

PEA-3406

LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

**EXPERIÊNCIA: HARMÔNICAS EM
TRANSFORMADORES**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

2017

HARMÔNICAS NOS TRANSFORMADORES

1 - OBJETIVO: Estudo das harmônicas de tensão e da corrente de excitação que aparecem nos diversos modos de ligação de 1 banco de 3 transformadores monofásicos.

2 - INTRODUÇÃO: Dada uma forma de onda periódica qualquer, podemos decompô-la numa somatória de senóides de frequência 1, 2, 3, etc. vezes a da fundamental.

No caso de circuitos magnéticos, as formas de onda de tensão e corrente terão integral nula num período e portanto não teremos as harmônicas de ordem par.

Logo as tensões trifásicas podem ser decompostas em:

$$V_A = V_{A1} \cos wt + V_{A3} \cos 3wt + V_{A5} \cos 5wt$$

$$V_B = V_{B1} \cos (wt - 120^\circ) + V_{B3} \cos 3 (wt - 120^\circ) + V_{B5} \cos 5 (wt - 120^\circ)$$

$$V_C = V_{C1} \cos (wt + 120^\circ) + V_{C3} \cos 3 (wt + 120^\circ) + V_{C5} \cos 5 (wt + 120^\circ)$$

2.1 - FUNDAMENTAL: no caso estamos considerando as fundamentais com seqüência positiva.

2.2 - TERCEIRA HARMÔNICA:

$$V_{A3} \cos 3wt = V_{A3} \cos 3wt$$

$$V_{B3} \cos 3 (wt - 120^\circ) = V_{B3} \cos 3wt$$

$$V_{C3} \cos 3 (wt + 120^\circ) = V_{C3} \cos 3wt$$

Isto é, a terceira harmônica comporta-se como uma tensão de seqüência zero

2.3 - QUINTA HARMÔNICA:

$$V_{A5} \cos 5wt = V_{A5} \cos 5wt = V_{A5} \cos 5wt$$

$$V_{B5} \cos 5 (wt - 120^\circ) = V_{B5} \cos (5wt - 600^\circ) = V_{B5} \cos (5wt - 240^\circ)$$

$$V_{C5} \cos 5 (wt + 120^\circ) = V_{C5} \cos (5*wt + 600^\circ) = V_{C5} \cos (5wt + 240^\circ)$$

Logo, a Quinta harmônica comporta-se como uma tensão de seqüência negativa

2.4 - HARMÔNICA QUALQUER:

Para as demais harmônicas, com raciocínio análogo, veremos que:

1	4	7	10	13	16	→ seqüência positiva
2	5	8	11	14	17	→ seqüência negativa
3	6	9	12	15	18	→ seqüência zero

3 - TRANSFORMADOR MONOFÁSICO:

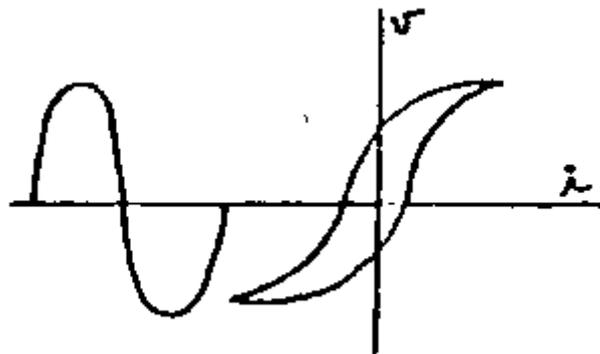
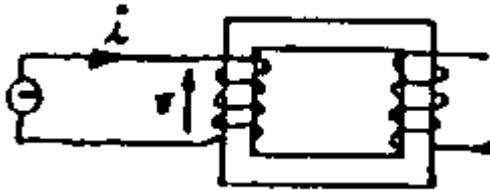


fig. 1

Aplicando tensão senoidal, a corrente será não senoidal devido ao ciclo de histerese ($B \times H$) não linear, figs 1 e 2.

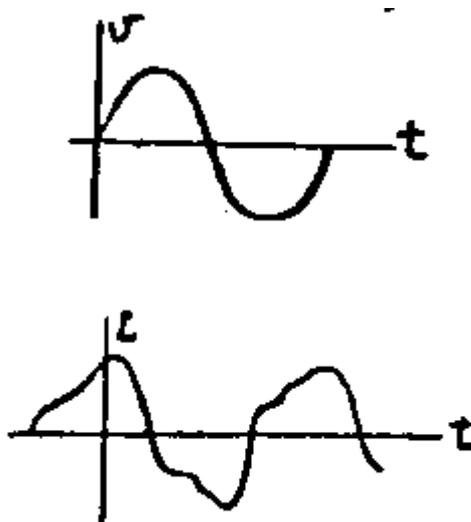


fig. 2

Isto é, a corrente terá uma fundamental mais harmônicas de ordem ímpar, no caso da figura predominando a 3ª e 5ª harmônicas.

Ao contrário, se aplicarmos corrente senoidal, teremos tensão não senoidal.

Aplicando tensão não senoidal teremos corrente não senoidal, e existe apenas uma forma de onda não senoidal que gera corrente senoidal).

3.1 - CARGA: CORRENTE NO SECUNDÁRIO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Uma vez magnetizado o transformador por meio de uma tensão senoidal no primário, temos tensão senoidal induzida, tanto no primário como no secundário.

Ligando uma carga de característica linear no secundário a corrente que circulará será senoidal, porque a tensão é senoidal.

A corrente do secundário provoca um fluxo de reação no circuito magnético, que deve ser cancelado, a cada instante, por uma corrente de reação refletida no primário, de modo a manter o fluxo magnético resultante no núcleo com o mesmo valor e a mesma característica senoidal que em vazio. Disto resulta uma corrente senoidal refletida no primário pela corrente senoidal do secundário.

Portanto uma carga linear impõe corrente de carga senoidal, tanto no secundário como no primário, independentemente da corrente de magnetização, não linear, que continua como componente de menor amplitude da corrente primária total.

4 - TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Para os trifásicos, a análise é mais complicada e o estudo deve ser feito primeiramente no laboratório para todos os modos possíveis de ligação: YY, $\Delta\Delta$, Y Δ , Δ Y.

4.1 - PRIMÁRIO EM Δ

Aplicando tensão de linha senoidal, a tensão aplicada será senoidal e portanto a corrente em cada monofásico (corrente de fase) será não senoidal.

A corrente terá a fundamental mais as harmônicas de 3ª, 5ª, ... ordem.

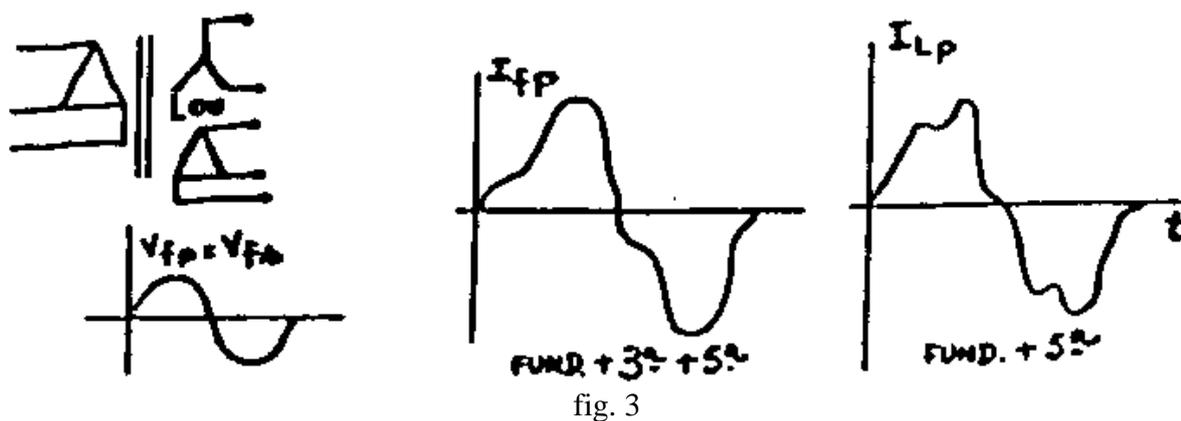
As terceiras harmônicas por estarem em fase, ficarão circulando apenas no triângulo. Não há terceira harmônica na corrente de linha.

A quinta harmônica, se houver, circulará tanto na fase quanto na linha, porque é de seqüência negativa.

Note que a superposição da 5ª harmônica com a fundamental na fase é diferente da superposição na linha, porque a fundamental sendo de seqüência +, a corrente de linha da fundamental está atrasada de 30° em relação à corrente de fase, e a corrente de linha da 5ª harmônica está adiantada de 30° em relação à de fase, por ser de seqüência negativa.

Em resumo (primário em Δ):

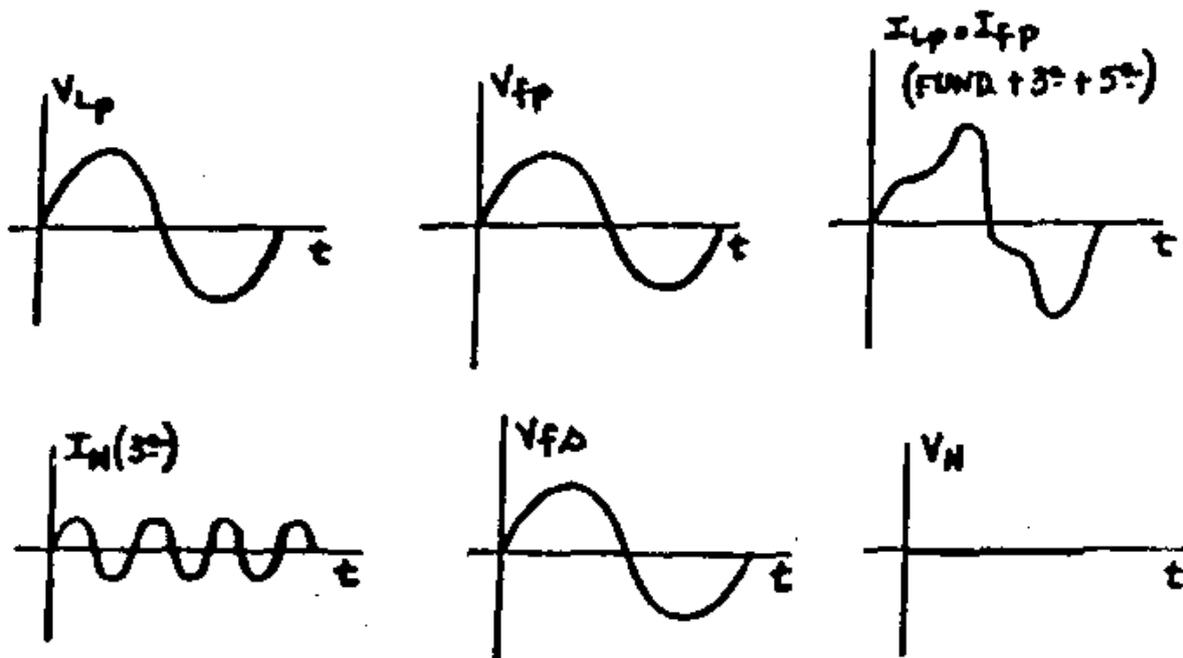
- Tensão senoidal implica em corrente não senoidal, em cada monofásico;
- A 3ª harmônica da corrente circula no triângulo e não passa para a linha;
- A 5ª harmônica, se houver, passa para a linha por ser de seqüência negativa;
- O fluxo fica senoidal induzindo tensões senóidais no secundário.



4.2 - PRIMÁRIO EM Y

As formas de onda de tensão e corrente de magnetização para as diversas ligações, são as seguintes:

4.2.1 -



4.2.2 - 

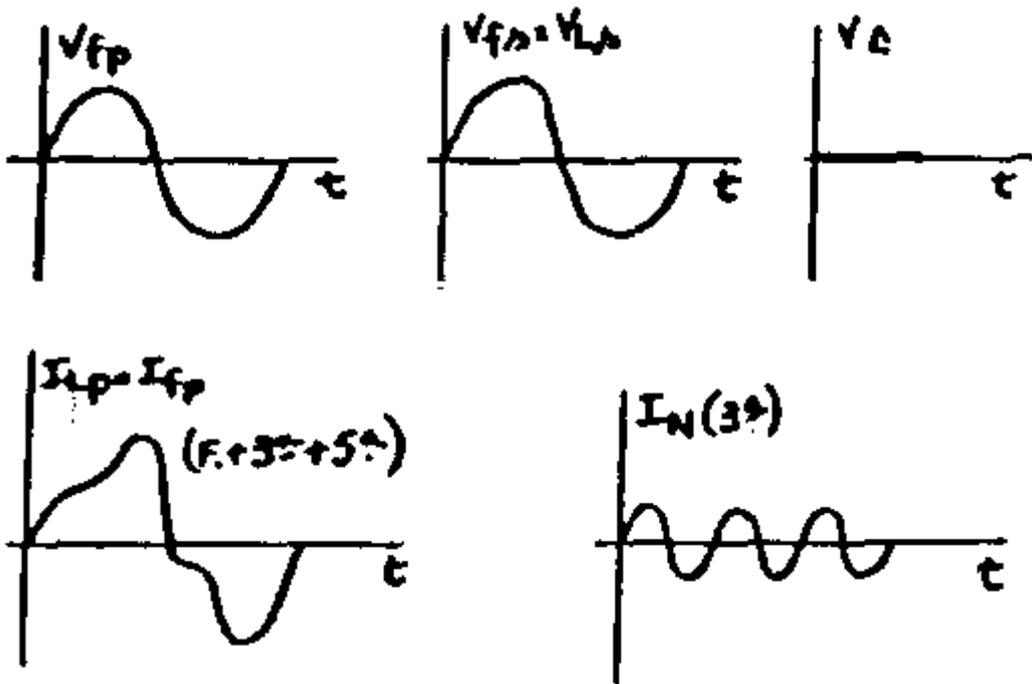


Fig. 5

4.2.3 - 

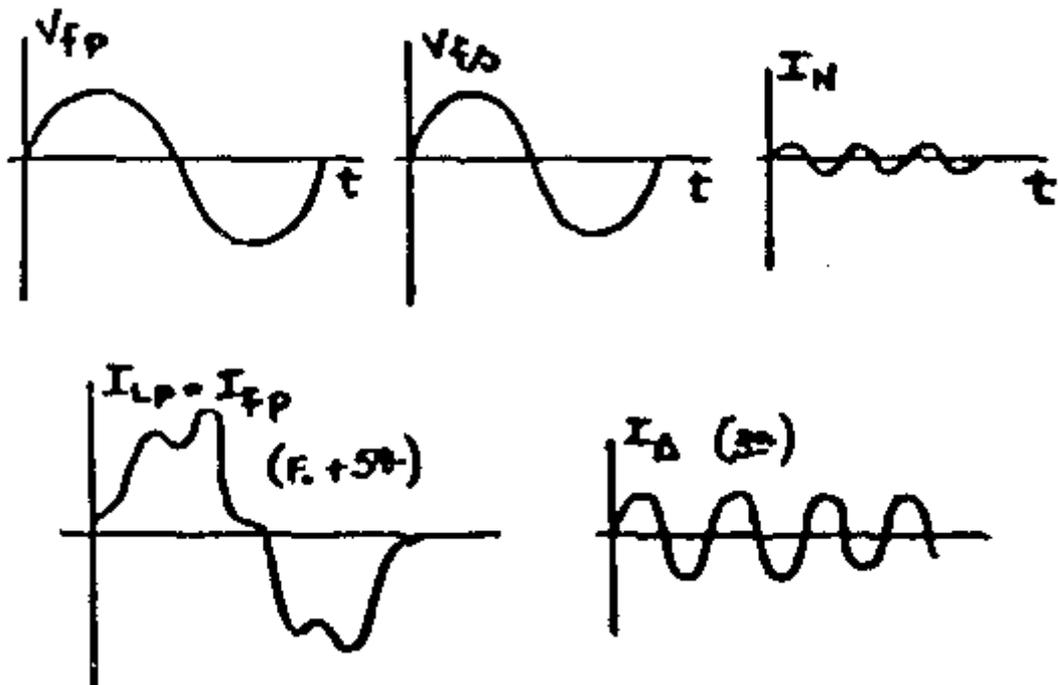


Fig. 6

4.2.4 - 

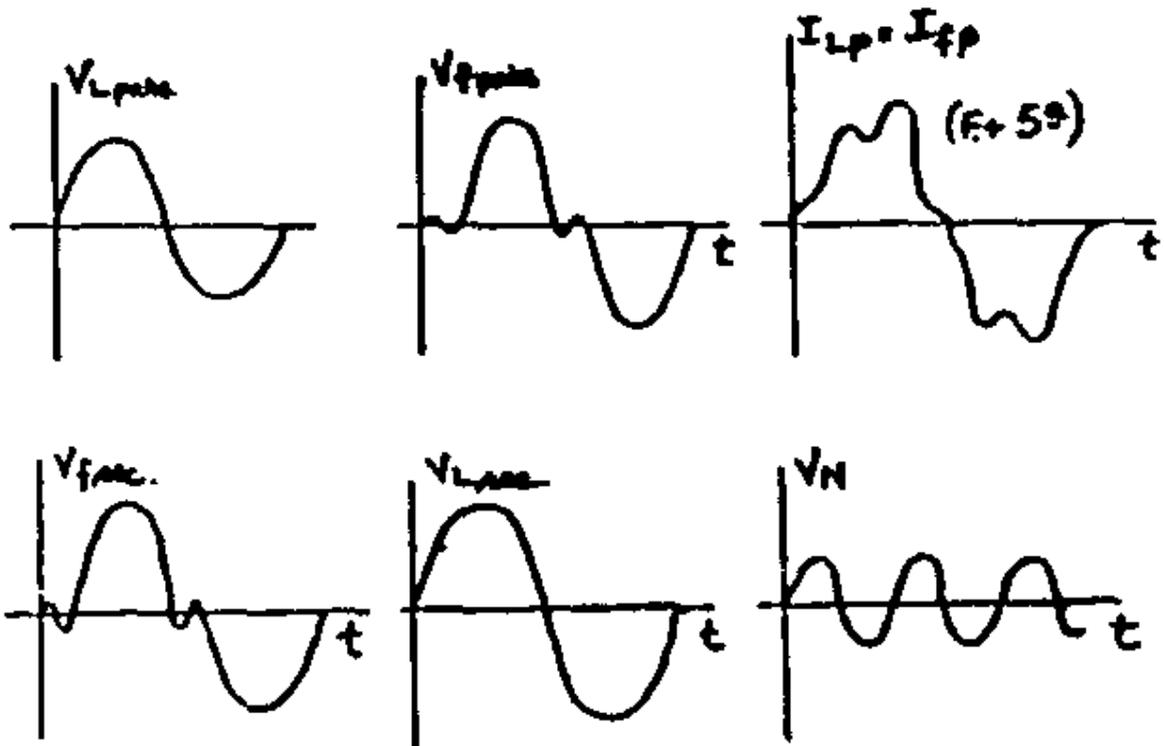


Fig. 7

4.2.5 - 

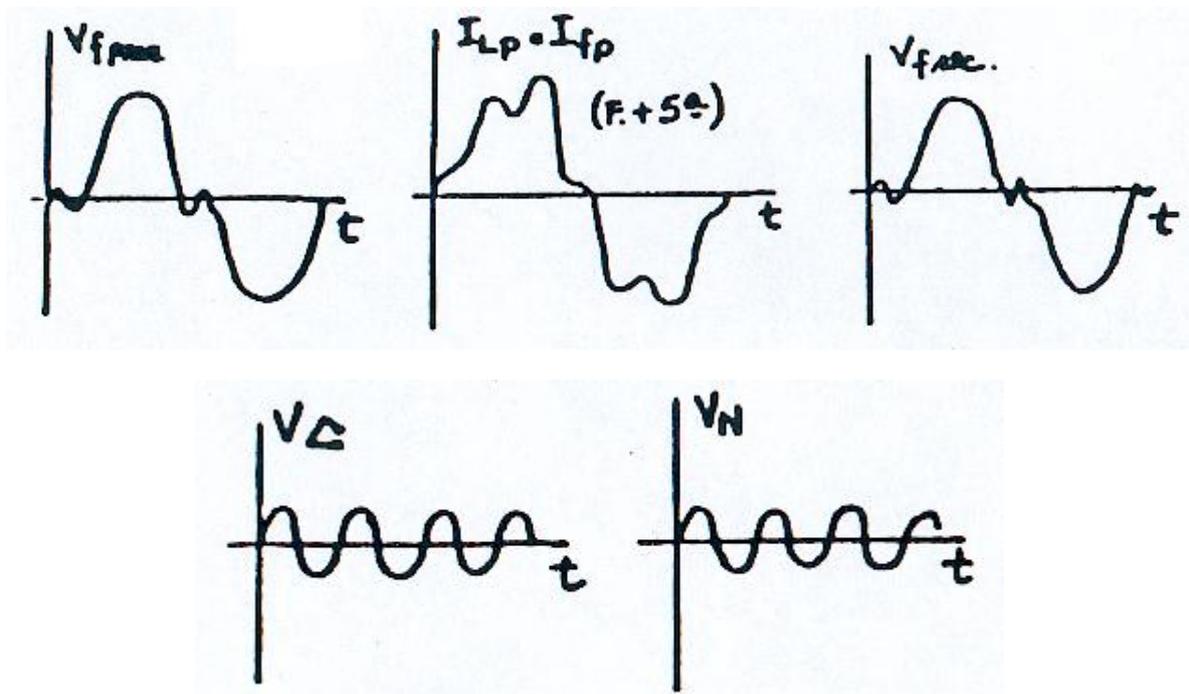


Fig. 8

4.2.6 - $Y \Delta$

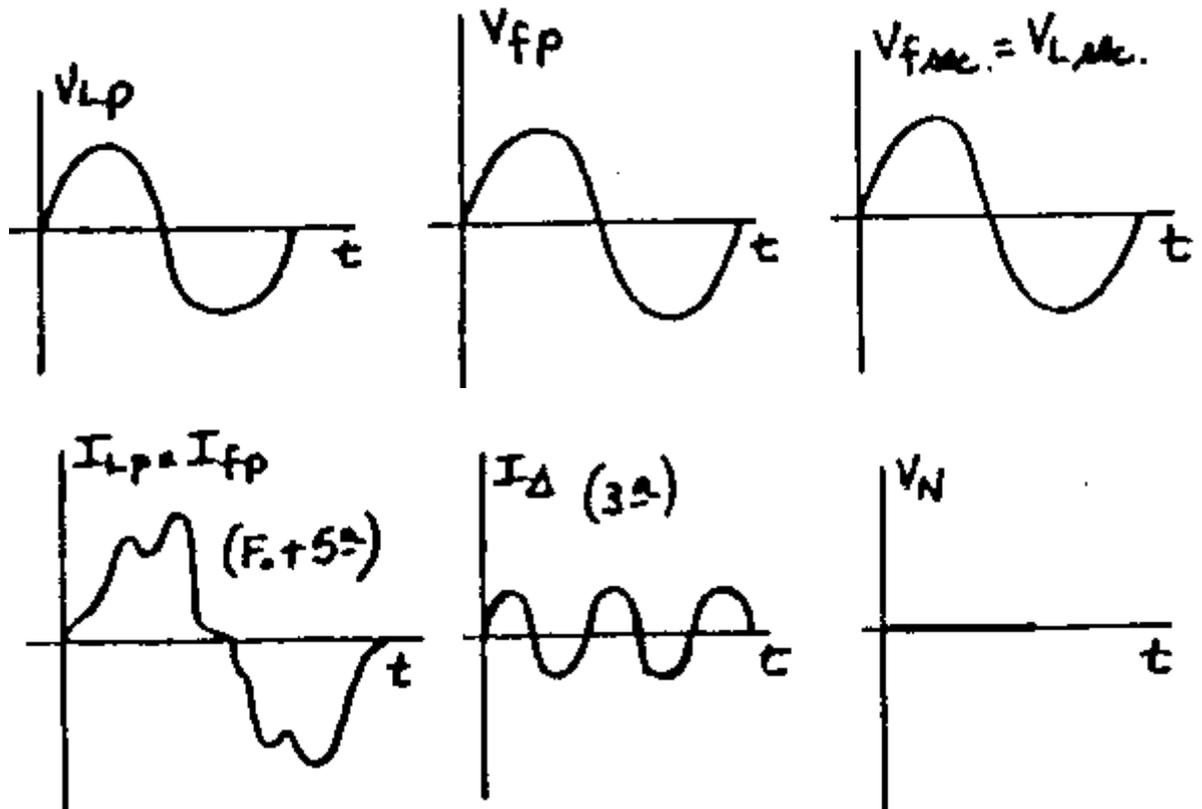


Fig. 9

4.2.7 - $Y_{\square} \Delta Y$

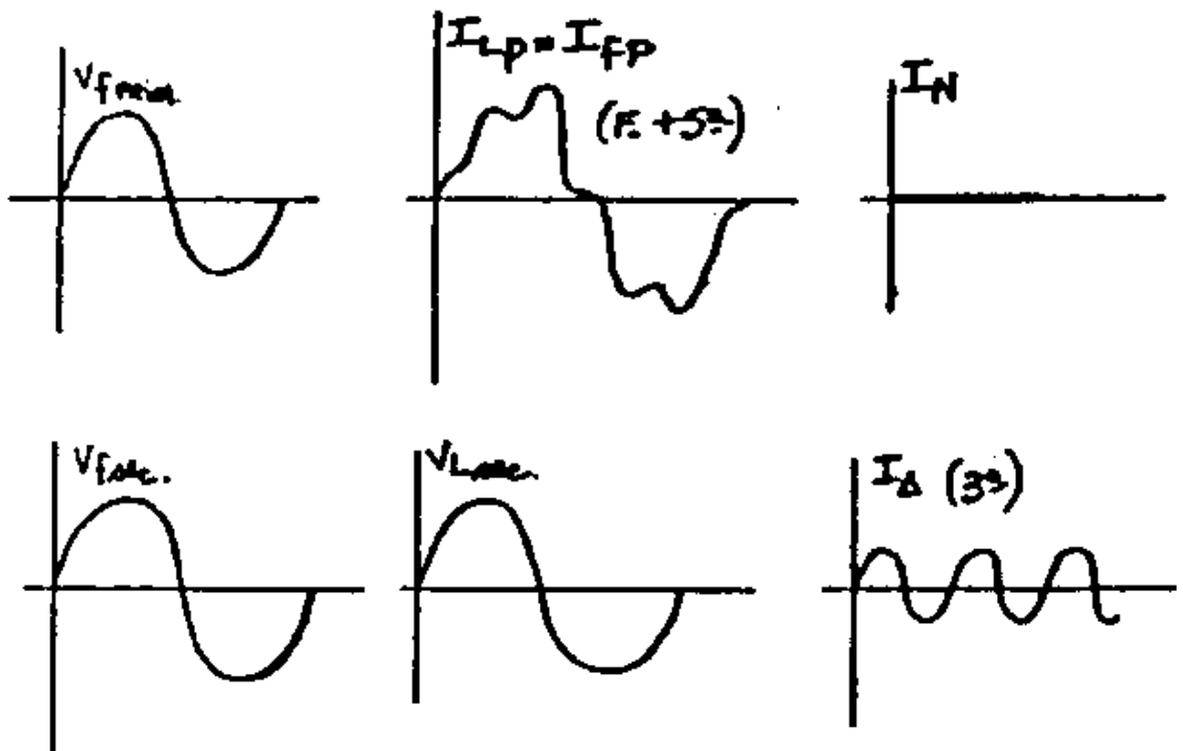


Fig. 10

4.2.8 - 

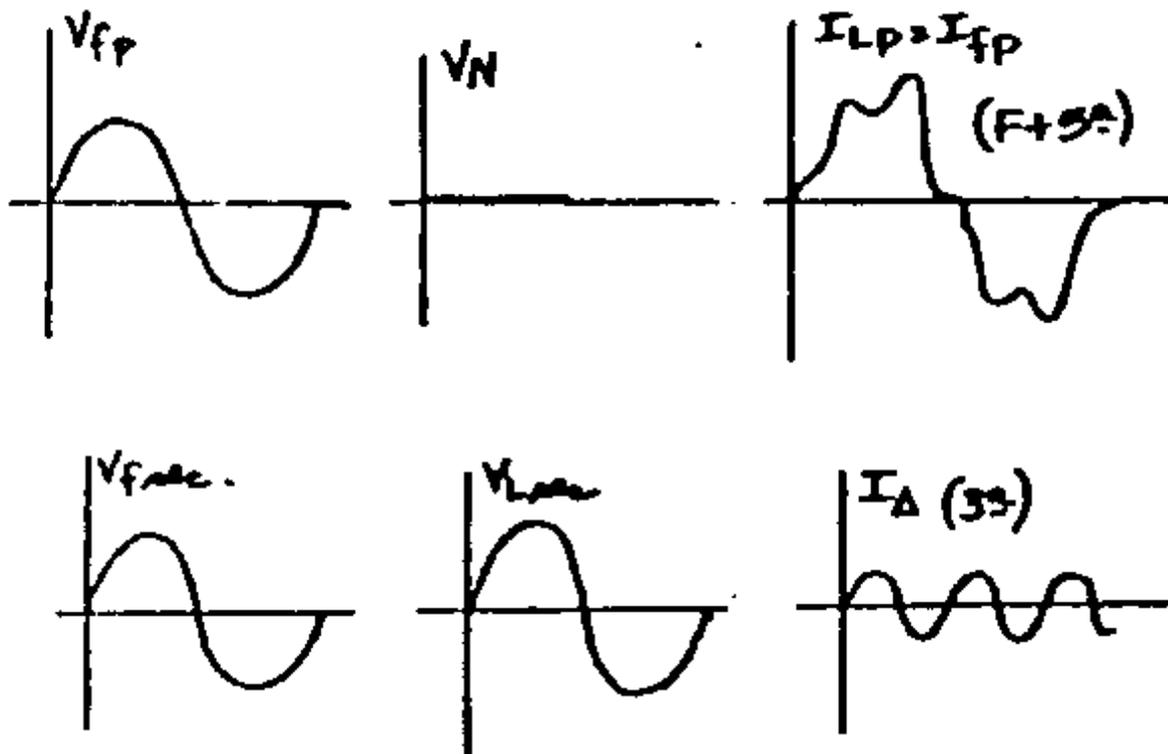


Fig. 11

4.3 - CONCLUSÃO:

No circuito magnético do transformador trifásico vale o seguinte:

-uma tensão senoidal impõe fluxo senoidal que, devido ao ciclo de histerese, impõe corrente não senoidal;

-a corrente não senoidal pode ser aproximada, em geral, pela fundamental mais a 3ª harmônica mais a 5ª harmônica;

-cada componente da corrente contribui com uma parte do fluxo. O resultado é um fluxo senoidal;

-faltando alguma das 3 componentes de corrente (em geral a 3ª harmônica), o fluxo deixa de ser senoidal; logo a tensão também deixa de ser senoidal;

4.3.1 - APLICACÃO ao CASO DE TRANSFORMADORES:

-a tensão de linha é sempre senoidal, pois é imposta pelo gerador;

-a tensão de fase é senoidal em todos os casos (só não o é no caso YY);

-o fluxo, portanto, é senoidal em todos os casos, menos no YY;

-logo temos corrente composta pela fundamental mais 3ª harmônica, mais 5ª harmônica circulando em um ou mais enrolamentos (no YY não há 3ª harmônica);

-na linha circula sempre a fundamental mais 5ª harmônica. No caso Υ/Δ pode circular também a 3ª harmônica.

-quando houver um Δ , a 3ª harmônica circula e produz a parte do fluxo necessária para que ele seja senoidal, logo não há necessidade de 3ª harmônica de corrente na fase do primário mesmo no caso Υ/Δ .

-a única ligação que deforma a tensão é a YY porque, para termos tensão senoidal, precisamos de fluxo senoidal, isto implica em corrente fundamental, 3ª harmônica mais 5ª harmônica. A fundamental e a 5ª harmônica são fornecidas pela fonte. A 3ª harmônica não pode circular, pois não está aterrado. Também não existe nenhum Δ , logo o fluxo não é senoidal e portanto a tensão é não senoidal tanto no primário como no secundário.

Para a ligação Y Δ apesar da fonte fornecer apenas a F + 5ª harmônica, a 3ª harmônica circula no Δ . Portanto o fluxo é senoidal e a tensão de fase no primário é senoidal.

A ligação $\Upsilon/\Delta/\Upsilon$ consome F + 3ª harmônica + 5ª harmônica da fonte.

Para eliminar a 3ª harmônica da linha (muita interferência em comunicações), basta adicionar um terceiro enrolamento ligado em Δ . Assim a parte do fluxo devida à componente de 3ª harmônica será imposta pela corrente de 3ª harmônica que circula no Δ e deixará de vir da fonte. Fica eliminada a 3ª harmônica da linha.

COMPLEMENTO

C1) Ao alimentar um banco de 3 monofásicos ligado com o primário em estrela aterrada e o secundário em delta aberto, observa-se corrente de 3ª harmônica (I_o) circulando pelo neutro aterrado.

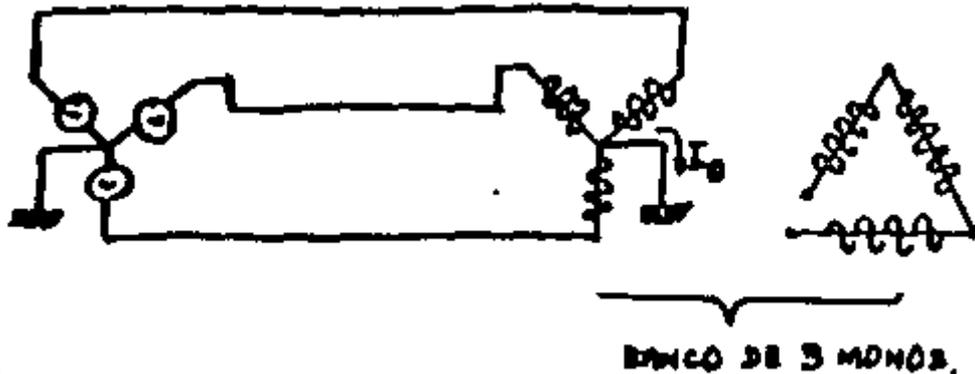


Fig. 12

Ao fechar o “delta” aberto, observa-se componente de corrente de 3ª harmônica circulando no Δ , porém não há o desaparecimento total da corrente I_o que circulava pelo neutro aterrado.

Isso é esperado, uma vez que ao se fechar o Δ oferecemos 2 caminhos para a passagem da corrente de 3ª harmônica (o neutro aterrado e o Δ). Assim essa corrente se distribuirá pelos dois caminhos de acordo com a impedância oferecida por eles à passagem dessa corrente de 3ª harmônica.

O que se procura fazer na prática é tornar o caminho Δ o melhor possível, evitando a circulação pelo neutro, uma vez que essa corrente pelo neutro vem pela linha, causando a interferência em telefonia. Em geral essa corrente de 3ª harmônica pela linha, sendo limitada a 40% da fundamental, não causa o problema citado.

C2) Ao observar a forma de onda da tensão (V_{xy}) da fig.13 no delta aberto, pode aparecer, além da componente de 3ª harmônica, componente fundamental de tensão. Isso se deve a desequilíbrios nas tensões induzidas V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} não dando mais soma igual a zero. Esse desequilíbrio pode ser da própria Light ou, o mais provável, os 3 trafos monofásicos não apresentam a mesma relação de transformação.



Fig. 13

- C3) A 3ª harmônica é da ordem de 40% da fundamental.
A 5ª harmônica é da ordem de 10% da fundamental.

Harmônicas de ordem superior podem ser desprezadas.

C4) A 3ª harmônica e as múltiplas da mesma têm um “comportamento” de seqüência zero mas não enxergam a mesma impedância de seqüência zero da fundamental devido ao problema da freqüência ($X = 2\pi f \cdot L$).

C5) Valores eficazes das correntes quando se introduzem as harmônicas no estudo:

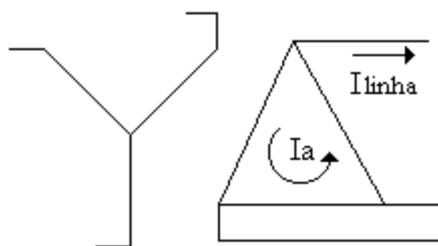


Fig. 14

- I_1 = componente fundamental
 I_3 = componente 3ª harmônica
 I_5 = componente 5ª harmônica

$$I_{\Delta} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

$$I_{LINHA} = \sqrt{3} \sqrt{I_1^2 + 0 \cdot I_3^2 + \dots}$$

$$I_9 = 0 = I_{15} = \dots$$

Se as harmônicas múltiplas de 3 são desprezadas temos:

$$I_{LINHA} = \sqrt{3} * \sqrt{I_{\Delta}^2 - I_3^2}$$

$$I_{LINHA} = \sqrt{3} * \sqrt{I_{\Delta}^2 - (0,415 * I_{\Delta})^2} = I_{\Delta} * \sqrt{3} * \sqrt{1 - 0,415^2}$$

$$I_{LINHA} = 0,91 * \sqrt{3} * I_{\Delta}$$

Assim a relação entre corrente de linha e corrente de fase se torna menor que $\sqrt{3}$.

C6) Ao ligar o banco em $Y\Delta$, medir a tensão antes de fechar o Δ .

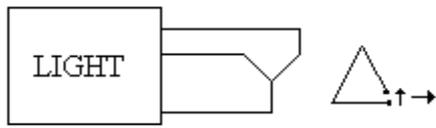


Fig. 15

Pode dar uma tensão da ordem de 80V. No entanto ao fechar o Δ , a corrente de circulação não é muito intensa. Isso se deve ao fato da impedância oferecida pela 3^a harmônica ser elevada o que implica numa limitação

PEA-2406 : LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

ROTEIRO EXPERIMENTAL

HARMÔNICAS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Objetivo: O aluno deverá observar as formas de onda de correntes e tensões em diversas ligações de um banco de transformadores monofásicos e de um transformador trifásico utilizando dois e três enrolamentos. O aluno deverá ser capaz de analisar a composição harmônica das formas de onda obtidas e justificar as causas do aparecimento destas.

Procedimento Experimental:

1) BANCO TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Serão utilizados transformadores monofásicos de dois enrolamentos, sendo um de 127 e outro de 127 ou 220 V.

Para realizar estas medições utilizaremos o medidor FLUKE-41, que permite a visualização das formas de onda de corrente, tensão e potência no tempo e também permite a visualização da análise harmônica de cada forma de onda observada.

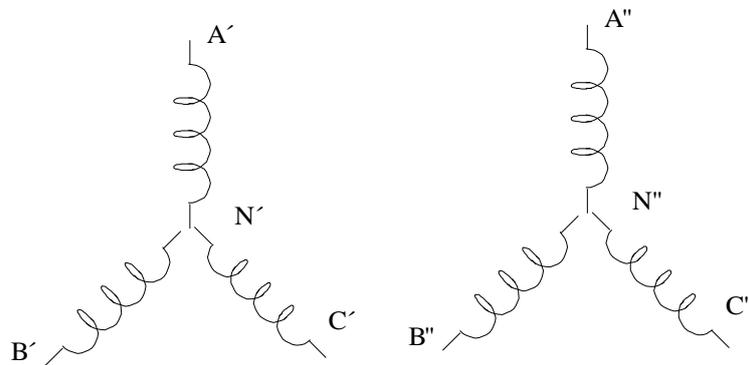
Através de uma conexão com um micro e utilizando um software da Fluke, podemos visualizar os resultados obtidos pelo medidor na tela do micro. Estes resultados podem ser impressos ou salvos no Word ou Excel (vetor de dados), para tratamento posterior.

Nós optaremos por salvá-los em arquivos (disquete) para que o aluno possa gerar o relatório da experiência em casa. Para tanto a nomenclatura para dar nomes aos arquivos é extremamente importante, para poder diferenciar as grandezas e as montagens.

Devem ser medidas as formas de onda e os valôres das principais componentes harmônicas (fundamental, 3^a e 5^a) das tensões e correntes, sempre com o secundário em vazio, das seguintes montagens:

1.1) DOIS ENROLAMENTOS

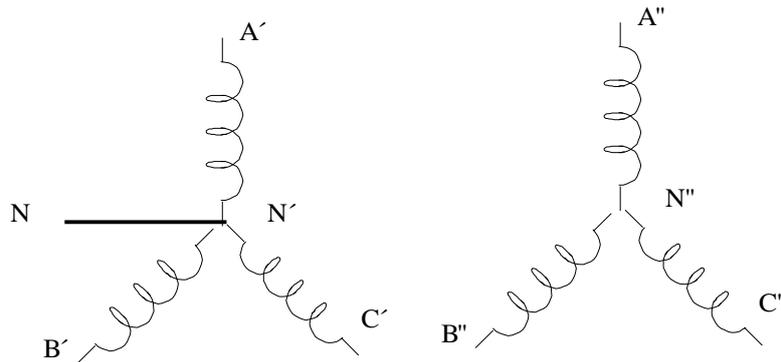
a) ligação Y / Y



Variável	Fundamental	3 ^a Harmônica	5 ^a harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
VNN'			
VNN''			
VN'N''			
VA''N''			
VB''N''			
VC''N''			

Comentários:

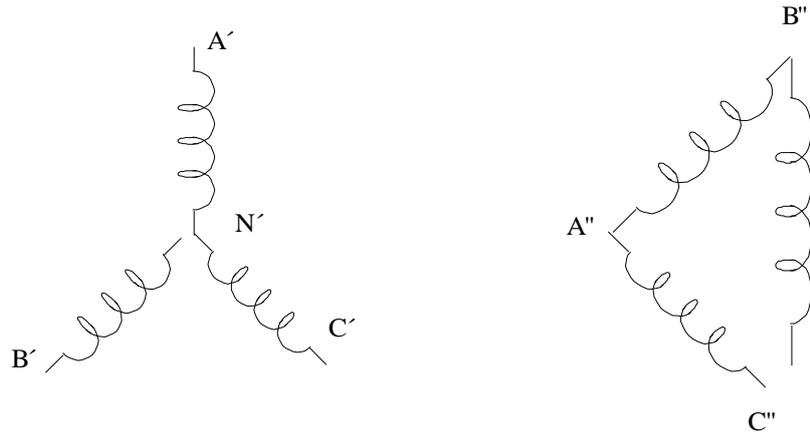
b) ligação Y aterrado / Y



Variável	Fundamental	3ª Harmônica	5ª harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
INN'			
VNN''			
VA''N''			
VB''N''			
VC''N''			

Comentários:

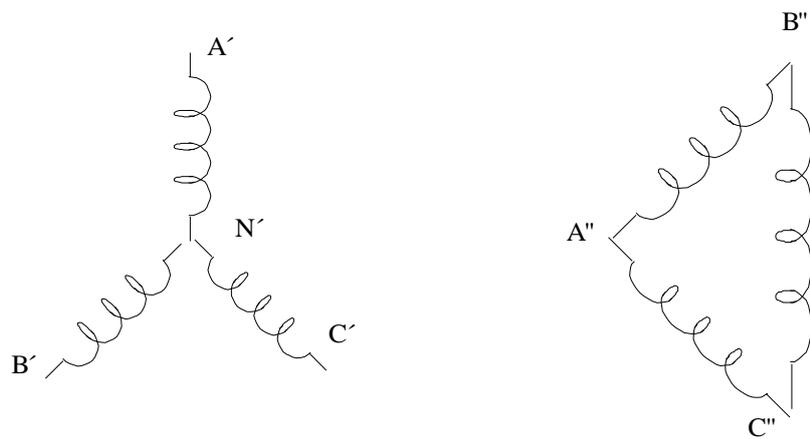
c) ligação Y / Δ aberto



Variável	Fundamental	3 ^a Harmônica	5 ^a harmônica
IA			
IB			
IC			
VA N'			
VB N'			
VC N'			
VNN'			
Vdelta aberto			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			

Comentários:

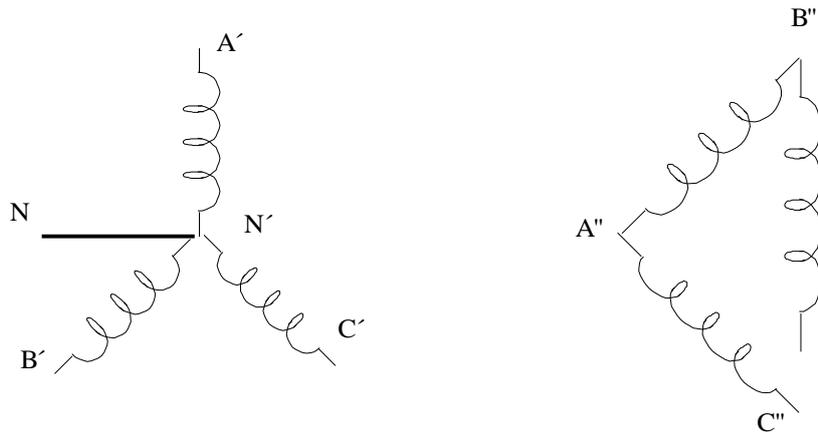
d) ligação Y / Δ fechado



Variável	Fundamental	3 ^a Harmônica	5 ^a harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
VNN'			
I delta			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			

Comentários:

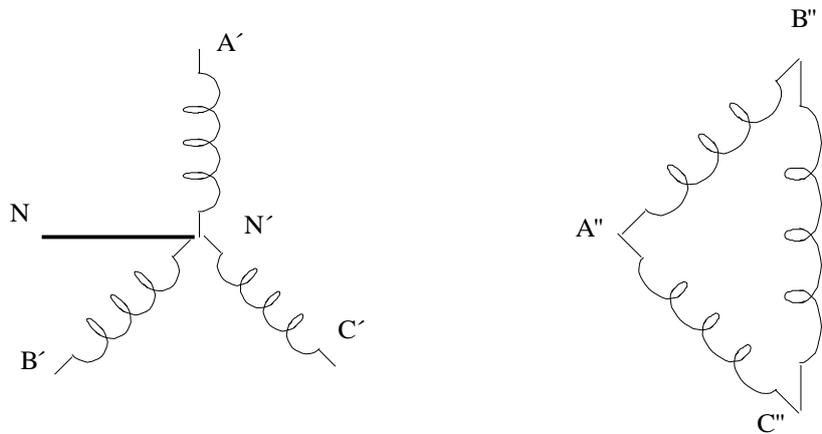
e) ligação Y aterrado / Δ aberto



Variável	Fundamental	3 ^a Harmônica	5 ^a harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
INN'			
V delta aberto			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			

Comentários:

f) ligação Y aterrado / Δ fechado



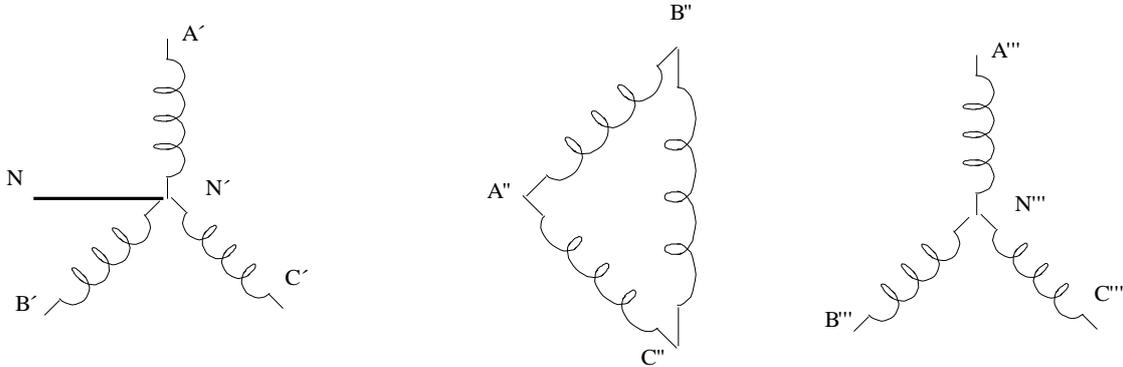
Variável	Fundamental	3 ^a Harmônica	5 ^a harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
INN'			
I delta			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			

Comentários:

1.2) TRÊS ENROLAMENTOS

Aproveitando agora a existência de três enrolamentos de 127 V, podemos utilizar uma montagem com três enrolamentos. Utilizando os mesmos procedimentos das medidas anteriores, devem ser medidas as formas de onda e os valores das principais harmônicas (1^a, 3^a e 5^a) das variáveis das seguintes montagens:

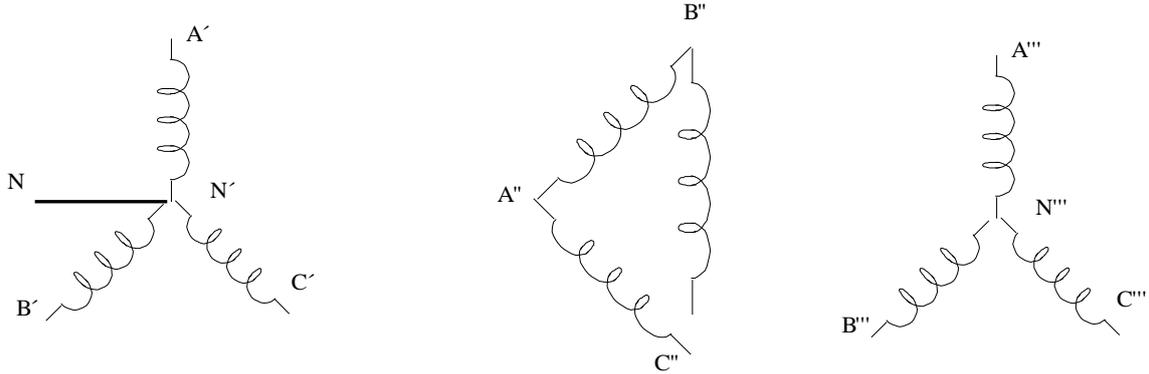
a) Y aterrado / Δ fechado / Y



Variável	Fundamental	3 ^a Harmônica	5 ^a harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
INN'			
I delta			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			
VA'''N'''			
VB'''N'''			
VC'''N'''			
VNN'''			

Comentários:

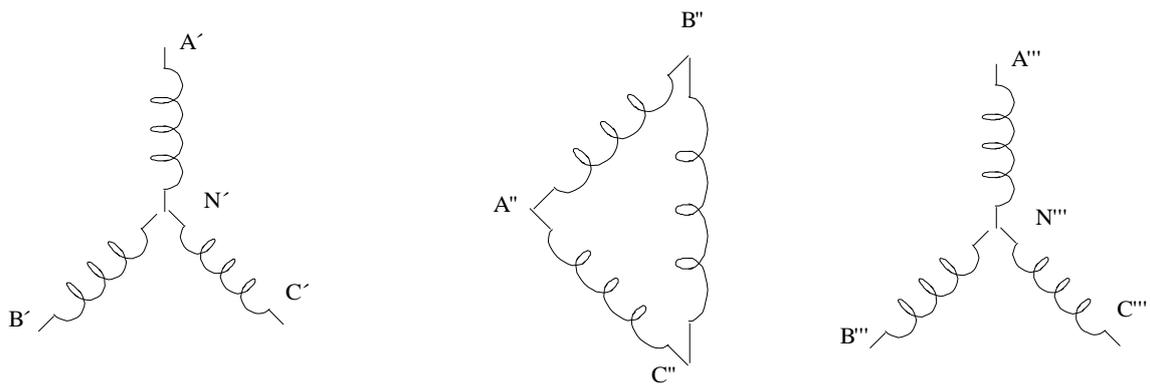
b) Y aterrado / Δ aberto / Y



Variável	Fundamental	3ª Harmônica	5ª harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
INN'			
V delta aberto			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			
VA'''N'''			
VB'''N'''			
VC'''N'''			
VNN'''			

Comentários:

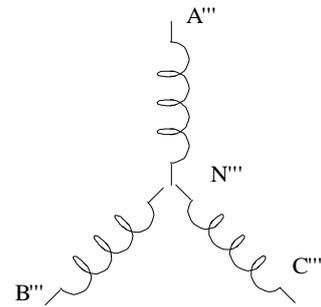
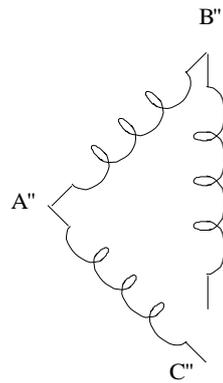
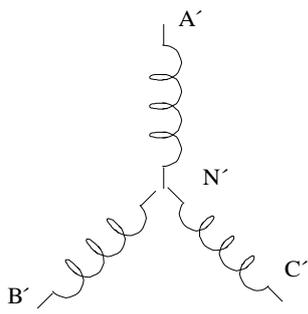
c) Y / Δ fechado / Y



Variável	Fundamental	3ª Harmônica	5ª harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
VNN'			
I delta			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			
VA'''N'''			
VB'''N'''			
VC'''N'''			
VN'N'''			
VNN'''			

Comentários:

d) Y / Δ aberto / Y



Variável	Fundamental	3 ^a Harmônica	5 ^a harmônica
IA			
IB			
IC			
VA'N'			
VB'N'			
VC'N'			
VNN'			
V delta aberto			
VA''B''			
VB''C''			
VC''A''			
VA'''N'''			
VB'''N'''			
VC'''N'''			
VN'N'''			
VNN'''			

Comentários:

Relatório

No relatório deverão constar as formas de onda , a análise espectral e análise e justificativa do aparecimento ou não de determinadas harmônicas nas variáveis de cada montagem.