

TEMA 5. – El transformador. Generalidades

CONTENIDO:

- 5.1. *Finalidad de los transformadores*
 - 5.2. *Fundamento de los transformadores de potencia*
 - 5.3. *Tipos de transformadores, designaciones y simbolismos.*
 - 5.4. *Constitución de un transformador monofásico.*
 - 5.5. *Potencia nominal de un transformador.*
 - 5.6. *El transformador monofásico, ensayos y rendimiento.*
 - 5.7. *Transformadores en sistemas trifásicos, designación*
 - 5.8. *Autotransformadores*
- EJERCICIOS DE APLICACIÓN

5.1. FINALIDAD DE LOS TRANSFORMADORES

El transformador es una máquina eléctrica estática, que transforma energía eléctrica, con una tensión e intensidad determinada, en energía eléctrica con tensión e intensidad distintas o iguales.

Un transformador está constituido por dos circuitos eléctricos acoplados mediante un circuito magnético.

El funcionamiento del transformador se basa en la Ley de inducción de Faraday, de manera que un circuito eléctrico influye sobre el otro a través del flujo generado en el circuito magnético.

Los circuitos eléctricos están formados por bobinas de hilo conductor, normalmente cobre. Estas bobinas reciben el nombre de devanados y, comúnmente se les denomina devanado primario y secundario del transformador.

Las condiciones de funcionamiento para las cuales se diseñan los transformadores constituyen sus *valores nominales*. En transformadores de potencia y distribución, las características nominales o de placa son, la frecuencia, las tensiones eficaces de primario y secundario y la potencia aparente. Los valores nominales de un transformador están limitados por el calentamiento máximo admisible de los aislantes, debido a las pérdidas.

Un parámetro fundamental en los transformadores es su *relación de transformación*. Aunque más adelante se precisará más, por el momento definimos la relación de transformación m como cociente de número de espiras de primario y secundario (o cociente de tensiones inducidas).

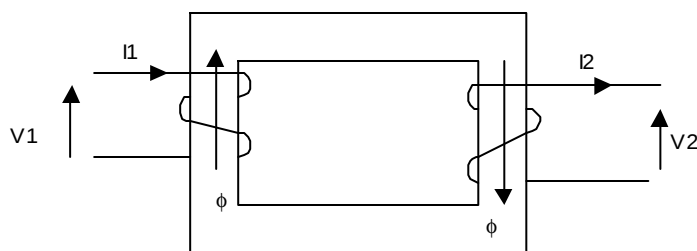
$$m = N_1/N_2 = E_1/E_2$$

Un transformador transforma tensiones, corrientes e impedancias, de acuerdo con las siguientes leyes:

$$\begin{aligned} V_1 &\approx mV_2 \\ I_1 &\approx \frac{I_2}{m} \\ Z_1 &\approx m^2 Z_2 \end{aligned}$$

5.2. FUNDAMENTO DE LOS TRAFOS DE POTENCIA

Si el devanado primario del transformador se somete a una tensión eléctrica (V_1), circulará por él una corriente (I_1). La corriente primaria (I_1) dará lugar, al pasar por el devanado primario a un flujo magnético (ϕ). Dicho flujo magnético (ϕ) al atravesar el interior de las espiras del devanado secundario, dará lugar a una corriente en el devanado secundario (I_2) y, a una tensión (V_2) en sus extremos.



magnético

Haciendo el estudio para un transformador ideal, en el que se supongan que tanto las pérdidas en el circuito magnético, como las pérdidas en los devanados sean nulas. Tendremos que si el flujo magnético está dado por:

$$f = f_{\max} \sin \omega t$$

y, en cada devanado hay N espiras, las tensiones inducidas en el primario y en el secundario serán:

$$e_1 = N_1 \frac{df}{dt} = N_1 f_{\max} \omega \cos \omega t$$

$$e_2 = N_2 \frac{df}{dt} = N_2 f_{\max} \omega \cos \omega t$$

con valores eficaces:

$$E_1 = 4,44 N_1 f_{\max} f$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f_{\max} f$$

que da la relación denominada relación de transformación o relación de espiras:

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

Si la resistencia óhmica de los devanados es nula y no hay flujo de dispersión, la tensión aplicada es igual a la tensión inducida, por lo que:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Si en el secundario existe una carga Z, de acuerdo con la Ley de Ampere:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \int_c H dl = \Re f(t)$$

que, suponiendo que la Reluctancia del circuito magnético es nula, queda:

$N_1 i_1 = N_2 i_2$, que en valores eficaces da lugar a la expresión:

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

En el caso de que en el secundario tengamos una impedancia Z_2 , con un factor de potencia $\cos \phi$, la potencia consumida será:

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \phi$$

dado que las tensiones e intensidades de primario y secundario están en fase (debido a que no hay pérdidas en el transformador), la potencia en el primario será:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos j \quad ; \text{con lo que:}$$

$$P_1 = V_2 \frac{N_1}{N_2} I_2 \frac{N_2}{N_1} \cos j = V_2 I_2 \cos j$$

Por lo que la potencia de entrada al primario del transformador es igual a la potencia de salida del transformador.

Un estudio similar se puede hacer con la impedancia conectada en el secundario, de tal manera:

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_1 \frac{N_2}{N_1}}{I_1 \frac{N_1}{N_2}} = \frac{V_1}{I_1} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = Z'_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

o bien:

$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

El valor de Z'_2 representa la impedancia vista desde el primario (hay que tener presente que se supone el transformador sin impedancia). También se dice que Z'_2 es la impedancia reflejada de Z_2 en el primario. El concepto de impedancia reflejada se usa para pasar las impedancias de un bobinado a otro, con objeto de facilitar el estudio del circuito equivalente del transformador. De esta forma, el transformador puede considerarse como un adaptador de impedancias.

5.3. TIPOS DE TRAFOS, DESIGNACIONES Y SIMBOLISMOS.

TIPOS DE TRANSFORMADORES:

Según el servicio:

De potencia y distribución (V y f constantes)
De comunicaciones (V y f variables)
De medida y protección

Según el circuito magnético:

De columnas
Acorazados

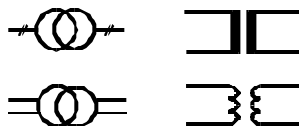
Según la refrigeración:

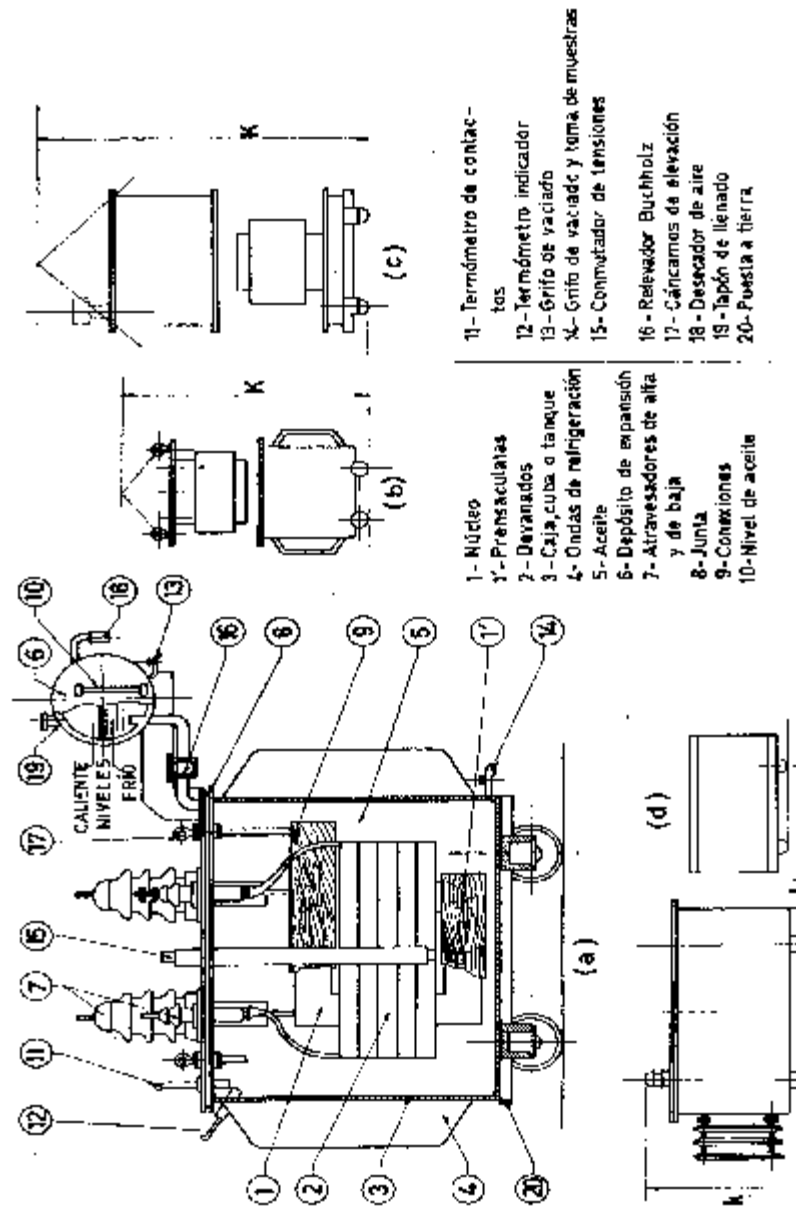
Transformadores en seco
Transformadores en baño de aceite
Transformadores con refrigeración natural
Transformadores con refrigeración forzada

Según el sistema de tensiones:

Monofásicos
Trifásicos
Etc.

Los símbolos más utilizados son los que se indican:





5. 4. CONSTITUCIÓN DE UN TRAFIO MONOFÁSICO.

Se denomina *parte activa* de un transformador al conjunto formado por los dos circuitos eléctricos y el circuito magnético. El circuito magnético está constituido por chapa magnética de acero aleado a base de Si (3-5%), generalmente de grano orientado laminada en frío. Un espesor típico de la chapa es 0,35 mm. La sección de las columnas y culatas no es rectangular; tampoco es circular, aunque se aproxima a esta geometría a base de una disposición por escalones. Las capas van aisladas entre sí mediante un barniz o un tratamiento termoquímico de nombre comercial *carlite*.

El **circuito magnético**, constructivamente, puede ser:

De columnas: Dos columnas (para un trafeo monofásico), sobre las que se arrollan los devanados.

Acorazado: Tres columnas, o sea, dos ventanas. Sobre la columna central, que tiene como sección el doble de las laterales, se disponen los devanados. Las columnas laterales son para retorno del flujo.

Por la disposición constructiva **los devanados** pueden ser:

Separados (no usual).

Concéntricos (o doblemente concéntricos) o por capas: típicos para transformadores de columnas.

Superpuestos o alternados, constituidos por discos o galletas: típicos para trafos acorazados.

En cualquier caso el devanado de más baja tensión (devanado de BT), está siempre más próximo al núcleo, mientras que el devanado de AT está más alejado por motivos de aislamiento.

Además de los circuitos eléctricos y magnético, el trafeo se compone de CUBA, FLUIDO REFRIGERANTE, RADIADORES, ELEMENTOS DE PROTECCIÓN A LA CONEXIÓN Y TERMINALES

5.5. POTENCIA NOMINAL DE UN TRANSFORMADOR.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, consideraremos como potencia nominal del transformador, el valor de su potencia aparente a la salida de su secundario, medida habitualmente en KVA.

Para la cuantificación de esta potencia debemos considerar los siguientes valores de potencia, característicos del propio trafo:

Potencia consumida en vacío (entrada circuito primario):

$$P_v = V_1 I_E \cos\phi_v$$

También considerada, en valor eficaz, como pérdida en el hierro (P_{Fe}), Es la potencia constante e independiente de la carga que se pierde en los circuitos del propio trafo.

Igualmente,

$$Q_v = V_1 I_E \sin\phi_v$$

Representará las pérdidas de energía consumidas por el transformador al magnetizar el núcleo.

Potencia de cortocircuito P_{cc} (ver ensayos en el siguiente apartado) que representan las pérdidas en el cobre del transformador, proporcionales a la carga y por ello al cuadrado de la intensidad.

A partir de estos valores, y de los correspondientes a la potencia suministrada por el transformador obtenidos bien mediante medida, bien mediante circuitos equivalentes, podemos definir el valor de potencia nominal del transformador que estudiemos, tal y como se define en su placa de características.

5.6. EL TRAFIO MONOFÁSICO, ENSAYOS Y RENDIMIENTO.

EL TRANSFORMADOR IDEAL.

Verifica las siguientes hipótesis simplificativas:

$r_1 = r_2 = 0$ (No hay pérdidas en el cobre)

$P_{Fe} = 0$ (No hay pérdidas en el hierro)

$m = \infty \Rightarrow N_1 I_1 = N_2 I_2 \Rightarrow I_1 = I_2 / m$

$\Phi_{11} = \Phi_{22} = 0$ (No hay flujo de fugas o de dispersión)

Con este modelo idealizado se tiene:

$$m = N_1 / N_2 = E_1 / E_2 = V_1 / V_2 = I_2 / I_1$$

$$S_1 = S_2$$

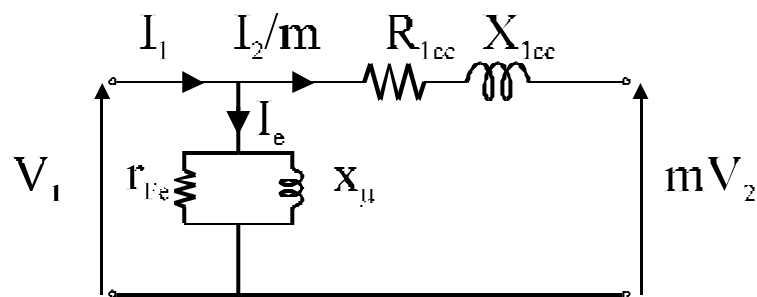
Recordemos que, en un transformador real:

$$m = N_1 / N_2 = E_1 / E_2 \cong V_1 / V_2 \cong I_2 / I_1$$

$$S_1 < S_2$$

CIRCUITOS EQUIVALENTES.

El más utilizado es el *circuito equivalente aproximado referido al primario*:



El módulo de la impedancia de cortocircuito Z_{1cc} así como su parte real R_{1cc} y su parte imaginaria X_{1cc} suelen expresarse en % o p.u. (por unidad o en tanto por uno). El valor base o de referencia es la impedancia nominal Z_{1n} o Z_{2n} .

Aplicando la 2ª L.K. al circuito equivalente anterior, se obtiene una ecuación compleja que, representada en el plano de Gauss (diagrama fasorial) permite obtener la *aproximación o ecuación de Kapp*, que es una ecuación algebraica:

$$V_1 = mV_2 + I_2/m (R_{1cc} \cos \phi_2 + X_{1cc} \sin \phi_2)$$

ENSAYOS

ENSAYO EN VACÍO

OBJETO

Determinar los valores de los siguientes parámetros:

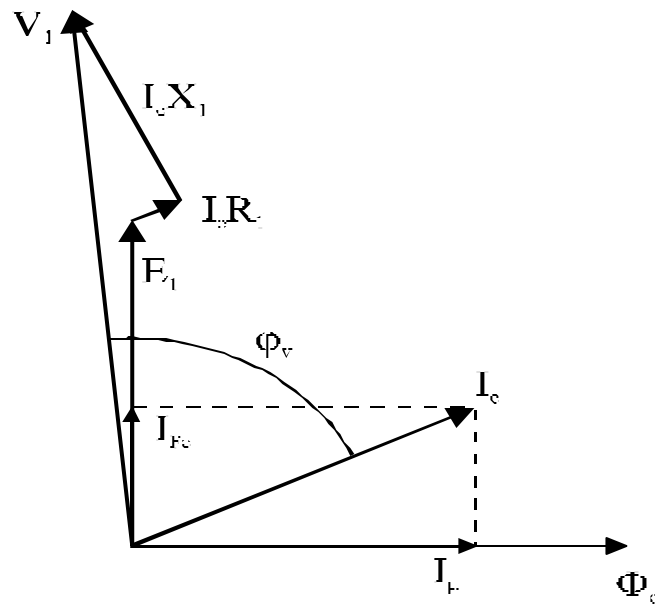
- r_{Fe} : Resistencia de pérdidas en el hierro
- x_ϕ : Reactancia magnetizante
- m : Relación de transformación
- I_e : Corriente de excitación o de vacío
- P_{Fe} : Pérdidas en el hierro

DESCRIPCIÓN

Consiste en alimentar, generalmente por el lado de BT, a la tensión nominal, estando el secundario abierto.

MAGNITUDES A MEDIR

- V_{1n} : Tensión nominal aplicada al primario
- V_{2v} : Tensión secundaria en vacío
- I_e : Corriente de excitación o de vacío
- P_v : Potencia consumida en vacío

DIAGRAMA VECTORIAL**FÓRMULAS**

$$m = V_{1n} / V_{2v}$$

$$P_v = V_{1n} I_e \cos \phi_v = P_{Fe}$$

$$I_{Fe} = I_e \cos \phi_v$$

$$I_{\mu} = I_e \sin \phi_v$$

$$r_{Fe} = V_{1n} / I_{Fe}$$

$$x_{\mu} = V_{1n} / I_{\mu}$$

ENSAYO EN CORTO CIRCUITO**OBJETO**

Determinar los valores de los siguientes parámetros:

$R_{1cc} = R_1 + m^2 R_2$: Resistencia total referida al primario

$X_{1cc} = X_1 + m^2 X_2$: Reactancia total referida al primario

$P_{Cu}]_{PC}$: Pérdidas en el cobre a plena carga

V_{1cc} : Tensión de corto circuito referida al primario

V_{2cc} : Tensión de corto circuito referida al secundario

$v_{cc} (\%)$: Tensión de corto circuito

z_{cc} (%) : Impedancia de corto circuito

DESCRIPCIÓN

Consiste en cortocircuitar el secundario, generalmente el lado de BT, y alimentar el primario (AT) con una tensión de ensayo V_{1cc} reducida, tal que por dicho arrollamiento circule la corriente nominal.

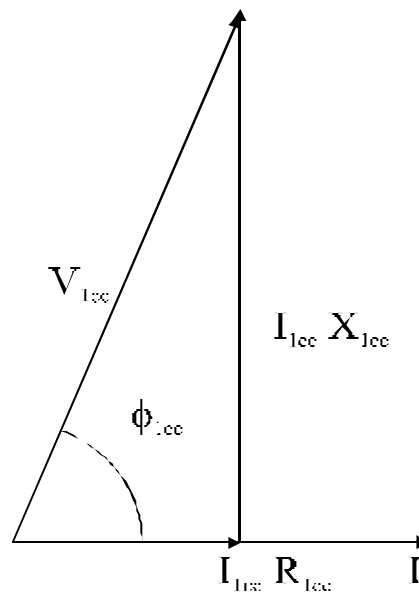
MAGNITUDES A MEDIR

P_{cc} : Potencia consumida en el ensayo en c.c.

V_{1cc} : Tensión de c.c. con la que se alimenta al primario

I_{1cc} : Corriente de c.c.

DIAGRAMA VECTORIAL



FÓRMULAS

$$P_{Cu}]_{PC} = P_{cc}$$

$$I_{1cc} = I_{1n}$$

$$P_{cc} = V_{1cc} I_{1cc} \cos \phi_{cc}$$

$$Z_{1cc} = V_{1cc} / I_{1cc}$$

$$R_{1cc} = Z_{1cc} \cos \phi_{cc}$$

$$X_{1cc} = Z_{1cc} \sen \phi_{cc}$$

$$z_{1cc} (\%) = z_{2cc} (\%) = z_{cc} (\%) = Z_{1cc} / Z_{1n} = Z_{2cc} / Z_{2n}$$

$$v_{1cc} (\%) = v_{2cc} (\%) = v_{cc} (\%) = \\ = V_{1cc} / V_{1n} = V_{2cc} / V_{2n}$$

$$Z_{1n} = V_{1n} / I_{1n} = V_{1n}^2 / S_n \\ Z_{2n} = V_{2n} / I_{2n} = V_{2n}^2 / S_n$$

$$v_{1cc} (\%) = v_{2cc} (\%) = v_{cc} (\%) = z_{cc} (\%)$$

$$V_{1cc} = m V_{2cc} \\ I_{1cc} = I_{2cc} / m \\ Z_{1cc} = m^2 Z_{2cc}$$

RENDIMIENTO.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + \text{Pérdidas}} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = f(\text{carga})$$

Las pérdidas en el hierro se admite que son constantes, esto es, independientes de la carga para una tensión de alimentación V_{1n} fija, y equivalen a la potencia consumida en el ensayo en vacío P_v .

Las pérdidas en el cobre disminuyen con el cuadrado de la carga (son pérdidas Joule) y pueden expresarse en función de la potencia consumida en el ensayo en corto circuito P_{cc} (pérdidas en el cobre a plena carga $P_{Cu}]_{PC}$) y del *índice de carga* C .

$$C = I_2/I_{2n} \cong I_1/I_{1n} = S/S_n$$

$$\eta = \frac{C V_2 I_{2n} \cos \phi_2}{C V_2 I_{2n} \cos \phi_2 + P_v + C^2 P_{cc}}$$

El índice de carga que se corresponde con el rendimiento máximo C_{hmax} (al que suele llamarse *factor de utilización óptimo* μ) es:

$$C_{hmax} = \mu = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cc}}}$$

También podría demostrarse que el rendimiento es óptimo cuando las pérdidas variables P_{Cu} se igualan con las pérdidas fijas P_{Fe} .

La potencia aparente a la que el rendimiento es máximo es:

$$S_{h_{max}} = \mu S_n$$

REGULACIÓN.

Con la tensión nominal V_{1n} aplicada al primario, la tensión secundaria, generalmente, es menor en carga que en vacío: Esta caída de tensión suele darse en % referida a la tensión nominal, denominándose *coeficiente o factor de regulación* ε (%):

$$\varepsilon (\%) = \frac{V_{2n} - V_{2c}}{V_{2n}} \times 100 \quad \text{para } V_1 = \text{cte.} = V_{1n}$$

Visto de otra forma, para mantener la tensión secundaria en el valor nominal, es necesario alimentar al primario con mayor tensión en carga que en vacío:

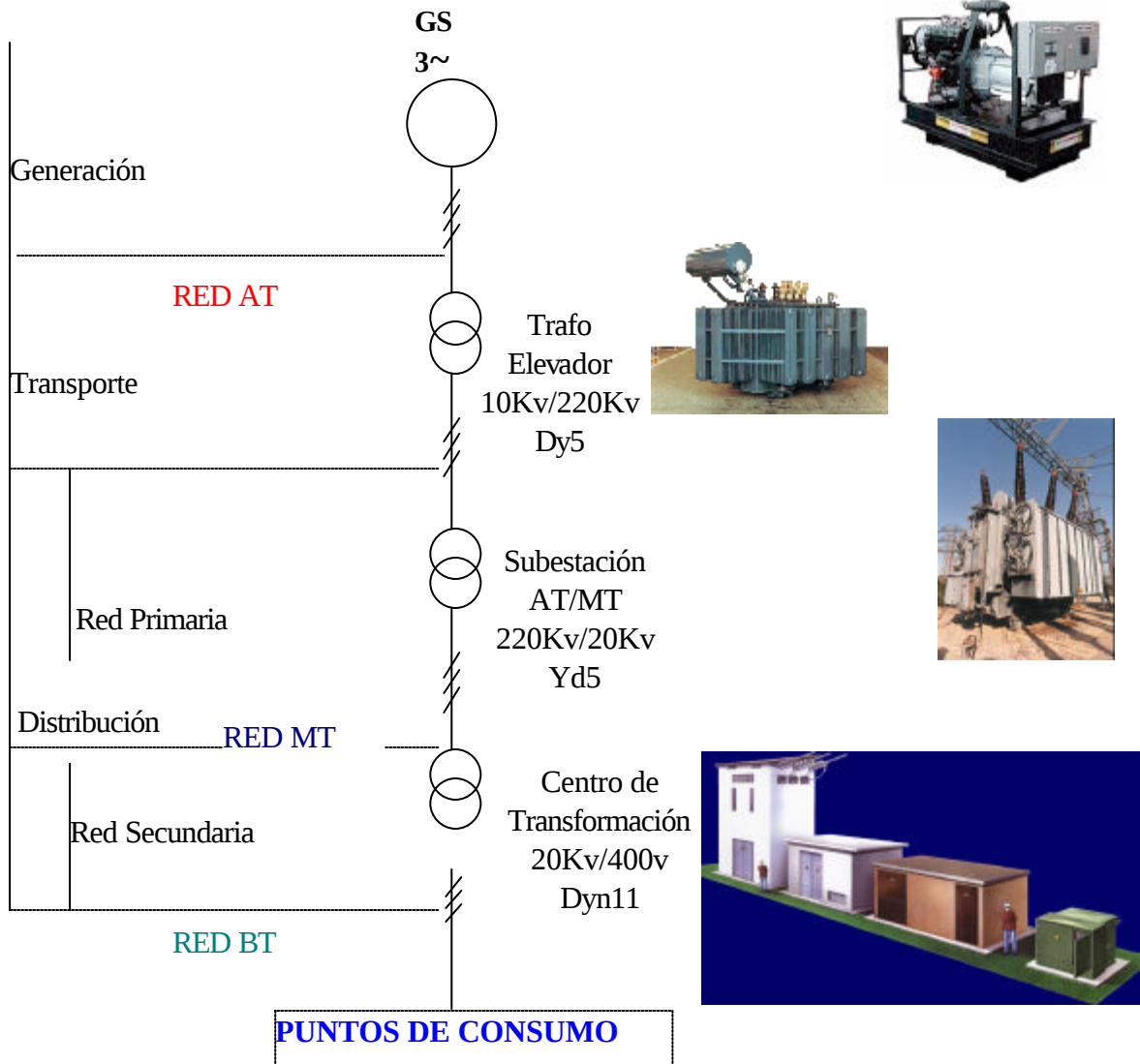
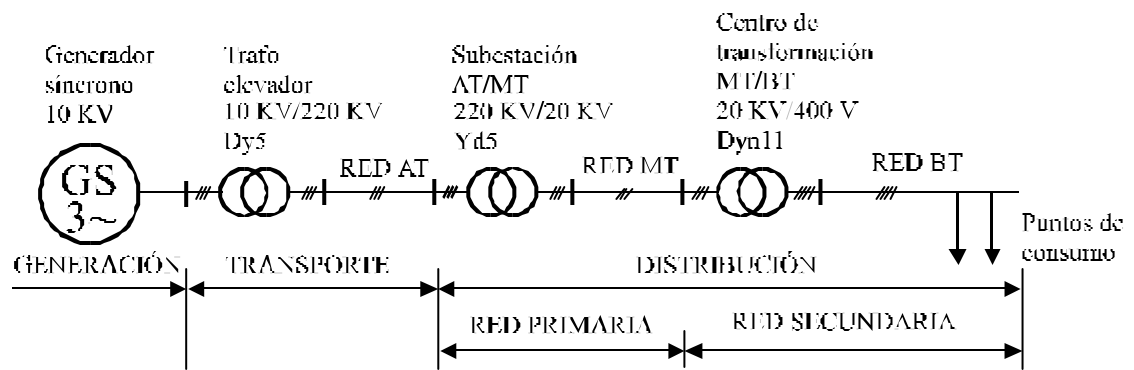
$$\varepsilon (\%) = \frac{V_{2n} - V_{2c}}{V_{2n}} \times 100 \quad \text{para } V_1 = \text{cte.} = V_{1n}$$

Aunque antes se ha hablado de “caída de tensión”, con cargas capacitivas puede ocurrir que la tensión secundaria en carga sea mayor que en vacío (*Efecto Ferranti*). Se recomienda dibujar un diagrama vectorial para entender la influencia del $\cos\phi$ de la carga en el signo de la caída de tensión.

5.7. TRAFOS EN SISTEMAS TRIFÁSICOS, DESIGNACIÓN.

BANCOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS Y TRAFOS TRIFÁSICOS.

Para transformar el nivel de tensión en un sistema trifásico, se emplean transformadores, al igual que en los sistemas monofásicos. En un *sistema eléctrico de potencia* se emplean transformadores trifásicos con gran profusión. Un esquema de principio, indicando los tres subsistemas clásicos de *generación, transporte y distribución*, se muestra en la siguiente figura.



Los transformadores deberán tener tres devanados primarios y tres secundarios montados sobre un único circuito magnético (*Transformador trifásico* de columnas o acorazado) o, alternativamente, conectarse entre sí tres transformadores monofásicos para formar un banco trifásico (*Banco trifásico* a base de transformadores monofásicos).

El circuito magnético de un transformador trifásico es similar al de los transformadores monofásicos, disponiéndose ahora de tres columnas, sobre las que van arrollados primario y secundario de cada una de las tres fases. La disposición constructiva de los circuitos eléctricos suele ser del tipo “devanados concéntricos o doblemente concéntricos”.

También existen transformadores trifásicos “acorazados”, que constan de tres columnas principales más dos columnas laterales de retorno del flujo de sección mitad que las anteriores.

Generalmente se prefiere (por tamaño, rendimiento, coste inicial, etc.) un transformador trifásico a un banco trifásico. Si se recurre alguna vez a la segunda alternativa es en los casos en que es determinante la disponibilidad o fiabilidad del sistema, así como por dificultades de transporte.

CONEXIONES.

Para ser empleados en circuitos trifásicos, los transformadores monofásicos (caso de bancos trifásicos a base de transformadores monofásicos) o los arrollamientos de cada una de las fases o columnas (caso de transformadores trifásicos) pueden conectarse según diversas disposiciones, unas simétricas y otras asimétricas.

Si la conexión es *simétrica*, cada fase del primario es igual que las otras dos, y lo mismo ocurre con las fases del secundario.

Si la conexión es *asimétrica*, no existe identidad, desde el punto de vista eléctrico, magnético y constructivo, entre las tres fases. Un ejemplo notable de disposición asimétrica es la *conexión en V* o *en triángulo abierto* que emplea sólo dos transformadores monofásicos (caso de bancos de transformadores) o dos de las tres fases de un transformador trifásico, cuando una de ellas queda fuera de servicio.

Las conexiones simétricas son:

Estrella (AT) - estrella (BT)	Yy
Triángulo (AT) - triángulo (BT)	Dd
Estrella (AT) - triángulo (BT)	Yd
Triángulo (AT) - estrella (BT)	Dy
Estrella (AT) - zig zag (BT)	Yz
Triángulo (AT) - zig zag (BT)	Dz

La conexión estrella consiste en unir los terminales de igual polaridad (de primario o secundario) para formar el punto neutro de la estrella.

La conexión triángulo consiste en unir los extremos de polaridad opuesta de fases adyacentes para formar un triángulo.

La conexión zig zag (sólo se emplea en el lado de menor tensión) consiste en subdividir en dos partes iguales los devanados secundarios, se forma un neutro como se indica en la siguiente figura y se conectan en serie, a cada rama de la estrella, las semibobinas invertidas de las fases adyacentes en un cierto orden cíclico.

MAGNITUD	CONEXIÓN		
	Y	D	z
Tensión de línea	V	V	V
Corriente de línea	I	I	I
Tensión simple	$V / \sqrt{3}$	V	$V / \sqrt{3}$
Corriente de fase	I	$I / \sqrt{3}$	I
Sección de Cu	s	$s / \sqrt{3}$	s
Número de espiras	N	$N \sqrt{3}$	$2N / \sqrt{3}$
Peso de Cu	100	100	115,5

CUADRO
DE
GRUPOS DE CONEXIONES USUALES SEGÚN VDE 0532/11.71¹

Índice de desfase (horario)	SÍMBOLO DE ACOPLAMIENTO O DE CONEXIONES	Esquema vectorial		Esquema de conexiones	Relación de transformación (2)
		mayor tensión	menor tensión		
0 (0°)	D d 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	(3) Y y 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 0				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	(3) D y 5				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 5				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 5				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
6 (180°)	D d 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Y y 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 6				$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
11 (330°) (-30°)	D y 11				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 11				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 11				$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$

CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

En líneas generales, puede decirse que, en transformadores pequeños o medianos con tensiones elevadas o muy elevadas (arrollamientos previstos para intensidades de corriente pequeñas), el constructor prefiere la **conexión estrella**.

Tratándose de potencias elevadas y tensiones moderadas (arrollamientos previstos para intensidades de corriente elevadas), se prefiere la **conexión triángulo**.

CONEXIÓN Yy0 (A2 - VDE)**CARACTERÍSTICAS:**

Disponibilidad de neutro en B.T. ¹

No recomendable cuando se prevén grandes desequilibrios: $I_N \leq 10\% I_{nom}$.

APLICACIONES:

Potencias pequeñas y cargas equilibradas.

Subestaciones elevadoras de M.T. (hasta 66 KV), p.e., 20 KV/66 KV.

Transformador de distribución en M.T., p.e., 66 KV/6 KV (esta aplicación es más rara a causa del mal comportamiento frente a cargas desequilibradas).

CONEXIÓN Dy5 (C1 - VDE)**CARACTERÍSTICAS:**

Disponibilidad de neutro en B.T.

Admite desequilibrios: $I_N \approx I_{nom}$.

No genera terceras armónicas de tensión. ²

APLICACIONES:

Transformadores elevadores de principio de línea (de Central), p.e., 10 KV/132 KV

Transformador de distribución en B.T. (Centro de Transformación M.T./B.T) ³

CONEXIÓN Yd5 (C2 - VDE)**CARACTERÍSTICAS:**

¹ B.T. ≤ 1 KV
A.T. > 1 KV
M.T. = 15 KV # **20 KV** # 28 KV # 36 KV

² 150 Hz

³ La conexión Dy con neutro a tierra, es la más empleada en C.T.
Según normas UNE (20-138-90) en transformadores de distribución en B.T.:
 $S_{nom} \leq 100$ KVA $\Rightarrow$ Yzn11
 $S_{nom} \leq 160$ KVA $\Rightarrow$ Dyn11

Imposibilidad de neutro en B.T.

Admite desequilibrios: $I_N \approx I_{nom}$.

No genera terceras armónicas de tensión.

APLICACIONES:

Transformadores reductores de final de línea (de Subestación), p.e., 132 KV/20 KV.

CONEXIÓN Yz5 (C3 - VDE)

CARACTERÍSTICAS:

Disponibilidad de neutro en B.T.

Admite desequilibrios: $I_N \approx I_{nom}$.

No genera terceras armónicas de tensión.

Se puede conectar a tensiones relativamente elevadas. Como transformador de C.T., con tensiones elevadas, es más barato que el Dy.

APLICACIONES:

Exclusivamente para redes de distribución en B.T. (Centros de Transformación) de reducida potencia (≤ 400 KVA).

Es idóneo para cargas muy desequilibradas.

CONEXIÓN Dy11 (D1 - VDE)

CARACTERÍSTICAS:

Disponibilidad de neutro en B.T.

Admite desequilibrios: $I_N \approx I_{nom}$.

No genera terceras armónicas de tensión.

APLICACIONES:

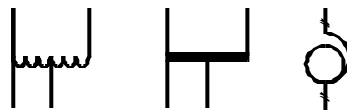
El Dyn11 es el más común en C.T., p.e., 20 KV/400 V.

5.8. AUTOTRANSFORMADORES.

Los devanados de un transformador ordinario, aunque están acoplados magnéticamente, están aislados eléctricamente entre sí. Es posible modificar las características de funcionamiento de los transformadores, interconectando eléctricamente los devanados primario y secundario. Tales dispositivos reciben el nombre de *autotransformadores*. Los beneficios derivados de esta modificación son, en líneas generales:

Menor coste inicial, peso y dimensiones.
Mayor rendimiento.
Menor caída de tensión porcentual.

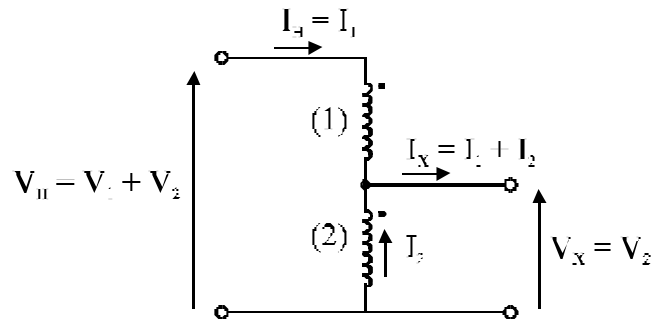
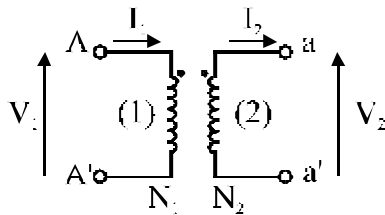
Estas ventajas son ciertas, especialmente, para transformar una tensión en otra discrepantes en un 25% o menos. Se pueden emplear como reductores o elevadores. Como veremos más adelante, hay también serios inconvenientes que, en muchas aplicaciones, desaconsejan el uso de autotransformadores. Los símbolos recomendados por la C.E.I., son:



Los autotransformadores pueden emplearse tanto en transformaciones monofásicas como en transformaciones trifásicas. Los trifásicos habitualmente son de conexión Y, aunque ésta no es la única posible. Sus aplicaciones están limitadas por el Reglamento de Estaciones de Transformación (Art. 19), siendo las más frecuentes:

Como arrancadores para motores trifásicos de media y elevada potencia.
Para obtener un sistema trifilar a partir de un sistema bifilar.
En redes de distribución cuando la tensión menor es inferior en menos de un 25% a la tensión más elevada y con la preceptiva puesta a tierra del neutro de la estrella

Para obtener las *relaciones fundamentales* en un autotransformador, partimos del esquema de principio de un transformador ideal, con los valores nominales que se indican en la siguiente figura, y conexiónamos los devanados para convertirlo en un autotransformador:



TRANSFORMADOR IDEAL

- (1) : Primario o entrada
 (2) : Secundario o salida
 $m_t = N_1 / N_2$

AUTOTRANFORMADOR

- (1) : Devanado serie
 (2) : Devanado común
 (H) : Entrada
 (X) : Salida
 $m_a = (N_1 + N_2) / N_2 = 1 + m_t$

Aunque las relaciones entre tensiones, corrientes, etc., son, en general, con carácter complejo, como en los autotransformadores se desprecia prácticamente siempre la corriente de excitación (porcentualmente es más pequeña que en los transformadores ordinarios), las relaciones entre corrientes son válidas con carácter algebraico (las corrientes I_H , I_X , I_1 e I_2 están en fase).

Las relaciones de transformación son:

$$m_t = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{V_1}{V_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

$$m_a = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = \frac{E_H}{E_X} = 1 + m_t \approx \frac{V_H}{V_X} \approx \frac{I_X}{I_H}$$

Las potencias, despreciando todo tipo de pérdidas:

$$S_a = V_X I_X = V_H I_H$$

$$S_t = V_2 I_2 = V_1 I_1$$

$$S_a = S_t \left(1 + \frac{1}{m_t}\right) = S_t \left(\frac{m_a}{m_a - 1}\right)$$

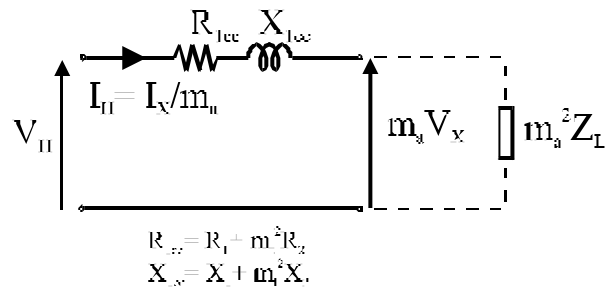
4

S_a recibe el nombre de *potencia de paso*, y es la potencia aparente transformable. S_t recibe el nombre de *potencia propia* o *potencia interna*, y es la potencia del transformador cuyo material constructivo o valor de adquisición se precisa.

⁴ Si consideramos que el devanado (1) es el común y el (2) el serie, en toda la formulación habría que intercambiar los índices 1 por 2. En ese caso se tendría, p.e., que $S_a = S_t (1 + m_t)$.

La relación entre la potencia de paso y la potencia interna, expresa con toda claridad la mayor ventaja de los autotransformadores: Con relaciones de transformación próximas a la unidad $S_a \gg S_t$. En particular, en el límite, cuando $m_a = 1$ la potencia de paso tiende a infinito.

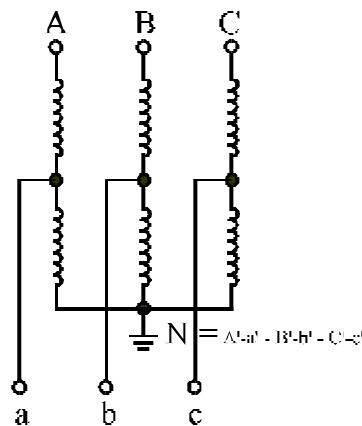
El *circuito equivalente aproximado*, referido a la entrada, es:



La ecuación (algebraica) o *aproximación de Kapp*:

$$V_H = m_a V_X + I_H (R_{1cc} \cos \phi + X_{1cc} \sin \phi)$$

Los *autotransformadores trifásicos* empleados para arranque de motores, en subestaciones, etc., son generalmente con conexión Y. Su esquema es:



Se resumen, a continuación, las principales ventajas e inconvenientes de los autotransformadores:

PARÁMETROS A COMPARAR	TRAFO	AUTOTRAFO
Potencia nominal	S_n	S_n
Tensiones nominales	V_{1n} / V_{2n}	V_{1n} / V_{2n}
Densidad de corriente	j	j
Densidad de flujo	B	B
VENTAJAS DE LOS AUTOTRAFOS		
Peso, Tamaño y Coste	PTC	$< \text{PTC}$
Rendimiento	η	$> \eta$
Corriente de vacío	I_0	$< I_0$
Regulación de tensión	ε	$< \varepsilon$
Factor de potencia	$\cos \phi$	$< \cos \phi$
INCONVENIENTES DE LOS AUTOTRAFOS		
Tensión de c.c.	$v_{cc} (\%)$	$< v_{cc} (\%)$
Corriente de c.c. accidental	I_{cc}	$> I_{cc}$
Acoplamiento en paralelo	Fácil	Difícil
Conexión eléctrica entre primario y secundario	No	Sí Posibilidad de accidente

EJERCICIOS DE APLICACIÓN

Ejercicio 1:

Un transformador monofásico de 250 KVA # 30 KV/380 V # 50 Hz, tiene una impedancia de corto circuito del 6% y unas pérdidas en el hierro de 650 KW. Las pérdidas en el cobre a plena carga se estiman en 3,9 KW. Determinar la tensión a la salida a plena carga y al 75% de plena carga, con factor de potencia 0,8 en retraso, cuando se alimenta a su tensión nominal.

Ejercicio 2:

Un transformador trifásico debe alimentar un sistema de alumbrado incandescente de 300 Kw. a 120 V y 4 hilos y f.d.p. unidad.

El transformador trifásico se alimenta a 3 hilos, 6600 V estando el primario en triángulo. Determinar:

- 1º Tensión de línea e intensidad de fase en el primario.
- 2º Tensión de línea e intensidad de línea en el secundario.
- 3º Relación de transformación.

Ejercicio 3:

Se han realizado ensayos en un transformador trifásico, conexión D y 5, de 100 KVA, 400/6600 V, dando los siguientes resultados:

E.VACÍO (Alimentando por B.T.): 1250 W # 400 V

E. C.C. (Alimentando por A.T.): 1600 W # 314 V # Corriente plena carga.

Determinar:

- a) Rendimiento a plena carga con f.d.p. 0,8 y a media carga con f.d.p. unidad.
- b) Rendimiento máximo y la carga para la cual se produce con f.d.p. unidad.
- c) Tensión necesaria en primario, a P.C. y $\cos \phi$ 0,8, si la tensión secundaria se mantiene a 6600 V.

Ejercicio 4:

Un transformador trifásico tiene las siguientes características nominales:

100 KVA # 3000/380 V # Conexión Yy0

Los resultados de los ensayos en vacío y en cortocircuito, han dado los siguientes valores:

VACÍO: 3000 V # 5 KW

CORTOCIRCUITO: 300 V # Corriente nominal # 6 KW (por A.T.)

Si la tensión secundaria se mantiene constante en 380 V, determinar:

- a) La tensión necesaria en el primario, cuando el transformador alimenta una carga equilibrada de 50 KW con $\cos \phi$ 0,6 capacitivo.

b) Potencia aparente de máximo rendimiento y rendimiento máximo para un f.d.p. unidad.

Ejercicio 5:

Durante los ensayos, un transformador de 5 KVA, dio los siguientes resultados:

Circuito abierto: con la tensión nominal aplicada, la potencia absorbida fue de 75 W.

Cortocircuito: con una tensión reducida aplicada al primario y circulando por él la corriente de plena carga, la potencia absorbida fue de 90 W.

Calcular el rendimiento a 0,75 de la plena carga con factor de potencia de 0,8 en retraso. ¿Para qué carga es máximo el rendimiento?.

Ejercicio 6:

El esquema unifilar de la figura, representa una red de distribución alimentada por un trafo Yd 5 de 10000/3500 V. Se consideran despreciables la corriente de excitación y las pérdidas en vacío. Al realizar una prueba de cortocircuito, alimentando por el lado de 10000 V, se obtuvo:

$$2720 \text{ V} \# 2000 \text{ A} \# \cos \phi_{cc} = 0,64$$

La impedancia de la línea trifásica en el conductor es la que se indica en el esquema. Calcular:

- La tensión de entrada al transformador para que la tensión en F sea de 2500 V.
- El rendimiento del transformador.

