

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

TEMAS DE ESTUDO

- O transformador monofásico: o transformador ideal e o transformador real
- Circuitos equivalentes
- Equações de funcionamento em vazio e em carga
- Aproximação de *Kapp*
- Ensaio em vazio e em curto-circuito
- Características de funcionamento em carga.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

NO FINAL DESTES MÓDULO O ALUNO DEVERÁ SER CAPAZ DE:

- Reconhecer as diferenças entre um transformador ideal e um transformador real.
- Compreender as simplificações efectuadas na obtenção dos diferentes circuitos equivalentes.
- Estabelecer o conjunto de equações correspondentes a cada circuito.
- Entender a representação fasorial associada a cada esquema (modelo) equivalente e utilizar estas ferramentas como suporte para a explicação dos fenómenos em jogo bem como para os cálculos a efectuar.
- Compreender o objectivo de se realizar ensaios económicos, o seu significado e o modo como se executam.
- Utilizar os dados obtidos através dos ensaios económicos para efectuar os devidos cálculos. Compreender as aproximações em jogo.
- Apreender o funcionamento do transformador com base no estudo das suas características de funcionamento.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

"O transformador é uma máquina eléctrica **estática** que absorve energia eléctrica através de um enrolamento e a fornece, transformada, por um ou mais enrolamentos, isolados electricamente do primeiro."

O transformador permite o uso quase exclusivo de corrente alternada no transporte e distribuição de energia eléctrica.

Motivos técnicos, económicos e de segurança implicam a utilização de diferentes valores de tensão para a produção, o transporte, a distribuição e o consumo de energia eléctrica. A adaptação de tensões por meios estáticos deriva da lei da indução. Assim, sendo o transformador uma máquina estática, para que o princípio da indução se verifique, as tensões devem ser variáveis no tempo...

A importância do transformador é notória quer para os SEE...

- Transformador de medida
- Transformador de isolamento
- Transformador de corrente constante
- Transformador com tensão de saída ajustável
- Transformador do número de fases

...quer para os sistemas de comunicação com os transformadores de sinal...

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

- ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O núcleo ferromagnético deve ter forma simples, ser robusto, económico e permitir montar e desmontar com facilidade os enrolamentos....

Como o fluxo magnético é variável surgem fenómenos de histerese e de correntes de Foucault que conduzem a perdas no núcleo. A estas perdas chamamos perdas magnéticas (p_{mag}) ou perdas no ferro (p_{Fe}).

Como poderemos minimizar o valor dessas perdas num transformador?

Recorrendo a abordagens específicas em termos construtivos e de escolha de materiais.

Os melhores materiais para o núcleo:

- Chapa de liga de aço fundido com silício laminado a quente (3 a 5% de Si)
- Chapas de cristais orientados obtidas por laminagem a frio e tratamento térmico de alta precisão
- Materiais amorfos (fogem do âmbito do nosso estudo...)

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

A adição de silício permite:

- Aumentar a resistividade do material ferromagnético reduzindo as correntes de Foucault
- Diminuir a área do ciclo histerético do material e consequentemente reduzir as perdas por histerese
- Diminuir/impedir o envelhecimento magnético e melhorar características magnéticas do material...)

Há um limite para a adição de silício. Um excesso torna o aço quebradiço. Por este motivo são indicadas as percentagens anteriores de 3 a 5%.

Em termos construtivos, para minimizar perdas por correntes de Foucault, em lugar de ter núcleos maciços, os transformadores apresentam núcleos constituídos por chapas e que são “empilhadas”, estando todas isoladas entre si.

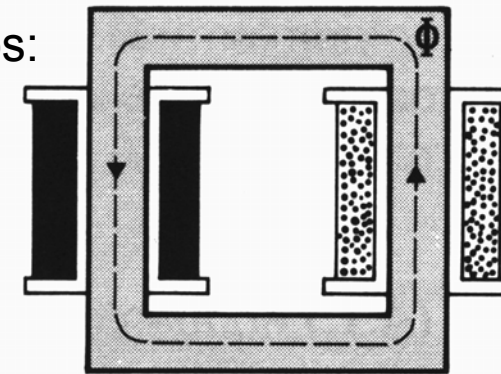
Adiante voltaremos à questão da minimização das perdas.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

ESTRUTURAS MAIS VULGARES (NÚCLEOS) EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

- Tipos de núcleos nos transformadores monofásicos:

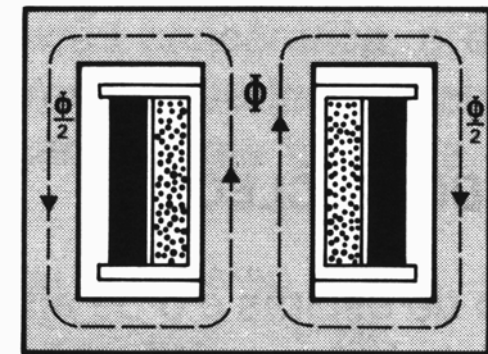
- Núcleo de colunas (core type) – Fig.a
- Núcleo couraçado (shell type) – Fig.b



a

- Tipos de secção dos núcleos

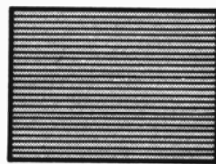
- a - Secção quadrada
- b - Secção rectangular
- c - Secção escalonada
- d - Secção com canais de refrigeração



b



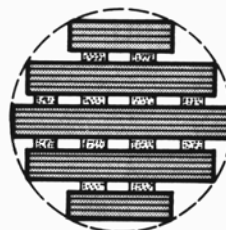
a



b



c



d

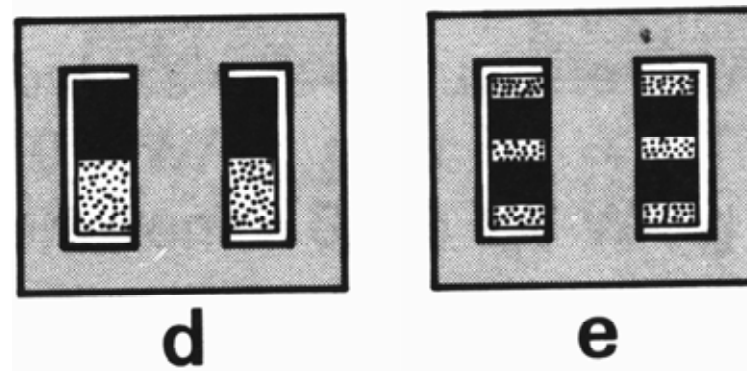
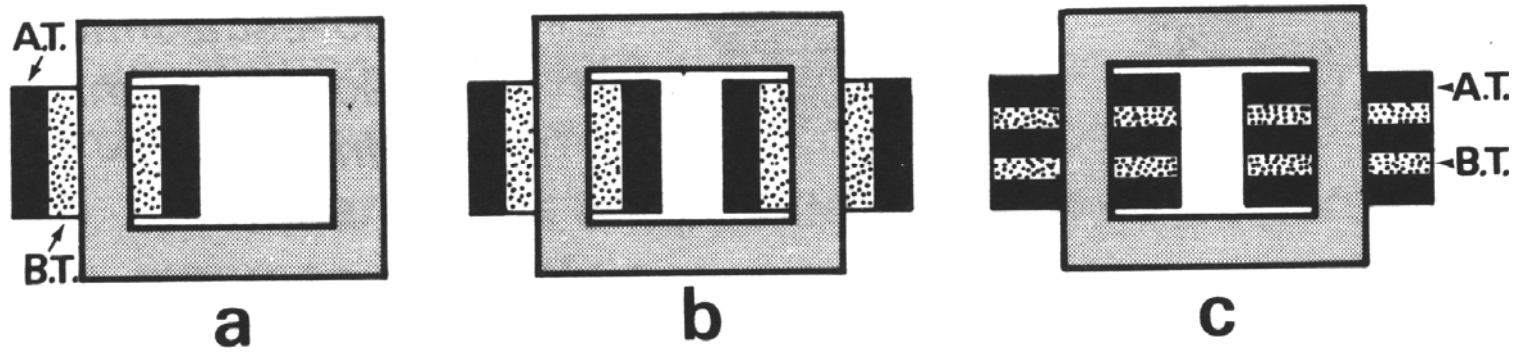
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

DISPOSIÇÃO DOS ENROLAMENTOS - TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS (O texto a seguir reporta-se ao acetato nº8)

- Bobinas concêntricas – transformadores de colunas (figs. a, b e c)
 - Ambos os enrolamentos igualmente repartidos pelas duas colunas
 - Baixa tensão junto ao núcleo. Assim poupa-se no isolamento bastando isolar criteriosamente o enrolamento de baixa do de alta. Se o de alta estivesse junto do núcleo seria também necessário isolar este do núcleo de forma capaz
- Bobinas alternadas – transformadores couraçados (figs. d e e)
 - Ambos os enrolamentos são fraccionados em bobinas parcelares dispostas alternadamente
 - Baixa tensão sempre nos extremos

O enrolamento com maior número de espiras é o de alta tensão ao invés do de baixa tensão que tem menor número de espiras

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Para melhor compreendermos o princípio de funcionamento do transformador, é usual começarmos o estudo admitindo o funcionamento deste em vazio. Em seguida veremos quais as diferenças para o funcionamento em carga.

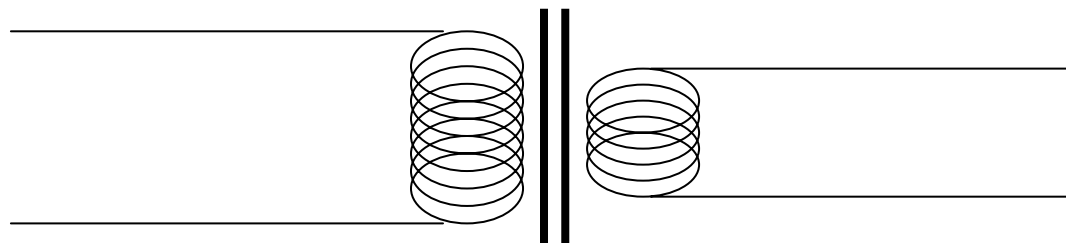
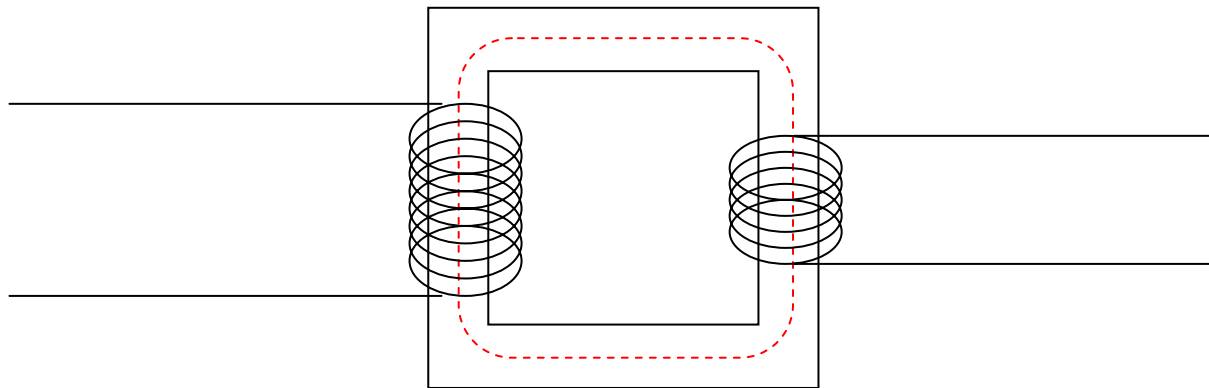
Para evitar confusões, vamos convencionar que:

- o enrolamento **primário** é aquele que recebe energia de uma fonte....
- as grandezas do **primário** serão sempre afectadas do índice **1**.
- o enrolamento **secundário** é aquele que fornece energia transformada ao receptor ou rede...
- as grandezas do **secundário** serão sempre afectadas do índice **2**.
- as grandezas **nominais** serão sempre referidas pelo índice **n**.
- as grandezas referentes a **vazio** serão sempre afectadas do índice **0**.
- as letras minúsculas - u, i, e - indicarão valores instantâneos
- as letras maiúsculas – U, I, E - indicarão valores eficazes

Vamos também considerar que o número de espiras do primário, N_1 , e o do secundário, N_2 , são diferentes.

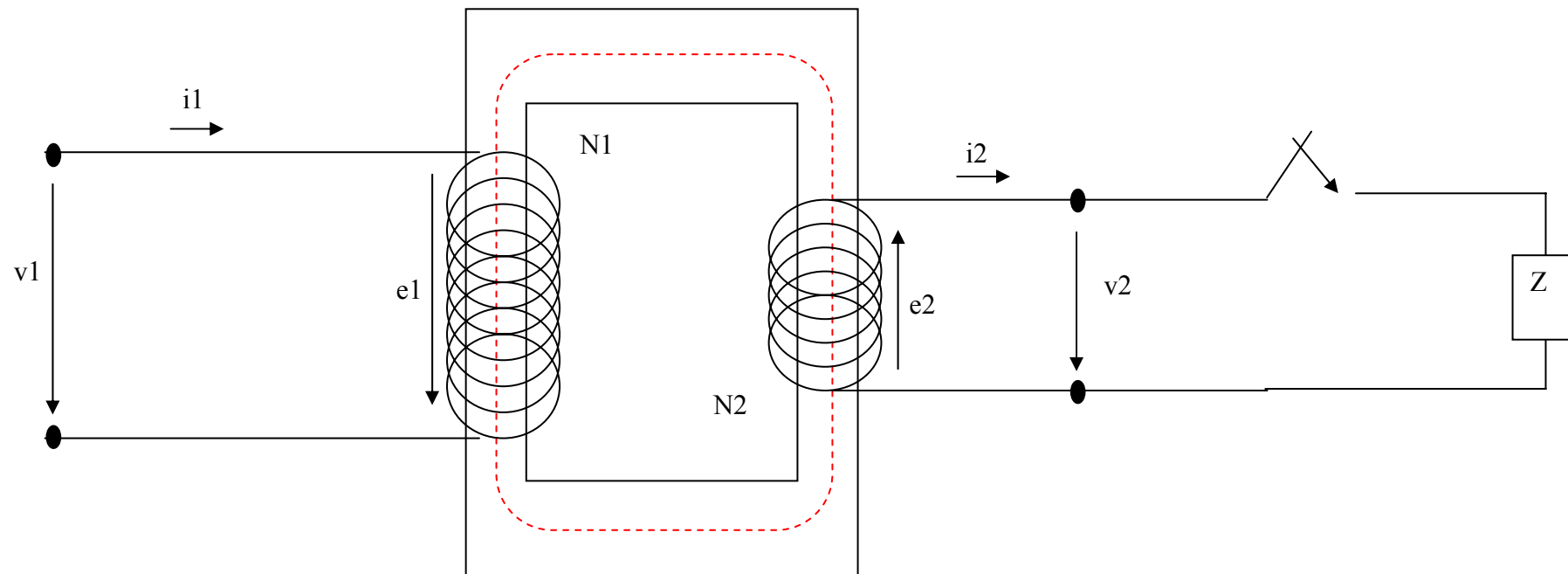
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Representações esquemáticas de um transformador de 2 enrolamentos



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

O TRANSFORMADOR IDEAL – ANÁLISE EM VAZIO



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Transformador ideal:

- A resistência dos enrolamentos é desprezável ($r=0$)
- Não se considera a existência de fluxo de fugas logo, todo o fluxo está confinado ao núcleo ($\Phi_t = \Phi_u + \Phi_{\text{fugas}}$ onde $\Phi_{\text{fugas}} = 0$, ficando $\Phi_t \approx \Phi_u$)
- As perdas magnéticas (isto é, no núcleo) são desprezáveis
- Sendo as perdas nulas a potência absorvida no primário é igual à potência cedida pelo secundário.
- A permeabilidade magnética do núcleo é considerada como sendo infinita, pelo que a corrente de excitação, ou magnetização, necessária para estabelecer o fluxo magnético é zero, ou seja, é desprezável. Assim, a FMM necessária para assegurar o fluxo no núcleo é, nestas condições, igualmente zero. Quando se alimenta o primário com uma tensão v_1 variável no tempo surge no núcleo um fluxo Φ também variável no tempo. Em consequência surge uma FCEM induzida no primário dada por e_1 .

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Uma vez que $r_1 = 0$

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

O fluxo Φ , comum aos dois enrolamentos, induz uma FEM e_2 no secundário.

Uma vez que $r_2 = 0$:

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Trabalhando as equações:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

Sendo m a razão de transformação, vemos que as tensões são directamente proporcionais a m .

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

O TRANSFORMADOR IDEAL – ANÁLISE EM CARGA

Vamos fechar o interruptor da figura anterior e ligar uma carga **Z** ao secundário do nosso transformador ideal.

No secundário vai circular uma corrente **i₂** e essa corrente vai proporcionar no núcleo uma FMM dada por **N₂i₂**.

Em consequência surgirá no primário uma corrente **i₁** e uma FMM dada por **N₁i₁**, força esta que se vai opor a **N₂i₂**. Se assim não fosse, **N₂i₂** alteraria drasticamente o fluxo no núcleo e o equilíbrio existente entre **v₁** e **e₁** seria perturbado.

N₁i₁ e **N₂i₂** têm sentidos opostos.

Ao dizer-se que o valor de FMM necessário para criar o fluxo no núcleo do transformador é zero estamos a dizer que:

“ **N₁i₁ – N₂i₂ = FMM para garantir $\Phi = 0$** “

Logo: **N₁i₁ = N₂i₂** **donde** $\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{m}$

Ou seja, as correntes são inversamente proporcionais à razão de transformação!

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Se a carga exigir mais corrente, então, mais corrente será absorvida pelo primário o que implica a existência de um equilíbrio de FMM que por sua vez assegura que o primário “saiba” da necessidade de corrente no secundário.

Retomando as equações anteriores, para o transformador ideal, trabalhando-as teremos:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2$$

Ou seja, a potência instantânea absorvida é igual à potência instantânea cedida à carga.

Até este momento temos falado em grandezas variáveis no tempo e as expressões têm sido apresentadas em valor absoluto!

Se considerarmos grandezas alternadas sinusoidais e ainda incluirmos a rotação de fase de 180° que se dá nas tensões e correntes do primário para o secundário, fica:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{z}_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{E}_2 = r_2 \underline{I}_2 + jx_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2 = \underline{z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2$$

$$N_1 \underline{I}_1 + N_2 \underline{I}_2 = N_1 \underline{I}_0$$

$$\underline{E}_1 = -j\omega N_1 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}}$$

$$\underline{E}_2 = -j\omega N_2 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

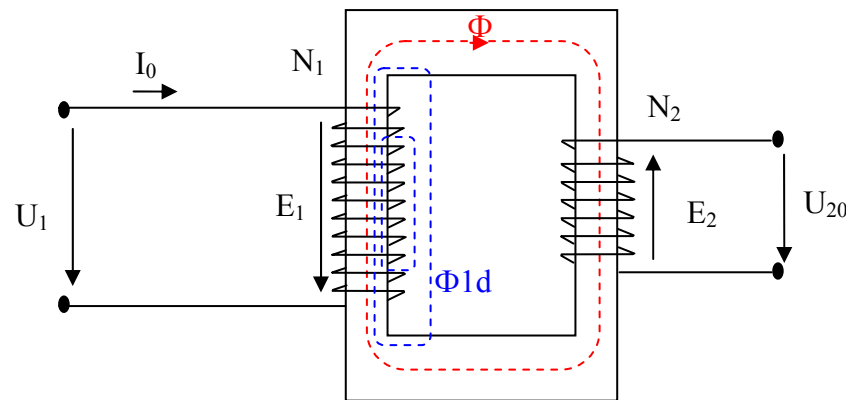
$$x = \omega \cdot l$$

$$z = r + jx$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO – ANÁLISE EM VAZIO

Vamos começar por analisar o que acontece em vazio, ignorando, para já, a existência de um enrolamento no lado secundário do transformador.



- admite-se afastada a saturação do circuito magnético (o que não é verdade...)
- arbitrou-se para o fluxo no núcleo o sentido indicado (em AC o sentido muda 50 vezes por segundo...)

Os fenómenos que ocorrem na malha do primário são os mesmos que vimos quando estudámos o comportamento de uma bobina com núcleo ferromagnético, alimentada por uma fonte de tensão alternada, logo, comportando-se como um elemento não linear.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Quando alimentamos o primário com uma tensão alternada, U_1 , surge na malha primária uma corrente alternada I_0 que vai dar origem a fluxo magnético no núcleo do transformador.

A corrente I_0 está atrasada de quase 90° face a U_1 . A este ângulo chamaremos φ_0 .

Em vazio, a expressão da potência activa cedida ao transformador é dada por:
 $P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$.

Esta potência inclui as perdas magnéticas, que têm lugar no núcleo do transformador, e uma pequena parcela de perdas que corresponde a perdas Joule no primário, mas que em vazio é muito pequena face às perdas no ferro (ou magnéticas). Escrevendo em termos de formulação convencional, temos:

- Perdas Joule em vazio: **$p_{J1_0} = r_1 I_0^2$** . (Não esquecer que o enrolamento primário tem resistência...)
- Perdas no ferro ou magnéticas: compostas por duas parcelas – perdas por Histerese e perdas por correntes de Foucault. $p_{\text{mag}} = p_{\text{Fe}} = p_H + p_{\text{CF}}$

A tensão de alimentação, U_1 , tem, numa primeira análise, duas parcelas:

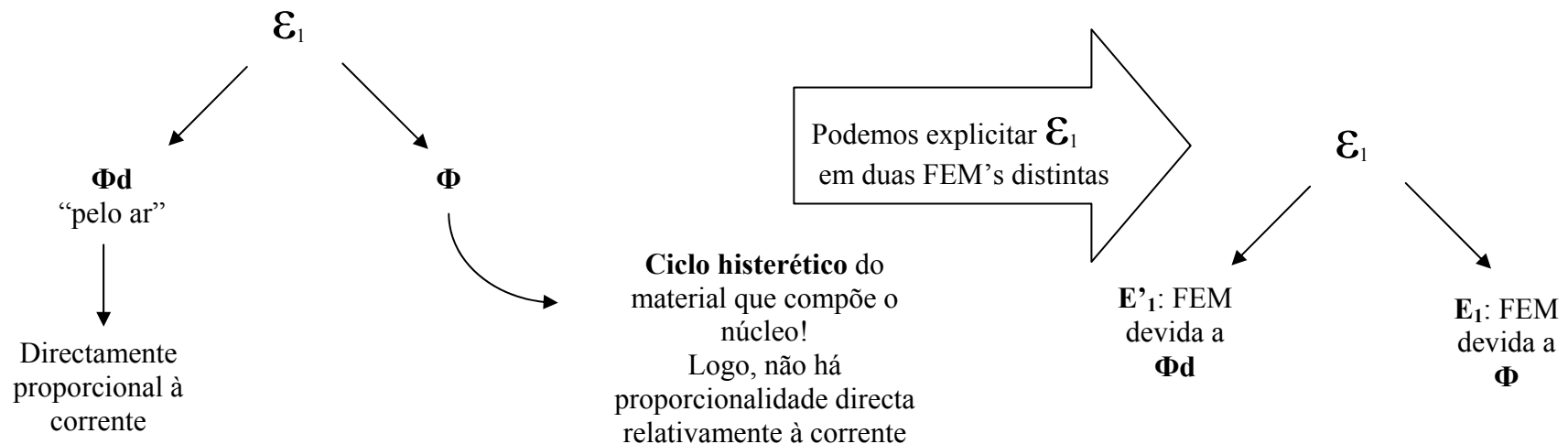
$$U_1 = \mathcal{E}_1 + r_1 I_0$$

\mathcal{E}_1 representa a FEM de auto indução que surge no enrolamento primário e $r_1 I_0$ a queda resistiva.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Quanto ao fluxo em jogo, poderemos dividi-lo em duas partes distintas. Uma, denominada fluxo principal e representada por Φ , consiste na maior parcela de fluxo e é a que circula no núcleo. A outra, denominada fluxo de dispersão ou fugas, representada por Φ_d , diz respeito à pequena parte do fluxo que não é conduzido pelo núcleo mas que se fecha “pelo ar”.

Podemos pois dividir \mathcal{E}_1 em duas partes!



A equação da malha primária ficará: $U_1 = -E_1 + E'_1 + r_1 I_0 = -E_1 + jX_1 I_0 + r_1 I_0$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

$\mathbf{E}'_1 \rightarrow$ FEM devida a Φ ; $\mathbf{x}_1 = 2\pi f \mathbf{L}_1$ onde \mathbf{L}_1 é o coeficiente de auto-indução do primário correspondente a Φ . Admite-se que temos dois enrolamentos em série: um com núcleo ferromagnético ($\Phi \leftrightarrow \mathbf{E}_1$) e outro com núcleo de ar ($\Phi \leftrightarrow \mathbf{E}'_1$).

Só o fluxo principal Φ é útil na transferência de potência do primário para o secundário.

Para ter Φ é necessária uma componente da corrente \mathbf{I}_0 que será representada por \mathbf{I}_m , ou componente de magnetização, em fase com Φ .

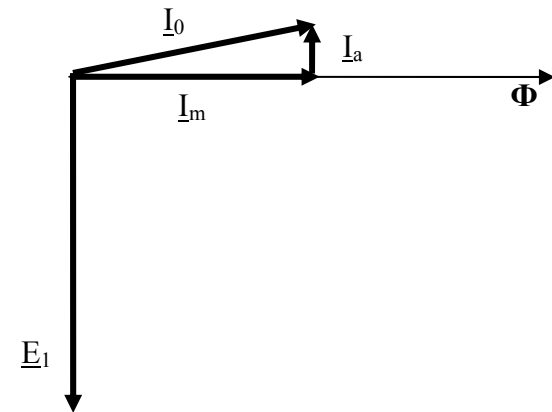
\mathbf{I}_m é uma componente reactiva de \mathbf{I}_0 .

Sendo a tensão de alimentação variável no tempo com frequência f , então o fluxo no núcleo, Φ , será igualmente variável no tempo com a mesma frequência visto que a corrente que lhe confere existência, \mathbf{I}_m , também tem frequência f idêntica.

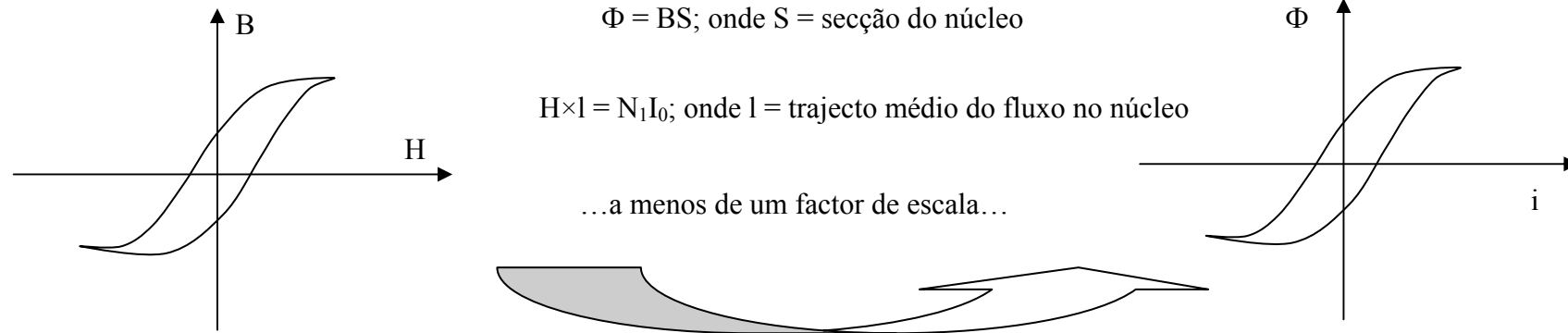
A parcela \mathbf{I}_a da corrente \mathbf{I}_0 refere-se às **perdas por histerese + perdas por correntes de Foucault**. Um fluxo alternado no núcleo produz perdas por histerese e perdas por correntes de Foucault. Além disso, o primário + núcleo comporta-se como um elemento não linear quando alimentado em AC como é o caso.

Todas as grandezas são sinusoidais com excepção de \mathbf{I}_0 .

Vamos tentar entender isto melhor...



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS



- Ao enrolamento é entregue energia eléctrica que vai ser transformada em energia magnética (fluxo magnético...) que vai novamente dar origem a energia eléctrica...!
- Este processo ocorre “através” do núcleo $\rightarrow \Phi = f(i) \rightarrow$ que traduz um processo não linear como podemos atestar pela figura acima. Isto vai alterar a forma de onda de I_0 tornando-a numa forma de onda não sinusoidal contendo harmónicos de 3ª, 5ª e 7ª ordem!
- Para podermos efectuar cálculos de forma simples iremos admitir que a forma de onda de I_0 é sinusoidal (o que não é verdade mas trata-se aqui de uma simplificação muito útil!).

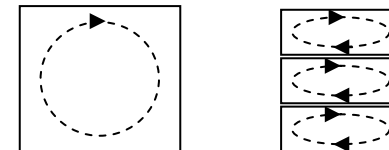
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Quanto às perdas no ferro (ou magnéticas), já vimos que são devidas a Histerese magnética e a correntes de Foucault.

A **histerese magnética** ocorre sempre que a corrente responsável pelo fluxo magnético no seio do material muda de sentido, isto é, traduz um atraso da indução face à excitação magnética. A corrente ao mudar de sentido obriga a uma mudança de polaridade magnética do material que ao obrigar à mudança de orientação de domínios atômicos não vê essa resposta ocorrer para todos os domínios ao mesmo tempo. Há uma inércia associada à rotação atômica no seio do material bem como atritos atômicos quando se dão estes movimentos, conduzindo a perdas de energia.

Esta perda de energia é proporcional à área do ciclo magnético, ao volume do núcleo e ao nº de ciclos realizados por segundo. Para as minimizar há que procurar materiais com menor área de ciclo histerético e boa permeabilidade magnética.

As perdas por correntes de Foucault são devidas a correntes induzidas no núcleo ferromagnético do transformador que conduzem a perdas de energia libertando calor. Os núcleos são laminados para diminuir estas correntes. Ao laminar e isolar as chapas entre si, pelo princípio da indução e segundo a Lei de Lenz, observa-se que as correntes em lâminas adjacentes tomam sentidos sucessivamente opostos anulando-se (não na totalidade mas em grande parte). A natureza do material também influi nestas perdas.



(Ver nos acetatos nº 4 e 5 referência a materiais para o núcleo)

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Vamos retomar a análise de funcionamento do transformador em vazio tendo agora em atenção o enrolamento secundário que permanece em aberto, logo, sem qualquer corrente.

O fluxo principal Φ encadeia os dois enrolamentos. No secundário, em aberto, temos uma F.E.M. induzida, devida a Φ , que representaremos por E_2 . Quer E_1 quer E_2 são proporcionais ao número de espiras dos respectivos enrolamentos.

$$E_1 = - N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad E_2 = - N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

Dividindo as expressões:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \text{Razão do número de espiras} \cong \text{Razão de transformação (m)}$$

Em vazio, denominamos a tensão aos terminais do enrolamento secundário como U_{20} em lugar de U_2 , designação que reservaremos para situações de carga. Teremos então $E_2 = U_{20}$.

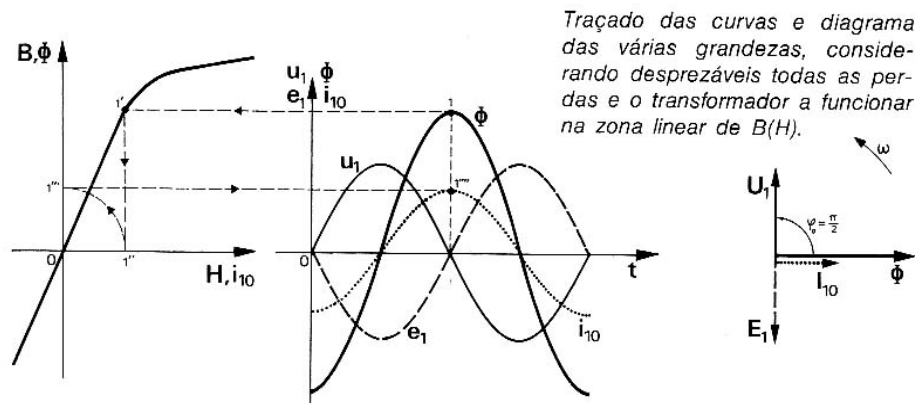
No primário, em vazio, I_0 é muito baixa o que implica que $r_1 I_0$ e $x_1 I_0$ sejam igualmente muito baixas quando comparadas com E_1 . Daqui se pode escrever que $U_1 \approx E_1$. Vamos obter a expressão da razão de transformação:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \cong m = \frac{U_1}{U_{20}}$$

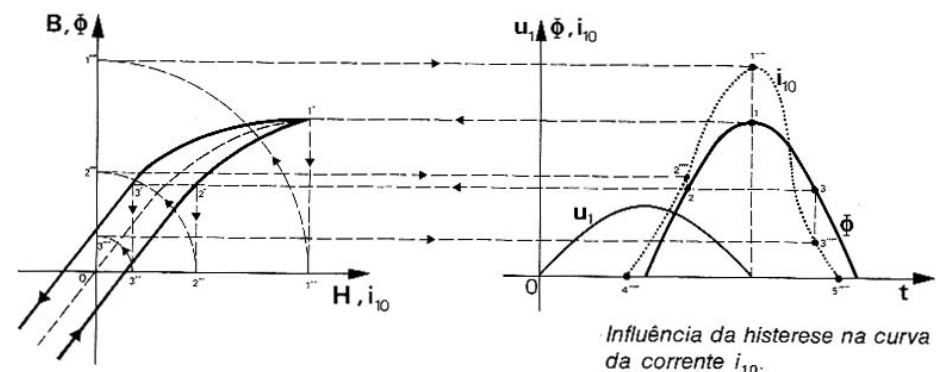
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Temos representado a corrente em vazio, recorrendo à notação usual para representar grandezas alternadas sinusoidais em valor eficaz. No entanto, a forma de onda dessa corrente, para transformadores reais, não é sinusoidal, como já anteriormente se referiu.

Na malha primária de um transformador em vazio, a tensão de alimentação é sinusoidal, a f.e.m. auto-induzida no enrolamento primário também é sinusoidal, o fluxo é ainda sinusoidal, mas a corrente em vazio nessa malha não o é.

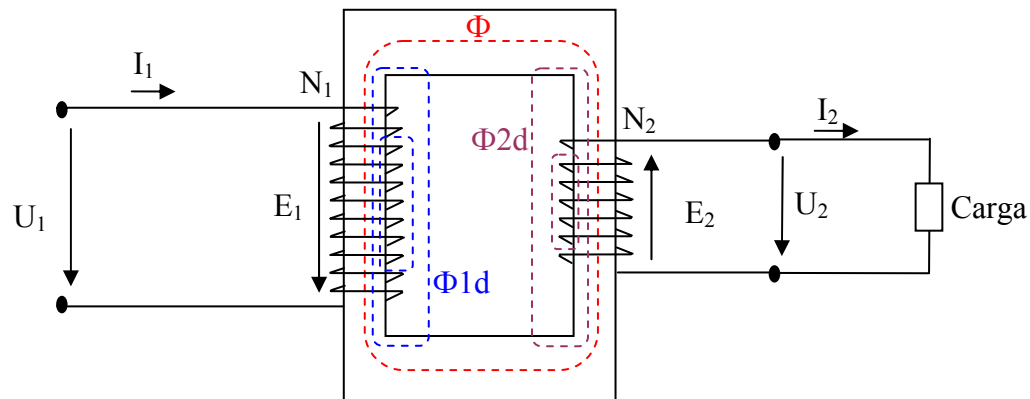


As figuras apresentadas permitem confirmar o que se disse atrás. No caso do T. ideal não há deformação.



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO – ANÁLISE EM CARGA



O transformador tem o seu secundário fechado sobre uma carga. Deste modo, admitindo que U_1 permanece o mesmo, $U_2 \neq U_{20}$ e $I_2 \neq 0$. Para compreendermos o funcionamento em carga de forma simples, vamos, por momentos, desprezar as perdas em jogo no transformador (p_J e p_{Fe} ou p_{mag}). Nestas circunstâncias e tendo em conta o princípio de conservação da energia temos que a potência que o primário absorve à rede é igual à que o secundário entrega à carga. Para o mesmo valor de U_1 isto implica que a corrente no primário, I_1 , acompanha, crescendo ou decrescendo, a corrente no secundário. A transferência de potência do primário para o secundário é feita à custa do fluxo principal, Φ . Este fluxo é indispensável ao funcionamento do transformador e deve estar presente, tanto em vazio como em carga, devendo ainda ser conseguido com o mais baixo valor possível de corrente de excitação, I_0 .

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

ANÁLISE SEQUÊNCIAL DA PASSAGEM AO FUNCIONAMENTO EM CARGA

- Quando o secundário se fecha sobre uma carga passa a existir uma corrente $I_2 \neq 0$.
- I_2 vai ser responsável pelo aparecimento de um fluxo que vai “contrariar” o fluxo principal diminuindo-o por instantes.
- Ao diminuir Φ , vai dar-se no primário uma diminuição de E_1 . Uma vez que U_1 é constante, o que vai aumentar no primário é o valor da corrente I_1 pedida à rede.
- Ao aumentar I_1 , vai surgir um fluxo a ela devido, que vai reforçar o fluxo principal Φ que havia diminuído. Este aumento do fluxo vai proporcionar o consequente aumento de E_1 .
- O processo continua até ser atingido um ponto de equilíbrio. Uma vez em equilíbrio verifica-se que Φ final no núcleo é **aproximadamente** igual ao Φ no núcleo em vazio. Assim, as Forças Magnetomotrizes correspondentes às correntes I_1 e I_2 equilibram-se. ($F = N i$ e $N_1 I_1 + N_2 I_2 = N_1 I_0$. No transf ideal $I_0 = 0$ donde $N_1 I_1 = - N_2 I_2$)
- Na prática, I_1 tem duas parcelas; uma que é (aproximadamente) igual a I_0 , (a corrente absorvida no primário **em vazio**) e outra parcela que equilibra os efeitos magnéticos da corrente secundária.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

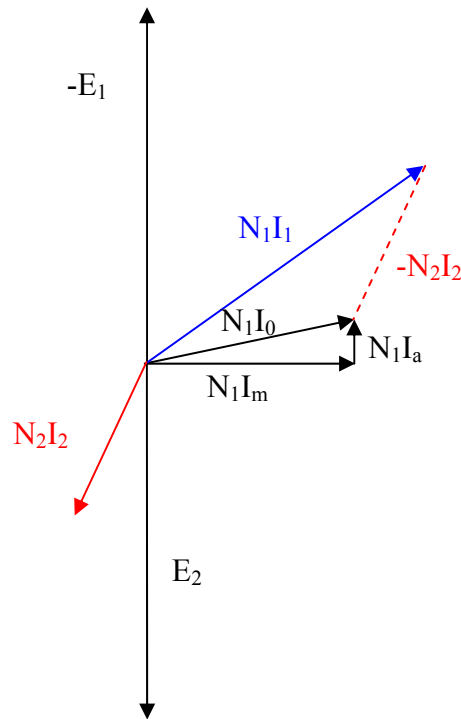
A variação de I_1 vai fazer com que as parcelas que constituem U_1 se alterem: as quedas resistiva e reactiva aumentam com o aumento de I_1 , sendo E_1 menor uma vez que U_1 permanece igual. Nos transformadores de potência convencionais as quedas resistiva e reactiva são muito pequenas face a E_1 donde se pode admitir $E_{1 \text{ vazio}} \approx E_{1 \text{ carga}}$, logo permite-nos reafirmar que $\Phi_{\text{vazio}} \approx \Phi_{\text{plena carga}}$. Lembrando que a parcela de I_0 responsável por manter o fluxo no núcleo é I_m , então, $N_1 I_m$ (FMM) é aproximadamente a mesma em vazio e em carga para produzir Φ . As perdas no ferro não variam praticamente do vazio para a carga $\Rightarrow I_a \approx \text{constante}$, onde esta corrente está associada às perdas no ferro. Seja I'_0 a corrente I_0 em carga: $I'_0 = I_a + I_m \approx \text{constante}$. Pelo exposto temos $I'_0 \approx I_0$.

Por tudo o que foi dito deve ser intuitivo aceitar que a um aumento/diminuição de I_2 corresponde um aumento/diminuição de I_1 . Assim, em carga, há duas forças magnetomotrizes em jogo no transformador: a FMM do primário e a FMM do secundário. A magnitude de Φ é influenciada pela resultante destas duas FMM's.

Vamos supor que o transformador alimenta uma carga que lhe impõe um factor de potência indutivo. De acordo com a figura do diagrama de FMM's (no próximo acetato), temos:

- I_2 em atraso face a E_2 .
- E_2 e E_1 em atraso de 90° face a Φ .
- Para que Φ permaneça igual em vazio e em carga então, em carga, a FMM resultante deve ser igual (aproximadamente) a $N_1 I'_0$, ou como já vimos, $N_1 I_0$.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS



Para que a última afirmação se verifique a FMM total no primário deve ser igual à soma vectorial de $\mathbf{N_1 I_0}$ e $(-\mathbf{N_2 I_2})$, ou seja, igual à diagonal $\mathbf{N_1 I_1}$ do paralelogramo da figura à esquerda.

Isto conduz-nos a uma observação importante: a soma da FMM do primário, $\mathbf{N_1 I_1}$, com a do secundário, $\mathbf{N_1 I_2}$, deve ser sempre igual à FMM necessária para produzir o fluxo principal no núcleo, Φ .

Uma vez que a relutância do núcleo é muito baixa conduzindo a valores de FMM de magnetização de cerca de 5 a 10% da FMM do primário, isto para regime nominal; é o mesmo que dizer que a corrente de magnetização é cerca de 5 a 10% da corrente total absorvida, o que é um valor substancialmente pequeno. Por ser assim, poderemos

escrever (em módulo):

$$N_1 I_1 \cong N_2 I_2 \text{ donde } \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_1}{E_2}$$

As correntes nos enrolamentos são aproximadamente inversamente proporcionais às FEM's induzidas. Pelo princípio de conservação da energia e desprezando perdas no transformador, poderemos ainda escrever que $\mathbf{U_1 I_1 \cos \varphi_1 \approx U_2 I_2 \cos \varphi_2}$. Donde, para regime nominal, $\mathbf{\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2}$.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

À semelhança do que foi feito para o enrolamento primário, ao aplicarmos o mesmo raciocínio ao enrolamento secundário, vemos que este pode ser representado por uma resistência, r_2 , em série com uma reactância, x_2 .

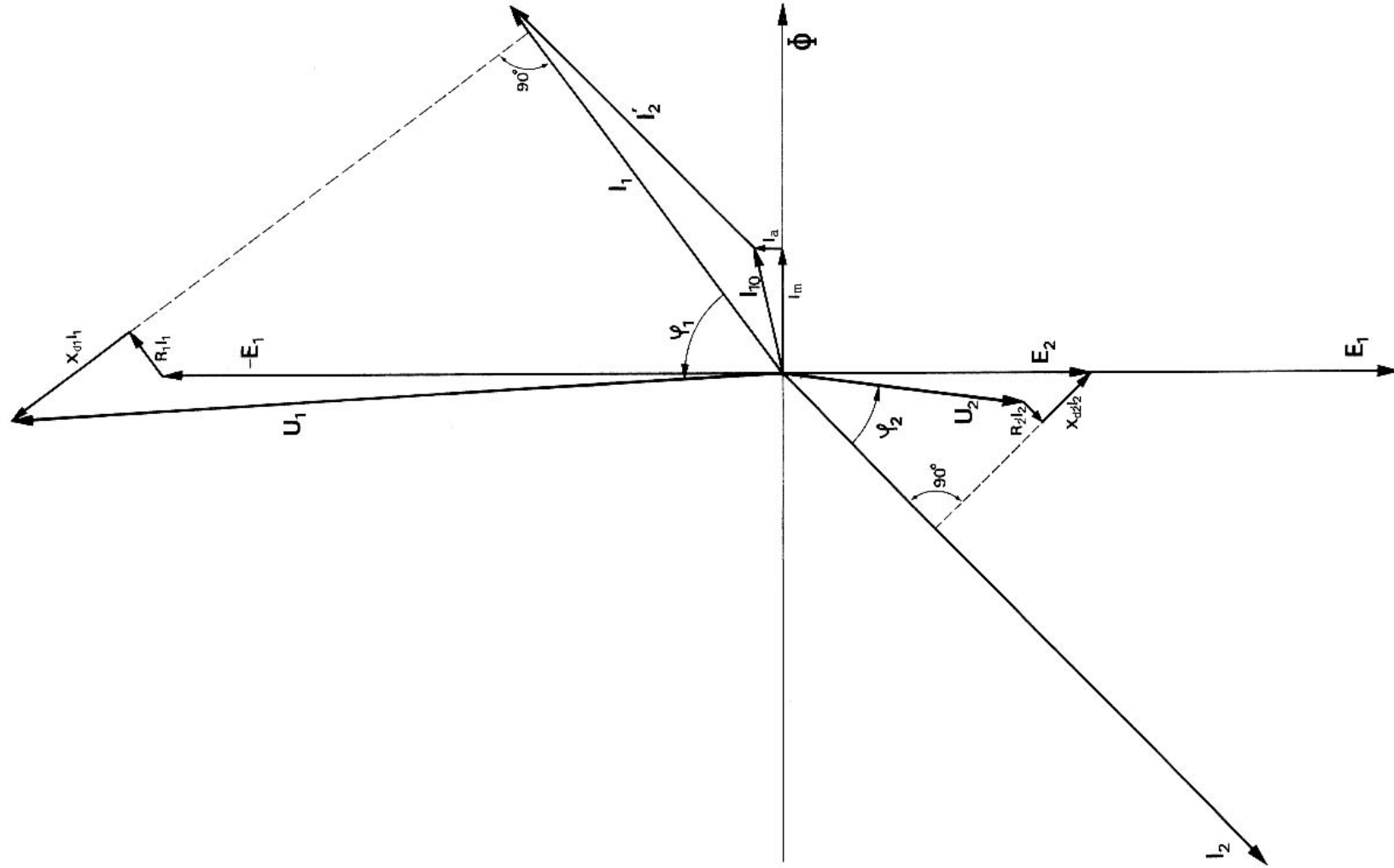
- E_2 está em fase com E_1 uma vez que são ambas induzidas pelo mesmo fluxo Φ .
- φ_2 é o ângulo entre U_2 e I_2 e é imposto pela carga.
- $\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + r_2 \underline{I}_2 + jx_2 \underline{I}_2$
- $r_2 \underline{I}_2$ é a componente da tensão que equilibra a queda resistiva; está em fase com I_2 .
- $x_2 \underline{I}_2$ é a componente referente à queda indutiva; está em avanço de 90° face a I_2 .

O ângulo entre U_1 ($\approx E_1$) e I_0 é aproximadamente 90° . Do diagrama vectorial a seguir indicado será intuitivo concluir que a parcela de I_0 correspondente às perdas no ferro, (I_a), estando em fase (paralela) com a tensão será representada por uma resistência, R_0 , no circuito equivalente; a parcela correspondente à magnetização (I_m) será representada por uma reactância, X_m , denominada reactância de magnetização.

Estes elementos servem para representar os fenómenos que ocorrem no núcleo! Ambos têm a mesma tensão aos seus terminais, e atentando na relação entre as correntes que os percorrem, surgirão no circuito equivalente em **paralelo!**

DIAGRAMA FASORIAL

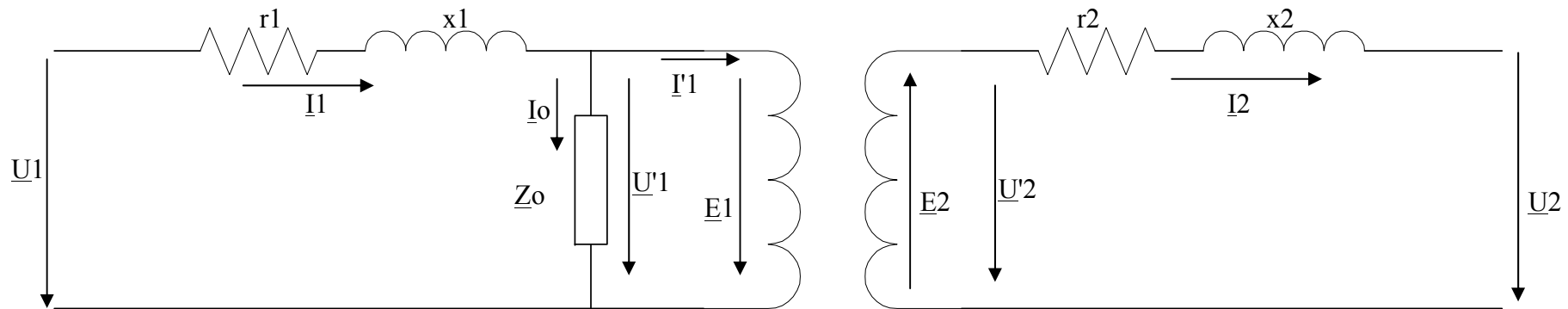
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

CIRCUITOS EQUIVALENTES.

Vamos agora aprender a efectuar os cálculos necessários à caracterização do funcionamento do transformador recorrendo aos circuitos equivalentes do transformador bem como às respectivas referenciações quer ao primário quer ao secundário.



$$\underline{U}_1 = - \underline{E}_1 + \underline{z}_1 \underline{I}_1$$

$$(\underline{U}'_1 = - \underline{E}_1)$$

$$(\underline{U}'_2 = \underline{E}_2)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2$$

$$\underline{E}_1 = -j\omega N_1 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}}$$

$$\underline{E}_2 = -j\omega N_2 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}'_1$$

$$\underline{I}'_1 = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Consideramos então que o nosso transformador real pode ser representado por um transformador ideal, (sem quedas de tensão, sem fugas magnéticas, sem perdas de energia), ficando exteriores a este todos os elementos que colocam em evidência as imperfeições naturais de um transformador real.

Assim o transformador ideal permite considerar que:

- Os enrolamentos não têm resistência nem reactância de fugas pois estas estão representadas fora em r_1 , r_2 , x_1 e x_2 .
- A magnetização e as perdas no ferro são representadas fora do transformador ideal pelo elemento em derivação no primário.
- As equações do transformador ideal:

$$\underline{U}'_1 = - \underline{E}_1$$

$$\underline{E}_1 = -j\omega N_1 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}} \quad \underline{E}_2 = -j\omega N_2 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}}$$

$$\underline{I}'_1 = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2$$

$$\frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{\underline{U}'_1}{\underline{U}'_2} = -\frac{N_1}{N_2}$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Assim as tensões são transformadas na razão directa do nº de espiras, as correntes na razão inversa e ambas com rotação de fase de 180°.

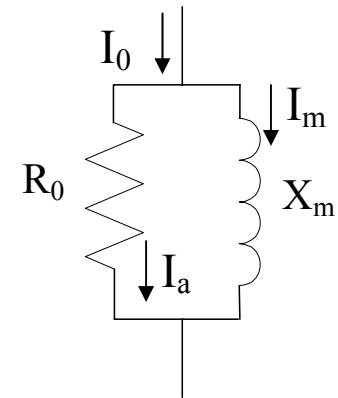
Quanto ao elemento em derivação no primário, este pode ser representado pelo paralelo de duas impedâncias:

O cálculo de Z_0 é fácil e pode ser dado por:

$$Z_0 = \frac{R_0 \cdot jX_m}{R_0 + jX_m}$$

Também já vimos que I_0 tem duas componentes:

$$I_0 = I_a + I_m$$



- I_a em fase com $\underline{U}'_1 = -\underline{E}_1$; logo podemos considerar que percorre uma resistência, R_0 , dada por: $R_0 = \frac{U'_1}{I_a}$
- I_m em atraso de 90° face à tensão; logo podemos considerar que percorre uma reactância pura, X_m , tal que: $X_m = \frac{U'_1}{I_m}$

Em módulo teremos:

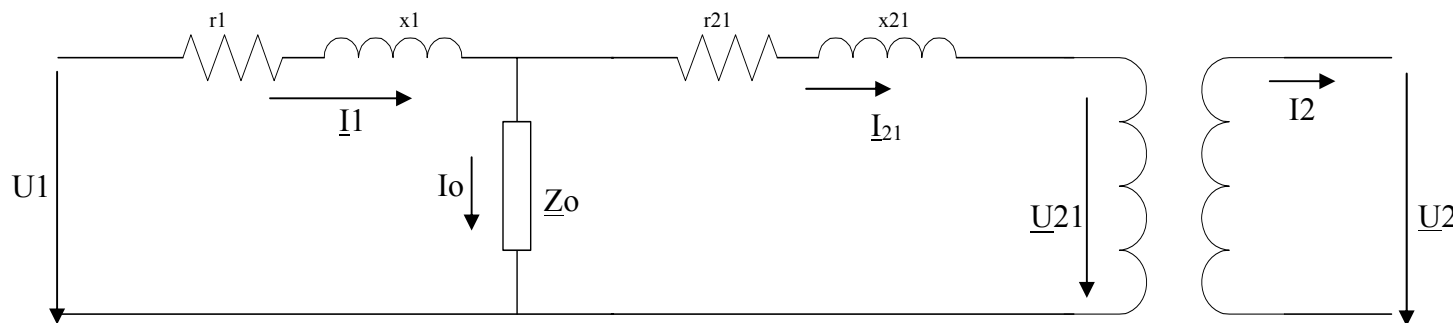
- $I_a = I_0 \cdot \cos\varphi_0$
- $I_m = I_0 \cdot \sin\varphi_0$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO A UM ENROLAMENTO

- Podemos ultrapassar, para simplicidade de cálculo, o "obstáculo" que $N1 \neq N2$ pode constituir...
 - Assim, o princípio de equivalência enunciado, diz que:
 - "Podemos substituir um dos enrolamentos por outro que lhe seja equivalente e tenha o número de espiras do outro enrolamento. As equivalências a estabelecer entre o enrolamento real e o equivalente são, necessariamente, duas":
 - os dois enrolamentos devem absorver ou fornecer a mesma potência eléctrica
 - os dois enrolamentos devem produzir os mesmos efeitos magnéticos "
- [CCC.37]

Circuito equivalente exacto referido ao primário:



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

$$r_{21} = m^2 \cdot r_2$$

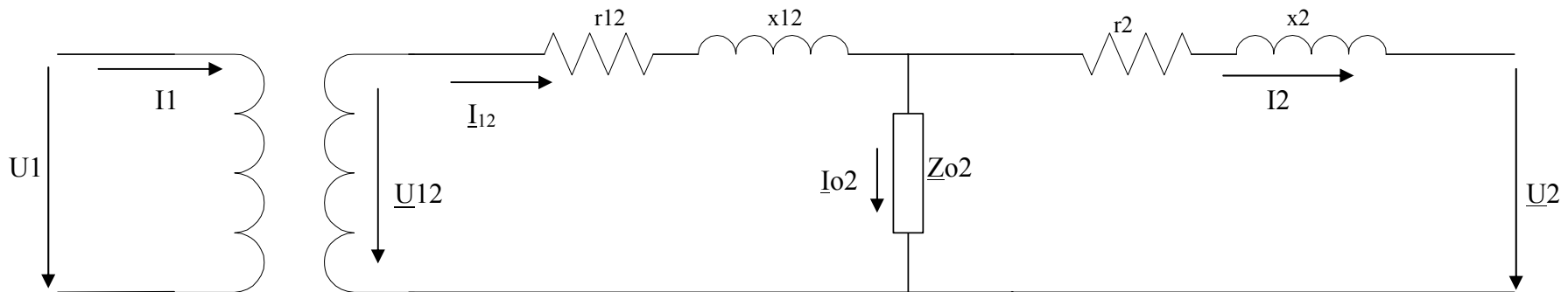
$$x_{21} = m^2 \cdot x_2$$

$$\underline{Z}_{21} = m^2 \cdot \underline{Z}_2$$

$$\underline{I}_{21} = -\frac{1}{m} \cdot \underline{I}_2$$

$$\underline{U}_{21} = -m \cdot \underline{U}_2$$

Circuito equivalente exacto referido ao secundário:



$$\underline{Z}_{12} = \frac{1}{m^2} \cdot \underline{Z}_1$$

$$r_{12} = \frac{1}{m^2} \cdot r_1$$

$$x_{12} = \frac{1}{m^2} \cdot x_1$$

$$R_{02} = \frac{1}{m^2} \cdot R_0$$

$$X_{m2} = \frac{1}{m^2} \cdot X_m$$

$$\underline{I}_{12} = -m \cdot \underline{I}_1$$

$$\underline{I}_{o2} = -m \cdot \underline{I}_0$$

$$\underline{U}_{12} = -\frac{1}{m} \cdot \underline{U}_1$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO

Nos transformadores normais com baixas fugas magnéticas e um dimensionamento cuidadoso de I_0 é possível tomar o fluxo como sendo constante, qualquer que seja o regime de funcionamento. Assim, admitindo que o fluxo é constante, I_0 é igualmente e consequentemente encarada como sendo constante, o mesmo aplicando-se às suas componentes. Isto corresponde a deslocar o elemento em derivação para a nova posição conforme indica o circuito abaixo. Mais ainda, ao admitirmos constância de fluxo, estamos a admitir, para qualquer regime de funcionamento, que as perdas no ferro são constantes, uma vez que estas são proporcionais ao quadrado da indução magnética quando a frequência é fixa, o que acontece na maior parte das utilizações normais dos transformadores.

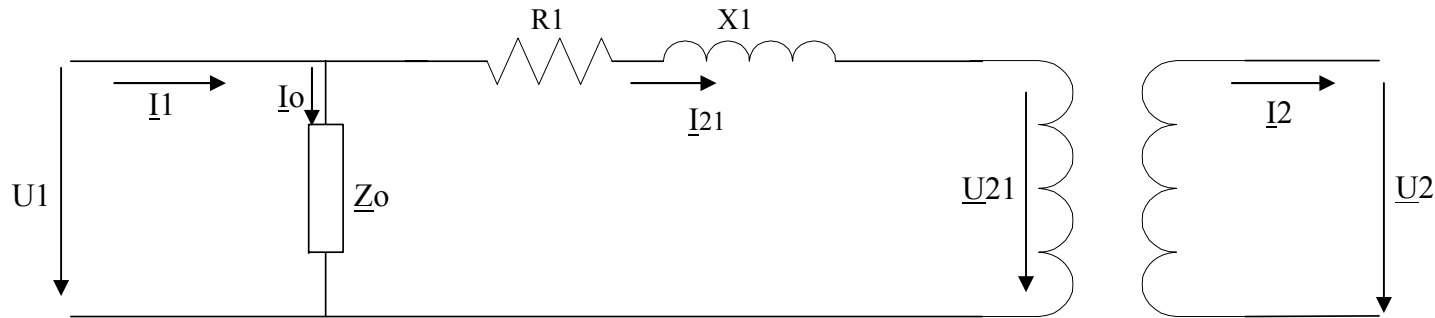
Passamos a ter uma impedância combinada de fugas constituída por uma resistência combinada dos dois enrolamentos e por uma reactância combinada de fugas igualmente dos dois enrolamentos.

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

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

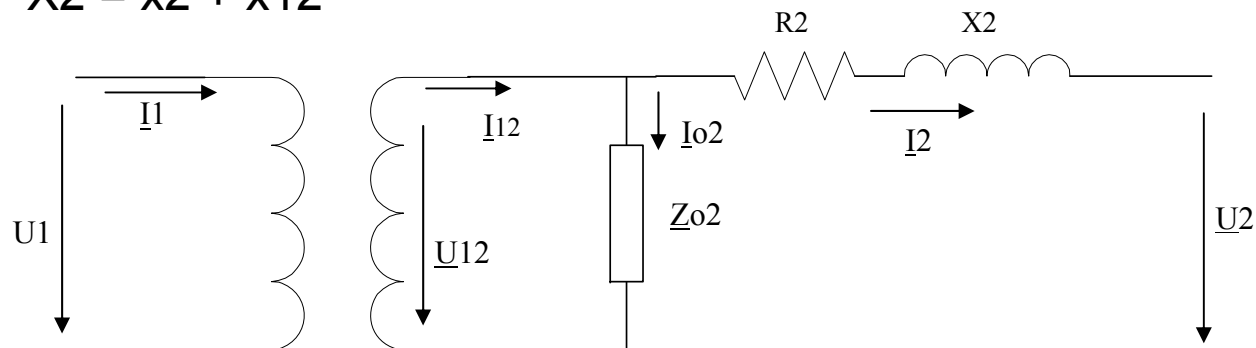
Circuito equivalente simplificado referido ao primário:

$$R1 = r1 + r21 \quad X1 = x1 + x21$$



Circuito equivalente simplificado referido ao secundário:

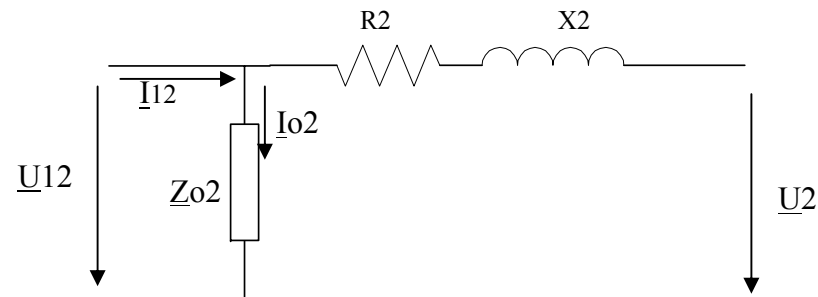
$$R2 = r2 + r12 \quad X2 = x2 + x12$$



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

CIRCUITO EQUIVALENTE DE KAPP

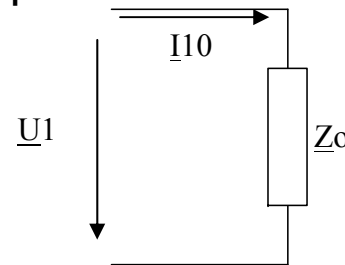
Se referirmos tudo ao secundário...



$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{o2}} + \frac{1}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_2}}$$

Aproximação de Kapp:

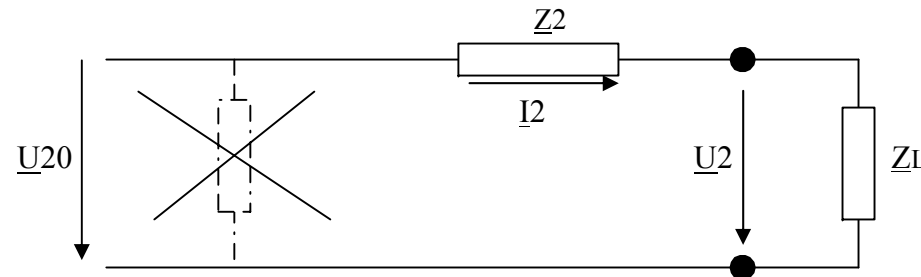
Em vazio, o transformador é equivalente a uma impedância \underline{Z}_0 .



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Em carga, é possível desprezar a corrente em vazio face à corrente de carga o que equivale a desprezar \underline{Z}_0 .

Vamos ver o que acontece se observarmos o transformador com esta simplificação e segundo o seu circuito referido ao secundário...



É como se o transformador fosse uma fonte de tensão AC, (isto é, um gerador), com uma f.e.m. constante e cujo valor eficaz seria igual a \underline{U}_{20} e com uma impedância interna igual a \underline{Z}_2 .

Daqui facilmente obtemos os diagramas vectoriais correspondentes à simplificação de Kapp...

(Vamos ver isto no quadro da sala de aula...)

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DE UM TRANSFORMADOR EM REGIME NOMINAL SEGUNDO PUBLICAÇÃO 76 DA NORMA CEI (1967).

Tensão nominal:

Tensão consignada que se pode aplicar ou desenvolver no funcionamento em vazio entre os terminais de linha de um transformador polifásico ou entre os terminais de um transformador monofásico.

Segundo a definição, o valor nominal da tensão num transformador polifásico é o de uma tensão composta.

Razão de transformação nominal:

É a razão entre a tensão nominal de um enrolamento e a de outro enrolamento cuja tensão nominal é diferente.

Uma vez que as tensões nominais se referem ao funcionamento em vazio, temos para o transformador monofásico:

$$m = \frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

[Nota: as unidades das grandezas são Volt...]

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Tensão de curto-circuito nominal - Transformadores de dois enrolamentos

Tensão à frequência nominal que é necessário aplicar entre os terminais de linha de um enrolamento polifásico ou entre os terminais de um enrolamento monofásico para nele fazer circular a corrente nominal quando os terminais do outro enrolamento estão em curto-circuito. Normalmente exprime-se em percentagem e designa-se por e_z .

$$e_z = \frac{U_{1c}}{U_{1n}} \cdot 100\% = \frac{U_{2c}}{U_{20}} \cdot 100\% = \frac{Z_2 I_{2n}}{U_{20}} \cdot 100\%$$

Nota: e_z baixo implica correntes de curto-circuito elevadas; e_z elevado implica elevadas quedas de tensão em carga. Logo, o cálculo de transformadores deve estabelecer um compromisso entre ambas as situações!

Queda óhmica nominal :

Componente da tensão de curto-circuito nominal em fase com a corrente.

$$e_r = \frac{R_2 I_{2n}}{U_{20}} \cdot 100\% \quad (\text{em valor percentual pois em módulo é } R_2 I_{2n} \dots)$$

As perdas Joule nominais podem ser avaliadas por intermédio de:

$$e_r = \frac{R_2 I_{2n}^2}{U_{20} I_{2n}} \cdot 100\%$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Queda indutiva nominal :

Componente da tensão de curto-circuito nominal em quadratura com a corrente.

$$e_x = \frac{X_2 I_{2n}}{U_{20}} \cdot 100\%$$

Temos também as seguintes interessantes e úteis relações:

$$\underline{e}_Z = e_r + j e_x$$

$$\underline{e}_Z = \sqrt{e_r^2 + e_x^2}$$

Seja :

$\alpha = \frac{I_2}{I_{2n}}$ uma dada fracção de carga também chamada de factor de carga. Então,

$$e'_Z = \alpha e_Z$$

$$e'_r = \alpha e_r$$

$$e'_x = \alpha e_x$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Variação da tensão em condições de carga especificadas é definida pela diferença entre a tensão nominal de um enrolamento e a tensão nos terminais do mesmo enrolamento em condições de carga e factor de potência especificados quando a tensão aplicada ao outro enrolamento se mantém no seu valor nominal. Exprime-se em percentagem da tensão nominal.

Já conhecemos bem (?) a expressão $\underline{U}_{20} = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2$.

Supondo uma análise efectuada para um dado \underline{I}_2 e um dado φ_2 :

$$\underline{U}_{20} - \underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2.$$

$$e = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\% \quad \text{que é função de } \underline{I}_2 \text{ e de } \varphi_2$$

Quando $\underline{I}_2 = \underline{I}_{2n}$ e para um dado φ_2 temos:

$$\text{regulação} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Uma possível definição de regulação...

"Define-se regulação de um transformador de potência, como o valor relativo do desvio da tensão no secundário do transformador, quando este se encontra alimentado em condições nominais (tensão e frequência) e fornece a sua corrente nominal secundária com factor de potência secundário especificado, relativamente ao valor dessa mesma tensão, nas mesmas condições de alimentação e em vazio." [AFC]

Retomando a equação $\underline{U}_{20} - \underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2$ vamos obter uma outra equação que constitui uma expressão muito cómoda para efectuar o estudo da variação da tensão com a carga.

$$\underline{U}_{20} - \underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 \Leftrightarrow \underline{U}_{20} - \underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + j X_2 \underline{I}_2$$

Projectando segundo os eixos cartesianos e admitindo os casos **capacitivo (-)** e **indutivo (+)**, ficará:

$$U_{20} - U_2 = R_2 I_2 \cos \varphi_2 \pm X_2 I_2 \sin \varphi_2$$

Multiplicando cada termo por $(100/U_{20})$ e substituindo I_2 por αI_{2n} teremos finalmente:

$$e = \alpha (e_r \cos \varphi_2 \pm e_x \sin \varphi_2)$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Rendimento

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_t} = \frac{P_2}{P_2 + p_{Fe} + p_J} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + p_{Fe} + p_J}$$

$$\eta_{M\acute{a}x} \Rightarrow p_{Fe} = p_J$$

$$\eta_{M\acute{a}x_{M\acute{a}x}} \Rightarrow p_{Fe} = p_J \quad e \quad \cos \varphi = 1$$

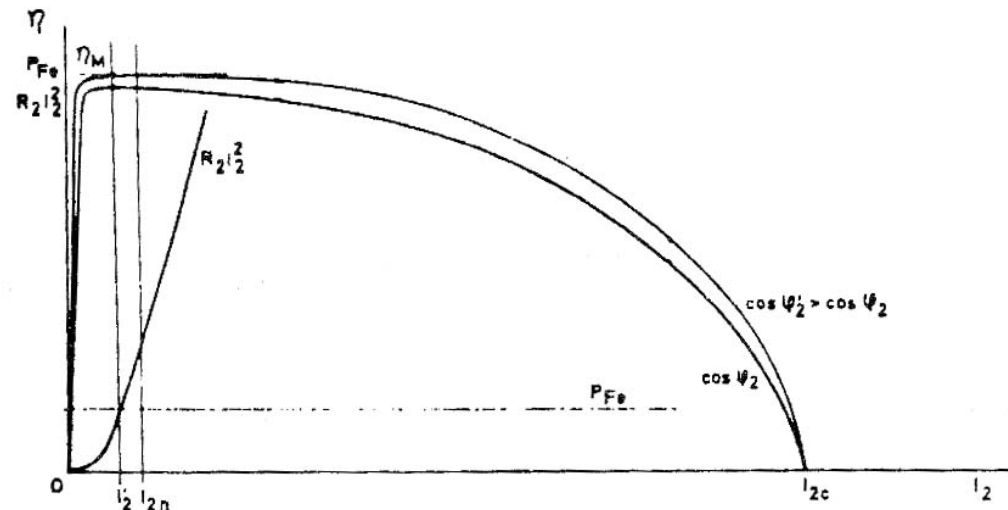
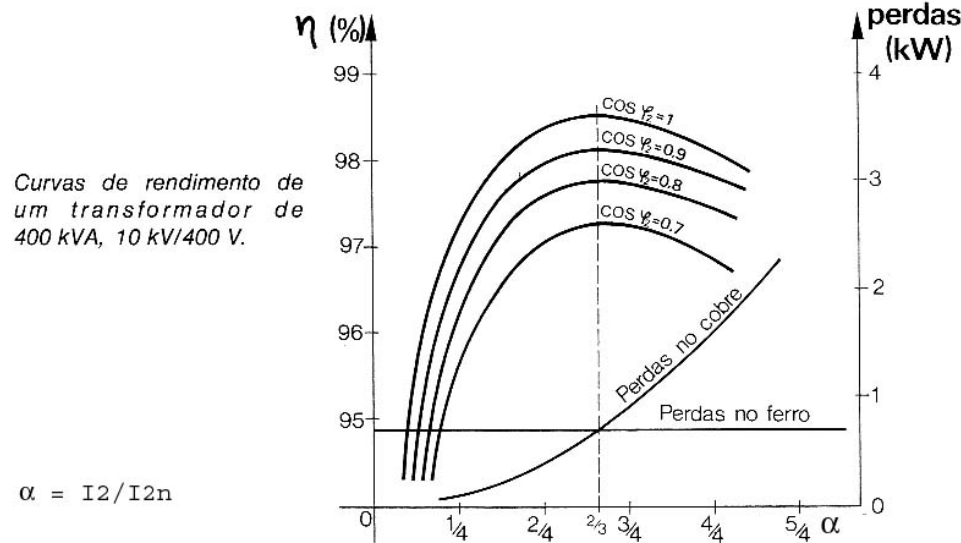
Valores percentuais das perdas

$$p_{Fe}\% = \frac{p_{Fe}}{S} 100\% \qquad p_J\% = \frac{p_J}{S} 100\% = \frac{R_2 I_2 n^2}{S} 100\%$$

$$S_n = U_1 n l_1 n = U_2 I_2 n$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Curvas de rendimento de transformadores obtidas em diferentes livros...



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

ENSAIOS ECONÓMICOS

Para conhecermos os parâmetros do circuito equivalente de um transformador poderemos efectuar dois ensaios económicos:

- Ensaio em circuito aberto ou Ensaio em vazio
- Ensaio em curto-circuito

Ensaio em Vazio

- O secundário fica em circuito aberto.
- O primário é alimentado à tensão e frequência nominais.
- Vamos registar os seguintes valores:
 - U_{1n}
 - U_{20}
 - I_0
 - P_0

[NOTA: Este ensaio pode ser efectuado do secundário para o primário, bastando depois referir as grandezas ao primário...Qual o interesse??...]

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Temos assim um conjunto de expressões que nos interessam bastante:

$$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0. \quad I_m = I_0 \sin \varphi_0. \quad I_a = I_0 \cos \varphi_0.$$

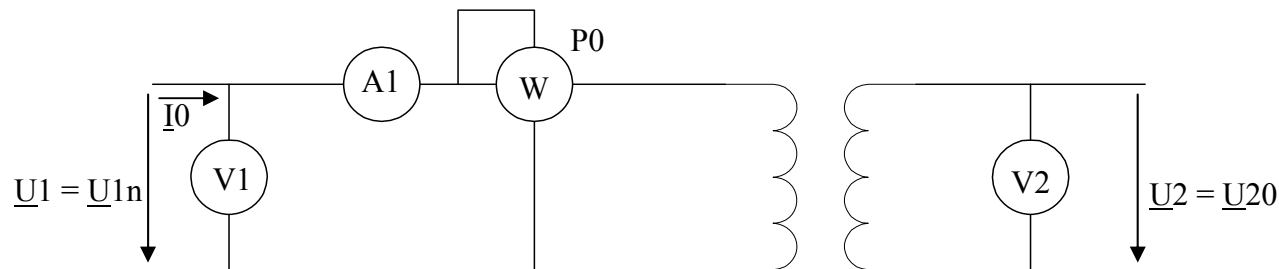
$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} \quad R_0 = \frac{U_1}{I_a} \quad X_m = \frac{U_1}{I_m} \quad \underline{Z}_0 = Z_0 e^{j\varphi_0}$$

Quanto à expressão da potência absorvida em vazio, embora a sua expressão seja:

$$P_0 = r_1 I_0^2 + p_{Fe} \text{ uma vez que a parcela correspondente às perdas joule em vazio } (r_1 I_0^2), \text{ é muito diminuta face ao resto, desprezá-la-emos, tomando então } P_0 \approx p_{Fe}.$$

Deste modo, poderemos dizer que o ensaio em vazio:

- Verifica a razão de transformação
- Mede a corrente em vazio e as perdas no ferro
- Determina, com os valores anteriores, a impedância Z_0 .



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Ensaio em Curto-circuito

- Um dos enrolamentos em curto-circuito. Por uma questão de comodidade vamos admitir que será o secundário.
- O outro enrolamento é alimentado a frequência nominal e com uma tensão cujo valor vai subindo gradualmente até que nos enrolamentos circulem as respectivas correntes nominais.
- Vamos registar os seguintes valores:
 - U_{1c} que é a chamada tensão de curto-circuito nominal

O seu valor referido ao secundário é $\underline{U}_{2c} = -\frac{U_{1c}}{m}$

Sendo $\underline{U}_{2c} = \underline{Z}_2 I_{2n}$ temos em módulo $Z_2 = \frac{U_{2c}}{I_{2n}} = \frac{U_{1c}/m}{I_{2n}}$ o que dá em valor

percentual $e_z = \frac{U_{1c}}{U_{1n}} \cdot 100\%$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

➤ $P_{cc} = p'Fe + R_2 I_2 n^2$.

Uma vez que a tensão de curto-circuito é apenas uma pequena fracção da tensão nominal. Se por exemplo a tensão aplicada for cerca de 1/10 da tensão nominal então a indução cairá para 1/10 do seu valor nominal e as perdas magnéticas que são proporcionais ao quadrado da indução magnética cairão por sua vez para 1/100 do seu valor normal.

Se já em condições normais temos cerca de 1% para as perdas no ferro e 1,....% para as perdas Joule, nestas condições então é ainda mais flagrante considerar: $p'Fe \ll R_2 I_2 n^2$ e que $P_{cc} \approx R_2 I_2 n^2 = pJn$ o que dá R_2 .

Uma vez que temos:

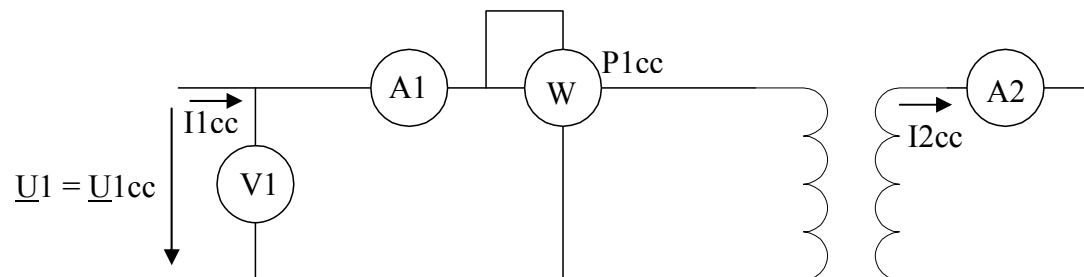
$$X_2 = \sqrt{(Z_2^2 - R_2^2)}$$

$$P_{1cc} = U_{1cc} \cdot I_{1cc} \cdot \cos \phi_{1cc}$$

$$X_1 = \sqrt{(Z_1^2 - R_1^2)} \quad I_{1cc} \neq I_{1n} \Rightarrow P_{1ccn} = P_{1cc} \left(\frac{I_{1n}}{I_{1cc}} \right)^2 \quad \underline{Z}_1 = \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} = \sqrt{(R_1^2 + X_1^2)} \quad R_1 = \frac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2}$$

$$\underline{I}_{1cc} = \underline{I}_{1n}$$

$$\underline{I}_{2cc} = \underline{I}_{2n}$$



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

A QUESTÃO DA SEPARAÇÃO DAS PERDAS NO FERRO EM p_H e p_{CF}

Por vezes é preciso conhecer separadamente o valor das parcelas que constituem as perdas no ferro: perdas por histerese e perdas por correntes de Foucault.

Para tal efectua-se um primeiro ensaio em vazio, por exemplo, à frequência nominal, e em seguida, um novo ensaio em vazio mas a frequência distinta. O tratamento dos dados recorrendo às expressões matemáticas das perdas por histerese e das perdas por corrente de Foucault permite calcular, com base nos resultados experimentais, o valor de cada uma das referidas perdas.

Vamos ver as expressões necessárias:

$$p_{Fe} = p_H + p_{CF} \quad \text{onde} \quad p_H = K_h * f * B_M^2 \quad \text{e} \quad p_{CF} = K_{CF} * f^2 * B_M^2$$

(NOTA: K_h e K_{CF} dependem da natureza do núcleo – dimensão, material)

Suponha que se submete o transformador a dois ensaios em vazio, fixando um valor para a indução e verificando os resultados das perdas no ferro para uma frequência A e para uma frequência B registando as p_{Fe} para os dois casos.

Ao fixarmos o valor de B_M estamos a dizer que $B_M = \text{constante}$, donde, com:

$$K_1 = K_h * B_M^2 \quad \text{e} \quad K_2 = K_{CF} * B_M^2 \quad \text{nos permite escrever:} \quad p_{Fe} = f * K_1 + f^2 * K_2$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

O resultado dos dois ensaios a frequências diferentes conduz-nos ao seguinte sistema de equações, onde as perdas no ferro são medidas em cada um dos ensaios:

$$\begin{cases} p_{FeA} = K_1 f_A + K_2 f_A^2 \\ p_{FeB} = K_1 f_B + K_2 f_B^2 \end{cases} \quad \text{Daqui se calcula } K_1 \text{ e } K_2.$$

Assim, teremos, por exemplo, para a frequência nominal, f : $p_H = K_1 * f$ e $p_{CF} = K_2 * f^2$

Como garantir que B_M é constante nos dois ensaios?

Para tal ser possível, há que variar a tensão de alimentação. Recordando a expressão da tensão segundo a fórmula de Boucherot...

$$U_1 = 4,44 * f * N_1 * A_f * B_M = K * f * B_M \quad (\text{onde } A_f \rightarrow \text{área da secção recta do ferro do núcleo})$$

Fixando a indução e escolhendo os dois valores para a frequência bastará adequar o valor da tensão:

$$\frac{U_{1A}}{U_{1B}} = \frac{f_A}{f_B}$$

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Efeitos da variação da frequência no funcionamento de um transformador.

Grandezas do transformador que dependem da frequência:

Tensões nominais

- $U_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot A_f \cdot B_M = K' \cdot f \cdot B_M$
- $U_{20} = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot A_f \cdot B_M = K'' \cdot f \cdot B_M$

As perdas no ferro:

- $p_{Fe} = K_h \cdot f \cdot B_M^2 + p_{CF} = K_{CF} \cdot f^2 \cdot B_M^2$

As reactâncias

- $x_1 = \omega l_1; x_2 = \omega l_2; X_0 = \omega L_0$

Tomando as equações das tensões admitidas constantes, para uma nova frequência f' :

$$f \cdot B_M = f' \cdot B'_M$$

Constata-se que a indução varia de forma inversamente proporcional face à frequência.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Uma diminuição de frequência provocaria um aumento da indução, com os riscos de saturação no núcleo e consequente aumento da corrente de magnetização, das perdas e da deformação da onda da corrente de magnetização.

Se, face ao valor nominal, se desse uma diminuição da frequência dar-se-ia uma diminuição da indução e provavelmente estaríamos perante uma má utilização do ferro.

Cuidados a ter na utilização de um transformador a frequência distinta da nominal

- Não ultrapassar a indução normal de funcionamento a menos que se saiba não vir a saturar o ferro do transformador.
- Assegurar que as perdas totais se mantenham num mesmo valor de modo a assegurar a mesma temperatura final.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Tome-se um transformador preparado para funcionar a 50Hz. Admita-se que se pretende fazer funcionar esse transformador a 60Hz, mas mantendo a tensão nominal primária U_1 .

A frequência aumenta 20%. Quanto às, $p_{Fe} = K_h \cdot f \cdot B_M^2 + p_{CF} = K_{CF} \cdot f^2 \cdot B_M^2$, estas variam com o quadrado da indução nas duas parcelas e com o quadrado da frequência apenas numa delas. Um aumento da frequência implica, como vimos atrás, uma diminuição da indução. Neste caso, a diminuição da indução tem um peso maior do que o aumento da frequência, logo, as perdas no ferro vão ser menores. No entanto, dando-se a diminuição das perdas no ferro numa proporção menor relativamente ao aumento da frequência, não se deverá esperar um aumento significativo da intensidade de corrente nominal.

Assim, e por aproximação, poder-se-á dizer que as grandezas nominais de tensão (primária e secundária), corrente (primária e secundária), potência aparente e perdas Joule, se mantêm idênticas a 50Hz (valor nominal) e a 60Hz (valor para o qual aumentou). As perdas no ferro e a corrente em vazio diminuem. O rendimento e a tensão de curto-circuito percentual aumentam.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

PARA FINALIZAR...ALGUMAS NOTAS

$$U_{1c} < 10\% U_{1n} \Rightarrow I_{0c} \approx 0$$

Usar o circuito equivalente em "L" ou esquema equivalente simplificado quando:

- $e_z < 10\%$
- $I_0 > 1\%$ de I_n

Usar o circuito equivalente de Kapp quando:

- $e_z < 10\%$
- $I_0 < 1\%$ de I_n

Usar o circuito equivalente em "T" quando:

- $e_z > 10\%$
- $I_0 > 1\%$ de I_n

Com os ensaios económicos (cc e vazio) não temos todos os elementos necessários para usar o esquema em "T" pelo que recorreremos ao esquema em "L" mas sem nunca esquecer que se estão a cometer erros.