

"OS TERCEIROS HARMÔNICOS NOS TRANSFORMADORES (Y) E (Δ)"

Eng.^o Antonio
Sérgio Soares Frota —
Professor da
Disciplina
"Máquinas Elétricas"
da UNIFOR e
Engenheiro Consultor
do NUTEC.

O objetivo deste trabalho é levar ao conhecimento dos Engenheiros, de maneira sucinta mas objetiva, o problema dos terceiros harmônicos.

A teoria será fundamentada somente nos terceiros harmônicos e seus múltiplos ímpares.

1. Harmônicos na Geração

No projeto de um alternador é importante que a distribuição do fluxo no entreferro seja a mais senoidal possível a fim de reduzir ao "mínimo" as harmônicas nas voltagens e correntes.

Suponhamos que um gerador está ligado em estrela conforme fig. 1. As tensões geradas entre a fase e neutro do gerador são compostas de uma fundamental e uma família de harmônicas, já que a distribuição do fluxo no entreferro da máquina não é uma senóide perfeita e sim aproximada.

Desenvolvendo-se as tensões geradas pela série de Fourier em um gerador ligado em estrela, obtemos:

$$\begin{aligned} e_{an} &= E_{1m} \text{ Sen } Wt + E_{3m} \text{ Sen } (3Wt + \alpha) + E_{5m} \\ &\quad \text{Sen } (5Wt + \beta) + \dots \\ e_{bn} &= E_{1m} \text{ Sen } (Wt - 120^\circ) + E_{3m} \text{ Sen } \{ 3(Wt - \\ &\quad 120^\circ) + \alpha \} + E_{5m} \text{ Sen } \{ 5(Wt - 120^\circ) + \\ &\quad + \beta \} + \dots \\ e_{cn} &= E_{1m} \text{ Sen } (Wt + 120^\circ) + E_{3m} \text{ Sen } \{ (3Wt + \\ &\quad + 120^\circ) + \alpha \} + E_{5m} \text{ Sen } \{ 5(Wt + 120^\circ) \\ &\quad + \beta \} + \dots \end{aligned}$$

As voltagens entre linhas são $e_{an} - e_{bn}$; $e_{bn} - e_{cn}$; $e_{cn} - e_{an}$ respectivamente, então:

$$\begin{aligned} e_{an} - e_{bn} &= E_{1m} \text{ Sen } Wt - E_{1m} \text{ Sen } (3Wt + 120^\circ) \\ &\quad + E_{3m} \text{ Sen } (3Wt + \alpha) - E_{3m} \text{ Sen } \{ 3(Wt - \\ &\quad - 120^\circ) + \alpha \} + E_{5m} \text{ Sen } (5Wt + \beta) - \\ &\quad - E_{5m} \{ 5(Wt - 120^\circ) + \beta \} \text{ mas,} \\ E_{3m} \text{ Sen } \{ 3(Wt - 120^\circ) + \alpha \} &= E_{3m} \text{ Sen } \\ (3Wt + \alpha) \text{ logo o componente de terceiro harmônico} \\ \text{da tensão entre linhas resulta nula.} \end{aligned}$$

O mesmo raciocínio deve ser seguido para a 9.^a harmônica e a 15.^a harmônica, assim:

$$E_{9m} \text{ Sen } \{ 9(Wt - 120^\circ) + \delta \} = E_{9m} \text{ Sen } (9Wt + \delta) \text{ e}$$

$$E_{15m} \text{ Sen } \{ 15(Wt - 120^\circ) + \epsilon \} = E_{15m} \text{ Sen } (15Wt + \epsilon)$$

É também de suma importância, notar que as tensões de terceiros harmônicos, resultam em fase como podemos observar:

$$e_{an3} = E_{3m} \text{ Sen } (3Wt + \alpha)$$

$$e_{bn3} = E_{3m} \text{ Sen } \{ 3(Wt - 120^\circ) + \alpha \} = E_{3m} \text{ Sen } \{ (3Wt - 360^\circ) + \alpha \}$$

$$e_{cn3} = E_{3m} \text{ Sen } \{ 3(Wt + 120^\circ) + \alpha \} = E_{3m} \text{ Sen } \{ (3Wt + 360^\circ) + \alpha \}$$

A figura 2 nos mostra as tensões geradas em cada fase enfocando apenas à fundamental e os terceiros harmônicos.

Suponhamos agora que ligaremos uma carga entre a fase A e a B conforme figura 3.

Esta carga deve ser necessariamente resistiva já que os transformadores e reatores são geradores de harmônicos, como veremos a seguir.

Pela demonstração anterior, vimos que a tensão de terceiro harmônico resultante nos terminais da carga, é nula.

Deve-se portanto concluir que nenhuma corrente de terceiro harmônico irá fluir, proveniente da geração.

Suponhamos agora que a carga L na fig. 4 é ligada entre a Fase A e o neutro N.

A tensão gerada entre A e N possui componente de terceiro harmônico, dando origem à uma circulação de corrente com componente de terceiro harmônico.

Pelo relato anterior vimos que as tensões que possuem terceiros harmônicos são originárias de uma não distribuição uniforme de fluxo no entreferro da máquina.

Na prática os geradores de rotores cilíndricos são projetados para resultar um entreferro uniforme, e se obter uma FMM senoidalmente distribuída por meio de um espaçamento adequado dos condutores ao redor da periferia deste cilindro.

Nos geradores de polos salientes, por razões econômicas e estruturais, são os preferidos para aplicação em Hidroelétricas. A distribuição "senoidal" do fluxo obtém-se ajustando-se a sapata polar e portanto variando-se a relutância do entreferro como uma função do seu ângulo com o eixo do polo.

2. Introdução aos Harmônicos nos Transformadores

Na introdução dos harmônicos nos transformadores é necessário o estudo da aplicação de uma onda senoidal de voltagem levando-se ou não em conta o fenômeno da histerese, e a aplicação de uma corrente senoidal incluindo também os efeitos da histerese ou sua ausência.

2.1. Onda de Tensão Senoidal, sem o efeito histerese

A fig. 5 ilustra o presente caso, na qual o ciclo de histerese tem área nula.

Logicamente trata-se de um caso teórico, porém de grande utilidade para os demais casos.

A construção da corrente I_0 pelo método gráfico não é objetivo deste artigo.

Como não existe perda no núcleo, a corrente (I_p) da corrente de excitação (I_0) necessária para suprir as perdas no núcleo, não existe, resultando apenas a corrente de magnetização em fase com o fluxo ϕ .

Na fig. 6 a curva (B), (H) não tem área, e indica uma relação não linear entre B e H provocada pela permeabilidade do material magnético.

Portanto, podemos dizer, que se a onda de fluxo é senoidal pura, então, H ou como consequência (I_0) nunca será.

q 2.2. Onda de Tensão Senoidal com Efeito Histerese

A fig 7 ilustra o presente caso no qual deve-se notar que a onda de corrente de excitação não é simétrica e a mesma resulta adiantada em relação ao fluxo ϕ pelo ângulo de avanço histerético.

Aplicando-se à análise de Fourier na onda de excitação I_0 poderemos decompô-la numa fundamental e uma família de harmônicas pares e ímpares.

2.3. Corrente de Excitação Senoidal sem efeito da Histerese

A fig. 8 mostra-nos a aplicação de uma onda senoidal de corrente de excitação, para um núcleo de área histerética nula.

A corrente de excitação (I_0) é a verdadeira corrente magnetizante. A onda de fluxo apresenta-se com o topo achatado (Flat Top) indicando a presença do terceiro harmônico em fase com a fundamental, visto que o máximo valor negativo do terceiro harmônico, coincide com o máximo valor positivo da fundamental, resultando pois uma onda com o topo achatado.

Na fig. 9, esta onda de topo achatado de fluxo, produz uma onda de força eletromotriz induzida pontiaguda (Peak wave), mostrando claramente que o terceiro harmônico da tensão está em oposição com a fundamental haja visto que a onda de terceiro harmônico da fem atinge o máximo no mesmo instante da fundamental (fig. 10), resultando assim a onda pontiaguda de tensão induzida.

2.4. Corrente de Excitação Senoidal com Efeito da Histerese

A inclusão da histerese não causa a diminuição do máximo valor da onda de fluxo e sim uma assimetria desta onda em relação ao eixo, resultando portanto a mesma forma de onda de f.e.m.

Os comentários feitos no item anterior portanto são válidos para este fim.

Podemos então em forma de conclusão, expressarmos os itens discutidos anteriormente assim:

- Com a onda de fluxo senoidal, conseqüentemente uma f.e.m senoidal, a corrente de excitação (I_0) contém o terceiro harmônico na onda de excitação.
- Com a onda de corrente de excitação senoidal, a voltagem induzida contém o terceiro harmônico, produzindo uma onda de fluxo com o topo achatado e uma onda de tensão (pontiaguda).

3. Estudo do Transformador Monofásico

A fig. 11, apresenta um transformador monofásico no qual aplicaremos uma tensão senoidal de entrada $V(t)$, circulando pelo primário uma corrente $I_0(t)$ chamada de excitação.

A seguinte fórmula clássica é aplicável ao estudo:

$$V(t) = R_1 i_0(t) + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \text{onde:}$$

- v
 $v(t)$ = Valor instantâneo da tensão aplicada ao primário
 R_1 = Resistência do enrolamento primário
 $i_0(t)$ = Valor instantâneo da corrente de excitação
 ϕ = Valor instantâneo do fluxo, mútuo à vazio

Suponhamos que o fluxo mútuo será puramente senoidal e este devido a sua variação induz no primário uma força eletromotriz (f.c.c.m) também senoidal regida pela lei de Lenz-Faraday.

Pela curva B, H de um material magnético, sabemos que se B é uma senóide, H não será, surgindo assim uma corrente de excitação não senoidal.

Ao levarmos estes resultados para a equação anterior, chegaremos a conclusão que o fluxo mútuo não poderá ser uma onda senoidal pura.

Analisando agora pelo lado prático, a deformação do fluxo mútuo é tão pequeno que o adotaremos como senoidal puro.

Nas análises à seguir tomaremos sempre o fluxo uma onda senoidal pura, logicamente nos casos onde chegarmos esta conclusão.

4. Transformadores Trifásicos

Analisaremos agora sob o ponto de vista apenas das ligações as conexões trifásicas.

A tabela I, mostra-nos as possíveis conexões e seus resultados sob a luz dos terceiros harmônicos na tensão, corrente à vazio e fluxo.

4.1. Estrela/Estrela neutro Isolado (I_N)

Neste caso não existe caminho de retorno para o terceiro harmônico e seus múltiplos ímpares da corrente de excitação.

Sob a luz do terceiro harmônico e seus múltiplos ímpares esta corrente será senoidal, tanto na linha como na fase já que é a mesma corrente circulante.

Como consequência, o fluxo terá sua forma de onda com o topo achatado (flat top wave) contendo portanto componente de terceiro harmônico.

A voltagem de fase no primário conterà terceiro harmônico e será pontiaguda (peaked wave). A voltagem de linha será senoidal.

No secundário, a corrente de linha será senoidal juntamente com a voltagem de linha, o mesmo não acontecendo com a voltagem de fase que terá componente de terceiro harmônico e terá sua onda da mesma forma da voltagem de fase do primário.

Nesta conexão, deve-se notar que para um B_{max} constante, a onda de topo achatado de fluxo possui um valor RMS maior do que a onda senoidal. Como consequência, isto resultará numa onda de tensão induzida com valor de pico e RMS maior do que, se o fluxo fosse senoidal (Harmônicos de tensão em oposição com a fundamental). Fig. 12.

Portanto, deve-se consultar o fabricante sobre esta sobretensão.

4.2. Estrela N.G./Estrela N.I.

Esta conexão, com o aterramento do neutro do lado primário abriu-se um caminho para a circulação dos terceiros harmônicos das correntes de excitação.

As voltagens de linha tanto do primário como do se-

cundário são senoidais.

As vantagens de fase conterão componentes de terceiros harmônicos, visto que o fluxo possui a componente de terceiro harmônico.

4.3. Estrela N.I./Estrela 4 fios

Este caso reflete o caso (4.2) com a inclusão de corrente de terceiro harmônico no secundário.

4.4. Estrela N.I./Delta

Nesta conexão deve-se estudar isoladamente os casos em que o transformador não fornece carga (triângulo aberto) e fornecendo carga (triângulo fechado).

Considerando o caso do triângulo aberto, não havendo portanto carga no secundário a corrente no primário será apenas a de excitação.

Como não existe caminho para a circulação dos terceiros harmônicos do primário, a corrente será senoidal.

O fluxo conterá componente de terceiro harmônico que se fecham pelo ar através de condutores, dielétricos e a caixa do transformador.

Ao se fechar o triângulo (coloca-se carga no transformador), os terceiros harmônicos das tensões induzidas, produziram terceiros harmônicos nos seus componentes fluxos magnéticos que tendem a compensar os fluxos magnéticos adicionais (fig. 13).

Em resumo podemos dizer que:

1. A presença do triângulo no secundário elimina os terceiros harmônicos do fluxo. Tornando-o senoidal.

2. As tensões primárias e secundárias estão livres dos terceiros harmônicos.

3. A corrente de terceiro harmônico circulará no delta.

4.5. Estrela N.G./Delta

Verificando a observação da Tabela I e o item (4.4) abriu-se agora no primário, um caminho para circulação dos terceiros harmônicos da corrente de excitação.

A única alteração do quadro relativo ao item 4.4 é a inclusão dos terceiros harmônicos no primário.

4.6. Delta/Estrela 4 fios

A corrente de terceiro harmônico circula no delta e nas linhas secundárias assegurando assim tensões senoidais e fluxo senoidal.

Deve-se observar que uma conexão delta, a corrente de terceiro harmônico não circula na linha já que:

$$I_{AB3} - I_{CA3} = I_{A3} \text{ como } I_{AB3} = I_{CA3} \text{ resulta}$$

$$I_{A3} = 0 ; I_{B3} = 0 ; I_{C3} = 0$$

4.7. Os demais casos são semelhantes aos estudados anteriormente.

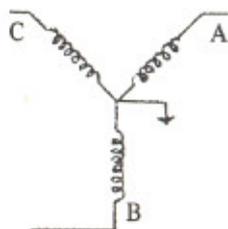


Fig. 1

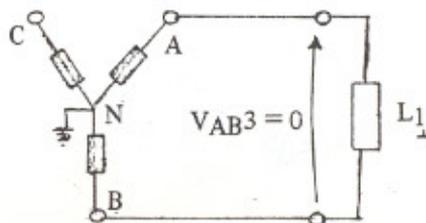


Fig. 3

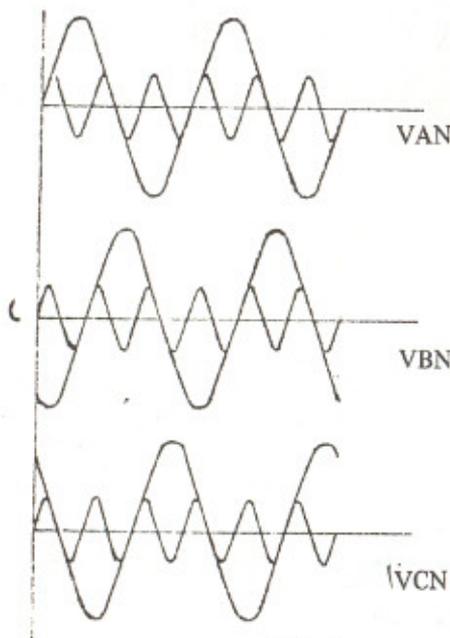


Fig. 2

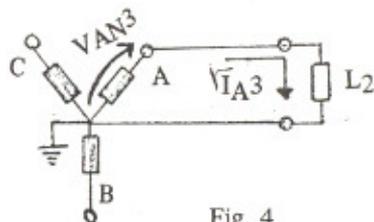
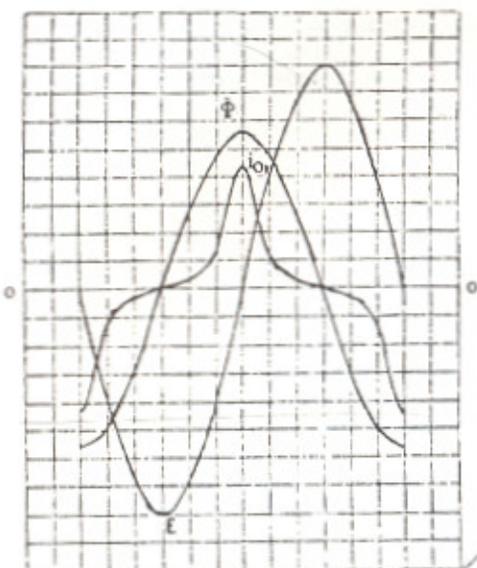


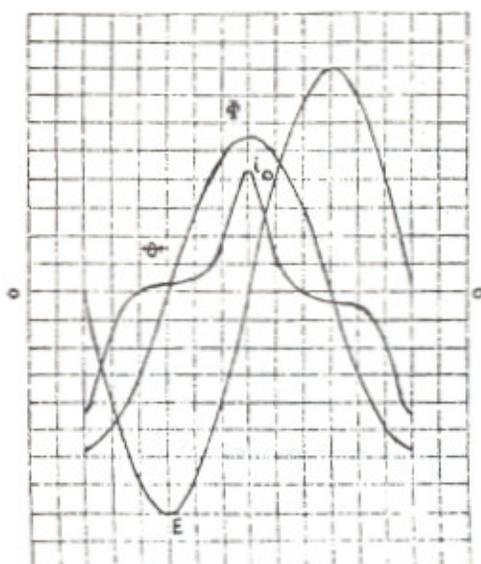
Fig. 4



$$i_0 = 100 \sin \theta - 54.7 \sin 3\theta + 31.5 \sin 5\theta + \dots$$

(Excluindo o efeito de Histerese)

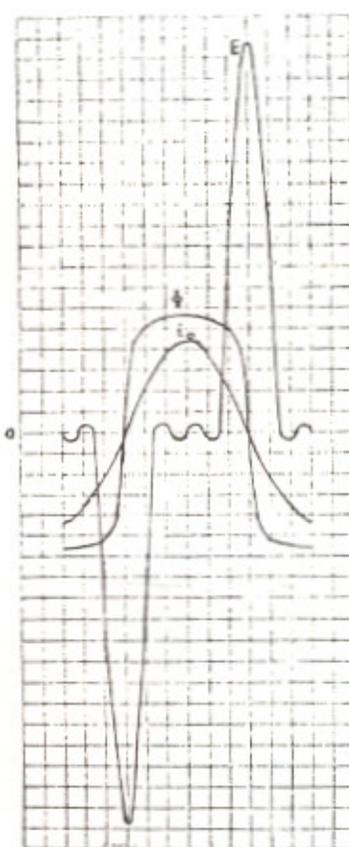
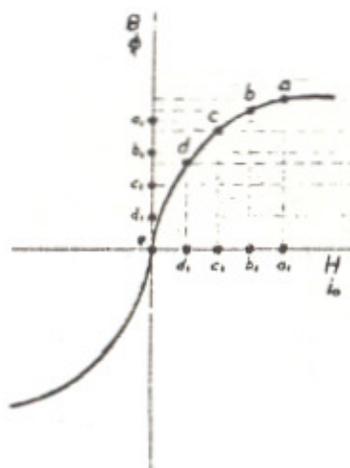
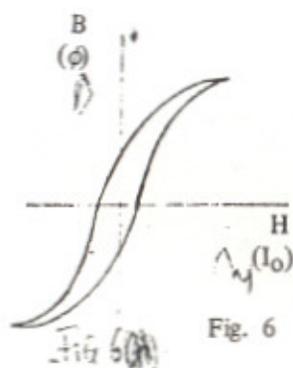
Fig. 5



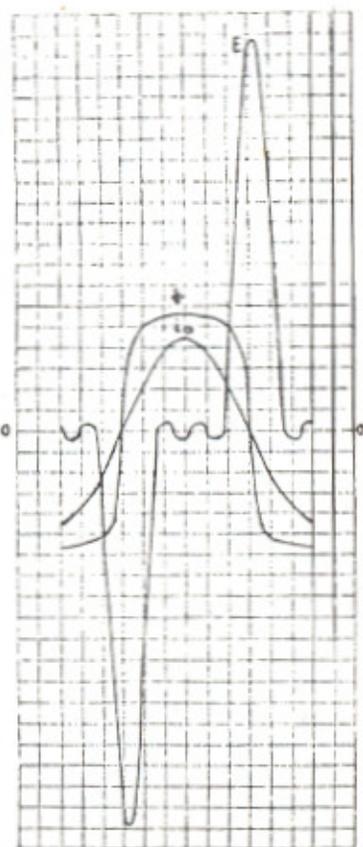
(Fig. 7)

Ondas de corrente de Excitação, Fluxo e Voltagem Induzida com a aplicação de uma voltagem senoidal.

Efeito de Histerese Incluído



(Fig. 8)



(Fig. 9)

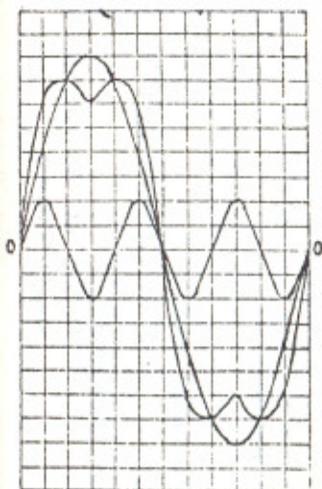
Efeito de Histerese Excluído

Efeito de Histerese Incluído

Ondas de Fluxo, tensão induzida e corrente de excitação com a aplicação de uma corrente sem carga senoidal.

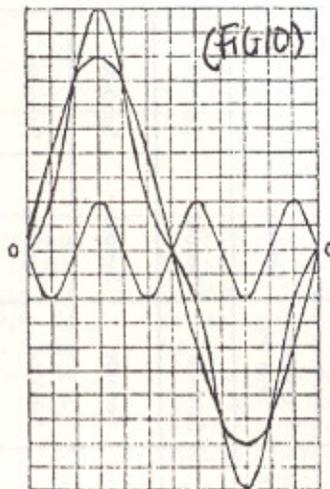
$$\Phi_m = 100 \sin \theta + 22 \sin 3\theta + 565 \sin 5\theta + \dots$$

$$E = 100 \cos \theta + 69 \cos 3\theta + 284 \cos 5\theta + \dots$$



(Fig. 10)

Terceiro Harmônico em Fase



(Fig. 10)

Terceiro Harmônico em Oposição
Combinação da Onda Fundamental Com o Terceiro Harmônico

FIGURA 12

B_{MAX} CONSTANTE						
FLUXO		TENSÃO INDUZIDA		CORRENTE A VAZIO		
FORMA DE ONDA	FATOR DE COMPARAÇÃO C/A ONDA SENOIDAL	PERDA NO FERRO/COMPARAÇÃO C/ ONDA SENOIDAL	FORMA DE ONDA	FATOR DE FORMAÇÃO C/A SENOIDAL	FATOR DE FORMAÇÃO C/A SENOIDAL	
SENOIDE 	MESMO	MESMO	SENOIDE 	MESMO	ONDA PONTI-AGUDA < b'' 	MAIOR
ONDA ACHATA-DA TERCEIRA HARMÔNICA EM FASE 	MENOR	MESMO	ONDA PONTI-AGUDA TERCEIRA HARMÔNICA EM POSIÇÃO 	MAIOR	SENOIDE 	MESMO
E_{RMS} CONSTANTE						
SENOIDE 	MESMO	MESMO	SENOIDE 	MESMO	ONDA PONTI-AGUDA TERCEIRA HARMÔNICA EM POSIÇÃO 	MAIOR
ONDA ACHATA-DA TERCEIRA HARMÔNICA EM FASE 	MENOR	MENOR	ONDA PONTI-AGUDA TERCEIRA HARMÔNICA EM POSIÇÃO 	MAIOR	SENOIDE 	MESMO

RELAÇÕES DA FORMA DE ONDA ENTRE FLUXO, TENSÃO INDUZIDA E CORRENTE A VAZIO

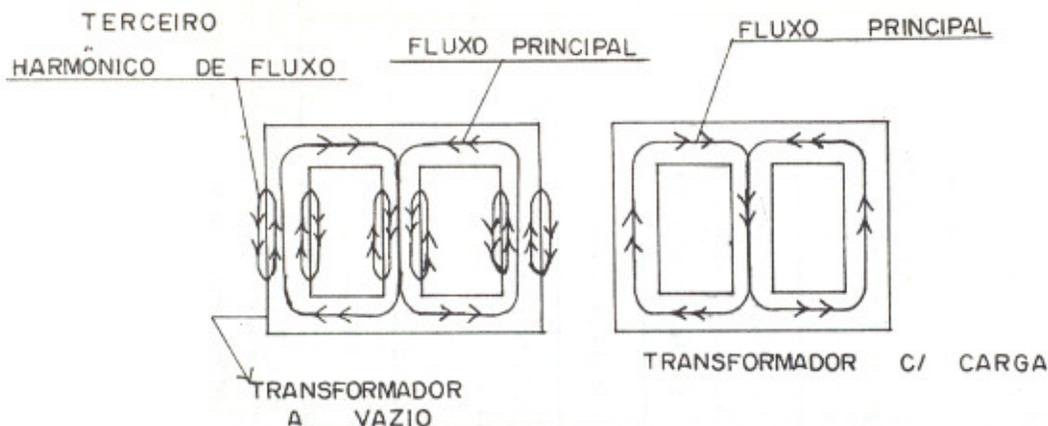


FIG. 13

TABELA 1

Nº	CONEXÕES	PRIMÁRIO				FLUXO	SECUNDÁRIO		
		CORRENTE		TENSÃO			Sem Carga	Linha	Fase
		Linha	Linha	Linha	Linha				
1	ESTRELA N.I./ESTRELA N.I.	Senóide	Senóide	Senóide	Contém 3ª (P)	Contém 3ª (TA)	Senóide	Senóide	Contém 3ª H (P)
2	ESTRELA N.I./ESTRELA N.I.	* Contém 3ª H (P)	Senóide	Senóide	* Contém 3ª H (P)	* Contém 3ª H (TA)	Senóide	Senóide	* Contém 3ª H (P)
3	ESTRELA N.I./ESTRELA - 4 FIOS	Senóide	Senóide	Senóide	* Contém 3ª H (P)	* Contém 3ª H (TA)	* Contém 3ª H (P)	Senóide	* Contém 3ª H (P)
4	ESTRELA N.I./DELTA	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide
5	ESTRELA N.G./DELTA	* Contém 3ª H (P)	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide
6	DELTA/ESTRELA N.I.	Contém 3ª H (P)	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide
7	DELTA/ESTRELA - 4 FIOS	Contém 3ª H (P)	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide
8	DELTA / DELTA	Contém 3ª H (P)	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide	Senóide

* Em todos estes casos a componente de terceira Harmônica é menor do que seria se (a) A circulação da corrente de terceira Harmônica fluísse somente através de um delta fechado desbalanceado, ou (b) o ponto neutro estivesse isolado.

N.I. Significa "Neutro Isolado"; N.G. Significa "Neutro do Gerador"; (P) Significa "Onda Pontaguda"; (TA) Significa "Topo de Onda Achatado".

BIBLIOGRAFIA

- 1) Alternating Current Wave - Forms
Philip Kemp
- 2) Alternating Current Machines
Puchstein Lloyd Conrad
- 3) Electric Machinery
Fitzgerald
- 4) Máquinas Eléctricas
Thaler y Wilcox
- 5) JEP - Transformer Book
Austen, Morgan, Franklin
- 6) Transformer Engineering
Division of the General Electric Company