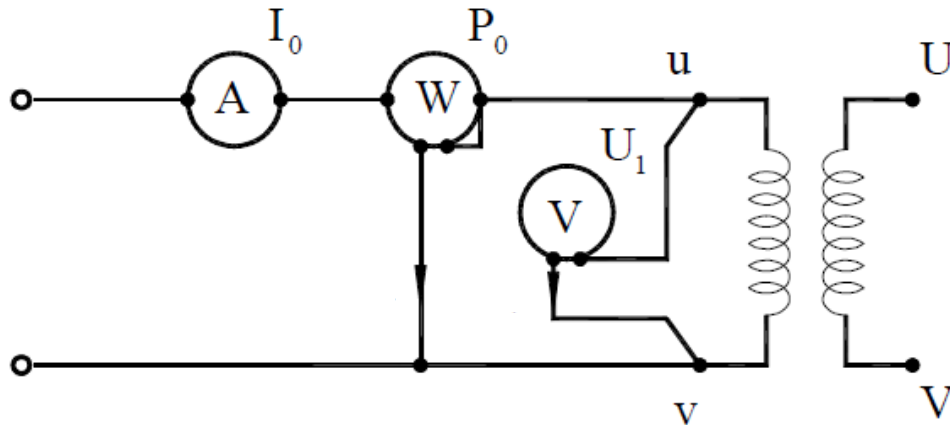


## Transformadores.

### 1. Ensayo de Vacío.

Este ensayo se realiza en las siguientes condiciones:

Transformador en vacío alimentado a tensión y frecuencia nominal.



A partir del mismo se determinan las pérdidas en el hierro y los valores de los parámetros de la rama de vacío.

Si la tensión y la frecuencia a la que se alimenta el transformador son los valores nominales entonces las pérdidas de vacío serán las nominales:

$$\left. \begin{array}{l} I_2 = 0 \Rightarrow P_{Cu2} = 0 \\ I_1 = I_0 \ll I_{1n} \Rightarrow P_{Cu1} \cong 0 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{Cu} \cong 0$$

$$U_1 = U_{1n} \cong E_{1n} = 4,44 f_n N_1 S_{Fe} B_{máx} \Rightarrow P_{Fe} = P_{Fen}$$

Hay que recordar que las pérdidas en el hierro son:

$$P_p = k_p f^2 \cdot B_{máx}^2$$

$$P_h = k_h f \cdot B_{máx}^x$$

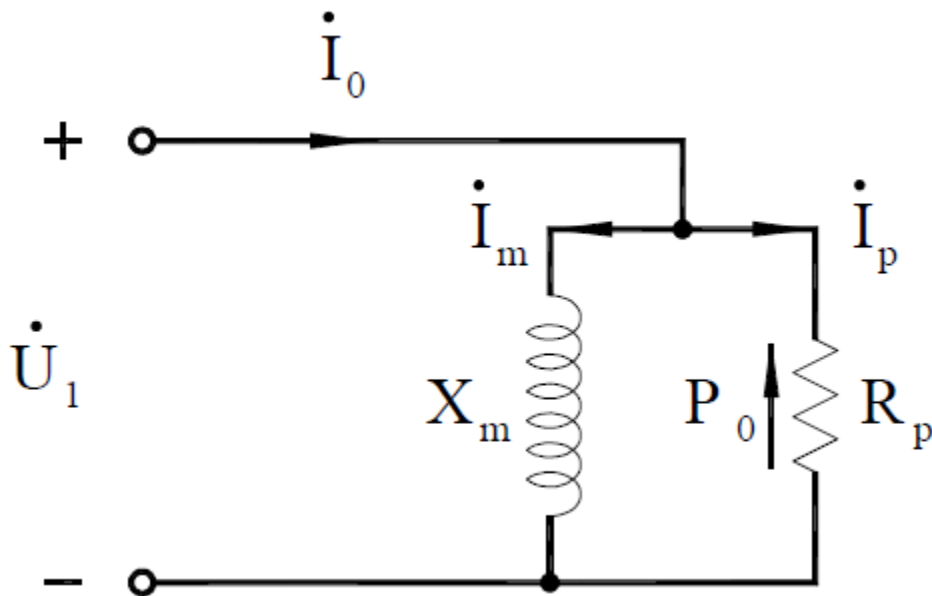
$$x \cong 2$$

Entonces:

$$P_0 = P_{Fen}$$

La potencia medida por el vatímetro serán las pérdidas en el hierro en condiciones nominales.

Recordando la forma en que queda el circuito equivalente en vacío:



Es posible calcular los parámetros de la rama de vacío del circuito equivalente a partir de las medidas realizadas:

$$I_p = \frac{P_0}{U_1}$$

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_p^2}$$

$$Q_0 = \sqrt{(U_1 I_0)^2 - P_0^2} = U_1 I_m$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_0 U_1}$$

Luego los parámetros referidos al nivel de tensión en que se realizaron los ensayos se calculan:

$$R_p = \frac{U_1}{I_p} = \frac{U_1^2}{P_0}$$
$$X_m = \frac{U_1}{I_m} = \frac{U_1^2}{Q_0}$$

**Variación de los valores medidos y los parámetros calculados al variar la tensión y mantener la frecuencia constante.**

Como:

$$U_1 = U_{1n} \cong E_{1n} = 4,44 f_n N_1 S_{Fe} B_{máx}$$

Si se mantiene la frecuencia constante:

$$f = \text{cte. } B_{máx} \propto U_1$$

Al variar la tensión del ensayo se varía el valor de inducción (flujo) al que trabaja el núcleo magnético.

Observación:

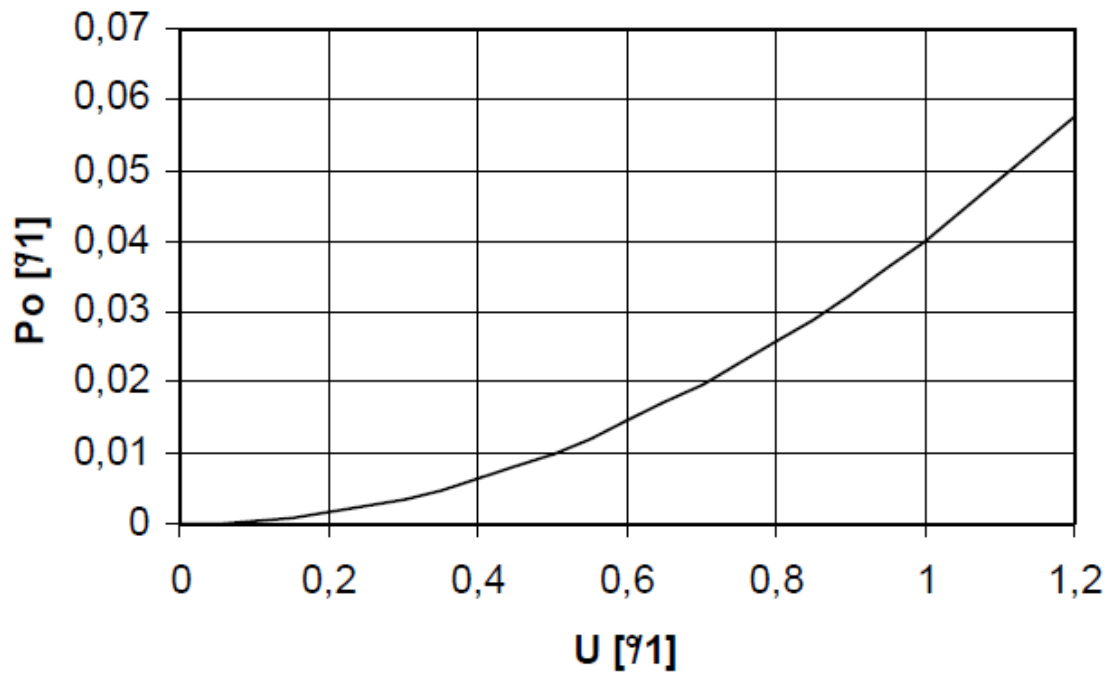
Si se sube la tensión se puede dar la saturación del núcleo.

Potencia absorbida:

La potencia absorbida en el ensayo es proporcional al cuadrado de la inducción magnética:

$$P_0 = P_{Fe} = P_p + P_h \propto B_{máx}^2 \propto U_1^2$$

Por lo cual a frecuencia constante la relación entre pérdidas en el hierro y tensión es cuadrática.



Corriente absorbida:

Se puede asumir que con la máquina en vacío la corriente es prácticamente inductiva por tanto:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_m + \dot{I}_p \cong \dot{I}_m$$

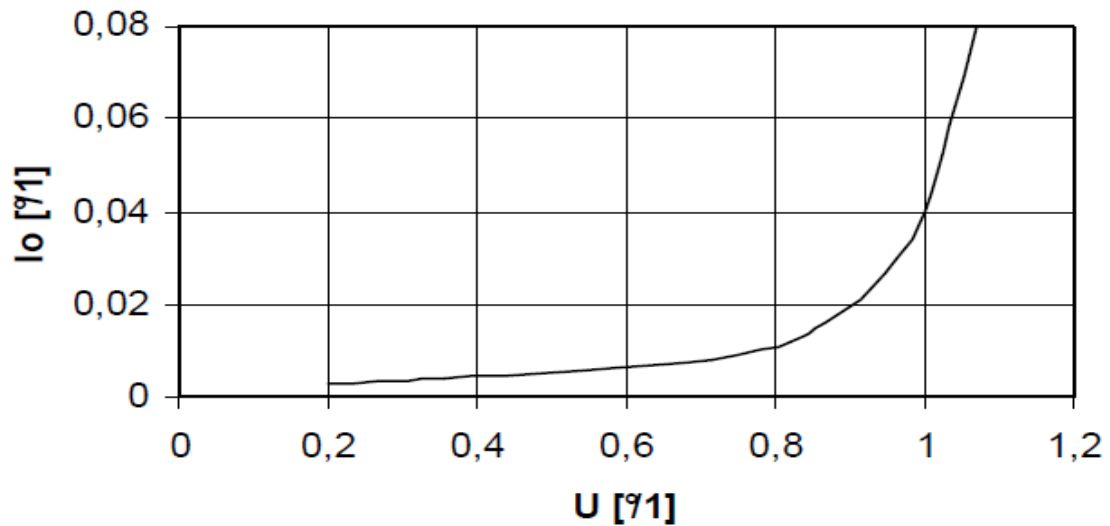
Teniendo en cuenta la relación entre corriente magnetizante e intensidad magnética se deduce:

$$H_{ef} = \frac{N_1}{l} \dot{I}_m \propto I_m \cong I_0$$

Teniendo en cuenta que a frecuencia constante la relación entre la tensión y la inducción magnética es lineal.

$$f = \text{cte. } B_{m\acute{a}x} \propto U_1$$

La curva corriente absorbida tensión es:



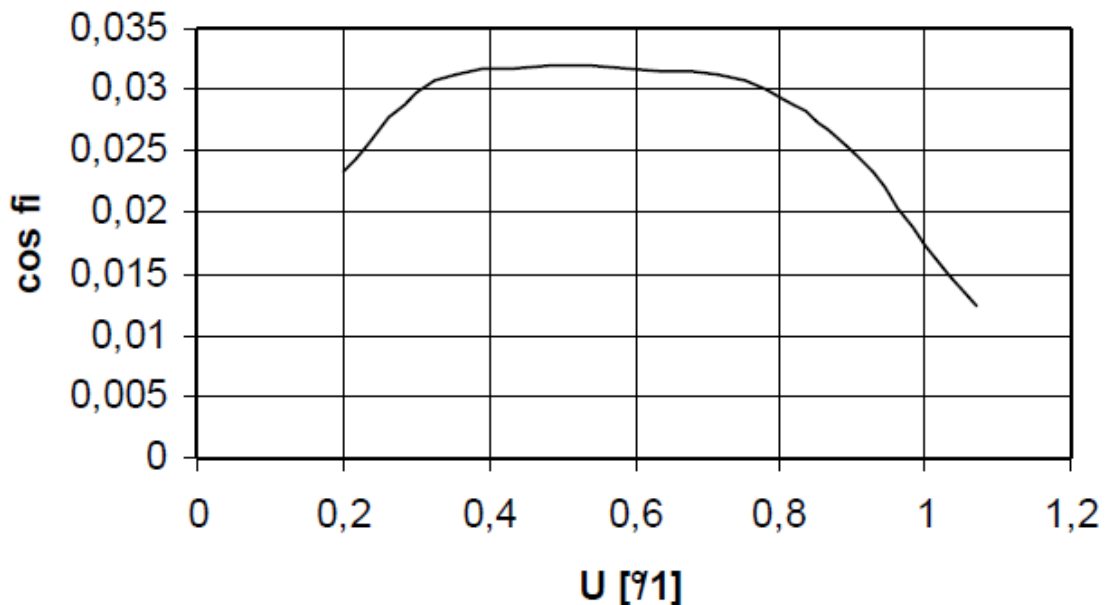
Factor de potencia.

El factor de potencia es el desfase entre la tensión y la corriente sinusoidal equivalente a la corriente real que esta absorbiendo la máquina; esto es una onda sinusoidal con el mismo valor eficaz que la onda de corriente real que está absorbiendo la máquina.

Entonces teniendo en cuenta lo mencionado sobre dependencia entre tensión y campo como varían la potencia y la corriente con la tensión se tiene:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_0 U_1} \propto \frac{B^2}{H \cdot B} = \frac{B}{H} = \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

La permeabilidad del núcleo magnético es alta en la zona lineal y luego se reduce cuando satura el mismo:



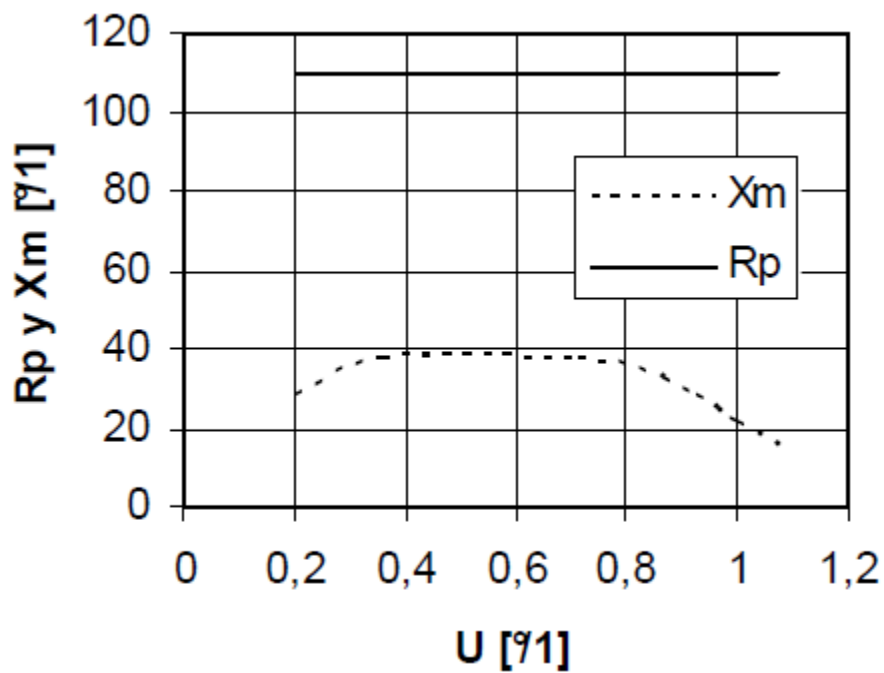
Resistencia de vacío:

$$R_p = \frac{U_1^2}{P_0} \propto \frac{B^2}{B^2} \cong cte.$$

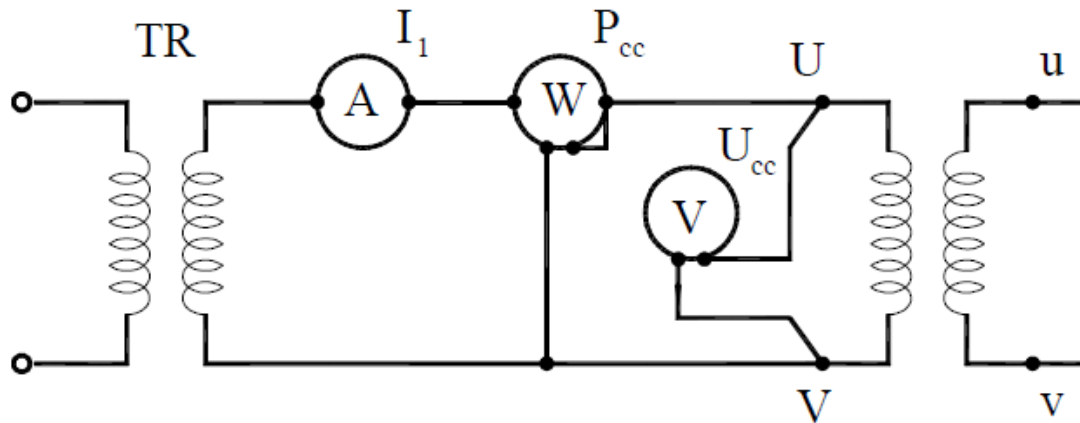
Reactancia magnetizante:

$$X_m = \frac{U_1}{I_m} \cong \frac{U_1}{I_0} \propto \frac{B}{H} = \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

La reactancia magnetizante varía según varía la permeabilidad magnética del núcleo del transformador, la cual es constante en la zona lineal y luego baja su valor al satura el núcleo.



2. Ensayo de Cortocircuito.



El ensayo de cortocircuito se realiza alimentando el transformador a tensión reducida y frecuencia nominal y poniendo en cortocircuito el bobinado que no se conecta a la fuente.

Es deseable que la corriente durante el ensayo sea la nominal o próxima a la misma por lo cual la tensión del ensayo debe ser mucho menor que la nominal.

En caso que trate de un transformador con más de dos arrollamientos, el ensayo se realiza tomando los arrollamientos de a dos y dejando los restantes a circuito abierto.

Al ser la tensión del ensayo mucho menor que la nominal las pérdidas en el hierro, que varían con la tensión al cuadrado, se pueden despreciar.

$$I_1 = I_{1n} \text{ e } I_2 = I_{2n} \Rightarrow P_{Cu} = P_{Cun}$$

$$U_{cc} \ll U_{1n} \Rightarrow P_{Fe} \cong 0$$

Como el transformador está en cortocircuito durante el ensayo la potencia de salida es nula por lo tanto la potencia medida en el ensayo es igual a las pérdidas en el cobre:

$$P_{cc} = P_{Cun}$$

Al ser la tensión mucho menor que la nominal el transformador trabaja en zona lineal, lejos de la saturación, por tanto en cortocircuito a tensión reducida los parámetros de un transformador son constantes y es posible obtener los valores que se medirían en un ensayo realizado a corriente nominal a partir de los valores medidos a una corriente menor a la nominal de la siguiente forma.

$$U_{cc} = \left( \frac{I_{1n}}{I_1} \right) \cdot U_{cc \text{ medida}}$$

$$P_{cc} = \left( \frac{I_{1n}}{I_1} \right)^2 \cdot P_{cc \text{ medida}}$$

Siendo  $I_1$  la corriente medida durante el ensayo.

A partir de los valores medidos en el ensayo es posible calcular los parámetros del circuito equivalente:

$$\left. \begin{aligned} U_{rt} &= \frac{P_{cct}}{I_1} \\ U_x &= \sqrt{U_{cct}^2 - U_{rt}^2} \\ Q_{cc} &= \sqrt{(U_{cct} I_1)^2 - P_{cct}^2} = U_x I_1 \\ \cos \varphi_{cct} &= \frac{P_{cct}}{U_{cct} I_1} \end{aligned} \right\} \text{Independientes de } t$$

Donde  $t$  es la temperatura a la que se realizó el ensayo.

$U_r$  es la caída de tensión en la resistencia de la rama de cortocircuito.

$U_x$  es la caída de tensión en la reactancia de fugas.

Las pérdidas de cortocircuitos dependen de la temperatura por lo cual se deben llevar los valores obtenidos a una temperatura de referencia de 75°C.

Las potencia medida tiene una componente de pérdidas Joule ( $P_j = RI^2$  medida en continua) propiamente dicho y otra debido al efecto Skin (pérdidas adicionales  $P_{ad}$ ) y su comportamiento con la temperatura no es igual, mientras una disminuye la otra aumenta con la temperatura.

$$P_{cc75} = \frac{235+75}{235+t} \cdot P_{jt} + \frac{235+t}{235+75} \cdot P_{adt}$$

Siendo  $t$  la temperatura a la que se realizaron los ensayos.

A partir de esto es posible calcular los parámetros a la temperatura de referencia teniendo en cuenta que la caída de tensión en la reactancia de cortocircuito no varía con la temperatura.



$$U_{r75} = \frac{P_{cc75}}{I_1}$$

$$U_{cc75} = \sqrt{U_{r75}^2 + U_x^2}$$

$$\cos \varphi_{cc75} = \frac{P_{cc75}}{U_{cc75} I_1}$$

La tensión sobre la resistencia calculada para 75°C es la tensión necesaria para que con la misma corriente del ensayo las pérdidas sean las que se calcularon a 75°C.

En función de esto:

$$r_{e75} = \frac{U_{r75}}{I_1}$$

$$x_e = \frac{U_x}{I_1} = \frac{Q_{cc}}{I_1^2}$$