

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS QUANDO SUBMETIDOS A CARGAS DESEQUILIBRADAS

RESUMO

Este artigo tem por objetivo mostrar o desempenho do transformador trifásico quando submetido a cargas desequilibradas. Será relatado o seu desempenho em suas várias configurações em relação ao desbalanço de tensão provocado pelas cargas desequilibradas. Testes e simulações foram realizados para comprovar a teoria exposta. A conexão zig-zag não fez parte deste estudo.

ABSTRACT

This article intends to show the performance of the triphasic transformer when submitted to charge unbalanced. To show the performance of its various configurations in relation to unbalanced tension to provoke unbalanced charge. Tests and simulations execution to prove the statement theory. The zig-zag connection does not make part of this study.

1- INTRODUÇÃO

Há uma preocupação das concessionárias de energia elétrica com relação as redes de distribuição que é de tentar ao máximo equilibrar as cargas no seu sistema. Estudos realizados em concessionárias revelaram

que transformadores subcarregados e com grande tempo ainda de vida útil foram queimados. Esta queima pode ser devido a cargas desequilibradas. A tabela (1) mostra as correntes nas três fases em alguns transformadores de distribuição de várias potências em vários pontos de uma grande

**JOSÉ BATISTA
SIQUEIRA FILHO**

*Mestrando em Sistemas
Elétricos Industriais-EFEI
(Escola Federal de
Engenharia de Itajubá).*

Potência em [kvar]	Fase A em (A)	Fase B em (A)	Fase C em (A)
112.5	150	120	100
112.5	50	110	110
225	250	220	240
225	300	280	315
225	350	315	280
225	180	200	215
150	170	160	200
150	215	230	180
150	220	240	200
45	45	38	60

Tabela 1 - Correntes nas fases de alguns transformadores

cidade. Observe o grau de desequilíbrio existente entre as fases.

Enquanto a carga secundária for equilibrada e simétrica o funcionamento trifásico pode ser estudado, observando-se uma só fase, qualquer que seja o esquema das conexões das fases primárias e secundárias.

Esta simplificação de estudo não é mais possível quando o transformador trifásico deve alimentar uma carga fortemente desequilibrada. Neste último caso o funcionamento do transformador dependerá do tipo de agrupamento das fases primárias e secundárias.

Esse desequilíbrio de cargas no secundário do transformador provoca o desbalanço de tensão e com isso o aparecimento de componentes de seqüência negativa e zero.

Estas componentes provocam um menor rendimento, perda de potência e o aumento de perdas no transformador; conseqüentemente diminuindo o seu tempo de vida útil.

O desbalanço de tensão em um sistema industrial, pode provocar sérios problemas nos motores, na qual é boa parte da carga de uma indústria. A componente de seqüência negativa provoca nos motores um torque contrário ao torque nominal, fazendo surgir o que podemos chamar de "carga fictícia" no eixo do motor, quer

dizer, o motor pode operar em sobrecarga sem estar sobrecarregado. Dependendo do grau de desbalanço das tensões, estas poderão causar uma sobrecarga e conseqüentemente diminuindo a vida do motor que dependendo do grau de desbalanço do sistema, pode resultar na queima do motor. Mas se o sistema for balanceado a única componente existente no motor é a de seqüência positiva, na qual provoca o torque nominal.

Ensaio realizado em laboratório, para observar o comportamento das tensões no primário e secundário quando o transformador foi submetido a cargas desequilibradas. As simulações no computador comprovam os ensaios realizados.

2- COMPONENTES SIMÉTRICOS

O trabalho de Fortecue na qual um sistema desequilibrado de n fasores correlacionados, pode ser decomposto em n sistemas de fasores equilibrados denominados componentes simétricos dos fasores originais(1).

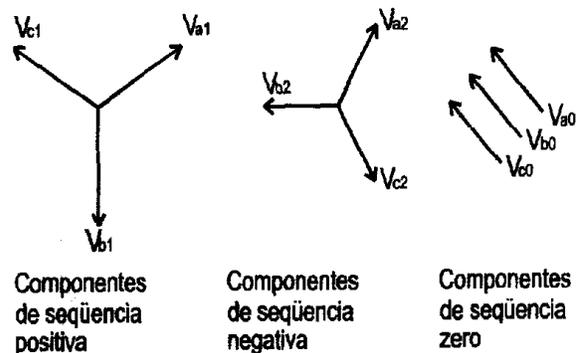


figura 1- fasores equilibrados, componentes de fasores desequilibrados

Os fasores desequilibrados podem ser decompostos em três sistemas equilibrado de fasores:

- componentes de seqüência positiva, consistindo de três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si, e tendo a mesma seqüência de fase que os fasores originais;
- componentes de seqüência negativa, consistindo em três fasores iguais em módulo 120° defasados entre si, e tendo a seqüência de

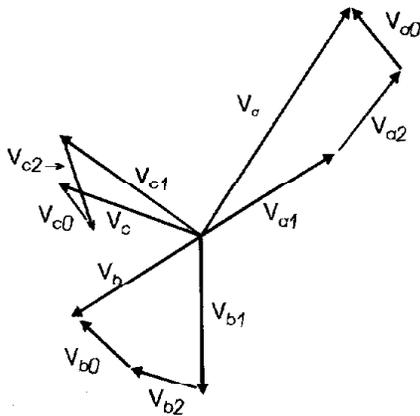


figura 2 - Soma gráfica dos fasores da figura 1.

fase oposta à dos fasores originais;

- componentes de seqüência zero, consistindo em três fasores iguais em módulo e com o defasamento nulo entre si.

A figura 1 mostra três conjuntos de fasores equilibrados que são componentes de três fasores desequilibrados e a figura 2 mostra a adição gráfica dos componentes mostrados na figura 1 para se obter os três fasores desequilibrados.

As equações abaixo mostram os componentes simétricos a partir de seus componentes assimétricos.

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned}$$

onde:

$$\begin{aligned} V_{c1} &= \alpha V_{a1} & V_{b1} &= \alpha^2 V_{a1} \\ V_{c2} &= \alpha^2 V_{a2} & V_{b2} &= \alpha V_{a2} \\ V_{c0} &= V_{a0} & V_{b0} &= V_{a0} \end{aligned}$$

como no caso das tensões as correntes simétricas a partir de seus componentes assimétricos são dados a seguir:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} \\ I_c &= \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} + I_{a0} \end{aligned}$$

onde:

$$\begin{aligned} I_{c1} &= \alpha I_{a1} & I_{b1} &= \alpha^2 I_{a1} \\ I_{c2} &= \alpha^2 I_{a2} & I_{b2} &= \alpha I_{a2} \\ I_{c0} &= I_{a0} & I_{b0} &= I_{a0} \end{aligned}$$

na qual o operador α é dado por:

$$\begin{aligned} \alpha &= -5 + j0.866 \\ \alpha^2 &= -5 - j0.866 \\ \alpha^3 &= 1 \end{aligned}$$

As equações acima mostram que não existem componentes de seqüência zero se a soma dos fasores desequilibrados for zero. Uma vez que a soma dos fasores de tensão de linha no sistema trifásico é sempre zero, as componentes de seqüência zero nunca estão presentes nas tensões de linhas, não importando a dimensão do desbalanço. A soma dos três fasores de tensão entre fase-neutro não é necessariamente zero e as tensões de fase podem conter componentes de seqüência zero.

Em um sistema trifásico a soma das correntes de linha é igual à corrente de neutro como mostra a equação abaixo:

$$I_N = I_a + I_b + I_c$$

Então sabe-se que :

$$I_N = 3 \cdot I_0$$

Na ausência de um caminho pelo neutro num sistema trifásico, a corrente no neutro e as correntes de linha não contêm componentes de seqüência zero. Uma carga ligada em estrela-isolada não apresenta caminho para a componente de seqüência zero, conseqüentemente se o transformador do sistema não possuir neutro e as cargas forem desequilibradas, o tempo de vida deste será maior que se possuir neutro, devido à não-existência da componente de seqüência zero.

3- POTÊNCIA

Para qualquer sistema trifásico não equilibrado a potência total consumida é a soma das potências absorvidas em cada fase, em termos de componentes simétricos é dada pela equação a seguir[2]:

$$P = 3 \cdot V_a \cdot I_a \cdot \cos \phi_{va} + 3 \cdot V_b \cdot I_b \cdot \cos \phi_{vb} + 3 \cdot V_c \cdot I_c \cdot \cos \phi_{vc}$$

A equação anterior mostra que a potência total de um transformador trifásico quando submetido a carga desequilibrada é a soma das potências consumidas em cada fase, portanto, para se obter a potência total, teremos que somar algebricamente as potências totais de seqüência positiva, negativa e zero de cada fase.

Observa-se que o transformador submetido a cargas desequilibradas fornece menos "potência útil", porque este, em vez de apenas fornecer potência com seqüência positiva, terá que dividir sua potência total em três parcelas, na qual duas delas não gera trabalho útil (seqüências negativa e zero).

4- PERDAS

Perda é a potência absorvida pelo transformador e dissipada, em forma de calor, pelos enrolamentos primários, secundários e pelo núcleo. Essas perdas significam aumento de temperatura e conseqüentemente a diminuição da vida útil do transformador. As perdas em carga são devido unicamente à resistência ôhmica das bobinas dos transformadores, e alcançam o seu valor máximo quando o transformador estiver em carga máxima. Esta carga máxima leva apenas em consideração a componente de seqüência positiva.

As perdas do transformador tendem a aumentar, se a carga aplicada for desequilibrada, pois apareceram componentes de seqüência negativa e zero.

As perdas de um transformador submetido a carga desequilibrada podem ser dadas pela equação abaixo[2]:

$$P = 3 \cdot I_a^2 \cdot R_a + 3 \cdot I_b^2 \cdot R_b + 3 \cdot I_c^2 \cdot R_c$$

Como R_1 , R_2 e R_0 são as resistências para as componentes de seqüência positiva, negativa e zero respectivamente e são aproximadamente iguais [2] temos:

$$P = 3 \cdot R \left[I_1^2 + I_2^2 + I_0^2 \right]$$

Como a equação anterior mostrou que se o transformador estiver submetido a cargas desequilibradas, este pode apresentar tempe-

raturas acima da prevista para uma dada carga. Dependendo do grau de desequilíbrio o transformador poderá até queimar, pois agora não existe apenas a componente de seqüência positiva no transformador, que dependendo da configuração poderá possuir componentes de seqüência negativa e zero.

5- RENDIMENTO

O rendimento é a relação entre a potência elétrica fornecida pelo secundário do transformador e a potência elétrica absorvida pelo primário. O rendimento do transformador é acompanhado de perdas, que devem ser limitadas ao máximo.

O rendimento do transformador pode ser dado pela fórmula a seguir:

$$\eta = 100 - \frac{100 \cdot (P_{fe} + F_c^2 \cdot P_{cu})}{F_c \cdot P_{nt} \cdot \cos\psi + P_{fe} + F_c^2 \cdot P_{cu}}$$

O item anterior mostrou como as perdas aumentam com o aparecimento das componentes de seqüência negativa e zero, logo o rendimento diminui.

6- PERDA DE VIDA

A temperatura gerada na parte ativa dos transformadores resulta em elevação de temperatura dos enrolamentos e óleo. À medida que esta temperatura aumenta, a vida do transformador diminui, logo a temperatura influencia diretamente na perda de vida do transformador.

A equação abaixo mostra como a elevação de temperatura do óleo do transformador sofre alteração com as perdas totais do transformador. Como mostramos anteriormente, as cargas desequilibradas são causa do aparecimento de componentes de seqüência negativa e zero, logo aumentando as perdas e elevando a temperatura do transformador.

$$\Delta\theta_o = \frac{\sum P_E}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) + \Delta\theta_{or} \cdot e^{-\frac{t}{b}}$$

A expectativa de vida do transformador pode ser dada pela equação a seguir:

$$P_v = 10^{-\left[\frac{B}{273+T_c} + A \right]} \cdot 100 \cdot \Delta t$$

Observa-se que a vida do transformador está diretamente relacionada com a temperatura expressa na fórmula por T_e , onde T_e representa o somatório das temperaturas do óleo, enrolamentos e ambiente. Aqui representamos apenas a influência da temperatura do óleo na expectativa de vida do transformador.

7- CONEXÕES DOS TRANSFORMADORES

De posse da análise feita sobre as conseqüências que as cargas desequilibradas podem causar nos transformadores, estudaremos o comportamento das tensões no transformador submetido a cargas desequilibradas, já que as tensões são um indicio de surgimento das componentes de seqüência negativa e zero. Observou-se que algumas conexões possuem maior desempenho no tocante ao desbalanço de tensão, que mostra a existência das componentes de seqüência positiva, negativa e zero. Observamos em laboratório e em simulações que as conexões que possuem na sua configuração os enrolamentos em delta, suportam com mais intensidade cargas desequilibradas, já a conexão com estrela-isolada possui o pior desempenho.

O transformador foi submetido a cargas monofásicas, produzindo um forte desequilíbrio. Este caso é o pior caso de desequilíbrio.

O transformador utilizado nos ensaios possui as características: 0.5 [kvar], 220/22[V], 1.31/13.1[A] e resistências variáveis de até 20[Ω].

7.1- Conexão Estrela/Estrela com ou sem Fio Neutro

Considere o esquema indicado na figura 3, no qual está ligada uma carga monofásica entre uma fase e o neutro.

A corrente I_2 fornecida pela fase secundária com carga provoca a absorção de uma corrente I_1 na correspondente fase primária.

Se o circuito primário possuir também o fio neutro, a corrente I_1 volta através deste sem interessar às outras duas fases. Neste caso o funcionamento do transformador mantém-se

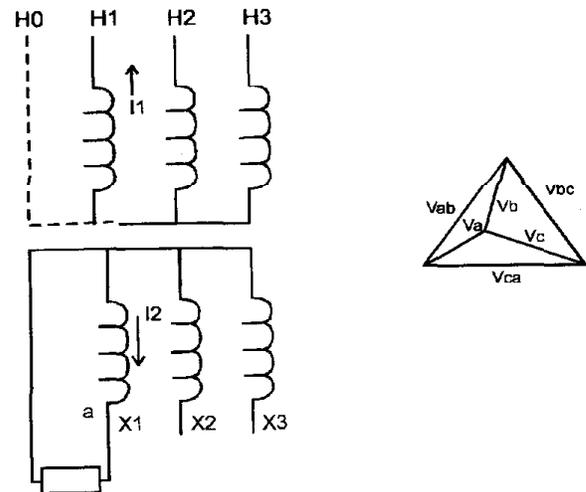


Figura 3 - Transformador com conexão estrela

regular, pois além da queda de tensão na fase afetada nenhum outro fenômeno perturbador se verifica. As f.e.m. (força eletromotriz) das três fases secundárias continuam iguais e simétricas.

Se o circuito primário não possuir fio neutro, a corrente I_1 deve necessariamente fazer o seu retorno através das outras duas fases primárias. As correntes que atravessam estas duas fases não sendo equilibrada por nenhuma corrente secundária, agem como correntes magnetizantes nas respectivas colunas. Essas correntes magnetizantes provocam um forte desequilíbrio do fluxo das três colunas e por conseguinte resultam desequilibrada também as f.e.m. primárias e secundárias. Uma das forças secundárias diminui consideravelmente enquanto as outras duas aumentam conforme o diagrama da figura 3.

Pelo exposto concluímos que a conexão estrela-aterrada/estrela-isolada no primário e secundário respectivamente, ou vice-versa, não é conveniente para cargas desequilibradas. A tabela 2 e a figura 3 mostram os ensaios realizados em laboratório em computador respectivamente, e em um transformador com estrela-aterrada/estrela-isolada. Os ensaios realizados comprovam a teoria exposta acima sobre as conexões estrela.

7.2- Conexão triângulo/estrela-aterrada

A conexão triângulo/estrela-aterrada presta-se otimamente para suportar uma carga

Corrente da carga no secundário em [A]	Tensão entre fases do primário em [V]		
	Vab	Vbc	Vca
a vazio	220	220	220
3.75	219	220	218
10	219	220	217
15	221	222	220
Corrente de carga secundária em [A]	Tensão entre fases do primário em [V]		
	Vab	Vbc	Vca
a vazio	20	20	20
3.75	20	20	20
10	19	20	19
15	18	21	18

Tabela 2- transformador com conexão estrela-isolada-estrela/aterrada, primário e secundário respectivamente

monofásica. Esta carga monofásica em questão é alimentada por uma fase secundária e o neutro, é não alterar as tensões das demais fases.

Observando-se a figura 5, a corrente secundária I_2 provoca a absorção da corrente primária I_1 , a qual circula através das fias H_1 e H_2 sem interessar as outras duas fases primárias.

Pela figura 6 e tabela 2 (corrente de carga de 16[A]) observa-se que quando a carga desequilibrada entre fase e neutro, apenas uma queda de tensão interna no transformador na fase em que a carga está presente é observada, logo a teoria exposta acima é verdadeira, mas se a carga desequilibrada for entre fases, ocorrerão correntes magnetizantes nas outras fases, logo haverá um desbalanço de tensão(e até mesmo um deslocamento angular das tensões -ver

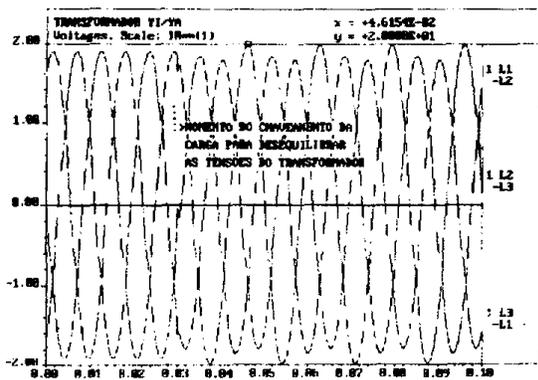


Figura 4- Simulação com a conexão estrela-isolada/estrela-aterrada

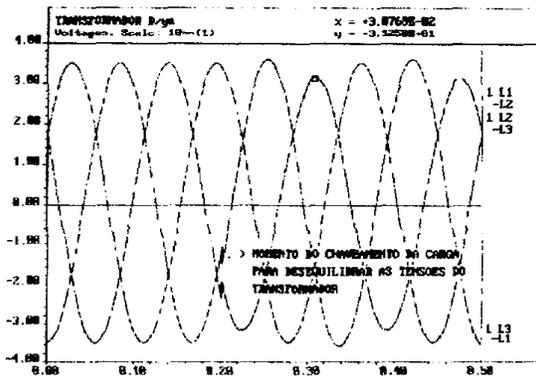


figura 6 - Transformador com conexão delta/estrela-aterrada com carga monofásica em uma das fases

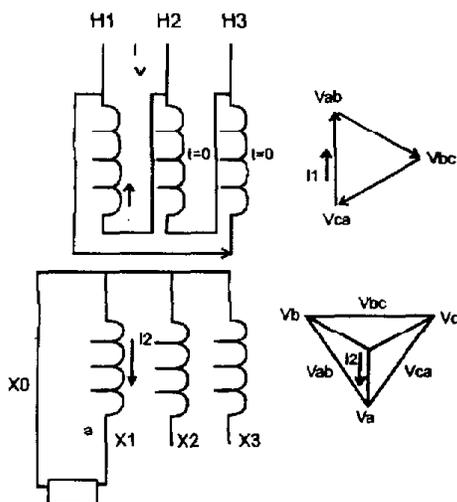


Figura 5 - Conexão delta/estrela-aterrada

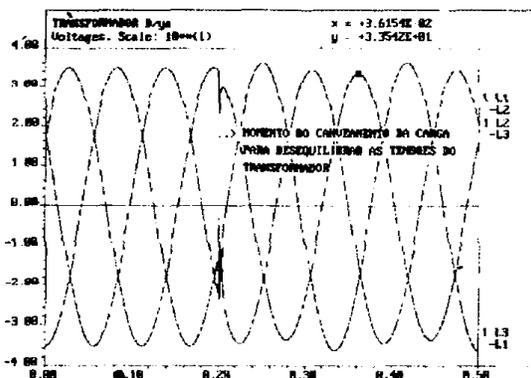


figura 7 - Transformador com conexão delta/estrela-aterrada com carga fracamente desequilibrada entre fases

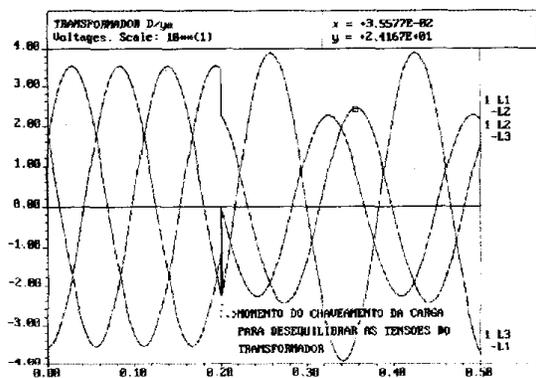


figura 8 - Transformador com conexão delta/estrela-aterrada com carga fortemente desequilibrada entre fases

Corrente de carga no secundário em [A]	Tensão entre fases do primário em [V]		
	Vab	Vbc	Vca
a vazio	221	222	222
3.75	219	221	220
10	218	220	219
15	217	220	219

Corrente de carga no secundário em [A]	Tensão entre fases do primário em [V]		
	Vab	Vbc	Vcq
a vazio	35	36	36
3.75	35	36	36
10	33	36	36
16	31	35	36

Tabela 3- transformador com conexão delta/estrela-isolada primária e secundária respectivamente

figura 8), este desbalanço é pior à medida que a carga desequilibrada aumenta. A figura 7 mostra uma carga desequilibrada entre fases e a figura 8 mostra um desequilíbrio mais forte.

7.3- CONEXÃO DELTA/DELTA

Neste tipo de conexão as tensões primárias de linha (ver figura 9) resultam diretamente aplicadas as fases primárias do transformador, transformando-se nas correspondentes tensões secundárias de linha.

Assim sendo, resulta que excluindo as pequenas dessimetrias devidas às diferentes

quedas de tensão as tensões secundárias podem ser consideradas iguais e simétricas, qualquer que seja o desequilíbrio da carga. A conexão delta/delta é considerada ótima para cargas desequilibradas.

A tabela 4 e a figura 10 mostram os ensaios em laboratório e simulações em computador respectivamente.

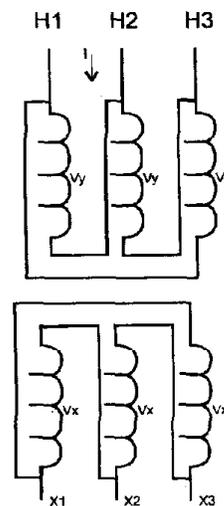


Figura 9 - Esquema da conexão delta/delta

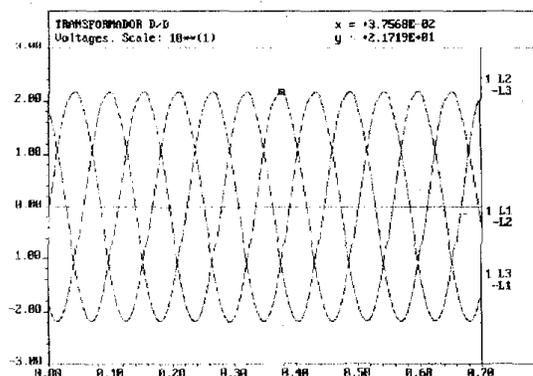


Figura10 - Simulação com a conexão delta/delta

8- CONCLUSÃO

Através dos estudos, ensaios e simulações mostramos o aparecimento de tensões desbalanceadas nos transformadores que provocam o aparecimento das componentes de seqüência negativa e zero a qual aumentam as perdas no transformador diminuindo tempo de vida deste.

Corrente de carga do secundário em [A]	Tensão entre fases do primário em[V]		
	Vab	Vbc	Vca
a vazio	220	220	221
6	219	220	221
10	218	220	221
16	218	220	221
Corrente de carga do secundário em [A]	Tensão entre fases do primário em[V]		
	Vab	Vbc	Vva
a vazio	22	22	22
6	21	22	22
10	20	22	22
16	20	21	21

Tabela 4- transformador com conexão delta/delta, primário e secundário respectivamente

Algumas conexões suportam um desequilíbrio de carga maior que outras e que algumas são muito frágeis no tocante ao desbalanço de tensões. O transformador que possui no seu secundário a conexão delta suporta mais os desequilíbrios de carga e as conexões com estrela-isolada são muito frágeis. A conexão muito utilizada em sistemas de

distribuição delta/estrela-aterrada, suportam até um certo nível de desequilíbrio as tensões balanceadas.

Visto o exposto, recomendamos que se evite ao máximo trabalhar com cargas desequilibradas, para que o tempo de vida do transformador não seja afetado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]- BATISTA, J.S.Filho, **Análise do desempenho de transformadores trifásico quando submetido a cargas desequilibradas**. Trabalho realizado na disciplina de Transformadores I, EFEI, 1993;
- [2]- MARTIGNONI A, **Transformadores**, Editora Globo, p. 11 a 28, 1986;
- [3]- STEVENSON W.D. Jr., **Elementos de sistemas de potência**, Editora Mcgram-Hill p. 12 a 20, 1987;
- [4]- OLIVEIRA J.C., Cogo J. R, Abreu J.P.G. **Transformadores (teoria e ensaio)** Editora Edgard, p. 150 a 172, 1988.
- [5]- MAMEDE J.F. **Manual de equipamentos elétricos**, Editora Livros Técnicos e Científicos, vol.II, p. 93 a 99, 1993;
- [6]- TADEU, A.L.A., Cogo J.R., Policarpo J.G.A., **Transformadores** apostila da FUPAI.