

## T04: Transformadores de potencia

### Máquinas y Accionamientos Eléctricos (3M4)

Departamento de Ingeniería Eléctrica – Facultad de Ingeniería –  
UNMdP

(Cursada 2019)



“Aparato estático de inducción electromagnética, que convierte un sistema primario de corriente alterna en otro sistema de intensidad y tensión generalmente diferentes”





“Aparato estático de inducción electromagnética, que convierte un sistema primario de corriente alterna en otro sistema de intensidad y tensión generalmente diferentes”



Transformador **Monofásico**



Transformador **Trifásico**

# TRANSFORMADORES

*El transformador monofásico es ante todo una máquina estática, únicamente para corriente alternada y que se utiliza para transformar una red de alternada en otra red de alternada, por lo regular con cambio de tensión y corriente.*

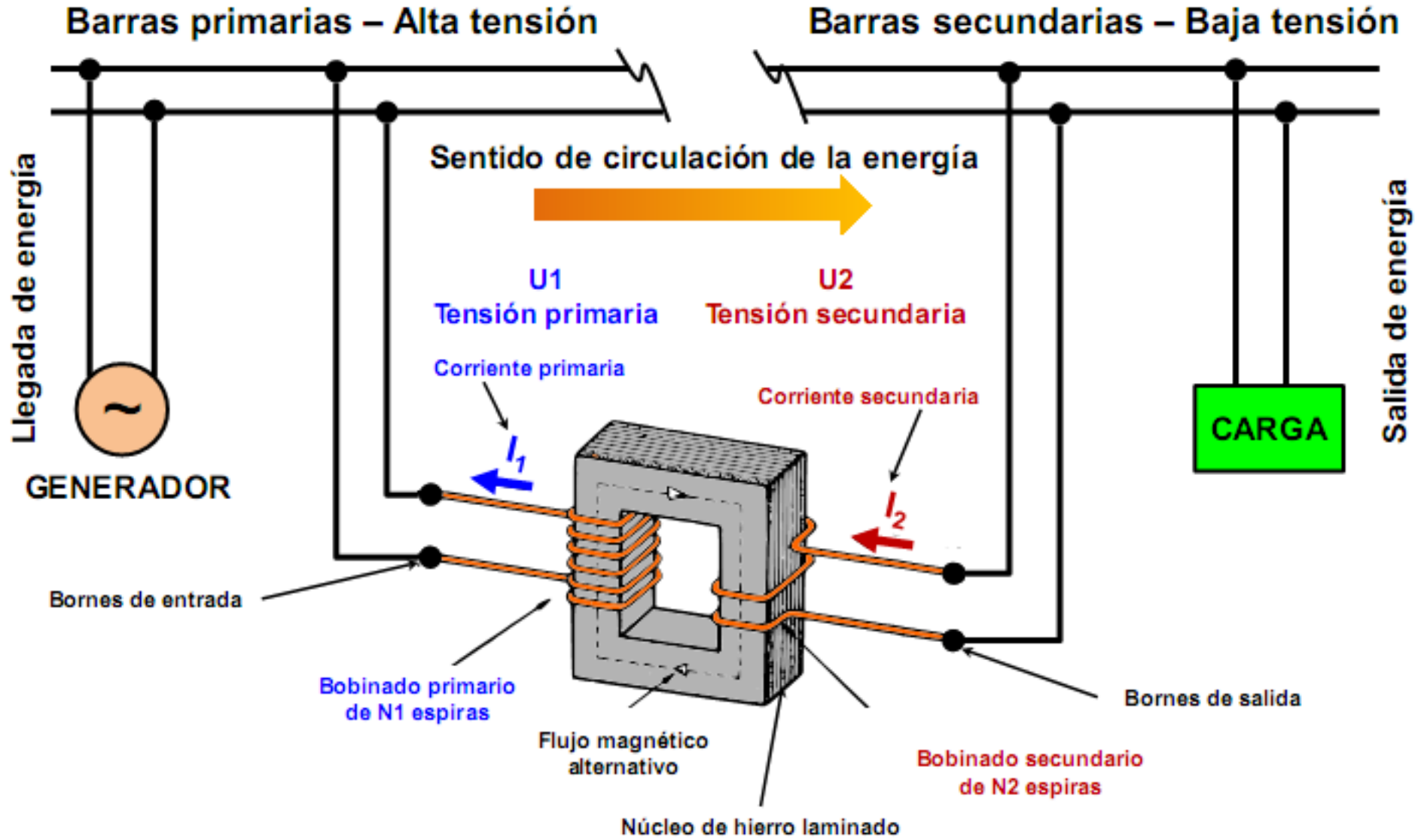
*En su forma mas simple, consiste en dos devanados aislados entre si, dispuestos de tal manera que una corriente en uno de ellos establecerá un flujo magnético que la enlace mas o menos totalmente con las espiras del otro.*

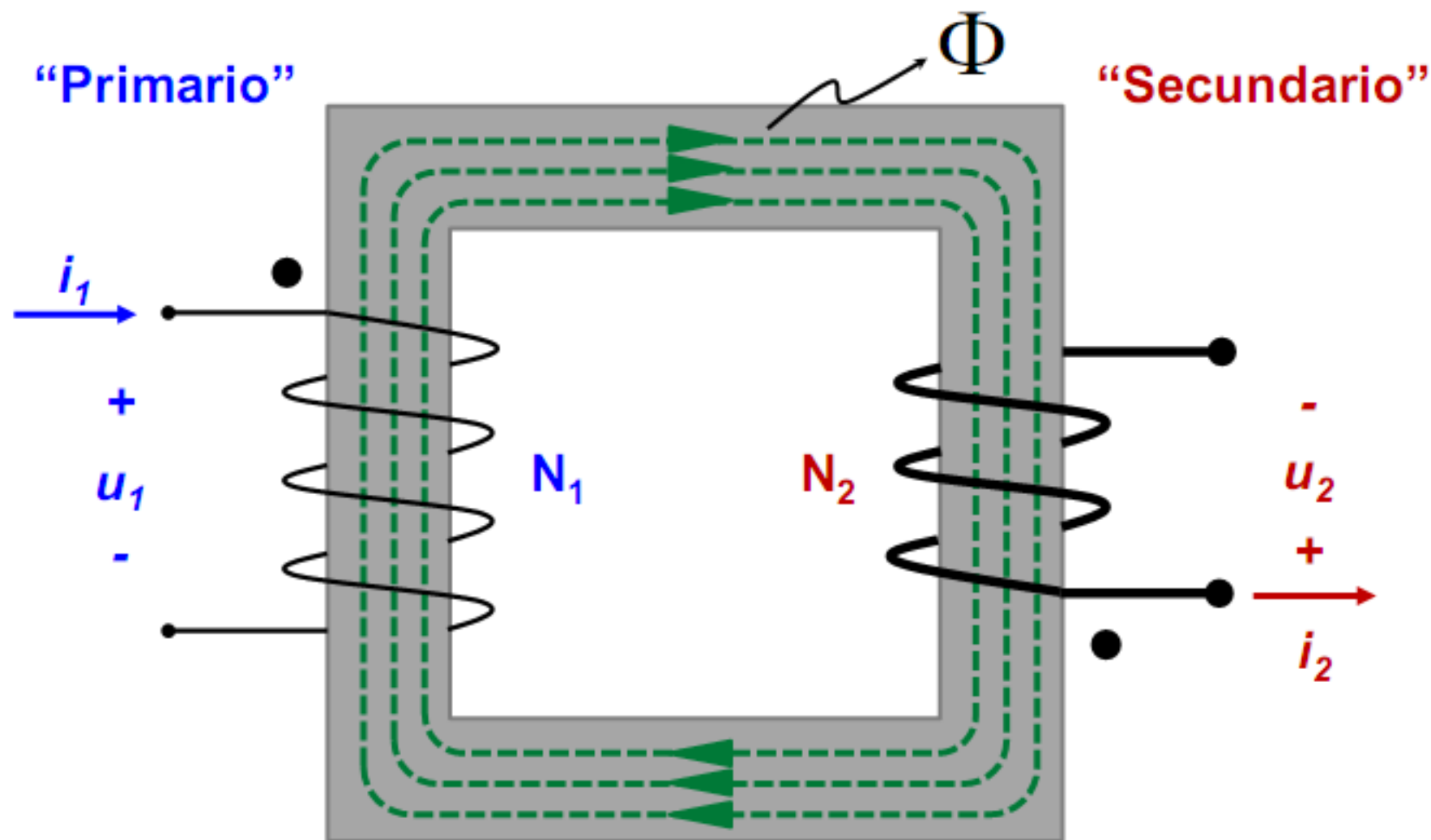
*A un circuito se lo denomina primario, siendo aquel que recibe la energía eléctrica. Al otro circuito se lo denomina secundario.*

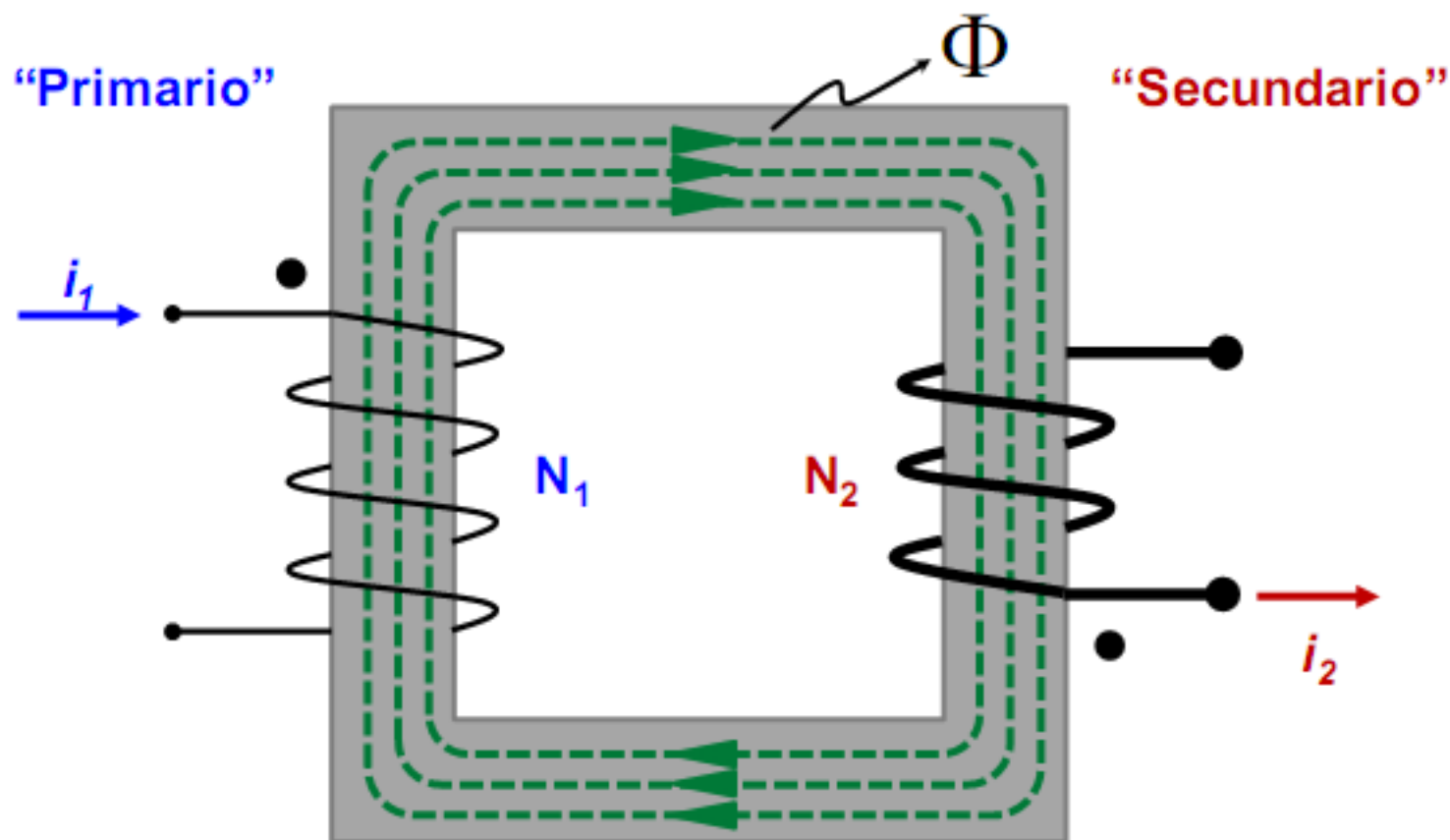


# Transformadores

## Definición

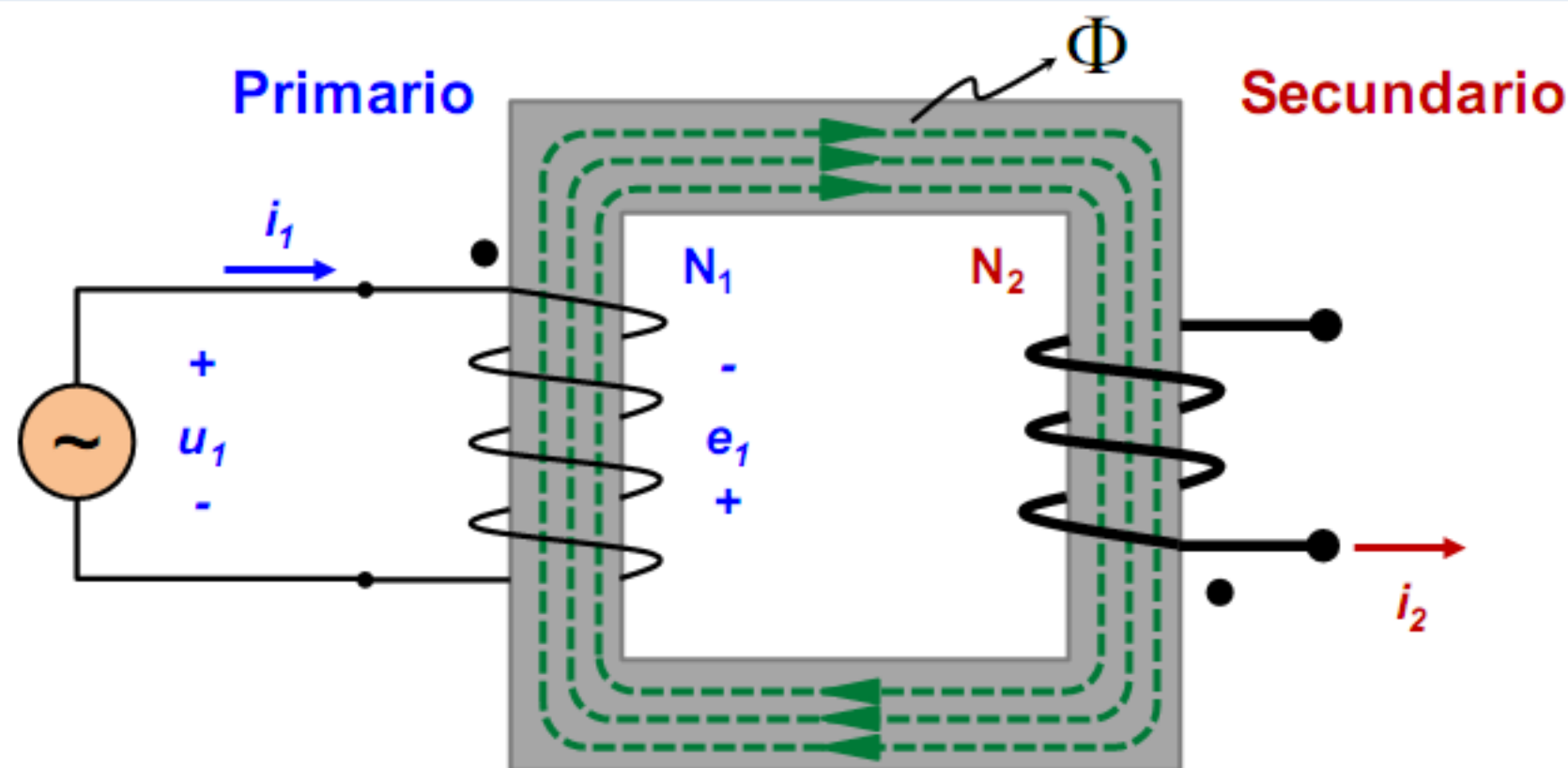






### Bornes homólogos (punto):

- Bornes que tienen igual polaridad instantánea.
- Bornes por los que hay que introducir corriente para obtener flujo aditivos.



## Ley Faraday

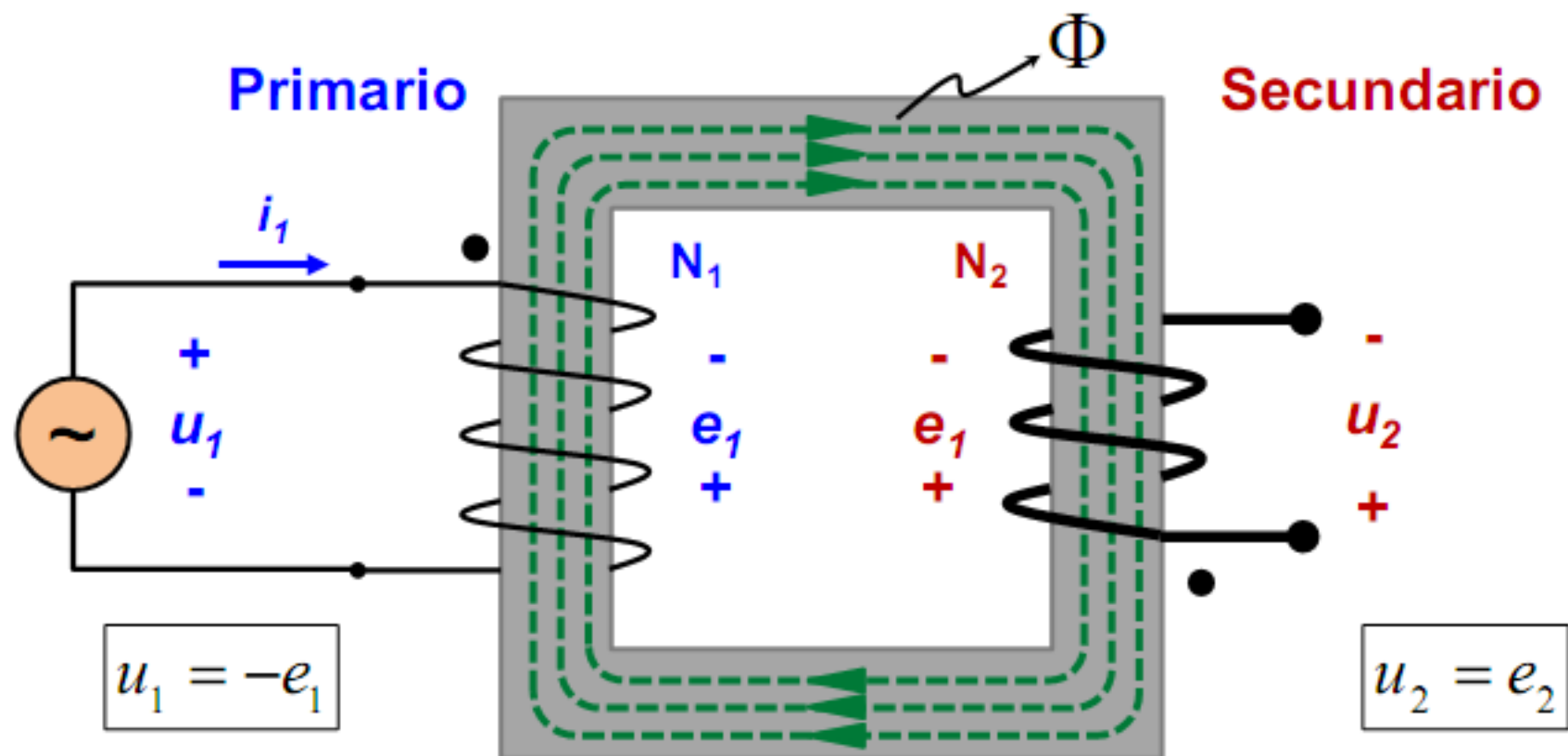
f.e.m.  $\leftarrow e = -N \frac{d\Phi}{dt} \rightarrow$  Variación del flujo magnético

Ley de Lenz  $\leftarrow$   $\leftarrow$  Número de espiras

## Ley de Ampère

$$\sum_{i=1}^n N_i i_i = 0$$





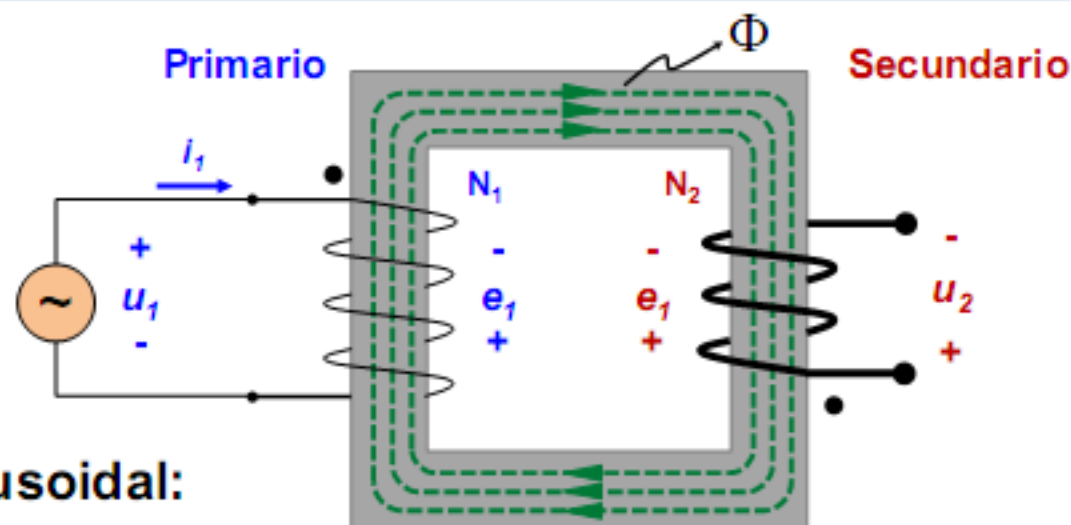
Al aplicar una tensión  $u_1$  al primario:

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}$$



$$\begin{cases} u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}$$



Si se alimenta con tensión sinusoidal:

$$i_1 = I_1 \text{sen} \omega t \quad \longrightarrow \quad \Phi = \Phi_m \text{sen} \omega t$$

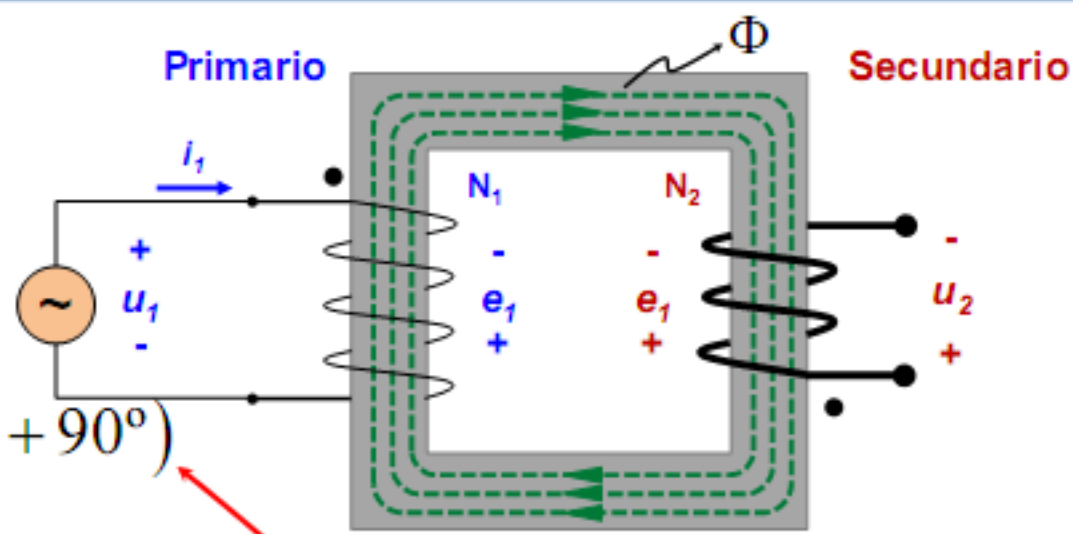
Luego:

$$\begin{cases} e_1 = N_1 \frac{d}{dt} (\Phi_m \text{sen} \omega t) = \omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \text{sen} (\omega t + 90^\circ) \\ e_2 = N_2 \frac{d}{dt} (\Phi_m \text{sen} \omega t) = \omega N_2 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_2 \Phi_m \text{sen} (\omega t + 90^\circ) \end{cases}$$



$$\begin{cases} u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_1 = -e_1 = -\omega N_1 \Phi_m \text{sen}(\omega t + 90^\circ) \\ u_2 = e_2 = -\omega N_2 \Phi_m \text{sen}(\omega t + 90^\circ) \end{cases}$$



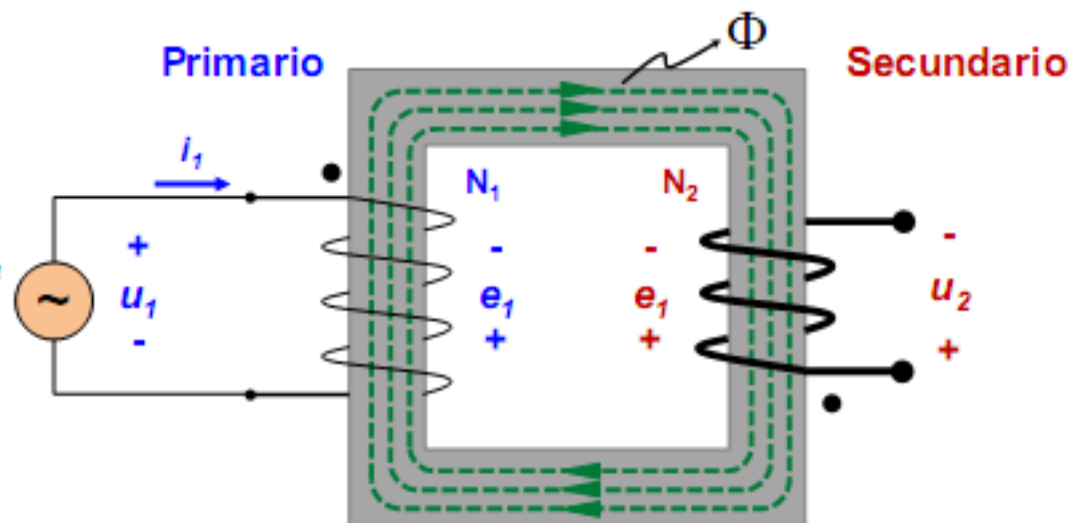
Las f.e.m.s atrasan 90°  
respecto del flujo

**En valores eficaces (valor absoluto):**

$$\begin{cases} U_1 = E_1 = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \Phi_m \\ U_2 = E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_2 \Phi_m \end{cases}$$



$$\begin{cases} U_1 = E_1 = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \Phi_m \\ U_2 = E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_2 \Phi_m \end{cases}$$



Dividiendo:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

**Relación de espiras o de transformación**

$k > 1$  → Transformador **reductor** de tensión →  $U_1 > U_2$

$k < 1$  → Transformador **elevador** de tensión →  $U_1 < U_2$

$k = 1$  →  $U_1 = U_2$  → ¿Qué usos puede tener?

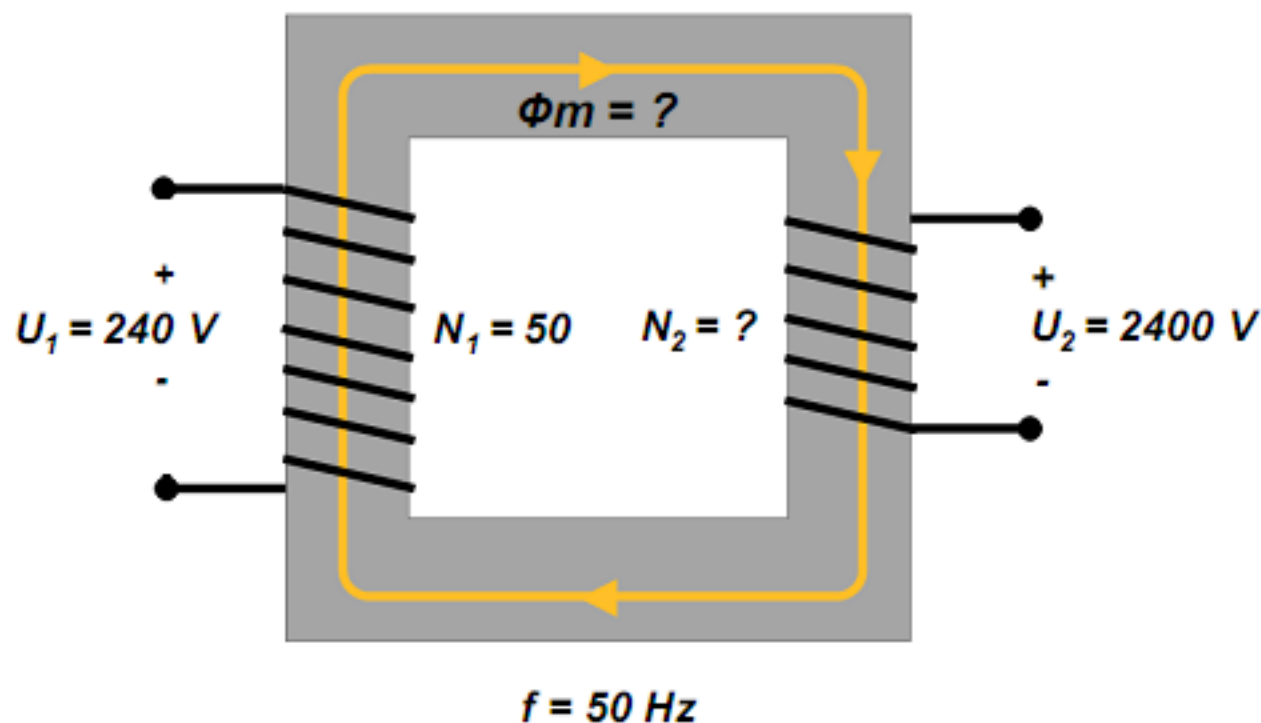


# Principio de funcionamiento – Trafo ideal

## Ejercicio:

Considerando el transformador ideal de la figura, calcular:

- El número de espiras del bobinado secundario,  $N_2$
- A amplitud del  $\Phi_m$



# Transformador ideal – en vacío

Avanzando un poco, anulamos la consideración:

4. No se requiere fuerza magneto motriz para crear el flujo  $\mathfrak{R} \neq \infty$

Será necesario una “**corriente magnetizante**” para generar el flujo del transformador.

$$\bar{\Phi} = \kappa \bar{I}_{\mu}$$

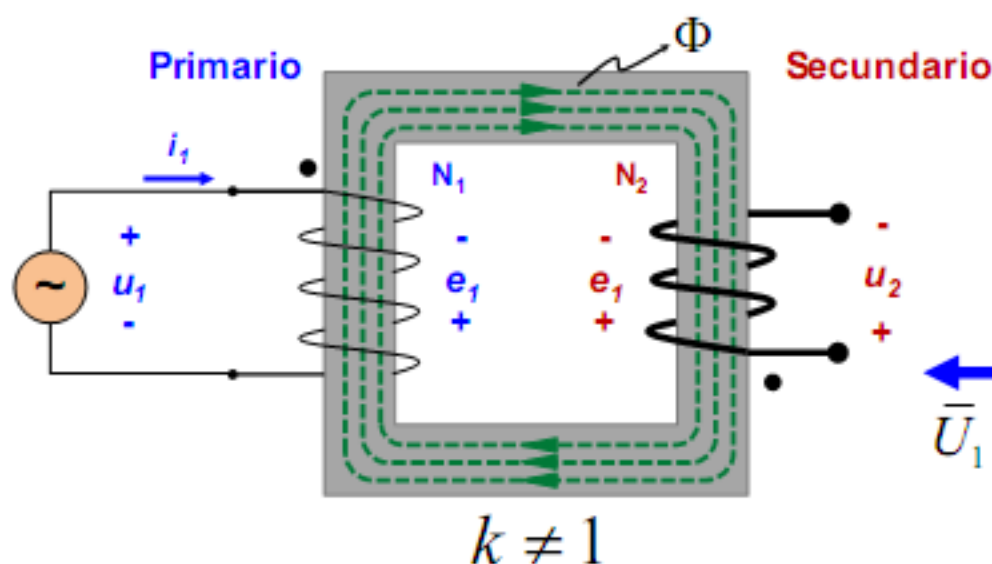
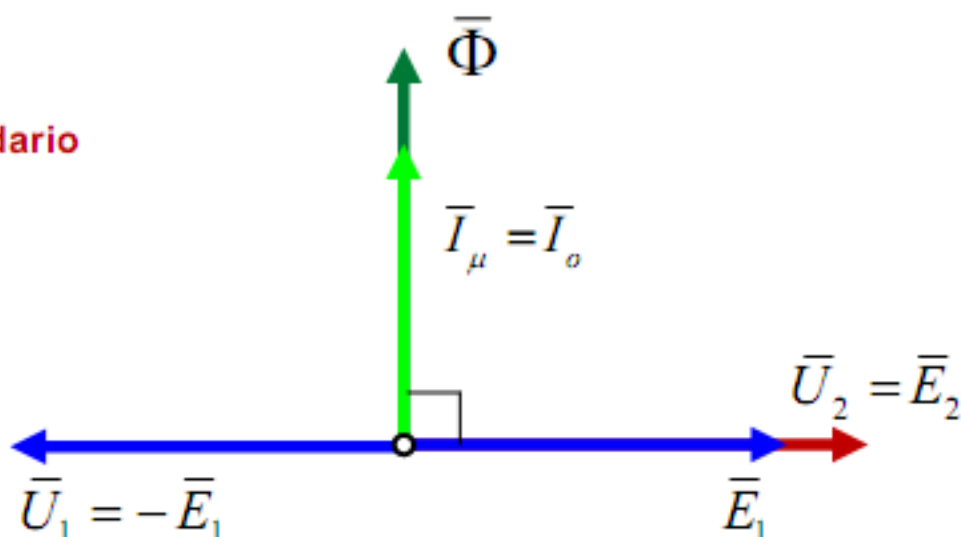
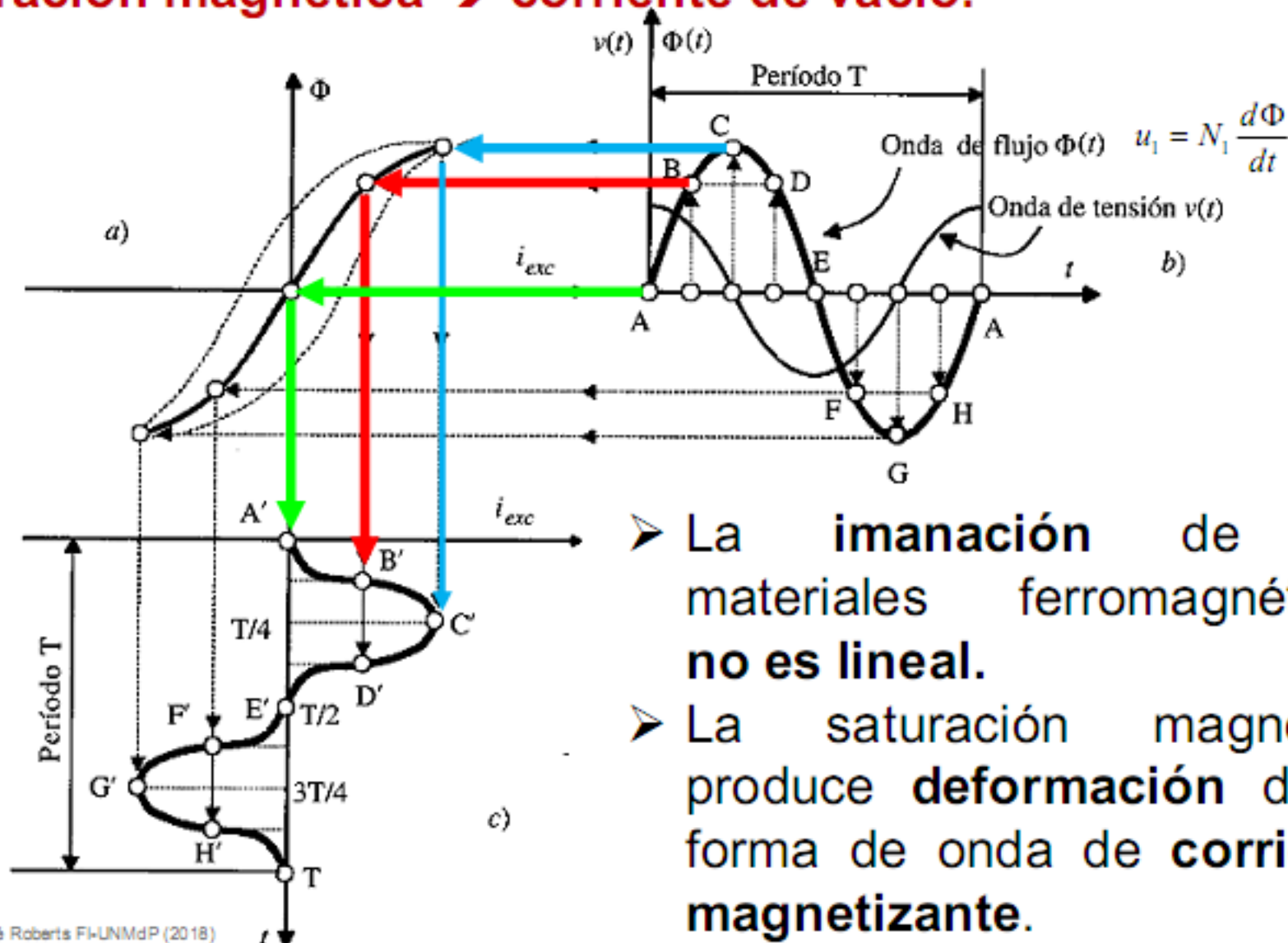


Diagrama fasorial en vacío



# Transformador ideal – en vacío

Saturación magnética → corriente de vacío:





## Transformador ideal – en vacío

### Curva de Saturación de vacío

#### Región lineal

- Incrementando la tensión primaria → flujo magnético se incrementa proporcionalmente → corriente de excitación se incrementa también en forma proporcional.

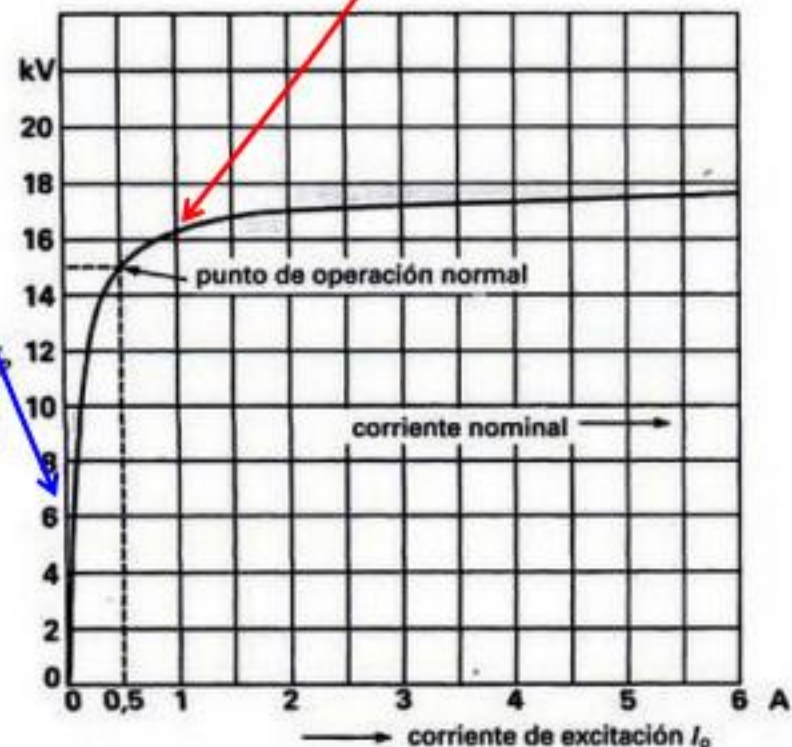
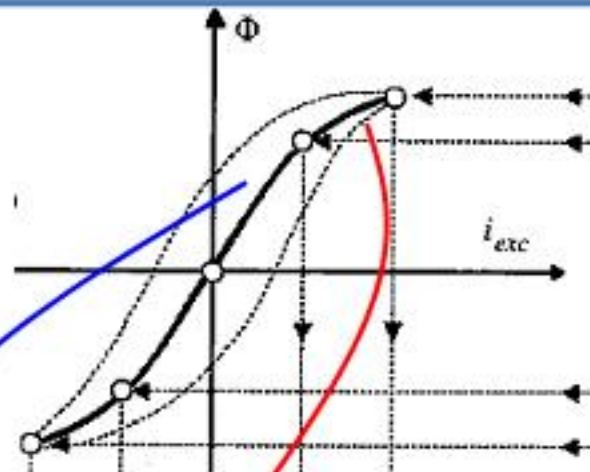
$$U_1 = E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_m$$

$$\bar{\Phi} = \kappa \bar{I}_\mu \quad \kappa = cte.$$

#### Región NO lineal (saturación)

- Ante un pequeño incremento de la tensión primaria → para producir el flujo requerido → la corriente aumenta fuertemente.

$$\kappa \neq cte.$$



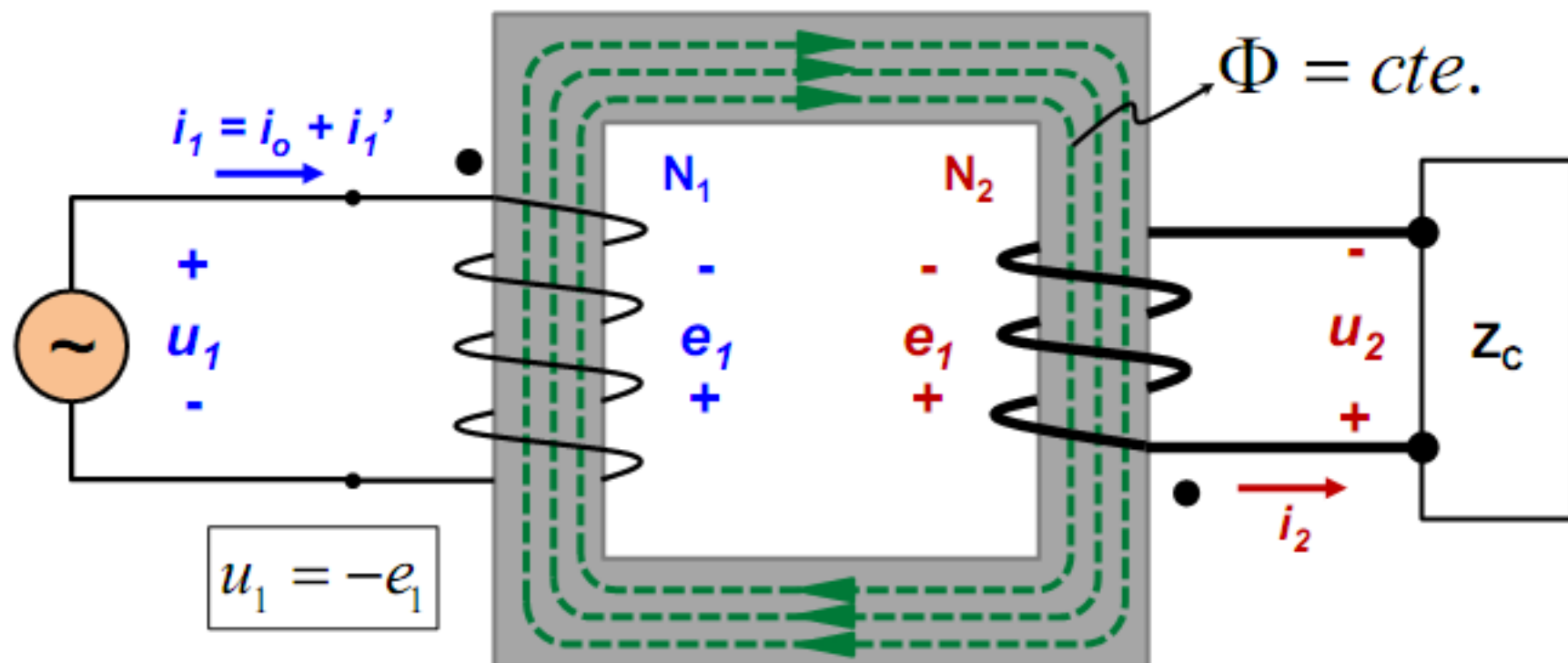


# Transformador ideal – en carga

En presencia de una  $Z_C \rightarrow$  corriente  $i_2$  circula por el secundario

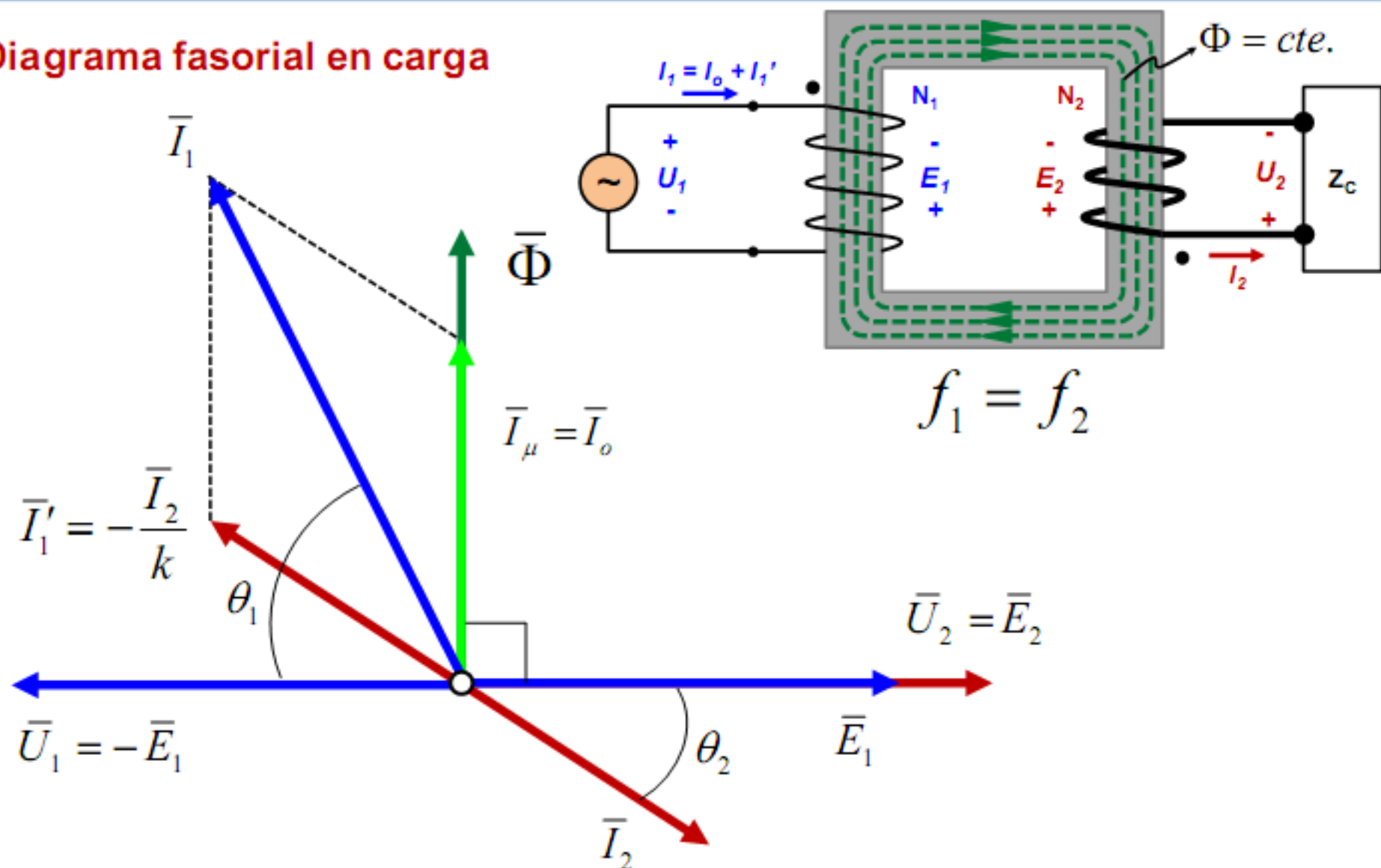
$i_2$  genera un flujo que se opone al  $\Phi$  existente

Mantener el flujo  $\Phi = cte \rightarrow$  corriente adicional  $i_1'$  en el primario para neutralizar  $i_2$



# Transformador ideal – en carga

## Diagrama fasorial en carga




Vimos que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

Dividiendo la primera por la segunda:

$$\frac{U_1/U_2}{I_1/I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = k^2 \Rightarrow \frac{U_1/I_1}{U_2/I_2} = k^2 \Rightarrow \frac{Z_{21}}{Z_c} = k^2$$

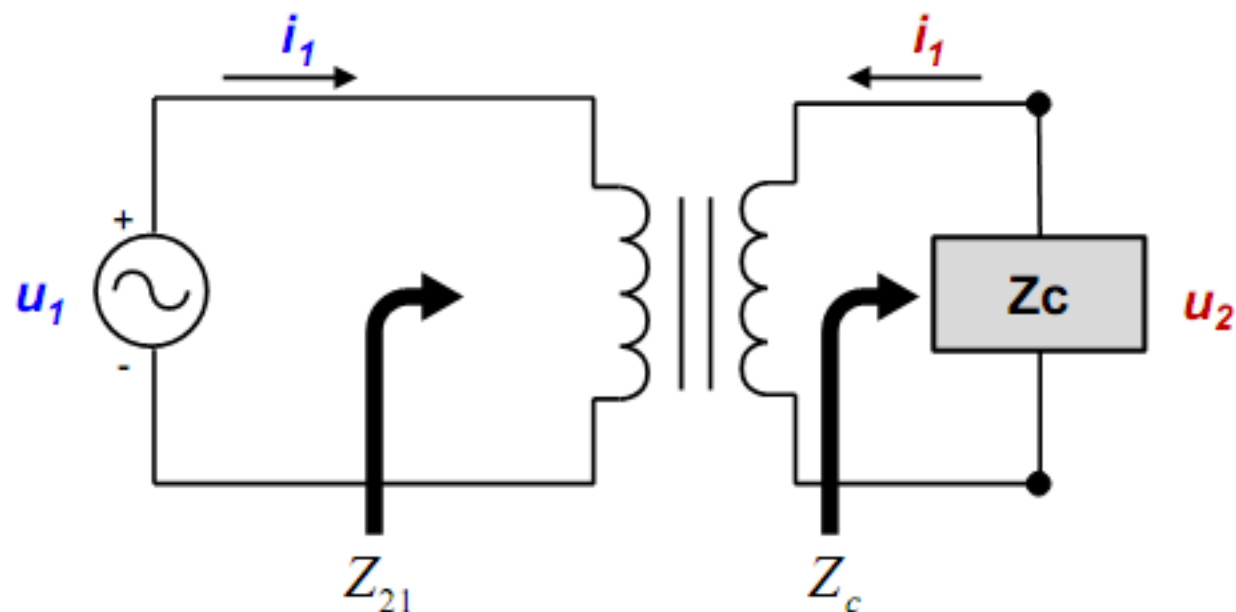
Impedancia de carga 

Finalmente:

$$Z_{21} = k^2 Z_c$$

Impedancia del secundario  
“referida” al primario

Impedancia del secundario referida al primario:



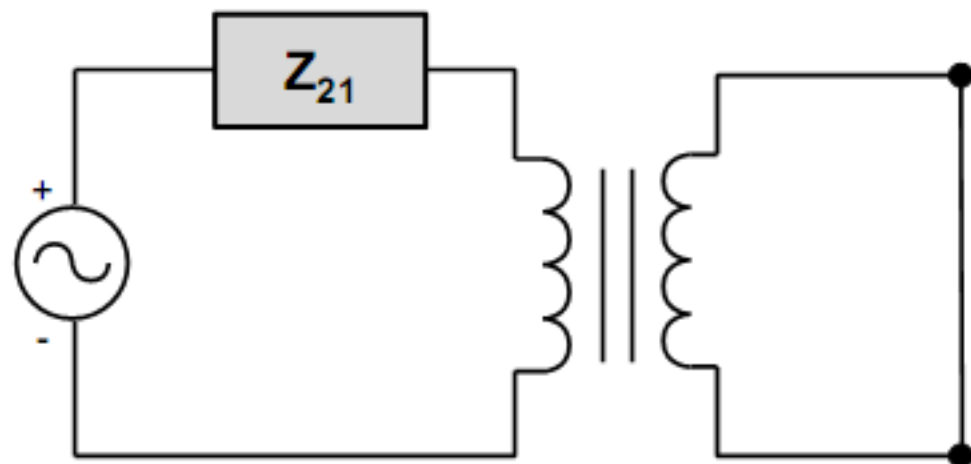
$$Z_{21} = \frac{U_1}{I_1}$$

$$Z_c = \frac{U_2}{I_2}$$

$$Z_{21} = k^2 Z_c$$

- La impedancia “vista” por la fuente en el lado primario corresponde a la impedancia del secundario (la de la carga), multiplicada por el cuadrado de la relación de transformación.
- Se dice que esta impedancia vista en el primario es la **impedancia del secundario referida (o reflejada) en el lado primario**.

Impedancia del secundario referida al primario:



$$Z_{21} = k^2 Z_c$$

$k > 1 \rightarrow Z_c$  “parece” mayor  
 $k < 1 \rightarrow Z_c$  “parece” menor

- La impedancia “vista” por la fuente en el lado primario corresponde a la impedancia del secundario (la de la carga), multiplicada por el cuadrado de la relación de transformación.
- Se dice que esta impedancia vista en el primario es la **impedancia del secundario referida (o reflejada) en el lado primario**.



# Transformador ideal

**Resumiendo, para un transformador ideal:**

- Las **tensiones** son transformadas en relación **directa** al número de espiras ►

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

- Las **corrientes** son transformadas en relación **inversa** al número de espiras ►

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

- Las **impedancias** son **referidas al primario en relación directa al cuadrado** número de espiras ►

$$Z_{21} = k^2 Z_c$$

- La potencia?**



# Transformador ideal - Potencia

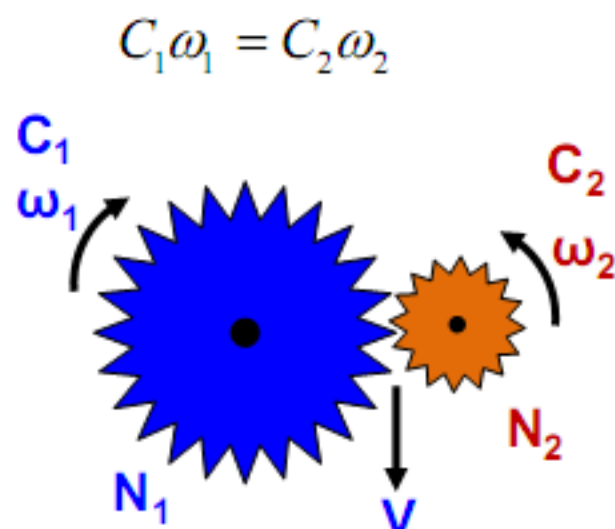
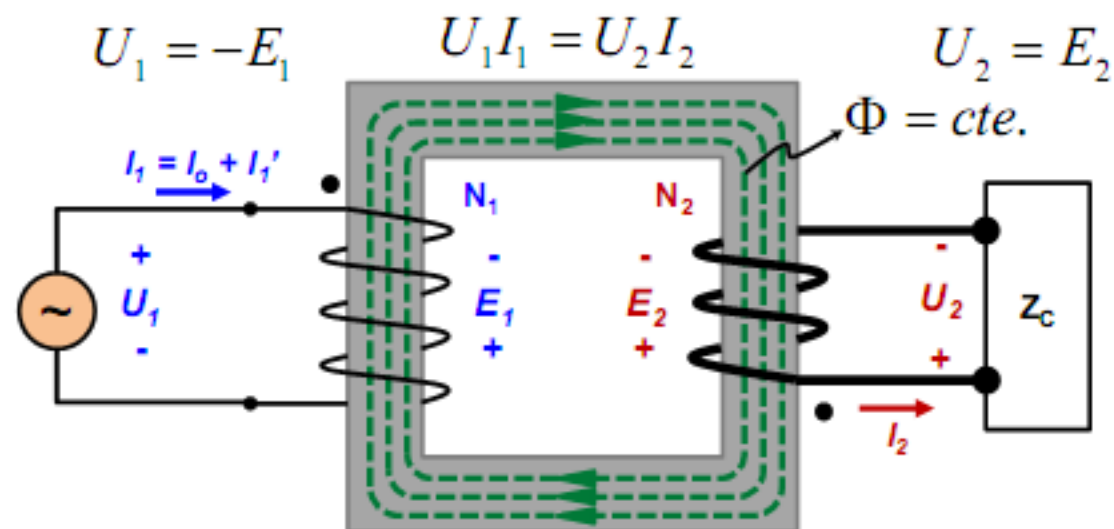
Siendo:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \Rightarrow U_1 = kU_2 \\ \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \Rightarrow I_1 = \frac{I_2}{k} \end{aligned} \right\} S_1 = U_1 I_1 = (kU_2) \left( \frac{I_2}{k} \right) = U_2 I_2 = S_2$$

Así, en un transformador ideal, la potencia transferida es cte.

$$S_{\text{primario}} = S_{\text{secundario}}$$

# Transformador ideal - Analogía



## Transformador ideal

Espiras primarias  $N_1$ Espiras secundarias  $N_2$ Relación de transformación  $k = N_1/N_2$ Tensión primaria  $U_1$ Tensión secundaria  $U_2$ Corriente primaria  $I_1$ Corriente secundaria  $I_2$ Potencia aparente  $S = U_1 I_1 = I_2 U_2$ Flujo común  $\Phi$ 

Indicadores de polaridad primaria secundaria

## Engranajes

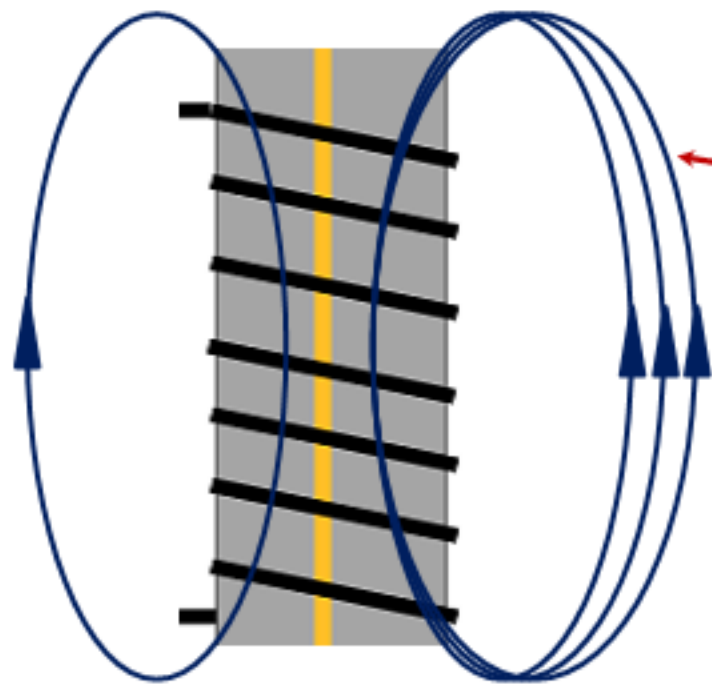
Dientes rueda primaria  $N_1$ Dientes rueda secundaria  $N_2$ Relación de dientes  $k = N_1/N_2$ Par de entrada  $C_1$ Par de salida  $C_2$ Velocidad de giro de entrada  $\omega_1$ Velocidad de giro de salida  $\omega_2$ Potencia  $P = C_1 \omega_1 = C_2 \omega_2$ Velocidad tangencial común  $V$ 

Flecha indicadoras de giro

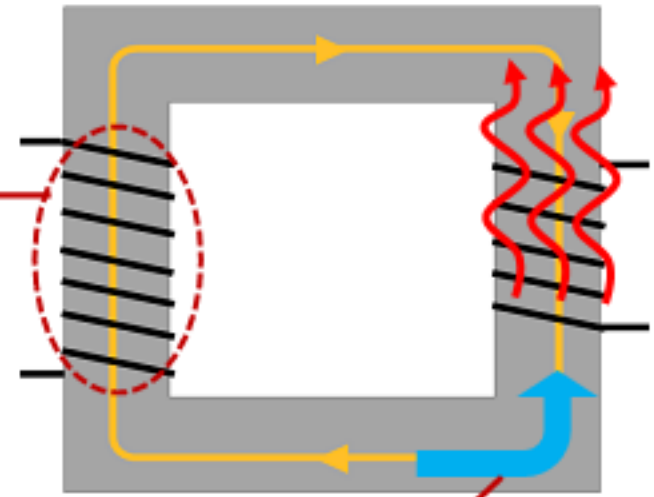




# Transformador real - Pérdidas



Flujo de dispersión



Efecto Joule

$$P_{Cu}$$

$$i^2 R_{1,2}$$

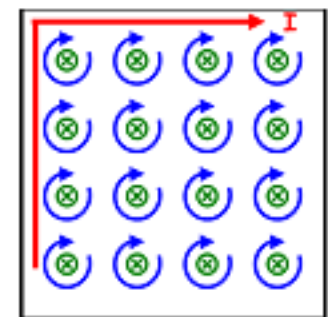
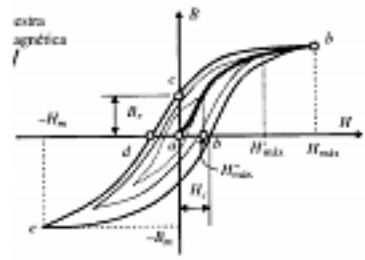
Pérdidas en el hierro

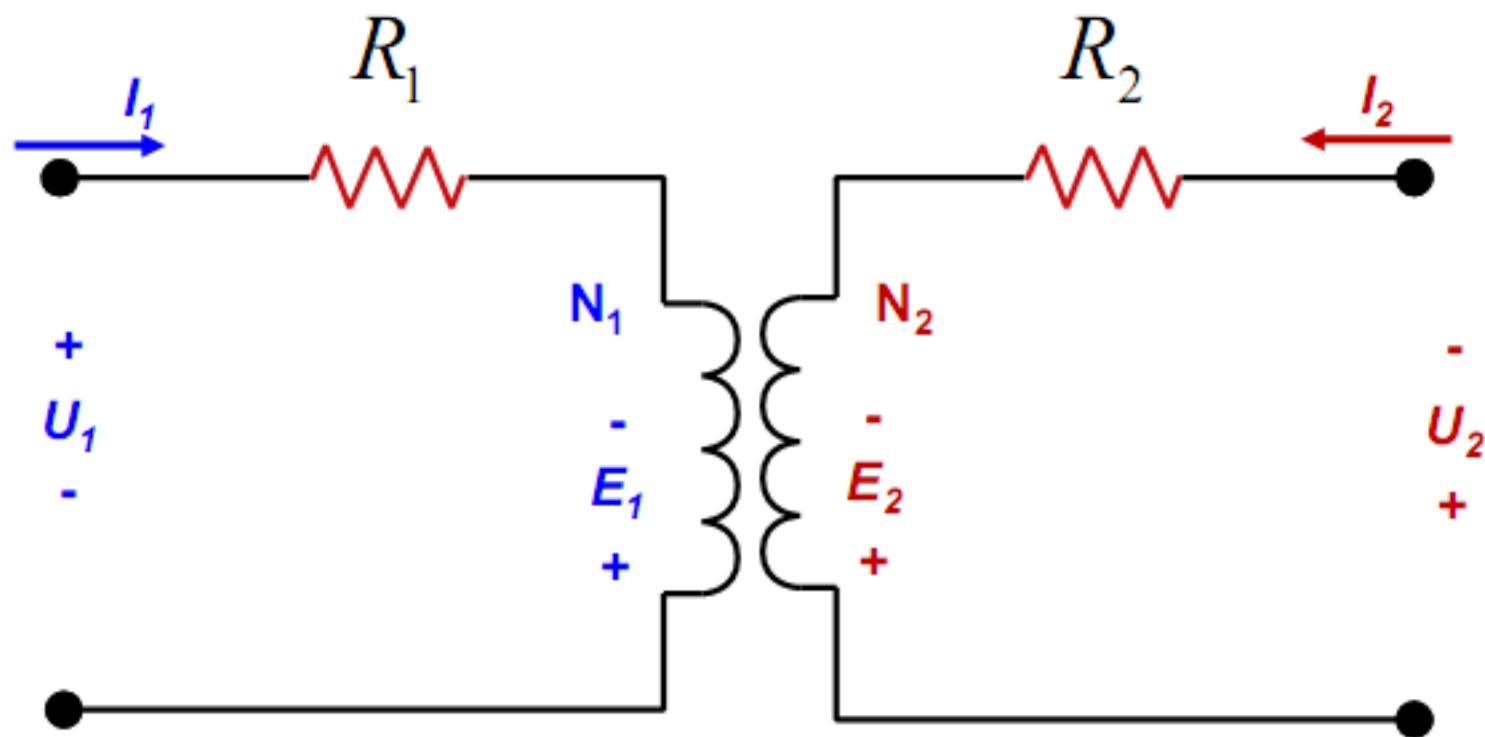
$$P_{Fe}$$

Histéresis

Corrientes Foucault

Adicionales



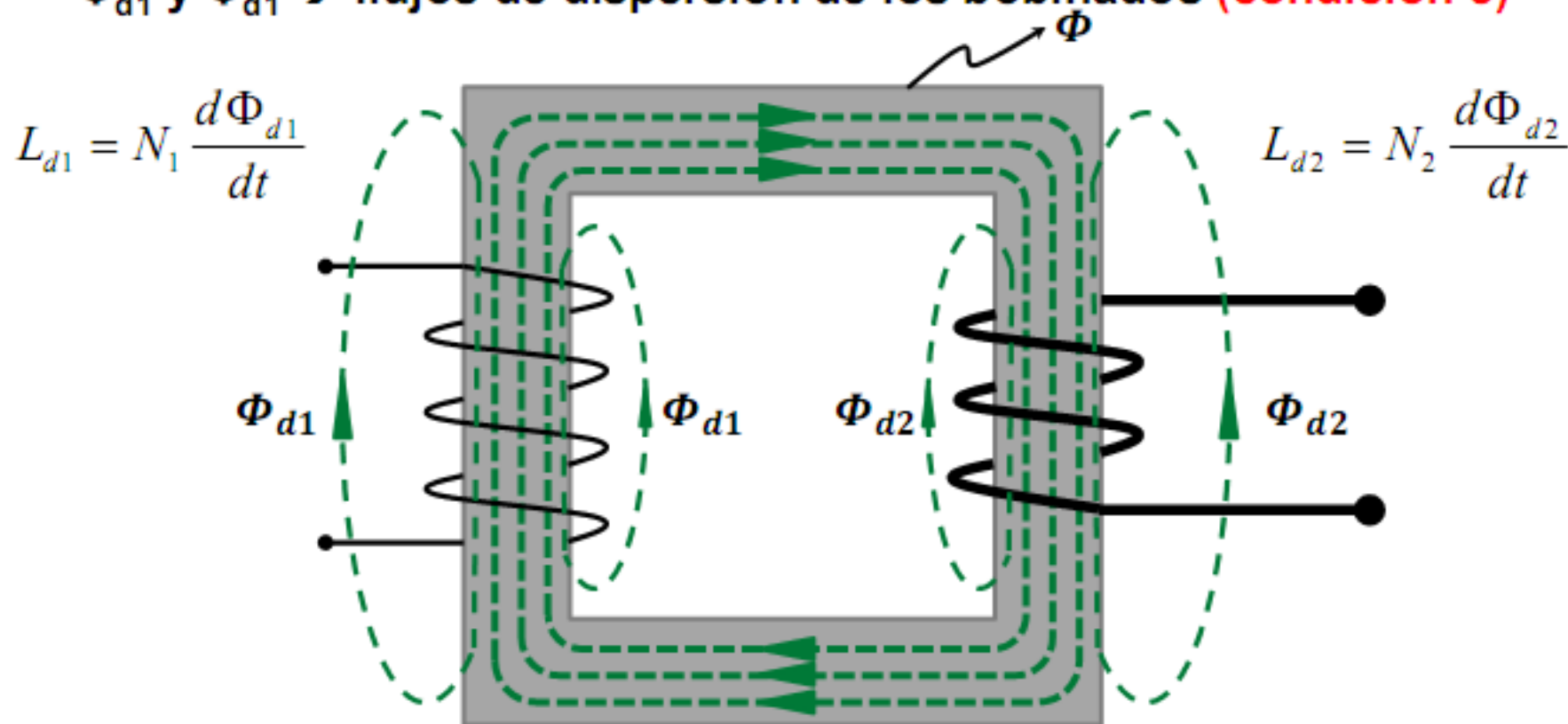
Pérdidas por efecto Joule en las bobinas -  $P_{Cu}$ 

$R_1$  y  $R_2 \rightarrow$  Resistencias de los bobinados  
(condición 1)



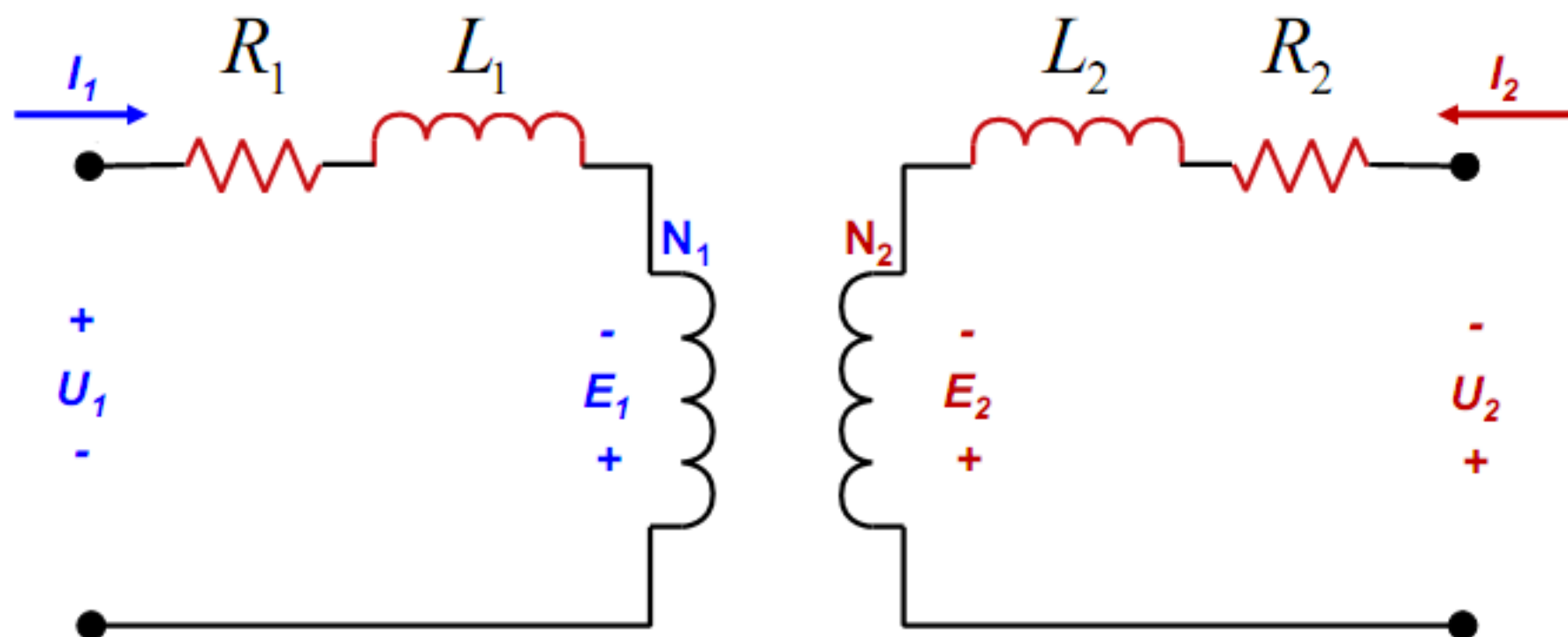
## Pérdidas por dispersión magnética

$\Phi_{d1}$  y  $\Phi_{d2}$  → flujos de dispersión de los bobinados (condición 3)



$\Phi_{d1}$  y  $\Phi_{d2}$  → generan caídas de tensión en los propios bobinados que las los generan → necesaria tensión igual y opuesta para compensarlas

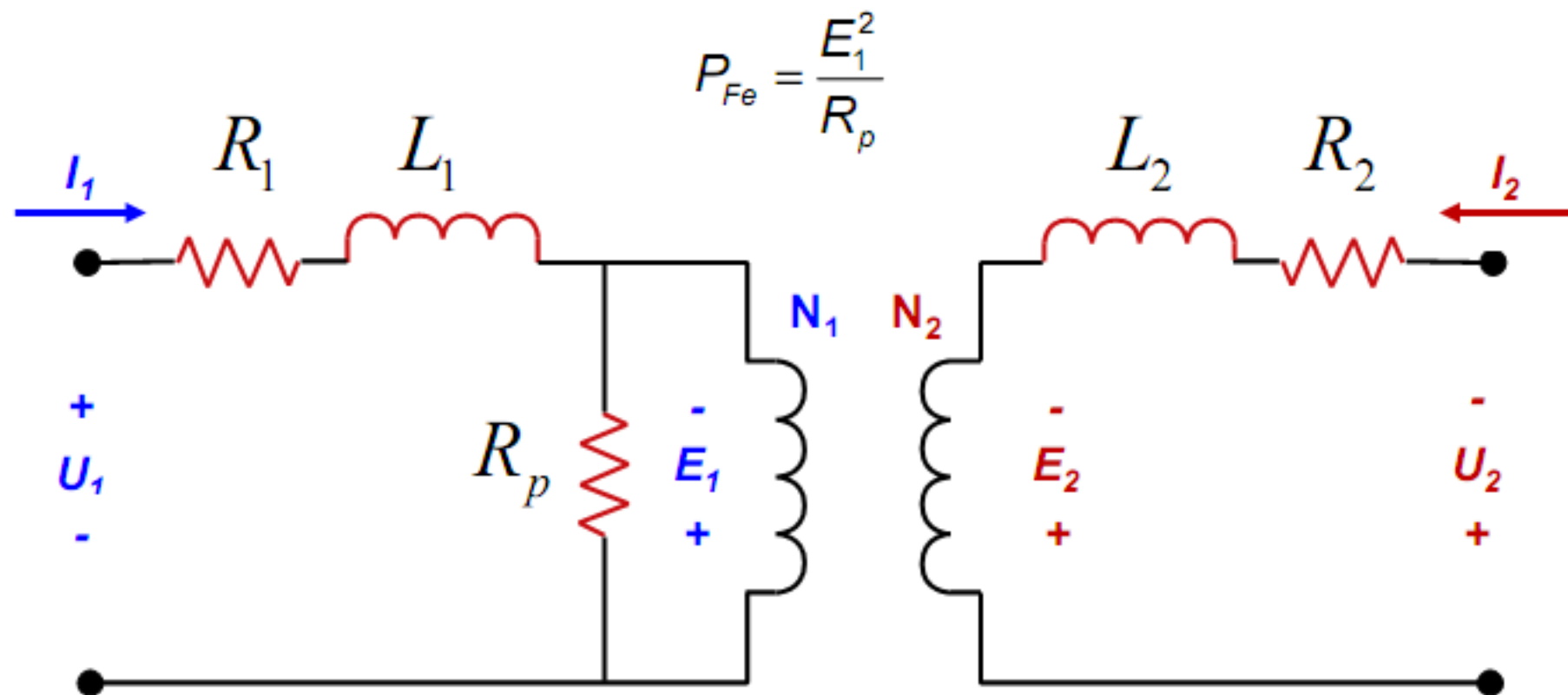
## Pérdidas por dispersión magnética



$L_1$  y  $L_2 \rightarrow$  Reactancias de dispersión de los bobinados  
(condición 3)

Pérdidas en el hierro (Foucault + Histéresis) -  $P_{Fe}$ 

$R_p \rightarrow$  representa las pérdidas en hierro, proporcionales a  $E_1$   
(condición 2)



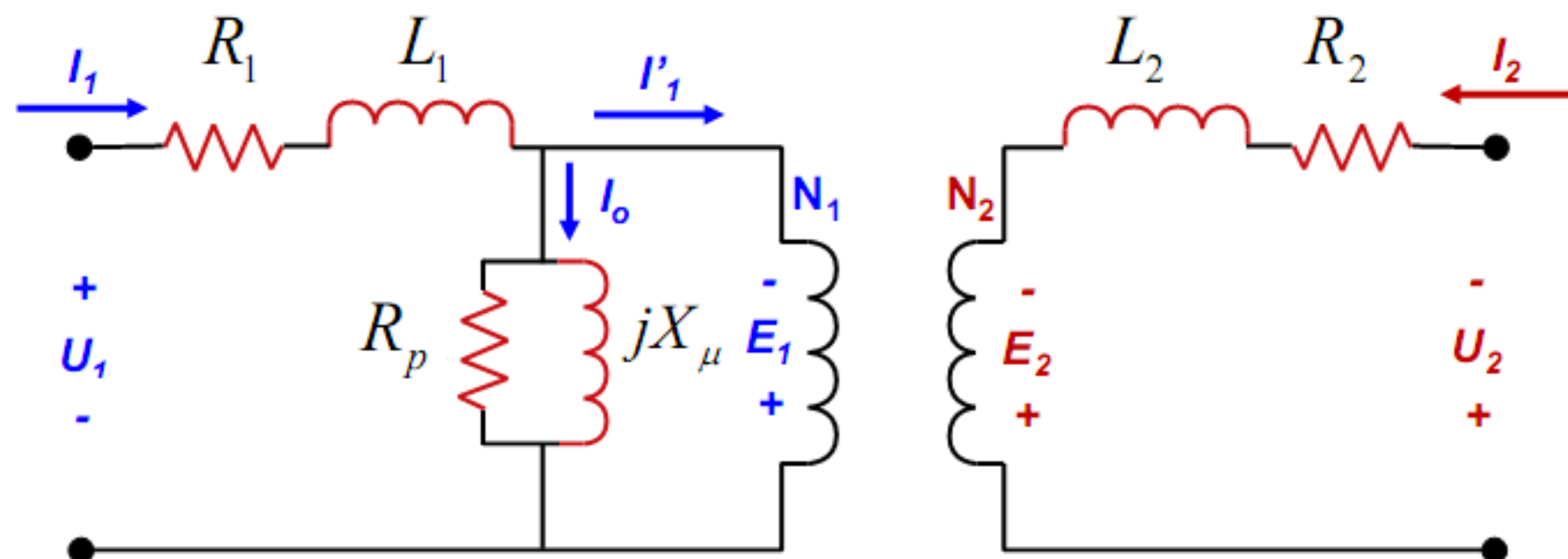


## Pérdidas por permeabilidad finita del núcleo

$X_\mu \rightarrow$  necesidad de corriente en el bobinado primario para tener un flujo magnético en el núcleo  $\rightarrow$  reactancia inductiva (condición 4)

$$I_1 = I'_1 \rightarrow \text{Ideal}$$

$$I_1 = I'_1 + I_o \rightarrow \text{Real}$$



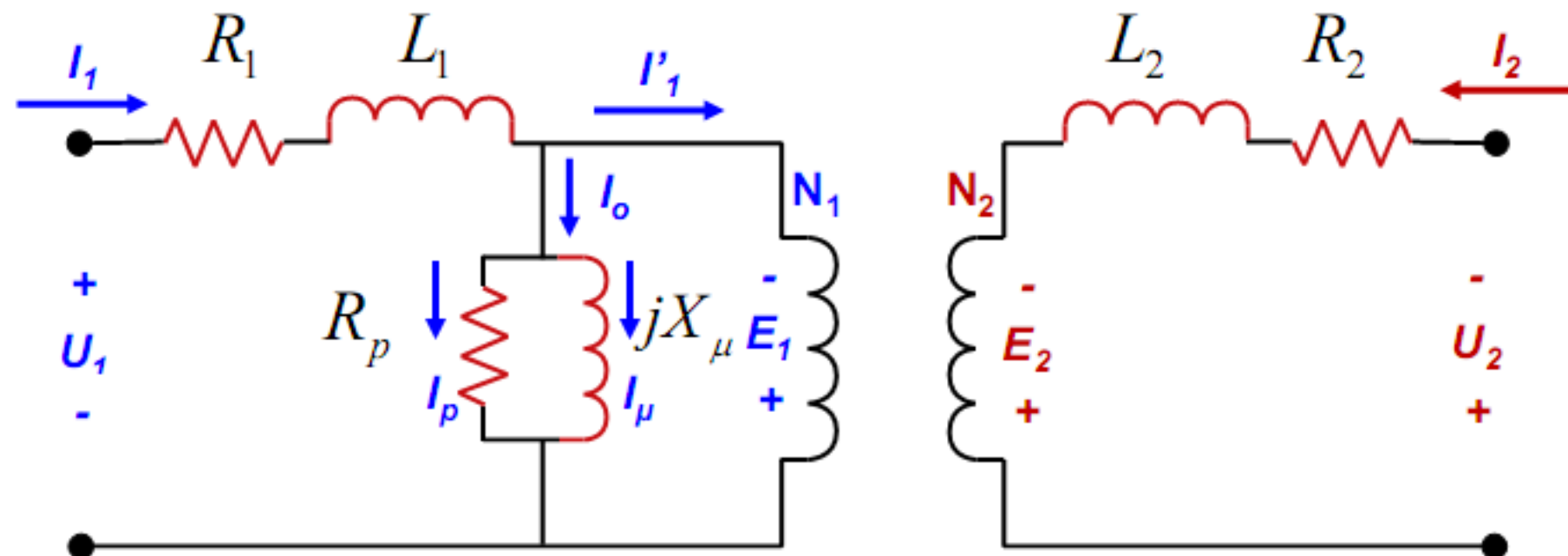


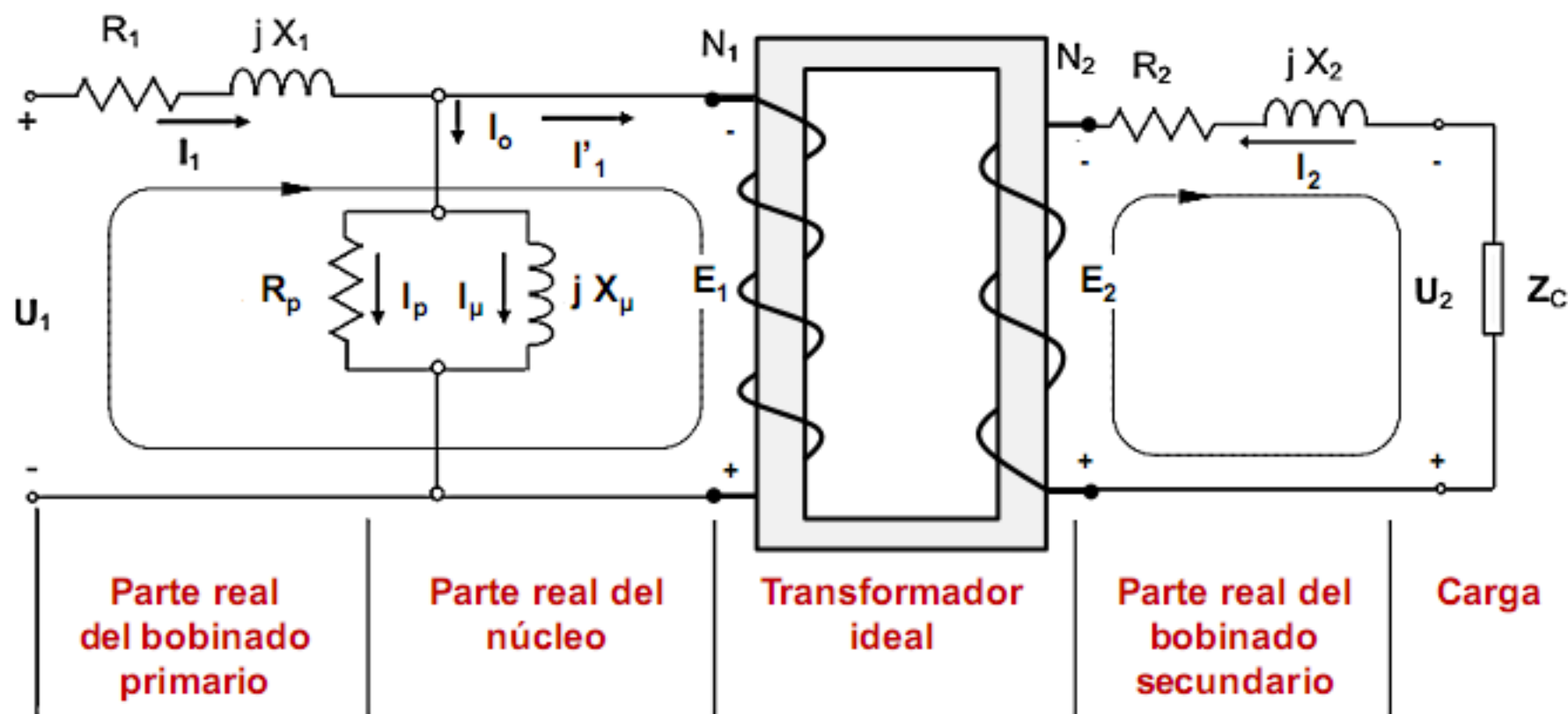
## Pérdidas por permeabilidad finita del núcleo

$X_\mu \rightarrow$  necesidad de corriente en el bobinado primario para tener un flujo magnético en el núcleo  $\rightarrow$  reactancia inductiva (condición 4)

$$I_1 = I'_1 \rightarrow \text{Ideal}$$

$$I_1 = I'_1 + I_o \rightarrow \text{Real}$$

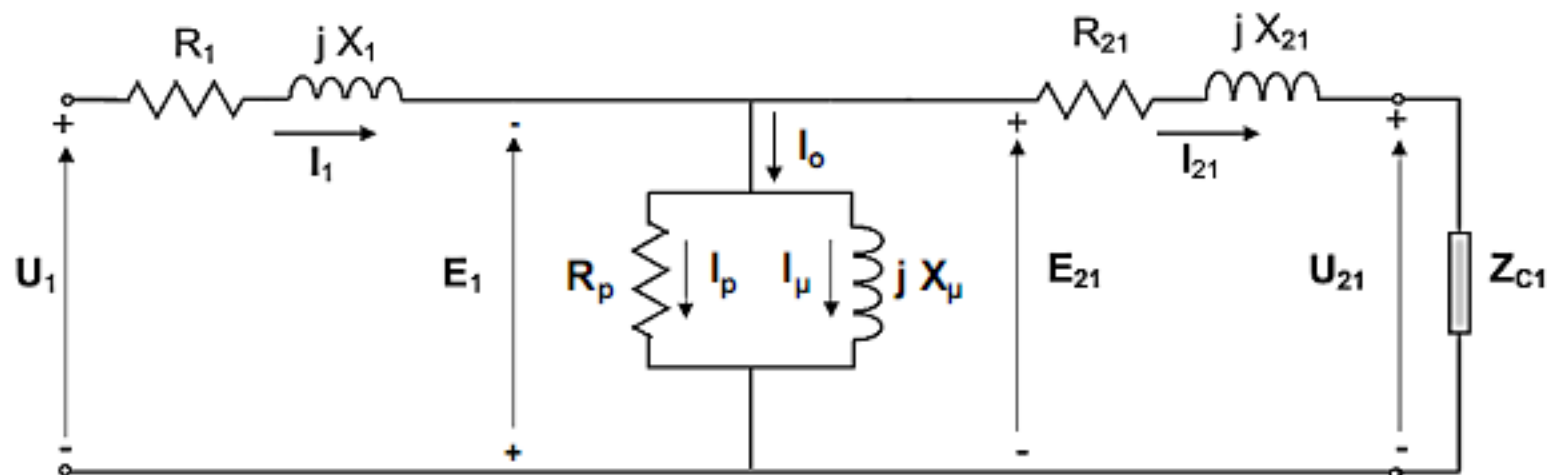








## Valores referidos al primario



Donde las magnitudes referidas al primario son:

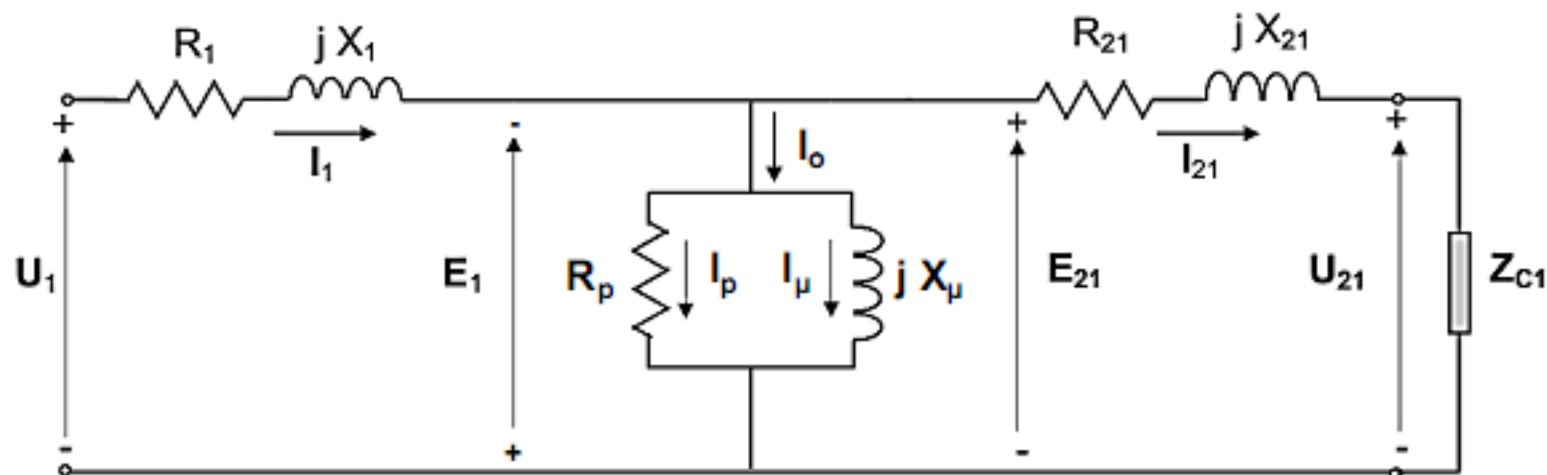
$$I_{21} = -I_2/k \qquad X_{21} = X_2 k^2$$

$$E_{21} = E_2 k \qquad Z_{c1} = Z_c k^2$$

$$U_{21} = U_2 k \qquad R_{21} = R_2 k^2$$



## Valores referidos al primario

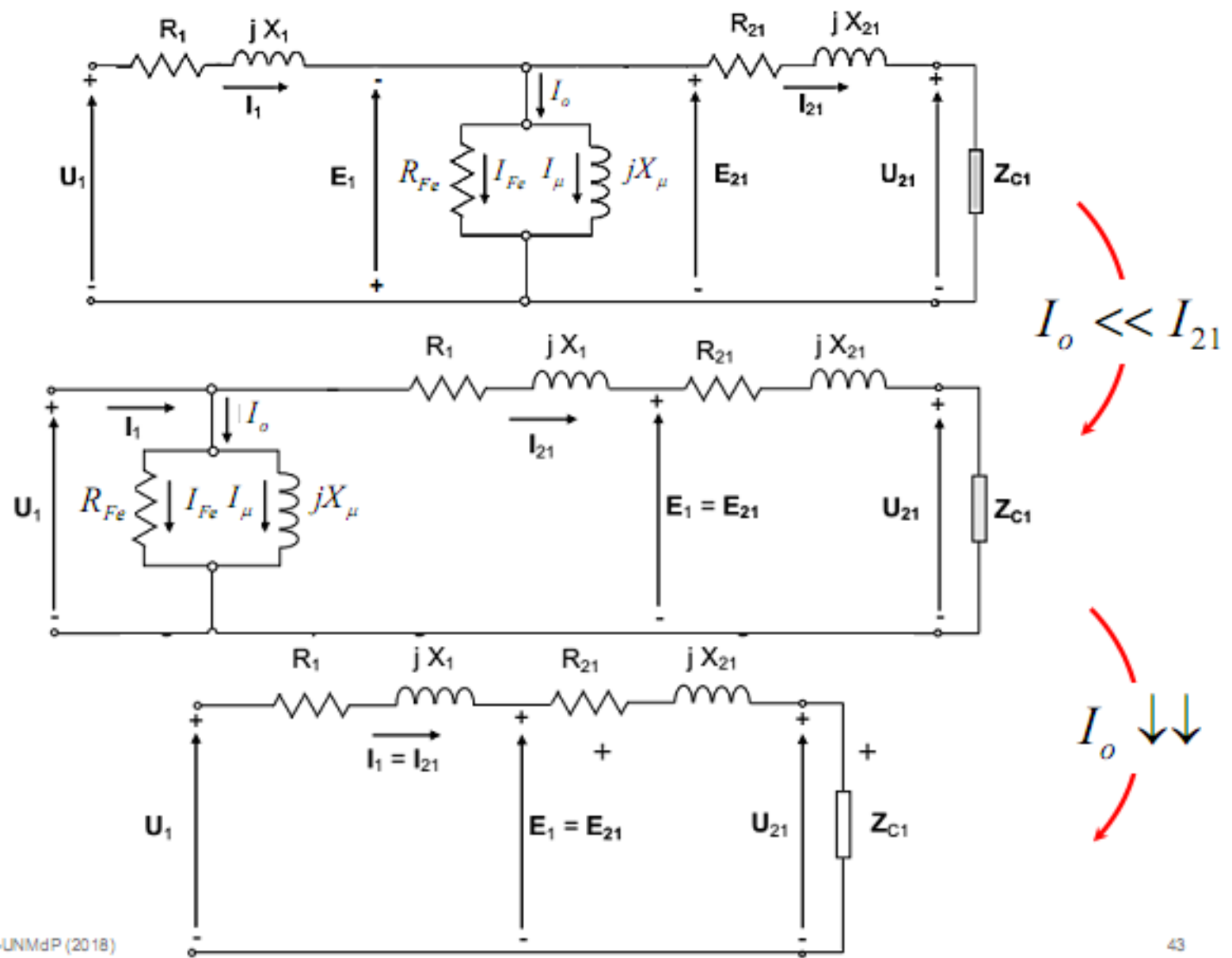


Ecuaciones de funcionamiento (equilibrio de tensiones):

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 R_1 + j \bar{I}_1 X_1 \\ \bar{E}_{21} = \bar{U}_{21} + \bar{I}_{21} R_{21} + j \bar{I}_{21} X_{21} \end{cases}$$



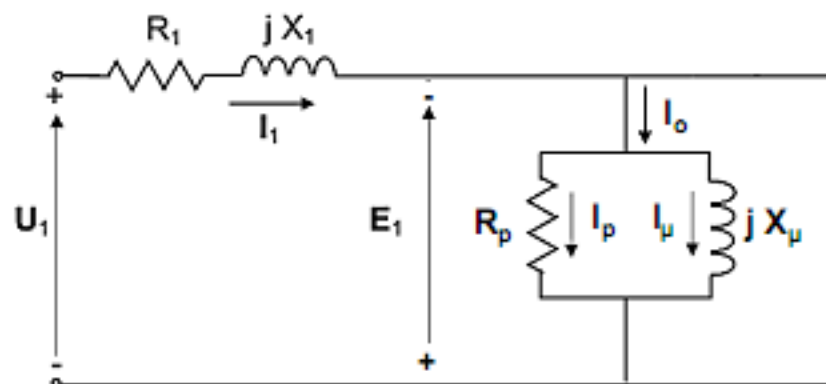
# Transformador real – Circuito reducido



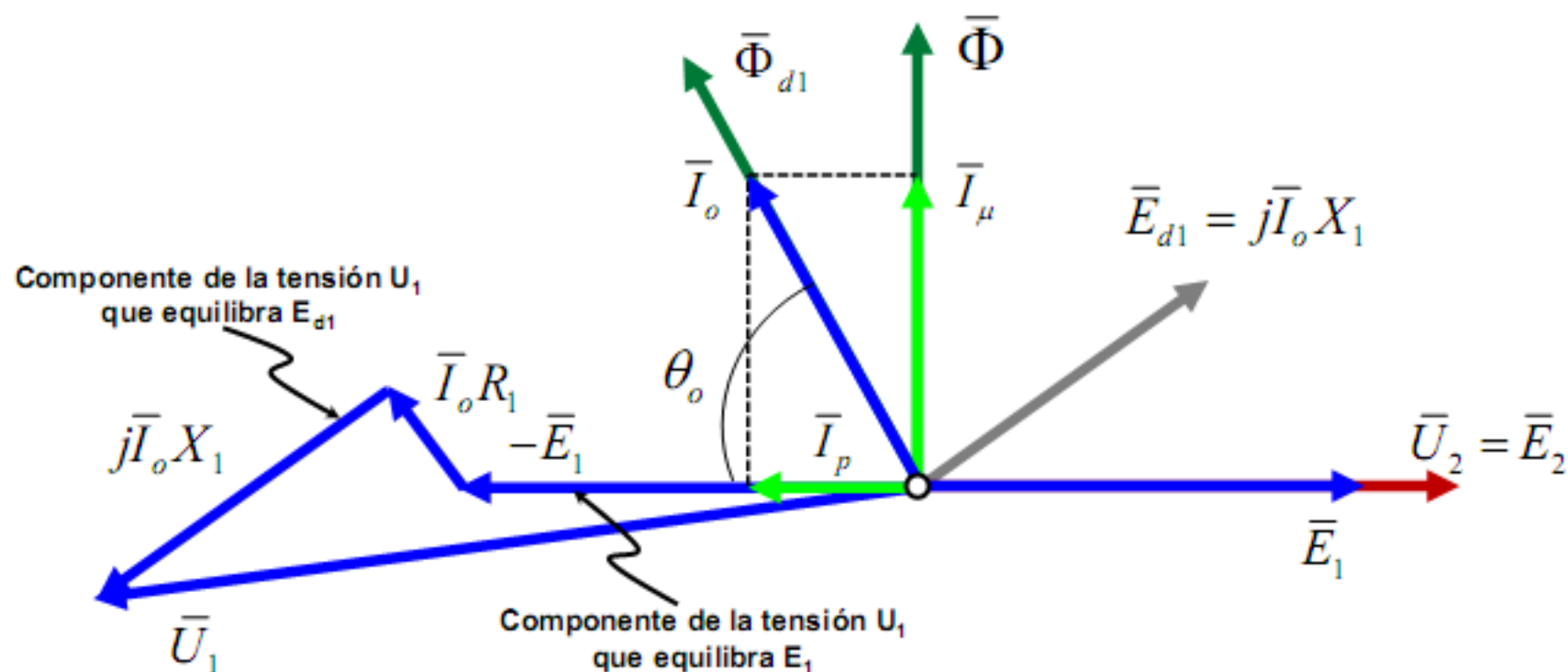


# Transformador real – Diagrama fasorial

## En vacío



$$U_1 = -E_1 + I_o R_1 + j I_o X_1$$

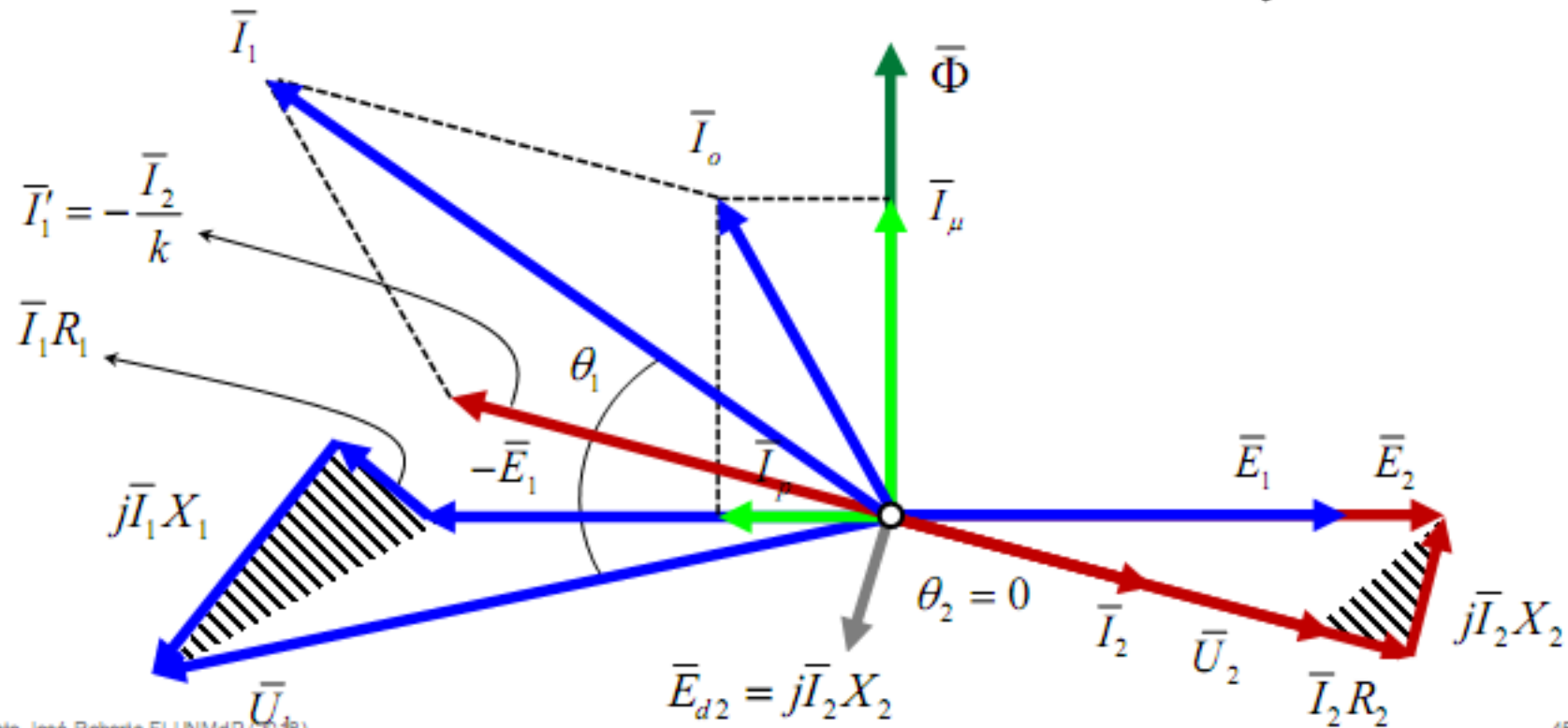
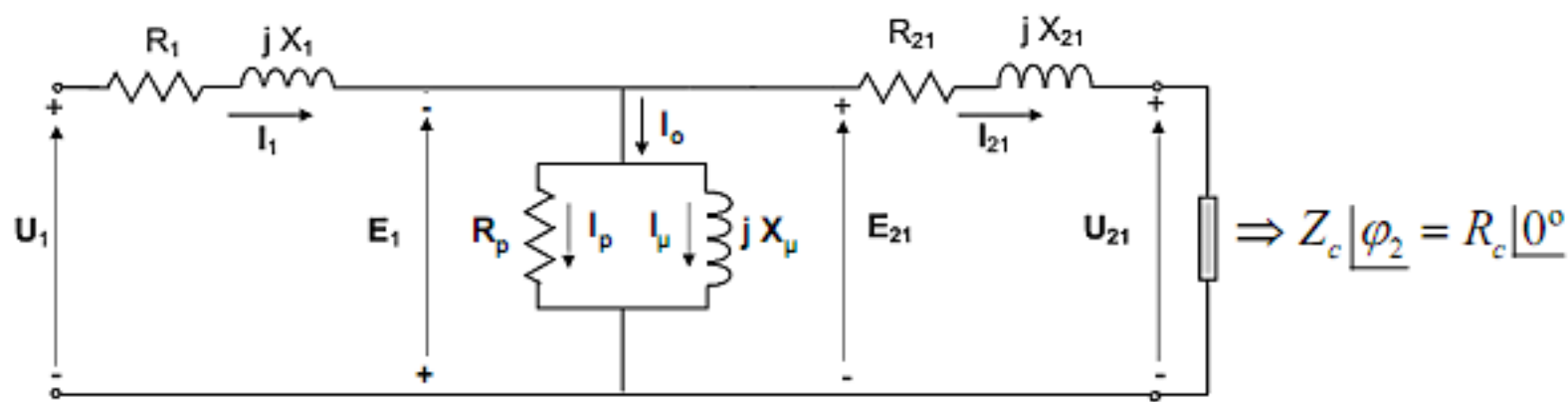


(Fuera de escala)



# Transformador real – Diagrama fasorial

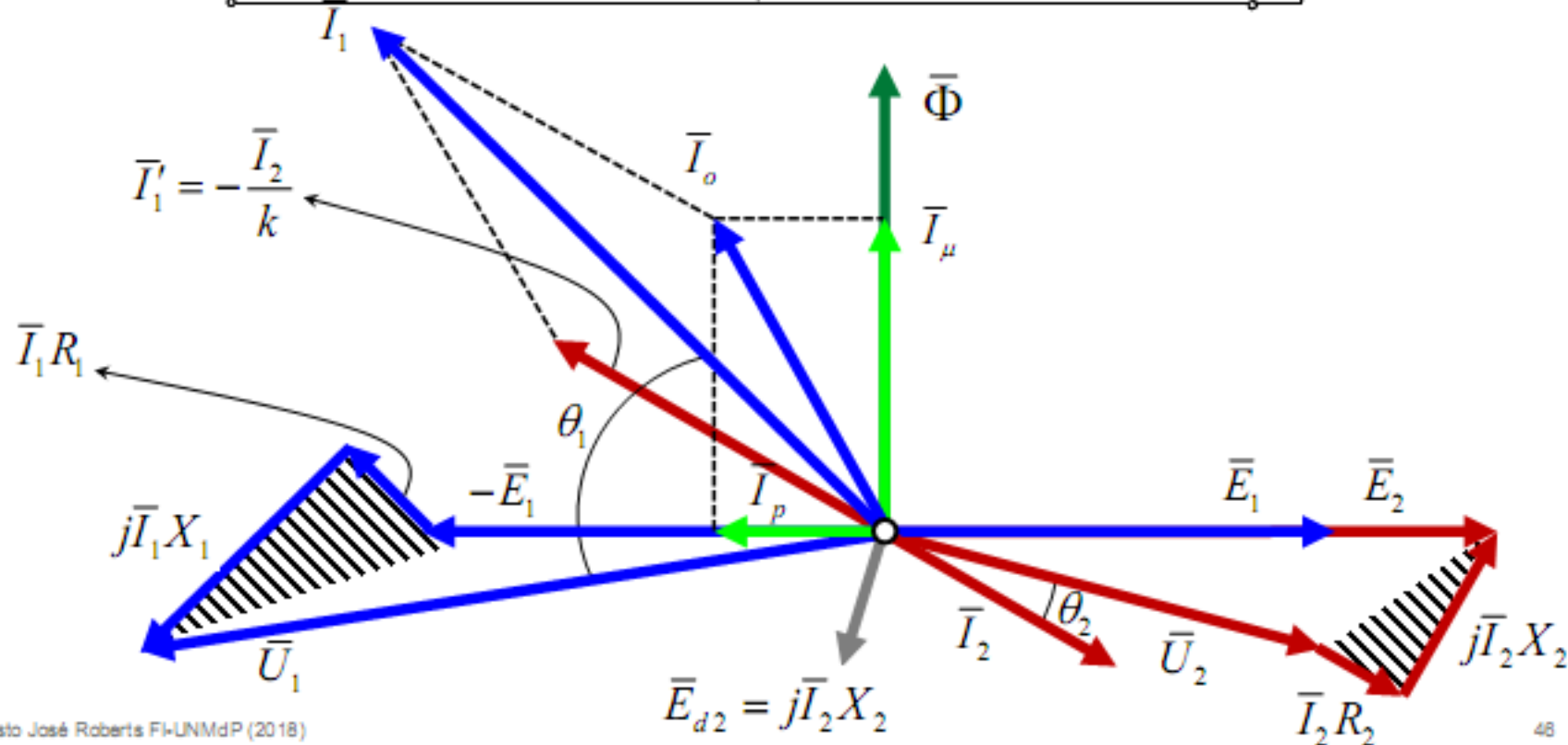
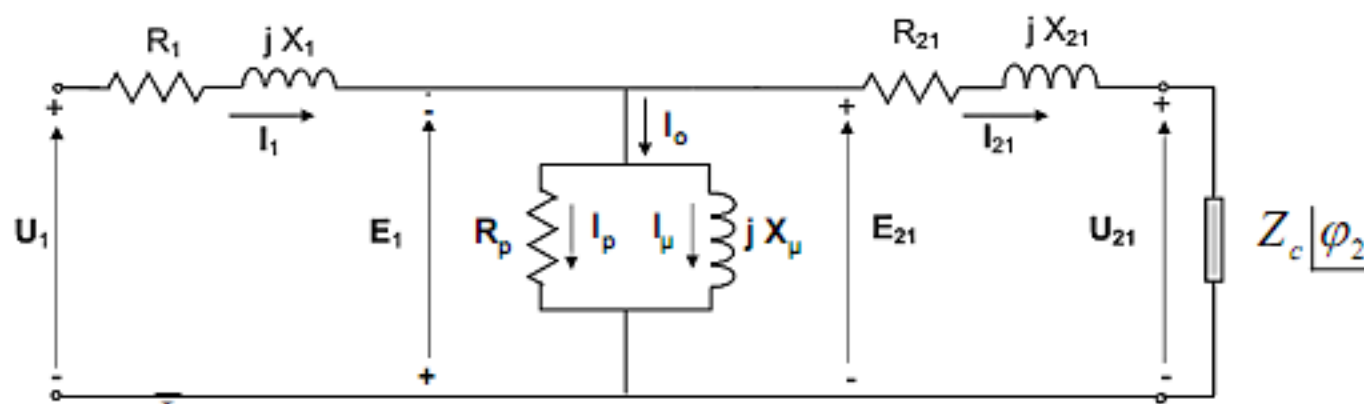
En carga  
(R)





# Transformador real – Diagrama fasorial

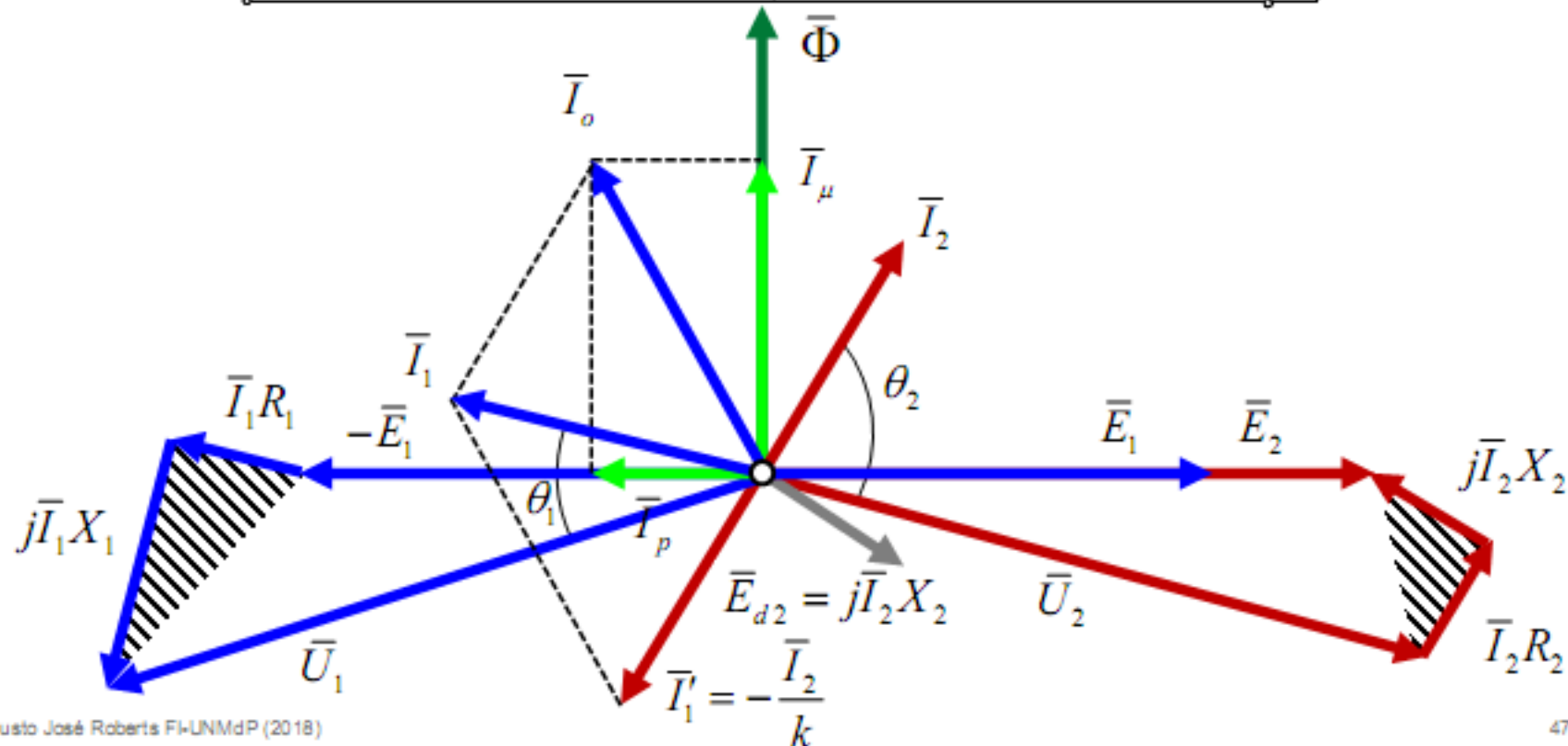
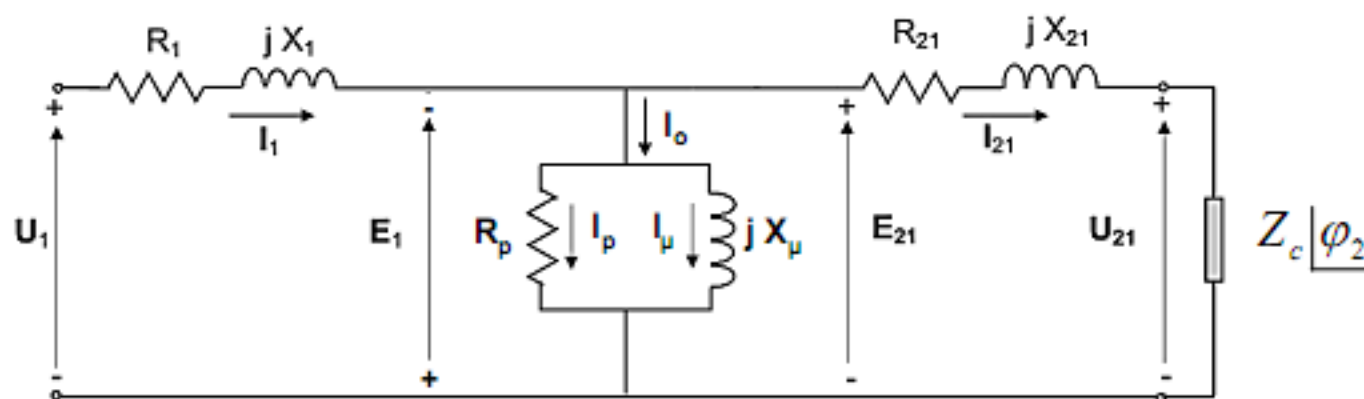
En carga  
(RL)





# Transformador real – Diagrama fasorial

En carga  
(RC)

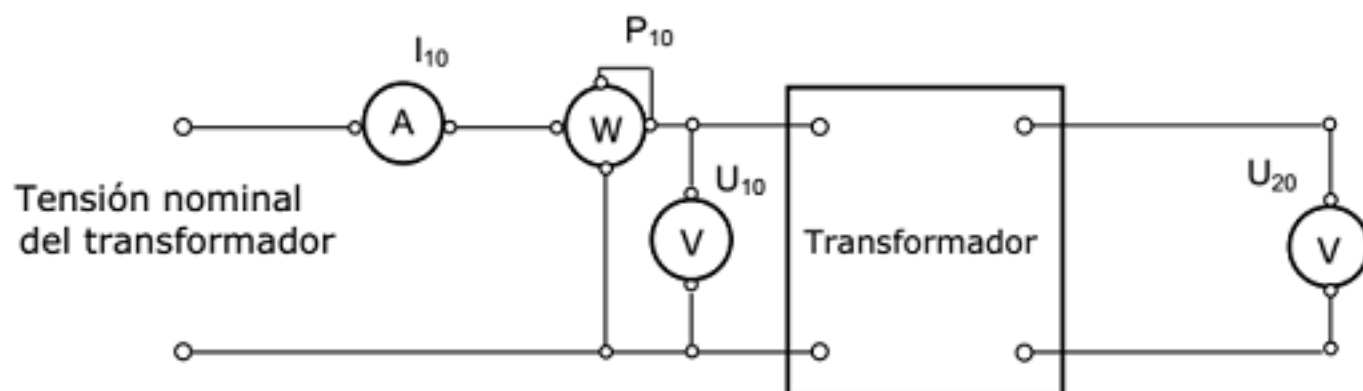


# Determinación de los parámetros

## Ensayo en vacío

- Alimentar el primario del transformador, con la tensión nominal y dejando el secundario a circuito abierto, en esta situación el flujo magnético en el núcleo es el nominal y por lo tanto las pérdidas en el mismo son las nominales.
- Al circular la corriente por el primario, en el mismo vamos a tener pérdidas en el cobre ( $P_{Cu}$ ), aunque estas se pueden despreciar frente a las del hierro ( $P_{Fe}$ )

$$I_o \approx 5\% I_{1n} \rightarrow P_{Cu} \downarrow\downarrow$$



$$U_{1o} = U_{1n} [V]$$

$$I_{1o} = \dots [A]$$

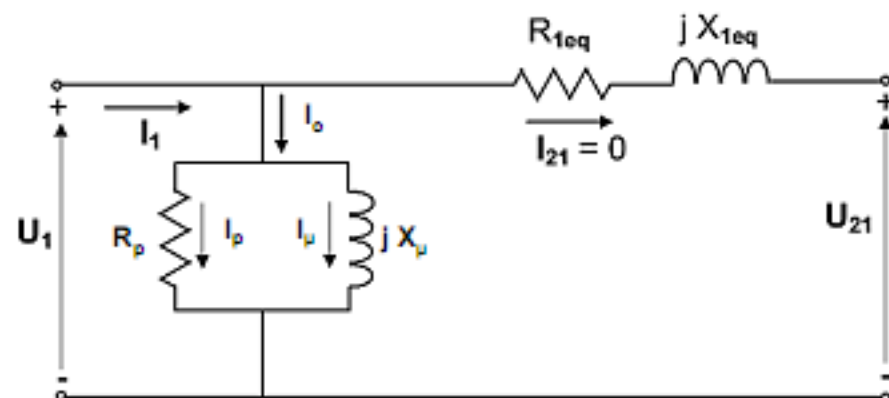
$$P_{1o} = \dots [W]$$



# Determinación de los parámetros

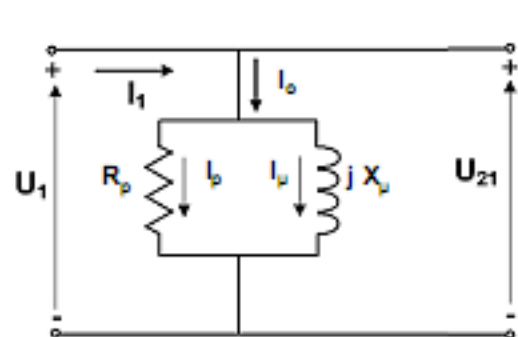
## Ensayo en vacío

En estas condiciones el circuito equivalente exacto es:



La potencia que indica el vatímetro es  $P_{1o} = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe}$

$$\Delta P_{Cu1} = I_o^2 R_{Fe} \quad I_o \approx 5\% I_{ln} \rightarrow P_{Cu} \downarrow \downarrow \quad P_{1o} \approx \Delta P_{Fe} = I_\mu U_1 \quad E_1 = U_1$$



$$\left\{ \begin{array}{l} S_{10} = U_{10} I_{10} \\ Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} \\ \cos \varphi = \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} I_\rho = I_{10} \cos \varphi \\ I_\mu = I_{10} \sin \varphi \end{array}$$

$$R_\rho = \frac{U_{10}^2}{P_{10}}$$

resistencia de  
excitación

$$X_\mu = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}}$$

inductancia  
de excitación

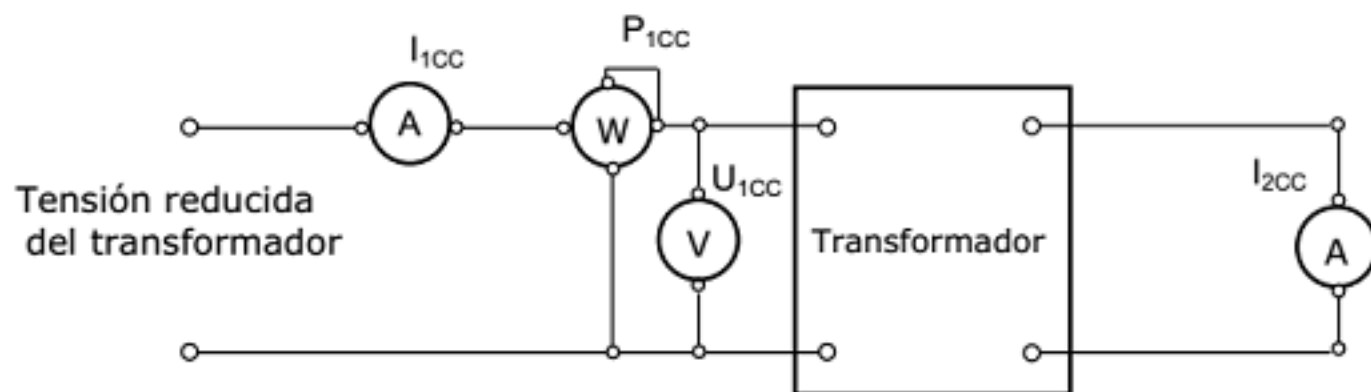


# Determinación de los parámetros

## Ensayo en cortocircuito

- Cortocircuitar el secundario del transformador y alimentar el primario mediante una tensión reducida, cuyo valor es tal que la corriente que circule sea la nominal del transformador.
- Debido a que el valor de la tensión que se debe aplicar es del orden del 5% de la tensión nominal, en la rama de excitación tendremos una corriente  $\downarrow \downarrow$

Podemos despreciar la rama de excitación



$$U_{1cc} = \dots [V]$$

$$I_{1cc} = \dots [A]$$

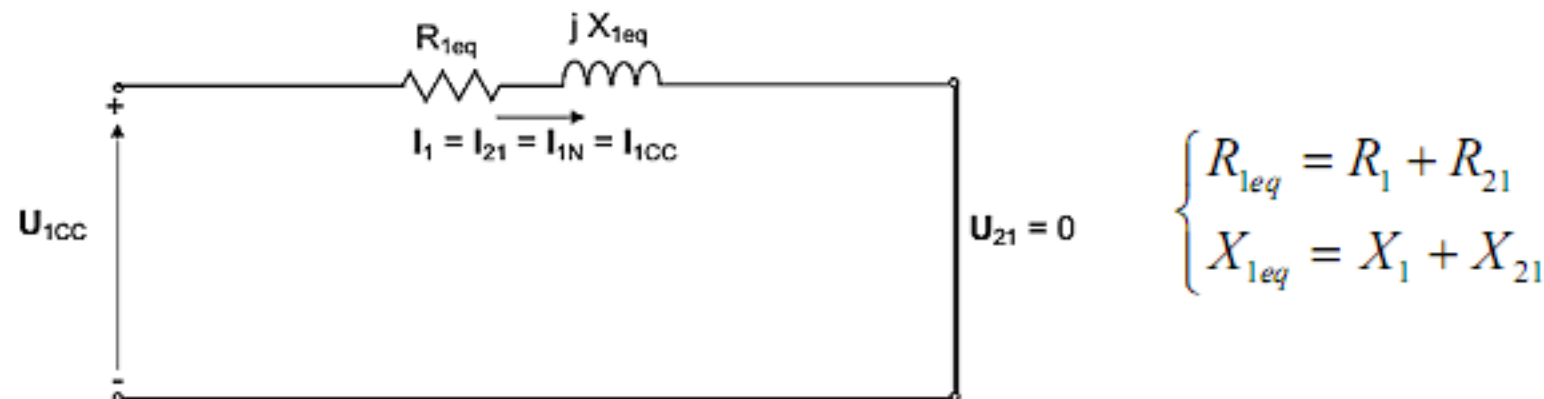
$$P_{1cc} = \dots [W]$$



# Determinación de los parámetros

## Ensayo en cortocircuito

- En estas condiciones el circuito equivalente es:



La potencia que indica el vatímetro es  $P_{1cc} = I_{1cc}^2 R_{1eq} \quad \therefore R_{1eq} = \frac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2}$

$$Z_{1eq} = \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} \quad X_{1eq} = \sqrt{Z_{1eq}^2 - R_{1eq}^2}$$

En la práctica, se cumple:

$$X_1 = X_{21}$$

$$R_1 = R_{21}$$

$$R_1 = \frac{R_{1eq}}{2}$$

$$X_1 = \frac{X_{1eq}}{2}$$

$$R_2 = \frac{R_{1eq}}{2k^2}$$

$$X_2 = \frac{X_{1eq}}{2k^2}$$



# Determinación de los parámetros

## Ejercicio:

Un transformador monofásico de 250 kVA, 15000/250 V, 50 Hz, ha dado los siguientes resultados en unos ensayos:

### Vacío (datos medidos en lado de B.T.)

$$U_{1o} = 250 \text{ V}$$

$$I_{1o} = 80 \text{ A}$$

$$P_{1o} = 4000 \text{ W}$$

### Cortocircuito (datos medidos en lado de A.T.)

$$U_{1cc} = 600 \text{ V}$$

$$I_{1cc} = \text{Corriente nominal}$$

$$P_{1cc} = 5000 \text{ W}$$

Calcular:

- Los parámetros del circuito equivalente reducido al primario.
- Dibujar el circuito equivalente.



1. Marcelo A. Sobrevila. Ingeniería de la Energía Eléctrica - Libro II. Buenos Aires: Marymar, 1985.
2. Irwing L. Kosow. Máquinas Eléctricas y Transformadores. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1991.
3. Jesús Fraile Mora. Máquinas Eléctricas. España: Mc Graw Hill, 2003.
4. A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr.,. Stephen D. Umans. Máquinas Eléctricas. México; Madrid: McGraw-Hill, 2004.
5. Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas. México: Mc Graw Hill, 2012.
6. Macri Mario G. Apuntes de cátedra Máquinas Eléctricas, FI-UNMdP.



**Prof. Justo José Roberts**

`jjroberts@fi.mdp.edu.ar`

# Autotransformadores

El autotransformador consiste en un devanado continuo, que se utiliza como **primario y secundario, arrollado sobre un único núcleo**, y con una toma intermedia que puede ser modificable.

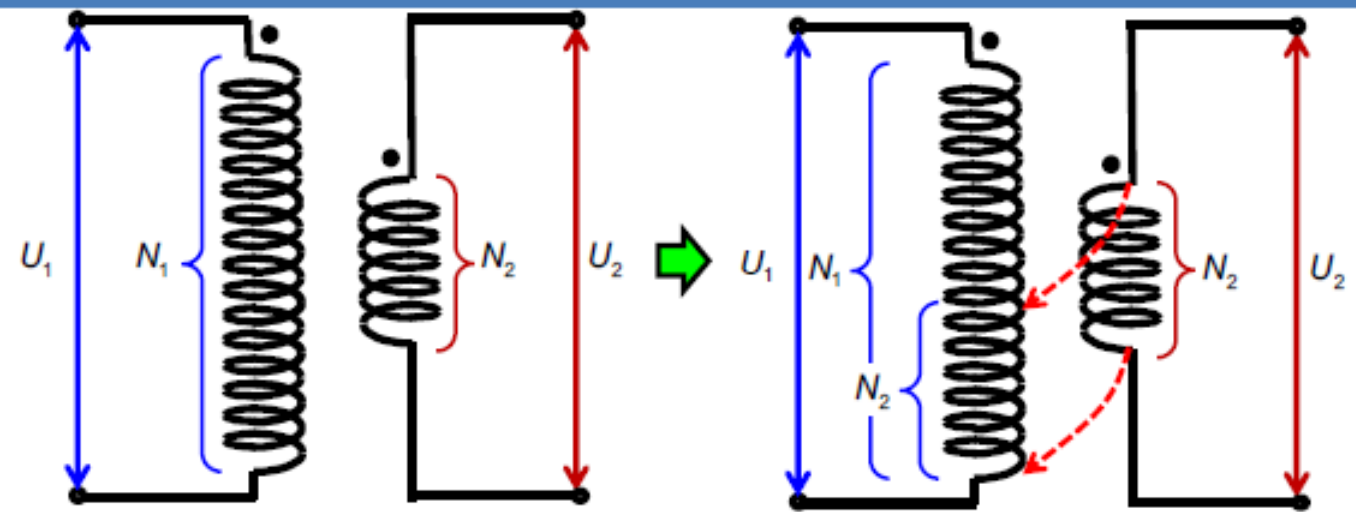
A diferencia del transformador de dos devanados, un autotransformador **transfiere energía entre los dos circuitos, en parte por acoplamiento magnético y en parte por conexión eléctrica directa.**



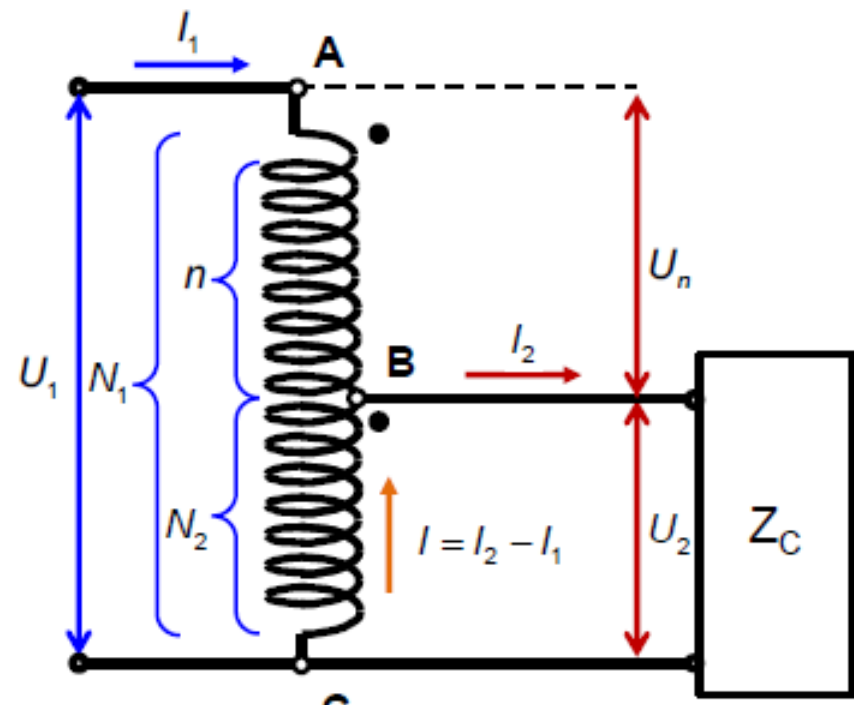


# Autotransformadores

Transformador:

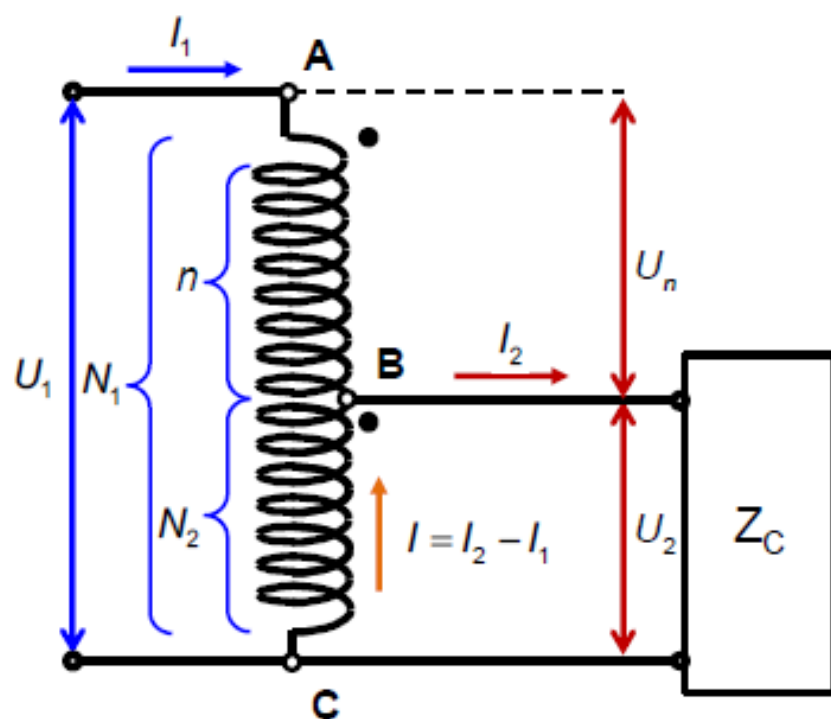


Autotransformador:





# Autotransformadores



Al depreciar la corriente de magnetización y las pérdidas, se cumple que:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{n + N_2}{N_2}$$

$$\frac{n}{N_2} + 1 = k + 1 = k_{\text{auto}}$$

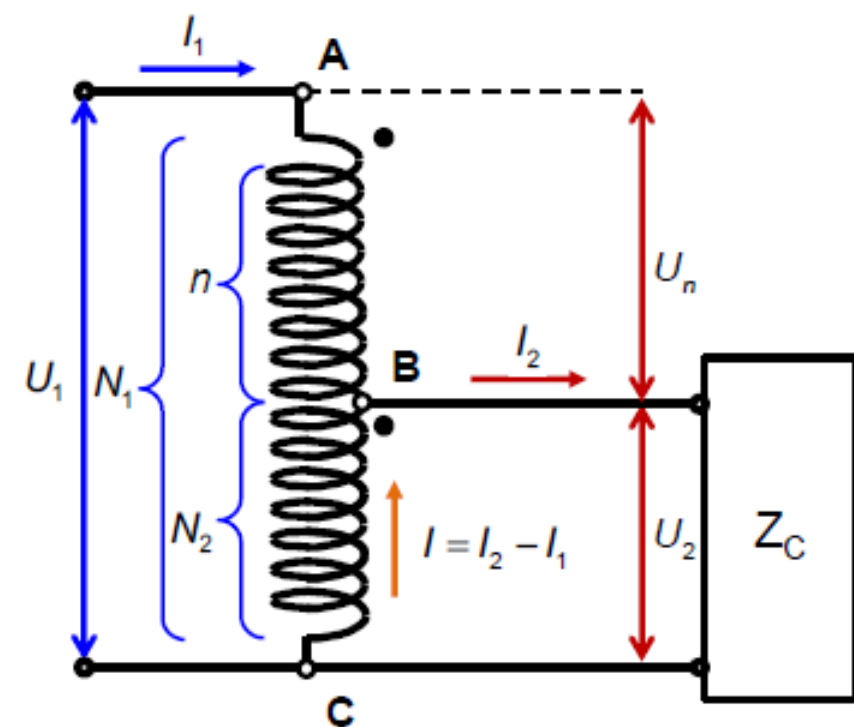
$$\left. \begin{aligned} I_1 \cdot n &= I \cdot N_2 \\ I &= I_2 - I_1 \\ n &= N_1 - N_2 \end{aligned} \right\} I_1 \cdot (N_1 - N_2) = (I_1 - I_2) \cdot N_2$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = k_{\text{auto}}$$

$$\frac{I}{I_1} = k_{\text{auto}} - 1$$

$$\frac{I}{I_2} = \frac{k_{\text{auto}} - 1}{k_{\text{auto}}} = 1 - \frac{1}{k_{\text{auto}}}$$

# Autotransformadores



Al depreciar la corriente de magnetización y las pérdidas, se cumple que:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{n + N_2}{N_2}$$

$$\frac{n}{N_2} + 1 = k + 1 = k_{auto}$$

$$\left. \begin{array}{l} I_1 \cdot n = I \cdot N_2 \\ I = I_2 - I_1 \\ n = N_1 - N_2 \end{array} \right\} I_1 \cdot (N_1 - N_2) = (I_1 - I_2) \cdot N_2$$

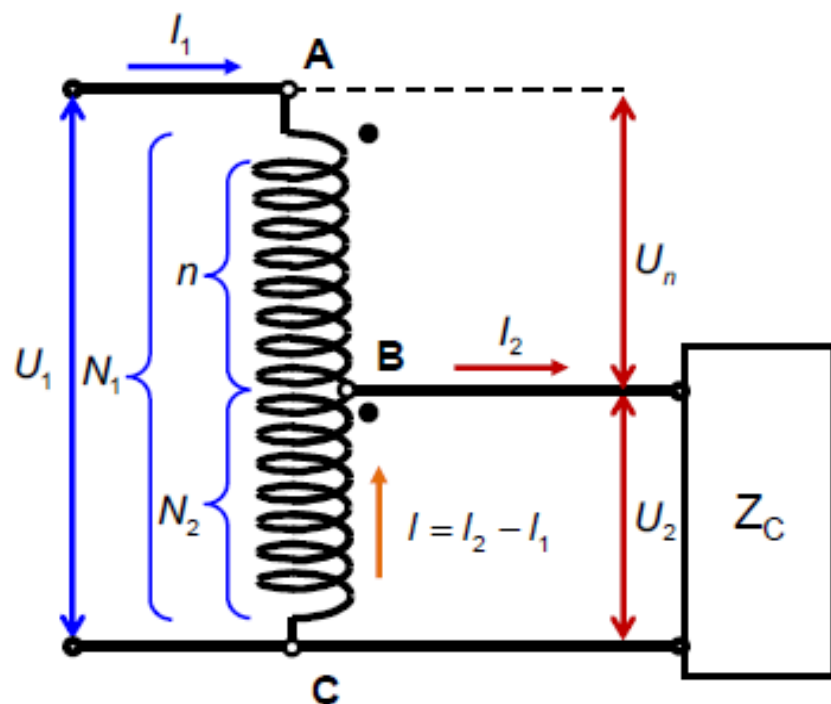
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k_{auto}$$

$$\frac{U_n}{U_1} = \frac{n}{N_1} = \frac{k_{auto} - 1}{k_{auto}}$$

$$\frac{U_n}{U_2} = k_{auto} - 1$$

# Autotransformadores

## Potencia conductiva e inductiva



La potencia en la carga:

$$S = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I) = U_2 I_1 + U_2 I$$

$$S = S_{\text{conductiva}} + S_{\text{inductiva}}$$

$$S_{\text{conductiva}} = U_2 I_1 \Rightarrow$$

Pasa directamente a la carga a través del devanado serie.

$$S_{\text{inductiva}} = U_2 I \Rightarrow$$

Es aportada por el devanado derivación recibiendo energía por acción transformatriz con el devanado serie.

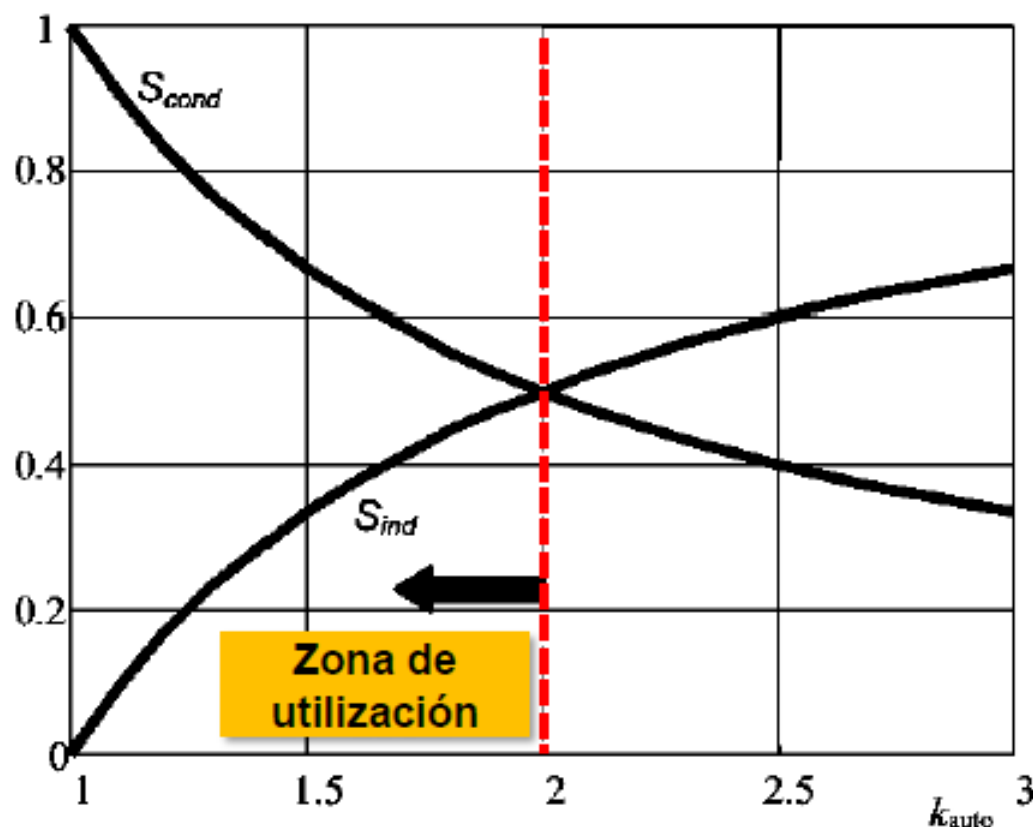
# Autotransformadores

## Potencia conductiva e inductiva

La relación de potencias será:

$$\frac{S_{cond}}{S} = \frac{U_2 I_1}{U_2 I_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{k_{auto}}$$

$$\frac{S_{ind}}{S} = \frac{U_2 I}{U_2 I_2} = \frac{I}{I_2} = 1 - \frac{1}{k_{auto}}$$



$k_{auto} \rightarrow 1$  la  $S_{cond}$  se hace muy grande, mientras que la  $S_{ind}$  que es la que realmente transforma, es baja. Puede alimentar cargas mucho mayores que la fijada por la potencia nominal de sus devanados.

$k_{auto} > 2$  la  $S_{ind}$  es mayor que la  $S_{cond}$  por lo que se pierde la ventaja del autotransformador frente al transformador.

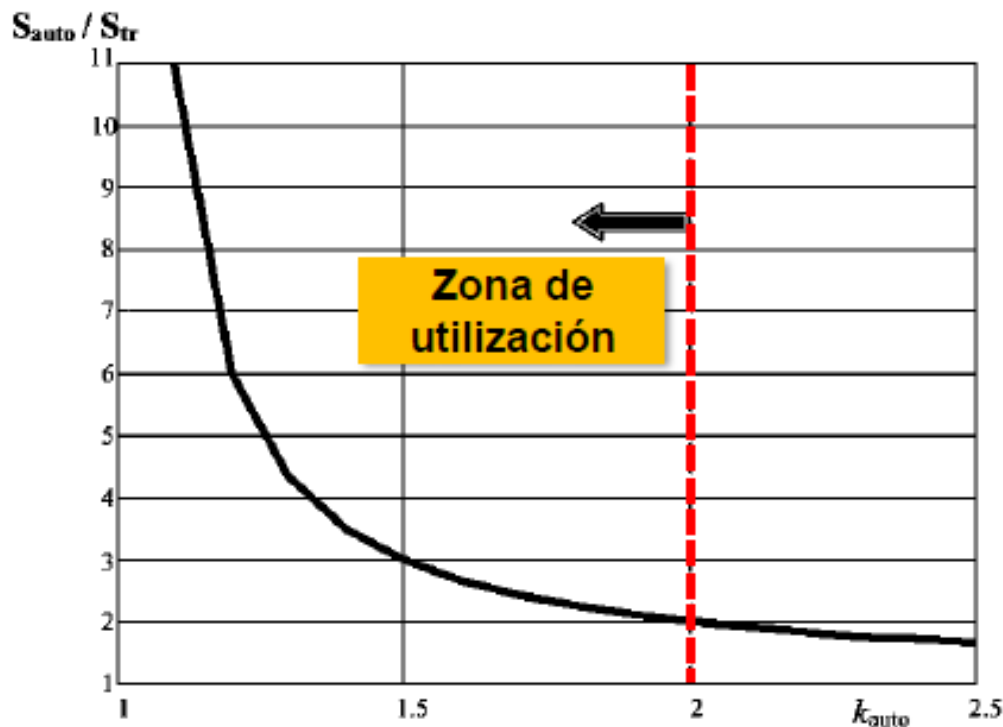
# Autotransformadores

## Transformador vs. Autotransformador

$$S_{auto} = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$S_{trafo} = U_2 I = U_2 (I_2 - I_1)$$

$$\frac{S_{auto}}{S_{trafo}} = \frac{U_2 I_2}{U_2 I} = \frac{U_2 I_2}{U_2 (I_2 - I_1)} = \frac{I_2}{I_2 - I_1} = \frac{k_{auto}}{k_{auto} - 1}$$



$k_{auto} = 2$  la  $S_{auto} = 2 \cdot S_{trafo}$  y para valores  $k_{auto} \rightarrow 1$  se hace mayor que 10 veces la potencia aparente que puede obtenerse de un transformador equivalente.

El campo de aplicación del autotransformador está en general para valores de  $k_{auto} < 2$ .



# Autotransformadores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Menor tamaño y peso frente a un transformador de la misma capacidad.</li><li>• Menor costo.</li><li>• Mejor rendimiento.</li><li>• Baja regulación de tensión debido a su baja impedancia equivalente.</li><li>• Menor corriente de vacío.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Elevada corriente de cortocircuito debido a su reducida impedancia equivalente (posee menos espiras).</li><li>• Peligro ante el corte de una espira, el secundario quedaría sometido a la tensión del primario.</li></ul>



# Autotransformadores

## Aplicaciones

- **Sistemas eléctricos de potencia** → interconectar circuitos que funcionan a tensiones diferentes, pero en una relación cercana a 2:1 (por ejemplo, 400 kV / 230 kV ó 138 kV / 66 kV).
- **En la industria** → conectar maquinarias que operan a tensiones nominales diferentes a la de la fuente de alimentación (por ejemplo, motores de 480 V conectados a una alimentación de 600 V).
- **Sistemas de distribución rural** → donde las distancias son largas, se pueden utilizar autotransformadores con relaciones de 1:1 → para variar la tensión de alimentación y así **compensar las apreciables caídas de tensión en los extremos de la línea.**
- **Motores de inducción** → método de arranque suave para motores de inducción tipo jaula de ardilla.
- **Sistemas ferroviarios** → reducir las pérdidas de transporte.

# Autotransformadores

## Variac (*variable alternating current*)

- Las aplicaciones más comunes son los **autotransformadores con relación de transformación variable**.
- Este aparato se conoce vulgarmente como **variacion** en laboratorios de ensayos.

Un tipo de autotransformador: el Variac







1. Marcelo A. Sobrevila. Ingeniería de la Energía Eléctrica - Libro II. Buenos Aires: Marymar, 1985.
2. Jesús Fraile Mora. Máquinas Eléctricas. España: Mc Graw Hill, 2003.
3. Macri Mario G. Apuntes de cátedra Máquinas Eléctricas, FI-UNMdP.
4. <http://www.tuveras.com/transformador/autotransformador.htm>
5. <http://www.sectorelectricidad.com/11001/el-autotransformador-ventajas-y-desventajas/>



# Conexiones Trifásicas con transformador



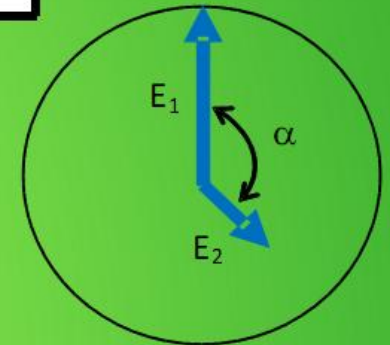
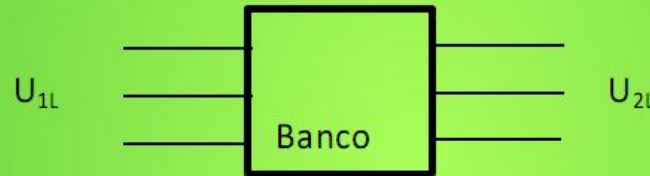
# TRANSFORMACIONES TRIFÁSICAS

BANCOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

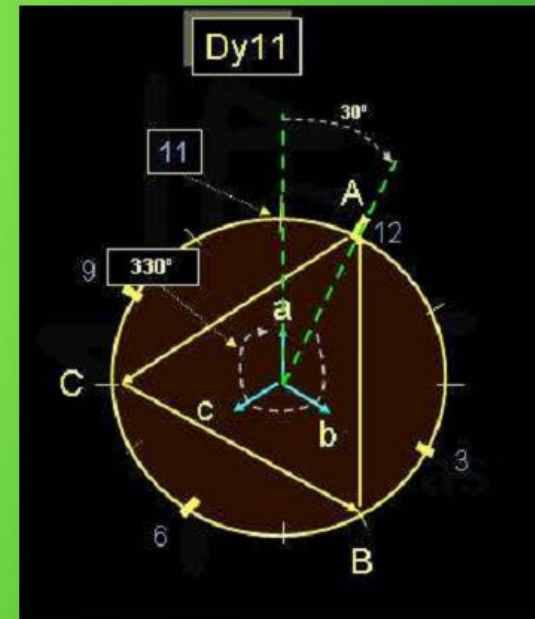
**Relación de transformación** En transformaciones trifásicas se define como la relación de tensiones de línea de entrada a las tensiones de línea de salida del Banco o transformador trifásico considerado

$$k = \frac{U_{1L}}{U_{2L}}$$

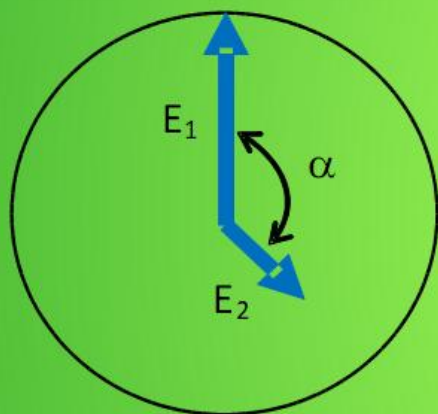


**Relación de fase** Se define como el ángulo de atraso  $\alpha^{\circ}$  de la Fem  $E_2$  de BT respecto a la Fem  $E_1$  de AT y se expresa mediante el denominado **índice horario**.

Si se supone ubicada la Fem de AT a las 12 en la esfera de un reloj ideal, la Fem de BT será siempre un múltiplo de  $30^{\circ}$  y caerá justamente sobre alguna hora del reloj. Entre cada hora existen  $30^{\circ}$  por lo que el **índice horario** se especifica mediante  $h/30^{\circ}$ :



# Grupos de Conexión Normalizados



1	2	3	4	5		6		7	8
				Diagrama		Esquema			
Identificación	Desfase Áng. de B.T. en retardo)	Denomi- nación C.E.I.	Diagrama		Esquema		Relación de tensiones compuestas (*) $\frac{U_{AT}}{U_{BT}}$	Antigua deno- nación V.D.E.	
			A.T.	B.T.	A.T.	B.T.			
0°	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$	A1		
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$	A2		
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$	A3		
150°	Dy5					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C1		
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	C2		
	Yz5					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C3		
180°	Dd6					$\frac{N_A}{N_B}$	B1		
	Yya					$\frac{N_A}{N_B}$	B2		
	Dz6					$\frac{2N_A}{3N_A}$	B3		
-30°	Dy11					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D1		
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	D2		
	Yz11					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D3		

## Condiciones ideales que deben cumplir los transformadores componentes

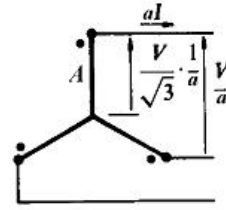
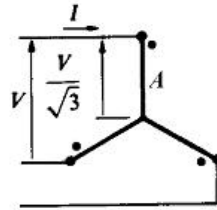
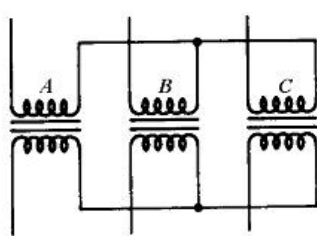
- Las relaciones nominales de transformación  $K_n$  deben ser iguales
- Deben tener igual potencia aparente nominal  $S_n$
- Las tensiones porcentuales de cortocircuito deben ser iguales para un reparto de carga adecuado

Tipos de conexiones:

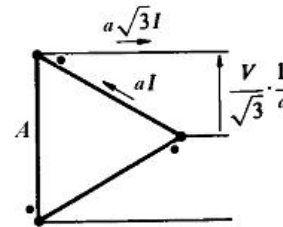
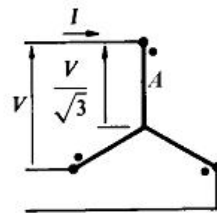
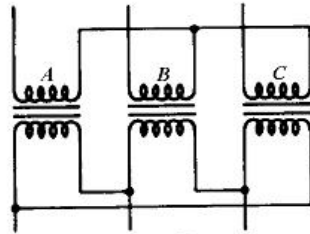
Simétricas: **Yy, Yd, Dy, Dd, Yz**

Asimétricas: **Vv** (triángulo abierto), **Tt**. etc

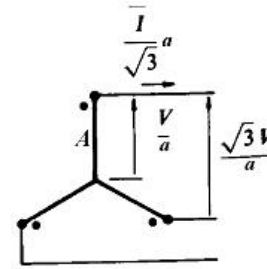
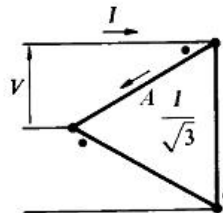
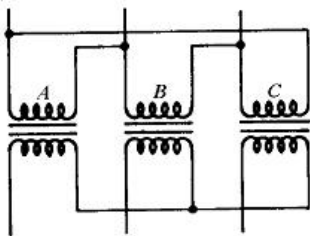
# Relaciones de transformación según el tipo de conexión



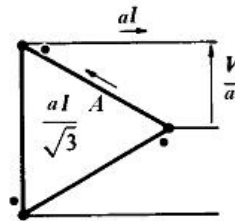
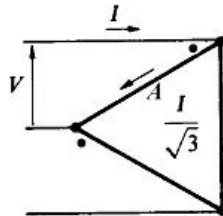
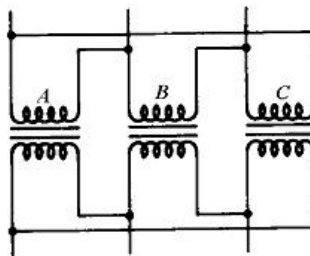
$$k = \frac{U}{\left(\frac{U}{a}\right)} = a$$



$$k = \frac{U}{\left(\frac{U}{\sqrt{3}a}\right)} = \sqrt{3}a$$



$$k = \frac{U}{\left(\frac{\sqrt{3}U}{a}\right)} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$



$$k = \frac{U}{\left(\frac{U}{a}\right)} = a$$



# Transformadores Trifásicos





# ESTABLECIMIENTOS MIRON S.A.

TRANSFORMADOR

3 FASICO

MAQUINA N°

POTENCIA 15.00 KVA

FREC. 50 Hz

TIPO

SERVICIO CONTINUO

ENFRIAMIENTO ONAN

AÑO

PRIMARIO

U<sub>p</sub> 13200 V ± 2.5 y 5 % I<sub>p</sub> 65.8 A U<sub>cc</sub> %

CONMUTAR SIN TENSION

PUNTO	1	2	3	4	5
VOLT	12540	12870	13200	13530	13860

SECUNDARIO

U<sub>c</sub> YACIO 6900 V

U<sub>c</sub> p.l. carga y cos. φ 0.8

I<sub>c</sub>

NORMAS  
IRAM

REFRIGERANTE

CANT.

PARTE ACTIVA 1800 Kg

PESO TOTAL

INDUSTRIA ARGENTINA



CONEXION  $\Delta$   $\Delta$

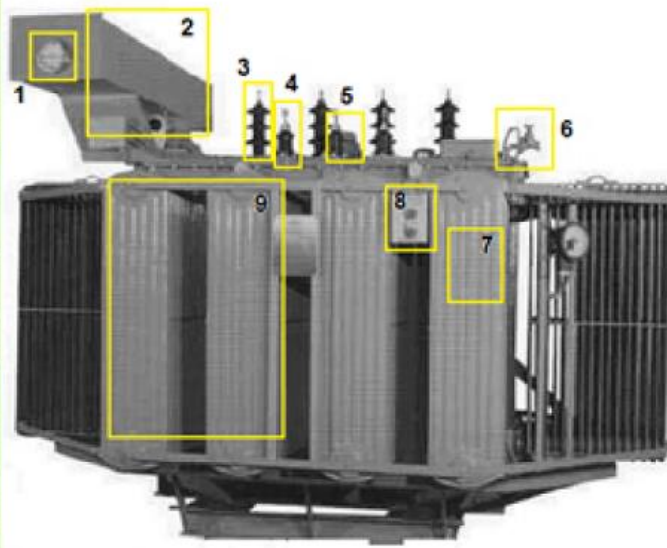
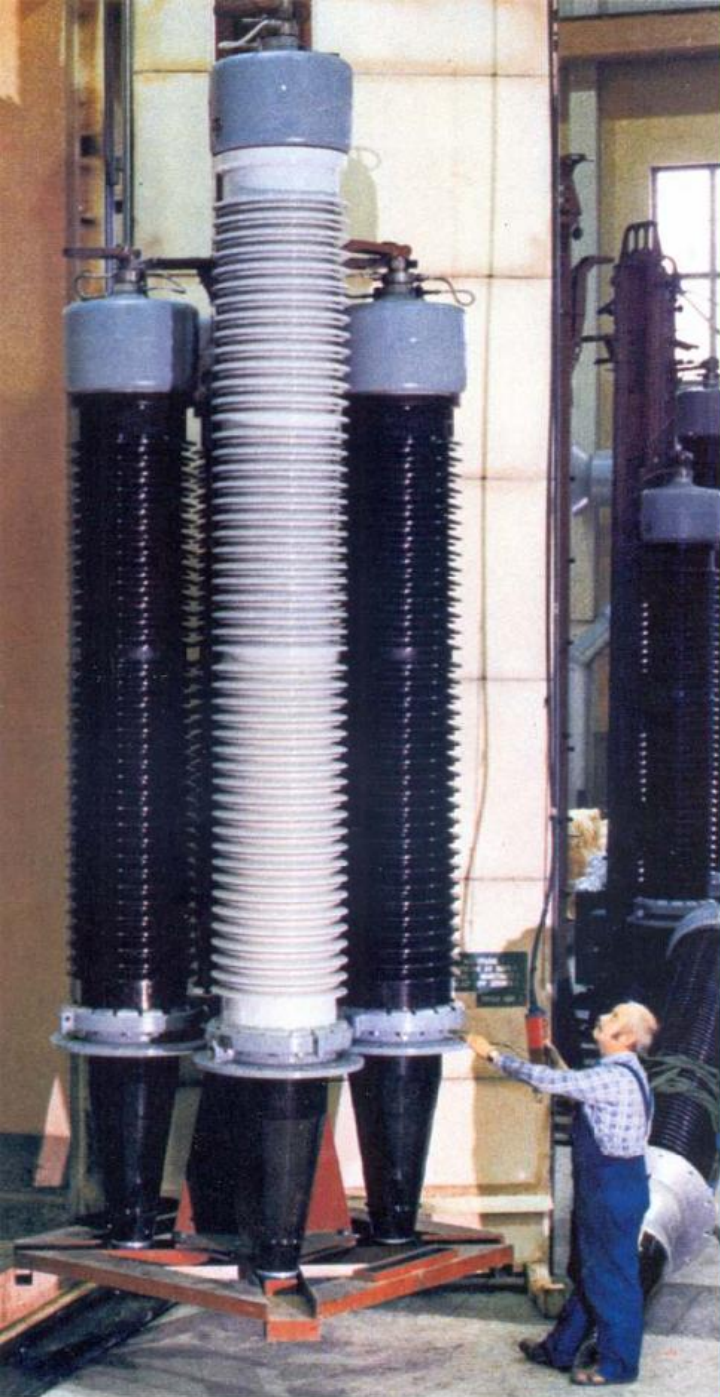
GRUPO Dy11

12



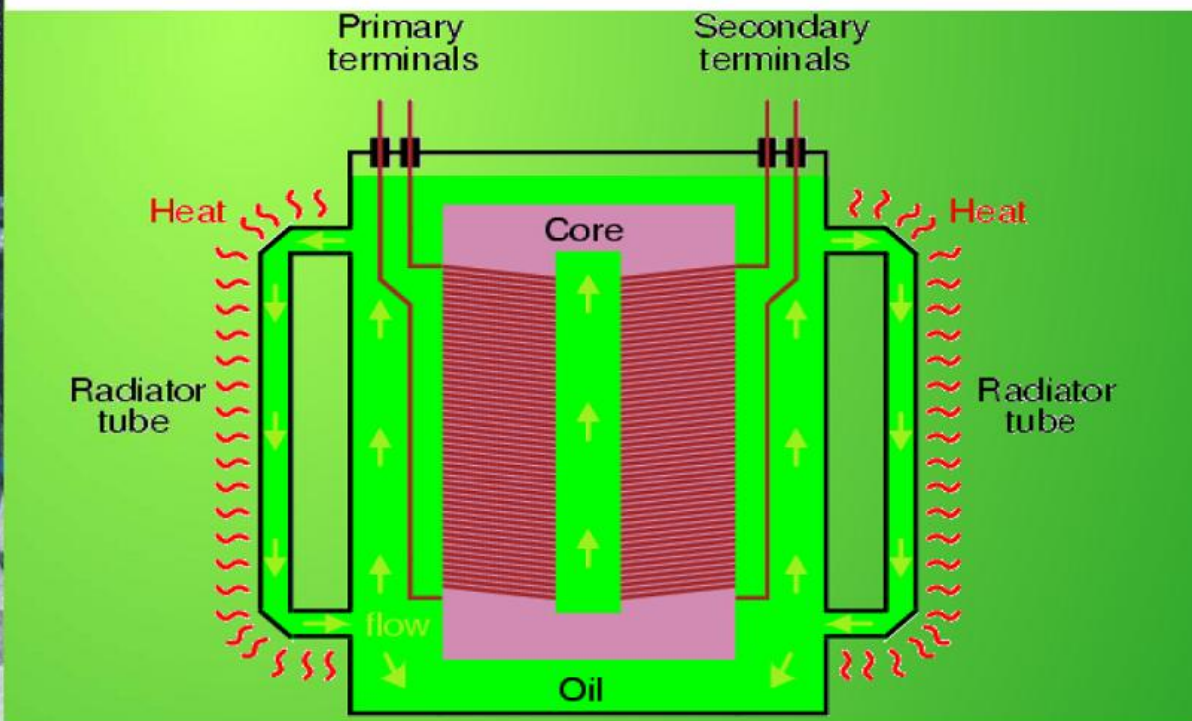
Transformador elevador a línea de AT en aceite: 255 MVA 18/400 kV  $\pm 3 \times 2.5 \%$



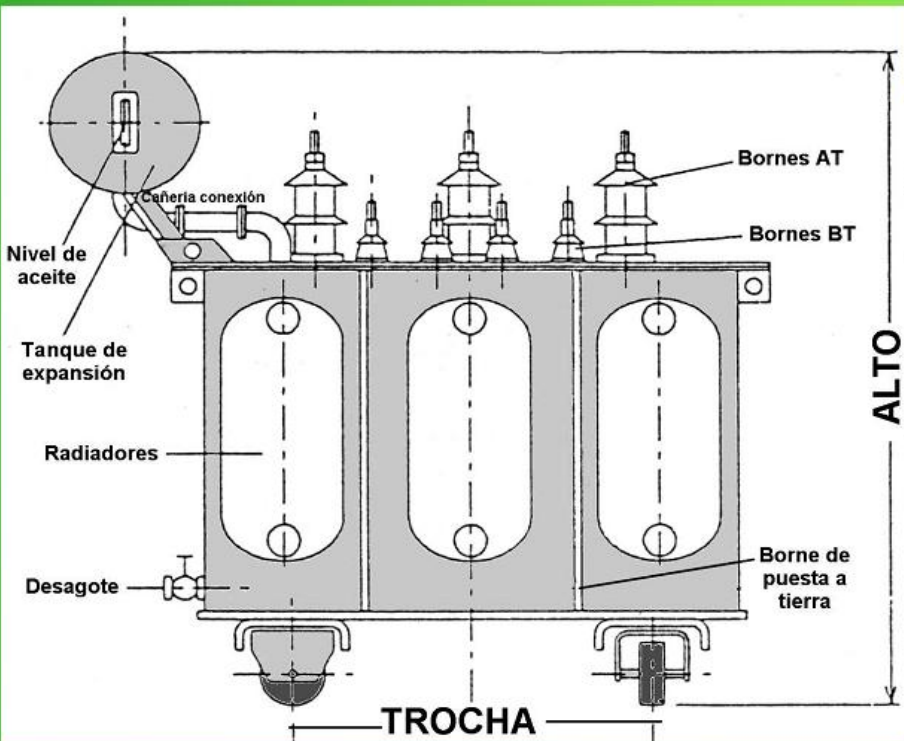


1. *Indicador de nivel.*
2. *Depósito de expansión.*
3. *Pasa-tapas de entrada.*
4. *Pasa-tapas de salida.*
5. *Mando conmutador.*
6. *Grifo de llenado.*
7. *Radiadores de refrigeración.*
8. *Placa de características.*
9. *Cuba.*

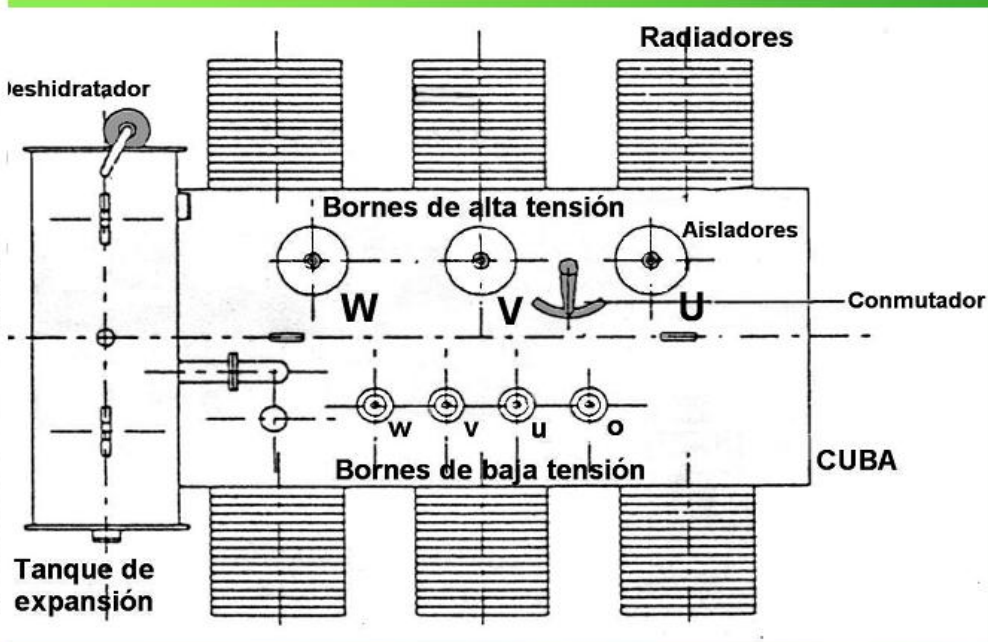
*Elementos que componen el transformador sumergido en aceite con depósito de expansión.*



# Detalles de un transformador de distribución en aceite

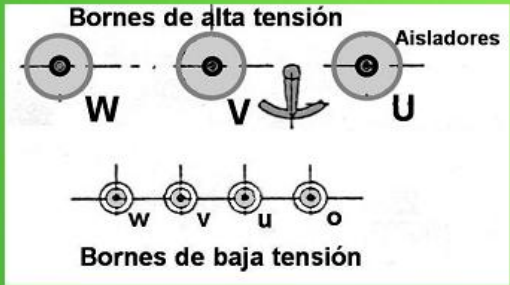
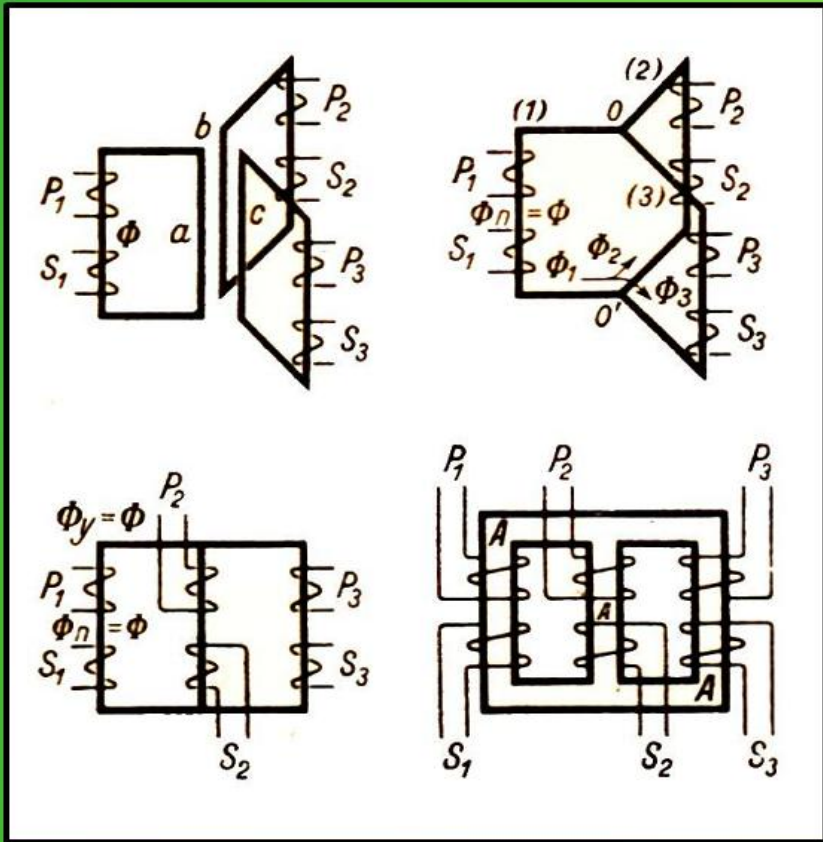


Vista lateral



Vista en Planta

# Transformador Trifásico de Columnas



Bornera normalizada Transformador de Distribución

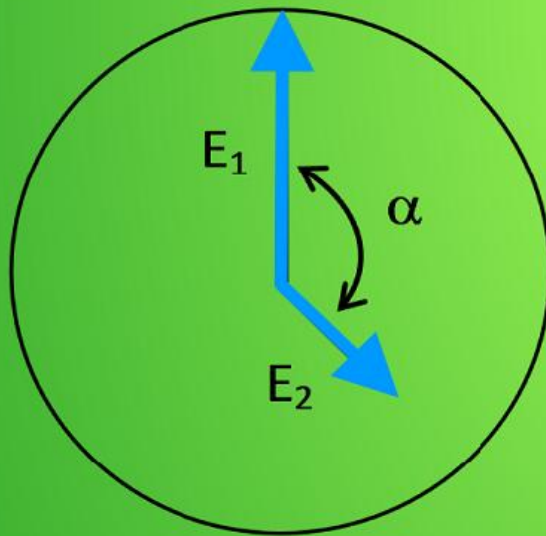
# Relación de Fase e Índice horario

**Relación de fase** Se define como el ángulo de atraso en grados, de la Fem  $E_2$  de BT respecto a la Fem  $E_1$  de AT y se expresa mediante el índice horario.

Si se supone ubicada la Fem de AT a las 12 en la esfera de un reloj ideal.

La Fem de BT será siempre un múltiplo de  $30^\circ$  y caerá justamente sobre alguna hora del reloj.

Entre cada hora existen  $30^\circ$  por lo que el índice horario se especifica mediante  $^\circ / 30^\circ$ :



Existen 4 grupos de conexión normalizados: 0, 5, 6, y 11

Identificación	Diagrama		Esquema		Relación de tensiones compuestas (*) U <sub>AT</sub> / U <sub>BT</sub>	Antigua denominación V.D.E.	
	Denominación C.E.I.	A.T.	B.T.	A.T.			B.T.
0°	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$	A1
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$	A2
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$	A3
150°	Dy5					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C1
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	C2
	Yz5					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C3
180°	Dd6					$\frac{N_A}{N_B}$	B1
	Yya					$\frac{N_A}{N_B}$	B2
	Dz6					$\frac{2N_A}{3N_A}$	B3
-30°	Dy11					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D1
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	D2
	Yz11					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D3

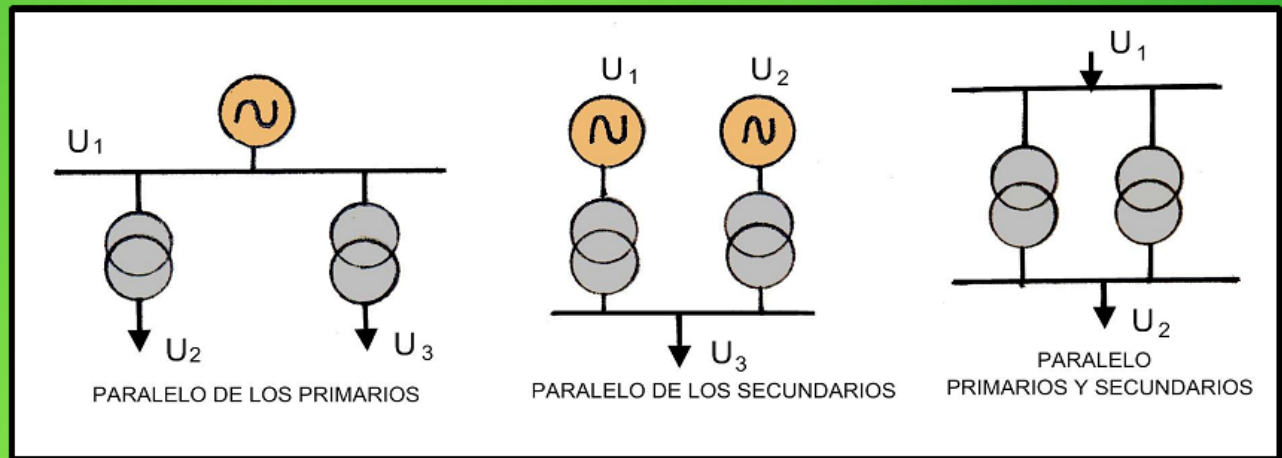
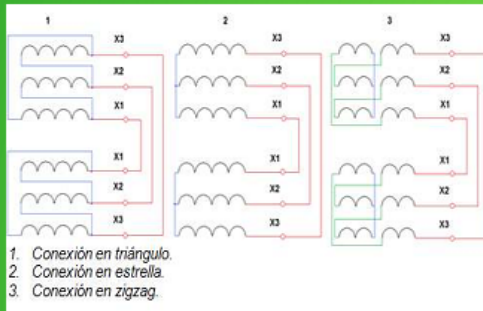
Grupos de conexión normalizados



# Funcionamiento en Paralelo de Transformadores

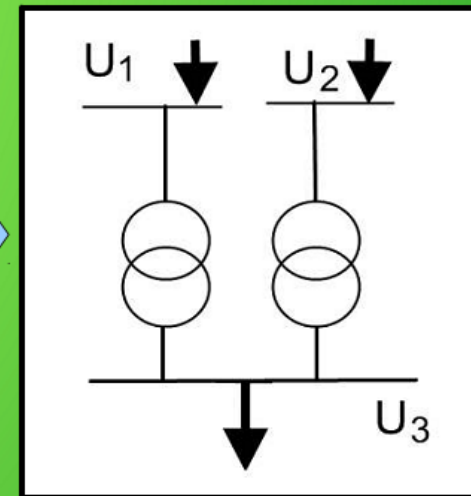


# Definiciones

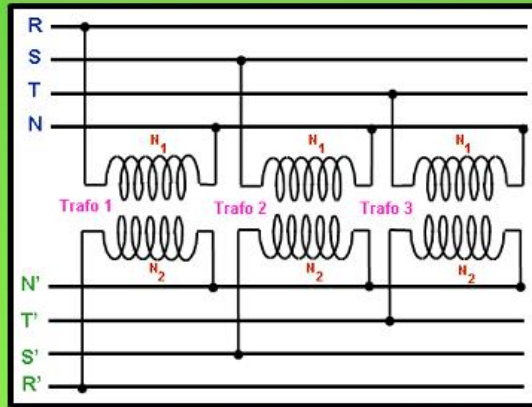


Se entiende el servicio en paralelo de transformadores, la forma de funcionamiento que se da cuando existen dos o mas transformadores con sus devanados primarios conectados eléctricamente en paralelo entre si, y además por otro lado, también están eléctricamente conectados en paralelo sus devanados secundarios entre si.

El caso de transformadores que toman energía con diferentes tensiones primarias de una misma fuente, pero con sus secundarios eléctricamente en paralelo es un caso especial de paralelo de transformadores donde evidentemente la relación de transformación nominal de ellos deberá ser diferentes a efectos de tener iguales tensiones secundarias.



## Condiciones Ideales de funcionamiento



- *Al unir los bornes secundarios y sin que exista carga conectada a ellos, los transformadores solo deben tomar su corriente de vacío. Esto implica que no deben existir corrientes secundarias si no existe carga*
- *A efectos de obtener el máximo aprovechamiento de los transformadores en carga, las corrientes que aporte a la carga cada uno de ellos, debería ser la nominal.*
- *Para una corriente de carga dada, las corrientes que aportan cada uno de los transformadores deben estar en fase con la corriente de carga a efectos de que sus magnitudes sean mínimas para dicha demanda.*



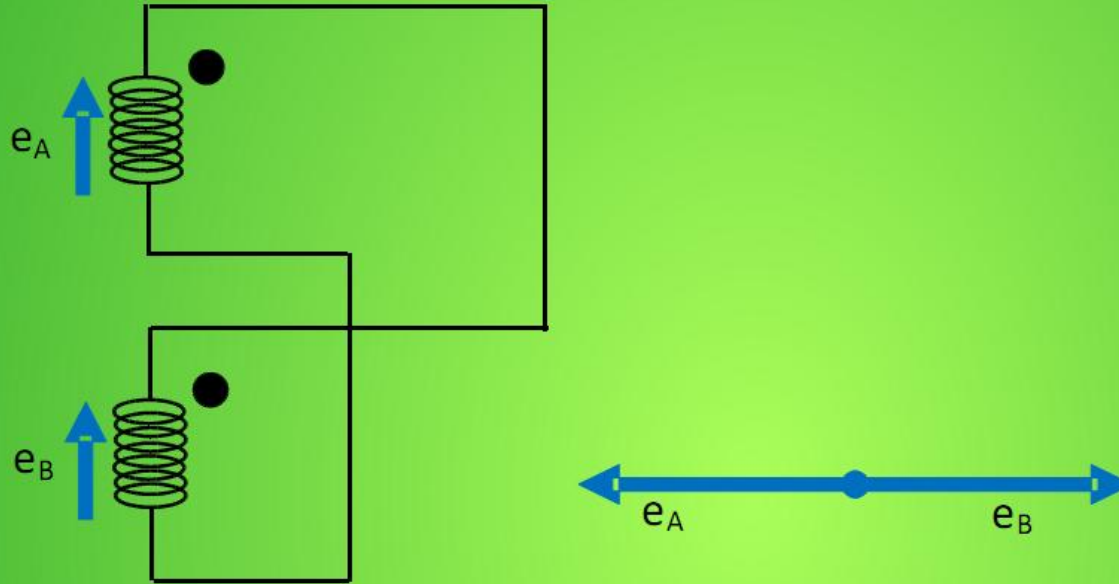
## Condiciones a cumplir

1. *Los borne a unir deben tener la misma polaridad*
2. *Las relaciones nominales de transformación  $K_n$  deben ser iguales*
3. *Las tensiones nominales porcentuales de cortocircuito  $u_{zn}\%$  deben ser iguales*
4. *Compatibilidad de los grupos de conexión*
5. *Igualdad de las secuencias de las tensiones secundarias*

**Existen dos condiciones que no son imprescindibles pero convenientes:**

6. *Las componentes de las tensiones porcentuales nominales de cortocircuito deben ser iguales.*
7. *Las potencias aparentes nominales  $S_n$  no deben diferir en mas de 3 a 1*

# Los bornes a unir deben tener la misma polaridad



Las tensiones instantáneas entre bornes secundarios a unir deben ser iguales y estar en oposición a efectos que la tensión resultante sea nula, y no circule corriente entre los transformadores

## Las relaciones nominales de transformación $K_n$ deben ser iguales

Cuando las tensiones primarias difieran las relaciones de transformación deben ser tales que las tensiones secundarias en vacío sean iguales.

(Las normas establecen que si existen tomas de regulación de tensión, los márgenes nominales de ajuste deben ser iguales con una tolerancia de  $\pm 0.5\%$  o  $1/10$  de la tensión nominal de cortocircuito  $u_{zn}$  )

# Compatibilidad de los grupos de conexión

**Son compatibles** todos los transformadores que pertenecen al mismo grupo de conexión, es decir que tienen *el mismo índice horario*.

**Tienen compatibilidad relativa** los montajes con desfases de  $180^\circ$

Grupo 0 y 6: Se hacen compatibles cambiando el conexionado interno

Grupo 5 y 11: Se hacen compatibles cambiando el conexionado interno y además la secuencia

**Son Incompatibles** los montajes del grupo 0 o 6 con el grupo 5 o 11

## Las potencias aparentes nominales $S_n$ no deben diferir en más de 3 a 1

Esta última condición es orientadora pero poco rigurosa, surge de consideraciones prácticas:

- Está relacionada con la igualdad de las componentes de las tensiones nominales porcentuales de cortocircuito, ya que en transformadores de diferente potencia los triángulos de cortocircuito pueden diferir considerablemente
- Además de existir una corriente de circulación entre transformadores, el valor porcentual de esta se hace significativo en el transformador de menor potencia