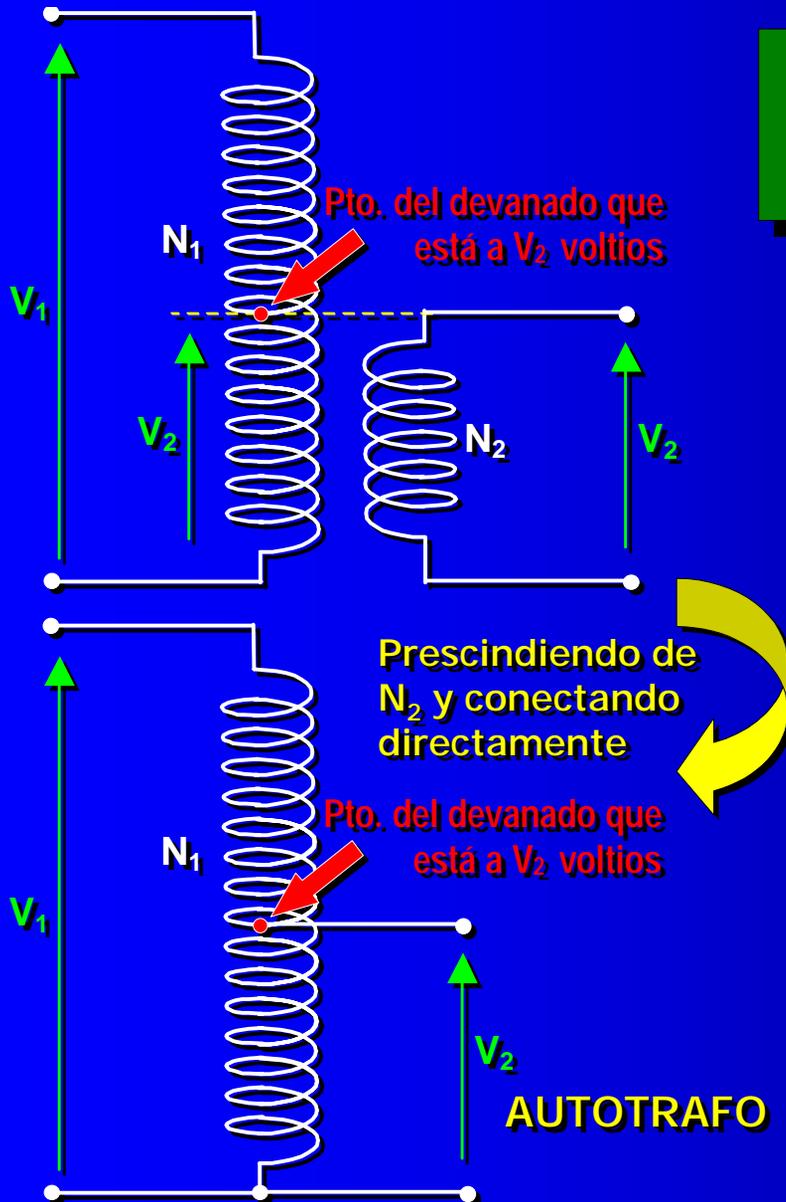
$$I_1 \cdot Z_{cc1} \cdot \frac{I_{1n}}{I_{1n}} \cdot \frac{1}{U_{1n}} = I_2 \cdot Z_{cc2} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{2n}} \cdot \frac{1}{U_{1n}}$$

$$C_1 \cdot \epsilon_{cc1} = C_2 \cdot \epsilon_{cc2}$$

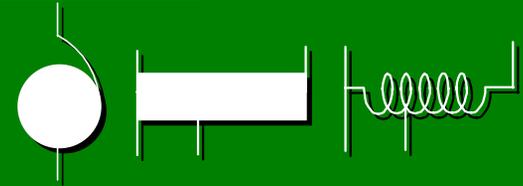
Si $\epsilon_{cc1} = \epsilon_{cc2} \Rightarrow C_1 = C_2$ sino un transformador estará más cargado que el otro

En transformadores trifásicos es necesario que ambos tengan el mismo índice horario para poder realizar la puesta en paralelo

4.23 Autotransformadores I



● SÍMBOLOS



VENTAJAS

- Ahorro de conductor: se emplean N_2 espiras menos.
- Circuito magnético (ventana) de menores dimensiones.
- Disminución de pérdidas eléctricas y magnéticas.
- Mejor refrigeración (cuba más pequeña).
- Menor flujo de dispersión y corriente de vacío. (Menor ϵ_{cc}).

INCONVENIENTES

- Pérdida del aislamiento galvánico.
- Mayor corriente de corto (Menor ϵ_{cc}).
- Necesarias más protecciones.

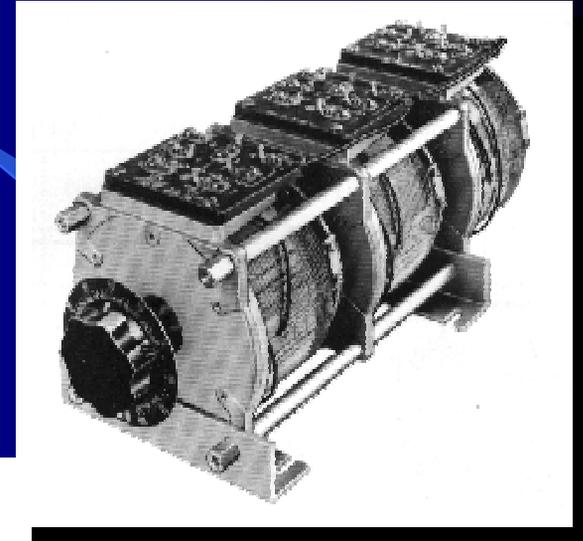
4.23 Autotransformadores II

**AUTOTRAFO
SECO DE BT**

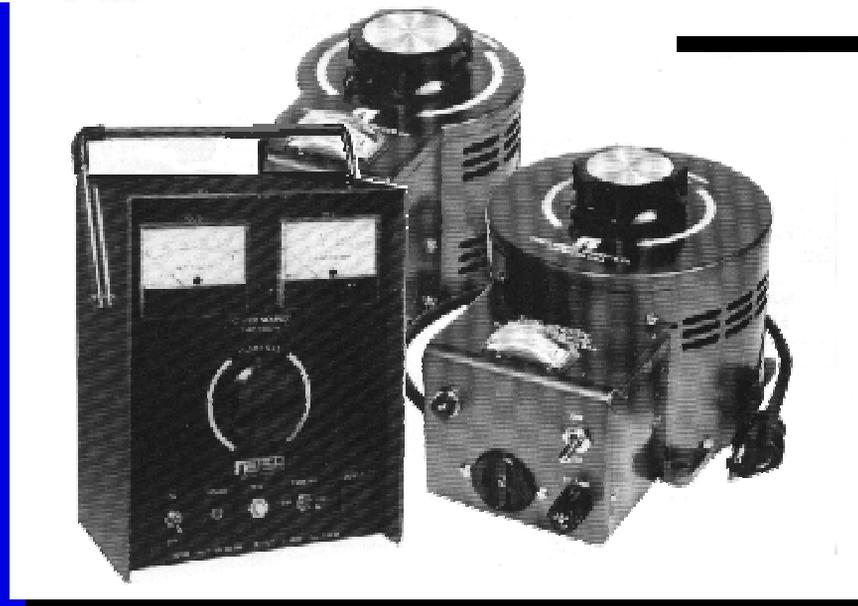


**VARIAC:
AUTOTRAFO
REGULABLE**

Catálogos comerciales

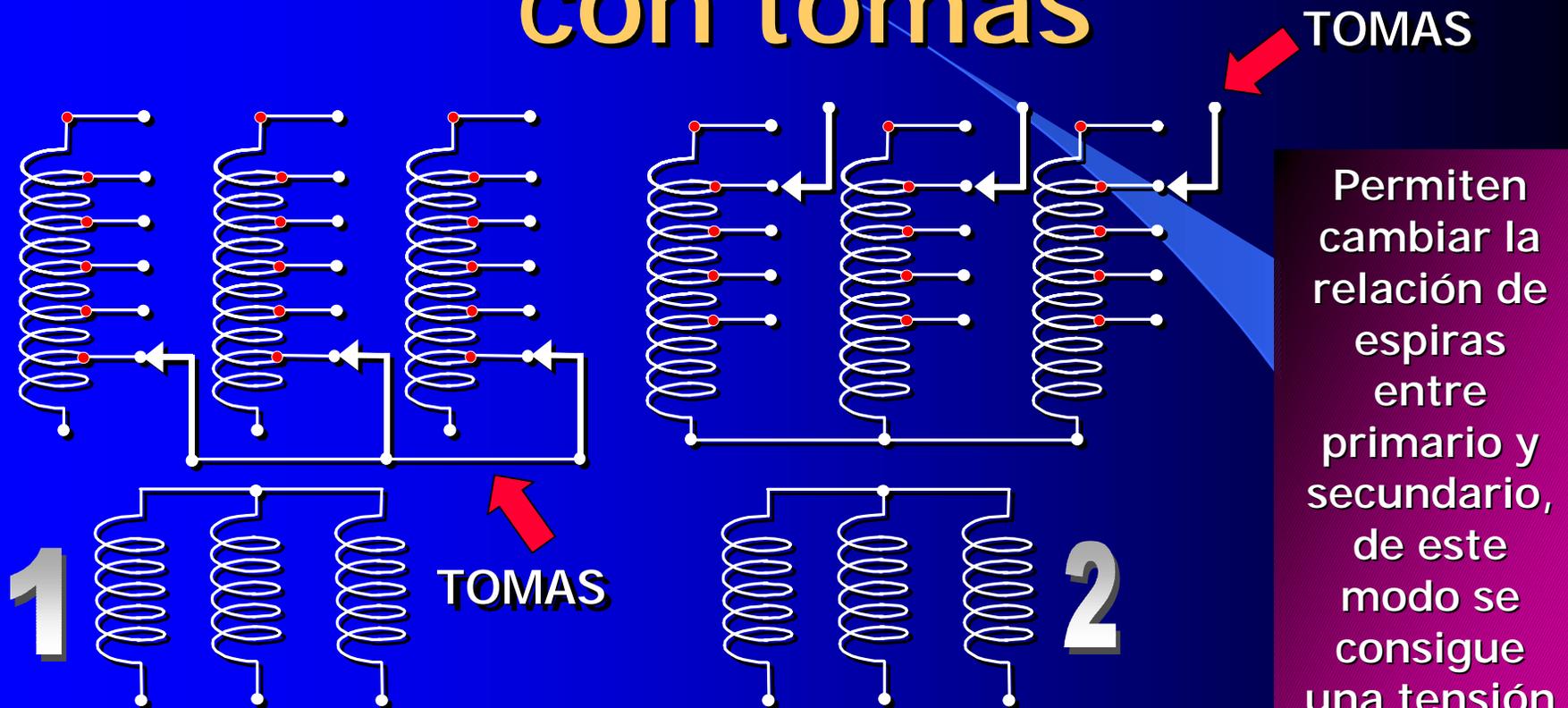


**AUTOTRAFO
SECO DE BT**



**VARIAC CON
INSTRUMENTOS
DE MEDIDA**

4.24 Transformadores con tomas



Permiten cambiar la relación de espiras entre primario y secundario, de este modo se consigue una tensión variable

El caso 1 es más favorable ya que se trabaja con tensiones menores

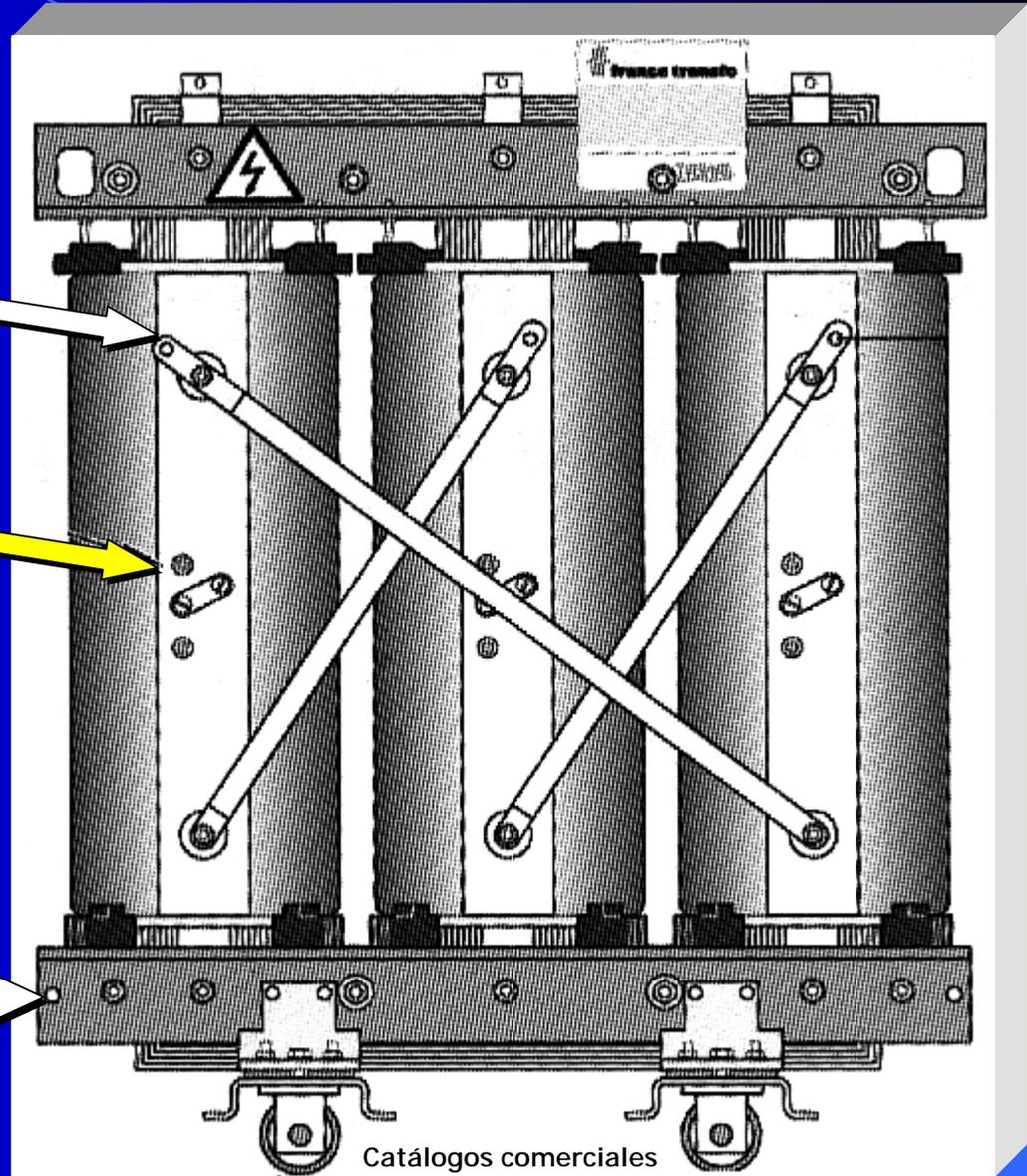
Entre otras aplicaciones se utilizan en las redes de transporte y distribución para mantener la tensión cte. con independencia de la carga

4.24 Trafos con tomas

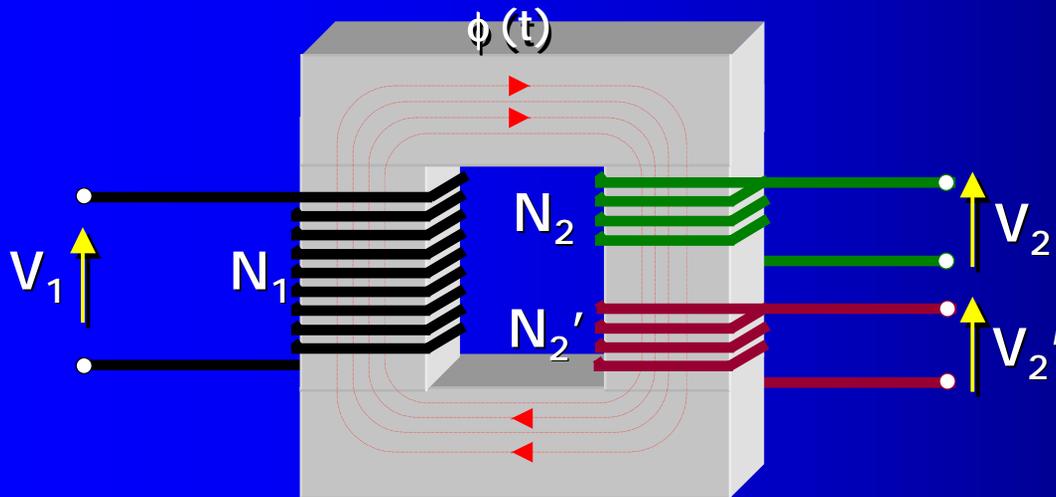
Conexión devanados

Tomas de regulación

Conexión toma de tierra

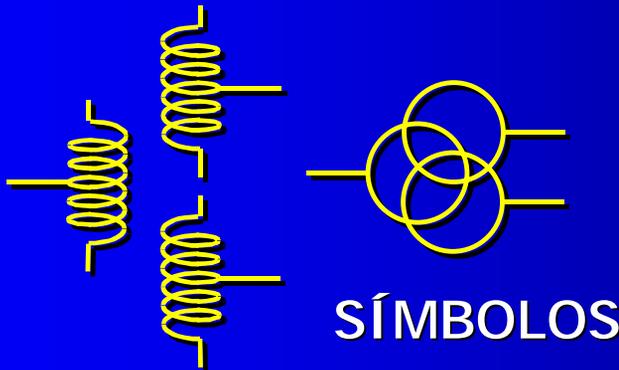


4.24 Transformadores con tres arrollamientos



Son transformadores especiales utilizados en alta potencia. Constan de un primario y dos secundarios

Mediante una sola máquina se obtienen dos niveles de tensión diferentes



4.25 Transformadores de medida y protección I

UTILIDAD

- Aislar los dispositivos de medida y protección de la alta tensión.
- Trabajar con corrientes o tensiones proporcionales a las que son objeto de medida.
- Evitar las perturbaciones que los campos magnéticos pueden producir sobre los instrumentos de medida

El rendimiento no es importante

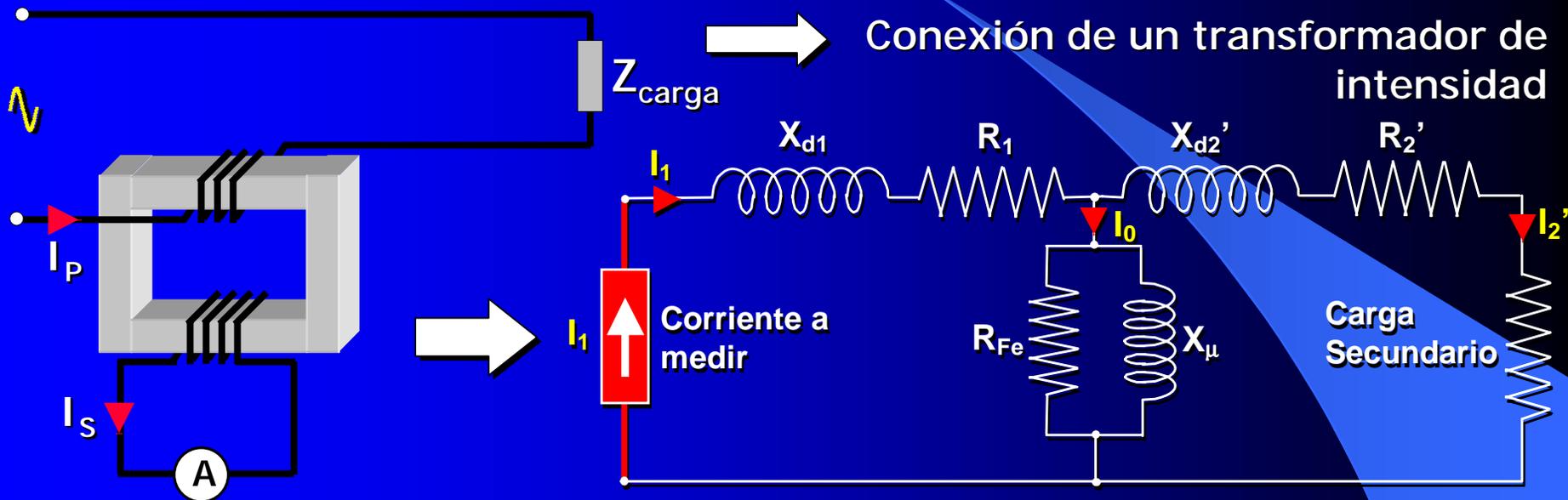
Trabajan con niveles bajos de flujo (zona lineal)

Existen trafos de corriente y de tensión

En todos los casos la r_t es < 1 para mantener los valores bajos en las magnitudes secundarias

Los trafos de corriente tienen las corrientes secundarias normalizadas a: 5 A y 1 A y los de tensión las tensiones secundarias a 100 y 110 V

4.25.1 Transformadores de corriente I



En un trafo de corriente la corriente del primario viene impuesta por la intensidad que se desea medir. El flujo no es cte.

Las impedancias que aparecen como cargas en el secundario tienen que ser muy bajas (suelen ser las de las bobinas amperimétricas)

!!!NUNCA SE PUEDE DEJAR EL SECUNDARIO EN CIRCUITO ABIERTO!!!

4.25.1 Transformadores de corriente II

PRECISIÓN DE LA MEDIDA

- Depende de la linealidad entre el flujo e I_0 . A mayor I_0 mayor error.
- Se utilizan materiales magnéticos de alta permeabilidad.
- Se trabaja con valores bajos de B.
- Se trabaja con valores limitados de la corriente del secundario (Z de carga próxima al cortocircuito) para evitar pérdidas de linealidad

PARÁMETROS DEL TRAFIO DE CORRIENTE

- Tensión de aislamiento: máx. tensión con la que se puede trabajar.
- Relación de transformación: 200/5 A (p ejem).
- Error de Intensidad: diferencia entre la I_2 real y la esperada en función de la corriente I_1 en % ($\varepsilon_i(\%)$).
- Error de fase: diferencia de fases entre I_1 e I_2

$$\varepsilon_i(\%) = \frac{I_2 K_n - I_1}{I_1} \cdot 100$$
$$K_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}$$

4.25.1 Transformadores de corriente III



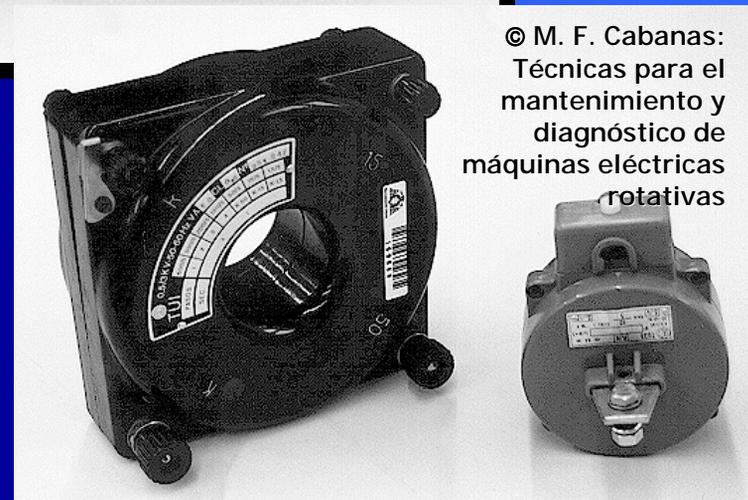
Núcleos magnéticos para transformadores de corriente



Sonda de corriente
1 – 10 –
100 A



Transformador de corriente 1250A



Transformadores de corriente 100 A

4.26 Revisión de los conceptos teóricos sobre los catálogos comerciales de un fabricante

Trihal - Norma UNE 21538-1 y UNE 20178

monotensión primaria aislamiento 17,5 kV⁽¹⁾ - pérdidas CENELEC - Ucc 6%

potencia asignada (kVA) ^{(1) (2)}		100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	
tensión primaria asignada (KV)		15											
nivel de aislamiento asignado (kV)		17,5											
tensión secundaria en vacío (V)		420											
regulación sin tensión		+ 2,5; + 5; + 7,5; + 10 %											
grupo de conexión		Dyn 11											
pérdidas (W)	en vacío	440	610	820	1030	1150	1300	1500	1700	2000	2300	2800	
	debidas a la carga												
	a 75 °C	1700	2400	3100	4000	4300	5200	6400	7500	8700	10200	12200	
	a 120 °C	2000	2700	3500	4600	4900	6000	7300	8600	10000	11700	14000	
tensión de cortocircuito (%)		6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
corriente de vacío (%)		2,5	2,3	2	1,8	1,5	1,5	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	
corriente transitoria de conexión	le/ln valor de cresta	10,5	10,5	10,5	10	10	10	10	10	10	10	10	
	constante de tiempo	0,1	0,13	0,18	0,2	0,25	0,25	0,26	0,3	0,3	0,35	0,4	
caída de tensión a plena carga (%)													
cos φ = 1	a 75 °C	1,87	1,67	1,41	0,18	1,25	1,21	1,19	1,11	1,05	0,99	0,94	
	a 120 °C	2,16	1,85	1,57	1,63	1,40	1,37	1,33	1,25	1,18	1,11	1,05	
cos φ = 0,8	a 75 °C	4,88	4,76	4,59	3,72	4,48	4,46	4,45	4,39	4,35	4,31	4,27	
	a 120 °C	5,05	4,87	4,69	4,73	4,58	4,57	4,54	4,48	4,44	4,39	4,35	
rendimiento (%)													
carga 100%	cos φ = 1	a 75 °C	97,90	98,15	98,46	98,43	98,66	98,72	98,76	98,86	98,94	99,01	99,07
		a 120 °C	97,62	97,97	98,30	98,24	98,51	98,56	98,62	98,73	98,81	98,89	98,96
	cos φ = 0,80	a 75 °C	97,39	97,70	98,08	98,04	98,33	98,40	98,46	98,58	98,68	98,77	98,84
		a 120 °C	97,04	97,48	97,89	97,81	98,14	98,21	98,28	98,42	98,52	98,62	98,70
carga 75%	cos φ = 1	a 75 °C	98,17	98,39	98,65	98,63	98,82	98,89	98,93	99,02	99,09	99,15	99,20
		a 120 °C	97,96	98,26	98,53	98,49	98,71	98,77	98,83	98,92	98,99	99,06	99,12
	cos φ = 0,80	a 75 °C	97,73	98,00	98,32	98,29	98,53	98,61	98,67	98,78	98,86	98,94	99,00
		a 120 °C	97,46	97,83	98,17	98,12	98,40	98,47	98,54	98,66	98,75	98,83	98,90
ruido ⁽³⁾	potencia acústica Lwa	59	62	65	67	68	69	70	72	73	75	76	
	dB (A) presión acústica Lpa a 1 metro	48	51	53	55	56	57	57	59	60	61	62	