

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tema 4

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Transformadores monofásicos:
Circuito equivalente; análisis de funcionamiento en servicio

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Transformadores

- *Constitución Básica.*
- *Transformadores. Monofásicos*
- *Circuito Equivalente.*
- *Ensayos Vacío y Cortocircuito.*
- *Operación en Carga.*
- *Transformadores Trifásicos*

INDUSTRIALES
UPM

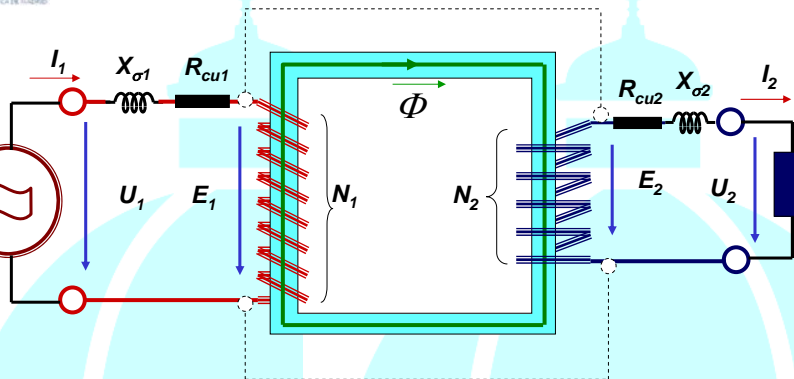
Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

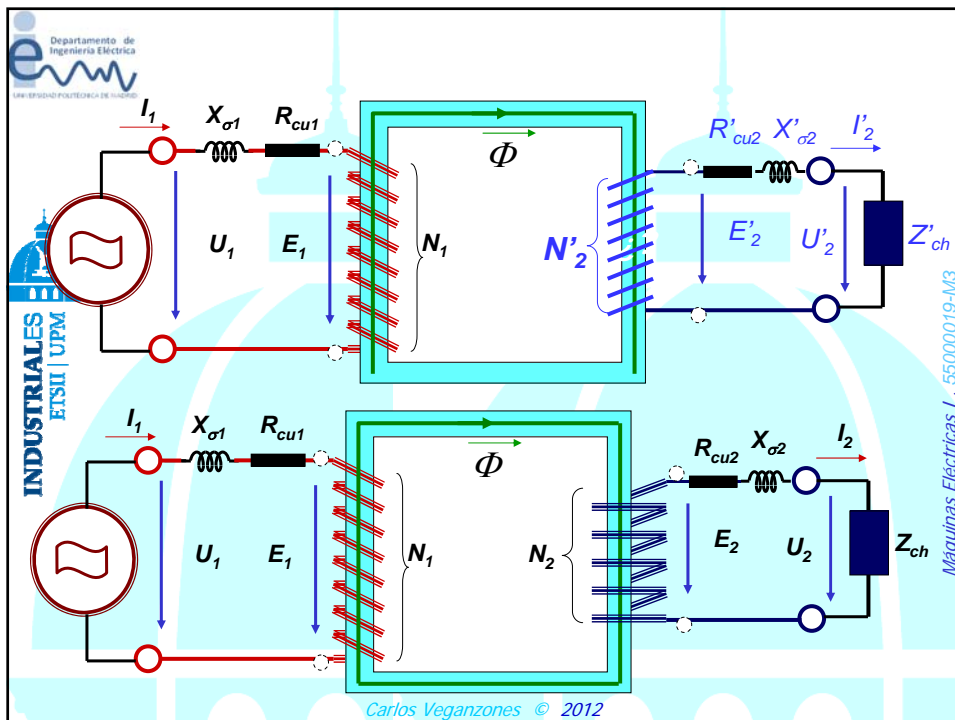
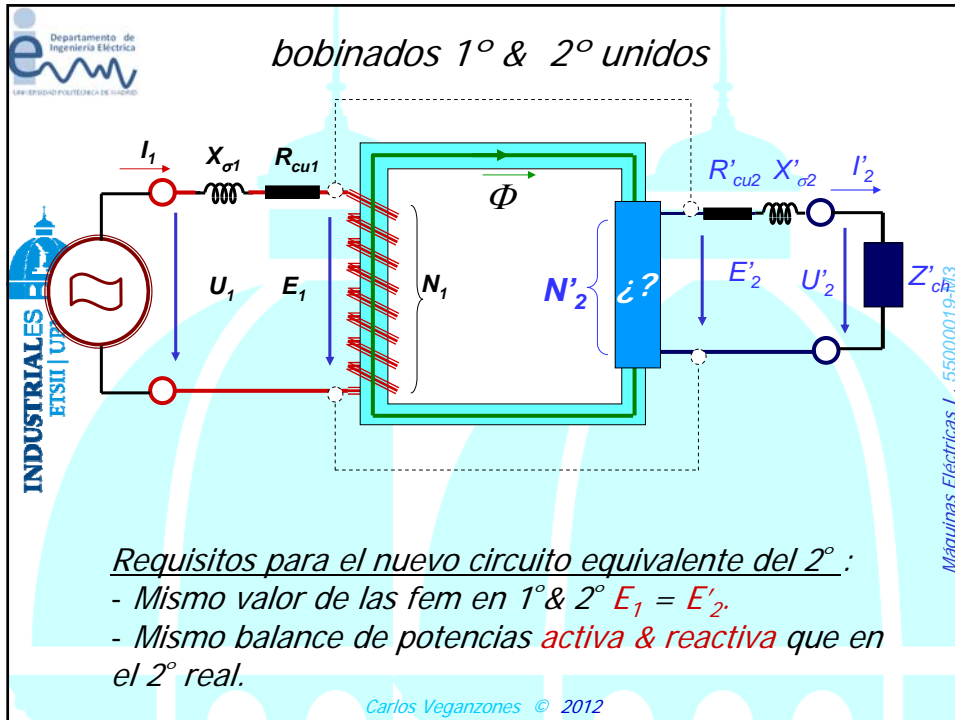
Carlos Veganzones © 2012

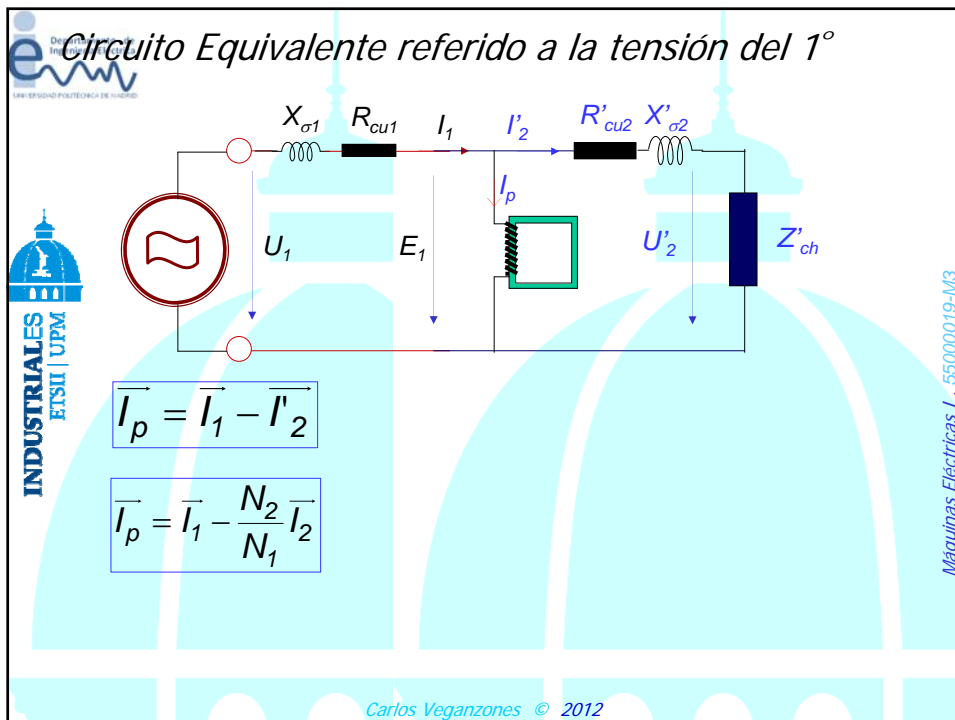
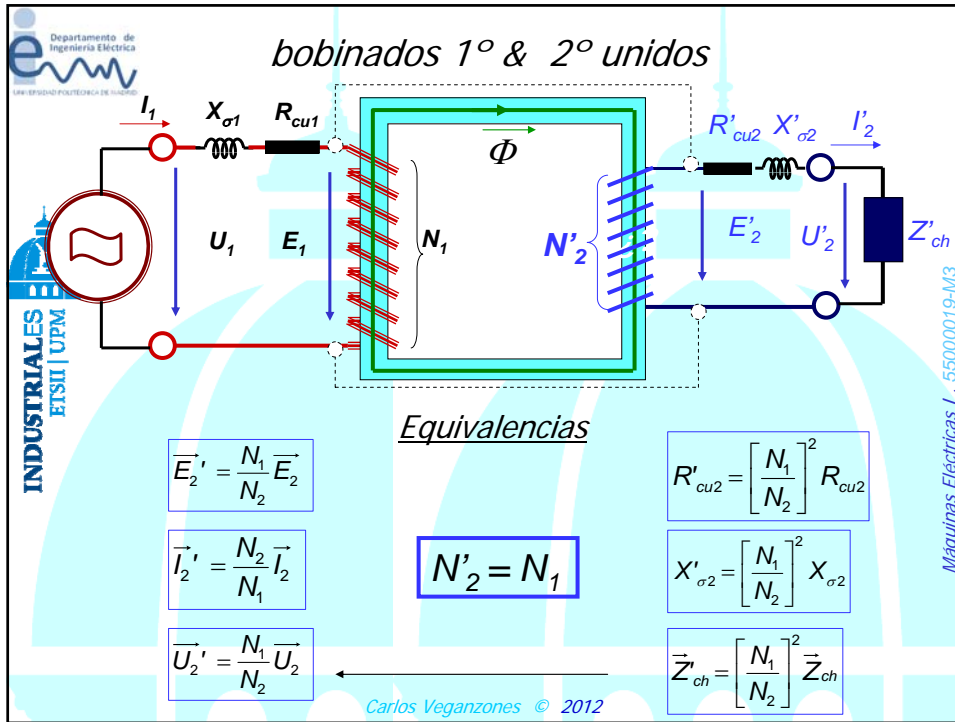
Para analizar *comodamente* el comportamiento de un transformador, se necesita ...

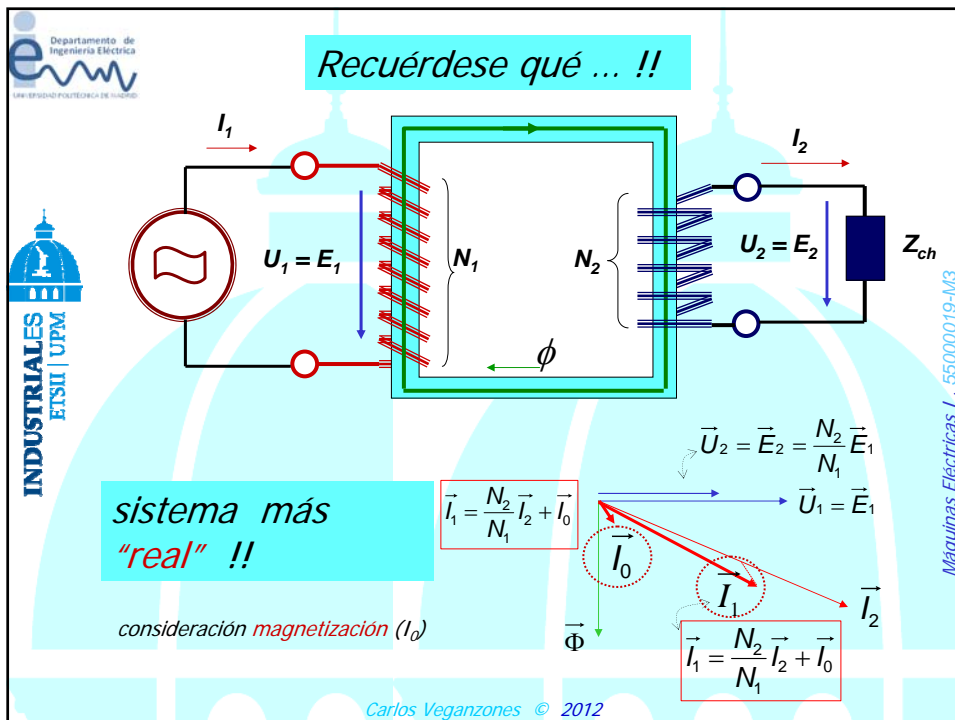
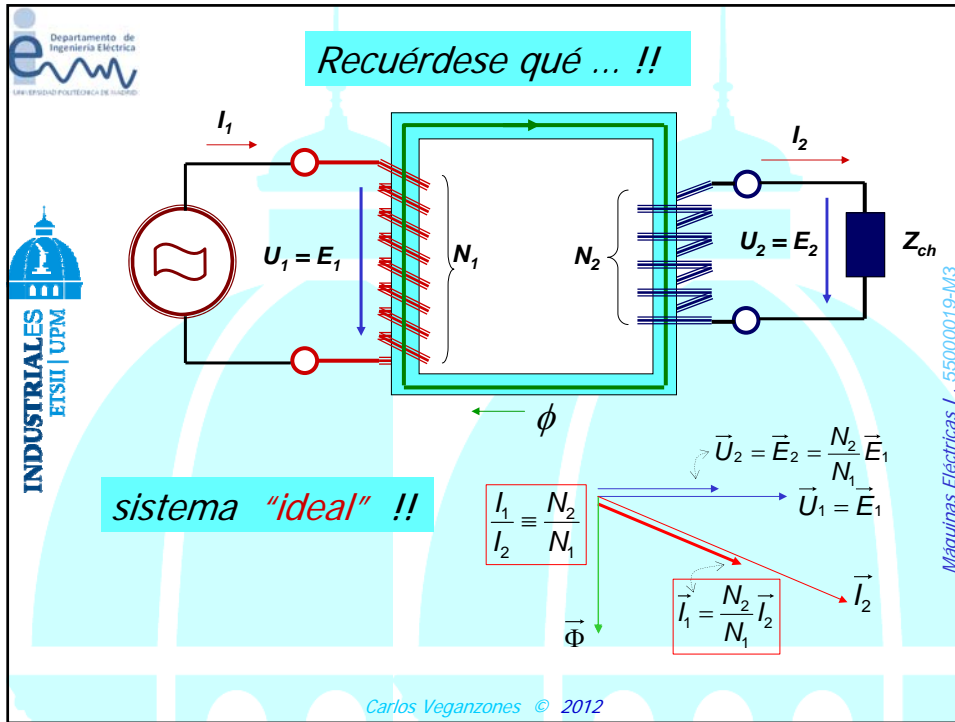
...un *circuito eléctrico equivalente* ... donde los bobinados de 1º y 2º estén *eléctricamente unidos*.... !

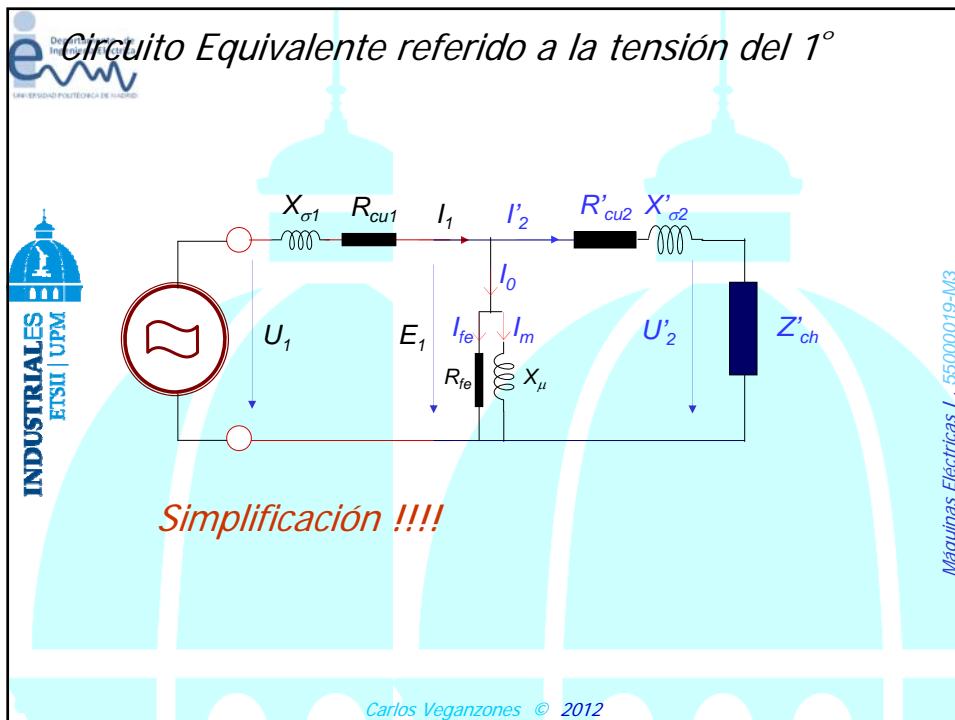
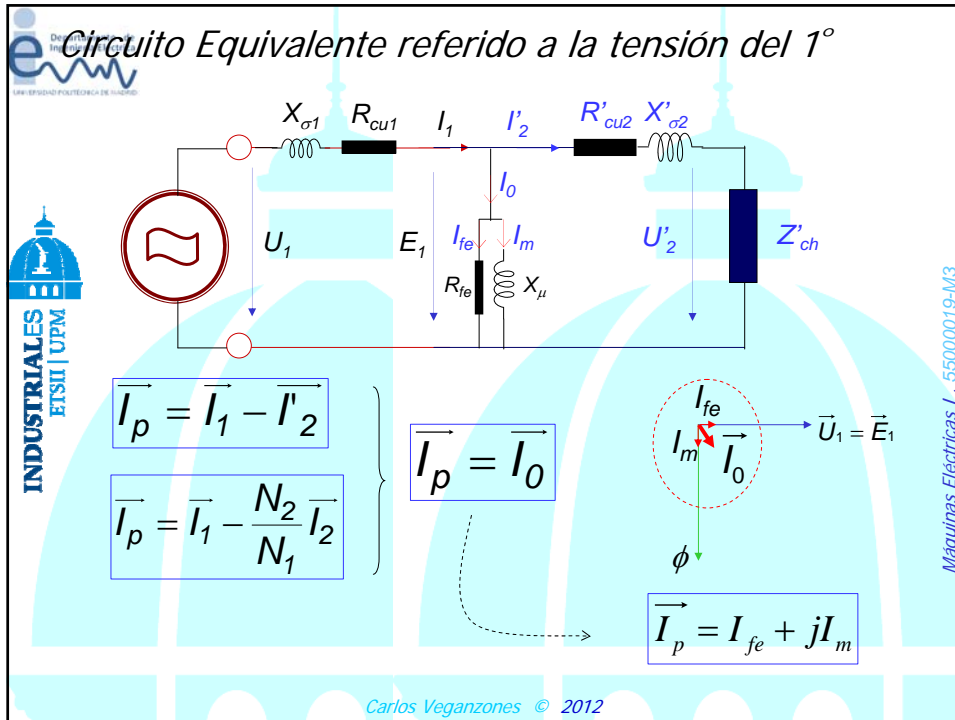
bobinados 1º & 2º unidos

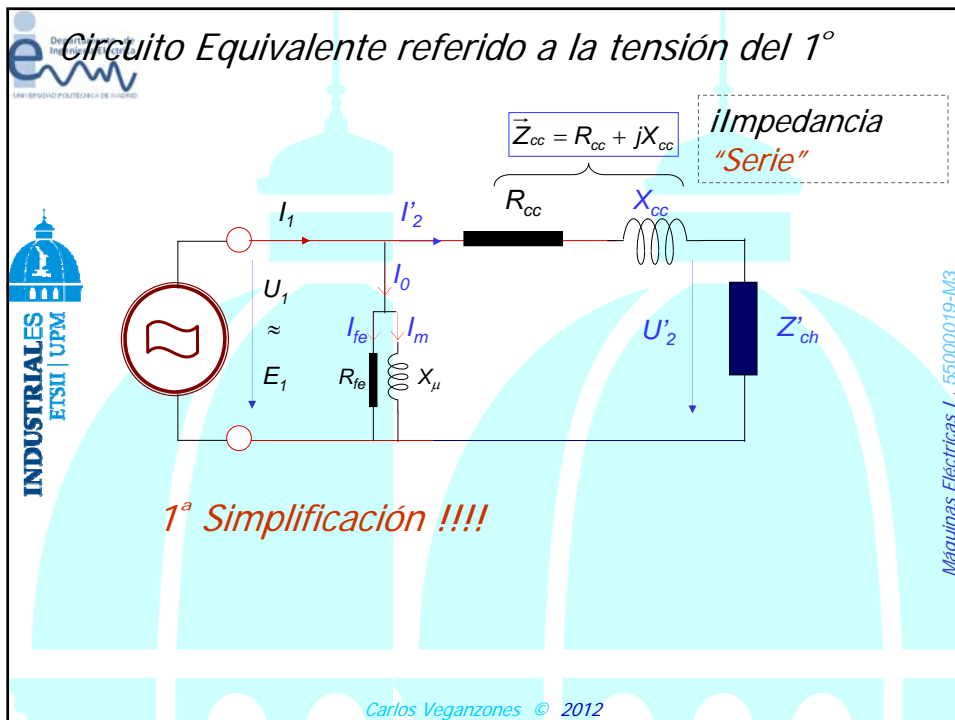
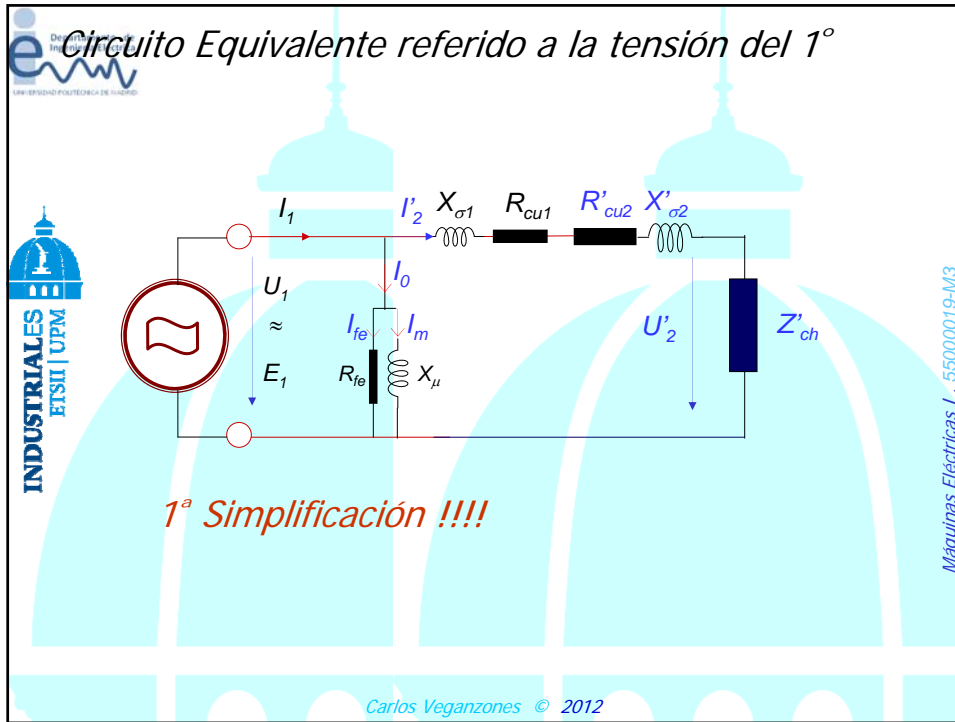


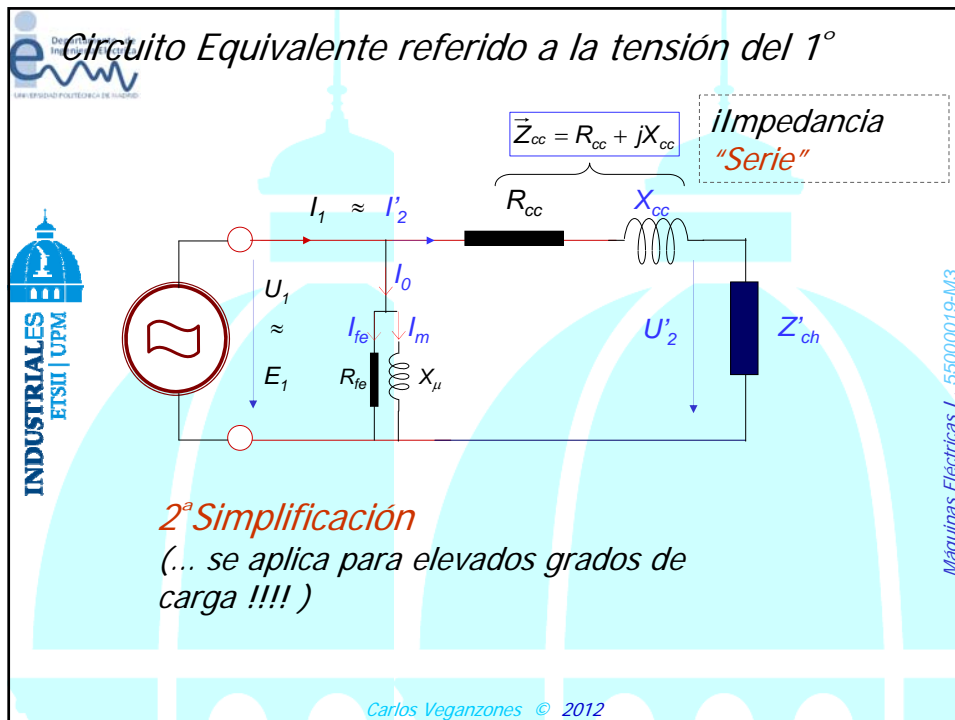












Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

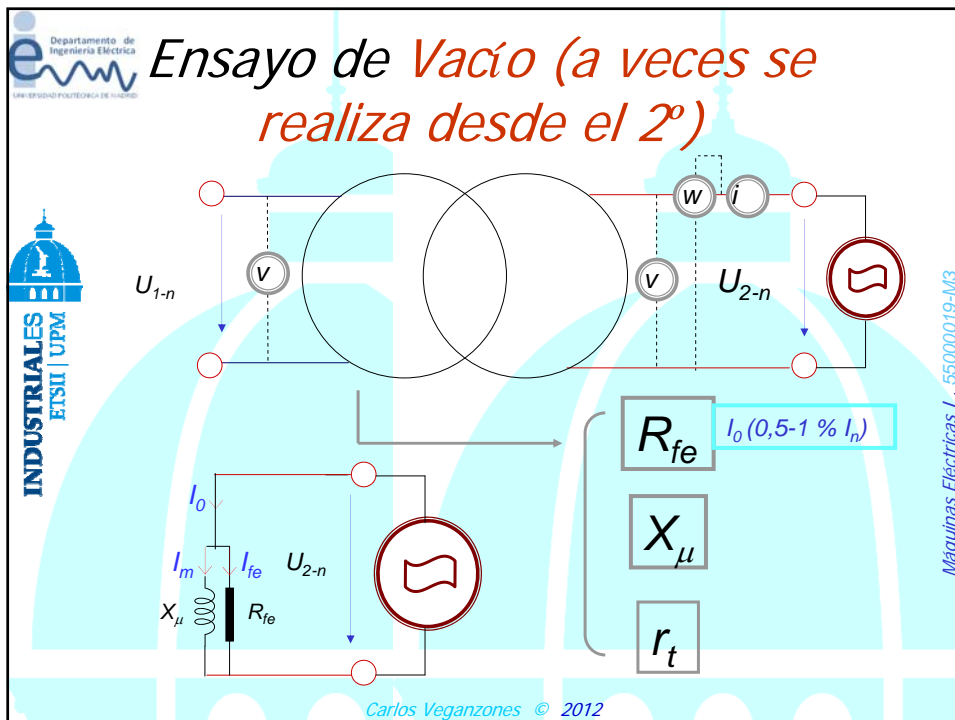
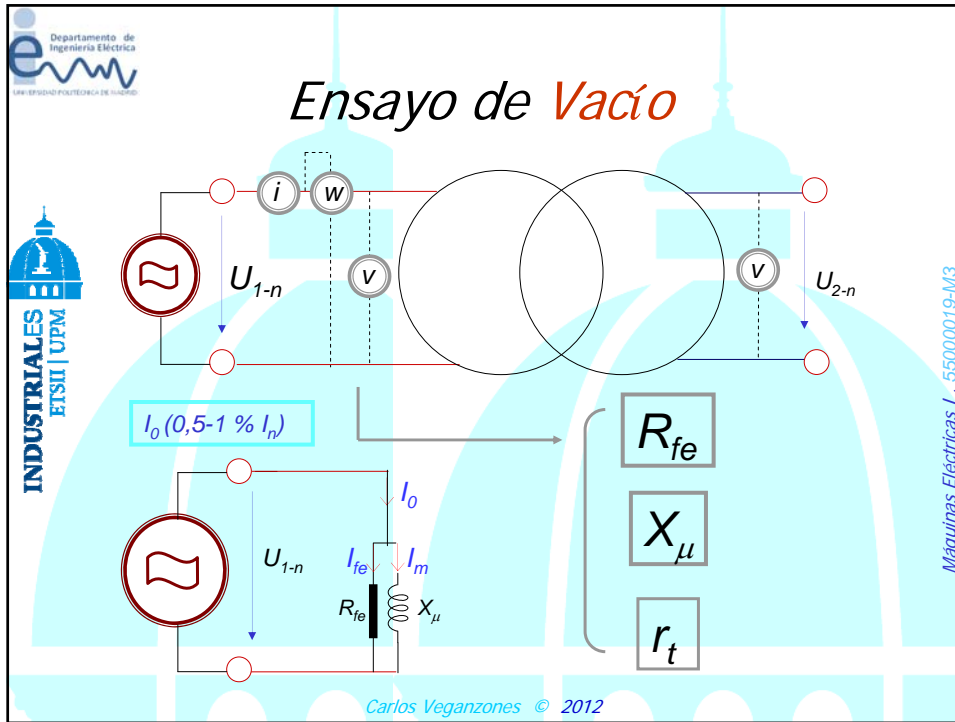
Transformadores

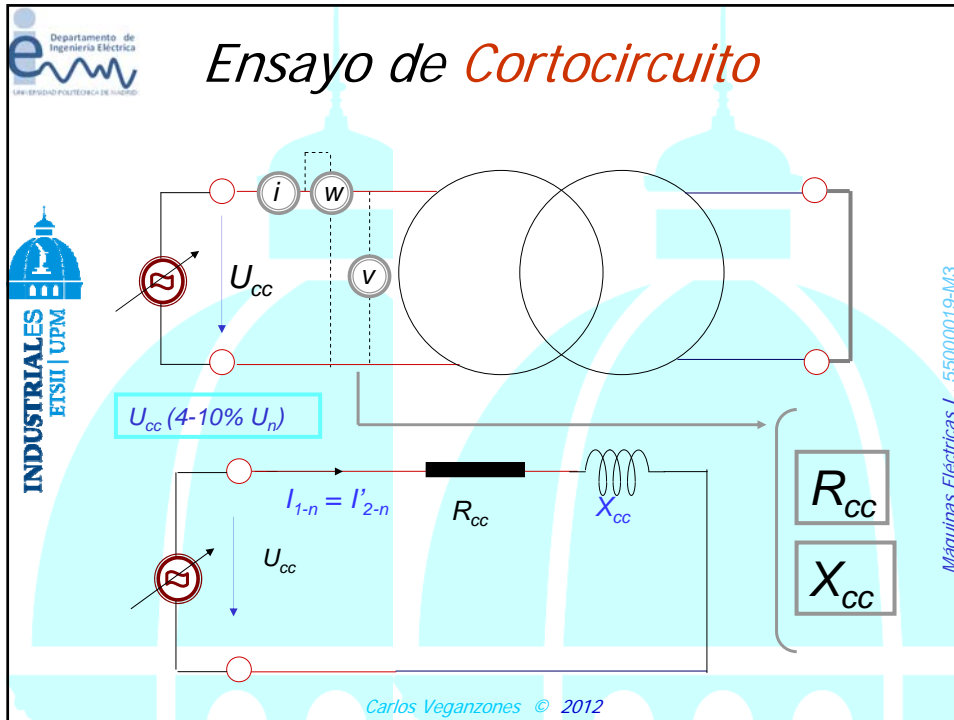
- Constitución Básica.
- Transformadores. Monofásicos
- Circuito Equivalente.
- Ensayos Vacío y Cortocircuito.
- Operación en Carga.
- Transformadores Trifásicos

INDUSTRIALES UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012





Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Transformadores

- Constitución Básica.
- Transformadores. Monofásicos
- Circuito Equivalente.
- Ensayos Vacio y Cortocircuito.
- Operación en Carga.
- Transformadores Trifásicos

INDUSTRIALES UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

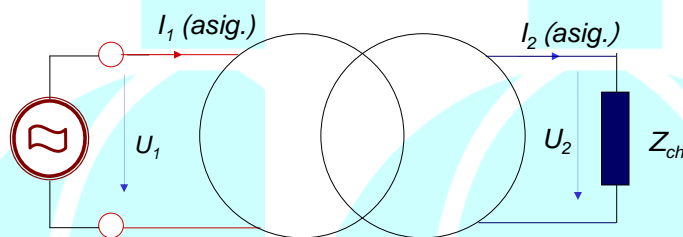
Carlos Veganzones © 2012

Evaluación de la *Operación* del Transformador *en carga*.

- Dimensionado de *Protecciones*. Parámetro (ϵ_{cc})
- *Caída interna de tensión*: Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})
- *Rendimiento* & Grado de carga (η / C)

Dimensionado de *Protecciones*. Parámetro (ϵ_{cc})

- Definición del parámetro (ϵ_{cc})



$$\epsilon_{cc} = \left[\frac{U_{int}}{U_1} \right]_n$$

Departamento de Ingeniería Eléctrica

INDUSTRIALES ETSII | UPM

Dimensionado de *Protecciones*. Parámetro (ϵ_{cc})

- Definición del parámetro (ϵ_{cc})

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$

$I_1 = I'_2$

U_1

U'_2

Z'_{ch}

$$\epsilon_{cc} = \left[\frac{I_{1n} Z_{cc}}{U_1} \right]$$

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica

INDUSTRIALES ETSII | UPM

Dimensionado de *Protecciones*. Parámetro (ϵ_{cc})

- Situación de fallo en la carga

I_1 (fallo)

I_2 (fallo)

U_1

$U_2=0$

Z_{ch}

$$\epsilon_{cc} = \left[\frac{U_{int}}{U_1} \right]_n$$

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
 Dimensionado de *Protecciones*. Parámetro (ϵ_{cc})

- Situación de fallo en la carga

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$

$I_1 = I'_2$ (fallo)

U_1

$U'_2 = 0$

Z'_{ch}

$$I_{fallo} = \left[\frac{I_{1n}}{\epsilon_{cc}} \right]$$

INDUSTRIALES ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
 Caída interna de tensión: Parámetros (ϵ_{RCC}) (ϵ_{XCC})

- Índice de Carga $C = \frac{I_1}{I_{1n}}$

$I_1(C)$

I_2

U_1

U_2

$Z_{ch}(C)$

$$C = \frac{I_1}{I_{1n}}$$

INDUSTRIALES ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
 Universidad Politécnica de Madrid

Caja interna de tensión: Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})

- Índice de Carga $C = \frac{I_1}{I_{1n}}$

$I_1 = I'_2 = I_{1n} C$

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$

U_1

U'_2

$Z'_{ch}(C)$

$\epsilon_{Rcc} = \left[\frac{u_{Rcc}}{U_1} \right]_n = \left[\frac{I_{1n} R_{cc}}{U_1} \right]$

$\epsilon_{Xcc} = \left[\frac{u_{Xcc}}{U_1} \right]_n = \left[\frac{I_{1n} X_{cc}}{U_1} \right]$

$\epsilon_c = \left[\frac{\Delta u}{U_1} \right] \approx C [\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_z + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_z]$

¡normalmente $U'_2 < U_1$!

INDUSTRIALES ETSII UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
 Universidad Politécnica de Madrid

Caja interna de tensión: Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})

- Índice de Carga $C = \frac{I_1}{I_{1n}}$

$I_1 = I'_2 = I_{1n} C$

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$

U_1

U'_2

$Z'_{ch}(C)$

$\epsilon_{Rcc} = \left[\frac{u_{Rcc}}{U_1} \right]_n = \left[\frac{I_{1n} R_{cc}}{U_1} \right]$

$\epsilon_{Xcc} = \left[\frac{u_{Xcc}}{U_1} \right]_n = \left[\frac{I_{1n} X_{cc}}{U_1} \right]$

$\epsilon_c = \left[\frac{\Delta u}{U_1} \right] \approx C [\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_z + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_z]$

¡Ojo efecto Ferranti!

¡carga capacitiva $U'_2 > U_1$!

INDUSTRIALES ETSII UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Rendimiento & Grado de carga

$\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_{fe} + P_{cu}}$
 $\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_0 + C^2 P_{cc}(I_n)}$
 $\eta_c = \frac{S_n \cos \varphi_z}{S_n \cos \varphi_z + \frac{1}{C}(P_0) + C(P_{cc}(I_n))}$
 $C_{\eta_{mx}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}(I_n)}}$

INDUSTRIALES ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

$f(x) = \frac{n}{d} \dots \dots \dots f(x) = \frac{d^{*n-n^*}d^*}{d^*}$

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Rendimiento & Grado de carga

$\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_{fe} + P_{cu}}$
 $\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_0 + C^2 P_{cc}(I_n)}$
 $\eta_c = \frac{S_n \cos \varphi_z}{S_n \cos \varphi_z + \frac{1}{C} \left[\frac{U_1^2}{R_{fe}} \right] + C(\varepsilon_{Rcc} S_n)}$
 $C_{\eta_{mx}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}(I_n)}}$
 $C_{\eta_{mx}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{U_1^2}{R_{fe}} \right)}{(\varepsilon_{Rcc} S_n)}}$

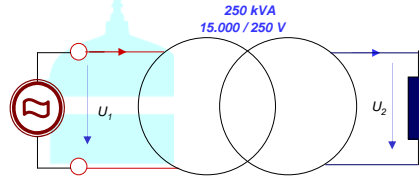
INDUSTRIALES ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

$f(x) = \frac{n}{d} \dots \dots \dots f(x) = \frac{d^{*n-n^*}d^*}{d^*}$

EJEMPLO MONOFÁSICO.



- Vacío y Cortocircuito. Circuito equivalente

- Dimensionado de Protecciones. Corriente de fallo por cortocircuito en el 2º. Parámetro (ϵ_{cc})

- Caída interna de tensión: Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind) Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})

- Rendimiento Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind) & Grado de carga (η / C)

Carlos Veganzones © 2012

(15)

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Vacío y cortocircuito & Circuito equivalente

250 kVA
15.000 / 250 V

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Transformador monofásico:
potencia **250 kVA**,
relación de transformación **15000 / 250 V**
Resultados de los ensayos de vacío y cortocircuito:

- VACIO (Desde A.T.) $U_0 = U_n = 15000 \text{ V}$; $P_0 = 4000 \text{ W}$; $I_0 = 1,33 \text{ A}$
- CORTOCIRCUITO (Desde A.T.) $U_{cc} = 600 \text{ V}$; $P_{cc} = 5000 \text{ W}$; $I_{cc} = I_n$

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Vacío y cortocircuito & Circuito equivalente

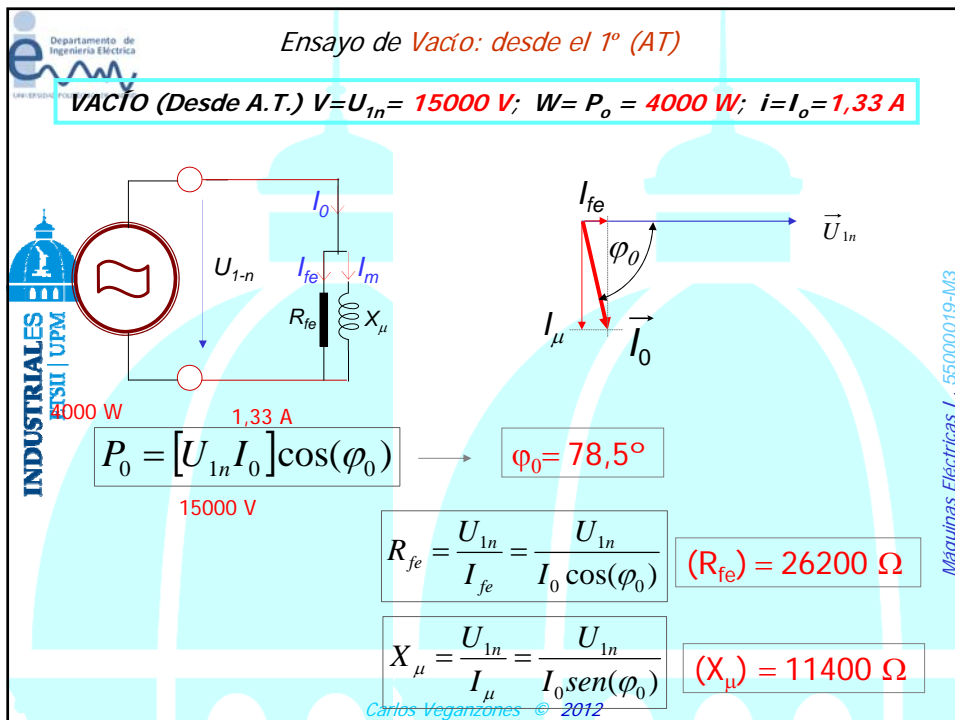
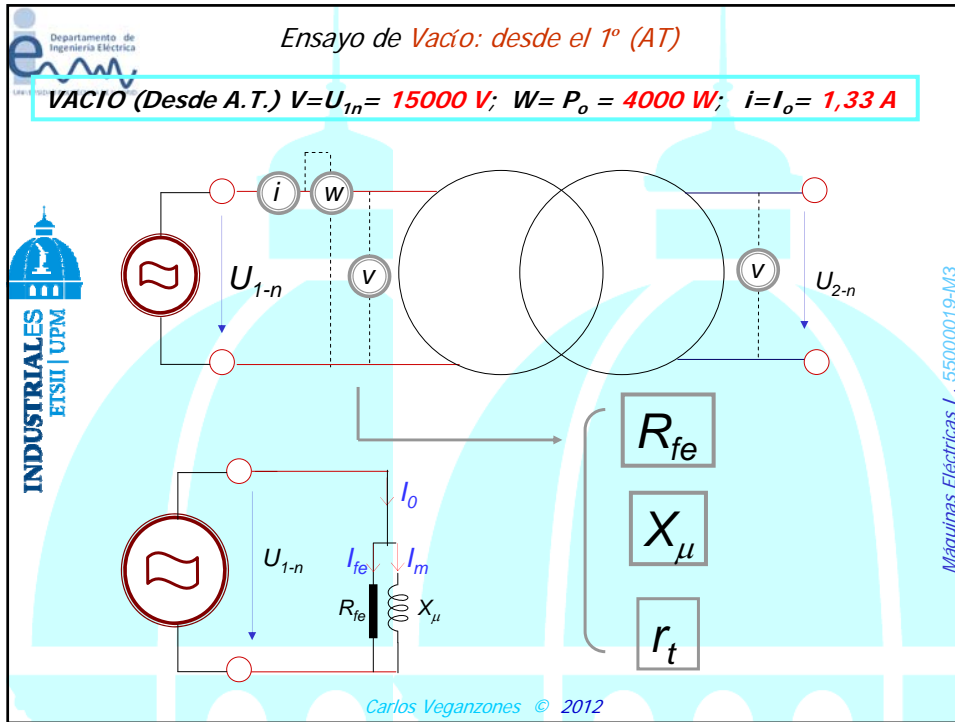
250 kVA
15.000 / 250 V

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Ensayo de Vacío

Carlos Veganzones © 2012



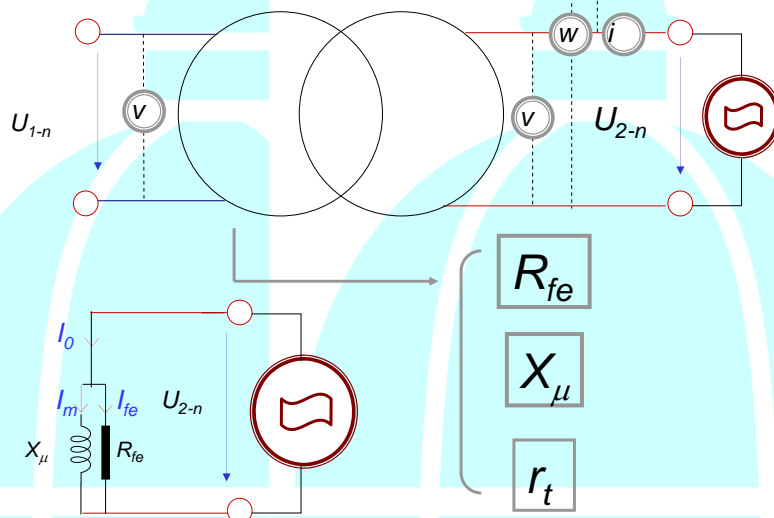
Ensayo de vacío: alternativa

ATENCIÓN: Alternativa: realizar el Ensayo de Vacío: desde el 2º (BT) si no se dispone de tensión suficiente en el Laboratorio de ensayos.

VACÍO (Desde B.T) $U_o = U_n = 250\text{ V}; P_o = 4000\text{ W}; I_o = 80\text{ A}$

Ensayo de Vacío: desde el 2º (BT)

VACÍO (Desde B.T.) $V = U_{2n} = 250\text{ V}; W = P_o = 4000\text{ W}; i = I_o = 80\text{ A}$



Departamento de Ingeniería Eléctrica

Ensayo de Vacío: desde el 2° (BT)

VACÍO (Desde B.T.) $V = U_{2n} = 250 \text{ V}$; $W = P_0 = 4000 \text{ W}$; $i = I_0 = 80 \text{ A}$

4000 W

80 A

$P_0 = [U_{2n} I_0] \cos(\varphi_0) \rightarrow \varphi_0 = 78,5^\circ$

250 V

$$R_{fe} = \frac{U_{2n}}{I_{fe}} = \frac{U_{2n}}{I_0 \cos(\varphi_0)} \quad R_{fe} = 15,62 \Omega$$

$$X_\mu = \frac{U_{2n}}{I_\mu} = \frac{U_{2n}}{I_0 \sin(\varphi_0)} \quad X_\mu = 3,19 \Omega$$

INDUSTRIALES ETSII UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Ensayo de Vacío:

Atención! : pasar parámetros de la base 2° (B.T. en este caso) A la base de tensiones del 1° (A.T. en este caso)

$(R_{fe})_{2^\circ} = 15,62 \Omega$

$(X_\mu)_{2^\circ} = 3,19 \Omega$

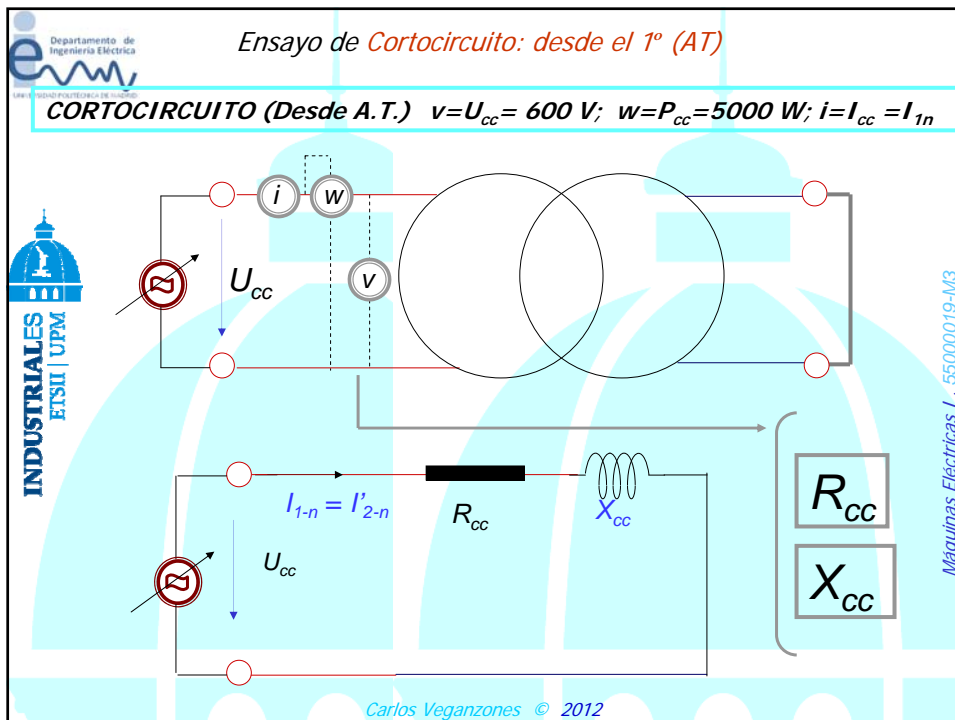
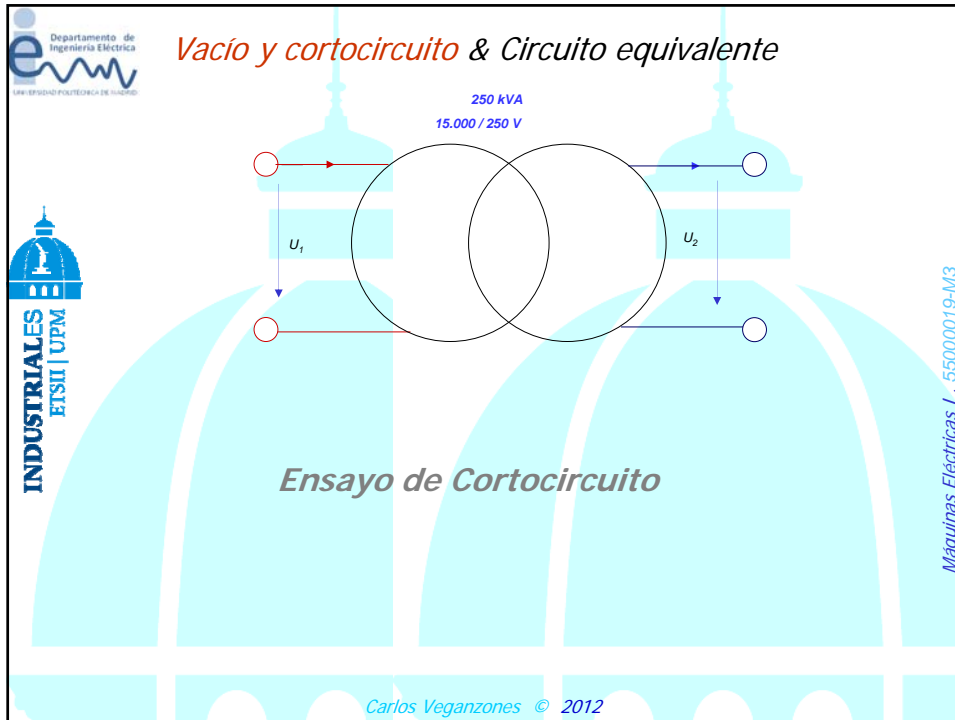
$(R_{fe})_{1^\circ} = (R_{fe})_{2^\circ} \left[\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right]^2 \quad (R_{fe})_{1^\circ} = 26200 \Omega$

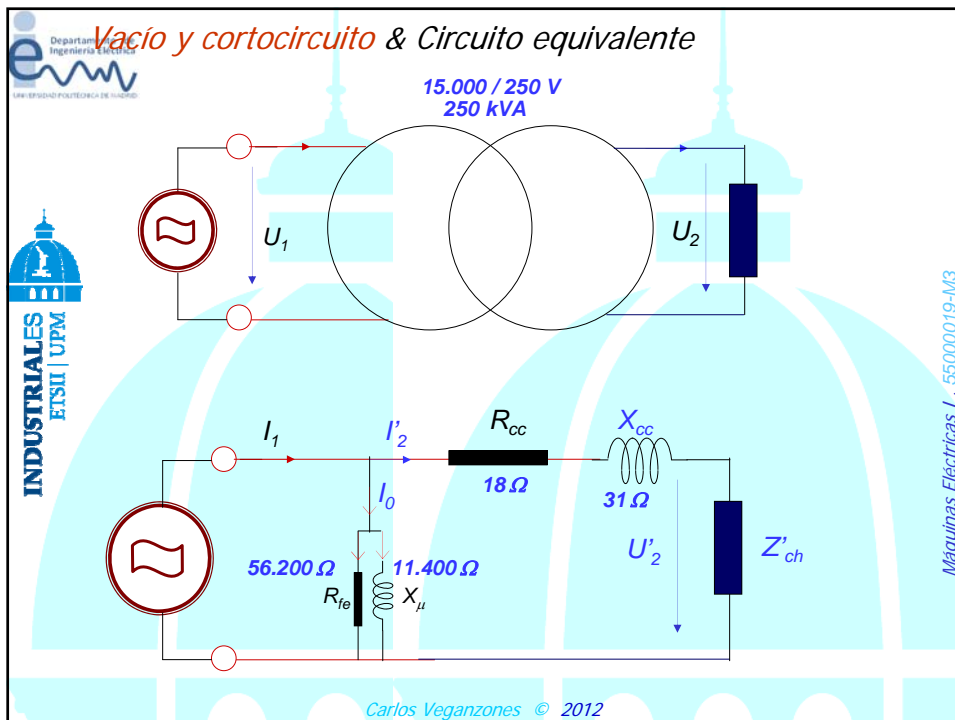
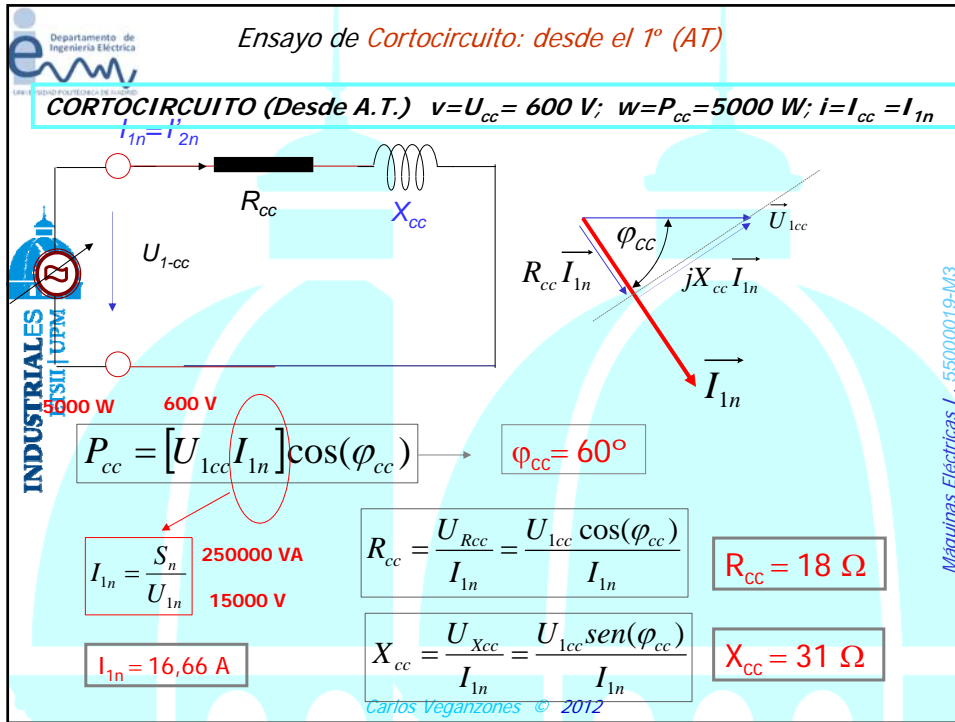
$(X_\mu)_{1^\circ} = (X_\mu)_{2^\circ} \left[\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right]^2 \quad (X_\mu)_{1^\circ} = 11400 \Omega$

INDUSTRIALES ETSII UPM

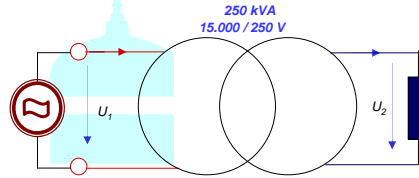
Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012





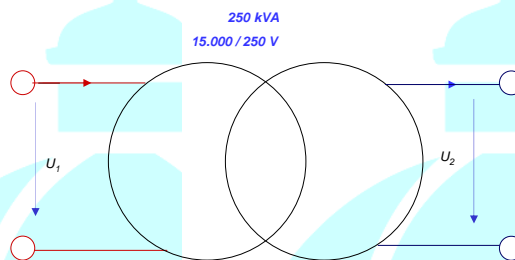
EJEMPLO MONOFÁSICO.



- Vacío y Cortocircuito. *Circuito equivalente*
- Dimensionado de *Protecciones*. *Corriente de fallo por cortocircuito en el 2º. Parámetro (ϵ_{cc})*
- *Caída interna de tensión*: Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind) Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})
- *Rendimiento* Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind) & Grado de carga (η / C)

Carlos Veganzones © 2012

Transformador monofásico



Parámetros (ϵ_{cc}) (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- Definición del parámetro (ϵ_{cc}) (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})

$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{250.000}{15.000} = 16,66 \text{ A}$

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} = 36 \Omega$

$\epsilon_{cc} = \left[\frac{I_{1n} Z_{cc}}{U_{1n}} \right] = \frac{16,66 * 36}{15.000} = 4\%$

$\epsilon_{Rcc} = \left[\frac{u_{Rcc}}{U_{1n}} \right] = \left[\frac{I_{1n} R_{cc}}{U_{1n}} \right] = \frac{16,66 * 18}{15000} = 2\%$

$\epsilon_{Xcc} = \left[\frac{u_{Xcc}}{U_{1n}} \right] = \left[\frac{I_{1n} X_{cc}}{U_{1n}} \right] = \frac{16,66 * 31}{15000} = 3,46\%$

INDUSTRIALES ETSII UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Dimensionado de Protecciones. Parámetro (ϵ_{cc})

- Situación de fallo en la carga

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$

$\epsilon_{cc} = \left[\frac{I_{1n} Z_{cc}}{U_{1n}} \right]$

$I_{fallo} = \left[\frac{U_{1n}}{Z_{cc}} \right] = \left[\frac{I_{1n}}{\epsilon_{cc}} \right]$

$I_{fallo} = 25 (I_{1n}) = 417 \text{ A}$

INDUSTRIALES ETSII UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Caída interna de tensión: Parámetros (ϵ_{RCC}) (ϵ_{XCC})

- Índice de Carga $C = \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{I_2}{I_{2n}}$

INDUSTRIALES ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

EJEMPLO MONOFÁSICO.

250 kVA
15.000 / 250 V

INDUSTRIALES ETSII | UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

- Vacío y Cortocircuito. **Circuito equivalente**
- Dimensionado de **Protecciones**. **Corriente de fallo por cortocircuito en el 2º. Parámetro (ϵ_{CC})**
- **Caída interna de tensión: Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind) Parámetros (ϵ_{RCC}) (ϵ_{XCC})**
- **Rendimiento Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind) & Grado de carga (η / C)**

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Caja interna de tensión: Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})

- Índice de Carga $C = \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{I_2}{I_{2n}}$

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$

$\epsilon_{Rcc} = \left[\frac{u_{Rcc}}{U_1} \right]_n = \left[\frac{I_{1r} R_{cc}}{U_1} \right]$

$\epsilon_{Xcc} = \left[\frac{u_{Xcc}}{U_1} \right]_n = \left[\frac{I_{1r} X_{cc}}{U_1} \right]$

$\epsilon_c = \left[\frac{\Delta u}{U_1} \right] \approx C [\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_z + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_z]$

INDUSTRIALES ETSII UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Caja interna de tensión: Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})

- Índice de Carga $C = \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{I_2}{I_{2n}} = 1$

$\vec{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$

$\frac{U_{1n}^2}{CS_n}$

$Z'_{ch} (900 \Omega)$

$\epsilon_c = \left[\frac{\Delta u}{U_1} \right] \approx C [\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_z + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_z] =$

$1 \left[\frac{2}{100} 0,8 + \frac{3,46}{100} 0,6 \right] = 3,68\%$

$U'_2 = 96,32\% (U_{1n}) = 14.448 \text{ V}$

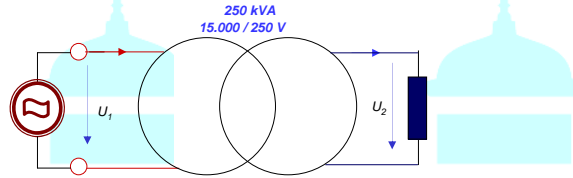
$U_2 = 96,32\% (U_{2n}) = 240 \text{ V}$

INDUSTRIALES ETSII UPM

Máquinas Eléctricas I . 55000019-M3

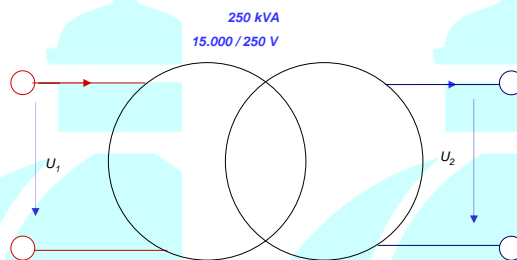
Carlos Veganzones © 2012

EJEMPLO MONOFÁSICO.



- Vacío y Cortocircuito. *Circuito equivalente*
- Dimensionado de *Protecciones*. *Corriente de fallo por cortocircuito en el 2º. Parámetro (ϵ_{cc})*
- *Caída interna de tensión: Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind) Parámetros (ϵ_{Rcc}) (ϵ_{Xcc})*
- *Rendimiento Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind)*

Transformador monofásico



Rendimiento

- *Rendimiento Para plena carga y factor de potencia 0,8 (ind)*
- *Índice de carga para obtener rendimiento máximo*

Rendimiento & Grado de carga

$$\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_{fe} + P_{cu}}$$

$$\eta_c = \frac{S_n \cos \varphi_z}{S_r \cos \varphi_z + \frac{1}{C} P_0 + C(\varepsilon_{Rcc} S_n)}$$

$$\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_0 + C^2(\varepsilon_{Rcc} S_n)}$$

$$C_{\eta_{mx}} = \sqrt{\frac{P_0}{\varepsilon_{Rcc} S_n}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc-n}}}$$

$P_{cc(n)}$

INDUSTRIALES ETSII UPM

Departamento Ingeniería Eléctrica UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Máquinas Eléctricas I - 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

Rendimiento & Grado de carga

$$\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_{fe} + P_{cu}}$$

$$\eta_c = \frac{S_n \cos \varphi_z}{S_r \cos \varphi_z + \frac{1}{C} P_0 + C(\varepsilon_{Rcc} S_n)}$$

$$\eta_c = \frac{CS_n \cos \varphi_z}{CS_n \cos \varphi_z + P_0 + C^2(\varepsilon_{Rcc} S_n)}$$

$$\eta_c = \frac{250 * 0,8}{(250 * 0,8) + (4) + (5)} = 96,5\%$$

$$C_{\eta_{mx}} = \sqrt{\frac{P_0}{\varepsilon_{Rcc} S_n}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc-n}}}$$

$$C_{\eta_{-max}} = \sqrt{\frac{4}{5}} = 0,9$$

Z'_{ch} (900 Ω)
($\cos \varphi = 0,8$ (ind))

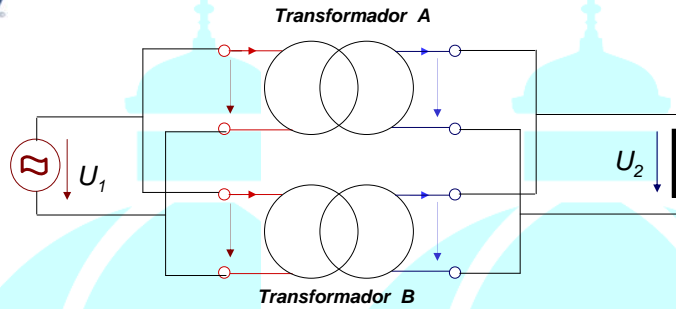
INDUSTRIALES ETSII UPM

Departamento Ingeniería Eléctrica UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Máquinas Eléctricas I - 55000019-M3

Carlos Veganzones © 2012

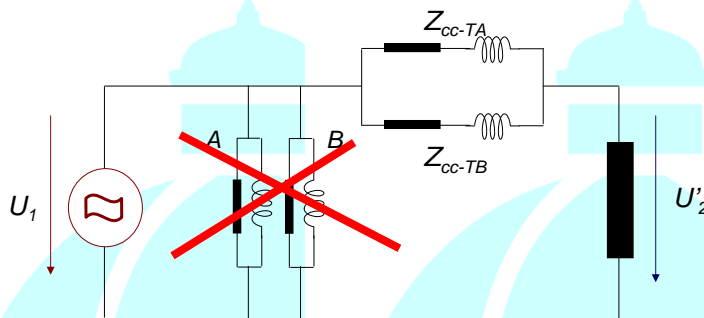
Transformadores en paralelo



- **Misma tensión asignada del primario.**
- **Misma relación de transformación.**
- **Similar ϵ_{cc} .** (Menor en el transformador de mayor potencia).
- **Potencia asignada del mismo orden.**

Carlos Veganzones © 2012

Transformadores en paralelo



$$C_{TA} \epsilon_{cc-TA} = C_{TB} \epsilon_{cc-TB}$$

- **Similar ϵ_{cc} .** (Menor en el transformador de mayor potencia).
- **Potencia asignada del mismo orden.**

Carlos Veganzones © 2012

Transformadores en paralelo

