

# Transformadores

## Funcionamento em paralelo na rede elétrica

### Resumo

O crescimento do consumo de energia elétrica verificado nos últimos anos e o aparecimento e evolução dos sistemas de produção de energia por fontes de energia renováveis, como a eólica e fotovoltaica, levam a que sejam necessários ajustes no sistema de forma a comportar estas variações no trânsito de potências. Assim, pode ser necessário instalar transformadores em paralelo para comportar o aumento da potência consumida num determinado local. Este artigo aborda a utilização dos transformadores nos Sistemas Elétricos de Energia e explica as condições necessárias para o correto funcionamento de transformadores em paralelo.

### 1 Introdução

Desde a produção até ao consumidor final, passando pelo transporte e distribuição, a energia elétrica sofre várias alterações no valor do seu nível de tensão. Isto é conseguido com o uso de transformadores de potência que estão instalados em locais estratégicos do Sistema Elétrico de Energia (SEE), como se pode ver na Figura 1.

Um transformador é uma máquina elétrica estática com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternada num outro sistema de tensão e corrente com valores normalmente diferentes mas com a mesma frequência, para a transmissão de energia entre os dois sistemas [1].

Idealmente, o transformador altera o valor do nível de tensão da entrada para outro valor na saída, sem afetar a potência fornecida. Se o transformador eleva o valor da tensão de entrada a corrente tem necessariamente que diminuir para que a potência fornecida seja igual à absorvida. Desta forma, a energia pode ser gerada numa central, o valor da sua tensão pode ser elevado para níveis de transporte, em grandes distâncias com baixas perdas, e o valor da tensão pode ser novamente diminuído para níveis de distribuição. Como as perdas nas linhas são proporcionais ao quadrado da corrente que nelas circula, elevando o valor da tensão e diminuindo o valor da corrente num fator de 10 no transformador, significa uma diminuição do valor das perdas num fator de 100. Pode afirmar-se que sem o uso de transformadores não seria possível a utilização da energia elétrica como hoje a conhecemos [2].

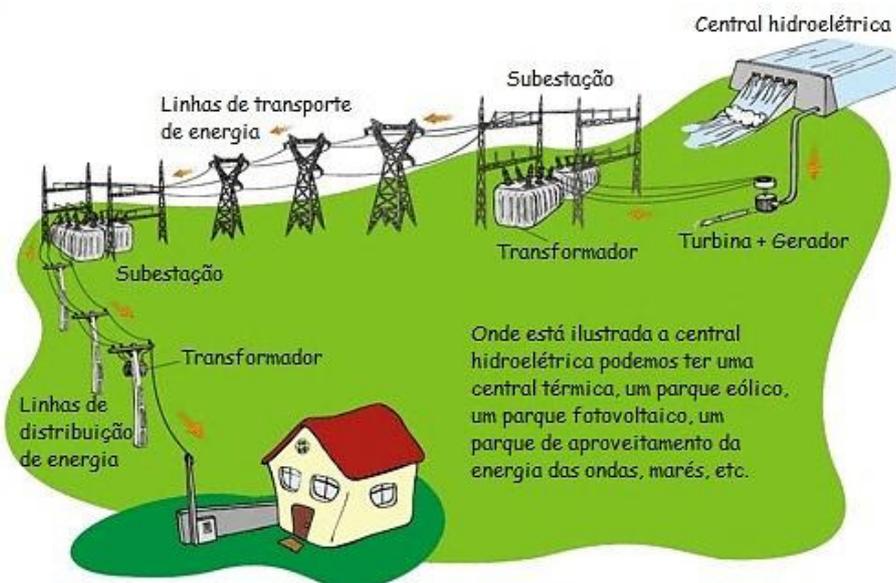


Figura 1 – Sistema Elétrico de Energia  
(Imagem adaptada de: <http://arqaulas.wordpress.com>)

Graças aos transformadores, é possível utilizar a energia elétrica dentro de limites recomendáveis de tensão, embora ela seja gerada na gama dos milhares de volts (6-25 kV), transportada até um milhão de volt (Muito Alta Tensão – MAT: 150 kV, 220 kV, 400 kV) e em muitos casos distribuída com tensões superiores a 30 kV (Alta Tensão – AT: 60 kV; Média Tensão – MT: 6 kV, 10 kV, 15 kV, 30 kV). Finalmente chega ao utilizador final com valores de 400/230V.

Por outro lado, os transformadores tornam possível a interligação de sistemas com valores de tensão diferentes, tornando-os mais flexíveis e fiáveis, levando a um melhor aproveitamento da potência total instalada [3].

Há vários tipos de transformadores, consoante o fim a que se destinam. No entanto, neste documento, serão apenas abordados os transformadores de potência destinados ao transporte e distribuição de energia elétrica.

## 2 Transformadores de Potência

Os transformadores utilizados em sistemas de potência devem ser projetados e construídos para que, além de se conseguir um custo aceitável, também se consiga [3]:

- Uma boa regulação de tensão: implica que tenham reduzidas quedas de tensão. Consegue-se pela intensificação do acoplamento magnético entre enrolamentos para redução dos fluxos de dispersão e correspondentes quedas reativas;
- Altos rendimentos: Implica obtenção de baixas perdas de energia, tanto no cobre como no ferro do núcleo. Consegue-se limitando as solicitações dos materiais utilizados (densidades de corrente no cobre e induções no ferro) a níveis compatíveis com os custos, melhorando por outro lado as suas propriedades;
- Baixas correntes e perdas no funcionamento em vazio: As baixas correntes em vazio conseguem-se com altas indutâncias de magnetização, utilizando núcleos altamente permeáveis. Menores perdas em vazio significam, principalmente, menores perdas no ferro.

Como se tratam de sistemas trifásicos, os transformadores utilizados também o são (podem ser usados bancos de três transformadores monofásicos). As ligações entre enrolamentos podem ser realizadas em estrela 'Y ou y', triângulo 'D ou d' ou zigue-zague 'Z ou z' (letra maiúscula refere-se ao enrolamento de tensão mais elevada e a letra minúscula ao enrolamento de tensão mais baixa). A partir daqui, neste documento, considera-se o enrolamento de mais alta tensão como o primário (transformador abaixador).

Desta forma, de acordo com a ligação de ambos os enrolamentos podemos ter diferentes configurações para um transformador. O esquema de ligação Yy é normalmente usada à saída de centrais e grandes subestações de distribuição. O esquema Dy é usado nos postos de transformação com o triângulo para as tensões da ordem dos 15 kV e a estrela do secundário para as tensões compostas de cerca de 400 V. É usado com condutor neutro e ligação à terra do neutro dos enrolamentos. A ligação Yd surge em subestações de distribuição para reduzir a tensão do transporte para níveis da distribuição. Normalmente, o neutro da estrela é ligado à terra e o triângulo a alimentar linhas aéreas ou redes de cabos [4].

## 3 Circuito Equivalente do Transformador

O funcionamento do transformador pode ser modelizado através do seu circuito equivalente, que está ilustrado na Figura 2. O transformador real pode ser representado por um transformador ideal em que aos enrolamentos do primário e secundário se encontram ligadas impedâncias representativas dos fenómenos que ocorrem no transformador real: quedas de tensão devidas às resistências e às indutâncias de fugas magnéticas, perdas de energia por efeito de Joule nas resistências, magnetização e perdas no ferro [4].

Este modelo é válido para regimes permanentes de funcionamento, com grandezas sinusoidais, não considerando os fenómenos não lineares do transformador real, como a saturação, histerese, etc.

O transformador ideal representado na figura está isento de quedas de tensão, fugas magnéticas e perdas de energia. Para qualquer regime de funcionamento, as tensões e intensidades de corrente são transformadas com alteração do módulo na proporção direta do número de espiras para as tensões e na proporção inversa para as correntes, e com uma rotação de fase de 180° para ambas as grandezas.

As perdas no cobre ( $R I^2$ ) traduzem-se no aquecimento dos enrolamentos do primário e secundário devido à passagem da corrente. No modelo estão consideradas em  $r_1$  e  $r_2$  que representam a resistência do enrolamento primário e secundário, respetivamente.

As perdas no ferro devido às correntes de *Foucault* traduzem-se no aquecimento do núcleo do transformador. São proporcionais ao quadrado da tensão aplicada ao transformador. As perdas histeréticas estão associadas à orientação dos domínios magnéticos do material ferromagnético. Estas perdas são função não linear da tensão aplicada ao transformador. As perdas no ferro estão consideradas no modelo em  $R_0$ .

As reactâncias  $x_1$  e  $x_2$  estão associadas aos fluxos de fugas ou dispersão que ocorrem no transformador quando o fluxo do núcleo (principal) se escapa e atravessa apenas um dos enrolamentos. Os efeitos da excitação magnética do núcleo são considerados na reatância de magnetização  $X_m$ .

As equações de funcionamento do transformador são (as letras sublinhadas indicam fasores) [4]:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \quad (1)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 \quad (2)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_{21} \quad (3)$$

$$\underline{I}_{21} = -\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 \quad (4)$$

$$\underline{E}_1 = -j\omega N_1 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$\underline{E}_2 = -j\omega N_2 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

em que:

$$Z_1 = r_1 + jx_1 \text{ e } Z_2 = r_2 + jx_2;$$

$N_1$  – número de espiras do enrolamento primário;

$N_2$  – número de espiras do enrolamento secundário;

$E_1$  – f.e.m. induzida no primário;

$E_2$  – f.e.m. induzida no secundário;

$\Phi_M$  – valor máximo do fluxo principal;

$I_{21}$  – corrente do secundário referida ao primário.

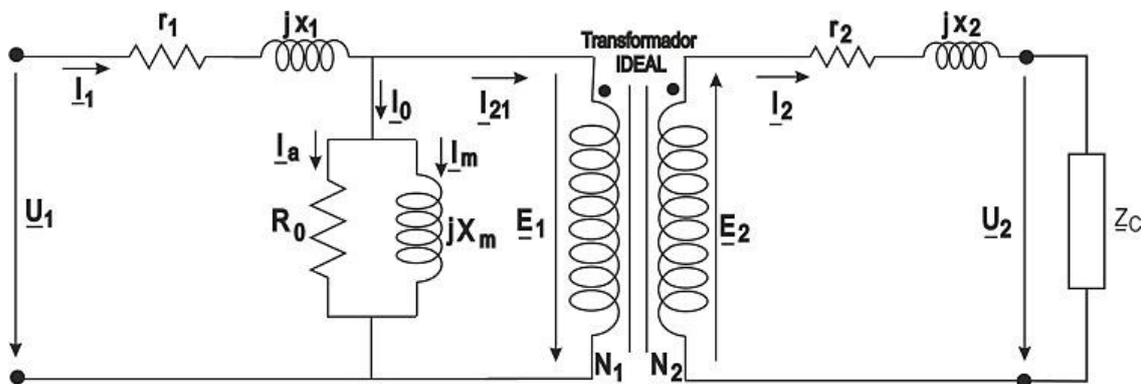


Figura 2 – Circuito equivalente do transformador

Sendo o transformador uma máquina que está ligada em conjunto com outras máquinas nas redes de energia elétrica, será mais cómodo o tratamento dos problemas relativos ao seu funcionamento se for representado como uma associação de impedâncias ou um quadripolo. Olhando para o esquema da Figura 2, verifica-se que uma simples associação de impedâncias se torna impossível devido à presença dos dois enrolamentos do transformador ideal [4].

É possível obter um circuito equivalente referido a um enrolamento, onde as grandezas no enrolamento equivalente vão ter valores diferentes das correspondentes no enrolamento real. Designar-se-ão com o índice 12 as grandezas primárias referidas ao secundário. No esquema da Figura 3 mostra-se o circuito equivalente referido ao secundário, com uma carga ligada aos terminais do secundário.

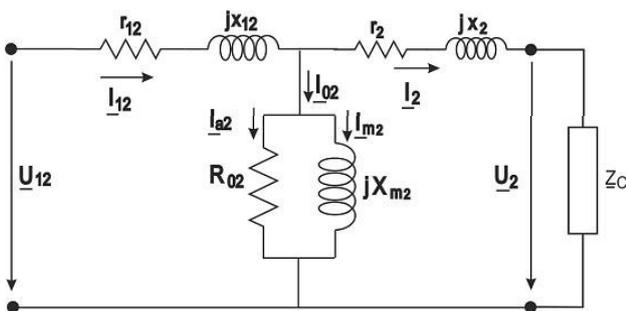


Figura 3 – Circuito equivalente referido ao secundário

Assim, sendo a razão do número de espiras dada por:

$$a = \frac{N_1}{N_2} \tag{7}$$

a passagem das impedâncias do primário para o secundário pode ser feita dividindo o seu valor pelo quadrado da razão do número de espiras, como se segue:

$$z_{12} = \frac{z_1}{a^2} \tag{8}$$

O valor da tensão do primário referido ao secundário  $U_{12}$  pode ser obtido a partir da expressão:

$$\underline{U}_{12} = -\frac{\underline{U}_1}{a} \tag{9}$$

O valor da corrente no primário será igual a:

$$\underline{I}_1 = -\frac{\underline{I}_{12}}{a} \tag{10}$$

Se o transformador tem baixas fugas magnéticas e o dimensionamento da corrente em vazio foi feito com cuidado, é possível, obter um circuito equivalente simplificado relativamente ao circuito anterior. Assim, considerando que a queda de tensão na impedância do primário assume valores muito baixos, o valor do fluxo e indução são praticamente constantes independentemente do regime de carga. Chega-se desta forma ao circuito equivalente simplificado, que está representado na figura seguinte:

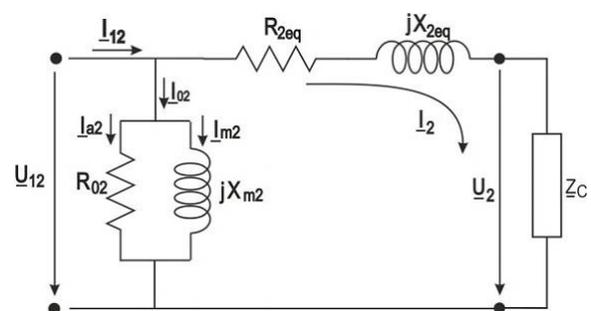


Figura 4 – Circuito equivalente simplificado referido ao secundário

Neste circuito, a resistência do primário referida ao secundário  $r_{12}$  e a resistência do secundário  $r_2$  foram agrupadas em  $R_{2eq}$ , assim como as reactâncias em  $X_{2eq}$ . Então,  $R_{2eq}=r_{12}+r_2$  e  $X_{2eq}=x_{12}+x_2$ .

Para transferir as impedâncias do secundário para o primário estas são multiplicadas pelo quadrado da razão do número de espiras:

$$\underline{z}_{21} = a^2 \underline{z}_2 \tag{11}$$

Quando se trata de transformadores trifásicos deve utilizar-se os valores das tensões simples e correntes nas linhas, e este deverá considerar-se um circuito equivalente por fase (fase-neutro). Por outro lado, deve utilizar-se a razão de transformação  $m$  no lugar da razão do número de espiras pois, dependendo do tipo de ligação dos enrolamentos do primário e secundário, estas podem ser diferentes. A razão de transformação pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$m = \frac{U_{1N}}{U_{20}} \quad (12)$$

em que  $U_{1N}$  é a tensão nominal do primário e  $U_{20}$  a tensão do secundário em vazio.

Para a análise do paralelo de transformadores vai considerar-se este esquema equivalente simplificado, cujo diagrama fasorial está representado na Figura 5, para uma carga indutiva.

#### 4 Funcionamento de Transformadores em Paralelo

Conforme referido, o agrupamento de transformadores em paralelo é de grande importância para o funcionamento dos sistemas elétricos de energia. Esta ligação em paralelo tem algumas vantagens, nomeadamente [3]:

- Maior fiabilidade do sistema: se um dos transformadores ficar com algum defeito, o outro pode continuar a alimentar a carga;

- Possibilidade de manutenção sem cortes de alimentação: pode realizar-se manutenção num dos transformadores sem que seja necessário desligar a alimentação da carga (se a potência disponível no outro transformador for suficiente para alimentar a restante carga);
- Expansão do sistema: possibilidade de aumento da capacidade do sistema, acrescentando um transformador para aliviar outro que esteja em sobrecarga, ou simplesmente, aumento da potência disponível para alimentar a carga.
- Operação sob condições mais favoráveis de carga: com as variações de carga que existem ao longo do dia, é vantajoso ter os transformadores a funcionar em condições próximas às de máximo rendimento. Isto significa introduzir ou retirar de funcionamento unidades, para que se mantenham ligadas as que fiquem a funcionar próximo do seu regime nominal.

A questão fundamental que surge quando se pretendem ligar dois transformadores em paralelo, seja porque é necessário aumentar a potência instalada num posto de transformação, seja por razões de garantir melhor fiabilidade do serviço, tem a ver com o modo como a carga total solicitada ao conjunto se vai repartir pelos diferentes transformadores. O ideal será repartir a carga pelos transformadores de forma proporcional às suas potências nominais e haver concordância de fase entre a corrente que circula no secundário de cada transformador e a corrente total na carga. Não se verificando estas condições significará que a capacidade do conjunto à plena carga será inferior à soma das potências nominais de cada transformador [4].

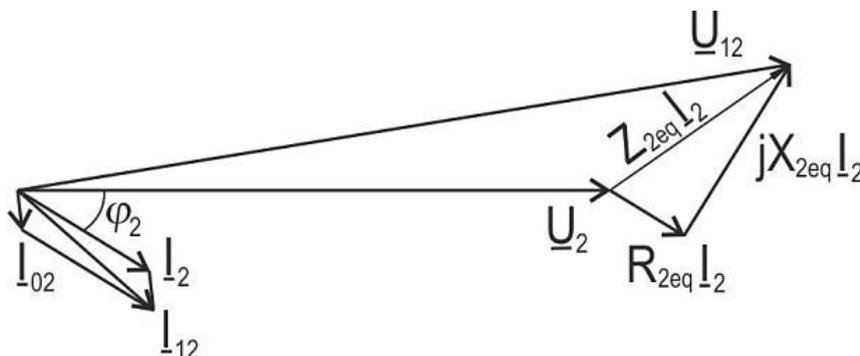


Figura 5 – Diagrama fasorial correspondente ao circuito simplificado referido ao secundário

#### 4.1 Condições para o Funcionamento de Transformadores em Paralelo

Para que se consiga uma distribuição da carga pelos transformadores de forma proporcional à sua potência nominal é necessário ter atenção ao seguinte [3]:

- Às polaridades dos transformadores monofásicos e sequência de fases dos polifásicos;
- Aos deslocamentos de fase entre primários e secundários de transformadores trifásicos;
- Às tensões nominais e relações de transformação;
- Aos valores das impedâncias de curto-circuito dos transformadores;

##### 4.1.1 Polaridade

A polaridade de um enrolamento refere-se à característica que mostra a dependência do sentido da f.e.m. induzida em relação ao fluxo que a gera (normalmente assinalada com uma seta ou um ponto). Assim, dois terminais de dois enrolamentos são da mesma polaridade ou homólogos quando estiverem igualmente situados relativamente ao sentido positivo num e noutro enrolamento [4].

A figura seguinte ilustra um processo simples de identificar os terminais com a mesma polaridade de um transformador. Em primeiro lugar, alimenta-se um dos enrolamentos com uma tensão alternada, que pode ser de baixo valor relativamente ao valor nominal do enrolamento. Os terminais identificados com ponto têm a mesma polaridade se o valor da tensão  $V_t$  for igual à soma das tensões  $V_1$  e  $V_2$ . Estas tensões podem ser medidas com um voltímetro ou com um osciloscópio [3].

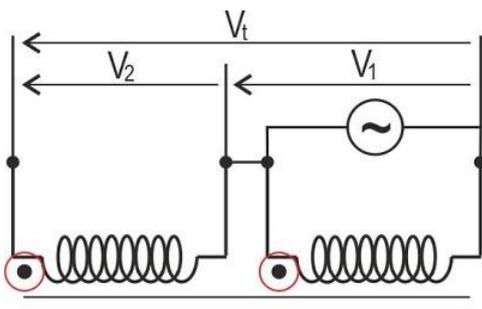


Figura 6 – Identificação de terminais com mesma polaridade

Uma vez identificados os terminais do transformador, a ligação em paralelo é feita interligando-se os terminais igualmente identificados nos dois transformadores.

##### 4.1.2 Deslocamentos de fase

No caso dos transformadores trifásicos (ou polifásicos) além do problema da polaridade dos enrolamentos de cada fase no primário e secundário, há que acrescentar o problema dos desfasamentos que podem ocorrer entre as tensões aos seus terminais, nas ligações em estrela, triângulo ou zig-zague. Podem ligar-se em paralelo dois transformadores trifásicos quando os seus deslocamentos de fase forem iguais. Se não o forem, as correntes de circulação entre eles podem atingir valores inaceitáveis [3].

Este assunto será abordado mais adiante neste documento.

##### 4.1.3 Tensões nominais e relações de transformação

Para que dois transformadores possam ser ligados em paralelo é necessário, além de terem razões de transformação iguais, que os valores eficazes das suas tensões nominais sejam iguais. Diferenças nas relações de transformação levariam ao aparecimento de correntes de circulação entre os transformadores que poderiam atingir valores inaceitáveis.

Por outro lado, quando dois (ou mais) transformadores se ligam em paralelo significa que recebem energia da mesma linha pelo primário e a transferem para outra linha pelo secundário. Assim, devem ter a mesma tensão quer no primário quer no secundário, tanto em módulo como em fase. Desta forma, uma condição que deve ser garantida quando se pretende ligar dois transformadores em paralelo é que ambos tenham as mesmas tensões nominais no primário e secundário, que significa que devem ter a mesma razão de transformação  $m$  [5].

Uma forma simples de verificar se os dois transformadores têm as mesmas tensões em valor eficaz, frequência e fase, está ilustrada na Figura 7 (para dois transformadores monofásicos) [4]:

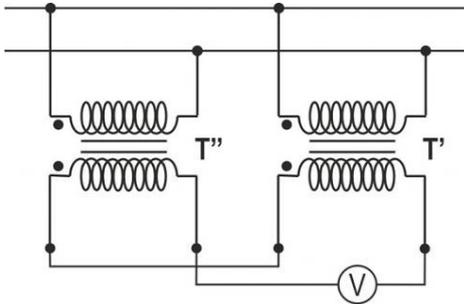


Figura 7 – Paralelo de dois transformadores monofásicos

Se, com as ligações indicadas, houver concordância de fase, a tensão indicada no voltímetro será nula. Se por outro lado o valor indicado no voltímetro for o dobro da tensão de cada transformador, significa que as ligações estão trocadas.

#### 4.1.4 Valores das impedâncias equivalentes

A análise que se segue aplica-se aos dois transformadores monofásicos da Figura 7, T' e T'', com razões de transformação  $m'=m''=m$ . Dessa análise verifica-se que o agrupamento em paralelo dos dois transformadores é ideal quando se tem igualdade de argumentos assim como módulos das suas impedâncias complexas equivalentes. Isto significa terem tensões de curto-circuito iguais. Assim, ao alimentarem uma carga com uma potência total S [3]:

As contribuições de cada um dos transformadores S' e S'' serão proporcionais às suas potências nominais. Assim, ambos podem funcionar em simultâneo à plena carga.

A potência total S solicitada pela carga será numericamente igual à soma das potências individuais fornecidas por cada transformador  $S=S'+S''$ , situação resultante da concordância de fase das correntes I' e I'' fornecidas por T' e T'' respetivamente [3].

Dado que esta análise se vai referir às correntes secundárias, no esquema equivalente de cada transformador não se considera a impedância de excitação, pelo que o esquema equivalente dos dois transformadores em paralelo será o representado na Figura 8. Considera-se ainda que:  $\underline{U}'_{1N}=\underline{U}''_{1N}$  e  $\underline{U}'_{20}=\underline{U}''_{20}=\underline{U}_{20}$ .

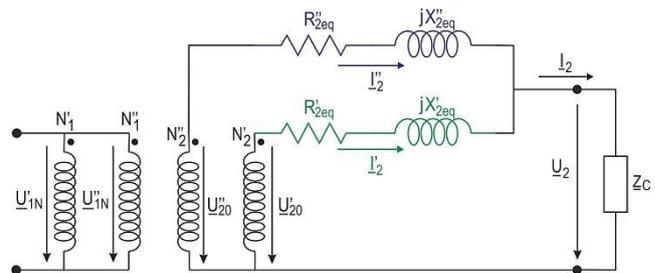


Figura 8 – Circuito equivalente de dois transformadores em paralelo

As equações de funcionamento do lado secundário do transformador são [4]:

$$\underline{U}_{20} - \underline{U}_2 = \underline{Z}'_{2eq} \underline{I}'_2 = \underline{Z}''_{2eq} \underline{I}''_2 \quad (13)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}'_2 + \underline{I}''_2 \quad (14)$$

Deste sistema pode obter-se:

$$\frac{\underline{I}'_2}{\underline{I}''_2} = \frac{\underline{Z}''_{2eq}}{\underline{Z}'_{2eq}} \quad (15)$$

$$\underline{I}'_2 = \frac{\underline{Z}''_{2eq}}{\underline{Z}'_{2eq} + \underline{Z}''_{2eq}} \underline{I}_2 \quad (16)$$

$$\underline{I}''_2 = \frac{\underline{Z}'_{2eq}}{\underline{Z}'_{2eq} + \underline{Z}''_{2eq}} \underline{I}_2 \quad (17)$$

As equações (16) e (17) determinam as correntes de cada transformador enquanto (15) mostra que estas se distribuem na razão inversa das impedâncias equivalentes.

#### 4.1.4.1 Impedâncias iguais em módulo e fase

Como referido anteriormente, o ideal seria que a carga se dividisse proporcionalmente às potências nominais de cada transformador e quando houvesse concordância de fase entre a corrente de cada transformador e a corrente solicitada pela carga. Estas condições traduzem-se na seguinte relação [4]:

$$\frac{I'_2}{I''_2} = \frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} \quad (18)$$

Como, de acordo com (15) temos:

$$\frac{I'_2}{I''_2} = \frac{Z''_{2eq}}{Z'_{2eq}} \quad (19)$$

Agrupando estas duas equações, obtém-se:

$$Z'_{2eq} I'_{2N} = Z''_{2eq} I''_{2N} \quad (20)$$

o que implica que os dois transformadores tenham iguais tensões de curto-circuito nominais.

Se os dois transformadores tiverem também iguais quedas óhmicas e indutivas nominais [4]:

$$R'_{2eq} I'_{2N} = R''_{2eq} I''_{2N} \quad (21)$$

$$X'_{2eq} I'_{2N} = X''_{2eq} I''_{2N}$$

então:

$$\frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} = \frac{R''_{2eq}}{R'_{2eq}} = \frac{X''_{2eq}}{X'_{2eq}} \quad (22)$$

Substituindo em (19) e (20) obtém-se:

$$\frac{I'_2}{I''_2} = \frac{Z''_{2eq}}{Z'_{2eq}} = \frac{R''_{2eq}}{R'_{2eq}} = \frac{X''_{2eq}}{X'_{2eq}} = \frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} \quad (23)$$

Analisando esta expressão, verifica-se que, independentemente do valor da carga, os dois transformadores funcionam com iguais quedas óhmicas e iguais quedas indutivas.

Isto significa que os diagramas de tensões são coincidentes e as correntes fornecidas por cada transformador estão em fase com a corrente solicitada pela carga, como ilustrado na figura seguinte (carga indutiva):

Em relação às potências que cada transformador fornece à carga elas serão proporcionais à potência nominal de cada um, como se demonstra a seguir [4]:

$$\frac{S'}{S''} = \frac{U'_2 I'_2}{U''_2 I''_2} = \frac{U'_{20} I'_{2N}}{U''_{20} I''_{2N}} = \frac{S'_{2N}}{S''_{2N}} \quad (24)$$

$$\frac{P'}{P''} = \frac{U'_2 I'_2 \cos \varphi'_2}{U''_2 I''_2 \cos \varphi''_2} = \frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} = \frac{S'_{2N}}{S''_{2N}} \quad (25)$$

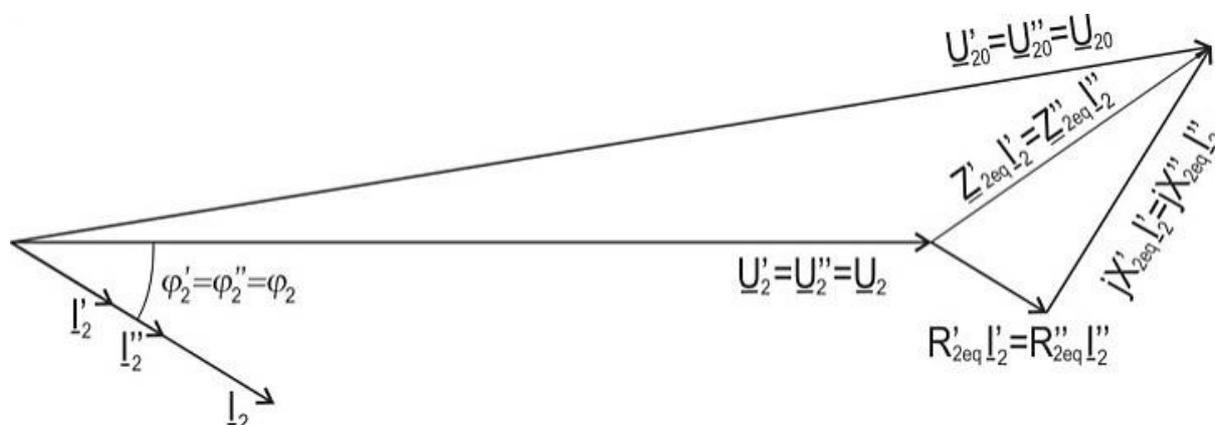


Figura 9 – Diagrama fasorial para o paralelo de dois transformadores com iguais quedas óhmicas e indutivas

Então, ao se efetuar o agrupamento de dois transformadores em paralelo o pretendido é que a carga seja dividida pelos transformadores de forma proporcional à sua potência. Se os transformadores forem de potências iguais, podem dividir por eles a carga em partes iguais se, fornecendo a mesma corrente, apresentarem a mesma queda de tensão. Assim, é necessário que as resistências e reatâncias equivalentes de ambos sejam iguais. Pode afirmar-se que devem ter a mesma tensão de curto-circuito [6].

**4.1.4.2 Impedâncias iguais apenas em módulo**

Suponhamos agora que os triângulos de quedas não são iguais, embora tenham a mesma hipotenusa, ou seja, igualdade em módulo das tensões de curto-circuito. Assim, pode escrever-se [4]:

$$\begin{aligned} Z'_{2eq} I'_{2N} &= Z''_{2eq} I''_{2N} \\ R'_{2eq} I'_{2N} &\neq R''_{2eq} I''_{2N} \\ X'_{2eq} I'_{2N} &\neq X''_{2eq} I''_{2N} \end{aligned} \tag{26}$$

As equações (18), (19) e (20) mantêm-se, por isso há uma distribuição proporcional das correntes. Há ainda uma distribuição proporcional das potências aparentes (24). Assim, os dois diagramas de tensões vão ter triângulos de quedas apenas com as hipotenusas coincidentes, como ilustrado na Figura 10, para uma carga indutiva. Verifica-se facilmente que as fases das correntes são diferentes, não sendo proporcional a distribuição das potências ativas [4].

Daqui se pode concluir que os dois transformadores podem funcionar em paralelo, simultaneamente à plena carga mas,

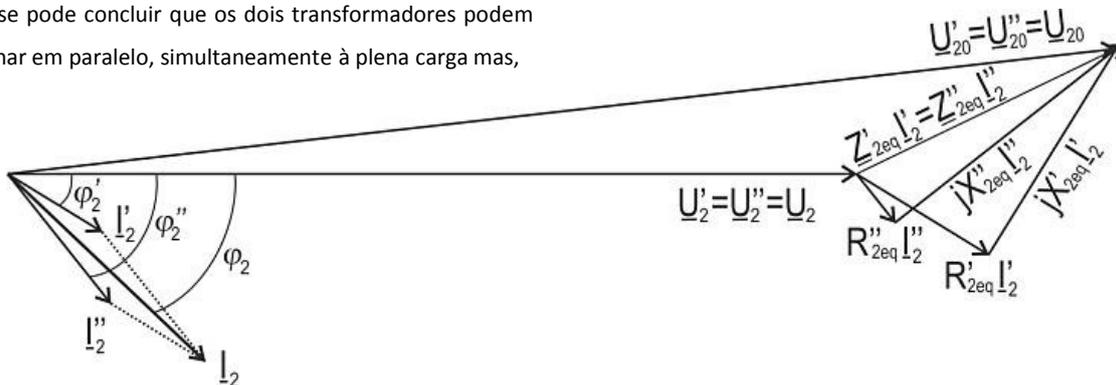


Figura 10 - Diagrama fasorial para o paralelo de dois transformadores com diferentes quedas ôhmicas e indutivas

como se tem  $\phi'_2 \neq \phi''_2$ , há diferença de fase nas correntes e  $|I_2| < |I'_2 + I''_2|$ .

**4.1.4.3 Impedâncias diferentes em módulo e fase**

Se também não for possível igualar os módulos das tensões de curto-circuito, temos [4]:

$$Z'_{2eq} I'_{2N} = \alpha Z''_{2eq} I''_{2N} \quad (\alpha > 1) \tag{27}$$

Como (19) se mantém, combinando com esta última expressão, fica:

$$\frac{I'_2}{I''_2} = \frac{I'_{2N}}{\alpha I''_{2N}} \tag{28}$$

Verifica-se desta forma que deixa de haver uma distribuição de correntes proporcional. Senão vejamos: se o transformador T' estiver a funcionar em regime nominal, ou seja,  $I'_2 = I'_{2N}$ , teríamos  $I''_2 = \alpha I''_{2N}$ , que significa que o transformador T'' estaria a funcionar em sobrecarga. Para que T'' não entre em sobrecarga, a máxima corrente que T' deve fornecer à carga é  $I'_{2N}/\alpha$ , que é inferior ao seu valor nominal.

Se um dos transformadores possuir uma tensão de curto-circuito menor significa que tem uma menor impedância equivalente. Como a potência se divide por eles na razão inversa das impedâncias equivalentes, o que possuir menor impedância equivalente, para ter a mesma queda de tensão, é forçado a fornecer uma maior corrente [6].

Daqui se conclui que este conjunto está subaproveitado, pois para um deles funcionar à corrente nominal o outro (o que tem maior tensão de curto-circuito) estará a funcionar abaixo do regime nominal.

#### 4.2 Paralelo de Transformadores Trifásicos

Para se efetuar o paralelo de dois transformadores trifásicos devem garantir-se as condições enunciadas anteriormente. Assim, deve garantir-se que os deslocamentos de fase das tensões secundárias sejam iguais. Nos transformadores trifásicos, esta igualdade está relacionada com a forma de ligação dos seus enrolamentos (estrela, triângulo ou zig-zague), ou seja, depende do desvio angular dos transformadores.

Segundo a norma CEI 60076 [1], o desvio angular corresponde ao desfasamento entre os fasores representativos das tensões entre o ponto neutro (real ou fictício) e os terminais homólogos de dois enrolamentos, quando aos enrolamentos de mais alta tensão se supõe ligado um sistema de tensões trifásico direto com sequência numérica ou alfabética, se os seus terminais forem designados por números ou letras, respetivamente. O desfasamento correspondente ao desvio angular é medido em atraso.

Desta forma, o desvio angular é o desfasamento, em atraso, entre as tensões simples dos enrolamentos do primário (mais alta tensão) e do secundário (reais ou fictícias), da mesma fase. Este desfasamento pode traduzir-se pela hora indicada num relógio em que a posição do fasor que traduz a tensão entre o neutro e o terminal de linha do enrolamento de tensão mais elevada é fixada nas 12 horas (ponteiro dos minutos). O ponteiro das horas corresponde ao fasor que traduz a tensão entre o neutro e o terminal de linha homólogo do enrolamento de mais baixa tensão. O desvio angular exprime-se numericamente pelas horas correspondentes, ou seja, obtém-se dividindo por  $30^\circ$  o desfasamento entre os fasores indicados [4].

Para o conceito ficar mais claro, suponhamos o transformador ilustrado na Figura 11. O enrolamento do primário (mais alta tensão) está ligado em triângulo e o secundário em estrela.

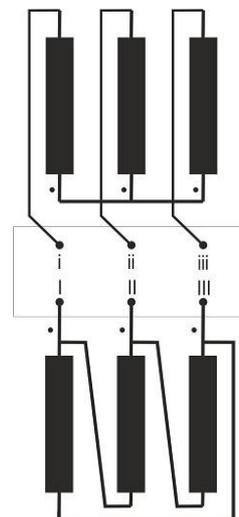


Figura 11 – Transformador trifásico com primário ligado em triângulo e secundário em estrela

Para determinar o desvio angular e desta forma o índice horário, toma-se como referência a tensão simples I (fictícia neste caso) coincidente com as 12 horas. Como na estrela estão disponíveis os terminais não homólogos, as relações de fase entre as tensões correspondentes dos dois lados são:

- i em oposição a I-III
- ii em oposição a II-I
- iii em oposição a III-II

Estas relações estão ilustradas na Figura 12:

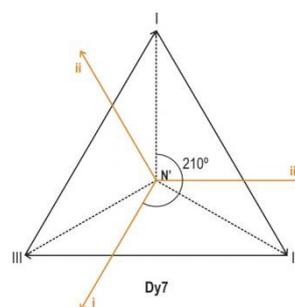


Figura 12 – Determinação do desvio angular do transformador trifásico

Como indicado na figura, o atraso de  $i$  relativamente a  $I$  é de  $210^\circ$ , correspondente às 7 horas.

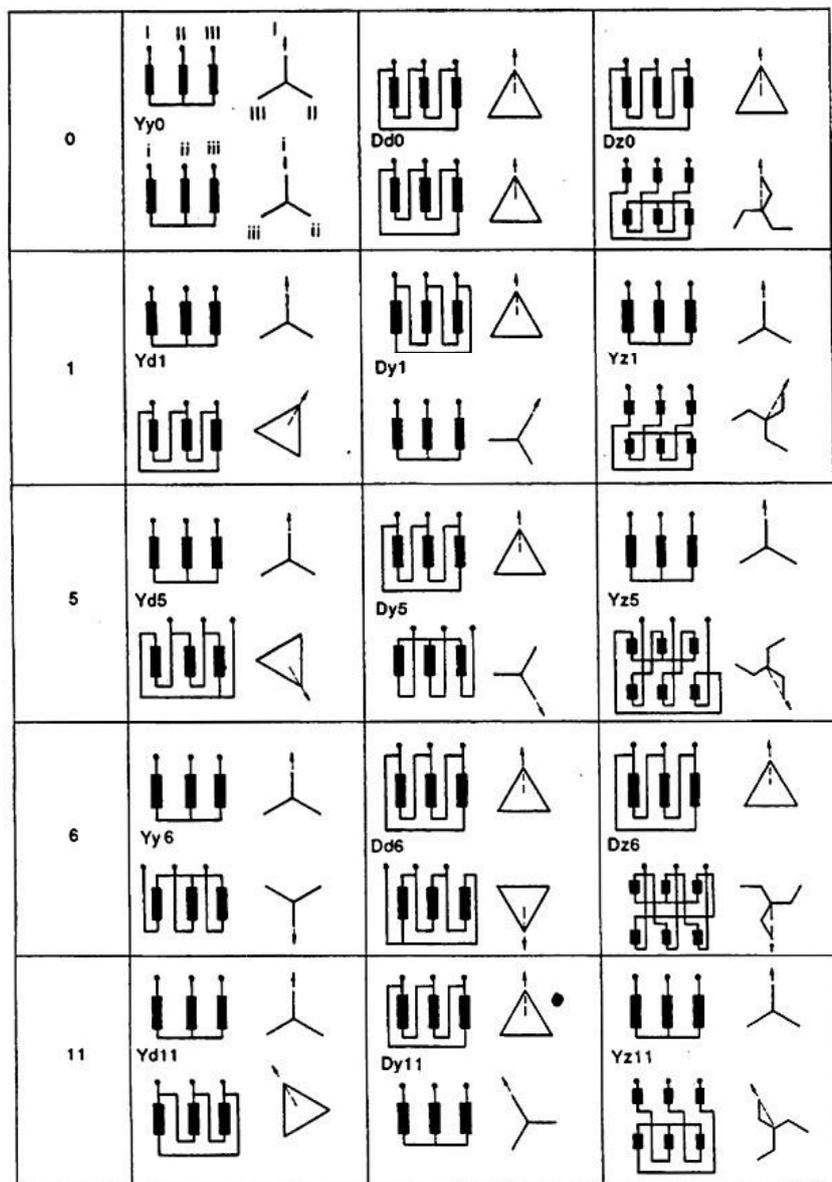
Desta forma o transformador tem um índice 7 (210/30). Na chapa de características deste transformador aparecerá a designação Dy7.

As ligações mais usuais estão ilustradas na figura 13 [1]:

Do que foi exposto, percebe-se que dois transformadores

com o mesmo sistema de tensões no lado da alta tensão, um com o índice 6 e outro com o índice 7, não vão ter as tensões do lado da baixa em fase. Assim, para se efetuar o paralelo de dois transformadores trifásicos eles deverão pertencer a um mesmo grupo. Os quatro grupos existentes são os seguintes:

- GRUPO I: Índices horários 0, 4, e 8;
- GRUPO II: Índices horários 6, 10 e 2;
- GRUPO III: Índices horários 1 e 5;
- GRUPO IV: Índices horários 7 e 11.



IEC 265/93

Figura 13 – Esquemas de ligação mais usuais em transformadores trifásicos

Para o paralelo de transformadores com o mesmo índice, bastará ligar em ambos os lados os terminais com a mesma designação.

Dentro de um grupo, se os índices horários apresentam uma diferença de 4 ou 8, isto significa que há um desfaseamento entre eles de  $120^\circ$  ou  $240^\circ$ , coincidente com o de duas fases de um sistema trifásico. Desta forma, ligam-se num dos lados os terminais com a mesma designação e no outro lado ligam-se entre si terminais por permutação circular das designações, como ilustrado na Figura 14 [4].

Há porém a possibilidade de efetuar o paralelo de transformadores de grupos diferentes (III e IV), de acordo com o seguinte [4]: Um transformador do grupo III pode ligar-se em paralelo com um do grupo IV se a ordem de sucessão das fases de um transformador se inverte em relação ao outro, como ilustrado na Figura 15.

Com exceção desta possibilidade anteriormente referida, é impossível o paralelo de transformadores pertencentes a grupos diferentes.

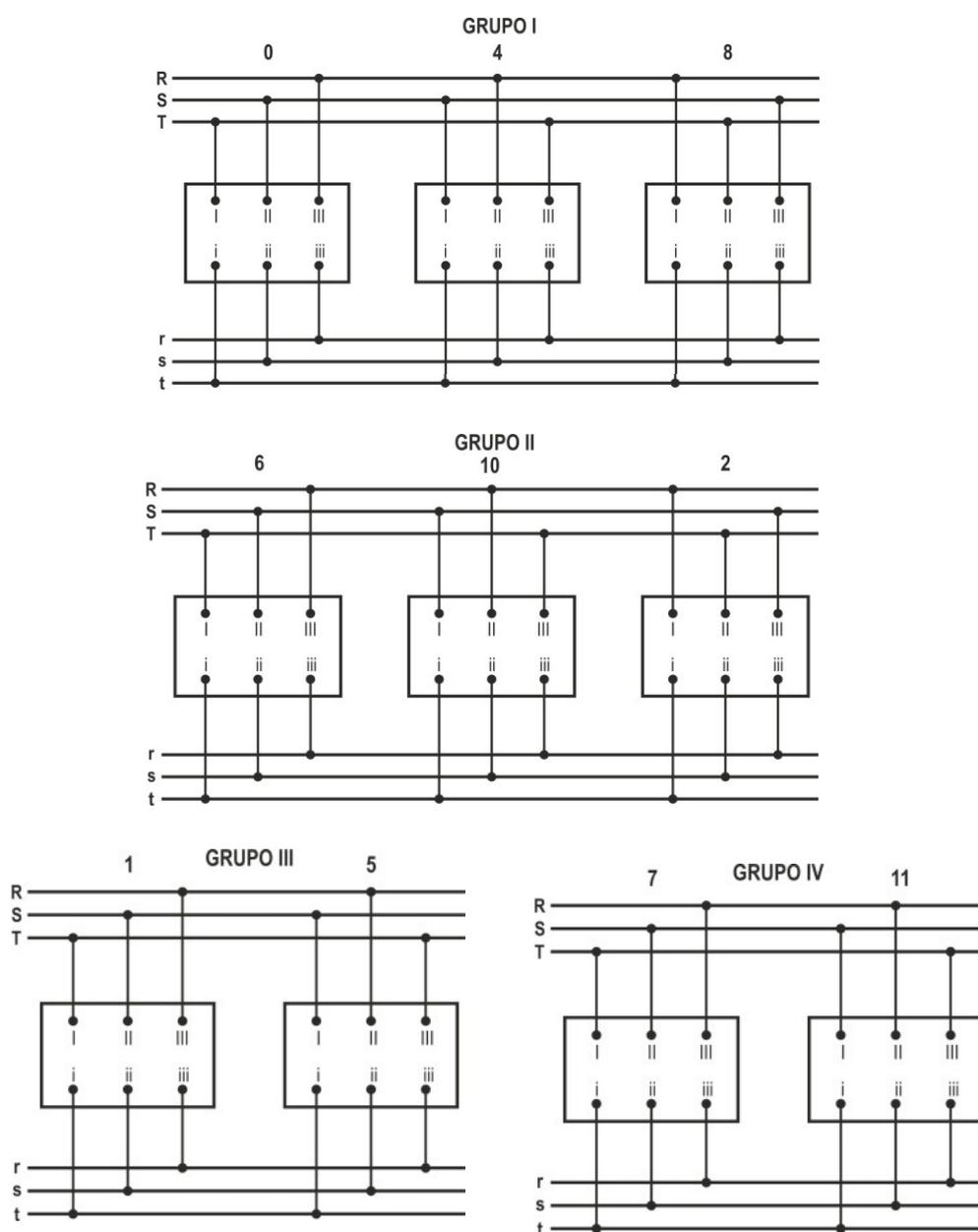


Figura 14 – Ligações para o paralelo de transformadores trifásicos pertencentes ao mesmo grupo horário

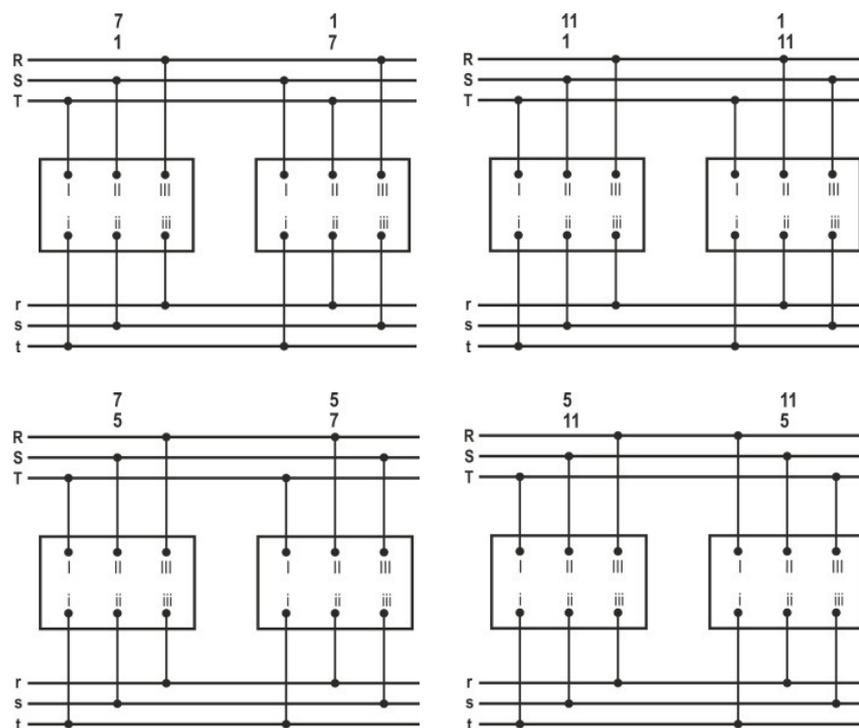


Figura 15 – Ligações para o paralelo de transformadores trifásicos pertencentes a grupos horários diferentes (III e IV)

## 5 Conclusões

Quando se pretende colocar dois ou mais transformadores monofásicos a funcionar em paralelo, há que ter alguns cuidados. Para que o funcionamento em paralelo se realize de forma ideal, ou seja, com distribuição da potência solicitada pela carga proporcional à potência de cada transformador, devem garantir-se as seguintes condições:

- Iguais tensões nominais dos enrolamentos primários e secundários;
- Iguais relações de transformação;
- Iguais tensões de curto-circuito com iguais quedas óhmicas e indutivas nominais;
- Mesma polaridade nos terminais interligados.

Quando se trata de transformadores trifásicos, além destas condições é necessário garantir que as tensões estão em fase, ou seja, ambos devem pertencer ao mesmo grupo horário, embora se possam ligar em paralelo transformadores pertencentes ao grupo III e IV.

Quando se agrupam transformadores de potências

diferentes, o que tiver menor potência deve ter maior impedância equivalente. Os triângulos fundamentais dos dois devem estar entre si na razão inversa das suas potências.

No entanto não é aconselhável efetuar o paralelo de transformadores com potências muito diferentes (no máximo 1:3), porque assim será difícil satisfazer os requisitos anteriores e o conjunto estará a ser subaproveitado.

## Referências

- [1] I. E. Commission, "IEC 60076-1: Power Transformers," in General, ed, 1999, p. 96.
- [2] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, Fourth ed.: McGraw Hill, 2005.
- [3] R. G. Jordão, Transformadores, 1ª edição ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- [4] C. C. Carvalho, "Transformadores," Sebenta ed. Porto: FEUP, 1983, p. 249.
- [5] M. A. R. Pozueta. (2008, Dezembro). Transformadores em Paralelo. Available: [http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos\\_Paralelo.pdf](http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos_Paralelo.pdf)
- [6] A. Martignoni, Transformadores, 8ª ed.: Editora Globo, 1969.