

# Transformadores de medida y protección

## Conceptos generales

Daniel Slomovitz

Instituto de Ingeniería Eléctrica

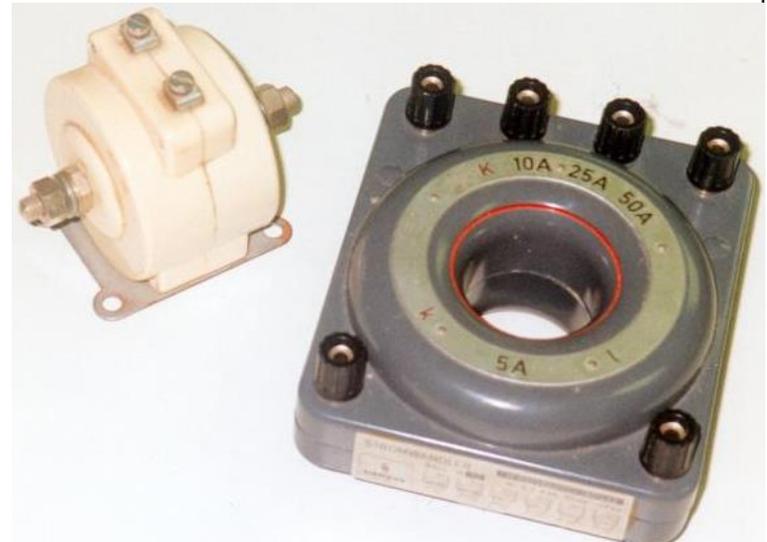
Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

2021

# Transformadores

- Todo transformador transforma tanto tensión como corriente.
- La distinción la hace las características específicas de valores de tensión y corriente, y de exactitud.



# Transformadores en subestación 150 kV



Transformadores de medida

# Transformadores de media tensión patrones



Transformadores de medida

# Transformadores de tensión y corriente de alta tensión



Transformadores de medida

# Relaciones múltiples



Transformadores de medida

# Pinzas de corriente

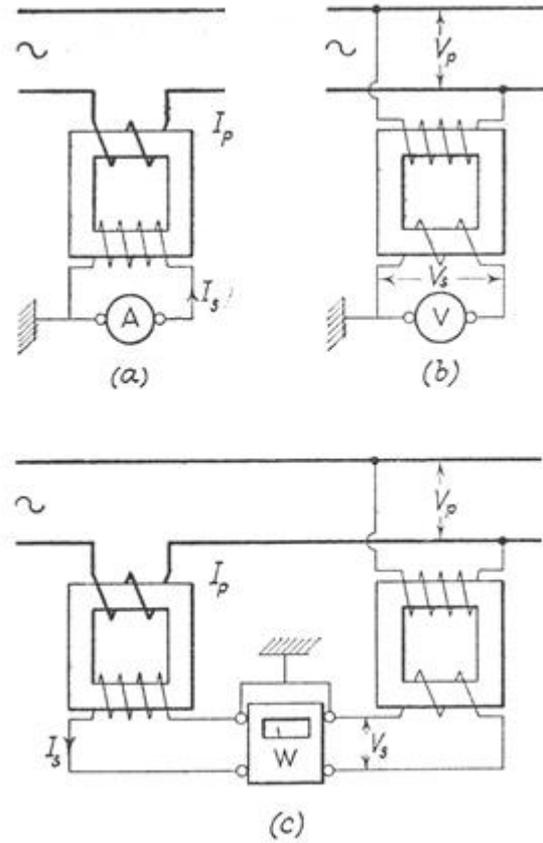
Moderada exactitud

Práctica para mediciones en campo



Transformadores de medida

# Conexiones



# Desarme CT 150 kV

## Primario



# Retiro de aislación



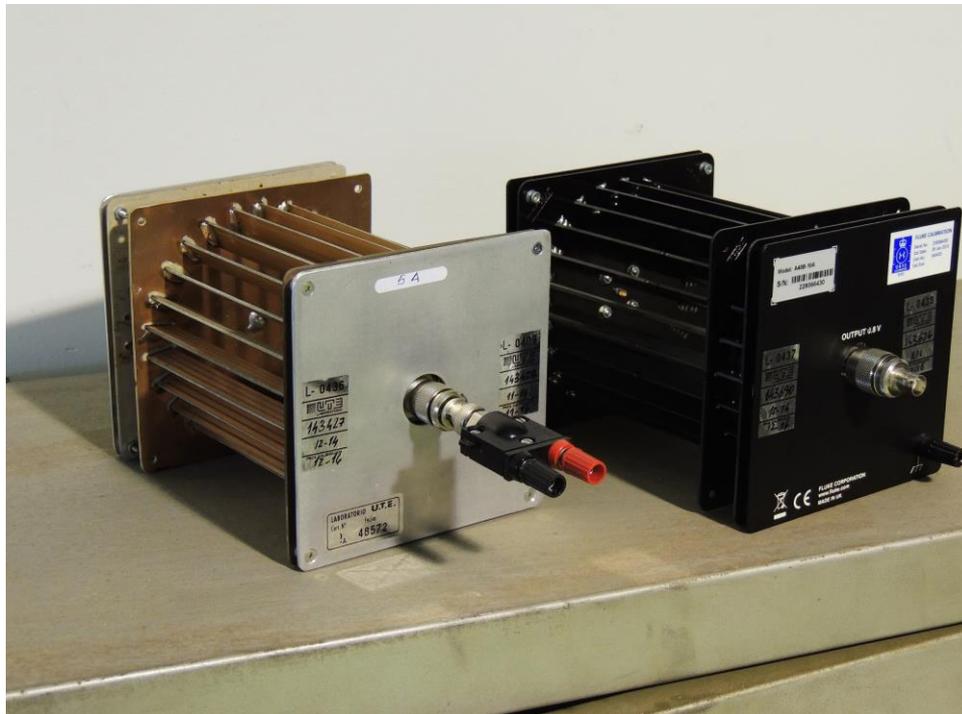
# Pantalla



# Secundarios



# Shunt



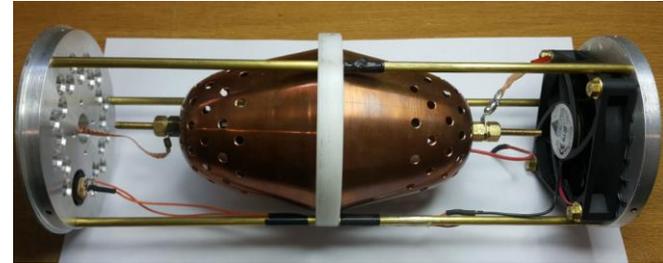
# CT vs. Shunt - Ventajas

Transformador de corriente	Shunt resistivo
Mantiene aislación entre elemento a medir y medidor	No tiene aislacion galvanica
La potencia consumida es independiente de la corriente	La potencia consumida aumenta proporcionalmente a la corriente (tensión constante)
Caída de tensión pequeña	Caída de tensión importante para ciertas aplicaciones
La exactitud no depende de la temperatura	El calentamiento produce variaciones en la exactitud
Muy estable	Varía con el tiempo

# CT vs. Shunt - Desventajas

Transformador de corriente	Shunt resistivo
Grandes dimensiones y peso.	Pequeño y liviano
Alto costo	Bajo costo
Funciona solo en ac	Apto para ac dc
Rango de frecuencias reducido	Amplio ancho de banda
Satura con altas corrientes	Comportamiento lineal

# Divisores de tensión



D. Slomovitz, L. Trigo, G. Aristoy and M. Brehm, "Resistor dividers for power quality meters," *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, Ottawa, ON, Canada, 2016.

# VT vs. Divisor de tensión

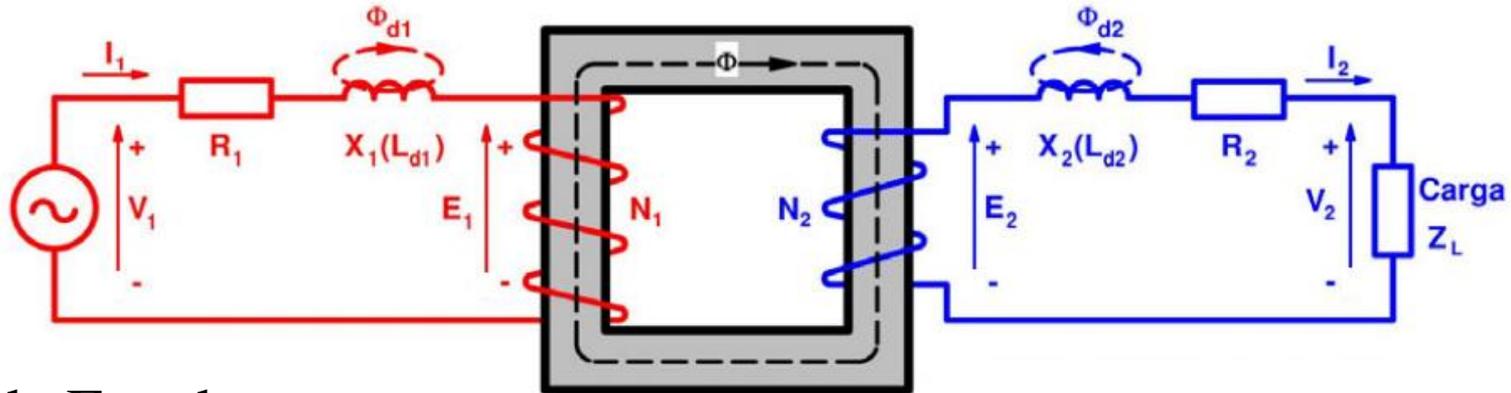
## ventajas

Transformador de tensión	Divisor de tensión
Mantiene aislación entre elemento a medir y medidor	No tiene aislación galvánica. Un extremo conectado a tierra.
Baja carga sobre el sistema a medir.	La potencia consumida puede ser alta en ciertas aplicaciones.
La exactitud no depende de la temperatura	El calentamiento produce variaciones en la exactitud
Exactitud independiente de cercanía de objetos.	Alta influencia de capacidades a objetos cercanos.
Muy estable	Varía con el tiempo

# VT vs. Divisor de tensión desventajas

Transformador de tensión	Divisor de tensión
Grandes dimensiones y peso.	Pequeño y liviano
Alto costo	Bajo costo
Funciona solo en ac	Apto para ac dc
Rango de frecuencias reducido	Amplio ancho de banda
Rango de tensión reducido	Comportamiento lineal

# Fundamentos



## Ley de Faraday

$$e_1 = \frac{d \Psi_1}{d t} = N_1 \frac{d \Phi}{d t} \quad e_2 = \frac{d \Psi_2}{d t} = N_2 \frac{d \Phi}{d t}$$

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi_M$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f \Phi_M$$

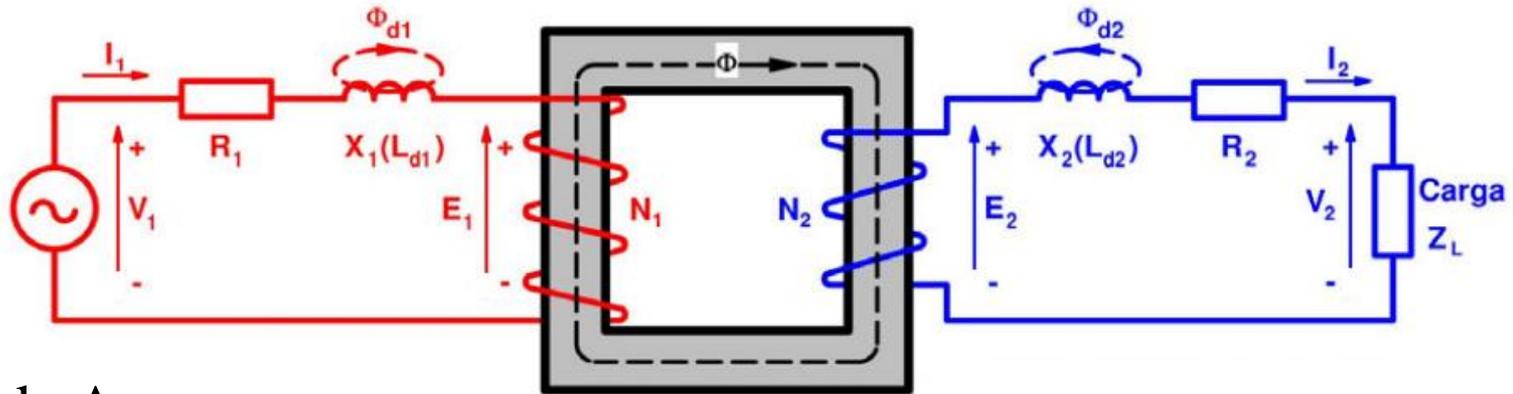
$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_1 + j X_1 \bar{I}_1$$

$$4.44 = 2 \pi / \sqrt{2}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\bar{V}_2 = \bar{E}_2 - R_2 \bar{I}_2 - j X_2 \bar{I}_2$$

# Fundamentos

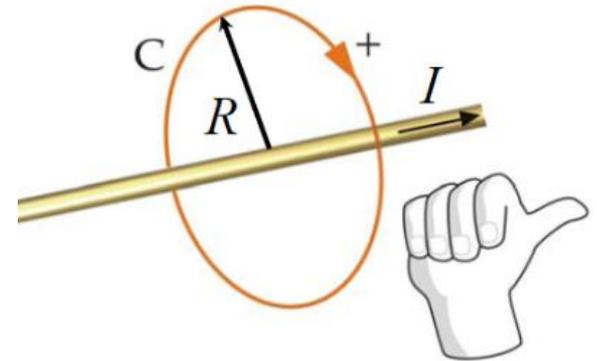


Ley de Ampere

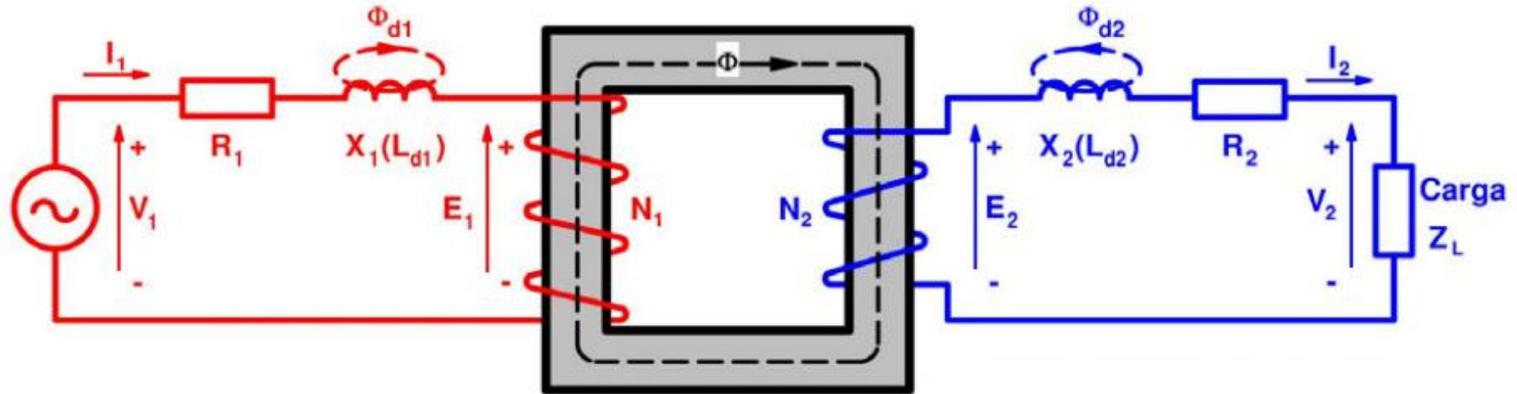
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I$$

$$N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2 = H l = (B/\mu) l$$

$$N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_0$$



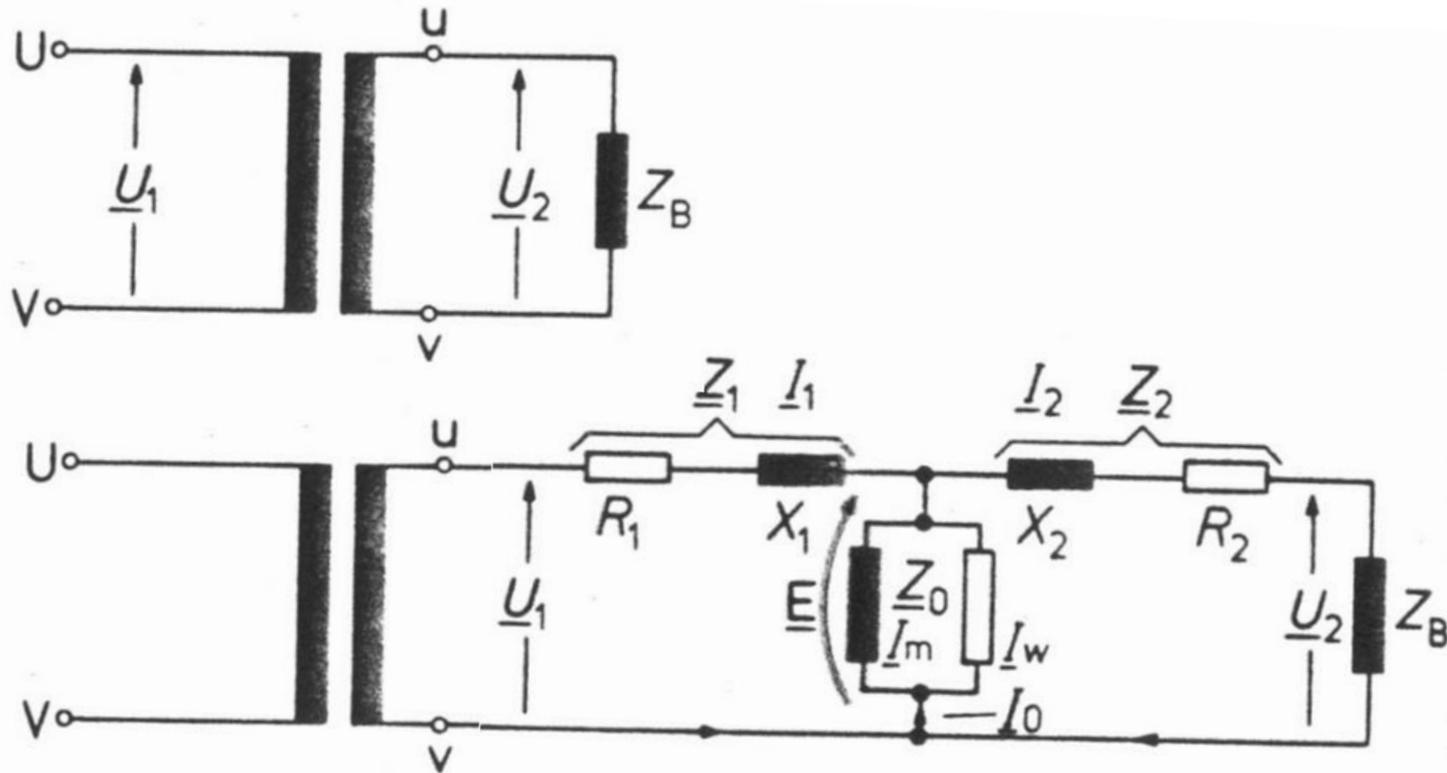
# Fundamentos



Transformador ideal

$$\begin{aligned} V_1/V_2 &= N_1/N_2 \\ I_1/I_2 &= N_2/N_1 \\ S_1 &= S_2 \end{aligned}$$

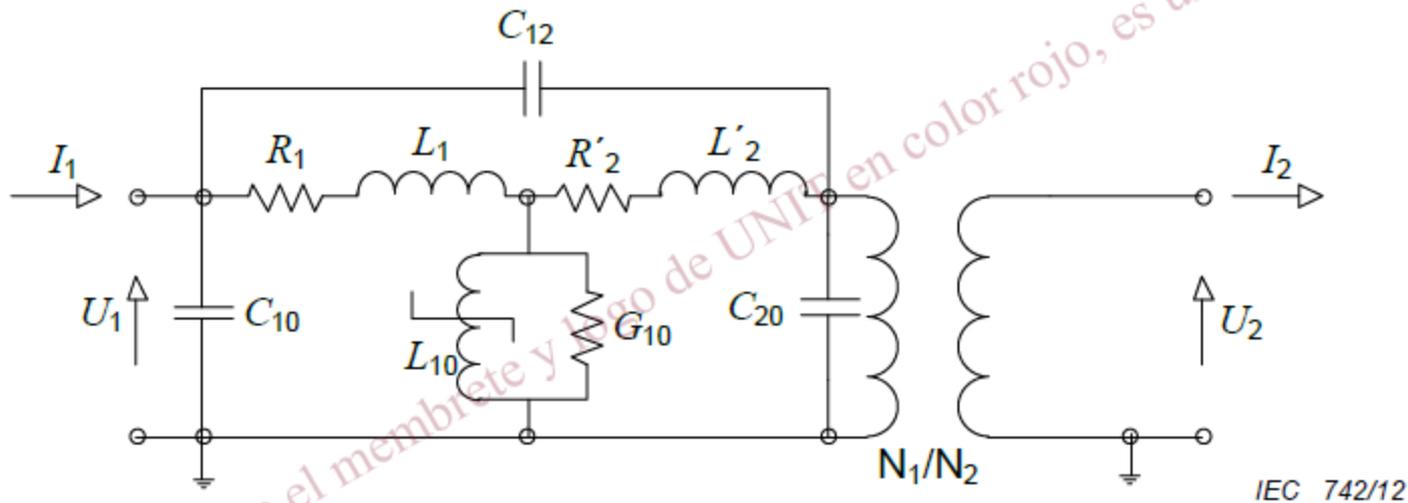
# Modelo de transformador



Reglamento de pruebas del PTB, Transformadores de medición.

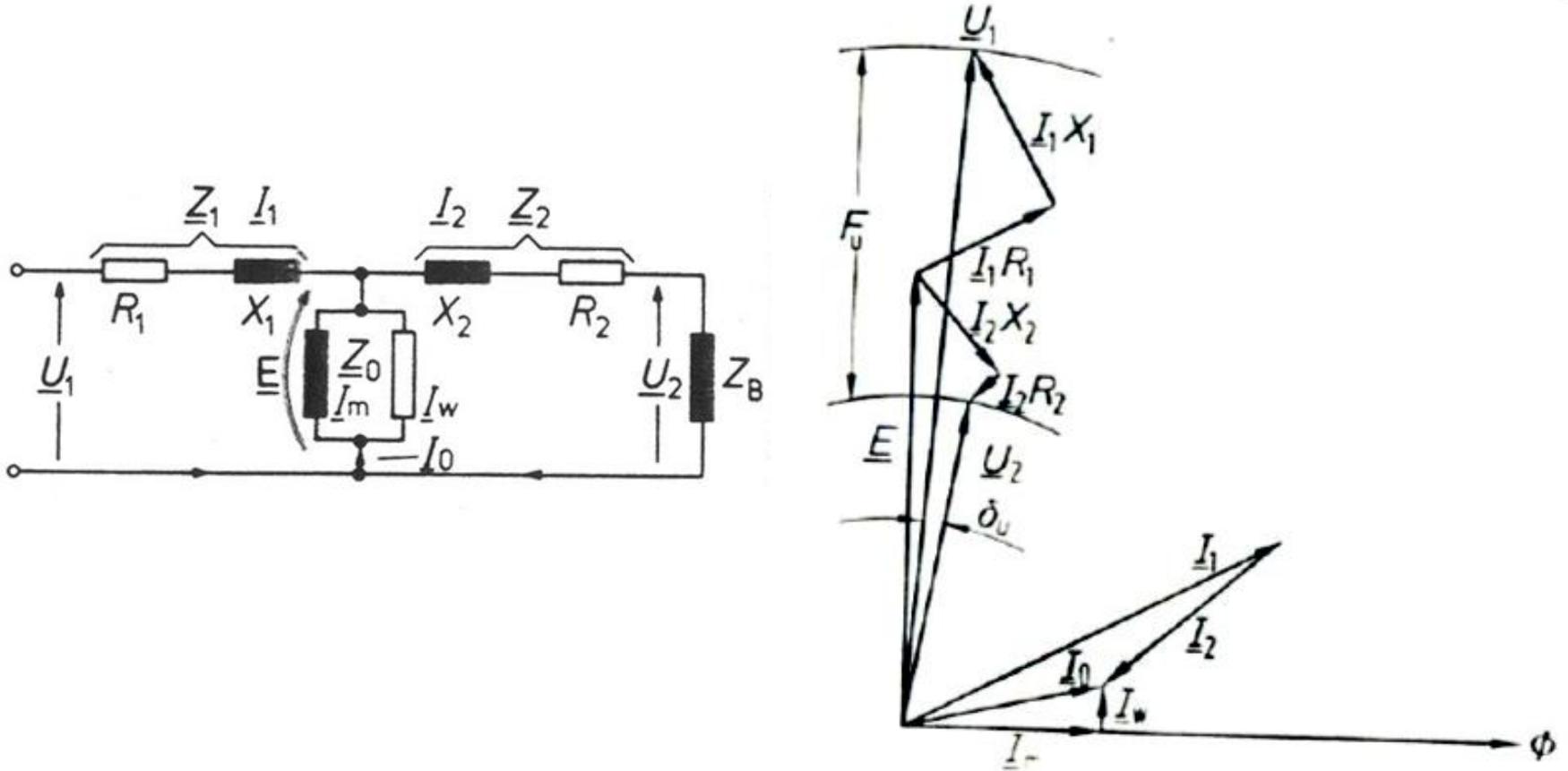
Transformadores de medida

# Capacidades parásitas



IEC/TR 61869-103

# Origen de los errores



Reglamento de pruebas del PTB, Transformadores de medición

Fig. 7a

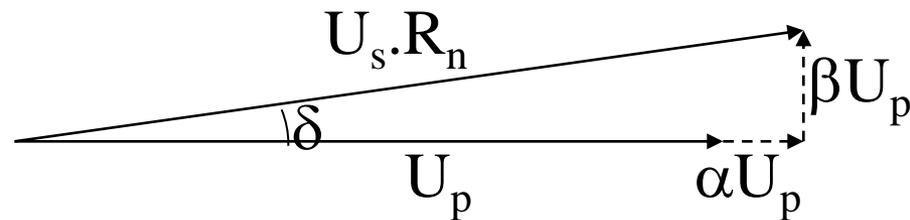
# Origen de los errores en VT

- Los errores en los transformadores de voltaje, a bajas frecuencias, están determinados principalmente por las caídas de tensión en las ramas serie debidas a la **corriente de magnetización y la corriente de carga**.
- Cuanto más baja sean las impedancias serie, menores serán los errores.
- Idealmente, los errores son nulos si las impedancias valen cero y no se consideran otros efectos de segundo orden.

# Disminución de los errores en VTs

- Para reducir el valor de las caídas de tensión
  - se reduce la impedancia serie usando grandes núcleos y arrollados de gran sección y poca cantidad de espiras,
  - se reduce la corriente de salida aumentando la impedancia de la carga,
  - se agregan elementos de compensación.

# Especificación de errores VT



$$U_s R_n = U_p (1 + \alpha + j\beta) \approx U_p (1 + \alpha)$$

$$\delta \approx \text{Ar tg } \beta \approx \beta$$

Si  $\alpha > 0$ , la tensión de salida es mayor que la que debería ser.

Si  $\beta > 0$ , la tensión de salida adelanta a la de entrada.

Unidades: %, ppm – min, crad,  $\mu\text{rad}$

# Origen de los errores en CT

- Los errores en los transformadores de corriente, a bajas frecuencias, están determinados principalmente por la **corriente de magnetización**.
- Cuanto más alta sea la impedancia magnetizante, menores serán los errores.
- Idealmente, los errores son nulos si la impedancia magnetizante vale infinito y no se consideran otros efectos de segundo orden.

# Error en función de parámetros constructivos

$$|F| = \frac{I_E}{\omega w_2^2 A_E \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \cdot Z$$

En las mismas significan:

$I_E$  longitud del camino magnético en el núcleo

$w_2$  número de espiras del secundario

$A_E$  área transversal del núcleo

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$  constante del campo magnético

$\mu_r$  permeabilidad relativa

$Z$  impedancia del circuito secundario

# Influencia de la carga

- En la transparencia anterior, además de parámetros constructivos, vemos que el error es proporcional a la impedancia del circuito secundario, incluyendo la carga.
- Esto se debe a que aumenta la tensión sobre la rama magnetizante haciendo aumentar  $I_0$ , lo que redundará en un aumento del error.

# Variación del error con el factor de potencia de la carga y la corriente

Load: 30 VA, range: 200 A, class: 0.2s				
	$\lambda=0.8$		$\lambda=1$	
I (%)	Ratio (%)	$\delta'$	Ratio (%)	$\delta'$
<b>1</b>	-0.21	9	-0.06	13.5
<b>5</b>	-0.15	5.2	-0.02	10.7
<b>20</b>	-0.12	2.2	-0.08	7
<b>100</b>	-0.04	-0.6	-0.03	2.5
<b>120</b>	-0.03	-0.8	-0.03	3

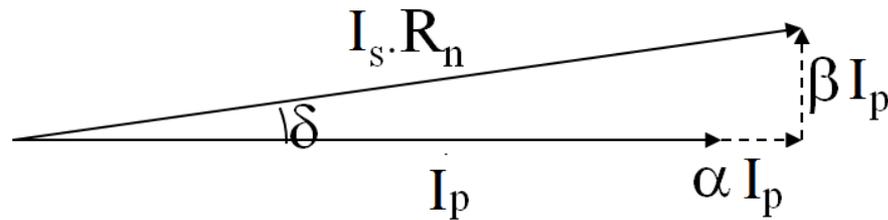
Burden for CTs ; IEC 61869-2		
Burden	$\lambda$	Range
Z < 1 VA	Not permitted	25% < Z < 100% of Zn
Z < 5 VA	1 (only)	
Z > 5 VA	0.8 (only)	

CT Limits of Errors. IEC 61869-2				
	0.2s Class		0.5 Class	
I (%)	$\epsilon$ (%)	$\delta$ (min)	$\epsilon$ (%)	$\delta$ (min)
<b>1</b>	0.75	30		
<b>5</b>	0.35	15	1.5	90
<b>20</b>	0.2	10	0.75	45
<b>100</b>	0.2	10	0.5	30
<b>120</b>	0.2	10	0.5	30

# Disminución de los errores en CTs

- Para reducir el valor de la corriente magnetizante
  - se aumenta la impedancia magnetizante usando grandes núcleos y arrollados de gran cantidad de espiras,
  - se reduce la impedancia de carga, lo que baja tensión en la rama magnetizante,
  - se agregan elementos de compensación.

# Especificación de errores CT



$$I_s R_n = I_p (1 + \alpha + j\beta) \approx I_p (1 + \alpha)$$

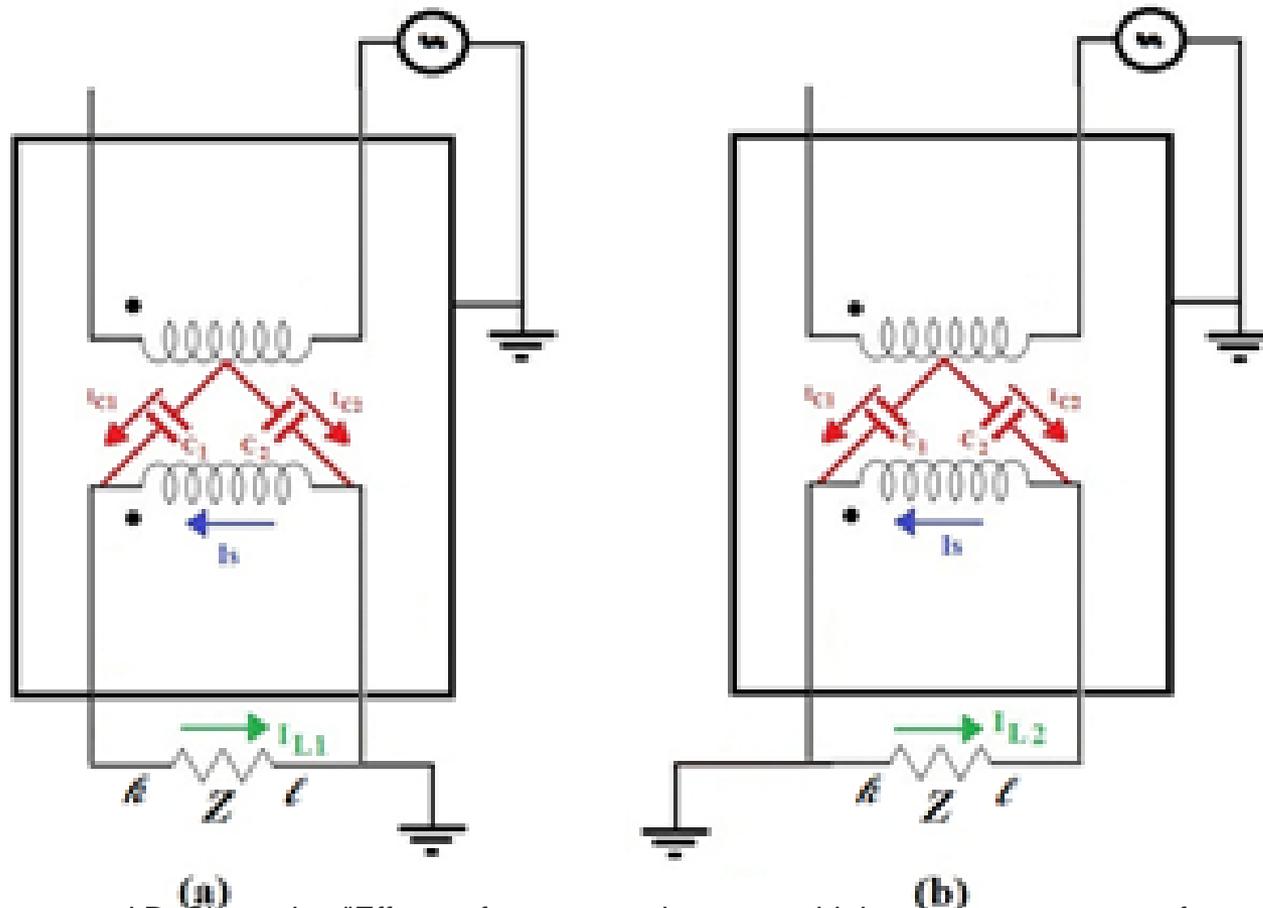
$$\delta \approx \text{Ar tg } \beta \approx \beta$$

Si  $\alpha > 0$ , la corriente de salida es mayor que la que debería ser.

Si  $\beta > 0$ , la corriente de salida adelanta a la de entrada.

Unidades: %, ppm – min, crad,  $\mu\text{rad}$

# Influencia de la presencia de alta tensión en el error de CTs



# Transformador capacitivo

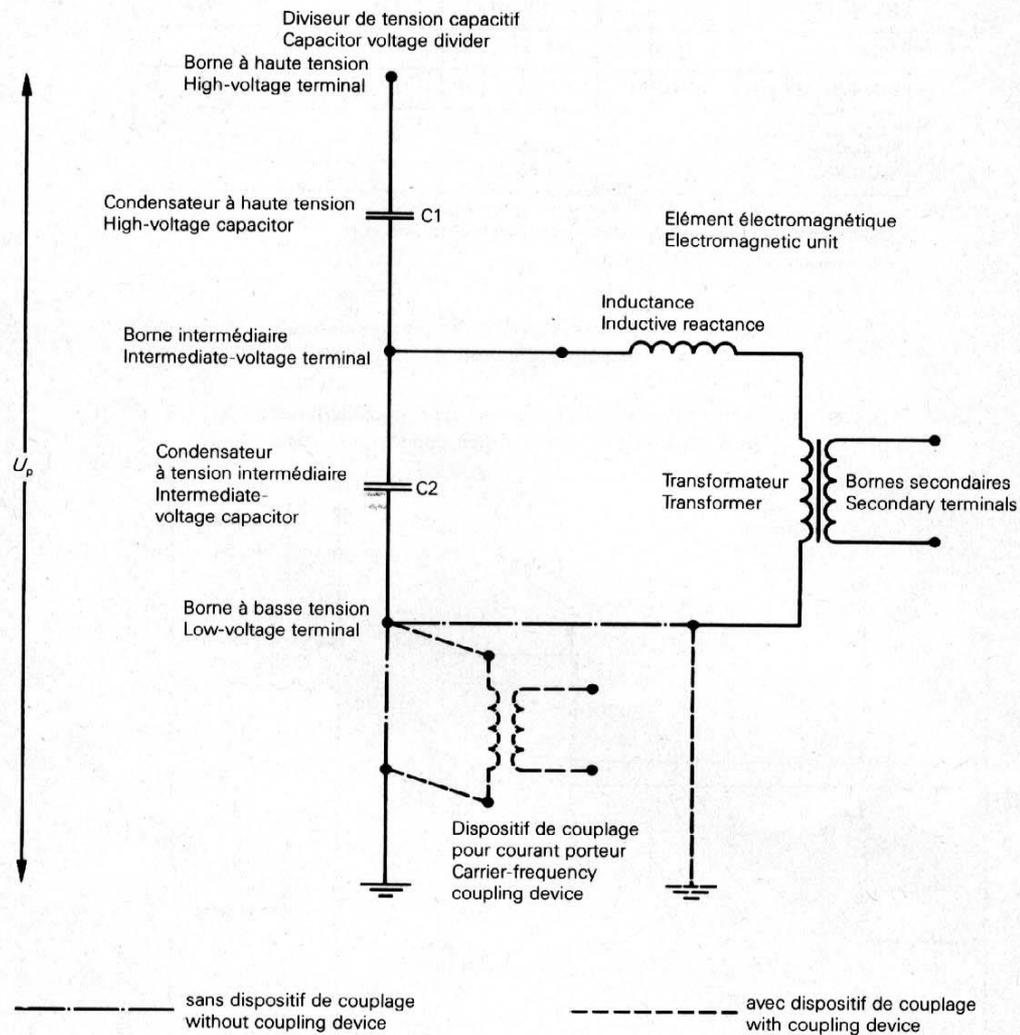


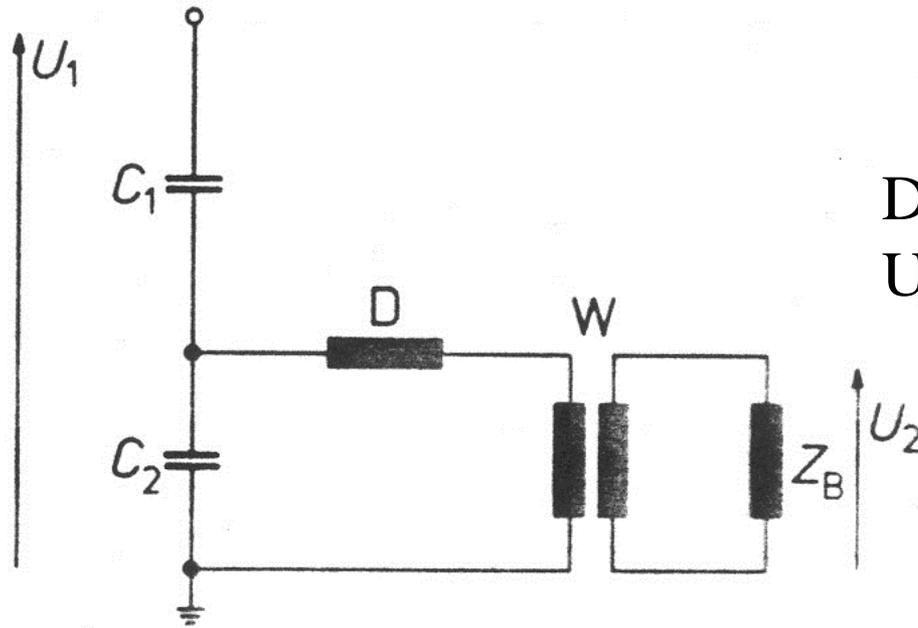
FIG. A1. — Schéma type d'un transformateur condensateur de tension.  
Typical diagram for a capacitor voltage transformer.

596/86

Norma IEC 61869-5

# Transformador capacitivo

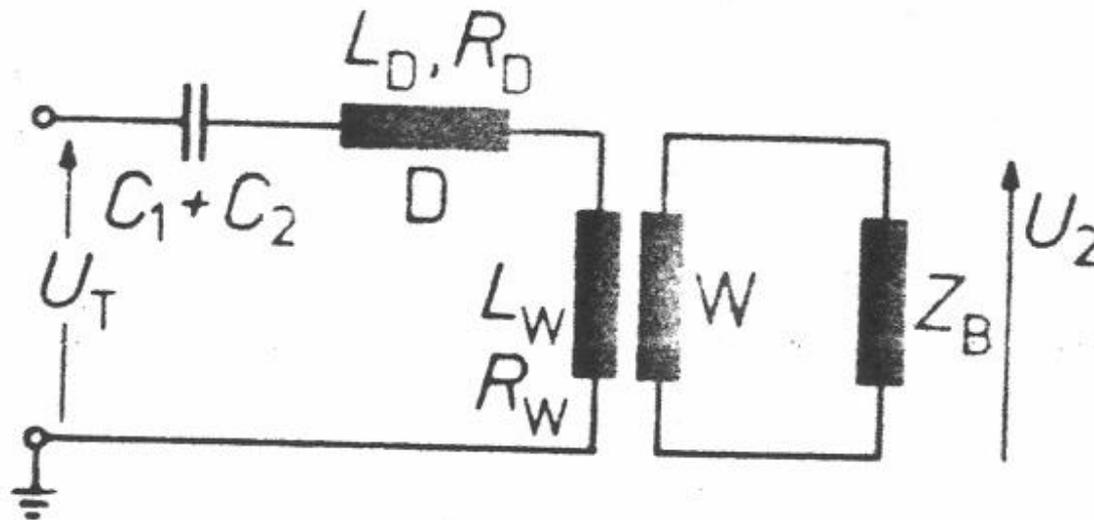
## Diagrama simplificado



Divisor capacitivo  
 $U_{out} = U_1 \cdot C_1 / (C_1 + C_2)$

# Transformador capacitivo

## Circuito equivalente



$$LC = 1/\omega^2$$

# Transformador capacitivo

186 © IEC 1987

— 81 —

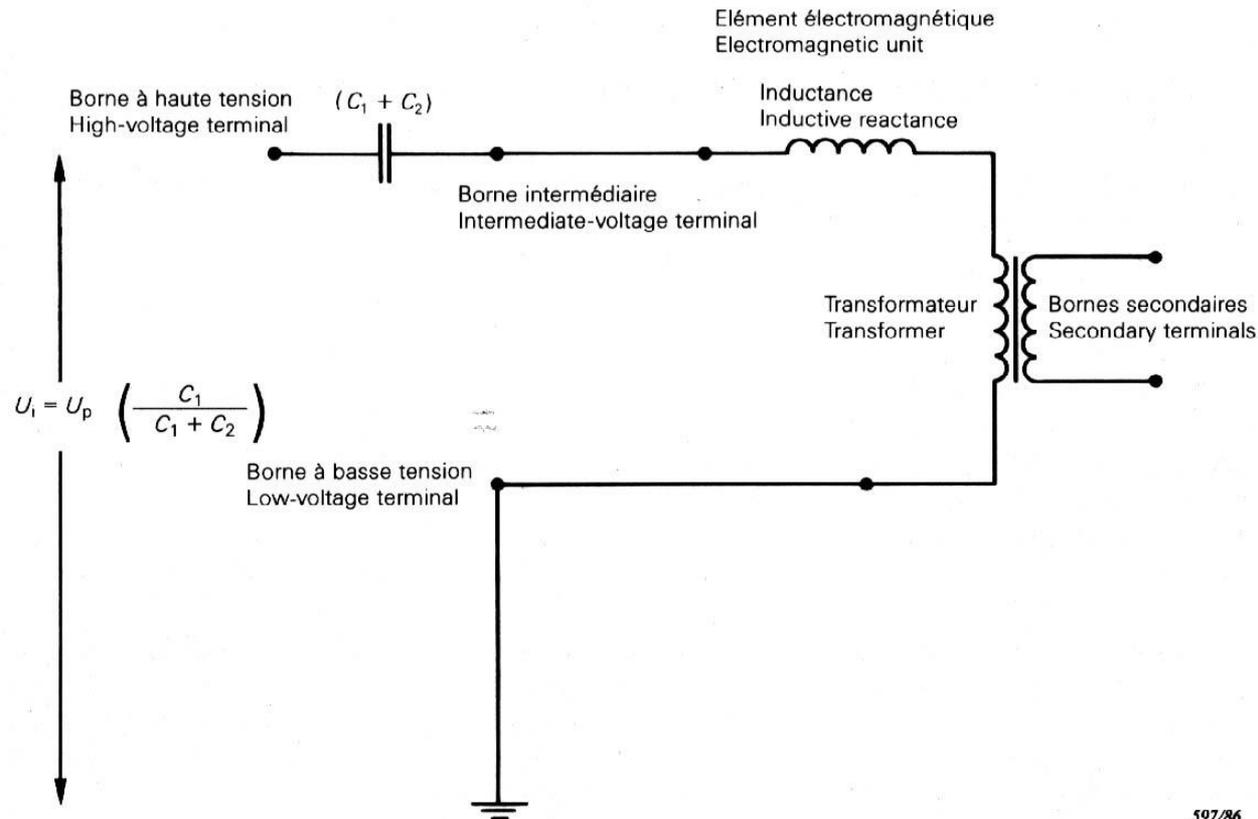
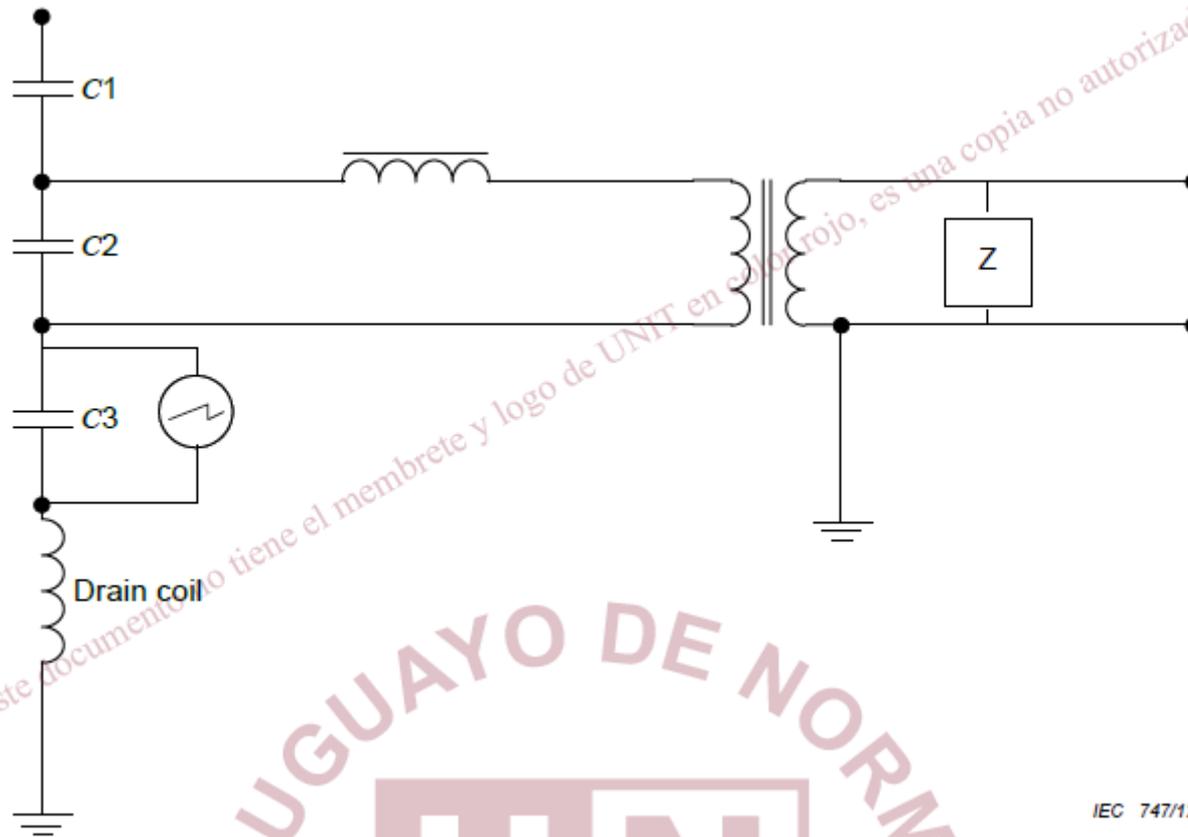


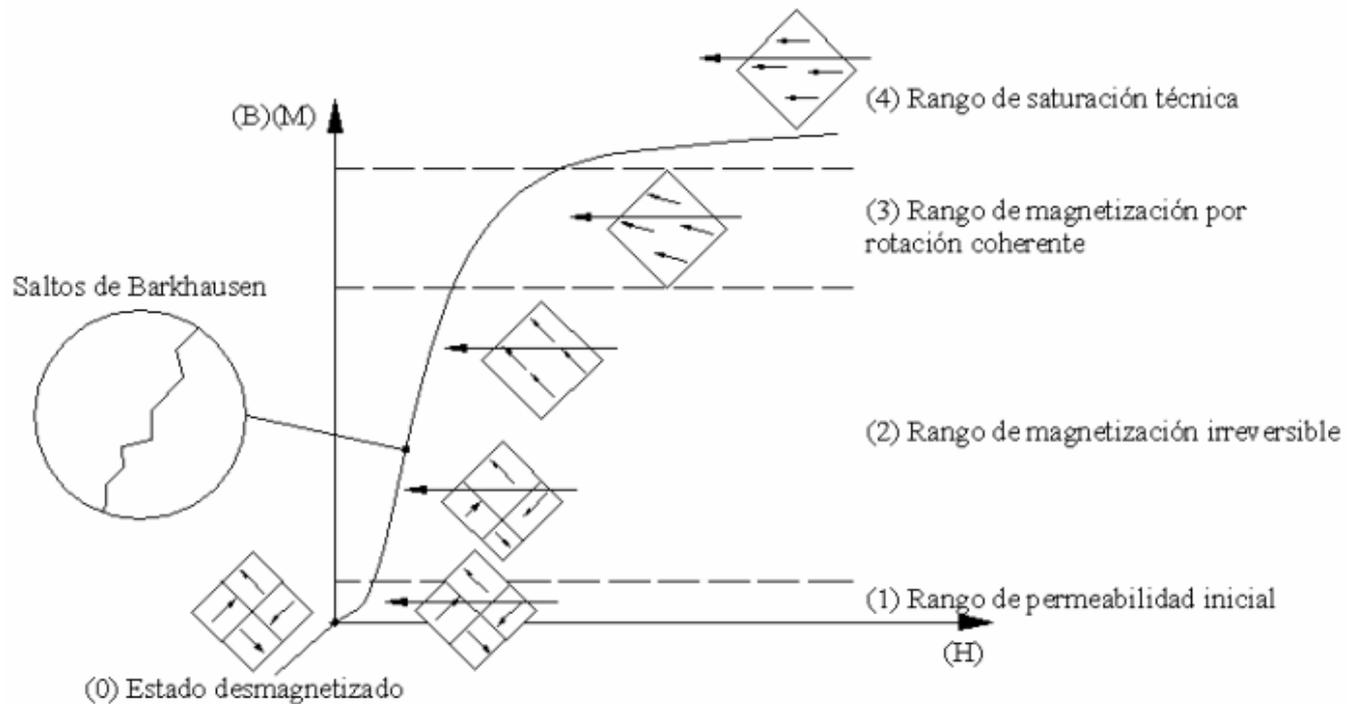
FIG. A2. — Schéma du circuit équivalent d'un transformateur condensateur de tension.  
Diagram of equivalent circuit for a capacitor voltage transformer.

Norma IEC 61869-5

# Salida para medición de armónicos

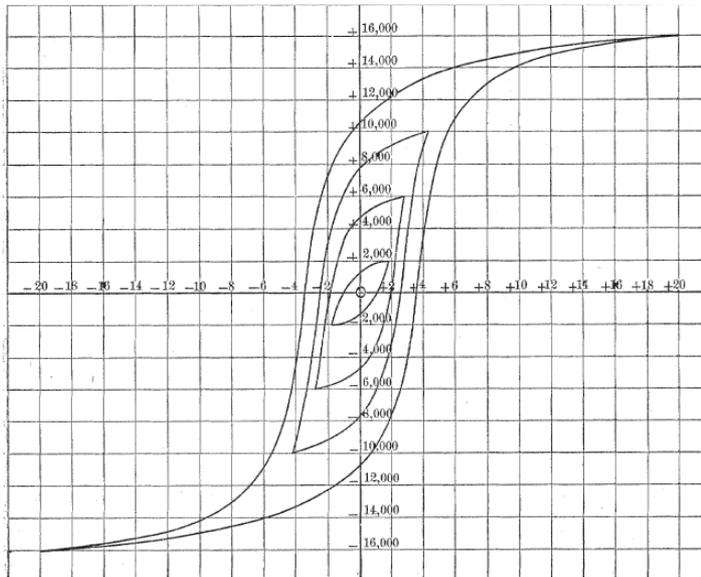


# Curva de magnetización



MODELIZACIÓN DE LA HISTÉRESIS MAGNÉTICA Y SU APLICACIÓN AL CÁLCULO NUMÉRICO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS, Tesis doctoral de ALFREDO DE BLAS DEL HOYO, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, BARCELONA-SORIA, 2005

# Ciclo de histéresis



## Saturación:

- Disminución de la impedancia magnetizante.
- CT: gran aumento de los errores. Distorsión en la forma de onda.
- VT: puede ser tolerable cierto grado de saturación.

# Ciclo de histéresis

- Pérdidas de energía ( $P_h$ )
  - Fricción molecular
  - Ecuación semiempírica de Steinmetz,  $\alpha=1,8$

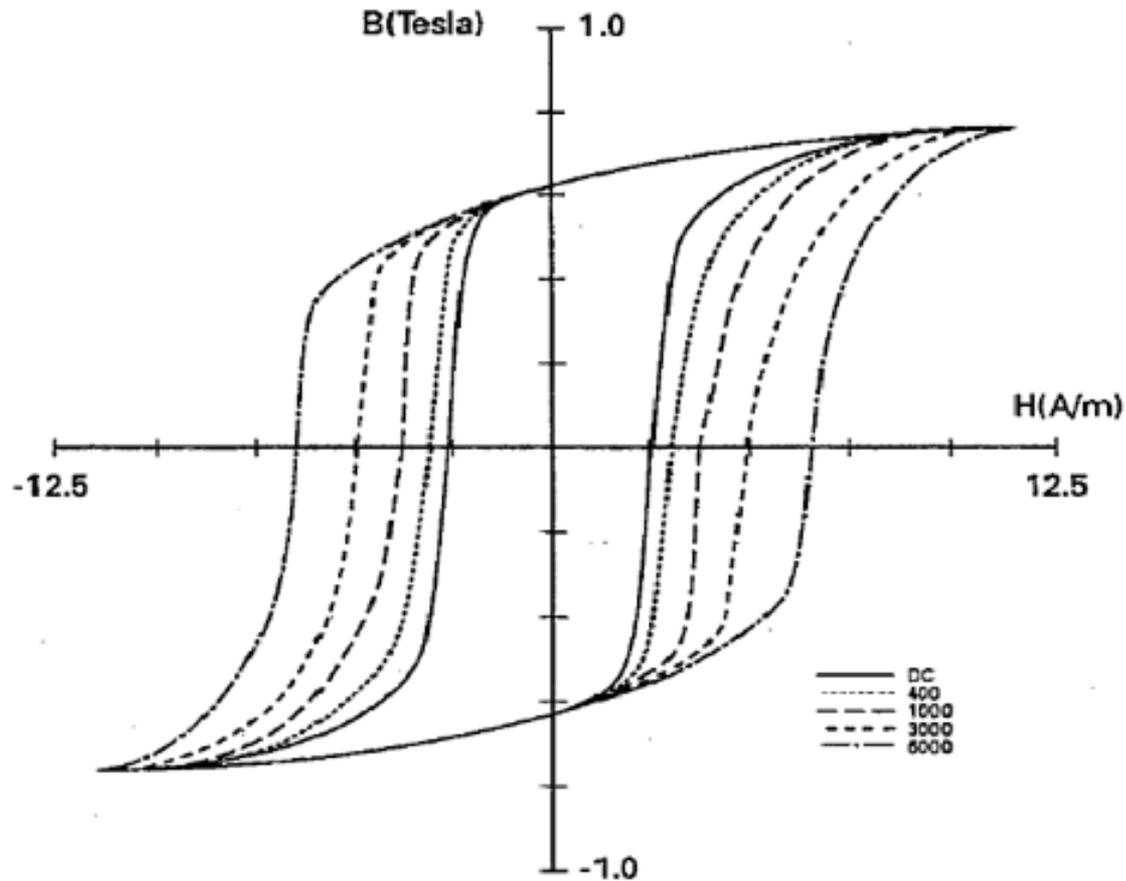
$$P_h = \eta_h f B_m^\alpha$$

- Corrientes parásitas ( $P_e$ )

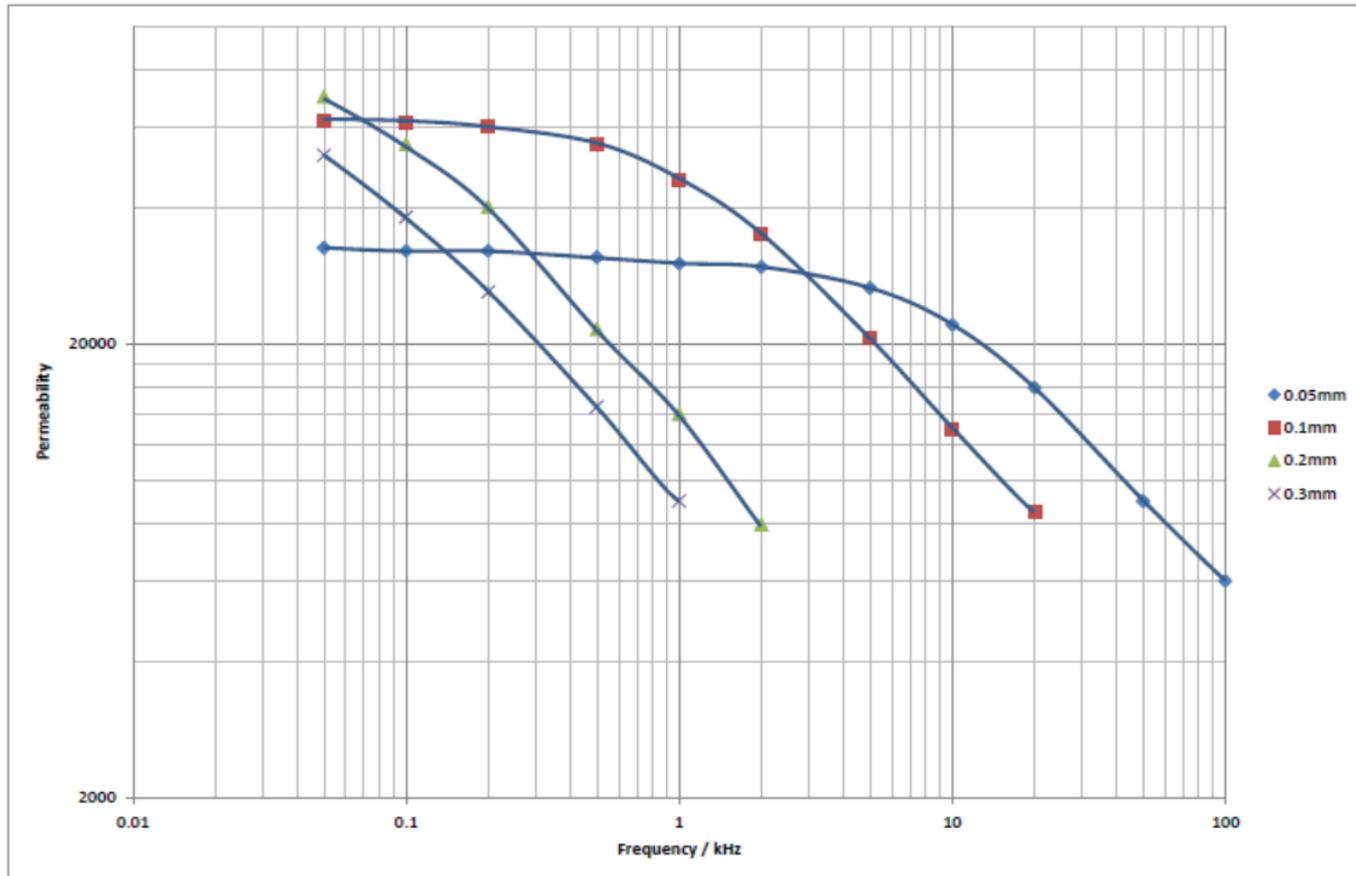
$$P_e = k' V_{\text{RMS}}^2$$

Correction of power transformer no-load losses, measured under nonsinusoidal voltage waveforms, D. Slomovitz, IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, 1989 , Volume: 136 , Issue: 1, Pages: 42 – 47.

# Variación del ciclo de histéresis con la frecuencia



# Variación de permeabilidad con la frecuencia



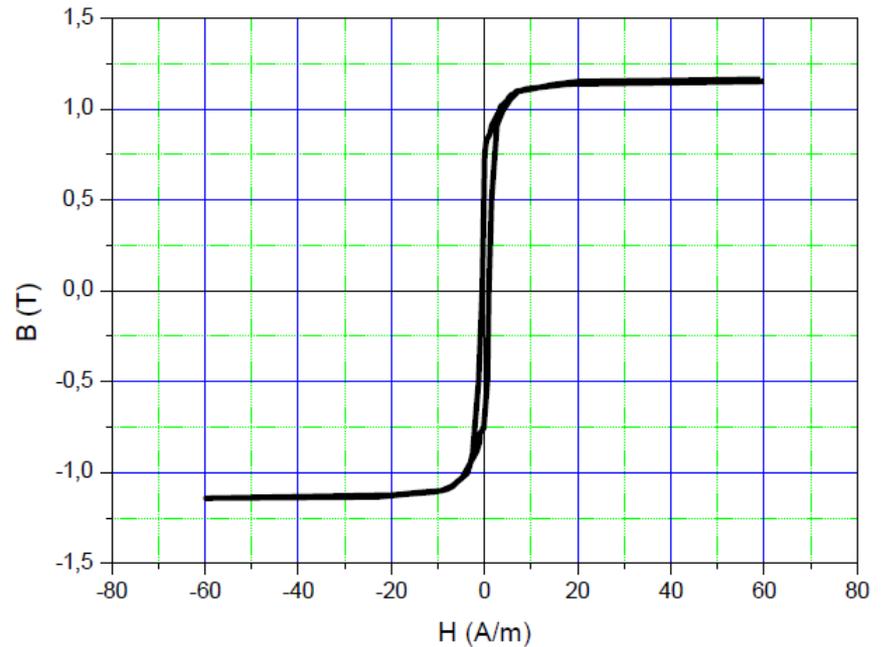
# Variación del error con la frecuencia

- Baja influencia en transformadores inductivos, gran ancho de banda.
- Alta influencia en transformadores capacitivos. No sirven para mediciones de armónicos.

# Núcleos

## Nanocristalinos

PERMEABILIDADE MÁXIMA	60 Hz	280.000
PERMEABILIDADE MÉDIA INICIAL	50 Hz	98.000
PERMEABILIDADE MÍNIMA	50 Hz	40.000
INDUÇÃO DE SATURAÇÃO $B_{SAT}$	T	1,25
TEMPERATURA DE CURIE	°C	560
DENSIDADE	g/cm <sup>3</sup>	7,3
MAGNETOSTRICÇÃO, $\lambda_s$		$5 \times 10^{-6}$
RESISTIVIDADE	$\mu\Omega\text{-cm}$	130



# Transformadores de medición vs. protección

- Medición
  - Bajos errores.
  - Bajo nivel de saturación.
- Protección
  - Admite errores mayores.
  - Alto nivel de saturación.

# Errores en transformadores de medida

- CT
  - Asegura exactitud entre 1% y 120 % de  $I_n$ .
  - Valores típicos: 0.1% a 0.5%
- VT
  - Asegura exactitud entre 80% y 120 % de  $V_n$ .
  - Valores típicos: 0.1% a 0.5%

# Errores en transformadores de protección

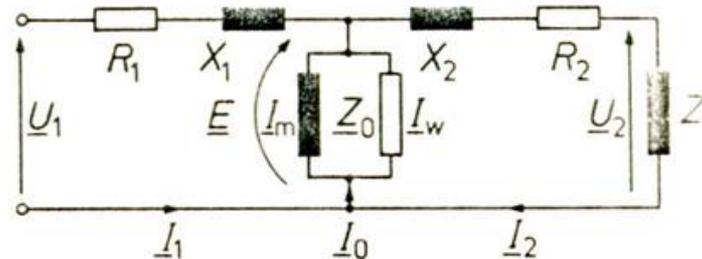
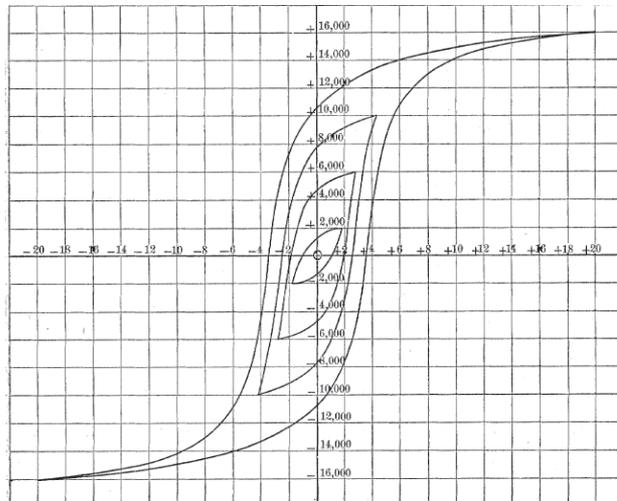
- Admiten errores mayores que los de medida (1%)
- VT
  - Comparte el mismo núcleo que el de medida.
  - Rango de voltaje extenso.
  - Respuesta transitoria.
- CT
  - Alto nivel de saturación (más de 10 veces  $I_n$ )
  - Núcleos separados con el de medida.

# Cuidados a tener con CTs

- Sobretensiones por secundarios abiertos.

$$v = nd\Phi/dt$$

- Desmagnetización previa.



Fin