

# LIGAÇÕES TRIFÁSICAS

## LIGAÇÃO ESTRELA – ESTRELA

### Harmônicos de 3ª frequência:

#### 1. Yy – Sem neutro dos 2 lados –

a) **Em vazio** – Como não existe neutro no primário não pode circular o harmônico de tripla frequência da corrente magnetizante. O fluxo terá de conter um harmônico de tripla frequência, implicando que as f.e.m. induzidas quer no primário quer no secundário contenham um harmônico de tripla frequência, o mesmo acontecendo com as tensões por fase.

É evidente que as tensões compostas nunca conterão um harmônico de tripla frequência.

Tal facto obriga a dimensionar os enrolamentos para uma tensão por fase  $U_s = \sqrt{u_1^2 + u_3^2}$ , sendo  $u_1$  e  $u_3$  as tensões simples, respectivamente do termo fundamental e do 3.º harmónico.

Devido ainda ao 3.º harmónico resulta a chamada **instabilidade do ponto neutro**, que se verifica quer na Alta Tensão quer na Baixa Tensão.

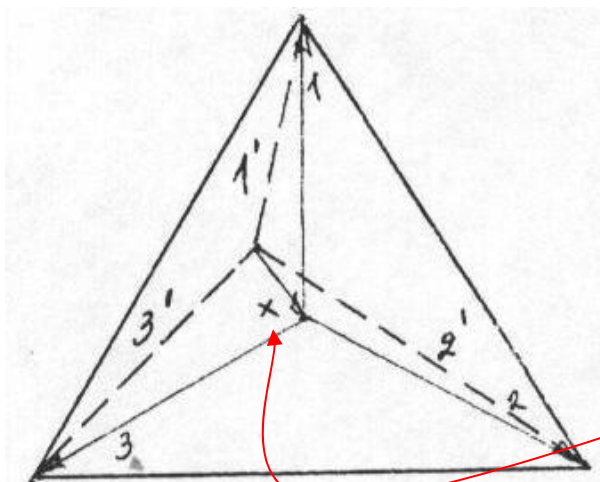


Figura 1

Na figura 1 representam-se os vectores respeitantes às tensões simples (1,2,3) e o vector  $x$  representativo do 3.º harmónico. As *verdadeiras tensões simples serão (1',2',3')*. O sistema de tensões compostas mantém-se simétrico

Na figura 2 representa-se o diagrama vectorial das tensões referente a um instante posterior: os termos fundamentais rodaram por exemplo 30° e o terceiro harmónico terá que rodar 90° (frequência  $3\omega$ ). O **ponto neutro deslocou-se de «n» para «n'»**. O triângulo das tensões compostas não se deformou. O ponto neutro desloca-se sobre uma circunferência o que originará uma variação da fem induzida por fase.

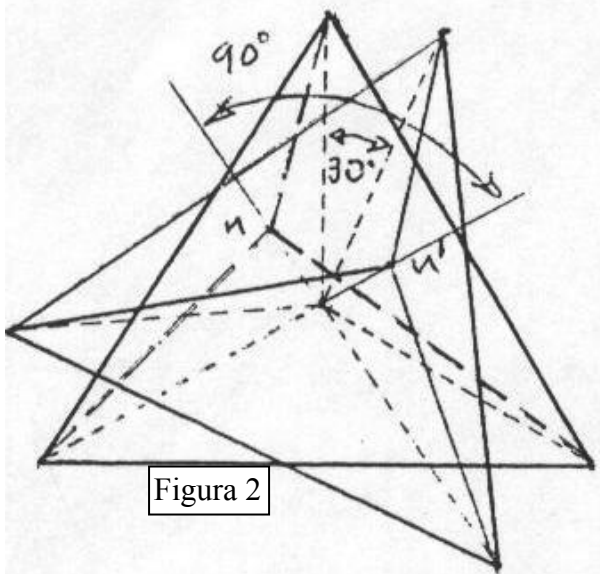


Figura 2

O tipo de núcleo que melhor amortecer estes fenómenos é o núcleo de fluxos ligados, porque os fluxos de tripla frequência estão em fase nas colunas, não podendo portanto circular nas travessas, obrigando a que se fechem pelo ar.

b) **Em carga** – Como não existe neutro não haverá possibilidade de circulação de harmónicos de tripla frequência originados na carga.

## 2. $Y_{NY}$ - Com neutro no primário

- Em vazio** – a corrente de tripla frequência pode circular no primário e, se a tensão for sinusoidal, o fluxo também o será e as fem primárias e secundárias também o serão. Existe no entanto um inconveniente, que resulta da circulação da corrente de tripla frequência do lado do primário que é o facto de poder provocar, no caso da linha primária ser aérea interferências nos circuitos telegráficos.
- Em carga** – O transformador como não tem neutro no secundário não permite a circulação de harmónicos de tripla frequência devido à carga.

## 3. $Y_{NY_n}$ – Com neutro dos dois lados –

- Em vazio** – só há corrente no primário, logo é equivalente ao caso anterior (caso 2)
- Em carga** – Se a carga introduz harmónicos de tripla frequência, devido ao neutro estes passam para montante.

## 4. $Y_{yn}$ – Sem neutro no primário e com neutro no secundário

- Em vazio** – só há corrente no primário, logo é equivalente ao caso 1 (sem neutros)
- Em carga** – Podem passar correntes de tripla frequência no secundário, o mesmo nunca poderá acontecer no primário.

### Funcionamento em regime de cargas desequilibradas:

#### 1. $Y_{NY_n}$ - Com neutro no primário

Considere-se o caso limite em que só tem uma fase carregada figura 3. A passagem de corrente na fase C, provoca uma passagem de corrente na correspondente fase primária, que equilibra os efeitos magnéticos da corrente  $I$ . O pequeno desequilíbrio de tensões é devido apenas à queda na fase carregada não havendo notável desequilíbrio no sistema de tensões.

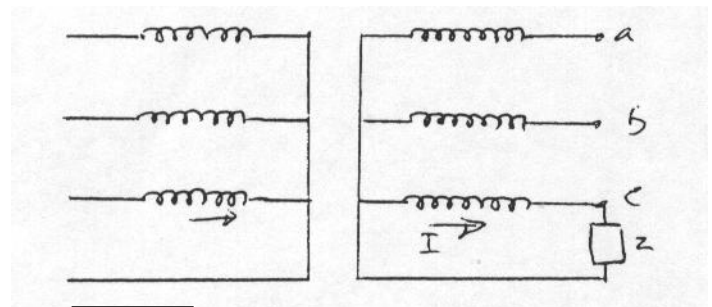


Figura 3

#### 2. $Y_{yn}$ - Sem neutro no primário

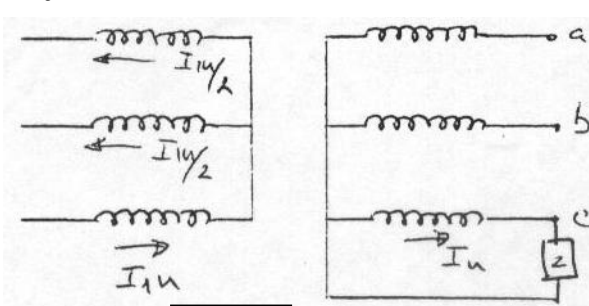


Figura 4

Carregando a fase C com a corrente  $I_n$  (figura 4), circulará na correspondente fase primária uma corrente  $I_{1n}$  que equilibrará a corrente  $I_n$ . A corrente  $I_{1n}$  faz o seu retorno pelas outras duas fases com o valor  $I_{1n}/2$  e os efeitos magnéticos destas correntes não serão equilibrados do lado secundário. Como  $I_{1n}/2$  é um valor muito superior ao da corrente magnetizante, as respectivas f.e.m. simples tomarão um valor superior ao normal (figura 5), com conseqüente

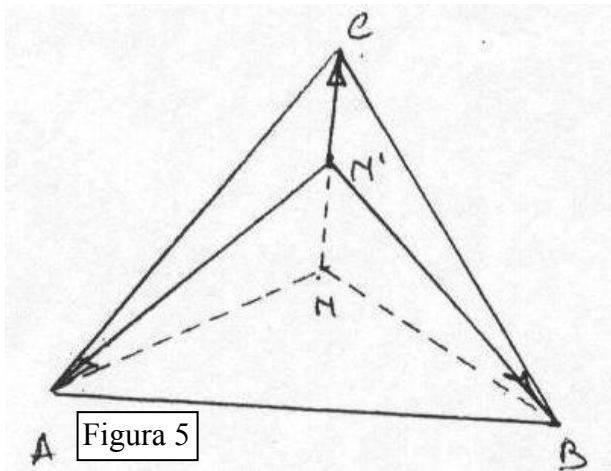


Figura 5

Poderá melhorar-se o comportamento de um transformador  $Yy_n$  (sem neutro no primário) com o emprego de um enrolamento terciário (figura 6).

O enrolamento terciário vai permitir a circulação do harmônico de tripla frequência, necessário para que o fluxo seja sinusoidal. No enrolamento terciário se houver cargas desequilibradas (figura 6), circulará uma corrente em todas as fases que equilibrará os efeitos magnéticos das correntes nas fases do primário.

**Aplicações:** Os transformadores  $Yy$  aplicam-se às saídas de centrais com neutro ligado à terra de um só lado.

diminuição de tensão na fase carregada. Há assim, deste modo, um deslocamento do ponto neutro. Este tipo de ligação só se deverá usar quando não sejam de prever desequilíbrios de carga entre fase e neutro.

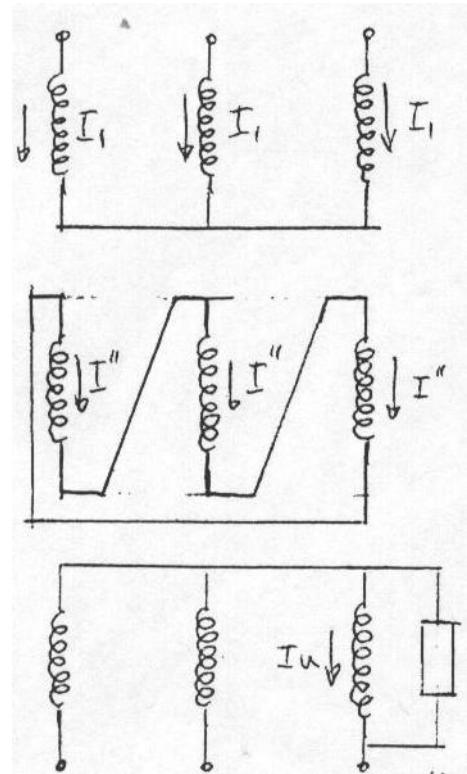


Figura 6

## Ligação Triângulo – Triângulo Dd

### Harmônicos de 3ª frequência:

Como não há neutros, não circularão harmônicos de tripla frequência. No entanto, tanto do lado primário como do lado secundário, na malha fechada que é o triângulo, circulará uma corrente (correntes sinfásicas em enrolamentos em série) que permitirá que o fluxo seja sinusoidal, o que fará com que as f.e.m. também o sejam.

Em carga, o transformador não é afectado pelas correntes de tripla originadas pela carga, pois elas não poderão circular nas linhas do lado do secundário.

### Funcionamento em regime de cargas desequilibradas:

Vamos supor o caso extremo de uma só carga entre duas fases. (figura 7). Aparecerá uma corrente de circulação na malha do triângulo, que provocará o aparecimento de uma corrente do

lado primário com o mesmo valor por fase (setas pequenas). Em cada fase existem em cada enrolamento correntes que equilibram os efeitos magnéticos, não havendo portanto desequilíbrio de tensões.

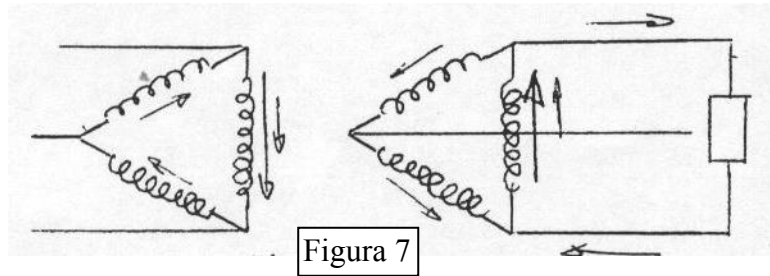


Figura 7

**Aplicações:** Este tipo de ligação é de aplicação reduzida devido a não se dispor de neutro e não permitir portanto a protecção de ligar o neutro à terra. Torna-se por vezes interessante em aplicações de força motriz.

## Ligação Triângulo – Estrela Dy

### Harmónicos de 3ª frequência:

- Em vazio** – Como o primário é em triângulo, existirá o harmónico de tripla frequência na corrente magnetizante e as f.e.m. virão sinusoidais.
- Em Carga** – Se houver neutro secundário circulará corrente de tripla frequência devido à carga. Haverá também corrente no triângulo primário mas as correntes de tripla não passarão para montante, visto não haver neutro.

### Funcionamento em regime de cargas desequilibradas:

Da figura 8 depreende-se que o desequilíbrio é pouco sensível e resultará unicamente das quedas de tensão devidas à passagem de corrente.

**Aplicações:** emprega-se como elevador de tensão nas saídas de centrais, sendo também muito usado como redutor em postos de transformação.

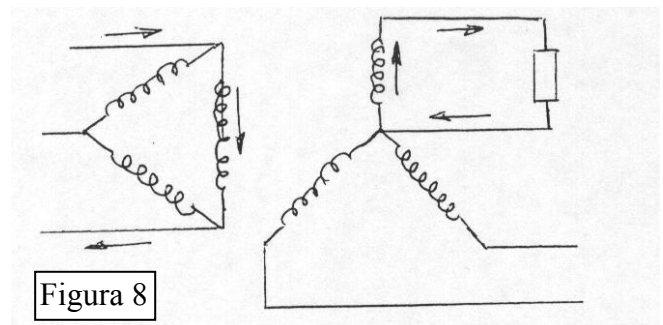


Figura 8

## Ligação Estrela – Triângulo Yd

### Harmónicos de 3ª frequência:

- Em vazio** – Se o primário tiver neutro poderá circular a corrente de tripla frequência, o fluxo será sinusoidal e também o serão as f.e.m. e as tensões. Convém não esquecer que a circulação do harmónico de tripla, nas linhas de alimentação poderá provocar interferências telefónicas e telegráficas. Se não existir neutro no primário, em

princípio o fluxo conterá um termo de tripla frequência, bem como as f.e.m. induzidas nos enrolamentos secundários. Nestas porém, os terceiro harmônicos das f.e.m. estão em fase nos três enrolamentos e circulará na malha do triângulo uma corrente de tripla frequência que pelos seus efeitos fará com que o fluxo seja sinusoidal. Tudo se passa como se a componente de tripla frequência necessária à corrente magnetizante, para que seja sinusoidal o fluxo no núcleo, circule do lado secundário.

- b) Em Carga** – Como não há neutro, os harmônicos de tripla originados na carga não passam para montante.

### Funcionamento em regime de cargas desequilibradas:

Na figura 9 representa-se o caso limite de carga unicamente entre duas fases. Verifica-se que em cada enrolamento circularão correntes que equilibrarão os efeitos magnéticos das correntes nos enrolamentos correspondentes. Não há excesso de magnetização, portanto existirá apenas uma pequena assimetria provocada pelas quedas de tensão.

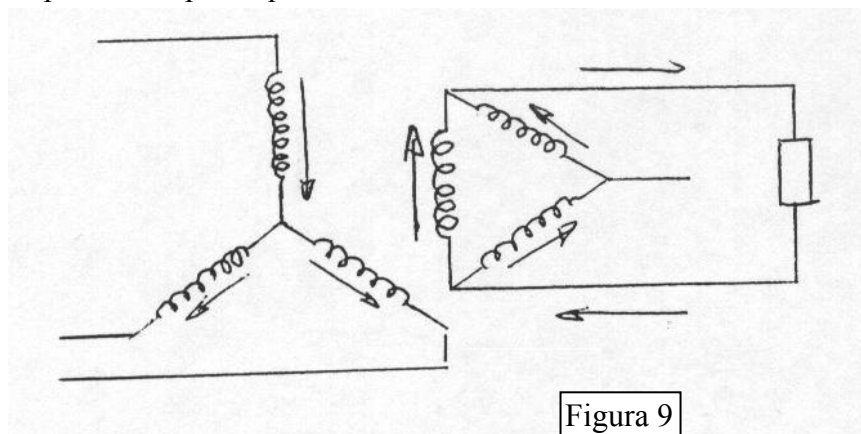


Figura 9

**Aplicações:** É o tipo de transformador indicado para reduzir a tensão no fim das linhas de distribuição de energia que não precisam de neutro secundário.

## Ligação Estrela – Zig-Zag Yz

### Harmônicos de 3ª frequência:

- a) Em vazio** – Nestes transformadores não existe neutro primário (a fim de evitar a circulação do harmônico de tripla nas linhas de alimentação). Assim o fluxo conterá um termo de tripla frequência e as f.e.m. nos enrolamentos parcelares conterão um termo de tripla. Como a f.e.m. por fase se obtém por diferença de duas f.e.m., em enrolamentos parcelares, ela será sinusoidal.
- b) Em Carga** – Se a carga der origem a um harmônico de tripla frequência, como as correntes de tripla são síncricas, e percorrem os enrolamentos de uma mesma fase em sentidos opostos, é evidente que o fluxo de tripla frequência resultante em cada coluna é nulo.

### Funcionamento em regime de cargas desequilibradas:

Considere-se o caso limite de uma carga entre fase e neutro (figura 10), como na representação os enrolamentos paralelos são os que estão na mesma coluna e, como a passagem de corrente num enrolamento secundário obriga à passagem de correspondente corrente no enrolamento primário

da coluna a que aquele pertence, conclui-se da análise da figura que o desequilíbrio de cargas não produz senão um pequeno desequilíbrio de tensões.

**Aplicações:** Como transformador redutor nos postos de transformação onde o neutro secundário é imprescindível e para potências até 100kVA.

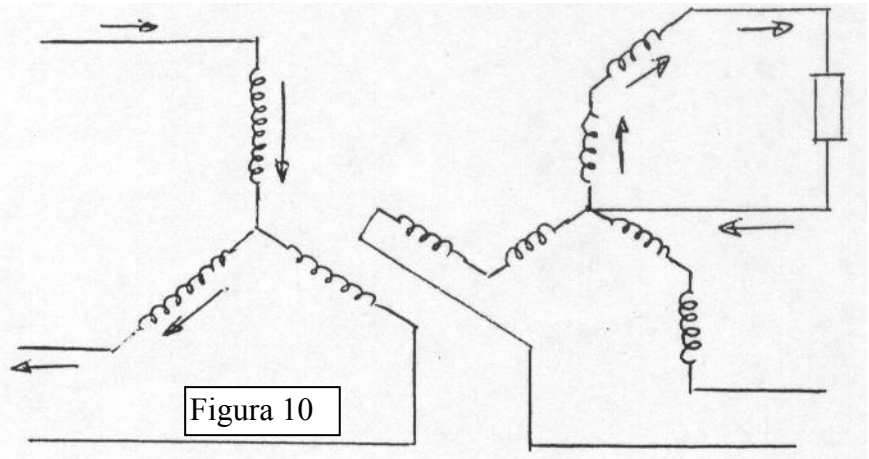


Figura 10

### Ligação Triângulo – Zig-Zag Dz

#### Harmônicos de 3ª frequência:

- a) **Em vazio** – As correntes de tripla circulam na malha do triângulo e as f.e.m. induzidas no secundário, mesmo nos enrolamentos parcelares são sinusoidais.
- b) **Em carga** – O transformador comporta-se exactamente como no tipo anterior.

#### Funcionamento em regime de cargas desequilibradas:

Da análise da figura 11, conclui-se que o desequilíbrio de tensões (simples) que possa haver é unicamente devido às quedas nos enrolamentos.

**Aplicações:** Esta ligação tem emprego muito reduzido. Será indicada para transformações redutoras onde sejam de prever grandes desequilíbrios de carga.

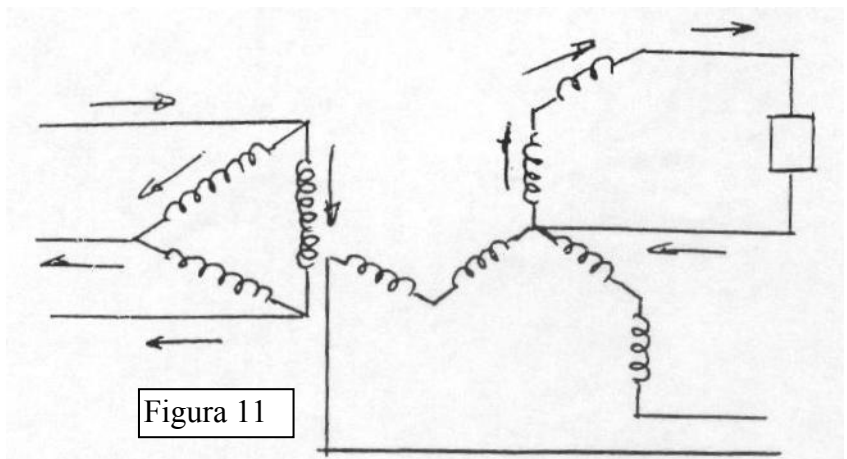


Figura 11