

TESE

798

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Dissertação de Mestrado

Uma Proposta de Transformador Tri-Tetrafásico

Luiz Henrique Andrade Correia

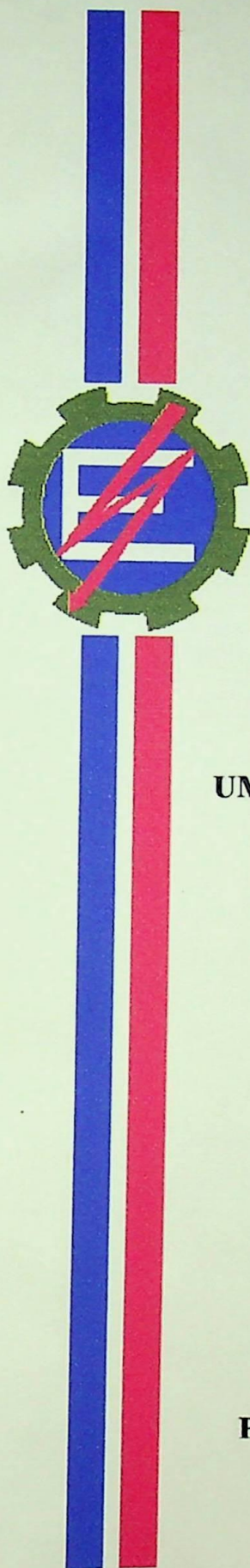
Orientadores:

Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves De Abreu

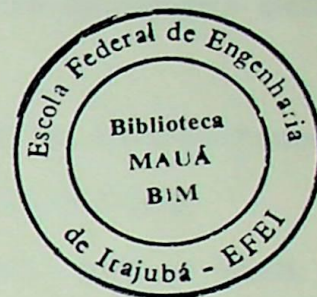
Prof. MSC. Héctor Arango

ITAJUBÁ — MG 1995

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



Dissertação de Mestrado



UMA PROPOSTA DE TRANSFORMADOR TRI-TETRAFÁSICO

LUIZ HENRIQUE ANDRADE CORREIA

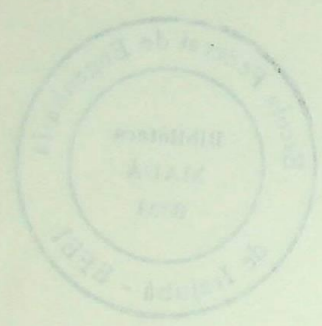
ORIENTADORES:

**PROF. Dr. JOSÉ POLICARPO GONÇALVES DE ABREU
PROF. MSC. HÉCTOR ARANGO**

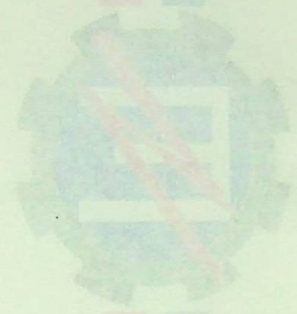
**ITAJUBÁ - MG
1995**

CLASS. 621.314.001.13 (043.2)
CUTTER. C 824u
TOMO. 498

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAUBA



Dissertação de Mestrado



UMA PROPOSTA DE TRANSFORMADOR TRI-TETRAFÁSICO

LEIX HENRIQUE ANDRADE CORREIA

ORIENTADORES:

PROF. DR. JOSÉ POLICARPO GONCALVES DE ABREU
PROF. MSC. HÉCTOR ARANGO

ITAUBÁ - MG
1992



Resumo

Devido a escassez de novas fontes hidroenergéticas nos grandes centros consumidores, tornou-se necessário a transmissão a longas distâncias. Recentes pesquisas realizadas pelo SibNIEE (Instituto Siberiano de Energética), mostram que a transmissão tetrafásica pode ser solução viável para linhas longas no sistema elétrico brasileiro.

Este trabalho de dissertação, apresenta uma proposta de um transformador especial tri-tetrafásico, através da análise de transformações trifásico-bifásicas.

São apresentadas conexões básicas trifásico-bifásicas, para as quais são analisadas suas características elétricas e o balanço de forças magnetomotrizes, para sistemas balanceados tanto na entrada quanto na saída dos transformadores.

O sistema tetrafásico é idealizado somente para transmissão, mantendo-se a geração e as cargas trifásicas. Algumas opções para formação da conexão tetrafásica são apresentadas e analisadas, sendo também mostrada a opção destas conexões para transmissão através de um sistema trifásico em caso de faltas ou em condição de emergência.

Através do estudo das várias conexões trifásico-bifásicas, são escolhidas aquelas conexões que mais se adequam à formação da conexão tetrafásica mantendo a compatibilidade dos sistemas trifásico e tetrafásico.

Abstract

This work shows the obtainment of a special three-phase to four-phase transformer, that was obtained through the analysis of three-phase to two-phase transformations.

Because there is a lack of new hydroenergetics sources in large consumers centers it became necessary the transmission by long distance.

Later researches realized by SibNIEE (Energetic Siberian Institute) show that the four-phase transmission can be a viable solution for long transmission lines in the electric Brazilian system.

Basic three-phase to two-phase connections are shown and either electric characteristics or balance of magnetizing forces are analyzed.

The four-phase system is idealized only for transmission, keeping the generation and loads as three-phase systems. Some options arranged to the four-phase transformation are shown and analyzed, the options to these connections transmission in three-phase system are available in cases of the faults or in emergency conditions.

Through the study of several three-phase to two-phase connections they are one chosen those ones that are more adequate to the formation of four-phase connection more compatible with the three-phase and four-phase systems.

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais, a minha esposa e a todos aqueles que me acolheram e me compreenderam nos momentos de ausência e ansiedade.

A todas as minhas Marias, esposa, mãe e avó.

Agradecimentos

Agradeço ao corpo docente desta entidade que me acolheu com carinho e me ensinou a percorrer os caminhos do saber.

Aos meus colegas que souberam me compreender nos momentos difíceis e que me incentivaram a continuar este trabalho.

Ao incentivo dado pelo **CNPq**, o qual apoiou e financiou a pesquisa desta dissertação.

A todos aqueles que contribuíram de sobremaneira no meu trabalho de dissertação, aos meus professores, ao pessoal da biblioteca Mauá, da secretaria e especialmente aos meus orientadores **Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu** e ao **Prof. Msc. Héctor Arango**, sem os quais não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

Resumo	<i>i</i>
Abstract	<i>ii</i>
Dedicatória.....	<i>iii</i>
Agradecimentos.....	<i>iv</i>
Sumário.....	<i>v</i>
Simbologia.....	<i>viii</i>
Capítulo I - Introdução.....	1
Capítulo II - Características elétricas dos transformadores especiais para transformação trifásico-bifásica.....	6
II.1 - Considerações iniciais.....	7
II.2 - Conexões Trifásico-bifásicas.....	9
II.2.1 - Conexão Scott.....	9
II.2.2 - Conexão Arnold.....	17
II.2.3 - Conexão Meyer.....	21
II.2.4 - Conexão Steinmetz.....	24
II.2.5 - Conexão Taylor.....	27
II.2.6 - Conexão Le Blanc.....	34
II.3 - Considerações finais.....	40

Capítulo III - Balanço das forças magnetomotrizes.	41
III.1 - Considerações iniciais.	42
III.2 - Balanço das forças magnetomotrizes para transformações trifásico-bifásicas.	44
III.2.1 - Conexão Scott.	46
III.2.2 - Conexão Arnold.	48
III.2.3 - Conexão Meyer.	51
III.2.4 - Conexão Steinmetz.	53
III.2.5 - Conexão Taylor.	55
III.2.6 - Conexão Le Blanc.	61
III.3 - Considerações finais.	63
III.3.1 - Scott.	63
III.3.2 - Arnold.	64
III.3.3 - Meyer.	64
III.3.4 - Steinmetz.	65
III.3.5 - Taylor.	65
III.3.6 - Le Blanc.	66

Capítulo IV - Conexões Tetrafásicas.	67
IV.1 - Considerações iniciais.	68
IV.2 - Conexão Scott tetrafásica.	69
IV.3 - Conexão Le Blanc tetrafásica.	74
IV.4 - Considerações finais.	79
Capítulo V - Conexões tetrafásicas operando como trifásicas em condições de emergência.	80
V.1 - Considerações iniciais.	81
V.2 - Conexão Scott tetrafásica operando como trifásica.	82
V.3 - Conexão Le Blanc tetrafásica operando como trifásica.	86
V.4 - Considerações finais.	90
Capítulo VI - Conclusões e sugestões.	91
Apêndice I - Grupos Scott.	94
I.1 - Grupo Scott não intercambiável.	95
I.2 - Grupo Scott intercambiável.	96
Apêndice II - Sistema Tetrafásico - SibNIIE.	97
Referências bibliográficas.	102

Simbologia

k - número de fase do sistema, ou sistema k -fásico;

$E_{k\phi}$ - tensão de fase (V);

$E_{k\phi n}$ - tensão de fase-neutro (V);

$I_{k\phi}$ - corrente de fase (A);

$I_{k\phi n}$ - corrente fase-neutro (A);

$S_{k\phi}$ - potência aparente (VA);

$P_{k\phi}$ - potência ativa (W);

$Q_{k\phi}$ - potência reativa (Var);

$E_{2\alpha}$ e $E_{2\beta}$ - tensões de fase bifásicas (V);

$E_{2\bar{\alpha}}$ - tensão bifásica com fasor complementar a $E_{2\alpha}$, ou seja deslocado de 180° ;

$E_{2\bar{\beta}}$ - tensão bifásica com fasor complementar a $E_{2\beta}$, ou seja deslocado de 180° ;

$|E_{k\phi}|$ - módulo da tensão;

$|I_{k\phi}|$ - módulo da corrente;

E_{kij} - tensão entre i e j ;

I_{kij} - corrente entre i e j ;

\mathfrak{T}_i - força magnetomotriz na fase i ;

\mathfrak{T}_p - força magnetomotriz no enrolamento primário;

\mathfrak{T}_s - força magnetomotriz no enrolamento secundário;

\mathfrak{T}_r - força magnetomotriz resultante;

\mathfrak{R} - relutância no núcleo do transformador;

ϕ - fluxo magnético no núcleo do transformador;

N_i - número de espiras no enrolamento do lado i ;

$[N_i]$ - número de espiras no enrolamento do lado i ;

$[I_{k\phi}]$ - correntes no sistema k -fásico;

h - valor da força magnetomotriz na coluna do transformador.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

UMA PROPOSTA DE TRANSFORMADOR TRI-TETRAFÁSICO

I - Introdução

A evidente escassez, de novas fontes hidráulicas para a geração de energia elétrica nas regiões economicamente mais desenvolvidas do Brasil, tornou necessária a busca de novas fontes em regiões mais distantes.

Devido à grande extensão territorial do país, estas novas fontes hidroenergéticas estão muito distantes dos grandes centros consumidores, acarretando então sérios problemas na transmissão de grande quantidade de energia.

Como estas fontes hidroenergéticas se encontram na região norte do país, foi criada pela ELETROBRÁS a Comissão de Planejamento para Transmissão da Amazônia - CPTA -, que vem realizando conjuntamente com o Instituto Siberiano de Energética - SibNIEE - , pesquisas de formas alternativas de transmissão de energia elétrica a longas distâncias.

O SibNIEE, vem desenvolvendo pesquisas na área de transmissão para linhas longas desde 1956. Uma vez que a distância das fontes energéticas aos centros consumidores na Sibéria assim como no Brasil., são muito grandes, os estudos realizados pelo SibNIEE devem ser de grande valia para o sistema brasileiro.

Em 1991, foi realizado no Brasil, um seminário pela CPTA, com a presença de pesquisadores siberianos, os quais aventaram a possibilidade de se gerar grande quantidade de energia na Amazônia e transmiti-la aos grandes centros consumidores através de um sistema tetrafásico.

Para substituição do sistema trifásico de transmissão a grandes distâncias, o sistema tetrafásico é alternativa viável em extra-alta tensão, pois este tem praticamente o mesmo nível de confiabilidade das transmissões tradicionais em corrente alternada (A.C.) e das transmissões a corrente contínua (D.C.). A viabilidade do sistema tetrafásico se faz pôr este apresentar um menor custo, quando comparado à transmissão D.C. [1].

Partindo-se da alternativa de um sistema tetrafásico, a primeira pergunta natural a se fazer é: Como se conseguir quatro fases para se efetuar a transmissão, sendo que o sistema gerador e a carga são trifásicos?

As possibilidades para a obtenção de um sistema tetrafásico, são:

- Mudança da geração trifásica para tetrafásica;
- Transformadores especiais tri-tetrafásicos.

A mudança da geração para tetrafásica necessitaria do desenvolvimento de um gerador com características especiais. O sistema de transmissão com geração tetrafásica, pode ser visualizado através da figura I.1.

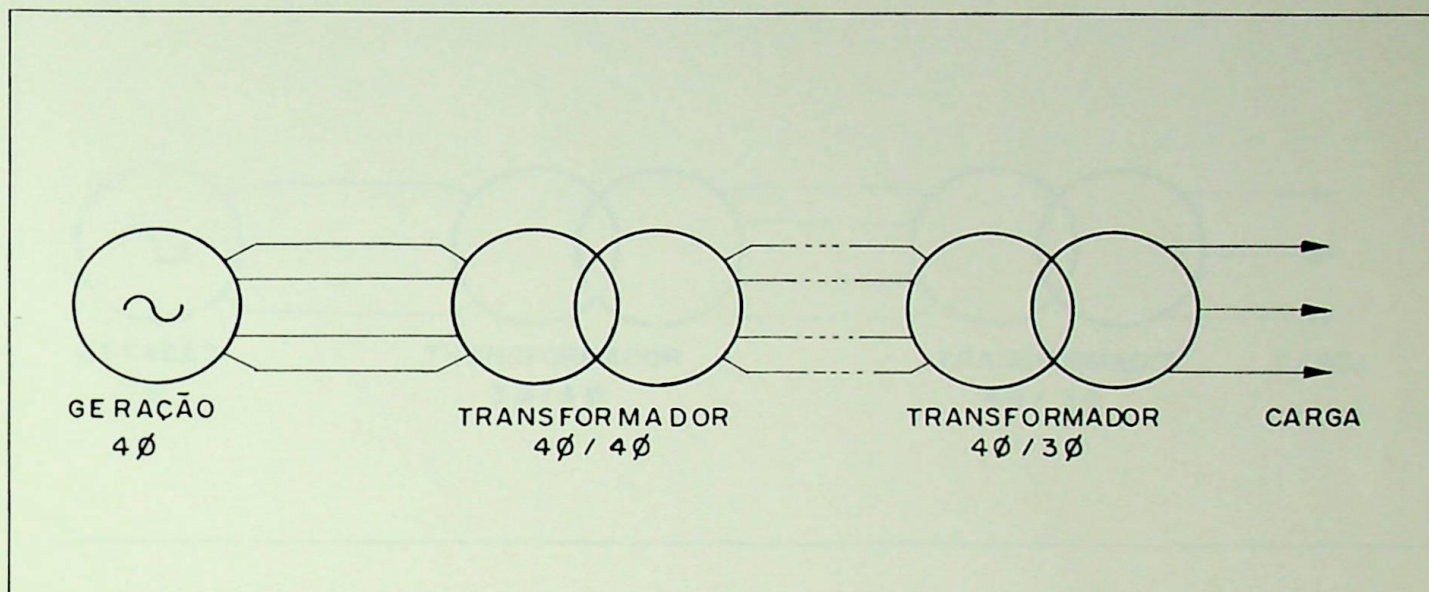


Figura I.1 - Sistema com geração tetrafásica

Note-se que, como em todo sistema de transmissão, há um transformador elevador de tensão, sendo então necessário o desenvolvimento de um transformador tetrafásico elevador e também de um que converta o sistema tetrafásico em trifásico para a alimentação dos centros consumidores (cargas). Assim, para a mudança da geração trifásica para tetrafásica, seria necessário além do desenvolvimento do gerador tetrafásico, mais dois transformadores especiais

A outra solução é obter-se transformadores com ligações especiais que consigam transformar o sistema trifásico em tetrafásico e vice-versa, conforme mostrado na figura I.2.

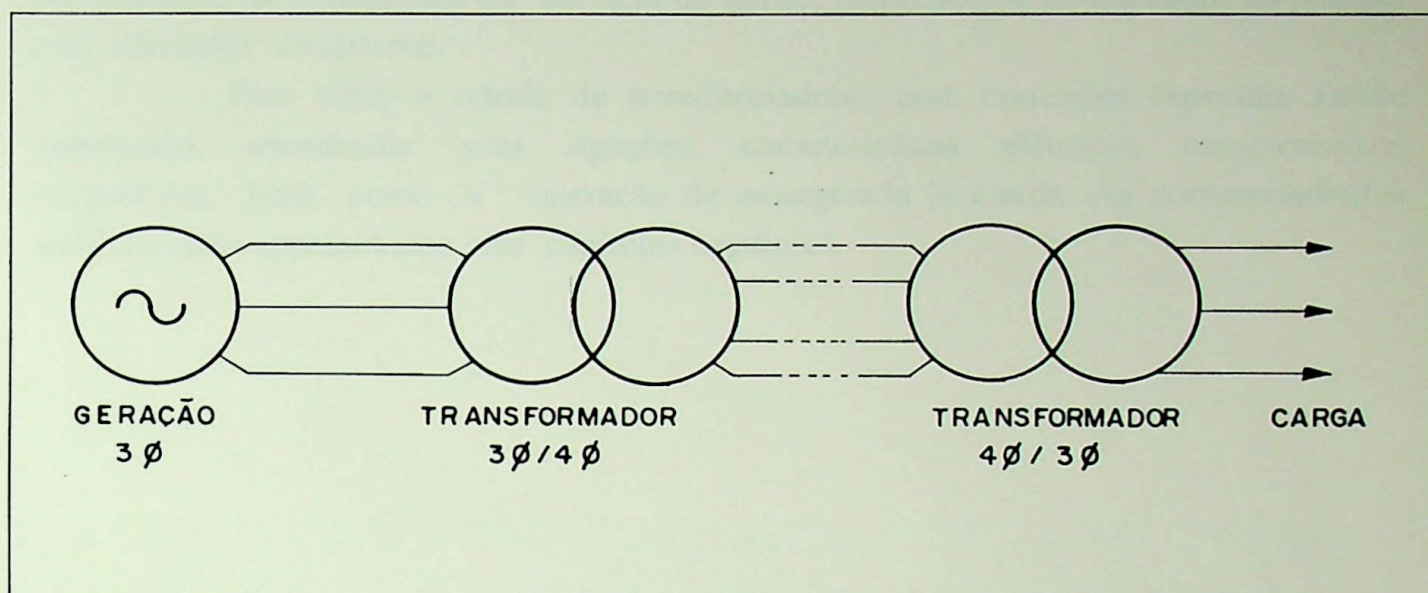


Figura I.2 - Sistema trifásico com transformadores especiais

A obtenção deste transformador especial tri-tetrafásico, é possível através do estudo de transformações trifásico-bifásicas, sendo o sistema tetrafásico obtido com a ligação de dois grupos de transformadores trifásico-bifásicos, onde os seus lados bifásicos estarão defasados de 180° e ligados entre si.

Este trabalho de dissertação, tem o intuito de estudar os transformadores com conexões especiais que consigam a compatibilidade dos sistemas trifásicos e tetrafásicos, através de transformações trifásico-bifásicos e além disto obter uma configuração de conexão trifásica-tetrafásica que opere também como trifásica-trifásica em condição de emergência ou em caso de falhas, mantendo-se balanceados as tensões e as correntes do sistema.

Para tanto o estudo de transformadores com conexões especiais faz-se necessário, abordando: suas ligações, características elétricas, características magnéticas, bem como a operação de emergência já citada. As correspondentes análises estão apresentados nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO II - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS TRANSFORMADORES ESPECIAIS PARA TRANSFORMAÇÃO TRIFÁSICA-BIFÁSICA

II - Características elétricas dos transformadores especiais para transformação trifásico-bifásica

II.1 - Considerações iniciais

Já nas primeiras décadas deste século muitas conexões foram desenvolvidas na Europa e na América, tais como as conexões Scott, Arnold, Meyer, Steinmetz e Taylor [2].

A partir destas conexões básicas foram feitas várias combinações entre elas, obtendo-se então uma infinidade de outras para transformação do sistema trifásico em bifásico. Algumas destas somente são utilizadas em condições de emergência por apresentarem desequilíbrio entre tensões e entre correntes.

Como vários sistemas de transformação são apresentados em diversas bibliografias, somente serão abordados aqui os sistemas mais básicos e populares, dentre os quais será escolhido aquele que mais se enquadre dentro das características necessárias à de um sistema tetrafásico, que são: equilíbrio entre tensões e entre correntes, bem como o balanço de forças magnetomotrizes.

As conexões básicas, descritas a seguir, serão analisadas segundo o método descrito a seguir:

- Considera-se no lado bifásico, carga com fator de potência unitário;
- Supõe-se que o sistema elétrico esteja equilibrado em ambos os lados;
- Para a condição anterior verifica-se qual a conexão oferece balanço magnético ou seja aquela em que: “A soma fasorial dos amperes-espiras em cada fase dos enrolamentos do lado trifásico estão balanceados pela soma dos amperes-espiras do lado bifásico na mesma fase” [6];
- Tensões de linha, em ambos os lados são iguais a 1,0 p.u:

$$E_{3\phi} = E_{2\phi}$$

- Existirão dois tipos de ligações entre as fases do sistema bifásico:
 - a) Fases bifásicas eletricamente distintas (a quatro condutores) :

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi};$$

$$S_{2\phi} = 2 E_{2\phi} I_{2\phi}$$

Desprezando-se as perdas $S_{entrada} = S_{saída}$, logo:

$$E_{2\phi} = E_{2\phi n}; E_{3\phi} = E_{2\phi}$$

$$\sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi} = 2 E_{3\phi} I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.1547$$

b) Fases bifásicas conectadas eletricamente (a dois ou três condutores):

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi}; S_{2\phi} = \sqrt{2} E_{2\phi} I_{2\phi}$$

$$E_{2\phi n} = \frac{E_{2\phi}}{\sqrt{2}}; E_{3\phi} = E_{2\phi}$$

$$\sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi} = 2 \frac{E_{2\phi}}{\sqrt{2}} I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.816$$

II.2 - Conexões Trifásico-bifásicas

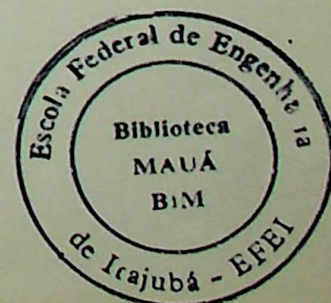
Com a adoção mundial do padrão trifásico no início do século, a transformação de sistemas tornava-se necessária, assim buscava-se uma conexão que adequasse o novo sistema aos sistemas já existentes, tal como a transformação bi-trifásica e vice-versa.

Foram então desenvolvidas cinco conexões básicas para a transformação do sistema bifásico em trifásico, sendo que a partir destas conexões surgiu uma infinidade de outras que são na verdade variações ou apenas combinações destas conexões básicas.

II.2.1 - Conexão Scott

A conexão que mais foi utilizada na transformação dos sistemas bifásicos em trifásicos foi a conexão Scott, não por apresentar vantagens sobre algumas outras conexões alternativas propostas, mas por anteceder a todas elas sendo patenteada em 05/05/1894, apresentando na prática resultados satisfatórios em alguns países como a Grã-Bretanha [4].

A idéia proposta para se obter a conexão Scott, começou com um banco de transformadores monofásicos formando um sistema trifásico. Este banco trifásico consistia de três transformadores monofásicos ligados em delta ou estrela, conforme mostra a figura II.1, onde **A**, **B** e **C** representam os terminais da ligação delta e **AN**, **BN** e **CN** representam os terminais da ligação em estrela.



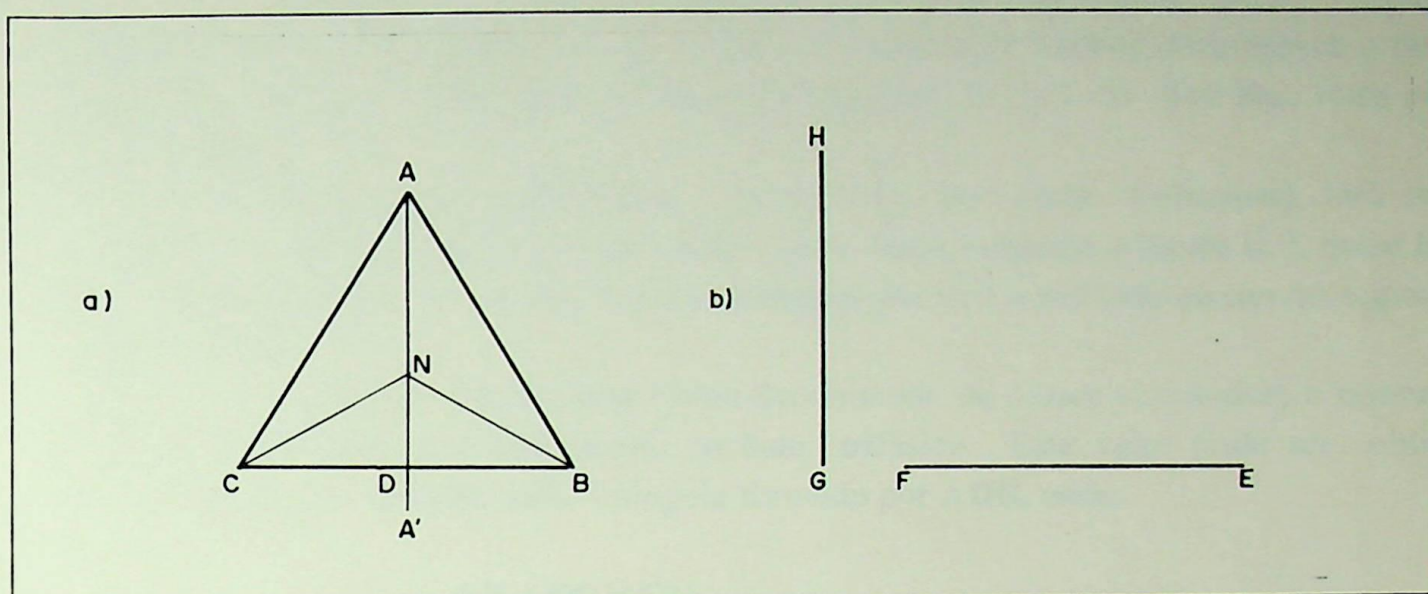


Figura II.1 - Diagrama de tensões para a conexão Scott

a) Sistema trifásico

b) Sistema bifásico

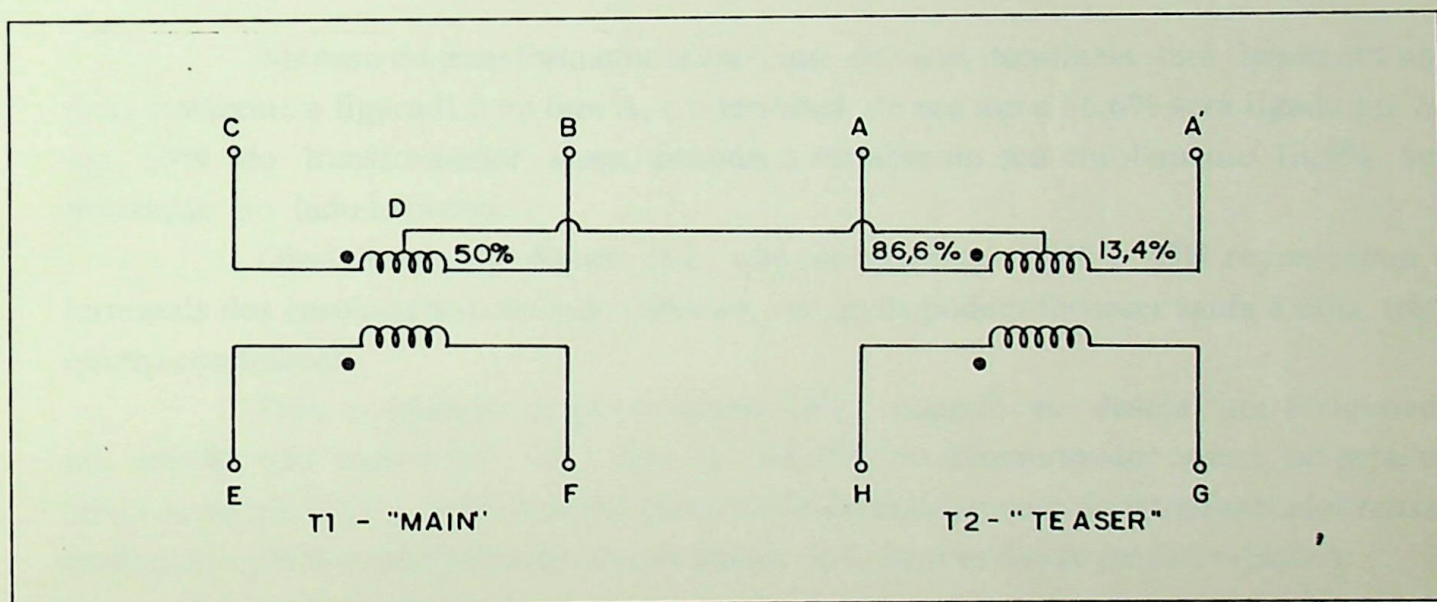


Figura II.2 - Formação da conexão Scott,
onde T1 - main, T2 - teaser

Nota-se da figura II.1, que para obter um desfasamento de 90° entre os fasores no sistema trifásico, são necessários apenas dois transformadores monofásicos, os quais terão os terminais de seus enrolamentos ligados nas fases do lado trifásico formando os fasores **BC** e **AD**. Para obter estas ligações será necessário que os dois transformadores tenham *taps* no lado trifásico, como mostrado na figura II.2.

No sistema bifásico os fasores de tensão estão defasados de 90° . Com o intuito de obter este desfasamento através do diagrama fasorial prolonga-se o fasor AN até o ponto D, ficando então o fasor AD deslocado de 90° do fasor BC, visto pelo lado trifásico.

O primeiro transformador, denominado de *main* (principal), terá seus terminais do lado trifásico ligados entre duas fases, segundo a figura II.2, entre B e C, este terá um *tap* na metade de seu enrolamento que será conectado ao *tap* do segundo transformador.

O segundo transformador será denominado de *teaser* (excitador) e possuirá um *tap* a 86,6% de seu enrolamento no lado trifásico. Este valor pode ser obtido através da figura anterior pelo triângulo formado por ADB, onde:

$$\begin{aligned} AB &= BC = E3\phi \\ BD &= 0.5 BC = 0.5 E3\phi \\ AB^2 &= AD^2 + BD^2 \Rightarrow AD = \frac{\sqrt{3}}{2} E3\phi \end{aligned}$$

No caso do transformador *teaser*, um de seus terminais será ligado em uma fase, conforme a figura II.2 na fase A, e o terminal de seu *tap* a 86,6% será ligado no *tap* em 50% do transformador *main*, ficando o restante do seu enrolamento 13,4% sem utilização no lado trifásico.

Observe-se pela figura II.2, que os terminais EF e GH representam os terminais dos enrolamentos do lado bifásico, os quais podem fornecer saída a dois, três e quatro condutores.

Para a obtenção do ponto neutro (N), quando se deseja um fechamento em estrela, será necessário um *tap* de 28,9% no transformador *teaser*, ou seja, um terço do *tap* de 86,6%. Estes valores percentuais do enrolamento do transformador *teaser*, podem ser obtidos geometricamente da figura II.1, através das seguintes relações:

$$AN = \frac{1}{\sqrt{3}} AB = 0.577 AB$$

$$AD = \frac{\sqrt{3}}{2} AB$$

$$DN = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{3} \right) AB \Rightarrow DN = 0.289 AB$$

$$\Rightarrow DN = \frac{0.866 AB}{3} = 0.289 AB$$

$$\Rightarrow DN = 0.289 \sqrt{3} AN$$

$$\Rightarrow DN = 0.5 AN \Rightarrow AD = AN + 0.5 AN \Rightarrow AD = 1.5 AN$$

Com a carga tendo fator de potência unitário, as tensões e correntes no transformador *teaser* estarão em fase, mas no transformador *main* estas estarão defasadas de 30° , pois as duas correntes nas duas metades do enrolamento do transformador *main* estão deslocadas de 120° e estão a 30° da tensão **BC**, conforme mostra o diagrama de correntes e tensões da figura II.3.

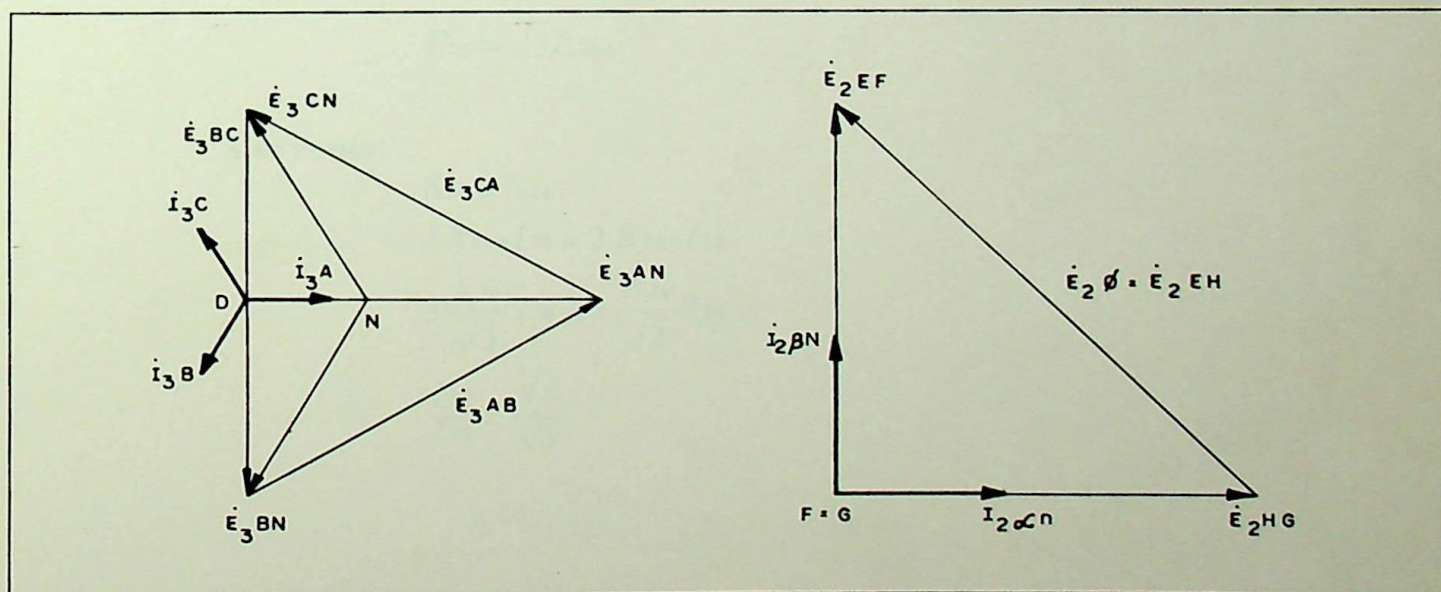


Figura II.3 - Diagrama de fasores para a conexão Scott

Considerando-se o diagrama fasorial anterior, e que a ligação dos dois transformadores seja a três condutores, tem-se a figura II.4:

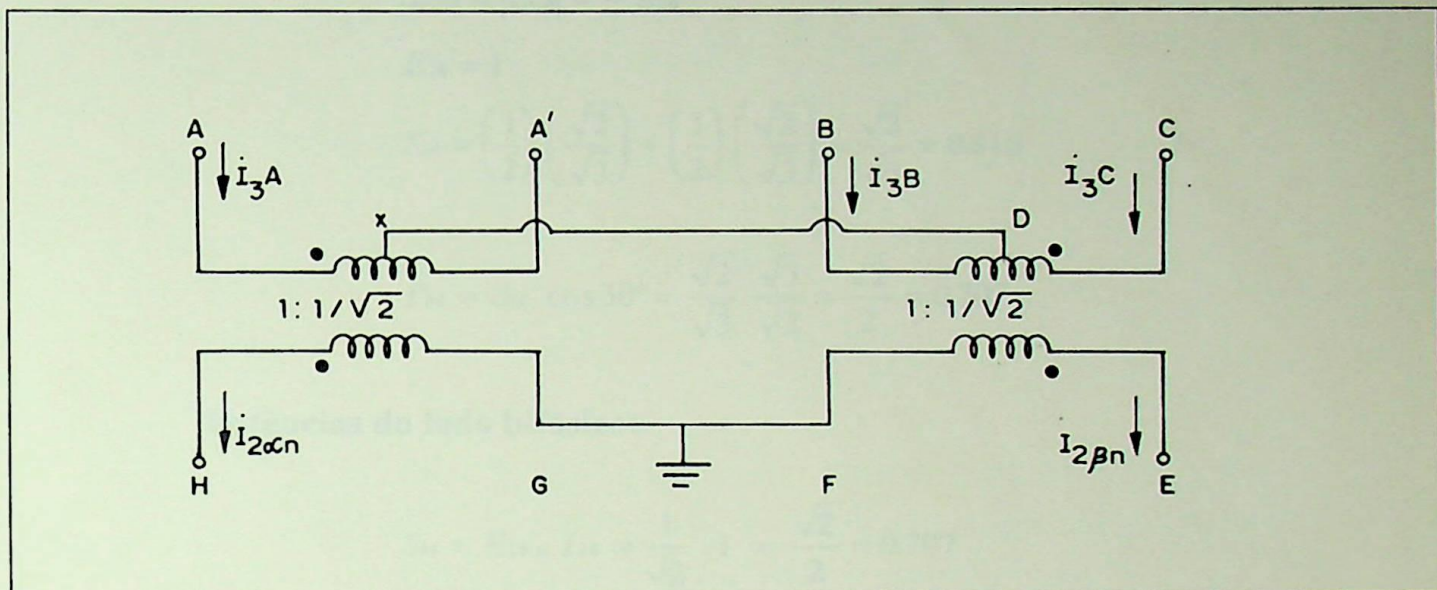


Figura II.4 - Conexão Scott com saída a três condutores

A partir da figura II.4 obtém-se para o **transformador main**:

Tensão:

$$E_{3\phi} = E_{2\phi} = \sqrt{2} E_{2\phi n}$$

$$E_{2\phi} = \sqrt{3} E_{3\phi n}$$

Corrente:

$$S_{3\phi} = S_{2\phi}$$

$$3 E_{3\phi n} I_{3\phi} = 2 E_{2\phi n} I_{2\phi}$$

$$3 \frac{E_{3\phi}}{\sqrt{3}} I_{3\phi} = 2 \frac{E_{2\phi}}{\sqrt{2}} I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Potências do lado trifásico:

$$S_M = E_{BD} I_{3B} + E_{CD} I_{3C}$$

$$|E_{BD}| = |E_{CB}| = \frac{1}{2} E_{3\phi}$$

$$E_{3\phi} = 1$$

$$S_M = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.816$$

$$P_M = S_M \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$$

Potências do lado bifásico:

$$S_M = E_{2\phi n} I_{2\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$$

$$P_M = E_{2\phi n} I_{2\phi} \cos 0^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$$

E para o transformador *teaser* tem-se as seguintes relações:

Tensão:

$$E_{2GH} = E_{3AN} + E_{3ND}$$

$$E_{3ND} = 0.5E_{3AN}$$

$$E_{2GH} = 1.5E_{3AN}$$

$$E_{2\phi n} = E_{3\phi n}$$

Corrente:

$$\sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi} = \sqrt{2} E_{2\phi} I_{2\phi}$$

$$\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} E_{3\phi} \right) I_{3\phi} = \sqrt{2} E_{2\phi} I_{2\phi}$$

$$\frac{3}{2} \sqrt{3} E_{3\phi n} I_{3\phi} = \sqrt{2} \sqrt{2} E_{2\phi n} I_{2\phi}$$

$$\frac{3}{2} \sqrt{3} E_{3\phi n} I_{2\phi} = 2 \left(\frac{3}{2} E_{3\phi n} \frac{1}{\sqrt{2}} \right) I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Potências lado trifásico:

$$S_T = E_{3\phi} I_{3\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.707$$

$$P_T = E_{3\phi} I_{3\phi} \cos 0^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.707$$

Potências lado bifásico:

$$S_T = E_{2\phi} I_{2\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} 1 = 0.707$$

$$P_T = E_{2\phi} I_{2\phi} \cos 0^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} 1 = 0.707$$

onde:

SM \Rightarrow potência aparente no transformador *main* (VA);

ST \Rightarrow potência aparente no transformador *teaser* (VA);

PM \Rightarrow potência ativa no transformador *main* (W);

PT \Rightarrow potência ativa no transformador *teaser* (W);

EFE e EGH \Rightarrow tensões no lado bifásico.

A partir das deduções efetuadas tem-se a tabela II.1.

Relações	Main	Teaser
Tensão (V)	$E_{3\phi} = \sqrt{2}E_{2\phi n}$ $E_{2\phi} = \sqrt{3}E_{3\phi n}$	$E_{2\phi} = 1.5E_{3\phi n}$
Corrente	$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.816$	$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.816$
Potências do lado trifásico (VA)	$S_M = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.816$ $P_M = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$	$S_T = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ $P_T = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$
Potências do lado bifásico (VA)	$S_M = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ $P_M = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$	$S_T = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ $P_T = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$

Tabela II.1 - Relações de tensões, correntes e potências nos transformadores que compõem a conexão Scott.

A partir da tabela II.1 pode-se perceber que a potência aparente do transformador *main* deve ser 15,5% superior à do transformador *teaser* [4]. Isto deve-se, naturalmente, a já verificada defasagem entre as correntes apresentadas na figura II.3.

As características descritas na tabela II.1 é própria da conexão Scott do tipo não intercambiável. Vale ressaltar que existe a conexão Scott do tipo intercambiável que é mostrada em detalhes no apêndice I.

Esta última, embora mais onerosa em termos construtivos, tem a vantagem de necessitar apenas de um transformador reserva que pode vir a substituir tanto o *main* quanto o *teaser*.

II.2.2 - Conexão Arnold

Criada no início do século, a conexão Arnold faz parte dos sistemas básicos obtidos para a transformação de fases [2], [3] e [5]. Esta conexão, é composta por três transformadores monofásicos que formam um banco trifásico no lado primário que está conectado em estrela, sem qualquer modificação em seus enrolamentos. No lado secundário, os enrolamentos possuem uma ligação em delta, sendo que estes enrolamentos possuem *taps* que irão compor o sistema bifásico.

Este será formado de maneira que ao se conectar duas fases em lados opostos, tem-se como efeito que a metade de cada novo fasor estará no mesmo potencial, sendo portanto uma conexão com duas fases separadas eletricamente, ou seja a quatro condutores, como mostrado na figura II.5.

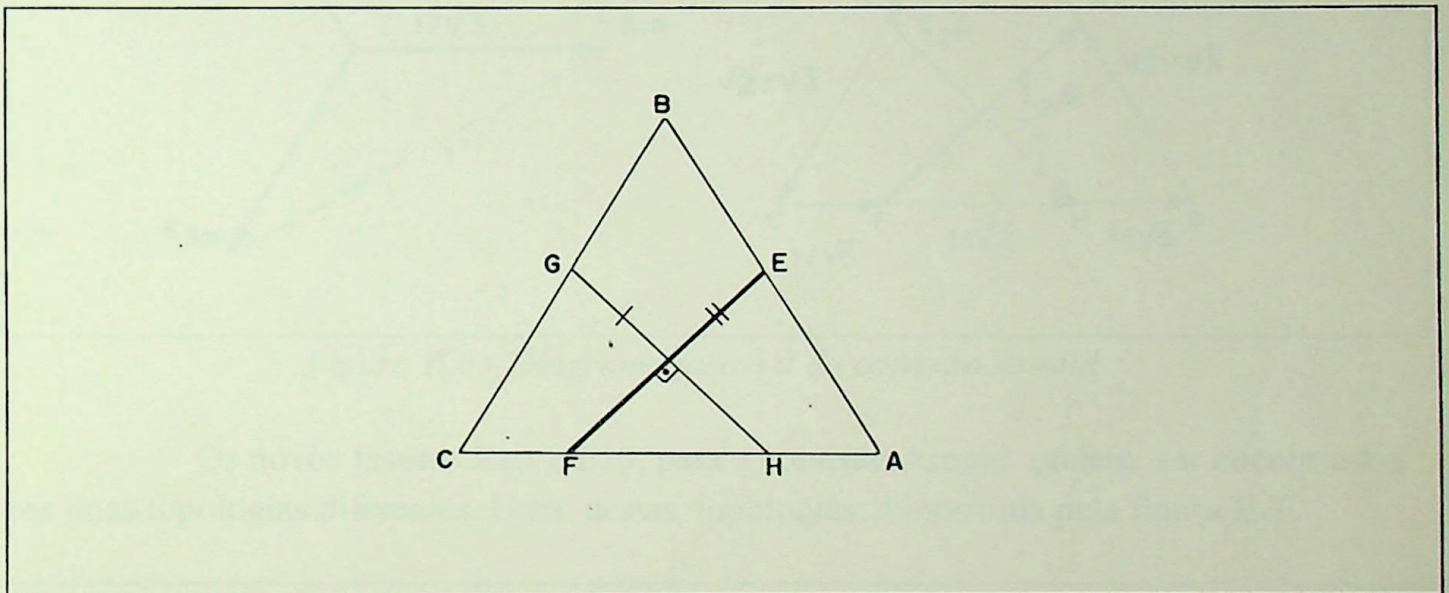


Figura II.5 - Estrutura básica da conexão Arnold

A relação entre os enrolamentos é obtida de maneira tal que as tensões entre fases sejam iguais no lado trifásico e bifásico. Para tanto os transformadores no lado bifásico terão os seguintes *taps*:

$$\text{Transformador 1: taps em F} = 0.408 = \frac{1}{\sqrt{6}} \text{ e em H} = 1.118 = \frac{1}{\sqrt{6}} + \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Transformador 2: tap em E} = 0.816 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Transformador 3: tap em G} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Resultando uma relação de transformação de:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} : 1.524$$

Assim, esta conexão obtém dois fasores deslocados de 90° , constituindo um sistema a quatro condutores, conforme pode ser observado através das ligações mostradas na figura II.6.

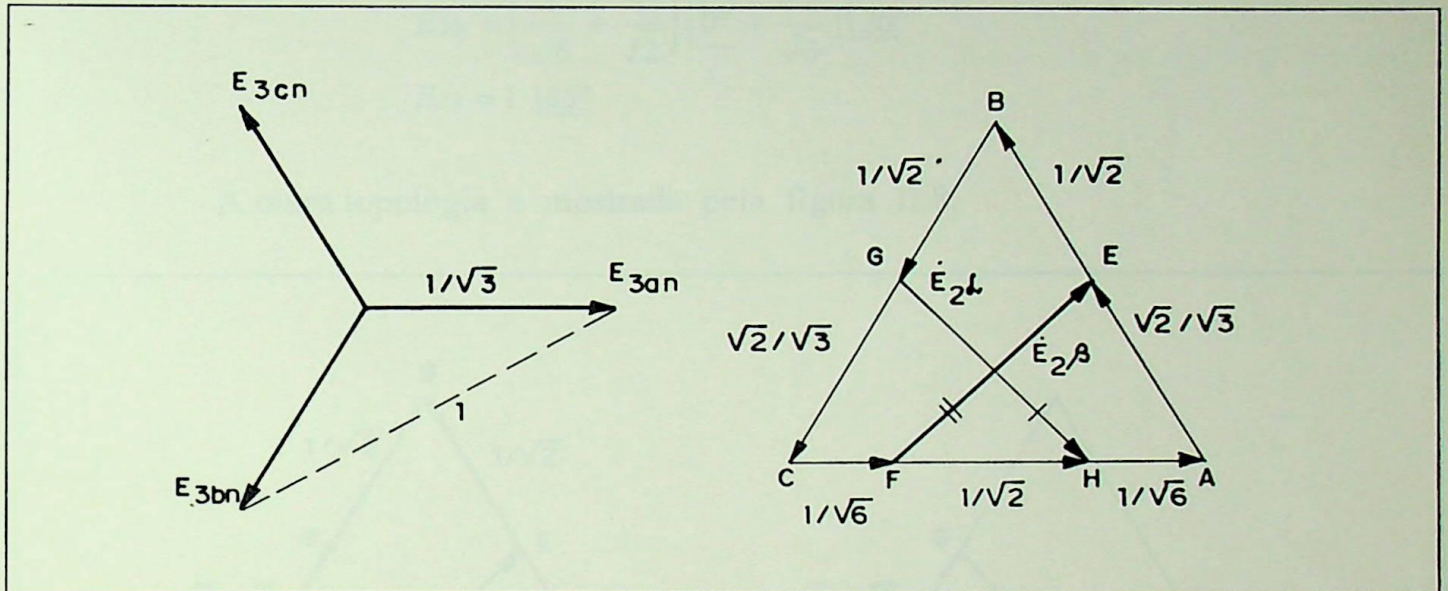


Figura II.6 - Diagrama fasorial da conexão Arnold

Os novos fasores $E_{2\alpha}$ e $E_{2\beta}$, para a conexão Arnold podem ser encontrados por duas topologias diferentes. Uma destas topologias é mostrada pela figura II.7.

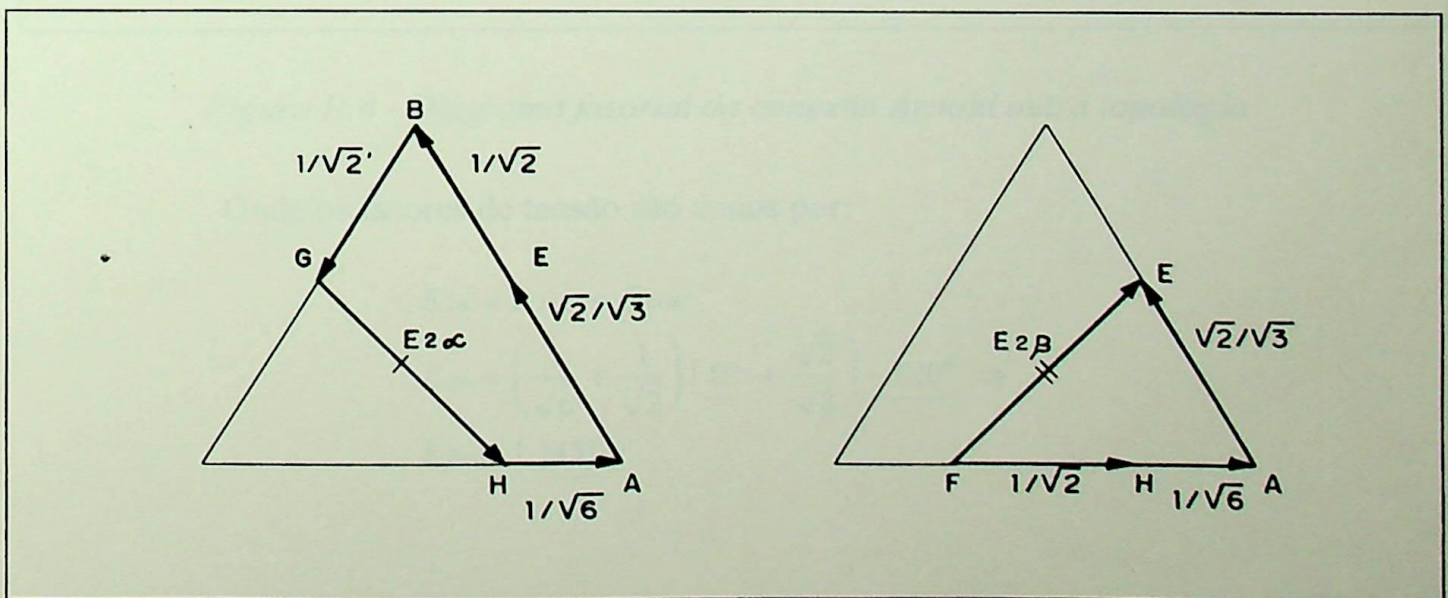


Figura II.7 - Diagrama fasorial da conexão Arnold

Onde os fasores de tensão são dados por:

$$E_{2\alpha} = -E_{2BG} - E_{2AB} - E_{2HA}$$

$$E_{2\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -120^\circ - \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \angle 120^\circ - \frac{1}{\sqrt{6}} \angle 0^\circ \Rightarrow$$

$$E_{2\alpha} = 1 \angle -45^\circ$$

$$E_{2\beta} = E_{2FA} + E_{2AE}$$

$$E_{2\beta} = \left(\frac{1}{\sqrt{6}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \angle 0^\circ + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ$$

$$E_{2\beta} = 1 \angle 45^\circ$$

A outra topologia é mostrada pela figura II.8.

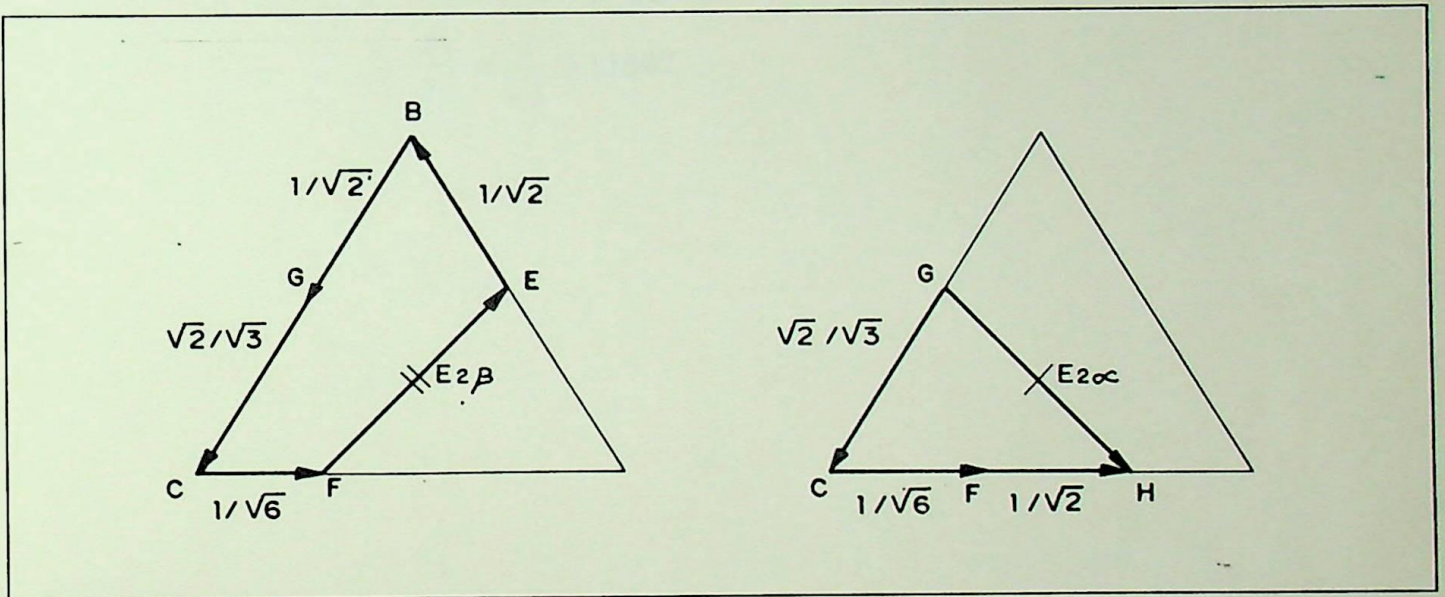


Figura II.8 - Diagrama fasorial da conexão Arnold outra topologia

Onde os fasores de tensão são dados por:

$$E_{2\alpha} = E_{2HC} + E_{2GC}$$

$$E_{2\alpha} = \left(\frac{1}{\sqrt{6}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \angle 0^\circ + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ \Rightarrow$$

$$E_{2\alpha} = 1 \angle 45^\circ$$

$$E_{2\beta} = E_{2CF} + E_{2BC} + E_{2EB}$$

$$E_{2\beta} = \frac{1}{\sqrt{6}} \underline{0^\circ} + \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \underline{-120^\circ} + \frac{1}{\sqrt{2}} \underline{120^\circ}$$

$$E_{2\beta} = 1 \underline{-45^\circ}$$

É importante observar que na conexão Arnold as ligações em delta no lado bifásico continuam presentes e que os fasores $E_{2\alpha}$ e $E_{2\beta}$ são somente derivações em quatro locais do delta formando então um sistema bifásico a quatro condutores, tendo duas fases eletricamente distintas.

$$E_{2\phi} = E_{2\phi''}$$

$$\sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi} = 2 E_{2\phi} I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.1547$$

II.2.3 - Conexão Meyer

É a mais simples das conexões para transformação trifásica-bifásica, esta utiliza três transformadores monofásicos, sendo que seus enrolamentos do lado trifásico podem ser conectados tanto em estrela quanto em delta, não possuindo nestes qualquer modificação [2] e [3].

Nos enrolamentos do lado bifásico, existirão *taps* em pelo menos dois transformadores monofásicos, os quais serão à 57,7% do total do enrolamento.

Considerando-se que a relação das tensões entre fases seja unitária, assume-se que a relação de transformação entre os monofásicos seja $:\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Assim, somente dois transformadores monofásicos possuirão *taps* em 57,7% de seus enrolamentos, ou seja, em $\frac{1}{\sqrt{6}}$.

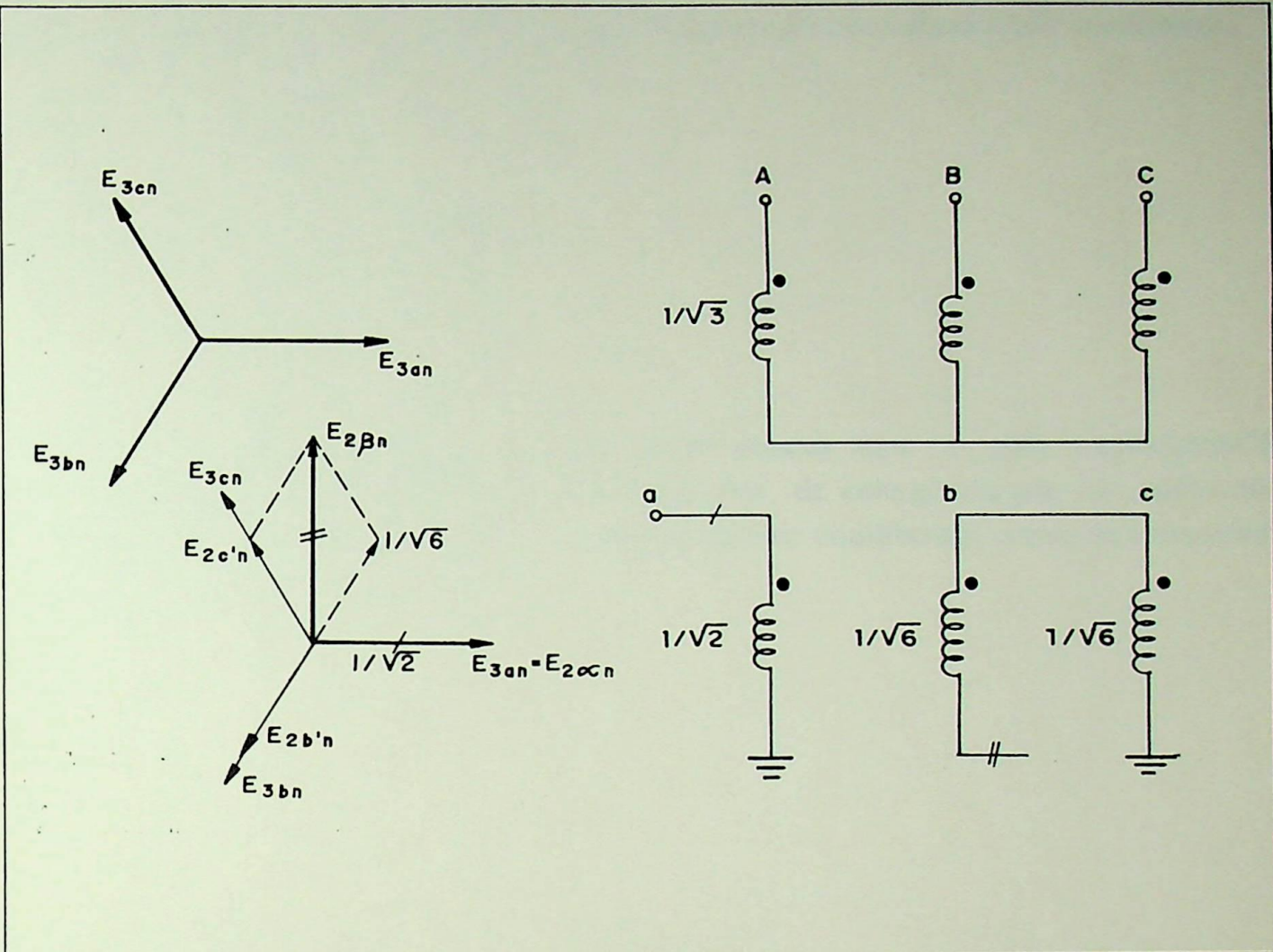
Logo relação entre as tensões será:

$$E_{2\phi n} = E_{2\alpha n} = \frac{E_{2\phi}}{\sqrt{2}}; \quad E_{3\phi} = E_{2\phi}$$

$$E_{2\alpha n} = \frac{E_{3\phi}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} E_{3\phi n}$$

$$\frac{E_{2\alpha n}}{E_{3\phi n}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \frac{N2}{N1}$$

Os diagramas de ligação dos enrolamentos e dos fasores da conexão Meyer, para o caso da ligação em estrela no lado trifásico são mostrados pelas figuras II.9 e II.10.



Figuras - II.9 - Diagrama fasorial de tensões para a conexão Meyer
 - II.10 - Diagrama de ligação da conexão Meyer

Considerando-se seqüência positiva, e que os fasores $E_{2b'n}$ e $E_{2c'n}$ estão na mesma direção dos fasores de tensão E_{3bn} e E_{3cn} , tem-se:

$$E_{2\beta n} = E_{2\phi n} = \frac{1}{\sqrt{6}} (E_{2c'n} - E_{2b'n}) = j \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$|E_{2\alpha n}| = |E_{2\beta n}|$$

Isto resulta em um desfasamento de 90° entre $E_{2\alpha n}$ e $E_{2\beta n}$, e a relação entre as correntes trifásica e bifásica, será a mesma para o sistema a três condutores:

$$E_{2\phi n} = \frac{E_{2\phi n}}{\sqrt{2}}; \quad E_{3\phi} = E_{2\phi}$$

$$\sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi} = 2 \frac{E_{2\phi}}{\sqrt{2}} I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.816$$

A conexão Meyer, até por exigir poucos *taps* e pela simplicidade de suas ligações, somente é utilizada em condições de emergência por não apresentar balanço magnético, considerando-se o sistema elétrico equilibrado, como será mostrado no capítulo seguinte.

II.2.4 - Conexão Steinmetz

A conexão Steinmetz, patenteada em 16/01/1906, foi mais uma das conexões obtidas para a transformação de sistemas trifásicos em bifásicos e vice-versa [2], [3] e [4].

Este sistema de conexão, utiliza dois transformadores monofásicos que são conectados de maneira semelhante à da conexão Scott, com a diferença que os dois lados (trifásico e bifásico) dos transformadores, possuem *taps* e serão conectados da mesma forma que no lado trifásico na conexão Scott.

Assim, os transformadores possuirão *taps* nos enrolamentos primários e secundários, sendo denominado de *main* o transformador com *taps* à 50% e *teaser* o transformador com *taps* à 86,6%.

A relação de transformação para que as tensões de linha nos lados bifásico e trifásico seja unitária será de **1:1**.

O arranjo das ligações e o diagrama de fasores é mostrado nas figuras II.11 a) e b), com o percentual dos enrolamentos:

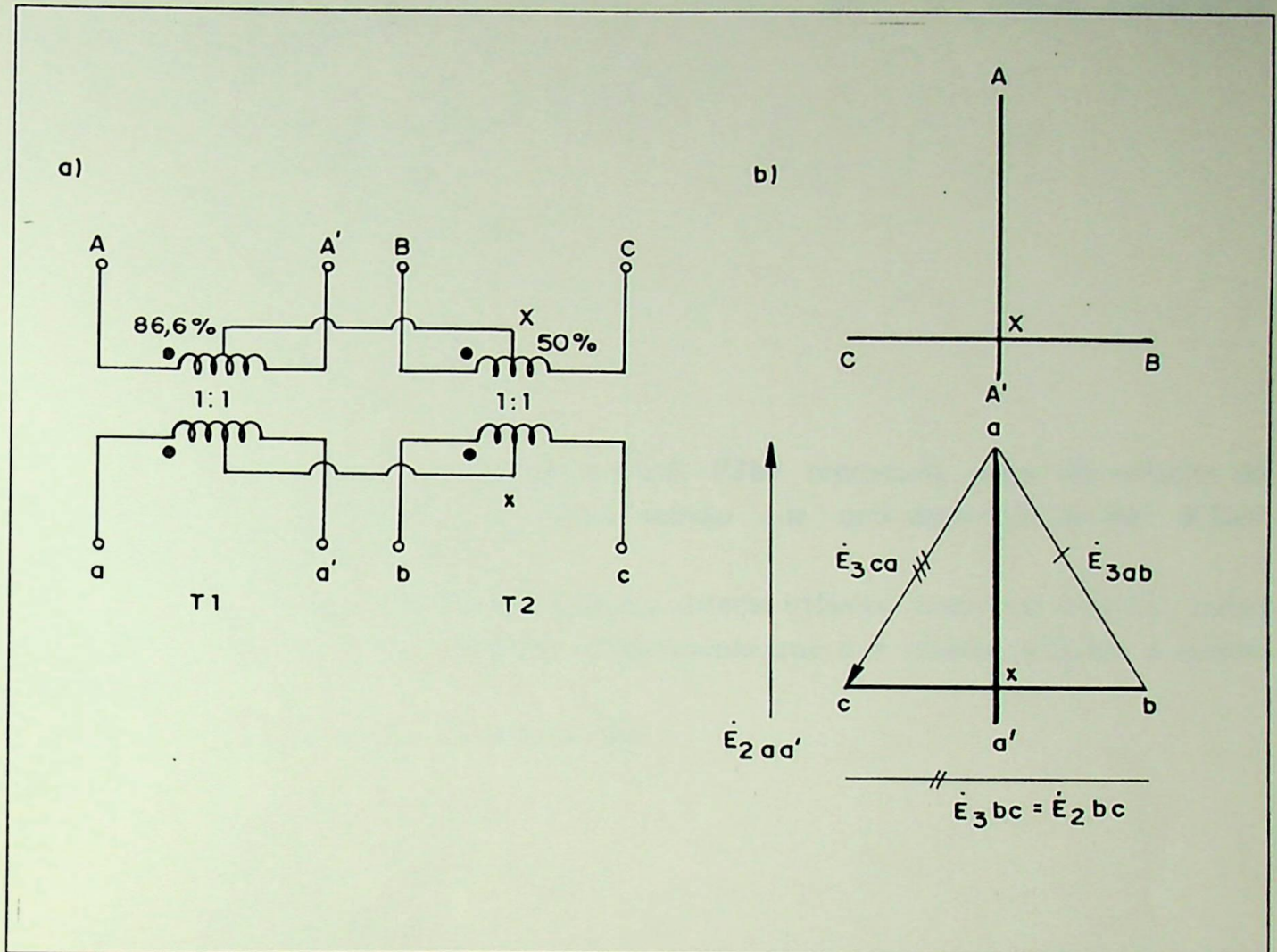


Figura II.11 - Diagramas da conexão Steinmetz

a) Ligações elétricas

b) Fasorial de tensões

onde:

Tensões trifásicas : $E_{3\phi} = E_{3ab} = E_{3bc} = E_{3ca}$
 (primário) $E_{3\phi} = E_{3AB} = E_{3BC} = E_{3CA}$

Tensões bifásicas: $E_{2\phi} = E_{2aa'} = E_{2bc}$
 (secundário)

Supondo-sequência de fases positiva para o sistema alimentador trifásico, as fases serão:

$$E_{3AB} = 1 \mid \underline{120^\circ} = E_{3ab}$$

$$E_{3BC} = 1 \mid \underline{0^\circ} = E_{3bc}$$

$$E_{3CA} = 1 \mid \underline{-120^\circ} = E_{3ca}$$

$$E_{2bc} = E_{3BC} = 1 \mid \underline{0^\circ}$$

$$E_{2aa'} = E_{3ax} + E_{2xa'} = j$$

Para a conexão Steinmetz, a tensão **E3bc** representa uma das tensões do lado bifásico ou seja **E2a** e a outra tensão que está deslocada de 90° **E2aa'** representa a tensão bifásica **E2b**.

Assim, esta conexão transforma o sistema trifásico tanto em trifásico, como em bifásico com duas fases distintas eletricamente que é o sistema bifásico a quatro condutores.

A relação entre as correntes será:

$$E_{2\phi} = E_{2\phi n}; E_{3\phi} = E_{2\phi}$$

$$\sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi} = 2 E_{3\phi} I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.1547$$

II.2.5 - Conexão Taylor

A conexão Taylor foi patenteada em 29/10/1907, sendo formada pela utilização de três transformadores monofásicos, ou apenas dois [2] e [6].

Esta conexão tem a característica de conseguir dois tipos de transformação, uma trifásica-bifásica e outra trifásica-trifásica, podendo ainda estes dois sistemas de transformação operar simultaneamente.

Utilizando-se dois transformadores monofásicos, os enrolamentos do lado trifásico (assumir primário) serão conectados em delta-aberto e no lado bifásico (assumir secundário) um dos transformadores possuirá *taps* em 50% e 86.6% de seu enrolamento sendo conectado como mostrado na figura II.12 a).

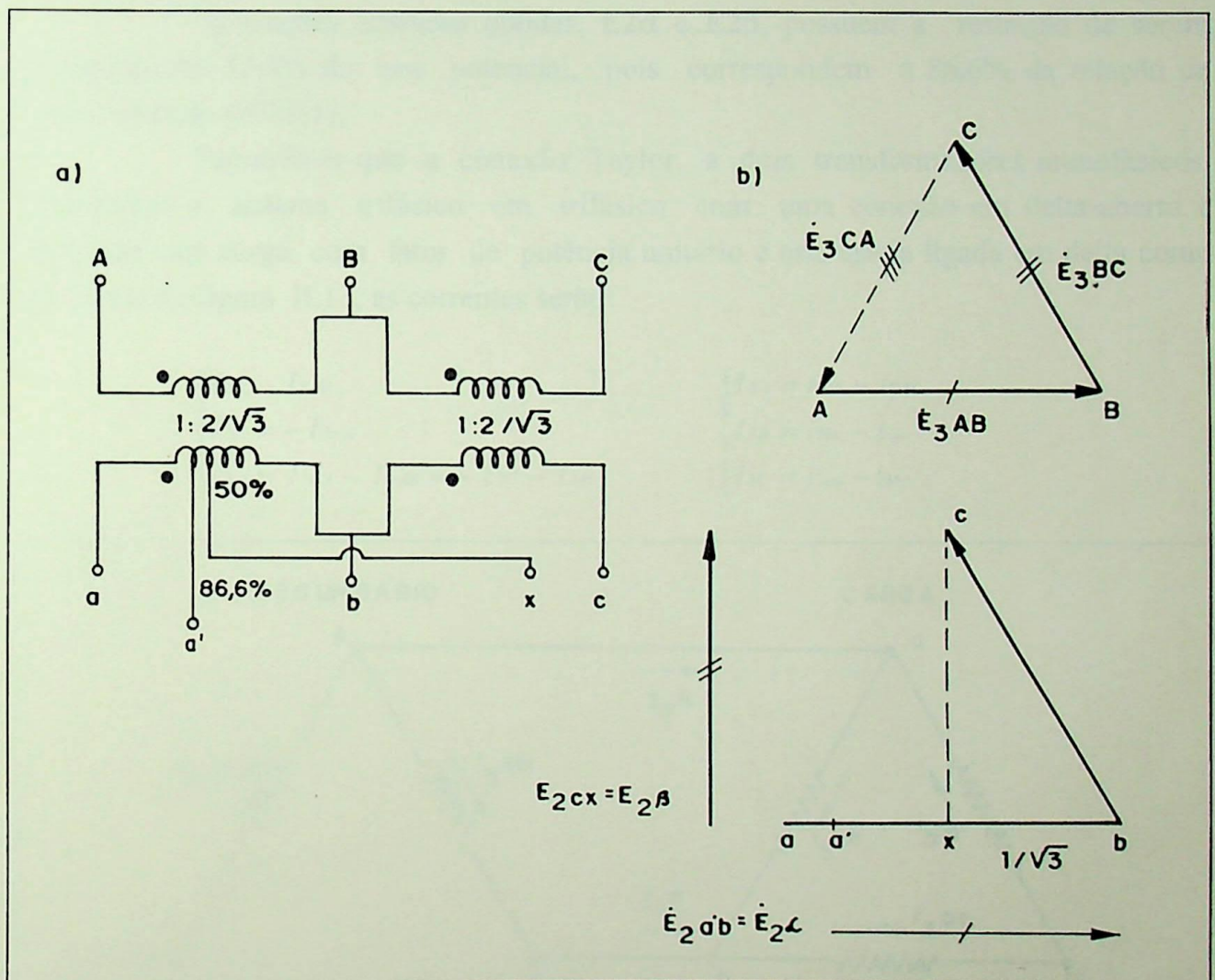


Figura II.12 - Conexão Taylor com dois transformadores monofásicos

a) Diagrama de ligações elétricas

b) Diagrama fasorial de tensões

Note-se na figura II.12 b) que são formados dois tipos de defasamento entre os fasores de tensão, sendo um de 120° e outro de 90° . Os fasores de tensão deslocados de 120° são os fasores E_{3ab} , E_{3bc} e E_{3ca} que formam um sistema trifásico-trifásico, e os fasores $E_{2a'b} = E_{2\alpha}$ e $E_{2cx} = E_{2\beta}$ formam o sistema trifásico-bifásico.

$$E_{2\alpha} = E_{2a'b} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_{2ab}$$

$$E_{2\alpha} = 1 \underline{0^\circ}$$

$$E_{2\beta} = E_{2cx} \Rightarrow (E_{2cx})^2 = (E_{2bc})^2 - (E_{2xb})^2$$

$$E_{2\beta} = 1 \underline{90^\circ}$$

As tensões bifásicas obtidas, $E_{2\alpha}$ e $E_{2\beta}$, possuem a restrição de serem reduzidas em 13,4% de seu potencial, pois correspondem a 86,6% da relação de transformação ($N_2:N_1$).

Supondo-se que a conexão Taylor, a dois transformadores monofásicos, transforme o sistema trifásico em trifásico com uma conexão em delta-aberto e alimente uma carga com fator de potência unitário e esta esteja ligada em delta como mostrada na figura II.13, as correntes serão:

$$\begin{cases} I_{3B} = I_{3AB} \\ I_{3C} = -I_{3CA} \\ I_{3A} = I_{3CA} - I_{3AB} = -I_{3C} - I_{3B} \end{cases} \quad \begin{cases} I_{3A} = i_{3ab} - i_{3ca} \\ I_{3B} = i_{3bc} - i_{3ab} \\ I_{3C} = i_{3ca} - i_{3bc} \end{cases}$$

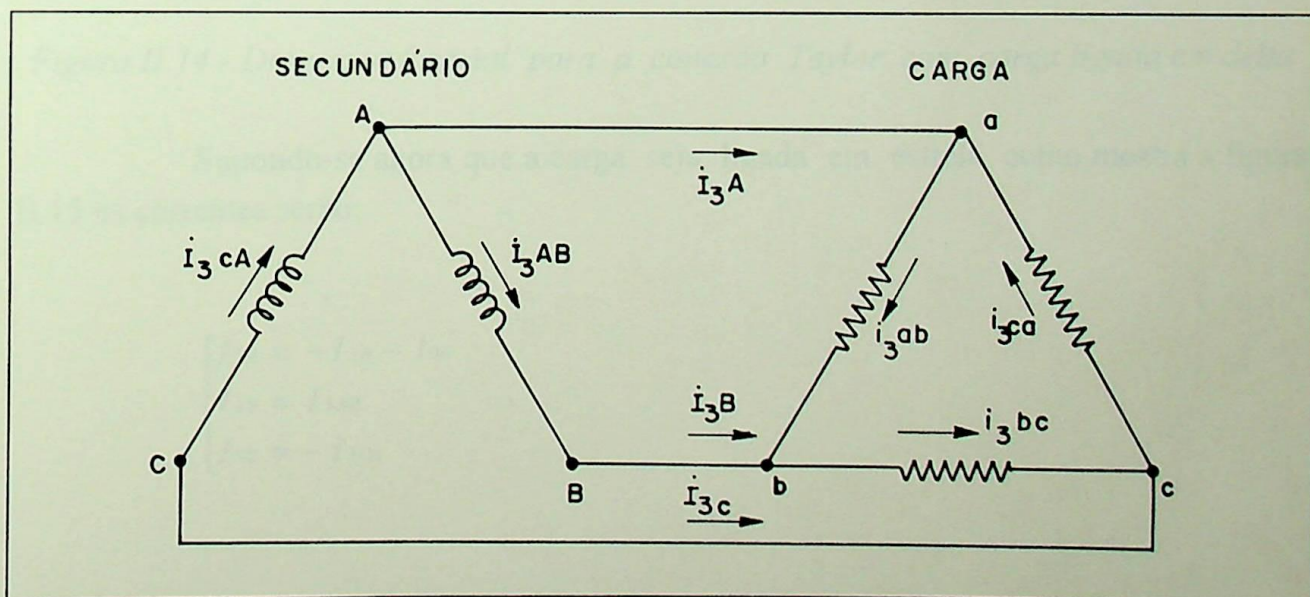


Figura II.13 - Diagrama de ligação da conexão Taylor com secundário em delta-aberto com carga em delta

O diagrama fasorial de tensões e correntes para a carga conectada em delta é mostrado na figura II.14.

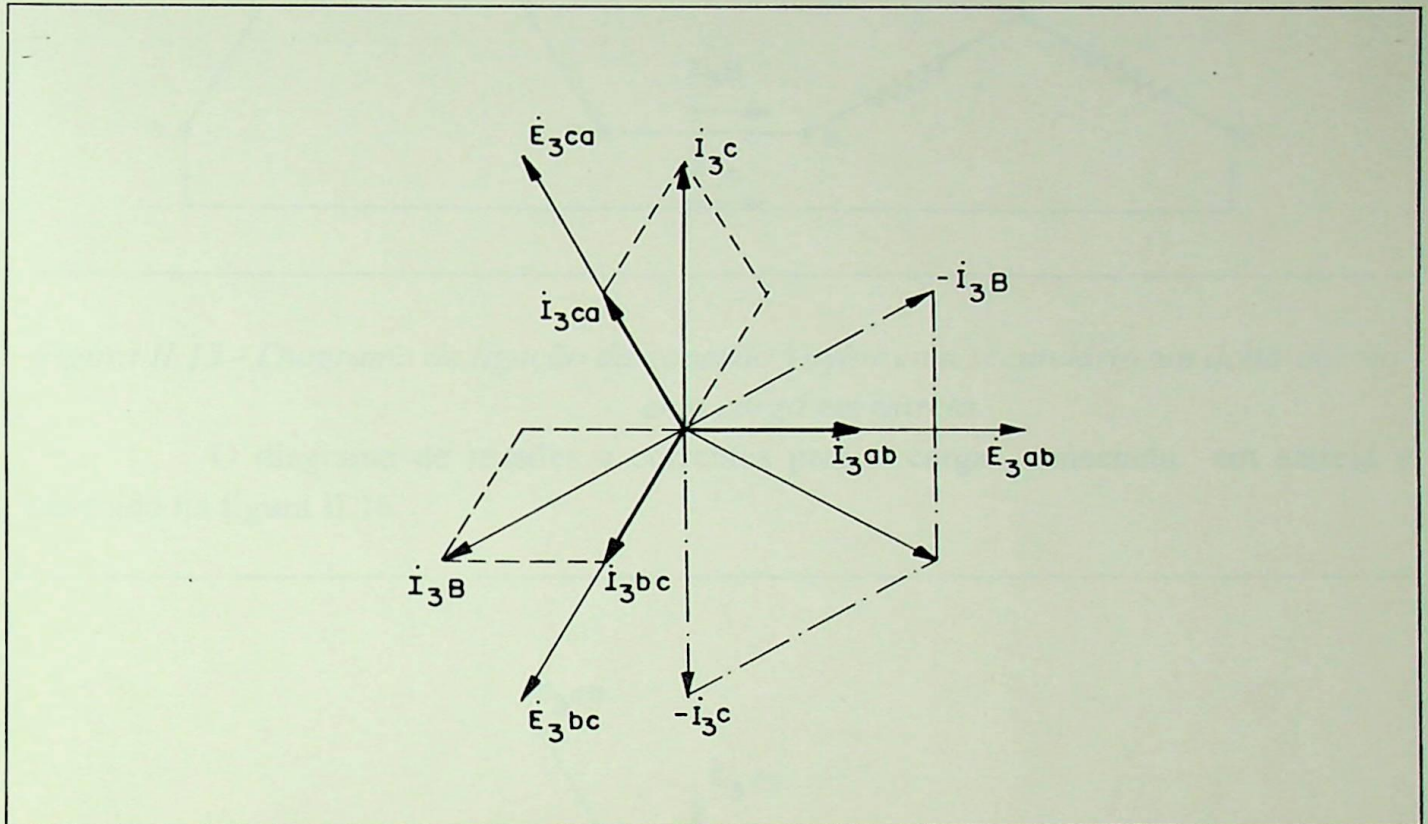


Figura II.14 - Diagrama fasorial para a conexão Taylor com carga ligada em delta

Supondo-se agora que a carga seja ligada em estrela como mostra a figura II.15 as correntes serão:

$$\begin{cases} I_{3A} = -I_{3B} - I_{3C} \\ I_{3B} = I_{3AB} \\ I_{3C} = -I_{3CA} \end{cases}$$

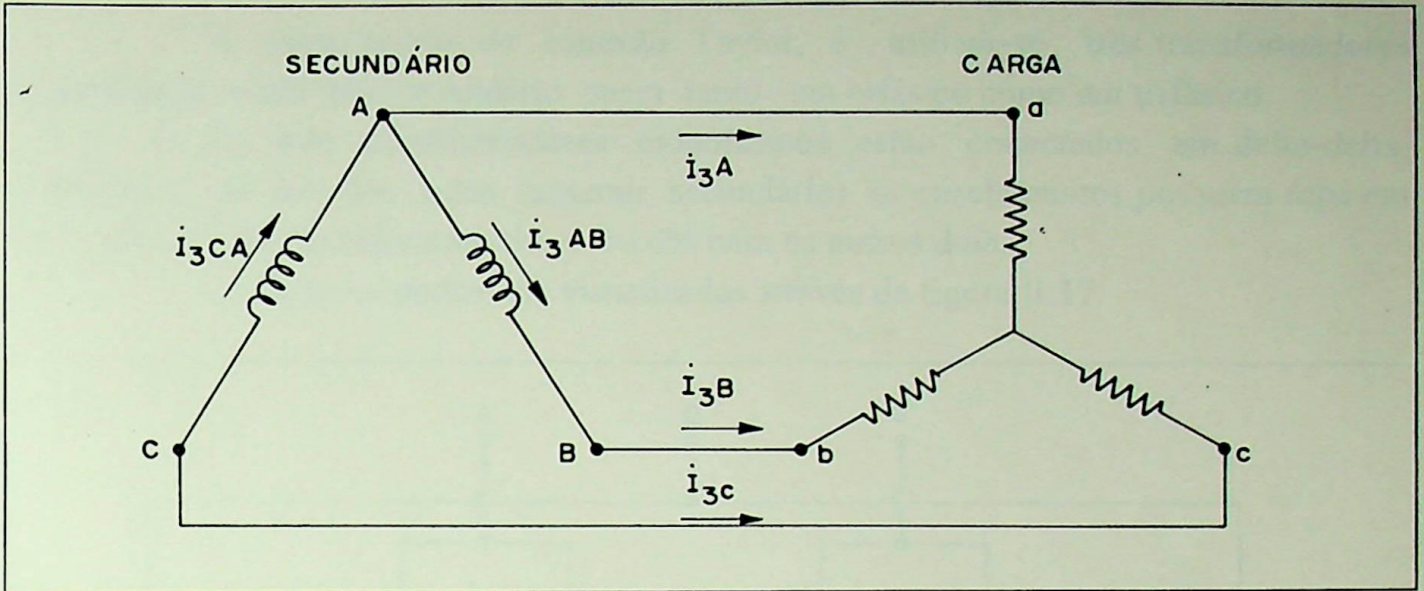


Figura II.15 - Diagrama de ligação da conexão Taylor com secundário em delta-aberto com carga em estrela

O diagrama de tensões e correntes para a carga conectada em estrela é mostrado na figura II.16.

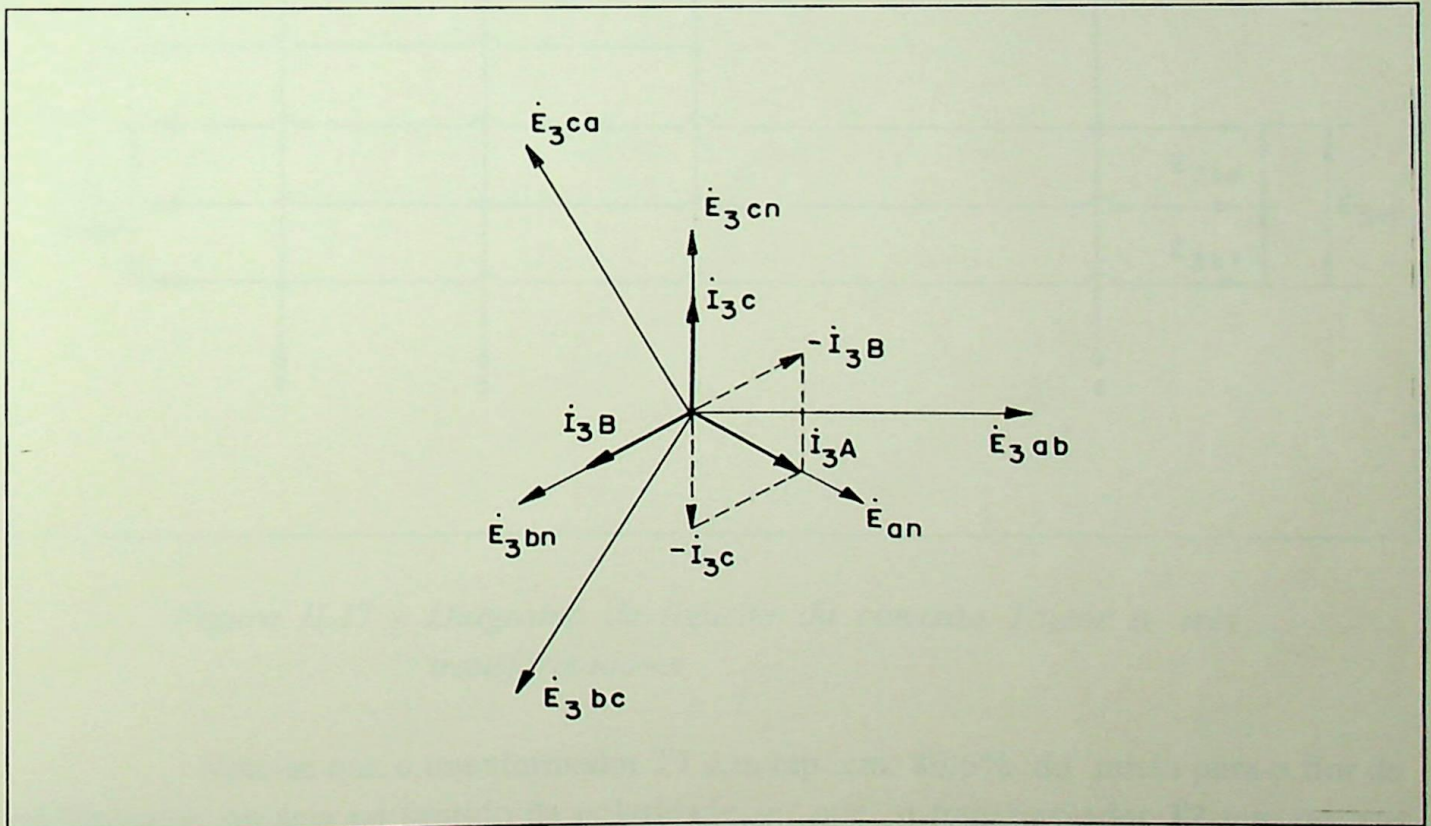


Figura II.16 - Diagrama fasorial para a conexão Taylor com carga ligada em estrela

A outra opção da conexão Taylor, é utilizar-se três transformadores monofásicos onde seu secundário opera tanto em bifásico como em trifásico.

Os três transformadores monofásicos estão conectados em delta-delta, sendo que em um dos lados (assumir secundário) os enrolamentos possuem *taps* em 50% para um dos transformadores e 86,6% para os outros dois.

As ligações podem ser visualizadas através da figura II.17.

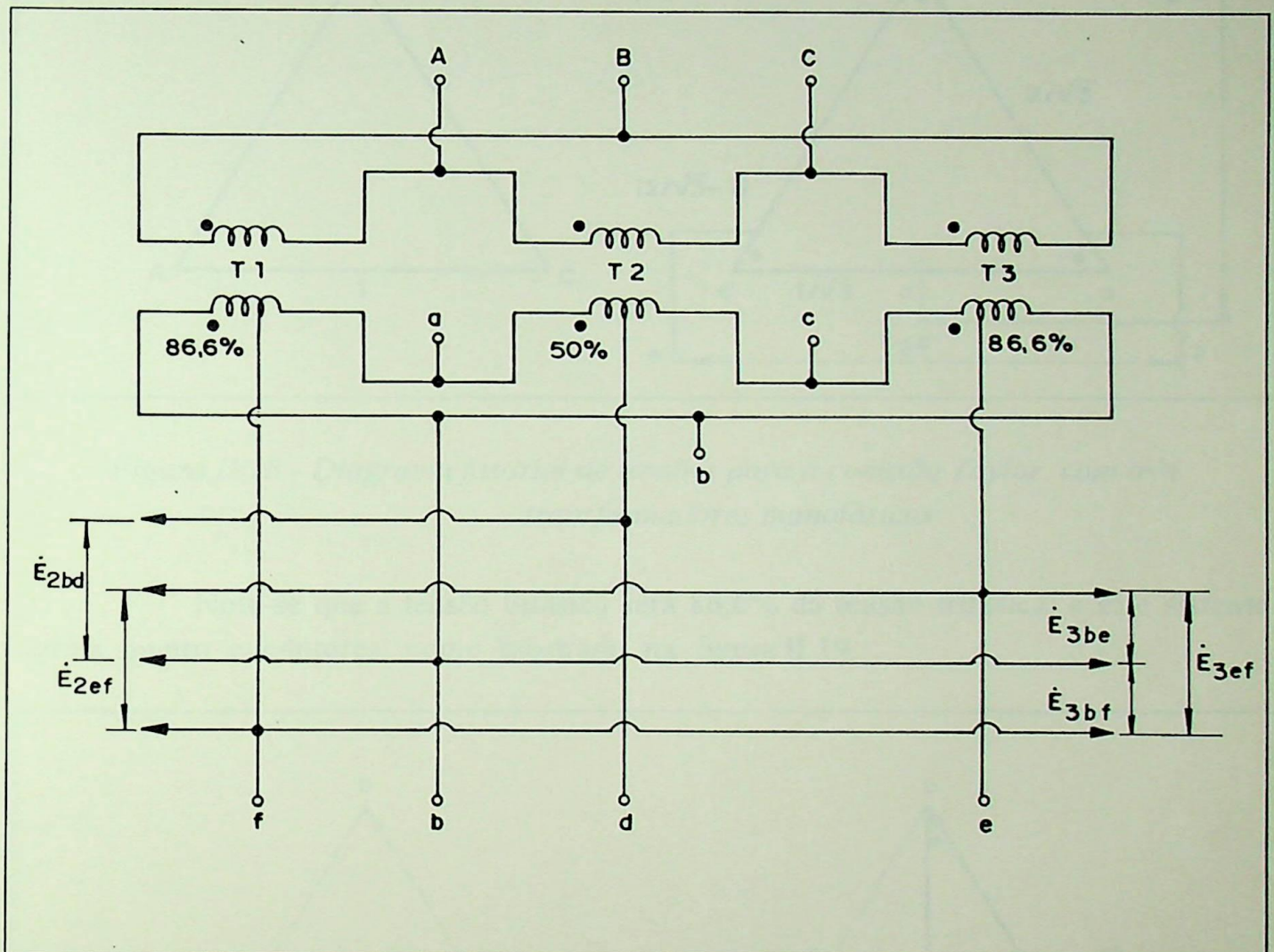


Figura II.17 - Diagrama de ligação da conexão Taylor a três transformadores

Note-se que o transformador T1 tem tap em 86,6% do início para o fim do enrolamento, ou seja no sentido da polaridade e que o transformador T2 tem tap em 86,6% do fim para o início do enrolamento, ou seja contra a polaridade.

As tensões trifásicas no secundário são dadas pelos fasores E_{3bf} , E_{3ef} e E_{3be} e as tensões bifásicas pelos fasores $E_{2\alpha} = E_{2ef}$ e $E_{2\beta} = E_{2bd}$, como pode ser verificado pelo diagrama fasorial de tensões mostrado na figura II.18.

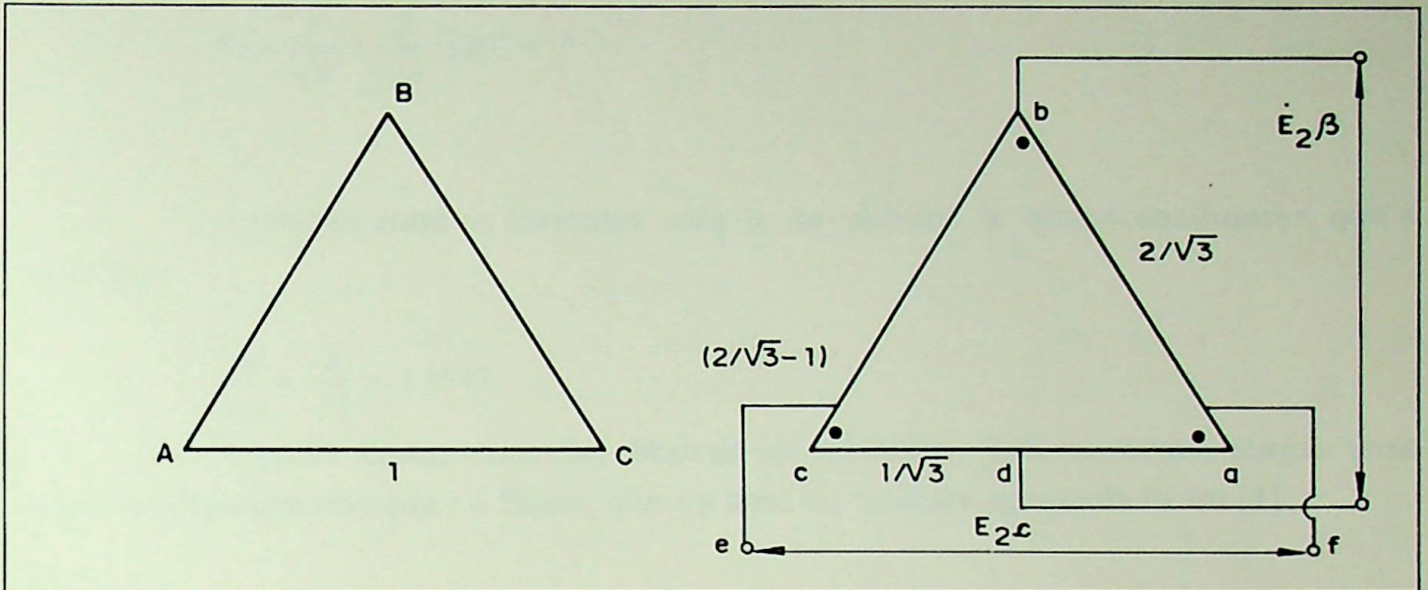


Figura II.18 - Diagrama fasorial de tensões para a conexão Taylor com três transformadores monofásicos

Nota-se que a tensão bifásica será 86,6% da tensão trifásica, e este sistema será a quatro condutores, como mostrado na figura II.19.

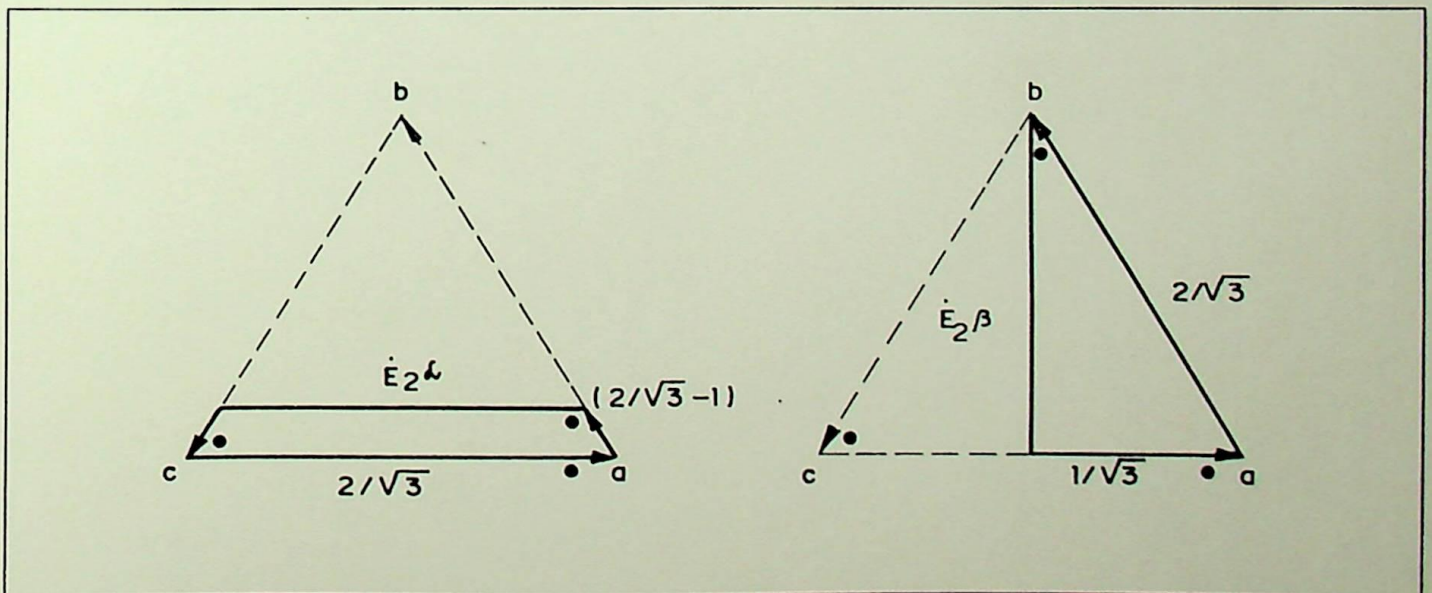


Figura II.19 - Diagrama fasorial de tensões bifásicas

Logo:

$$E_{2\alpha} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \angle -120^\circ + \frac{2}{\sqrt{3}} + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \angle 120^\circ = 1 \angle 0^\circ$$

$$E_{2\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ = j$$

A relação entre as correntes será a do sistema a quatro condutores, que é dada por:

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.1547$$

A partir destas conexões básicas apresentadas anteriormente, surgiu uma outra conexão denominada Le Blanc, que é a base do sistema apresentado em [1].

II.6 - Conexão Le Blanc

Apesar do grande uso da conexão Scott no passado, esta apresentava algumas desvantagens como o grande peso e tamanho dos transformadores monofásicos usados nesta conexão quando comparados com transformadores trifásicos de mesma potência.

Então, também no início do século XX, surgiu entre as diversas conexões alternativas, a conexão Le Blanc. Por surgir após as outras conexões, esta conexão não obteve a mesma popularidade, chegando mesmo na atualidade a ser desconhecida e pouco citada na bibliografia técnica [1], [2] e [4].

O emprego desta conexão alternativa, possui a vantagem de usar-se um transformador com núcleo trifásico, fornecendo então um transformador mais leve e menor do que qualquer grupo monofásico de três transformadores monofásicos.

Para melhor compreensão desta conexão, são feitas algumas conjecturas de como se teria obtido a transformação do sistema bifásico em trifásico pela conexão Le Blanc.

A obtenção de um sistema bifásico, com deslocamento de 90° entre as fases, pode ser facilmente obtido de um sistema trifásico.

Assim, como neste sistema trifásico os fasores de tensão fase-neutro possuem módulos iguais a $\frac{1}{\sqrt{3}}$ e estão defasados de 120° , as possíveis somas fasoriais entre eles que resultam em um deslocamento de 90° são mostradas na figura II.20 e são dadas por:

$$E_{3ac} = 1 \left| \underline{-30^\circ} \right.; E_{3cb} = 1 \left| \underline{90^\circ} \right.; E_{3bc} = 1 \left| \underline{210^\circ} \right.$$

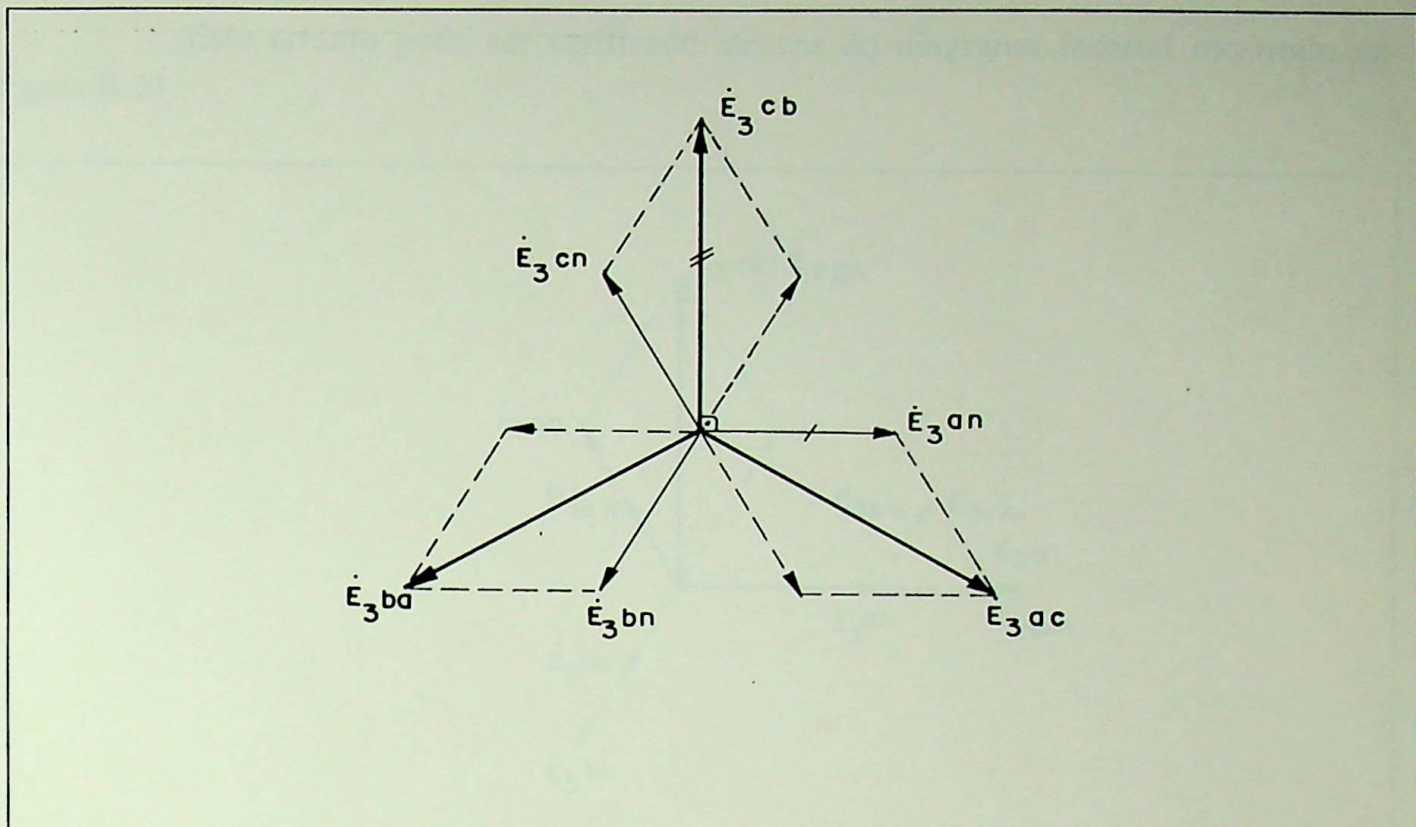


Figura II.20 Diagrama fasorial da soma das tensões fase-neutro

Observa-se então, que a soma fasorial entre E_{3nb} e E_{3cn} resultou em um fasor E_{3cb} deslocado 90° de E_{3an} , mas $\sqrt{3}$ vezes maior do que E_{3an} , resultando assim em um sistema desbalanceado. A solução proposta por Le Blanc, partindo-se do diagrama anterior, é manter-se a soma entre E_{3nb} e E_{3cn} e adicionar-se ao fasor E_{3an} um outro que corresponda à diferença de módulo existente entre E_{3cb} e E_{3an} , e que equilibre as forças magnetomotrizas, ou seja obtenha o balanço elétrico e magnético.

Para manter-se este balanço será necessário acrescentar-se o fasor E_{3an} em 15,47% (aumento no tamanho do enrolamento), o que corresponde a $\frac{2}{3}$ do módulo do fasor E_{3cb} . O restante, ou seja $\frac{1}{3}$, será formado pela soma fasorial de dois novos fasores $E_{3b'n}$ e $E_{3c'n}$, que terão módulos iguais a um terço de E_{3cb} e ângulos nas direções de E_{3bn} e E_{3cn} respectivamente.

Este arranjo pode ser verificado através do diagrama fasorial mostrado na figura II.21.

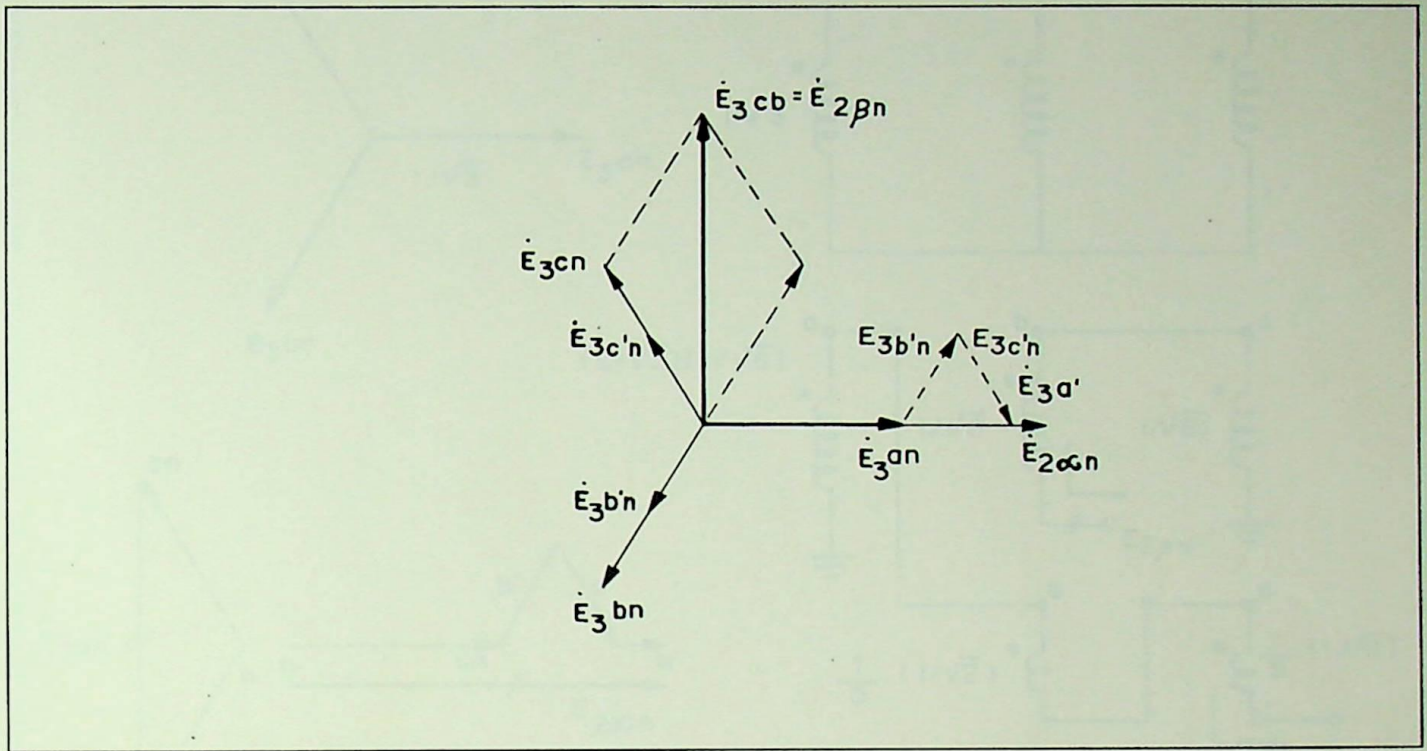


Figura II.21 - Diagrama fasorial da conexão Le Blanc

Para a construção dos diagramas de ligação dos enrolamentos, considera-se o lado trifásico conectado tanto em estrela como em delta e o lado bifásico com as relações dos enrolamentos equivalentes à do diagrama fasorial anterior. Assim, é mostrada na figura II.22, os diagramas fasorial e de ligação para o primário conectado em estrela.

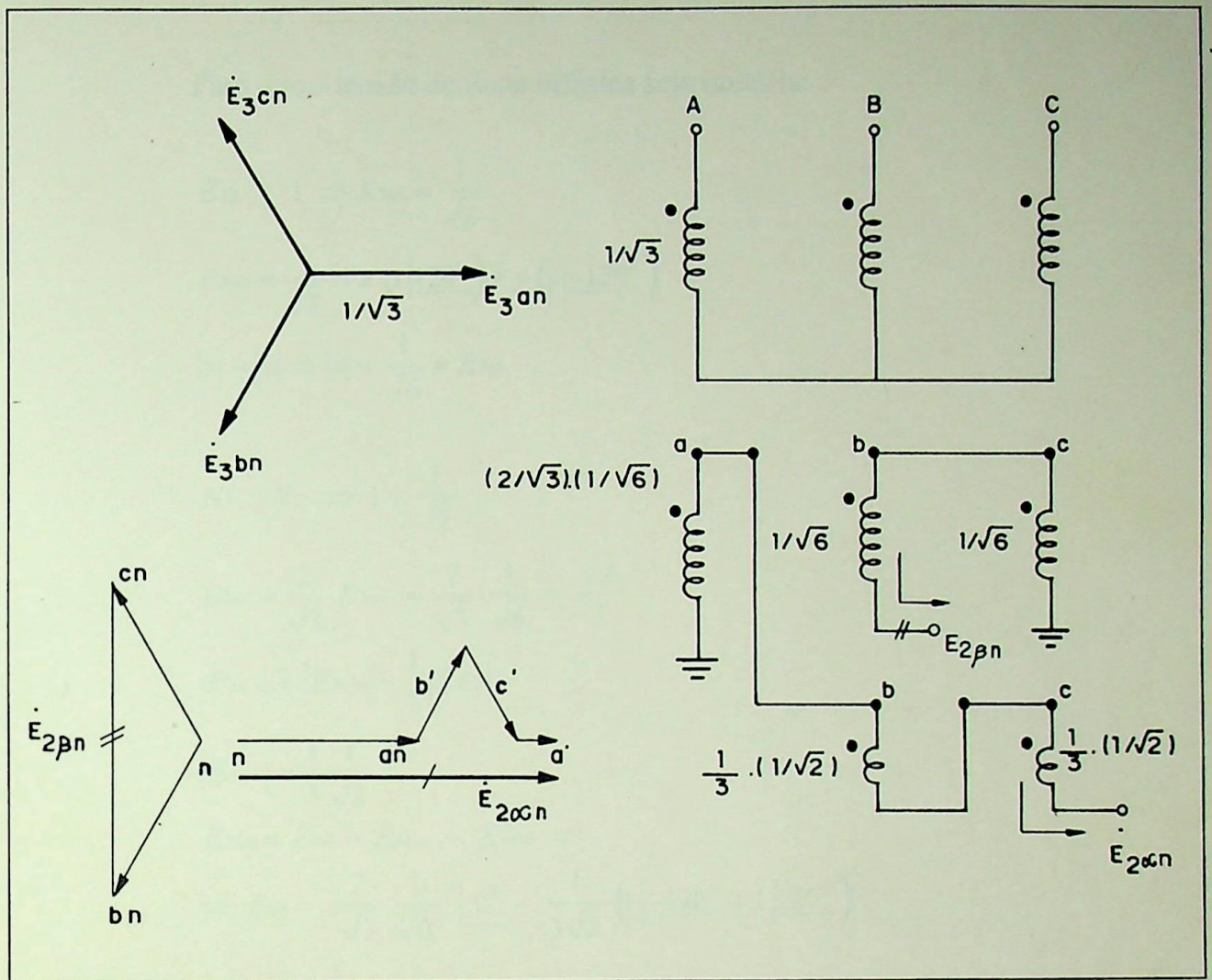


Figura II.22 - Diagramas de ligação e fasorial para o primário conectado em estrela

Resumindo, o fasor E_{3cb} é obtido pela soma fasorial das tensões E_{3nb} e E_{3cn} que corresponderá a fase E_{2bn} do sistema bifásico, e a fase E_{2an} será obtida por um fasor de módulo 1,1547 vezes o módulo de E_{3an} mais a soma fasorial de $E_{3b'n}$ e $E_{3c'n}$ que correspondem a 33,3% de $E_{2\beta n}$.

Logo, para manter-se a relação unitária entre as tensões de fase, $E_{3\phi} = E_{2\phi}$ a relação de transformação será dada por $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ($N_1 : N_2$), e os valores dos novos fasores serão:

Para que a tensão de linha bifásica seja unitária:

$$E_{2\phi} = 1 \Rightarrow E_{2\phi n} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$E_{2\beta n} = \frac{1}{\sqrt{2}} = x \left(1 \mid 120^\circ\right) - y \left(1 \mid -120^\circ\right)$$

$$|x| = |y| \Rightarrow |x| = \frac{1}{\sqrt{6}} = E_{3an}$$

$$N_1 : N_2 \Rightarrow 1 : \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$E_{3a'} = \frac{2}{\sqrt{3}} E_{3an} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{6}} = \frac{\sqrt{2}}{3}$$

$$|E_{3b'n}| = |E_{3c'n}| = \frac{1}{3} |E_{3CB}|$$

$$|E_{3b'n}| = \frac{1}{3} \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$E_{2cn} = E_{3a'} - E_{3b'n} - E_{3c'n} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{cn} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{6}} \mid 0^\circ - \frac{1}{3\sqrt{2}} \left(1 \mid -120^\circ + 1 \mid 120^\circ\right)$$

$$\Rightarrow E_{cn} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mid 0^\circ$$

E a relação entre as correntes será dada por:

$$E_{3\phi} = E_{2\phi}$$

$$S_{3\phi} = S_{2\phi} \Rightarrow \sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi} = \sqrt{2} E_{2\phi} I_{2\phi}$$

$$\frac{I_{3\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Os diagramas de ligação e fasorial para a conexão Le Blanc, com o primário conectado em delta são mostrados pelas figuras II.23 e II.24.

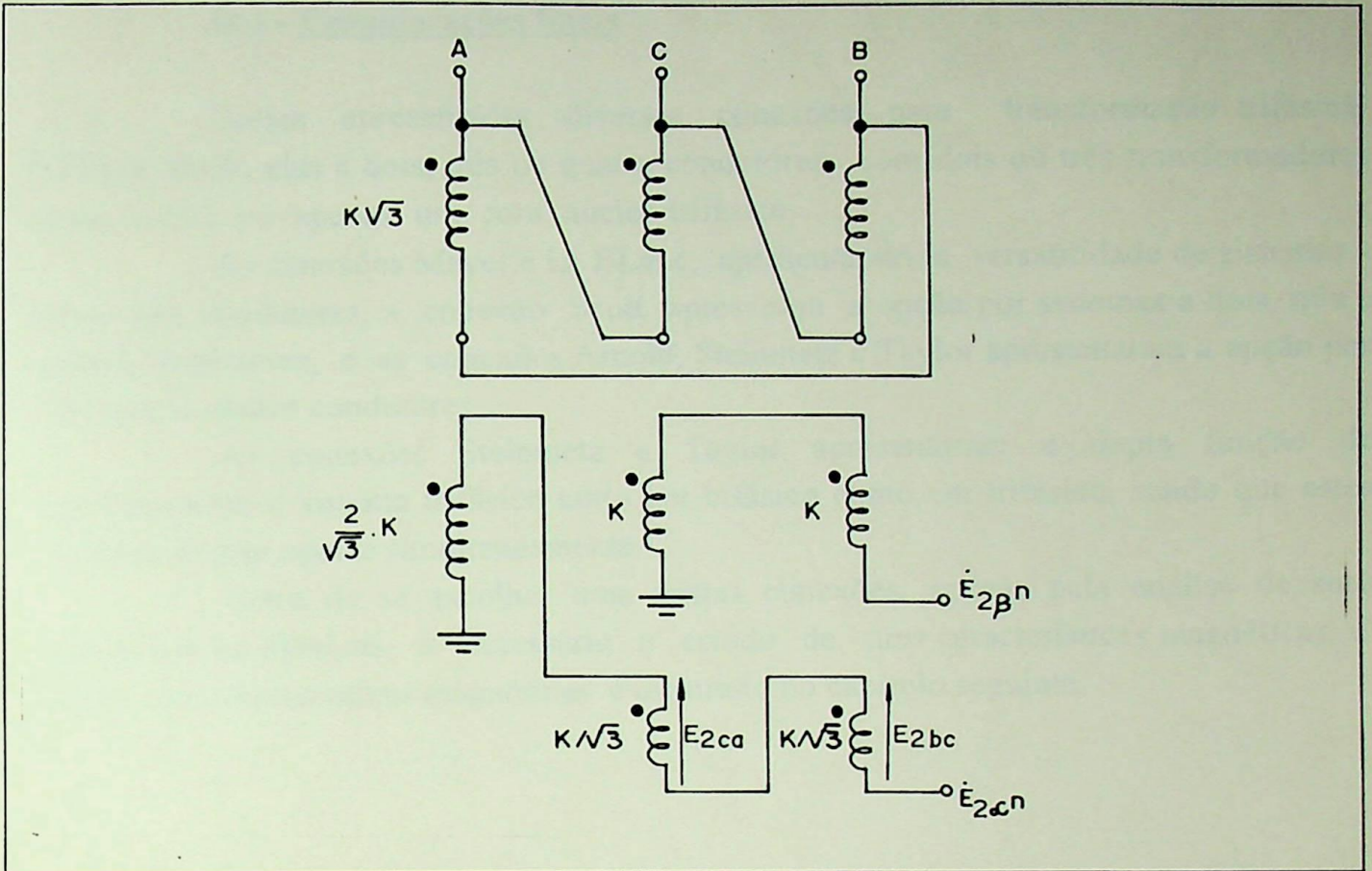


Figura II.23 - Diagramas de ligação para o primário conectado em delta

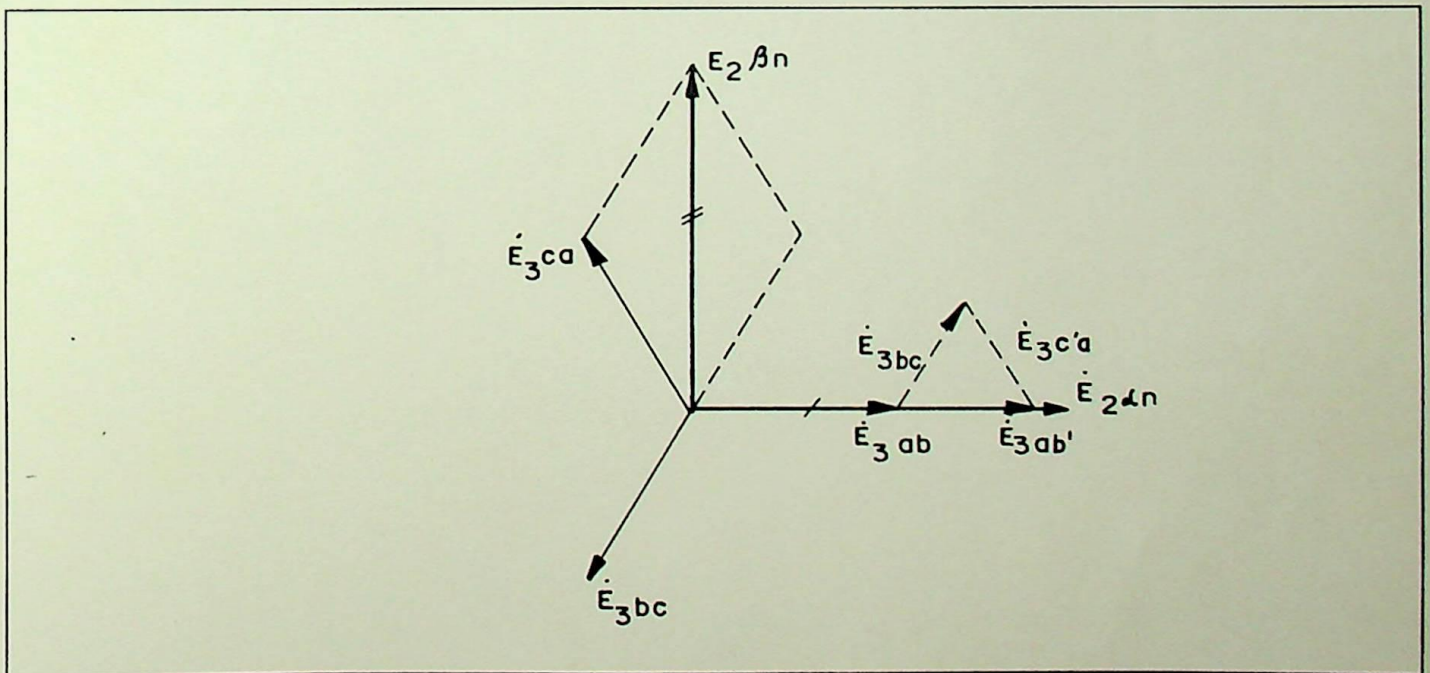


Figura II.24 - Diagrama fasorial para o primário ligado em delta

II.3 - Considerações finais

Foram apresentadas diversas conexões para transformação trifásica-bifásica, sendo elas a dois, três ou quatro condutores, com dois ou três transformadores monofásicos ou apenas um com núcleo trifásico.

As conexões Meyer e Le Blanc, apresentaram a versatilidade de sistemas a dois e três condutores, a conexão Scott apresentou a opção por sistemas a dois, três e quatro condutores, e as conexões Arnold, Steinmetz e Taylor apresentaram a opção por sistemas a quatro condutores.

As conexões Steinmetz e Taylor apresentaram a dupla função de transformarem o sistema trifásico tanto em bifásico como em trifásico, sendo que estes sistemas podem operar simultaneamente.

Antes de se escolher uma destas conexões, apenas pela análise de suas características elétricas, é necessário o estudo de suas características magnéticas. O estudo das características magnéticas é mostrado no capítulo seguinte.

□

2.1 - Considerações

Este capítulo tem como objetivo analisar as condições de equilíbrio e estabilidade de sistemas magnetomotrizes em regime permanente. Para isso, serão considerados os balanços de energia e momento angular em cada elemento do sistema, considerando a interação entre os campos magnéticos e as correntes elétricas. A análise será feita considerando o sistema como um todo e também para cada um dos seus elementos, visando estabelecer as condições de equilíbrio e estabilidade.

A força magnetomotriz produzida no núcleo de um transformador é dada pela expressão $F = \frac{1}{2} \frac{dW}{dx}$, onde W é a energia armazenada no campo magnético e x é a distância entre os polos. Esta expressão pode ser utilizada para determinar a força magnetomotriz em função das características físicas do sistema.

$$F = \frac{1}{2} \frac{dW}{dx} \quad (1)$$

CAPÍTULO III - BALANÇO DAS FORÇAS MAGNETOMOTRIZES

- 1 - Balanço energético
- 2 - Balanço de momento angular
- 3 - Balanço de potência magnetomotriz

De acordo com a Lei III, a energia elétrica fornecida ao sistema é convertida em energia mecânica e calor. O balanço de energia pode ser escrito da seguinte forma: $P_{in} = P_{mech} + P_{calor}$. Considerando-se o transformador da Figura III.1, temos:

$$P_{in} = P_{out} + P_{perdas} = P_{mech} + P_{calor} + P_{perdas} \quad (III.1)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{perdas} = P_{mech} + P_{calor} + P_{perdas} \quad (III.2)$$

- onde:
- P_{in} - Potência de entrada
- P_{out} - Potência de saída
- P_{perdas} - Perdas no sistema
- P_{mech} - Potência mecânica
- P_{calor} - Potência dissipada em calor
- P_{perdas} - Perdas no sistema

III - Balanço das forças magnetomotrizes (f.m.m.)

III.1 - Considerações iniciais

Após o estudo das características elétricas das conexões básicas, é necessário observar-se a existência do balanço magnético destas conexões. Assim, é verificado o balanço magnético em cada transformador monofásico, procedendo-se o estudo em cada fase individualmente e para o transformador com núcleo trifásico é verificado se a soma dos amperes-espiras em cada fase dos enrolamentos é igual a zero. A esta técnica dá-se o nome de balanço das forças magnetomotrizes.

A força magnetomotriz produzida no núcleo de um transformador, é função do número de espiras dos enrolamentos dispostos sobre o núcleo e da corrente que atravessa estes enrolamentos [5], assim a **f.m.m.**, pode ser dada por:

$$\Rightarrow \mathfrak{F} = N I (A)$$

onde:

\mathfrak{F} - força magnetomotriz;

N - número de espiras do enrolamento;

I - corrente que percorre o enrolamento.

O sentido da **f.m.m.**, é o mesmo adotado para as polaridades das correntes, ou seja utiliza-se da regra da marcação dos pontos nos enrolamentos do transformador.

Considerando-se o transformador da figura III.1, tem-se:

$$\begin{cases} \mathfrak{F}_p = N_p I_p \\ \mathfrak{F}_s = - N_s I_s \end{cases} \Rightarrow \mathfrak{F}_r = \mathfrak{F}_p + \mathfrak{F}_s = N_p I_p - N_s I_s \quad \dots(III.1)$$

$$\mathfrak{F}_r = \mathfrak{F}_p + \mathfrak{F}_s = N_p I_p - N_s I_s = \Phi \mathfrak{R} \quad \dots(III.2)$$

onde:

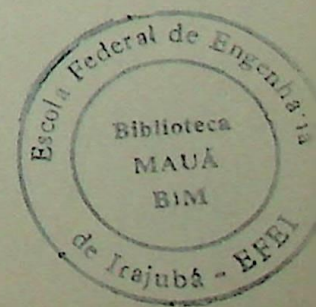
\mathfrak{F}_p - f.m.m. no primário;

\mathfrak{F}_s - f.m.m. no secundário;

\mathfrak{F}_r - f.m.m. resultante;

\mathfrak{R} - relutância do núcleo do transformador;

Φ - fluxo no núcleo.



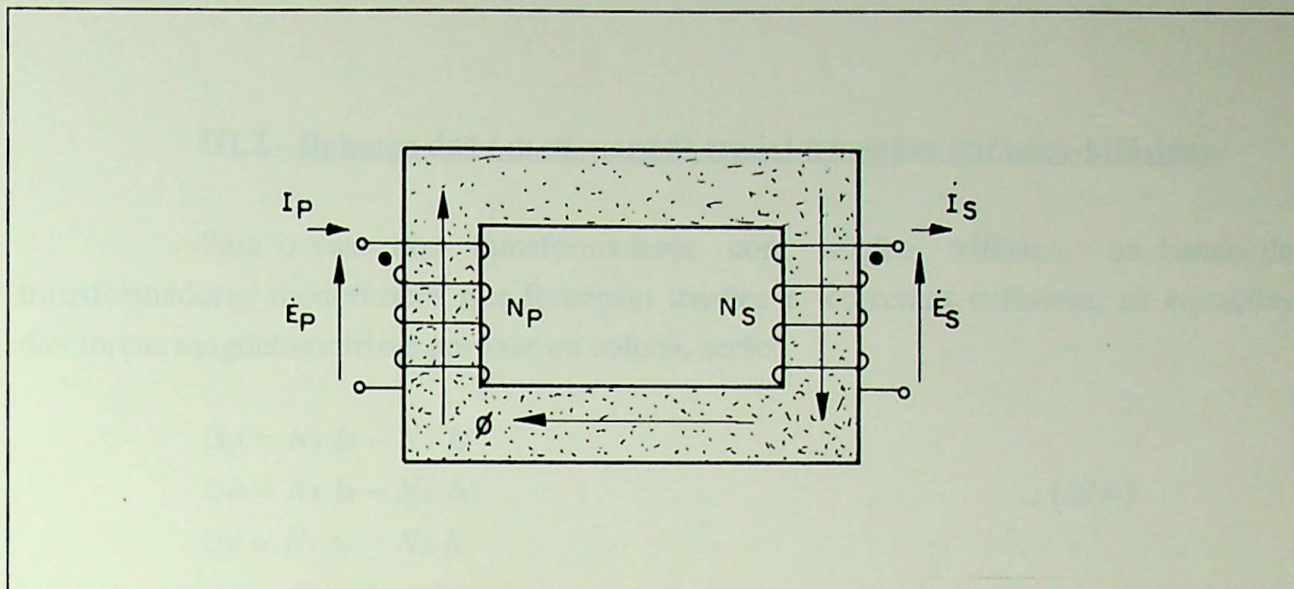


Figura III.1 - Estrutura para análise de balanço de f.m.m.

Como o material utilizado na construção do núcleo dos transformadores apresenta uma baixa relutância até que o núcleo atinja a saturação, a f.m.m. resultante é dada por:

$$\mathfrak{I}_r = \mathfrak{I}_p + \mathfrak{I}_s = N_p I_p - N_s I_s \cong 0$$

Logo:

" Os ampères-espiras (\mathfrak{I}_p) de cada fase dos enrolamentos primários estão balanceados pela soma dos ampères-espiras (\mathfrak{I}_s) dos enrolamentos secundários na mesma fase "[6].

III.2 - Balço das f.m.m. para as transformações trifásico-bifásicas

Para o caso dos transformadores com núcleo trifásico, ou banco de transformadores monofásicos que forneçam tensões e correntes trifásicas, as equações das forças magnetomotrizes por fase ou coluna, serão:

$$\begin{aligned}\mathfrak{F}_a &= N_1 I_A - N_2 I_a \\ \mathfrak{F}_b &= N_1 I_B - N_2 I_b \\ \mathfrak{F}_c &= N_1 I_C - N_2 I_c\end{aligned}\quad \dots(III.4)$$

onde:

- N1 - número de espiras no enrolamento primário;
- N2 - número de espiras no enrolamento secundário;
- I_A, I_B, I_C - correntes nos enrolamentos primários;
- I_a, I_b, I_c - correntes nos enrolamentos secundários;

A f.m.m. resultante será :

$$\begin{aligned}\mathfrak{F}_r &= \mathfrak{F}_a + \mathfrak{F}_b + \mathfrak{F}_c = 0 \\ \mathfrak{F}_r &= N_1 (I_A + I_B + I_C) - N_2 (I_a + I_b + I_c) = 0\end{aligned}\quad \dots(III.5)$$

Logo o sistema anterior, descrito na equações III.4, para a transformação trifásica-bifásica pode ser representado por:

$$[N_1][I_{3\phi}] - [N_2][I_{2\phi}] = 0 \quad \dots(III.6)$$

onde:

- [N1] - número de espiras dos enrolamentos do lado trifásico;
- [I_{3φ}] - correntes trifásicas;
- [N2] - número de espiras dos enrolamentos do lado bifásico;
- [I_{2φ}] - correntes bifásicas.

É importante observar-se, que muitas vezes as tensões e correntes bifásicas são obtidas por ligações entre *taps* de enrolamentos. Estes *taps* fracionam os enrolamentos, e nestas. frações fluirão correntes que através de outras ligações poderão fornecer as correntes bifásicas $I_{2\alpha}$ e $I_{2\beta}$.

Portanto, a força magnetomotriz em cada fase ou coluna do transformador, será calculada pela soma das frações dos enrolamentos multiplicadas por suas respectivas correntes.

Para que haja balanço magnético nas fases dos transformadores, as forças magnetomotrizes terão o mesmo módulo e estarão defasadas de 120° , sendo a f.m.m. resultante igual a zero [7].

Assim, as equações para o cálculo da f.m.m. serão:

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}_a &= N_1 I_A - N_2 I_a = h \\ \mathfrak{F}_b &= N_1 I_B - N_2 I_b = h \alpha^2 \\ \mathfrak{F}_c &= N_1 I_C - N_2 I_c = h \alpha \end{aligned} \quad \dots(III.7)$$

onde:

h - é o módulo das forças magnetomotrizes;
 α - operador de valor $\underline{120^\circ}$

Como as correntes bifásicas devem ser consideradas nas frações dos enrolamentos, calcula-se o valor de **h**, das correntes nas frações dos enrolamentos e das forças magnetomotrizes nas colunas ou fases dos transformadores. Se a f.m.m. resultante for igual a zero, haverá balanço magnético na conexão utilizada, assim baseando-se na metodologia descrita, faz-se as análises para as conexões básicas.

III.2.1 - Conexão Scott

Em banco de transformadores monofásicos não existe um núcleo comum, assim as forças magnetomotrizes são obtidas em cada transformador individualmente. Mostra-se a seguir o equilíbrio das correntes no lado bifásico, de acordo com a figura III.2.

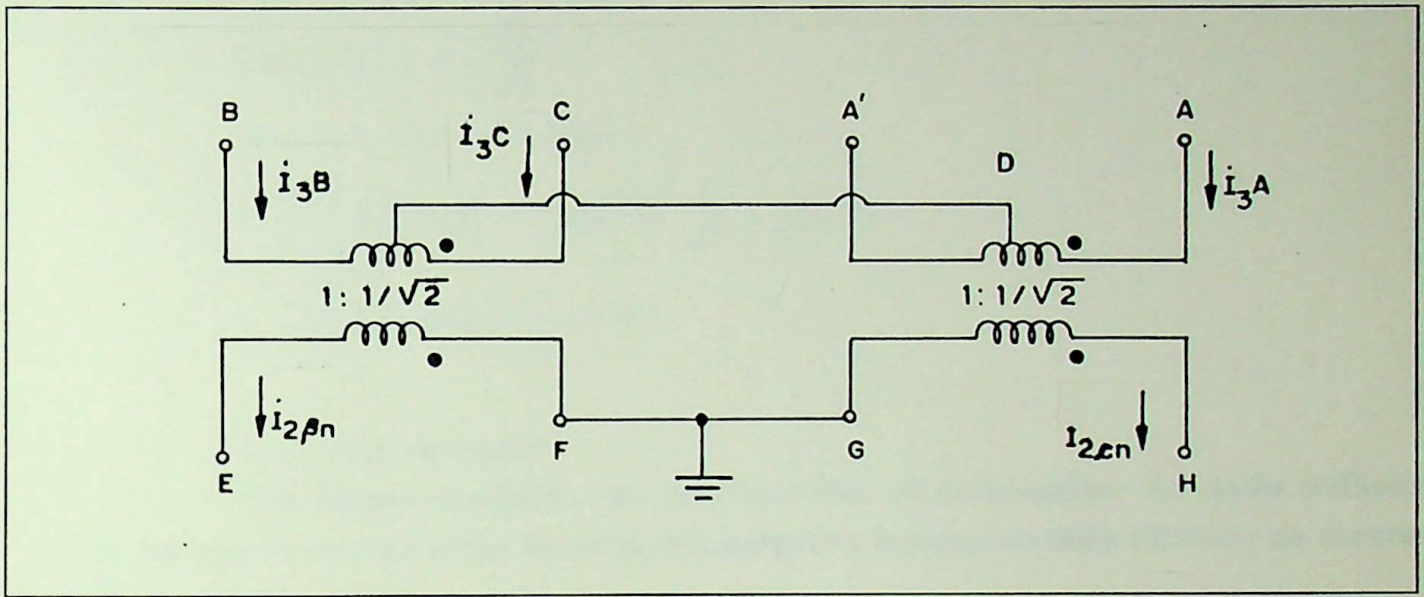


Figura III.2 - Conexão Scott à três condutores

Considerando a ligação da figura III.2, como sendo a três condutores, a relação entre as correntes trifásicas e bifásicas será de $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$, como mostrado no capítulo II.

Para o transformador *teaser*, o balanço magnético será:

$$I_{3\phi} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \Rightarrow I_{2\phi} = 1$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} |0^\circ - \frac{1}{\sqrt{2}} 1 |0^\circ \Rightarrow$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} = 0$$

E para o transformador *main*, o balanço magnético será:

$$|I_{3B}| - |I_{3C}| = 0 \Rightarrow |I_{3B}| = |I_{3C}|$$

$$|I_{3B}| + |I_{3C}| = -|I_{3A}| \Rightarrow 2|I_{3C}| = -|I_{3A}|$$

$$|I_{3B}| = |I_{3C}| = \frac{-\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}$$

$$N_3 (I_{3B} - I_{3C}) - N_2 I_{2\beta n} \Rightarrow$$

$$1 \frac{-\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} (1|_{-120^\circ} - 1|_{120^\circ}) - \frac{1}{\sqrt{2}} 1|_{90^\circ} \Rightarrow$$

$$1 \frac{-\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} (-j\sqrt{3}) - \frac{1}{\sqrt{2}} j = 0$$

Onde conclui-se que:

"Os amperes-espiras de cada fase dos enrolamentos do lado trifásico estão balanceados pela soma fasorial dos amperes-espiras do lado bifásico na mesma fase".

III.2.2 - Conexão Arnold

Para a análise do balanço das forças magnetomotrizes na conexão Arnold, considerando-se que existe no lado bifásico uma carga com fator de potência unitário, a distribuição das correntes nos enrolamentos é mostrada na figura III.3.

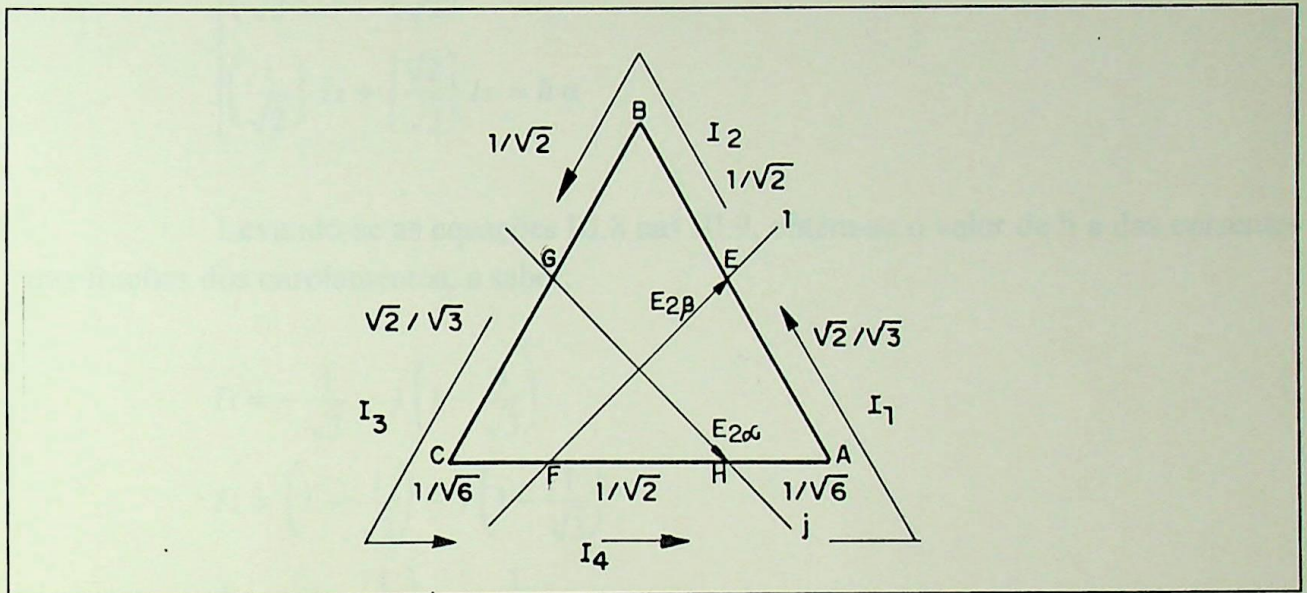


Figura III.3 - Conexão Arnold

Considerando-se que:

$$\begin{cases} I_1 = I_{2HE} \\ I_2 = I_{2EG} \\ I_3 = I_{2GF} \\ I_4 = I_{2FH} \end{cases}$$

A partir da figura III.3, tem-se:

$$\begin{cases} I_{2\alpha} = I_4 - I_1 = 1 \angle -45^\circ \\ I_{2\beta} = I_1 - I_2 = 1 \angle 45^\circ \end{cases} \dots(\text{III.8})$$

As correntes nas frações dos enrolamentos, são calculadas através do sistema:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) I_1 + \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) I_3 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) I_4 = h \\ \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) I_1 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) I_2 = h\alpha^2 \\ \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) I_2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) I_3 = h\alpha \end{cases} \dots(\text{III.9})$$

Levando-se as equações III.8 nas III.9, obtém-se o valor de h e das correntes nas frações dos enrolamentos, a saber:

$$\begin{aligned} I_1 &= -\frac{1}{\sqrt{3}} - j\left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \\ I_2 &= \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) - j\left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \\ I_3 &= \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) + j\frac{1}{\sqrt{3}} \\ I_4 &= -\frac{1}{\sqrt{3}} + j\frac{1}{\sqrt{3}} \\ h &= \frac{\sqrt{2}}{3} (-1 + j) = \frac{2}{3} \angle 135^\circ \end{aligned}$$

Assim, o balanço magnético em cada transformador monofásico será dada por:

Transformador 1:

$$\begin{aligned} N_1 I_1 - N_2 I_2 &\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2}{\sqrt{3}} - \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_3 + \frac{1}{\sqrt{2}} I_4 + \frac{1}{\sqrt{6}} I_1\right) \\ N_1 I_1 - N_2 I_2 &= \frac{2}{3} \angle 0^\circ - \frac{\sqrt{2}}{3} (-1 + j) \neq 0 \end{aligned}$$

Transformador 2:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ - \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} I_2 \right)$$

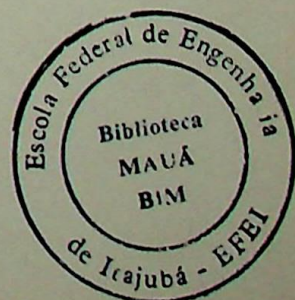
$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \frac{2}{3} \angle -120^\circ - \frac{2}{3} \angle 15^\circ \neq 0$$

Transformador 3:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_2 + \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_3 \right)$$

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \frac{2}{3} \angle 120^\circ - \frac{2}{3} \angle 255^\circ \neq 0$$

Conclui-se então, que não existe equilíbrio entre as forças magnetomotrizes.



III.2.3 - Conexão Meyer

Para a conexão Meyer, é necessária a verificação do balanço entre as forças magnetomotrizes nas fases dos enrolamentos.

Pela equação III.6, obtém-se a f.m.m. resultante, assim o sistema é dado por:

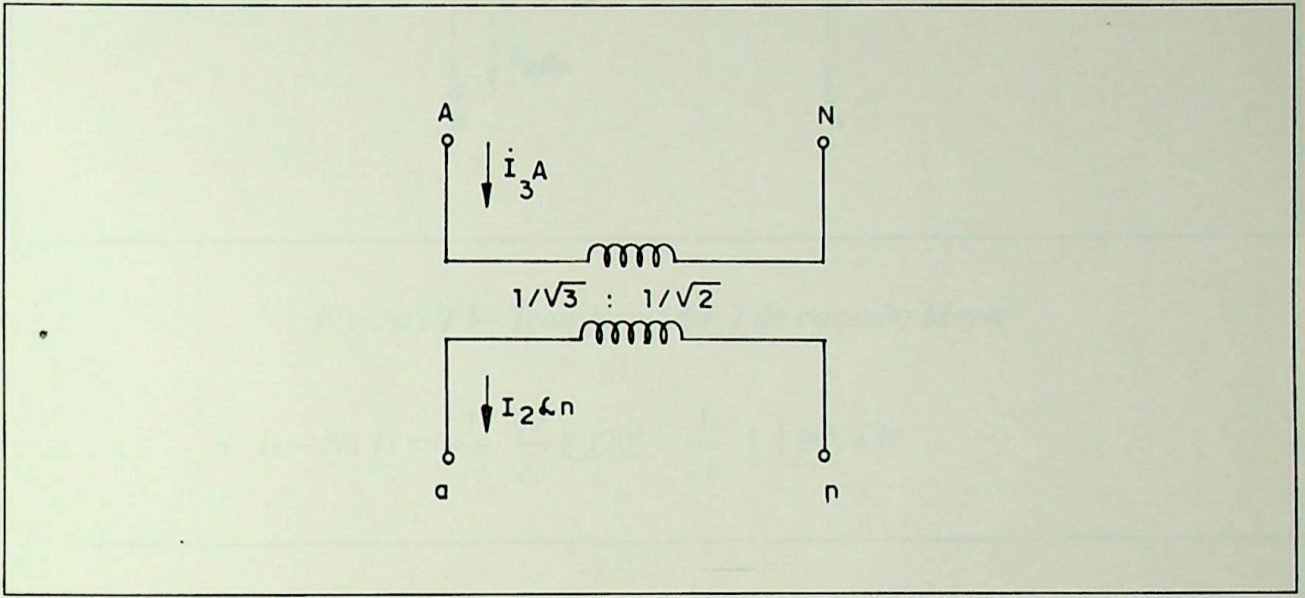


Figura III.4 - Transformador 1 da conexão Meyer

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} |0^\circ - \frac{1}{\sqrt{2}} 1 | 0^\circ \neq 0$$

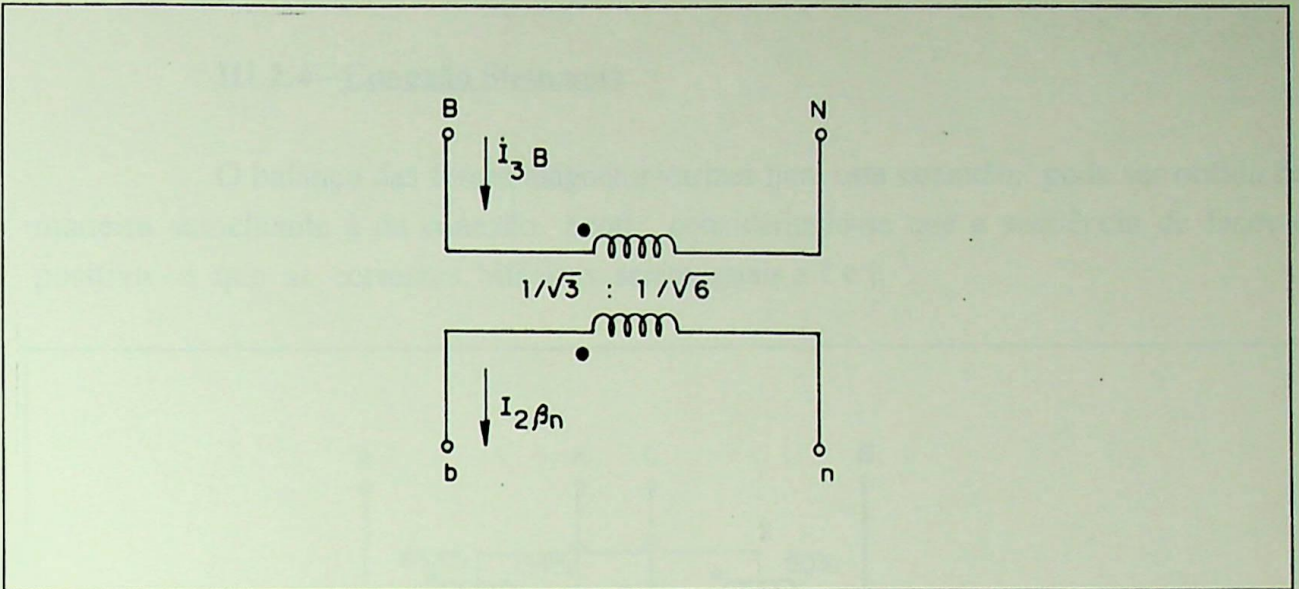


Figura III.5 - Transformador 2 da conexão Meyer

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ - \frac{1}{\sqrt{6}} 1 \angle 90^\circ \neq 0$$

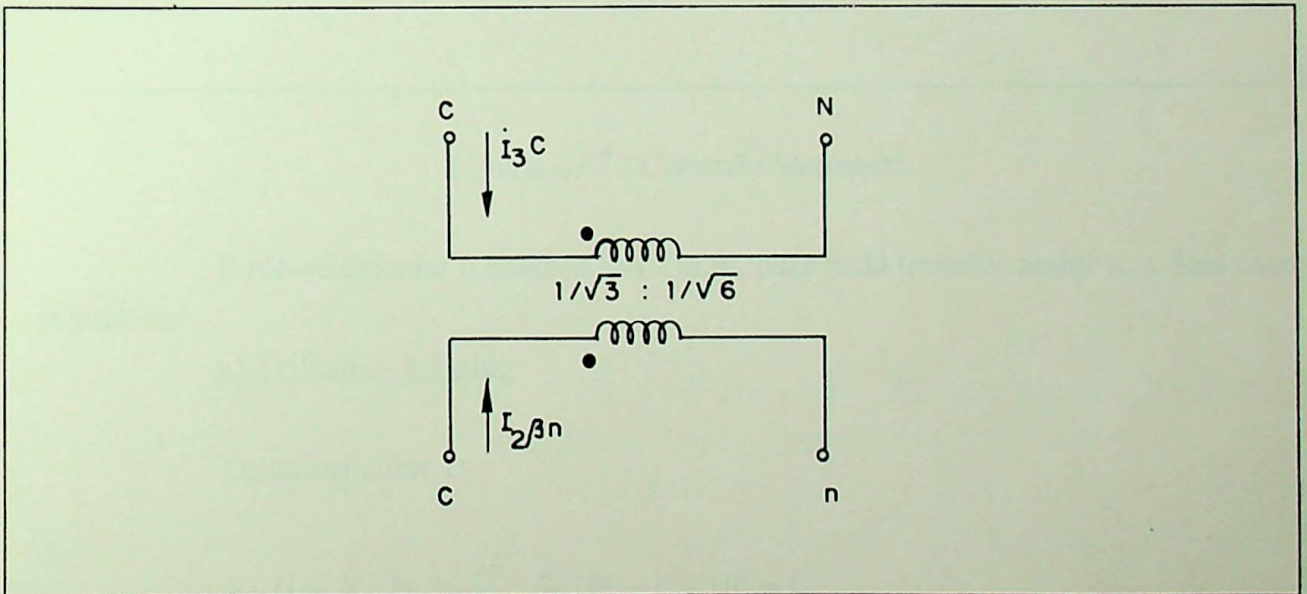


Figura III.6 - Transformador 3 da conexão Meyer

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ + \frac{1}{\sqrt{6}} 1 \angle 90^\circ \neq 0$$

Então não existe equilíbrio entre as forças magnetomotrizes.

III.2.4 - Conexão Steinmetz

O balanço das forças magnetomotrices para esta conexão, pode ser obtida de maneira semelhante à da conexão Scott, considerando-se que a seqüência de fases é positiva e que as correntes bifásicas sejam iguais a 1 e j.

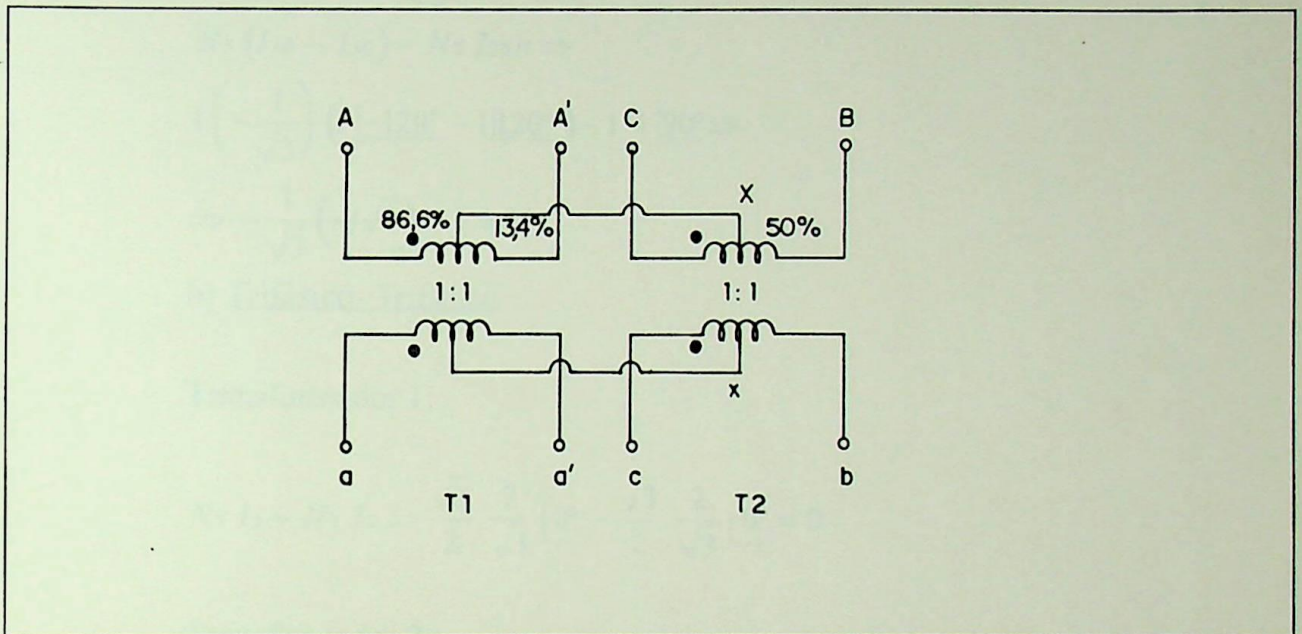


Figura III.7 - Conexão Steinmetz

Pode-se calcular o balanço das f.m.m. para cada transformador nos dois casos seguintes:

a) Trifásico- bifásico

Transformador 1:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2}{\sqrt{3}} \left| \begin{matrix} 0^\circ \\ -1 \\ 1 \end{matrix} \right| \left| \begin{matrix} 0^\circ \\ 1 \\ 0^\circ \end{matrix} \right| = 0$$

Transformador 2:

$$\begin{aligned}
 |I_{3B}| - |I_{3C}| = 0 &\Rightarrow |I_{3B}| = |I_{3C}| \\
 |I_{3B}| + |I_{3C}| = -|I_{3A}| &\Rightarrow 2 |I_{3C}| = -|I_{3A}| \\
 |I_{3B}| = |I_{3C}| = -\frac{1}{\sqrt{3}} \\
 N_3 (I_{3B} - I_{3C}) - N_2 I_{2\beta n} &\Rightarrow \\
 1 \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \right) (1 \angle -120^\circ - 1 \angle 120^\circ) - 1 \angle 90^\circ &\Rightarrow \\
 \Rightarrow -\frac{1}{\sqrt{3}} (-j\sqrt{3}) - j = 0
 \end{aligned}$$

b) Trifásico- Trifásico

Transformador 1:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 0$$

Transformador 2:

$$\begin{aligned}
 N_1 I_1 - N_2 I_2 &\Rightarrow N_1 (I_{3C} - I_{3B}) - N_2 (I_{3c} - I_{3b}) \Rightarrow \\
 \frac{1}{\sqrt{3}} (j \sqrt{3}) - \frac{1}{\sqrt{3}} (j \sqrt{3}) &= 0
 \end{aligned}$$

Conclui-se então, que existe equilíbrio entre as forças magnetomotrizes, para as duas transformações obtidas pela conexão Steinmetz, portanto:

"Os amperes-espiras de cada fase dos enrolamentos do lado trifásico estão balanceados pela soma fasorial dos amperes-espiras do lado bifásico na mesma fase".

III.2.5 - Conexão Taylor

Para a conexão Taylor, será necessário a verificação do balanço das f.m.m. para os casos de utilizar-se dois ou três transformadores monofásico, como também para os dois tipos de transformações trifásica-trifásica e trifásica-bifásica.

Na utilização de somente dois transformadores monofásico para a transformação dos sistemas, o balanço das f.m.m. pode ser verificado por:

a) Trifásico- Trifásico

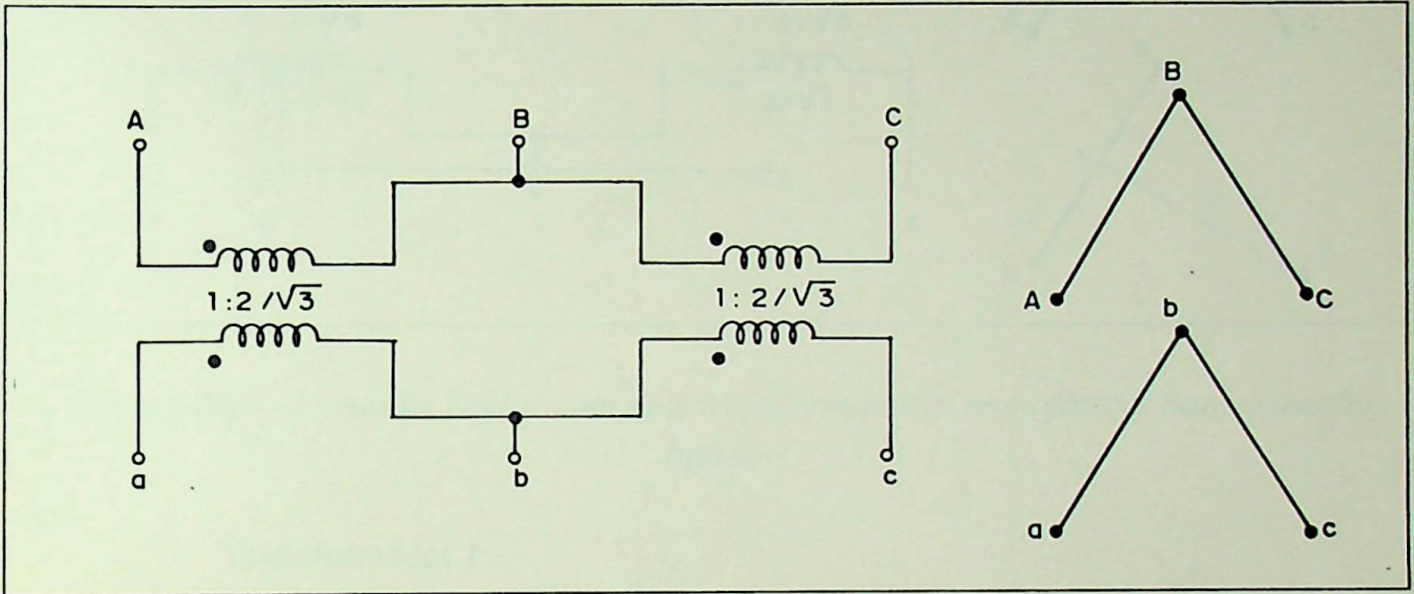


Figura III.8 - Conexão Taylor com dois transformadores monofásico

Transformador 1:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow N_{3AB} I_{3A} - N_{3ab} I_{3a} \Rightarrow$$

$$1 \frac{2}{\sqrt{3}} \left|_{-}^{0^\circ} - \frac{2}{\sqrt{3}} \right|_{-}^{0^\circ} = 0$$

Transformador 2:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow N_{3BC} I_{3B} - N_{3bc} I_{3b} \Rightarrow$$

$$1 \frac{2}{\sqrt{3}} \left|_{-}^{-120^\circ} - \frac{2}{\sqrt{3}} \right|_{-}^{-120^\circ} = 0$$

b) Trifásico- bifásico

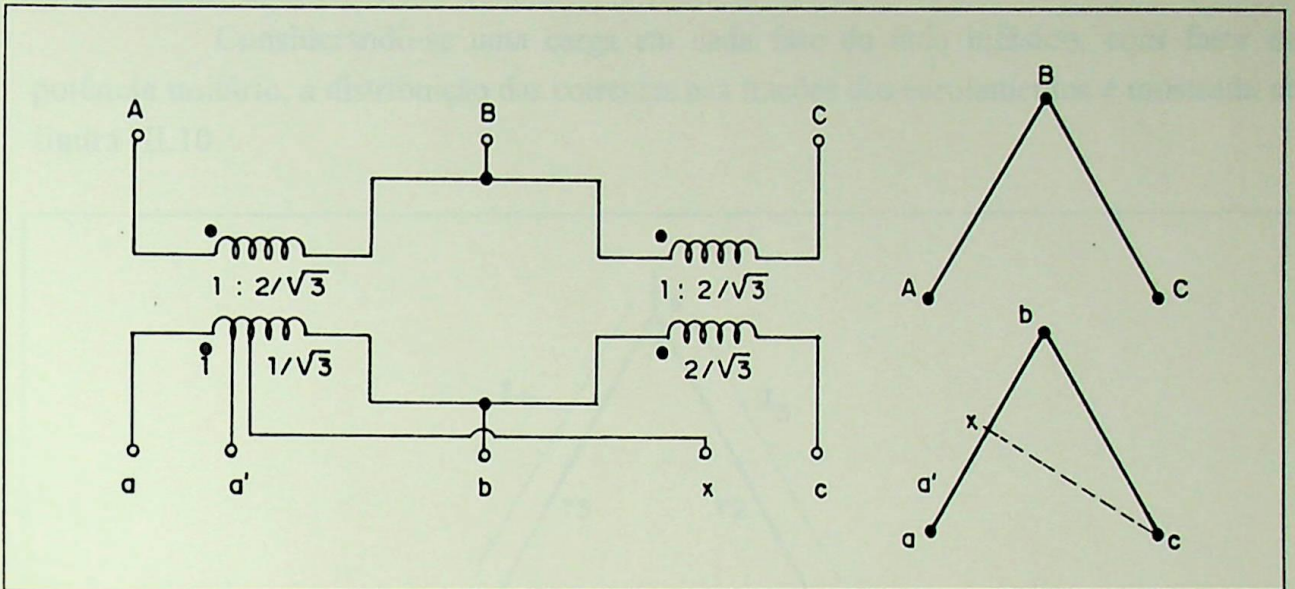


Figura III.9 - Conexão Taylor com dois transformadores monofásico para conexão bifásica

Transformador 1:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow N_{3AB} I_{3A} - N_{2ab} I_{2a} \Rightarrow$$

$$1 \frac{2}{\sqrt{3}} \left|_{0^\circ} - \frac{2}{\sqrt{3}} \right|_{0^\circ} = 0$$

Transformador 2:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow N_{3BC} I_{3B} - N_{2bc} I_{2b} \Rightarrow$$

$$1 \frac{2}{\sqrt{3}} \left|_{-120^\circ} - \frac{2}{\sqrt{3}} \right|_{-120^\circ} = 0$$

Ou seja, verifica-se que existe balanço de f.m.m..

Para o caso de três transformadores, será necessário apenas o estudo da transformação trifásica-bifásica, já que no caso trifásico-trifásico a conexão Taylor comporta-se como uma ligação delta-delta.

Nesta análise, é necessário se conhecer a distribuição das correntes nos enrolamentos do transformador para obtenção das respectivas forças magnetomotrizes.

Considerando-se uma carga em cada fase do lado bifásico, com fator de potência unitário, a distribuição das correntes nas frações dos enrolamentos é mostrada na figura III.10.

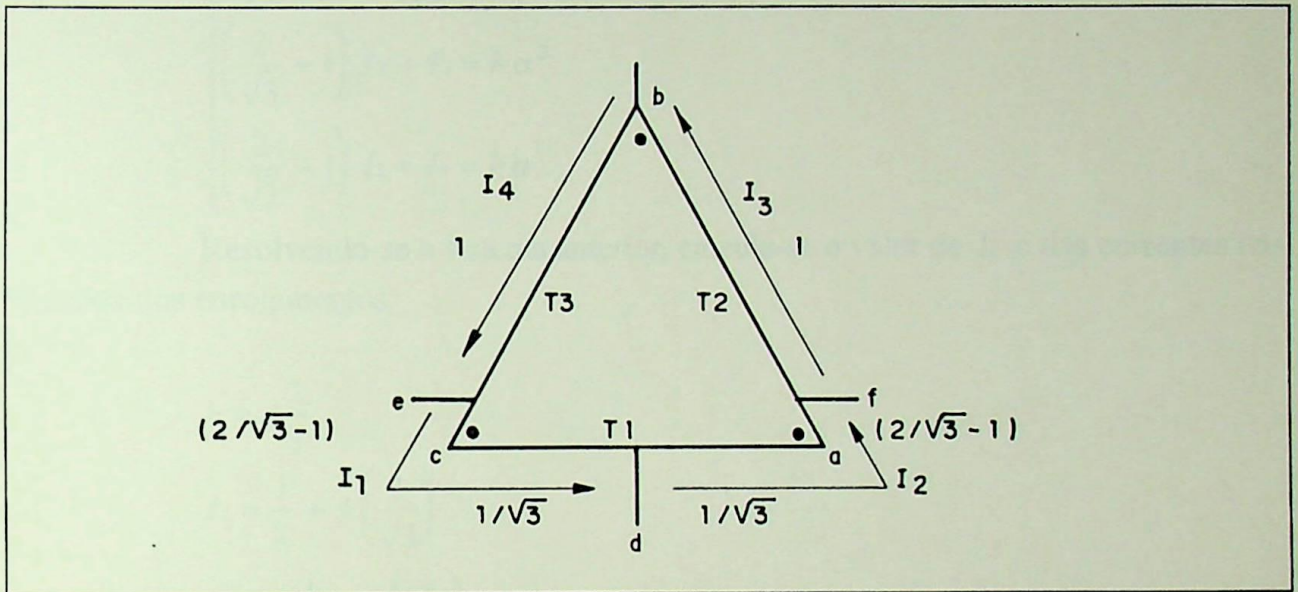


Figura III.10 - Conexão Taylor com três transformadores monofásico

Considerando-se que:

$$\begin{cases} I_1 = I_{ed} \\ I_2 = I_{df} \\ I_3 = I_{fb} \\ I_4 = I_{be} \end{cases}$$

As correntes bifásicas obtidas a partir das correntes nas frações dos enrolamentos, são:

$$\begin{cases} I_{2\alpha} = I_1 - I_2 = 1 \\ I_{2\beta} = I_2 - I_3 = j \end{cases}$$

Montando-se o sistema de equações das forças magnetomotrizes em função das correntes dos enrolamentos e das correntes trifásicas, vem:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) I_1 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) I_2 = h \\ \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1\right) I_2 + I_3 = h \alpha^2 \\ \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1\right) I_1 + I_4 = h \alpha \end{cases}$$

Resolvendo-se o sistema anterior, calcula-se o valor de h e das correntes nas frações dos enrolamentos:

$$h = j \frac{2}{3}$$

$$I_1 = \frac{1}{2} + j \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$$

$$I_2 = -\frac{1}{2} + j \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$$

$$I_3 = -\frac{1}{2} - j \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$$

$$I_4 = -\frac{1}{2} - j \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$$

Calculando-se a f.m.m. por transformador, tem-se:

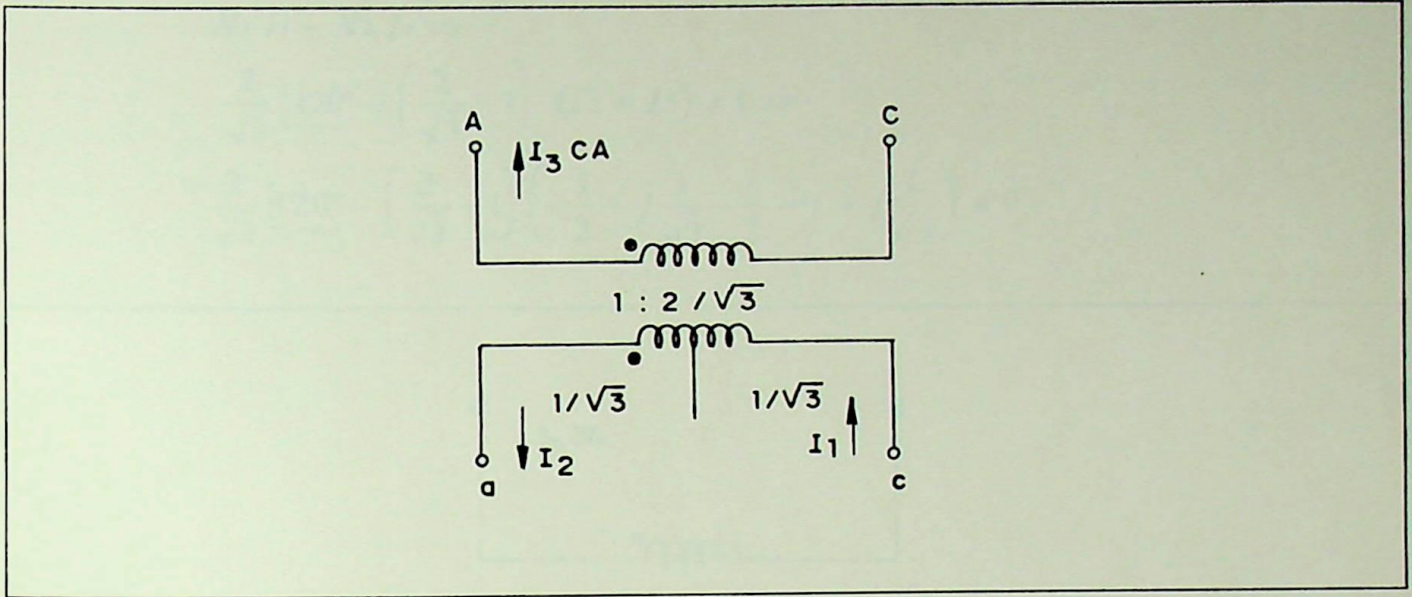


Figura III.11 - Transformador 1 com tap em 50%

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow$$

$$1 \frac{2}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{1}{\sqrt{3}} (I_1 + I_2) \Rightarrow$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} + j \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{2} + j \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \neq 0$$

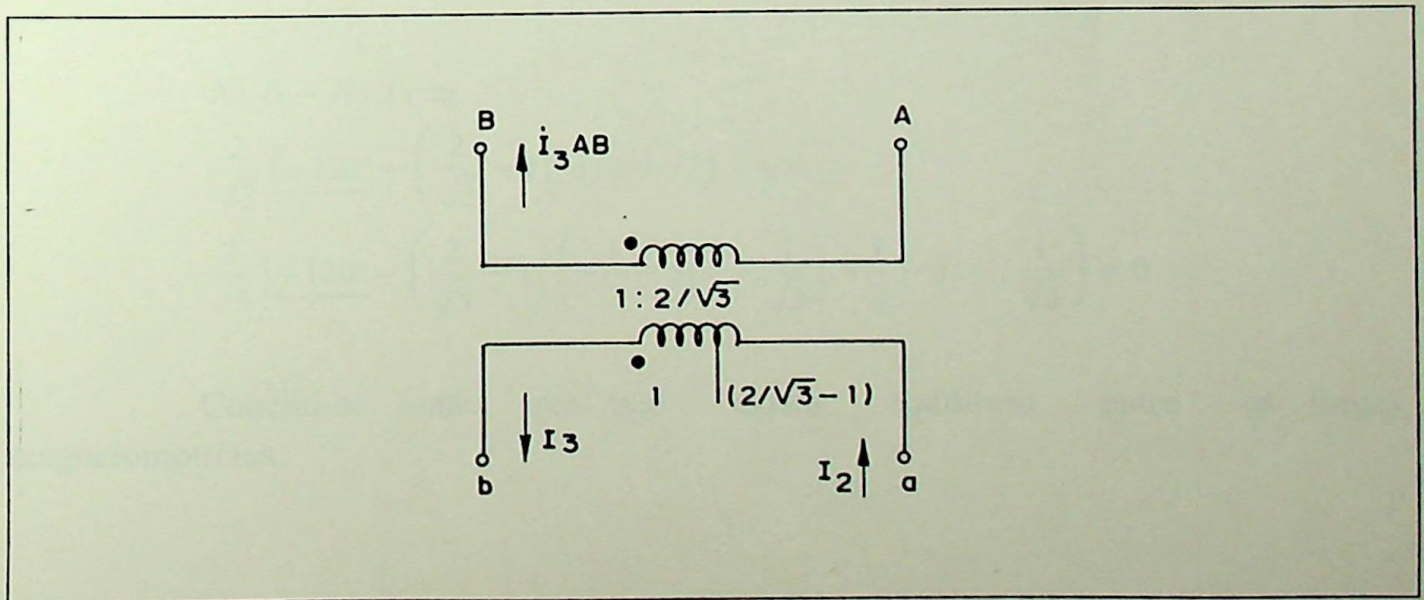


Figura III.12 - Transformador com tap em 86.6% contra a polaridade

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \left| \underline{120^\circ} - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right| (I_2 + I_3) \neq 0 \Rightarrow$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \left| \underline{120^\circ} - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right| \left(-\frac{1}{2} + j\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{2} - j + j\frac{1}{\sqrt{3}} \right) \neq 0$$

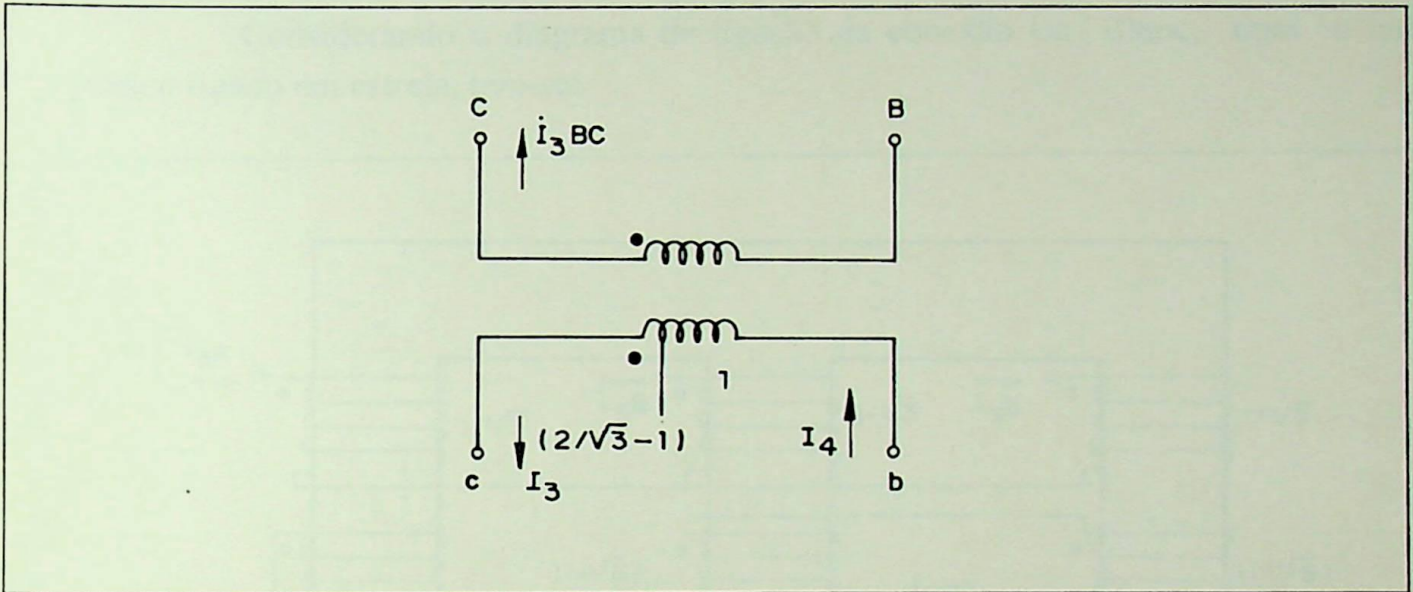


Figura III.13 - Transformador com tap em 86.6% a favor da polaridade

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \Rightarrow$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \left| \underline{-120^\circ} - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right| (I_4 + I_3) \neq 0 \Rightarrow$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \left| \underline{-120^\circ} - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right| \left(-\frac{1}{2} + j\left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) - \frac{1}{2} - j + j\frac{1}{\sqrt{3}} \right) \neq 0$$

Conclui-se então, que não existe equilíbrio entre as forças magnetomotrices.

III.2.6 - Conexão Le Blanc

Na conexão Le Blanc é utilizado o padrão trifásico de transformadores, ou seja, um único núcleo trifásico. A análise do balanço das f.m.m. consistirá em provar que a força magnetomotriz resultante é zero, supondo-se que o sistema elétrico seja equilibrado. Para isto, deve-se considerar as polaridades dos enrolamentos e as devidas correntes, bem como o número de espiras em cada enrolamento.

Considerando o diagrama de ligação da conexão Le Blanc, com o lado trifásico ligado em estrela, tem-se:

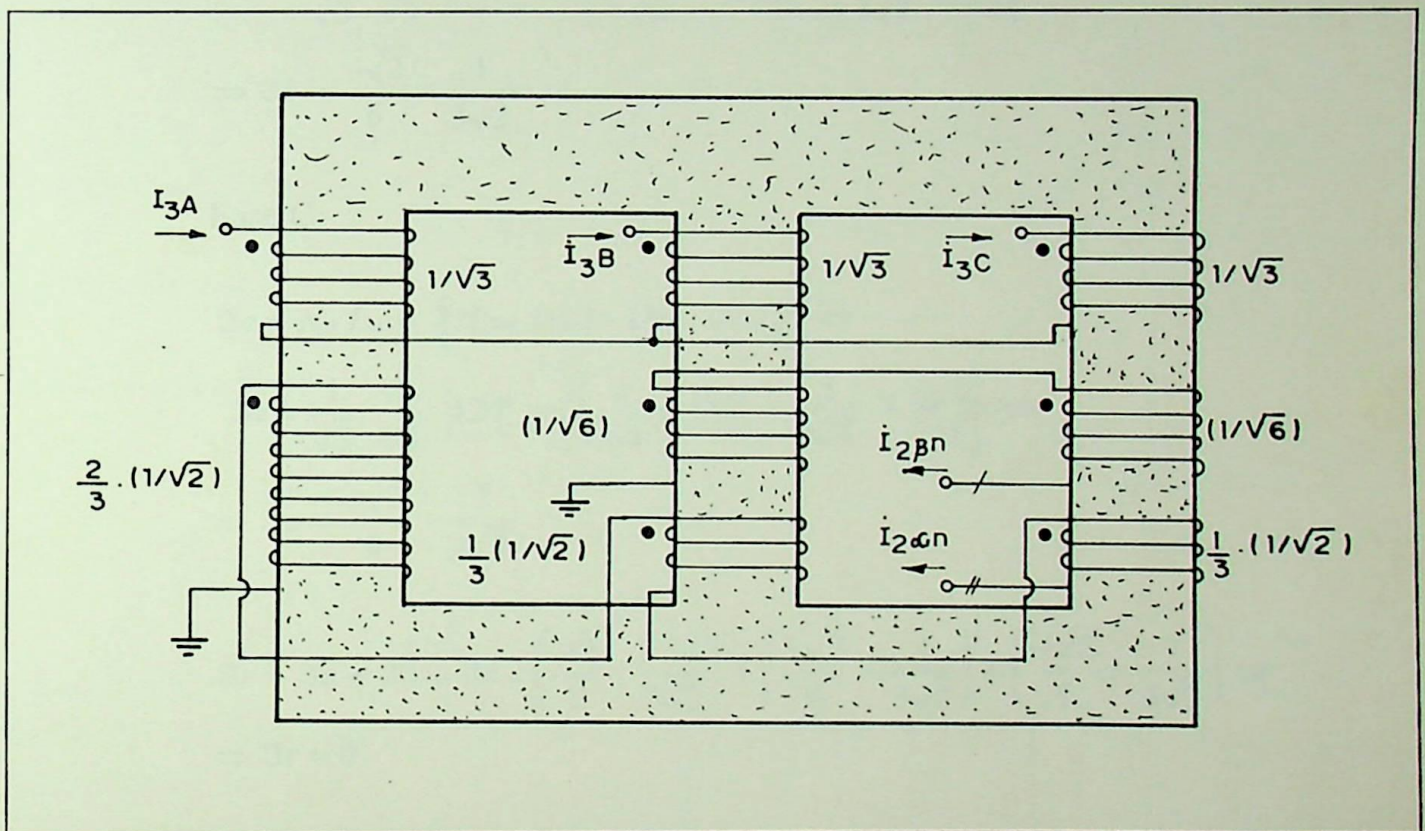


Figura III.14 - Conexão Le Blanc com o primário conectado em estrela

Utilizando-se a equação da força magnetomotriz, nas colunas do transformador, tem-se as seguintes equações:

Fase A:

$$\begin{aligned}\mathfrak{I}a &= N_3 I_{3A} - N_2 I_{2an} \Rightarrow \\ \Rightarrow \mathfrak{I}a &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left| \underline{0^\circ} \right. - \left(-\frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \underline{0^\circ} \right. \right) = \frac{\sqrt{2}}{3} + \frac{2}{3\sqrt{2}}\end{aligned}$$

Fase B:

$$\begin{aligned}\mathfrak{I}b &= N_3 I_{3B} - \left\{ (-N_{2bn} I_{2\beta n}) + (N_{2b'} I_{2\alpha n}) \right\} \Rightarrow \\ \mathfrak{I}b &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left| \underline{-120^\circ} \right. - \left\{ \left(\frac{-1}{\sqrt{6}} \left| \underline{90^\circ} \right. \right) + \left(\frac{1}{3\sqrt{2}} \left| \underline{0^\circ} \right. \right) \right\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \mathfrak{I}b &= \frac{-\sqrt{2}}{6} - \frac{1}{3\sqrt{2}}\end{aligned}$$

Fase C:

$$\begin{aligned}\mathfrak{I}c &= N_3 I_{3c} - \left\{ (N_{2cn} I_{2\beta n}) + (N_{2c'} I_{2\alpha n}) \right\} \Rightarrow \\ \mathfrak{I}c &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left| \underline{120^\circ} \right. - \left\{ \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \left| \underline{90^\circ} \right. \right) + \frac{1}{3\sqrt{6}} \left| \underline{0^\circ} \right. \right\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \mathfrak{I}c &= \frac{-\sqrt{2}}{6} - \frac{1}{3\sqrt{2}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathfrak{I}r &= \mathfrak{I}a + \mathfrak{I}b + \mathfrak{I}c = \left(\frac{\sqrt{2}}{3} + \frac{2}{3\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{-\sqrt{2}}{6} - \frac{1}{3\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{-\sqrt{2}}{6} - \frac{1}{3\sqrt{2}} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \mathfrak{I}r &= 0\end{aligned}$$

Assim, obtém-se que o sistema está equilibrado em força magnetomotriz, portanto:

"Os amperes-espiras de cada fase dos enrolamentos do lado trifásico estão balanceados pela soma dos amperes-espiras do lado bifásico na mesma fase".

III.3 - Considerações finais

Após o estudo das características elétricas e magnéticas das conexões para transformação trifásica-bifásica, pode-se concluir quais são as conexões mais adequadas para compor o sistema tetrafásico, sendo analisadas as vantagens e desvantagens de cada conexão de modo a compará-las.

III.3.1 - Scott

a) Vantagens:

- Utilização de duas unidades monofásicas;
- Apenas um transformador monofásico com características do transformador *main* e *taps* apropriados é requerido como unidade reserva;
- No lado trifásico o ponto neutro pode ser utilizado para aterramento ou carregamento;
- No lado bifásico os enrolamentos podem ser conectados à dois, três ou quatro condutores;
- Existência de balanço magnético em cada transformador;
- Enrolamentos característicos similares aos da conexão estrela-estrela.

b) Desvantagens:

- Devido às suas características construtivas e por ser constituída por transformadores monofásico, esta conexão possui transformadores grandes e pesados quando comparados com transformadores trifásicos de mesma proporção e potência [4];
- As metades separadas do enrolamento *main* no lado trifásico devem ser arranjadas de forma a diminuir os efeitos da reatância de dispersão, resultando complicações nos enrolamentos; [4]
- Existência de circulação de corrente de terceiro harmônico[4];
- Para uma carga com fator de potência unitário, o lado trifásico terá um fator de potência interno que somente permite o carregamento para duas unidades monofásicas com 86,6% de sua potência;

III.3.2 - Arnold

a) Vantagens:

- Utilização de três transformadores monofásico, permitindo uma fácil substituição e manutenção;
- A metade de cada fasor bifásico está no mesmo potencial do outro fasor bifásico;
- A inexistência da circulação da corrente de terceiro harmônico,

b) Desvantagens:

- A conexão requer grande número de *taps*
- Os transformadores não possuem *taps* em pontos idênticos, sendo necessário manter dois transformadores de reserva ou apenas um com três *taps*;
- O sistema é conectado somente a quatro condutores;
- Não possui balanço magnético, em face das considerações mencionadas no método de análise (item II.1);
- A impossibilidade de se ter o ponto de terra, ou neutro, no centro das tensões.

III.3.3 - Meyer

a) Vantagens:

- Seus enrolamentos do lado trifásico podem ser conectados tanto em delta quanto em estrela;
- Dos três transformadores monofásico, somente dois transformadores requerem *taps*, sendo apenas um tap em cada transformador e na mesma proporção, o que facilita a manutenção de apenas uma unidade reserva com apenas um tap.

b) Desvantagens:

- A corrente resultante nos enrolamentos será diferente, pois uma fase do lado bifásico será composta por apenas um dos enrolamentos, enquanto que a outra fase será composta por porções de dois enrolamentos diferentes, o que ocasiona - carregamento diferente nos três transformadores;
- Não possui balanço magnético, em face das considerações mencionadas no método de análise (item II.1);

III.3.4 - Steinmetz

a) Vantagens:

- Utiliza somente dois transformadores monofásico;
- Transforma o sistema trifásico tanto em bifásico como em trifásico, podendo estes sistemas operarem simultaneamente;
- Apenas um transformador monofásico com características do transformador *main* e *taps* apropriados é requerido como unidade reserva;
- Para o lado trifásico o ponto neutro pode ser utilizado para aterramento ou carregamento;
- Existência de balanço entre as f.m.m. de cada transformador;
- Tensões e correntes de terceiro harmônico são muito pequenas e não possuem importância prática [4].

b) Desvantagens:

- Devido às suas características construtivas e por ser constituída por transformadores monofásico, esta conexão possui transformadores grandes e pesados quando comparados com transformadores trifásicos de mesma proporção e potência;
- As metades separadas do enrolamento *main* no lado trifásico devem ser arrançadas de forma a diminuir os efeitos da reatância de dispersão, resultando complicações nos enrolamentos;
- Possui *taps* nos dois lados trifásico e bifásico;
- O sistema bifásico somente pode ser conectado a quatro condutores.

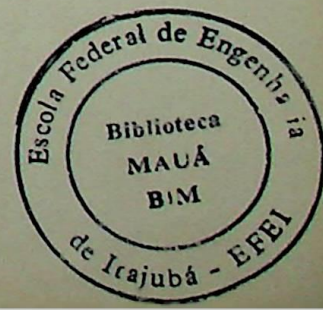
III.3.5 - Taylor

a) Vantagens:

- Pode-se utilizar dois ou três transformadores monofásicos;
- Transforma o sistema trifásico tanto em bifásico quanto em trifásico, podendo os dois sistemas operar simultaneamente.

b) Desvantagens:

- Quando transformando os sistemas trifásico em bifásico, a tensão é reduzida para 86,6% da tensão nominal do transformador;



- A conexão pode ser usada somente para sistema bifásico a quatro condutores;
- A unidade reserva, quando do uso de transformadores monofásicos, possuirá três *taps*;
- Não possui balanço magnético, em face das considerações mencionadas no método de análise (item II.1);
- A impossibilidade de se ter o ponto neutro no centro das tensões.

III.3.6 - Le Blanc

a) Vantagens:

- A conexão do lado trifásico pode ser feita tanto em delta quanto em estrela;
- As dimensões e proporções normais de um transformador trifásico são mantidas;
- É utilizado o padrão trifásico, tendo assim facilidade para construção;
- Os amperes-espiras de cada fase dos enrolamentos no lado trifásico estão balanceados pela soma dos amperes-espiras do lado bifásico na mesma fase;
- Esta conexão permite um uso mais eficiente dos materiais ativos e resulta uma unidade menor e mais leve para a dada proporção em KVA.

b) Desvantagens:

- Referindo-se à figura II.23, pode ser visto que no lado bifásico as seções dos enrolamentos denominados de **b**, devem ter uma relação entre as espiras de $\sqrt{3}$, uma condição similar aplica-se as seções **c**. Como somente aquela relação entre o número de espiras pode ser obtida, nota-se que a troca da relação entre as espiras deve ser limitada em certos casos. Então a máxima potência (KVA), a qual pode ser transformada em uma dada tensão é também limitada [4].

CAPÍTULO IV - CONEXÕES TETRAFÁSICAS

IV - Conexões Tetrafásicas

IV.1 - Considerações Iniciais

A transformação do sistema trifásico em tetrafásico, é possível através de transformadores especiais, podendo se ter geração trifásica, transmissão tetrafásica e consumidores trifásicos.

A utilização da transmissão a quatro fases se deve ao seu menor custo em relação à outras alternativas [1].

O desenvolvimento da conexão tetrafásica, somente é possível através da utilização de transformações trifásico-bifásicas, por não obtê-la diretamente. Portanto, as quatro fases serão obtidas através de transformadores especiais trifásico-bifásicos, que estarão ligados entre si e defasados de 180° , fornecendo as quatro fases deslocadas de 90° conforme idealizado pelo SibNIIIE (**Apêndice II - figura II.2**).

Para a transformação trifásica-bifásica, existem inúmeras conexões que fornecem sistemas bifásicos a dois, três e quatro condutores. O sistema tetrafásico será baseado em sistemas bifásicos a dois ou três condutores, (**Apêndice II - figura II.1**) sendo que as características do sistema a quatro condutores não se adequam ao sistema tetrafásico por não fornecerem um ponto de terra ou neutro no centro das tensões.

Como analisado nos capítulos II e III, os transformadores especiais para a conexão trifásica-bifásica que mais se adequam ao desenvolvimento da conexão tetrafásica, por suas característica elétricas e magnéticas, são as conexões Scott e Le Blanc.

IV.2 - Conexão Scott tetrafásica

O sistema tetrafásico pode ser formado por transformadores especiais trifásico-bifásicos que utilizam a conexão Scott. Esta conexão, como mostrado nos capítulos anteriores, pode fornecer o sistema bifásico a dois, três ou quatro condutores, mantendo-se balanceados tensões, correntes e forças magnetomotrizes.

Para o desenvolvimento da conexão Scott tetrafásica, existirão duas possibilidades de fornecer as quatro fases, uma utilizando-se o sistema bifásico a dois condutores e outra utilizando-se o sistema bifásico a três condutores. Como o sistema tetrafásico é utilizado para a transmissão, não é necessário a transmissão do condutor neutro, sendo então analisados somente os sistemas bifásicos a três condutores com neutro aterrado.

A transformação trifásica-bifásica utilizando-se a conexão Scott necessita de dois transformadores monofásicos, os quais serão denominados de *Grupo Scott*. Portanto, para a transformação trifásico-tetrafásica serão necessários dois *grupos Scott*, sendo que um grupo do lado bifásico estará defasado do outro de 180° .

O sistema tetrafásico formado por dois *grupos Scott*, pode ser visualizado através da figura IV.1, onde o primeiro grupo é semelhante àquele descrito no item II.2.1.

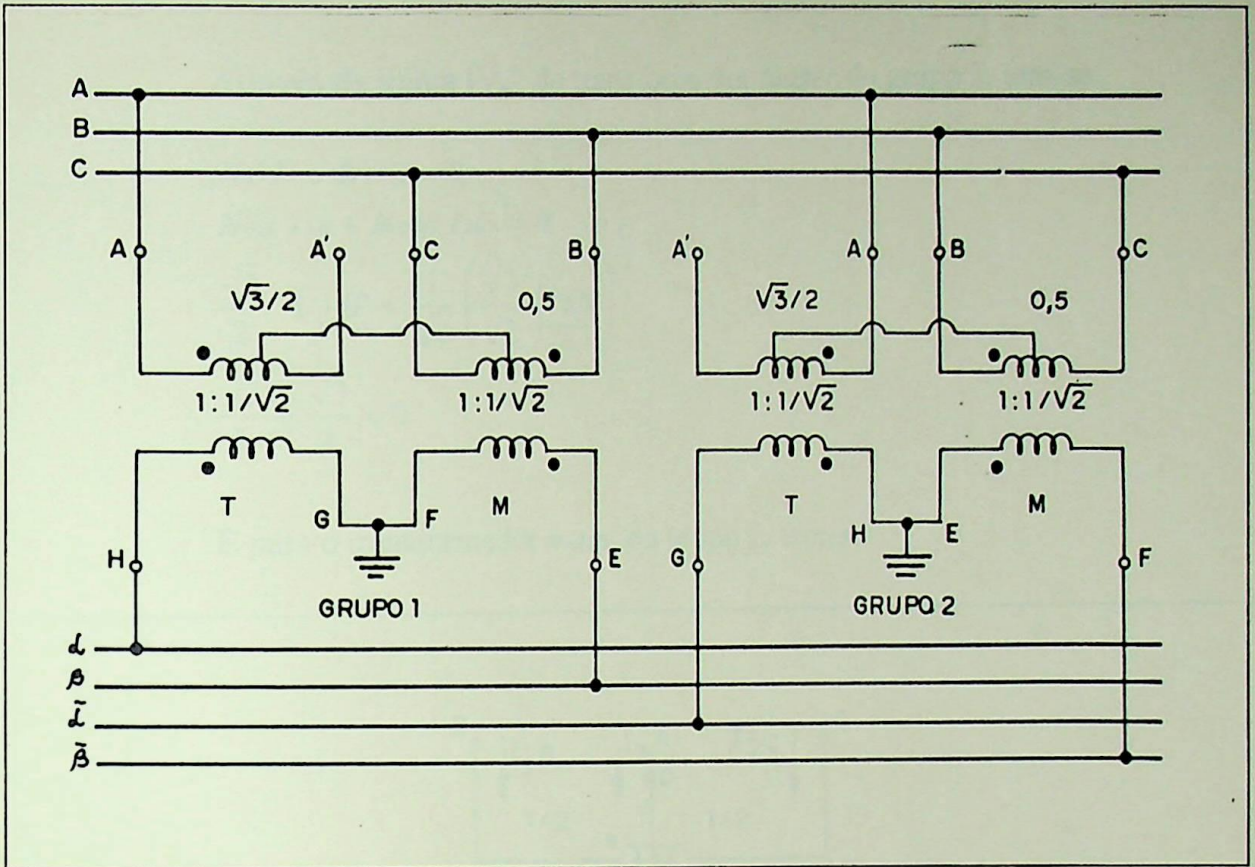


Figura IV.1 - Diagrama de ligações da conexão Scott tetrafásica

A verificação do balanço das forças magnetomotrizes para o grupo 2 da figura IV.1 é necessária, já que este difere do grupo 1 e não foi analisado anteriormente.

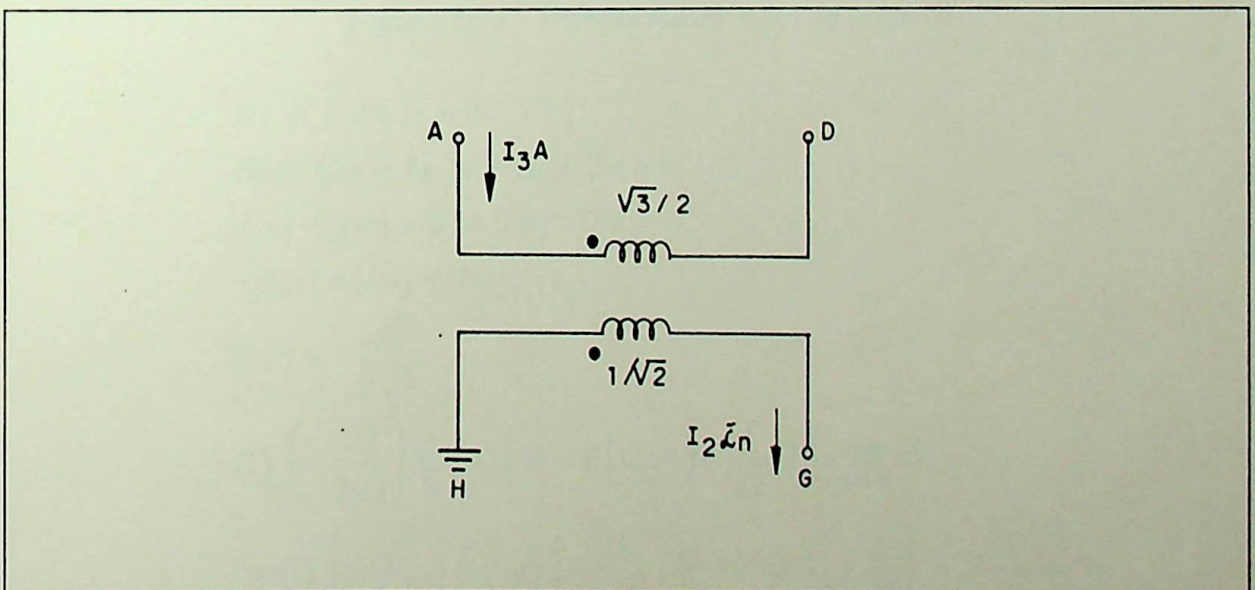


Figura IV.2 - Transformador teaser do grupo 2

Através da figura IV.2 do transformador *teaser* do grupo 2, tem-se:

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$$

$$N_{3A} I_{3A} + N_{2GH} I_{2\bar{a}\bar{n}} = 0$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} 1 \angle 0^\circ + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \angle 180^\circ \right)$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} = 0$$

E para o transformador *main* do grupo 2, tem-se:

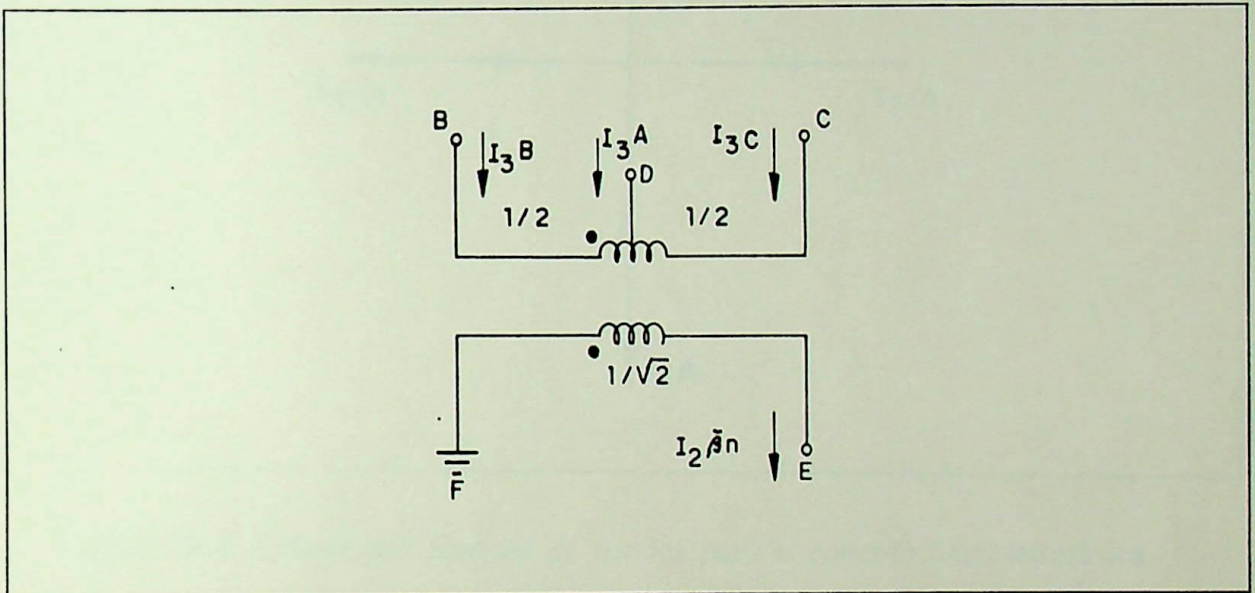


Figura IV.3 - Transformador *main* do grupo 2

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$$

$$N_{3BC} (I_{3B} - I_{3C}) + N_{2EF} I_2 \bar{\beta} n = 0$$

$$|I_{3B}| - |I_{3C}| = 0 \Rightarrow |I_{3B}| = |I_{3C}|$$

$$-|I_{3A}| = |I_{3B}| + |I_{3C}|$$

$$|I_{3C}| = -\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}$$

$$(1) \left(-\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \right) \left(1 \angle -120^\circ - 1 \angle 120^\circ \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} 1 \angle -90^\circ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (1) \left(-\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \right) (-j\sqrt{3}) + \frac{1}{\sqrt{2}} 1 \angle -90^\circ \Rightarrow 1 \left(j \frac{1}{\sqrt{2}} \right) - j \frac{1}{\sqrt{2}} = 0$$

Observa-se que o sistema tetrafásico pode ser obtido através de dois grupos Scott, defasados de 180° e ligados entre si, cujo o diagrama fasorial é mostrado na figura IV.4.

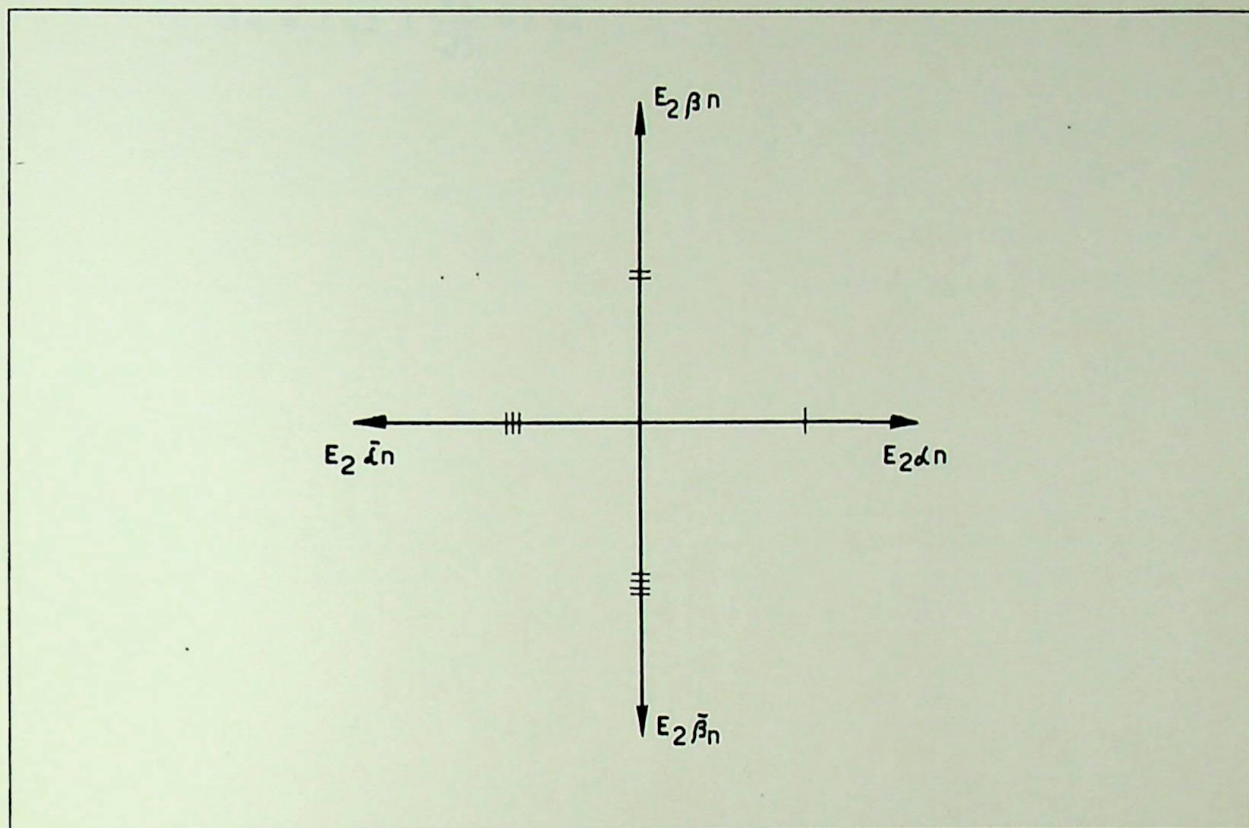


Figura IV.4 - Diagrama fasorial de tensões para a conexão Scott tetrafásica

A potência a ser transmitida pelos dois grupos Scott formando a conexão tetrafásica será dada por:

$$S_{4\phi} = 2 S_{2\phi}$$

$$S_{2\phi} = 2 E_{2\phi n} I_{2\phi}$$

$$E_{2\phi} = E_{3\phi} = \sqrt{3} E_{3\phi n}$$

$$I_{2\phi} = 1; I_{3\phi} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$S_{2\phi} = 2 \frac{E_{2\phi}}{\sqrt{2}} I_{2\phi} = 2 \frac{1}{\sqrt{2}} 1 = \frac{2}{\sqrt{2}}$$

$$S_{4\phi} = 2 \frac{2}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2}$$

E pelo lado trifásico, a potência será dada por:

$$S_{4\phi} = 2 S_{3\phi} = 2 \sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi}$$

$$S_{4\phi} = 2 \sqrt{3} \cdot 1 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 2 \sqrt{2}$$

IV.3 - Conexão Le Blanc tetrafásica

A conexão Le Blanc, como analisado anteriormente, consegue a transformação trifásica-bifásica através de um sistema a três condutores, mantendo-se balanceadas tensões, correntes e forças magnetomotrizas.

O sistema tetrafásico pode ser obtido através da conexão Le Blanc, utilizando-se dois transformadores trifásicos com *taps* apropriados para a conexão trifásica-bifásica, sendo que no lado bifásico estes estarão defasados de 180° e ligados entre si. Apesar da conexão Le Blanc formar um sistema a três condutores, não haverá a necessidade de se transmitir o condutor neutro, já que o sistema tetrafásico é utilizado para transmissão. A conexão Le Blanc tetrafásica é mostrada na figura IV.5.

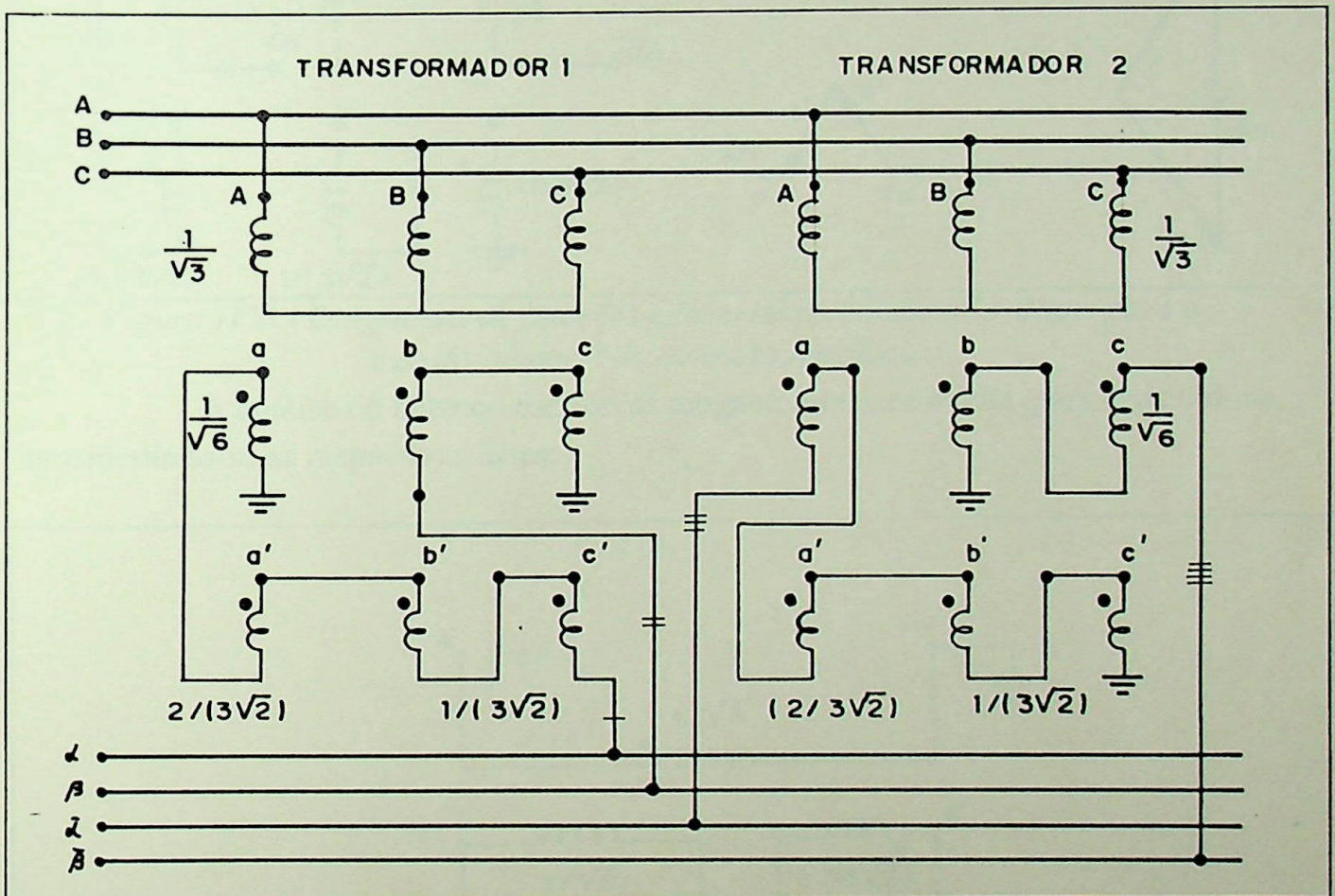


Figura IV.5 - Diagrama de ligações da conexão Le Blanc tetrafásica

A verificação do balanço das forças magnetomotrizes para o transformador 2 é necessária por este não ter sido analisado anteriormente e diferir do transformador 1, podendo ser visualizado na figura IV.6.

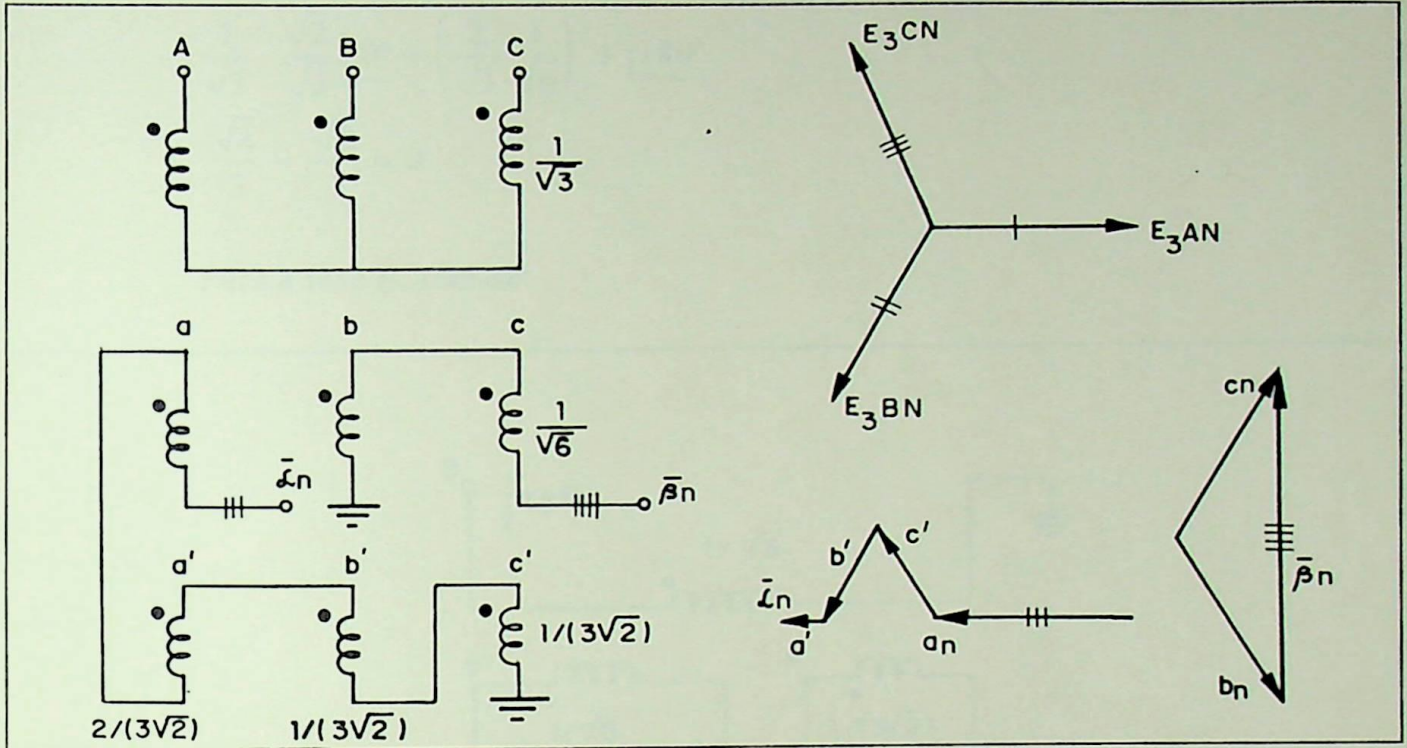


Figura IV.6 - Diagramas de ligações e fasorial da conexão Le Blanc para o transformador 2 da conexão tetrafásica

A análise do balanço das forças magnetomotrizes é feita para cada coluna, considerando-se as respectivas fases: .

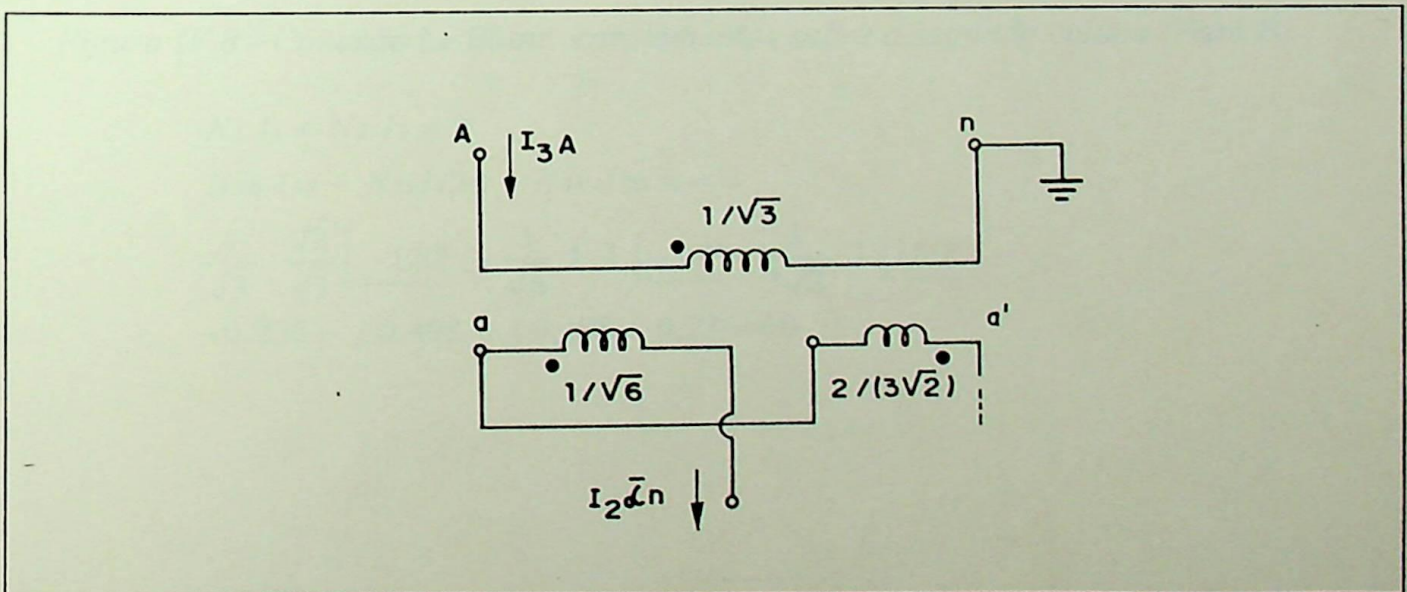


Figura IV.7 - Conexão Le Blanc, enrolamentos sobre a primeira coluna (Fase A)

Para a fase A, tem-se:

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$$

$$N_{3A} I_{3A} + (N_{2a} + N_{2a'}) I_{2\bar{\alpha}n} = 0$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{6}} \right) 1 \angle 180^\circ$$

$$\frac{\sqrt{2}}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} = 0$$

Para a fase B, tem-se:

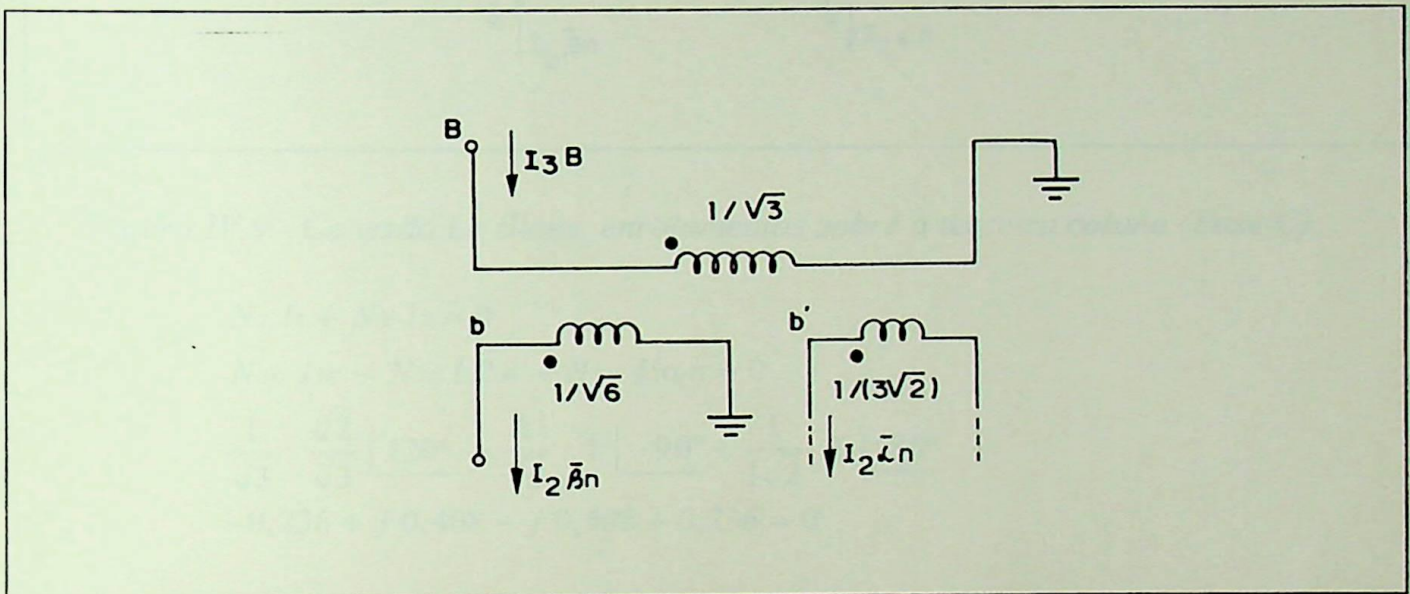


Figura IV.8 - Conexão Le Blanc, enrolamentos sobre a segunda coluna (Fase B).

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$$

$$N_{3B} I_{3B} - N_{2b} I_{2\bar{\beta}n} - N_{2b'} I_{2\bar{\alpha}n} = 0$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ - \frac{1}{\sqrt{6}} 1 \angle -90^\circ - \frac{1}{3\sqrt{2}} 1 \angle 180^\circ$$

$$-0,236 - j 0,408 + j 0,408 + 0,236 = 0$$

E para a fase C, tem-se:

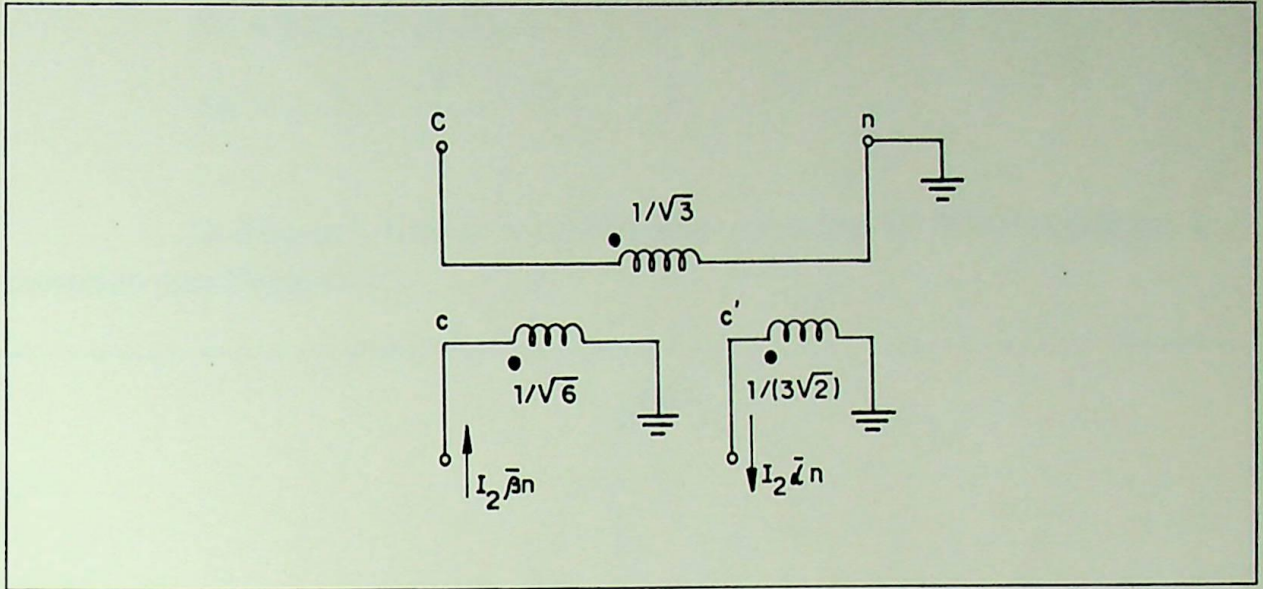


Figura IV.9 - Conexão Le Blanc, enrolamentos sobre a terceira coluna (Fase C).

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$$

$$N_{3c} I_{3c} - N_{2c} I_{2\beta n} - N_{2c'} I_{2\alpha n} = 0$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left| 120^\circ \right. - \frac{1}{\sqrt{6}} \left| -90^\circ \right. - \frac{1}{3\sqrt{2}} \left| 180^\circ \right.$$

$$-0,236 + j 0,408 - j 0,408 + 0,236 = 0$$

Observa-se que o sistema tetrafásico pode ser fornecido pela conexão Le Blanc e a potência a ser transmitida pela combinação dos dois transformadores, formando a conexão tetrafásica, será dada por:

$$S_{4\phi} = 2 S_{2\phi}$$

$$S_{2\phi} = 2 E_{2\phi n} I_{2\phi}$$

$$E_{2\phi} = E_{3\phi} = \sqrt{3} E_{3\phi n}$$

$$I_{2\phi} = 1; I_{3\phi} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$S_{2\phi} = 2 \frac{E_{2\phi}}{\sqrt{2}} I_{2\phi} = 2 \frac{1}{\sqrt{2}} 1 = \frac{2}{\sqrt{2}}$$

$$S_{4\phi} = 2 \frac{2}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2}$$

E pelo lado trifásico, a potência será dada por:

$$S_{4\phi} = 2 S_{3\phi} = 2 \sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi}$$

$$S_{4\phi} = 2 \sqrt{3} \cdot 1 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 2 \sqrt{2}$$

O diagrama fasorial de tensões para a conexão Le Blanc tetrafásica é mostrado pela figura IV.10.

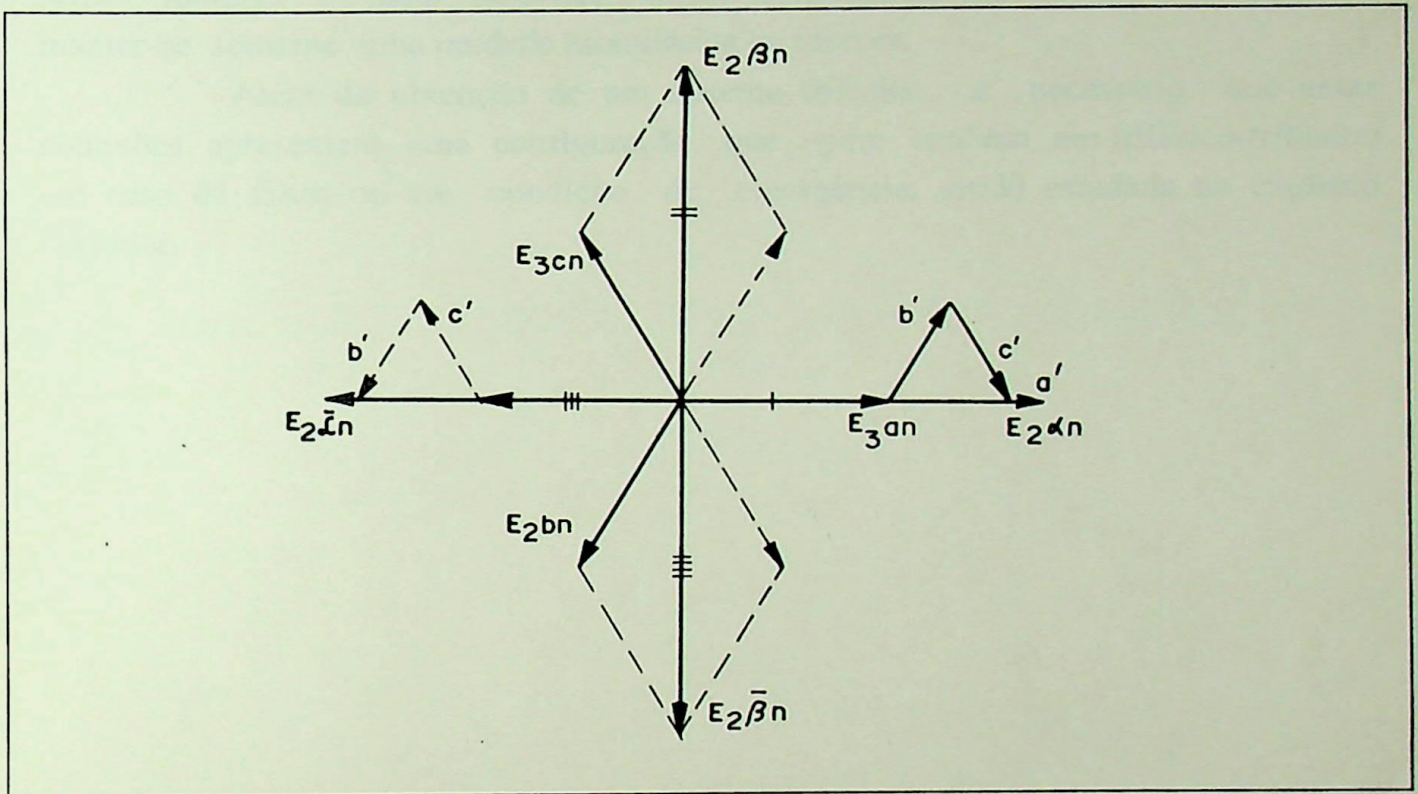


Figura IV.10 - Diagrama fasorial de tensões para a conexão Le Blanc tetrafásica

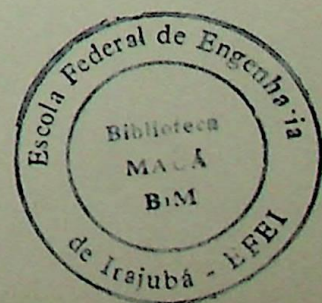
IV.4 - Considerações Finais

O sistema tetrafásico pode ser fornecido pelas duas conexões tetrafásicas Scott e Le Blanc. As vantagens e desvantagens para as duas conexões tetrafásicas, são as mesmas citadas em III.3 para o sistema trifásico-bifásico.

A opção do SibNIEE (Instituto Siberiano de Energética) pela conexão Le Blanc, pode ter sido feita pela facilidade de construção de um transformador com núcleo trifásico. Mas, a opção por dois transformadores monofásicos, mesmo sendo maiores e mais pesados, oferece facilidade de manutenção e a opção de manter-se somente uma unidade monofásica de reserva.

Além da obtenção de um sistema trifásico, é necessário que estas conexões apresentem uma configuração que opere também em trifásico-trifásico em caso de faltas ou em condição de emergência, sendo estudada no capítulo seguinte.

CAPÍTULO V - CONEXÕES TETRAFÁSICAS OPERANDO COMO
TRIFÁSICAS



V - Conexões tetrafásicas operando como trifásicas em condições de emergência

V.1 - Considerações Iniciais

Apesar da transmissão do sistema idealizado no capítulo I ser tetrafásica, a carga e os centros consumidores são trifásicos. Por isso, é necessário que o sistema de transmissão tetrafásico, forneça a opção de transmissão trifásica em caso de faltas ou operação em caso de emergência, oferecendo ao sistema maior confiabilidade.

As conexões tetrafásicas que podem ser analisadas para fornecer também o sistema trifásico, são as conexões tetrafásicas Scott e Le Blanc. Este sistema trifásico pode ser fornecido por modificações nas ligações das conexões trifásico-bifásicas, através de chaves elétricas que abrirão ou fecharão partes das conexões, fornecendo ao sistema tensões e correntes trifásicas.

É importante observar, que o sistema de chaveamento sugerido, possui somente fins didáticos, não sendo objeto de estudo nesta dissertação, não especificando portanto suas características estruturais ou nominais.

A estratégia completa de chaveamento deve levar em consideração que qualquer uma das quatro fases pode entrar em falta, sendo analisado para efeito de exemplificação, somente um tipo de falta em uma fase específica.

V.2 - Conexão Scott tetrafásica operando como trifásica

A transmissão tetrafásica pode operar em caso de emergência ou faltas, quando formada pela conexão Scott, fornecendo tensões e correntes trifásicas. Para esta transformação é necessário que existam *taps* no lado bifásico idênticos àqueles do lado trifásico, como mostrado para a conexão Steinmetz (ver item II.2.4).

A modificação da transformação trifásica-bifásica para trifásica-trifásica será obtida através de chaves elétricas, que poderão abrir ou fechar partes das ligações no circuito da conexão Scott, alterando a sua topologia.

A mudança da topologia do circuito da conexão Scott através das chaves elétricas é mostrada na figura V.1.

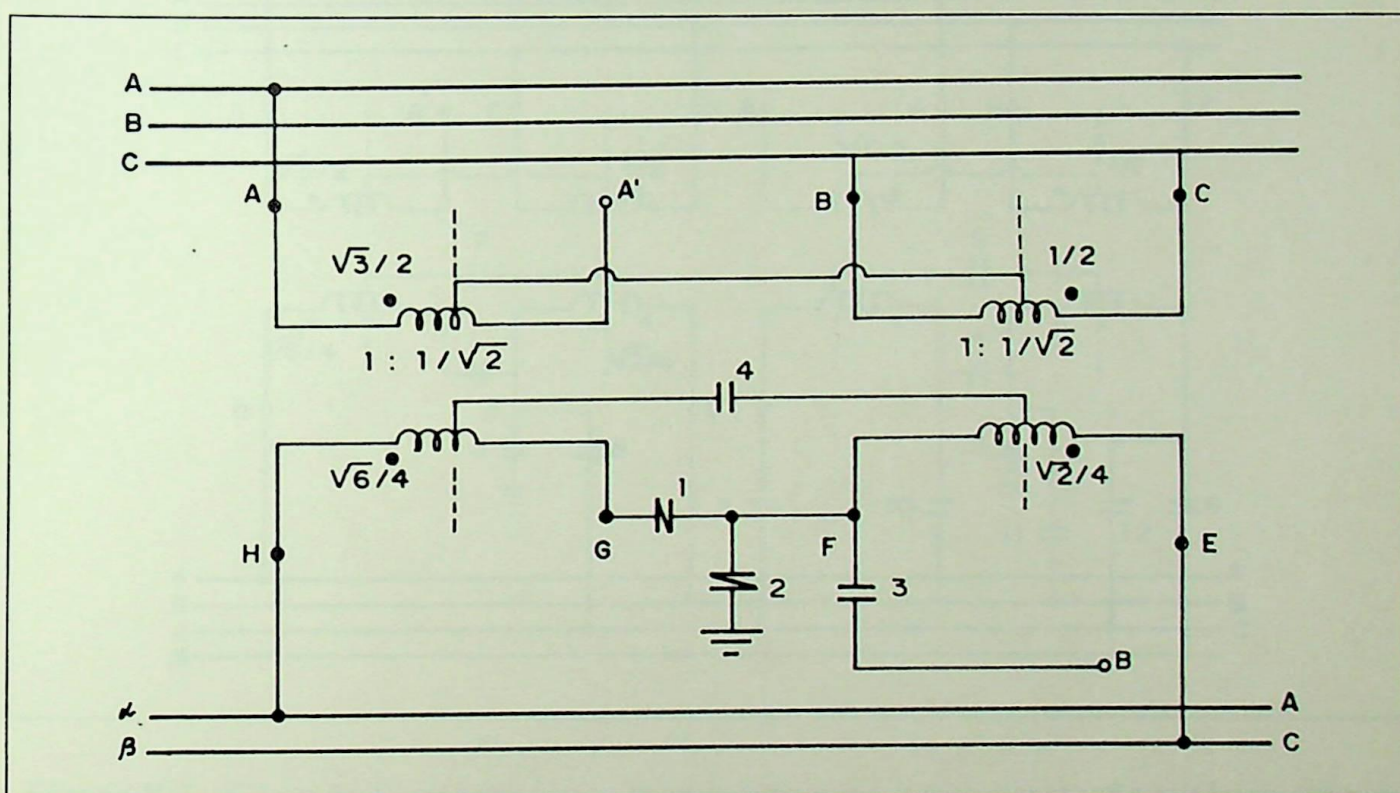


Figura V.1 - Conexão Scott modificada para Steinmetz através de chaves elétricas

Quando a conexão Scott transforma o sistema trifásico em bifásico, as chaves 1 e 2 estarão fechadas e as chaves 3 e 4 estarão abertas. Para a transformação trifásica-trifásica, ocorrerá o inverso, ou seja as chaves 1 e 2 estarão abertas e as 3 e 4 estarão fechadas.

Observe-se que existe uma seqüência para operação das chaves, primeiro opera-se as chaves 1 e 2, para depois operar-se as chaves 3 e 4, quando a mudança a ser efetuada é para trifásica-trifásica.

Mantendo-se a relação de transformação, de $1/\sqrt{2}$, é observado que as novas tensões trifásicas de linha terão módulos iguais a $1/\sqrt{2}$, podendo estes valores serem ajustados pela relação de transformação.

Considerando-se uma falta ocorrida no sistema tetrafásico formado pela conexão Scott, especificamente na fase $\bar{\beta}$, a operação para a modificação de suas ligações para Steinmetz é mostrada através da figura V.2.

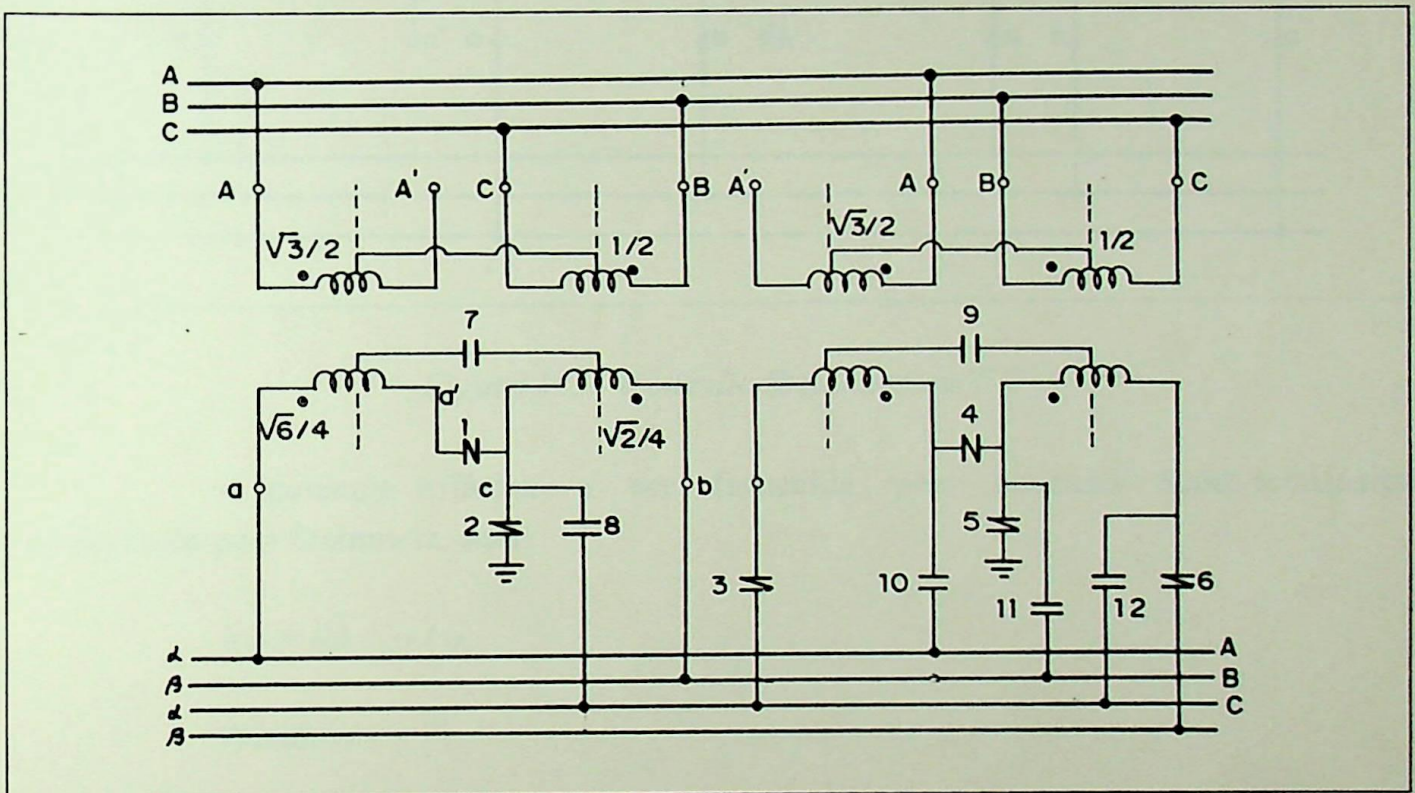


Figura V.2 - Conexão Scott tetrafásica modificada para a transformação trifásica através da conexão Steinmetz

Para a modificação da conexão tetrafásica para trifásica, opera-se primeiramente as chaves de 1 a 6, depois opera-se as chaves de 7 a 12.

Após a operação das chaves, nota-se que cada grupo Scott é modificado para a conexão Steinmetz (ou conexão T-T), ficando os dois grupos da conexão Steinmetz operando em paralelo, formando o sistema trifásico-trifásico, como mostrado pela figura V.3.

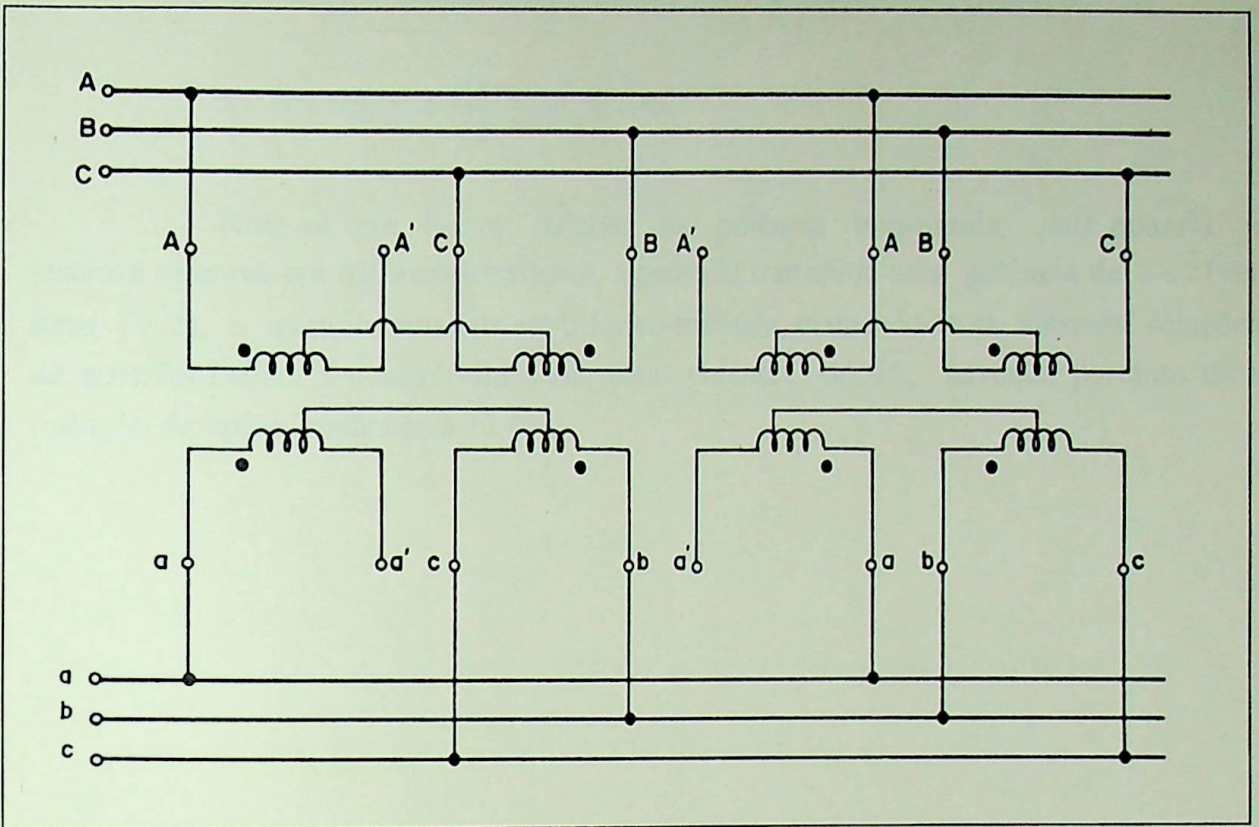


Figura V.3 - Conexão Steinmetz ou T-T

A potência trifásica a ser fornecida pela conexão Scott tetrafásica modificada para Steinmetz, será:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi}$$

Primário:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 1,22$$

Secundário:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 1,22$$

Para os dois grupos operando em paralelo, a potência total será:

$$ST = 2 S_{3\phi} = 2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \sqrt{6} = 2,45$$

Note-se que houve redução da potência transmitida, pois quando o sistema operava em trifásico-tetrafasico, a conexão transmitia uma potência de $2\sqrt{2}$ (ver item IV.2), e quando transmite em trifásico-trifásico, mantendo-se as mesmas relações de transformação, a conexão transmite uma potência de $\sqrt{6}$, havendo portanto uma redução de aproximadamente 13,4%.

V.3 - Conexão Le Blanc tetrafásica operando como trifásica

A conexão Le Blanc tetrafásica, formada por dois transformadores trifásico-bifásicos, foi desenvolvida para transmissão tetrafásica, sendo que em caso de faltas ou em condição de emergência esta conexão fornece a opção da transmissão trifásica. Esta transformação trifásica-trifásica fornecida pela conexão Le Blanc, é possível através de chaves elétricas que abrem ou fecham partes das ligações do circuito fornecendo tensões e correntes trifásicas.

A modificação na topologia do circuito da conexão Le Blanc, para fornecer o sistema trifásico é mostrada pela figura V.4.

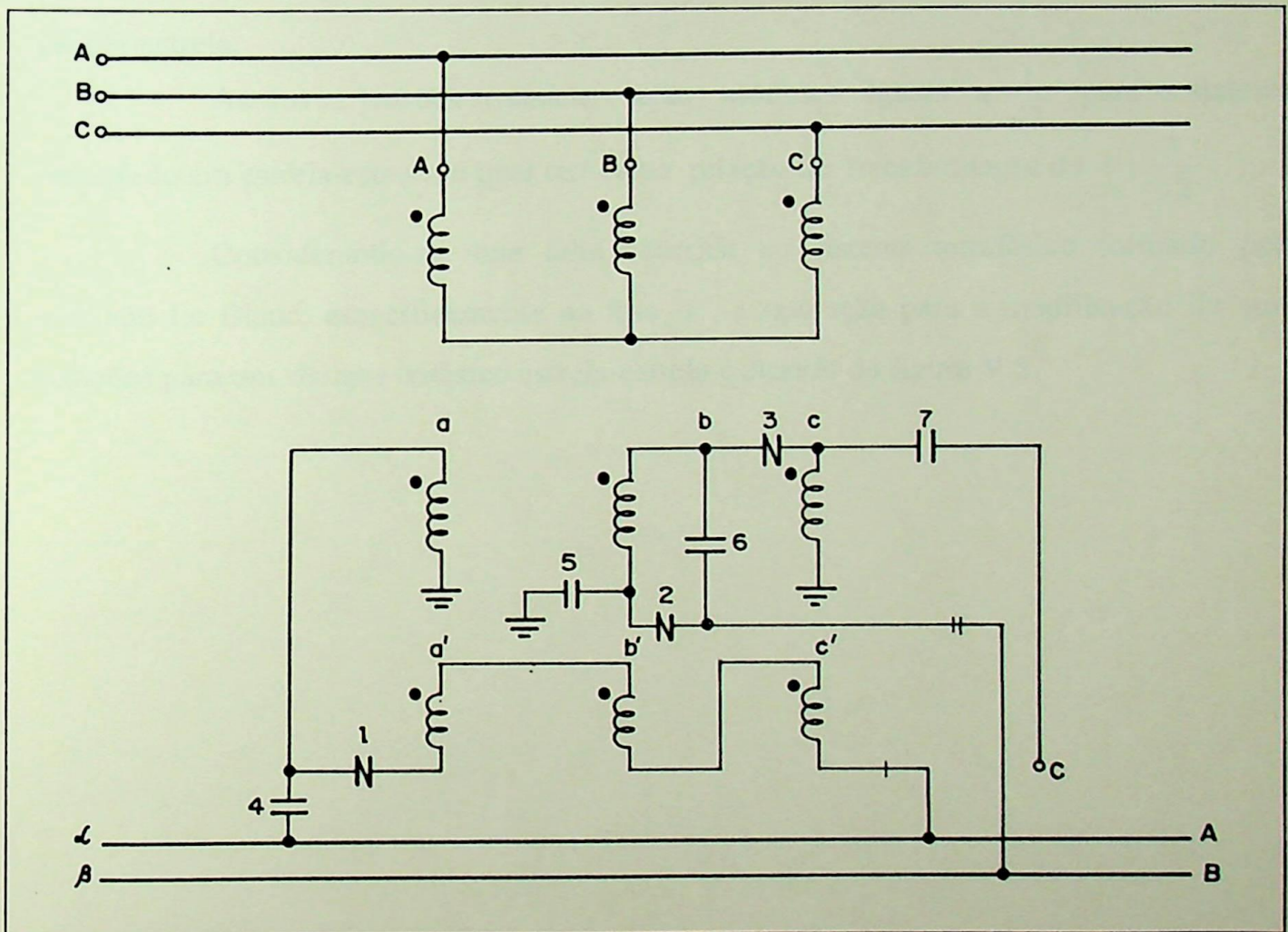


Figura V.4 - Conexão Le Blanc modificada para estrela-estrela

Quando a conexão Le Blanc transforma o sistema trifásico em bifásico, as chaves de 1 a 3 estarão fechadas e as chaves de 4 a 7 estarão abertas. Para a transformação trifásica-trifásica, a operação das chaves será modificada, as chaves de 1 a 3 estarão abertas e as chaves de 4 a 7 estarão fechadas.

Observe-se que existe uma seqüência para operação das chaves, primeiro opera-se as chaves de 1 a 3, para depois operar-se as chaves de 4 a 7, quando a operação a ser efetuada é para a transformação trifásica-trifásica.

Nota-se que após a operação das chaves, a alteração na topologia do circuito da conexão Le Blanc, fornece um sistema trifásico-trifásico com conexão em estrela-estrela.

As novas tensões trifásicas terão módulos iguais a $\frac{1}{\sqrt{2}}$ para o sistema conectado em estrela-estrela, o qual terá uma relação de transformação de $1 : \frac{1}{\sqrt{2}}$.

Considerando-se uma falta ocorrida no sistema tetrafásico formado pela conexão Le Blanc, especificamente na fase $\bar{\alpha}$, a operação para a modificação de suas ligações para um sistema trifásico estrela-estrela é através da figura V.5.

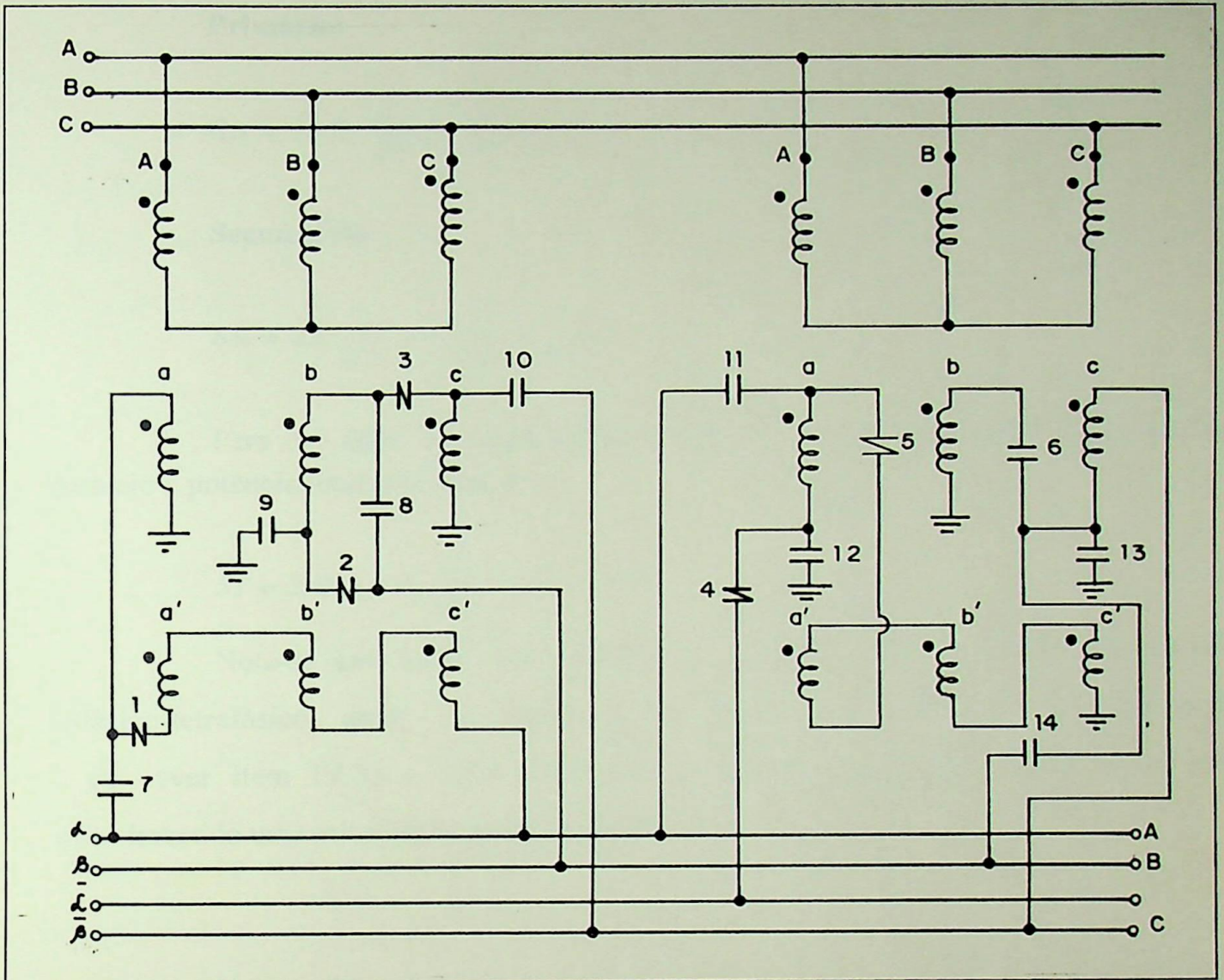


Figura V.5 - Conexão Le Blanc tetrafásica modificada para estrela-estrela

A modificação é obtida operando-se primeiramente as chaves de 1 a 6, abrindo-se as ligações do circuito da conexão Le Blanc e em seguida fechando-se as chaves de 7 a 14.

Após a modificação do circuito, observa-se que os dois transformadores, agora ligados em estrela-estrela, estão operando em paralelo.

A potência trifásica fornecida pela conexão Le Blanc alterada para estrela, será dada por:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} E_{3\phi} I_{3\phi}$$

Primário:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 1,22$$

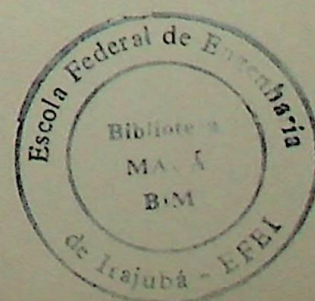
Secundário:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 1,22$$

Para os dois transformadores ligados em estrela-estrela, operando em paralelo a potência total será dada por:

$$ST = 2 S_{3\phi} = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \sqrt{6} = 2,45$$

Note-se que existe uma redução de potência ao se alterar o sistema trifásico-tetrafasico, antes da alteração a potência tetrafásica do conjunto era de $2\sqrt{2}$ (ver item IV.3) e após a alteração, a potência trifásica do conjunto caiu para $\sqrt{6}$, havendo uma redução de aproximadamente 13,4%.



V.4 - Considerações Finais

A mudança da transmissão tetrafásica para trifásica, pode ser fornecida para as duas conexões tetrafásicas Scott e Le Blanc. Esta modificação foi obtida através de chaves elétricas ideais, onde alterou-se as ligações dos circuitos das conexões trifásico-bifásicas para trifásico-trifásicas.

A potência fornecida pelas duas conexões tetrafásicas foi a mesma, $\sqrt{6}$, onde nota-se que houve redução de 13,4% na potência a ser transmitida ao se modificar os circuitos das conexões.

Para a conexão Scott tetrafásica, considerando-se falta na fase β , a modificação das ligações do circuito para se obter o sistema trifásico-trifásico, foram utilizadas doze chaves elétricas ideais que operadas seqüencialmente, obteve uma conexão semelhante à conexão Steinmetz.

A modificação da conexão Le Blanc tetrafásica, considerando-se falta na fase α , para se obter o sistema trifásico-trifásico, foram utilizadas quatorze chaves elétricas ideais, que também operadas seqüencialmente, obtiveram uma conexão semelhante à estrela-estrela.

Foi mostrado que as duas conexões tetrafásicas podem fornecer o sistema trifásico em caso de faltas podendo operar em condições de emergência.

Algumas conclusões são apresentadas no capítulo seguinte, como também algumas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

VI - Conclusões e sugestões

O sistema tetrafásico foi desenvolvido através de transformadores especiais trifásico-bifásicos, que estão defasados de 180° e ligados entre si, fornecendo quatro fases deslocadas de 90° para as tensões e correntes.

As transformações trifásico-bifásicas analisadas, forneceram sistemas a dois, três e quatro condutores, através de dois ou três transformadores monofásicos, ou apenas um transformador com núcleo trifásico. Os sistemas a quatro condutores não apresentaram as características necessárias para o desenvolvimento da conexão tetrafásica, por não fornecerem um ponto de terra (ou neutro) no centro das tensões, sendo utilizados somente os sistemas a dois ou três condutores.

Foram analisadas as características magnéticas de cada conexão apresentada, em cada transformador monofásico ou em cada fase individual.

Para as conexões apresentadas as que forneceram sistemas a dois ou três condutores foram as conexões Scott, Meyer e Le Blanc, sendo que a Meyer não apresentou balanço magnético, supondo-se o sistema elétrico equilibrado.

As conexões que apresentaram as características elétricas e magnéticas necessárias para a formação da conexão tetrafásica, foram as conexões trifásico-bifásicas Scott e Le Blanc. Estas conexões trifásico-bifásicas foram analisadas para a formação da conexão tetrafásica onde foram utilizados dois grupos ou dois transformadores que estão defasados de 180° e ligados entre si.

O sistema tetrafásico será utilizado somente para a transmissão, não necessitando de transmitir o condutor neutro, portanto as conexões Scott e Le Blanc fornecerão sistemas a dois condutores ou a três condutores com neutro aterrado.

As potências fornecidas pelas conexões tetrafásicas Scott e Le Blanc foram as mesmas, sendo que quando fornecem a opção de transmissão trifásica em caso de faltas ou em condição de emergência, existirá uma redução da potência transmitida em 13,4%.

A conexão Scott apesar de apresentar facilidades de manutenção, demonstra algumas desvantagens em relação à conexão Le Blanc, que são:

- Ligação no lado trifásico somente em estrela, não eliminando circulação de harmônicos;

- Complicações nos enrolamentos do transformador *Main* para diminuir os efeitos da reatância de dispersão;

- Fator de potência interno, permitindo somente o carregamento das unidades monofásicas em 86,6% de sua potência.

A opção pela conexão Le Blanc tetrafásica é sugerida por esta conexão apresentar vantagens em relação à conexão Scott tetrafásica, como a opção por ligações no lado trifásico tanto em estrela quanto em delta e pela facilidade de sua construção, pois esta fornece um padrão trifásico. A conexão Scott, apesar de apresentar algumas vantagens, como a facilidade de manutenção e operação, apresenta também algumas desvantagens, como transformadores grandes e pesados e complicações construtivas nos enrolamentos do transformador *main*.

Uma das contribuições deste trabalho, foi sem dúvida, o levantamento detalhado das conexões básicas para transformação trifásico-bifásica, que pode vir a ser de grande valia em outros tipos de aplicação. Teve-se por exemplo, informações recentes de que na Universidade de Montreal tem sido desenvolvidos estudos para aplicação da conexão Scott em conversores estáticos.

Sugere-se neste ponto, como temas para futuros trabalhos, o estudo do paralelismo entre as conexões Scott e Le Blanc formando um sistema tetrafásico; o desenvolvimento e análise de modelos elétricos para as conexões Scott e Le Blanc, bem como suas análises de curto-circuito; o estudo e implantação de chaves elétricas utilizadas para a conexão tetrafásica; e também, o estudo da análise de linhas de transmissões tetrafásicas.

APÊNDICE I - GRUPOS SCOTT

I.1 - Grupo Scott não intercambiável

O grupo Scott não intercambiável, consiste de dois transformadores monofásicos, sendo que o transformador *main* possui *tap* a 50% e o *teaser* a 86.6% e 28.86% dos seus enrolamentos no lado trifásico.

As conexões dos terminais dos enrolamentos e dos *taps* são obtidas conforme descrito anteriormente.

O grupo não intercambiável, é assim denominado porque os transformadores *main* e *teaser* só podem ser substituídos por transformadores exatamente iguais, ou seja, o transformador *main* nunca será substituído por um *teaser* ou vice-versa, por seus *taps* estarem em pontos diferentes.

O diagrama abaixo, mostra a conexão Scott do grupo não intercambiável:

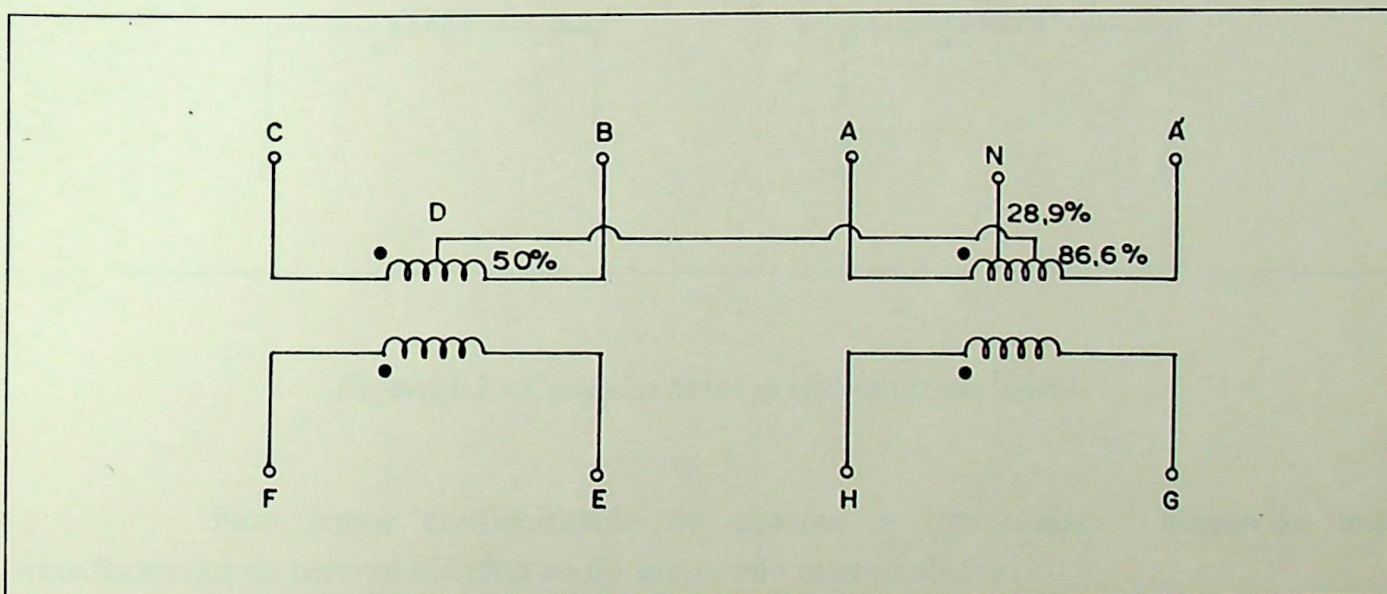


Figura I.1 - Conexão Scott grupo não intercambiável

Para facilidade de operação do sistema em caso de falha de um dos transformadores, é utilizado um outro de reserva, com a mesma relação de transformação do *main*, com a diferença que este possuirá *taps* à 50% , 86.6% e 28.86% do seu enrolamento no lado trifásico. Esta combinação será mais barata do que manter três transformadores idênticos ao *main*.

I.2 - Grupo Scott intercambiável

Este grupo é formado por dois transformadores monofásicos sendo que cada um deles pode ser utilizado tanto como *main* quanto como *teaser*. Isto será possível, contanto que os transformadores possuam as mesmas características do transformador de reserva do grupo não intercambiável.

O diagrama abaixo mostra a conexão Scott do grupo intercambiável:

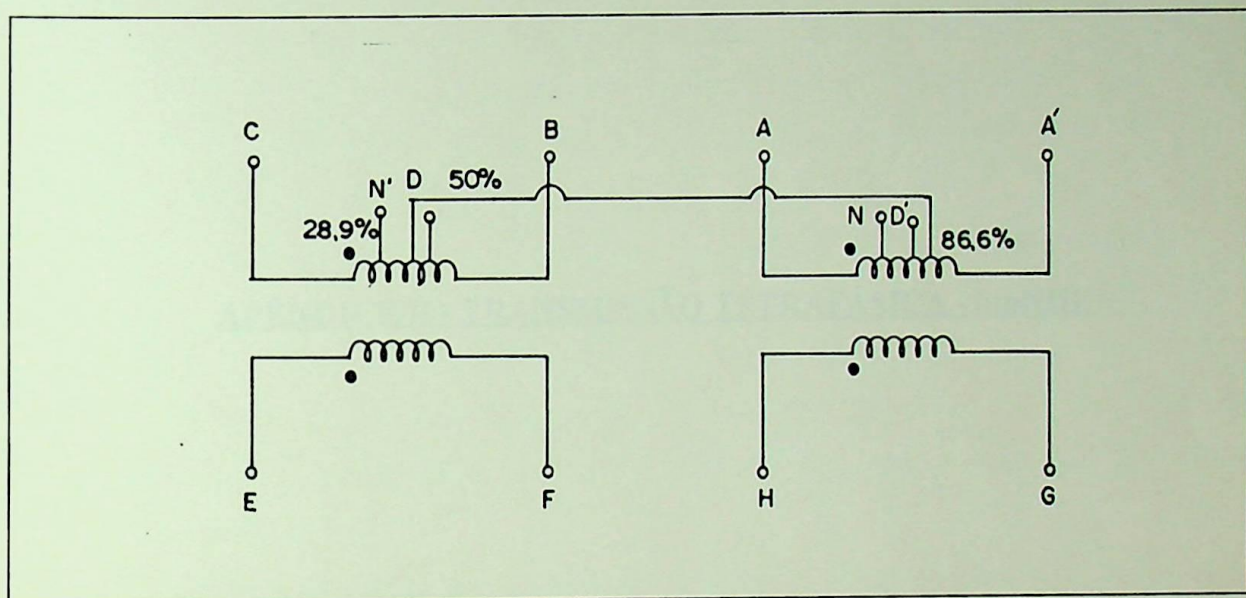


Figura I.2 - Conexão Scott grupo intercambiável

Para maior confiabilidade do sistema é necessário manter-se um transformador de reserva idêntico ao do grupo não intercambiável.

APÊNDICE II - TRANSMISSÃO TETRAFÁSICA - SibNIE

FOUR-PHASED POWER TRANSMISSION

“The technics of the electric power transmission with the alternating current (a.c.) are based on usage of three-phased electric power transmission.

The possibilities of the substantial rise of the technico-economic and reliable qualities of the such electric transmission are practically exhausted.

It is possible to achieve the radical improvement of the economy and reliability of the electric transmission of a.c. with the help of transferring to the new type of electric transmission - to four-phased electric transmission. It consists of the four-phased electric transmission. It consists of the four-phased line (fig. II.1) of proper construction and the phase transformation for the connection of the four-phased line with the three-phased a.c. bus bar.

The phase inverting transformers make it possible to provide the charging the four-phased electric transmission into the three-phased mode the work. In this case not less than 75% of the capacity of the initial mode is transferred.

The four-phased transmission, having practically the same level of the reliability as two-chained electric transmission of a.c., d.c. transmissions, possesses much better economic indices.

The four-phased electric transmission are recommended first of all as an alternative to the traditional electric transmission of the superhigh voltage. It may be used for giving power big power stations, transportation of the electric energy systems.

The four-phased electric transmissions, especially in case when they change the two-chained three-phased electric transmissions”.

USSR 630091, Novosibirsk-91, Frunze-9, Samorodov G. I.

Telex: 133288 DIOD SU

Phones: 200-959, 209-707

Pela figura II.1, verifica-se que o sistema idealizado pelo SibNIIE será formado por dois transformadores trifásicos-bifásicos defasados de 180° e ligados entre si, observe-se então, que o sistema tetrafásico não é obtido por uma transformação direta.

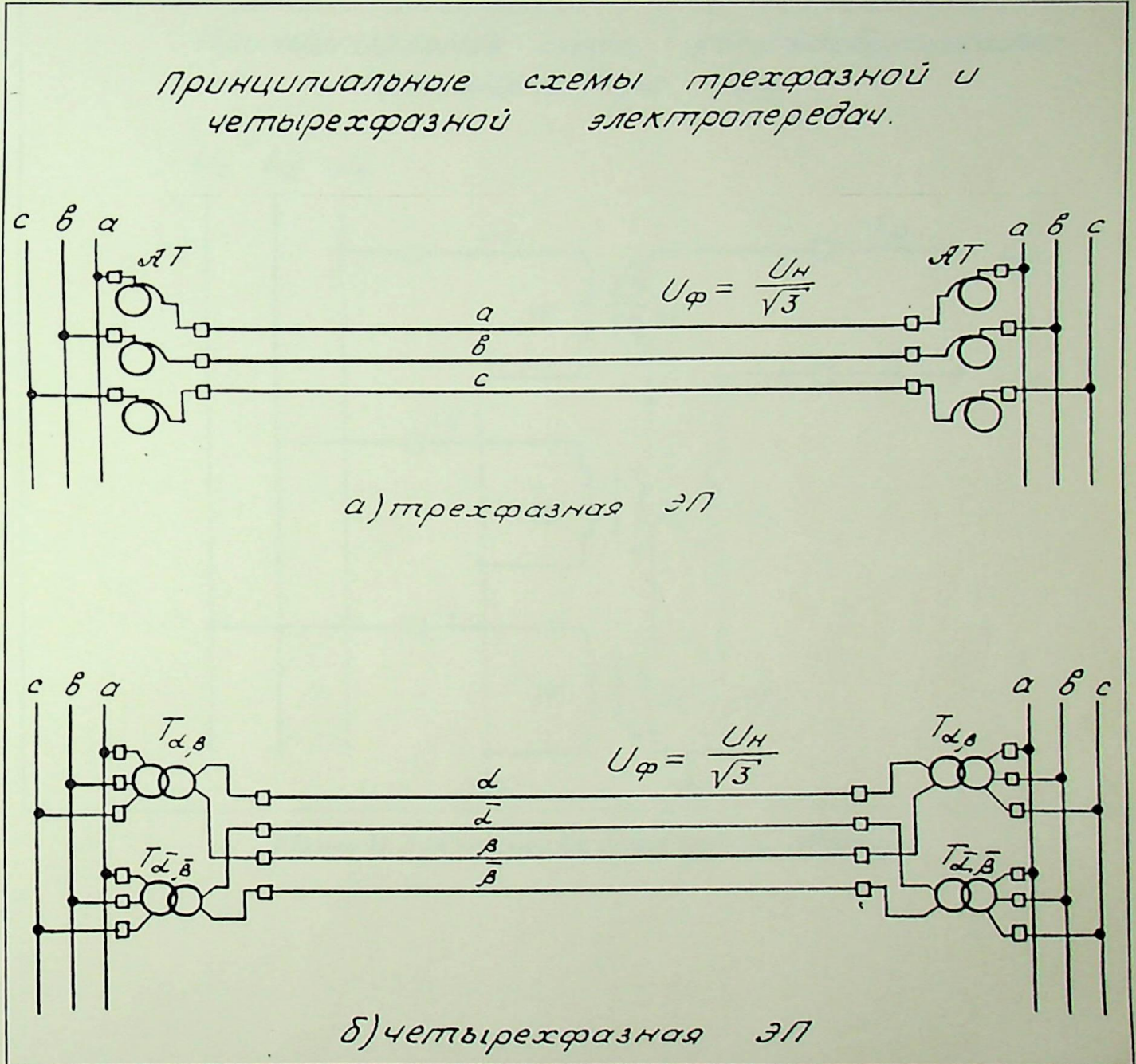


Figura II.1 - Transmissão Tetrafásica

A transformação do sistema trifásico em bifásico, é obtida através de transformadores que estão conectados de maneira semelhante à da figura II.2, mostrada pelo SibNIE.

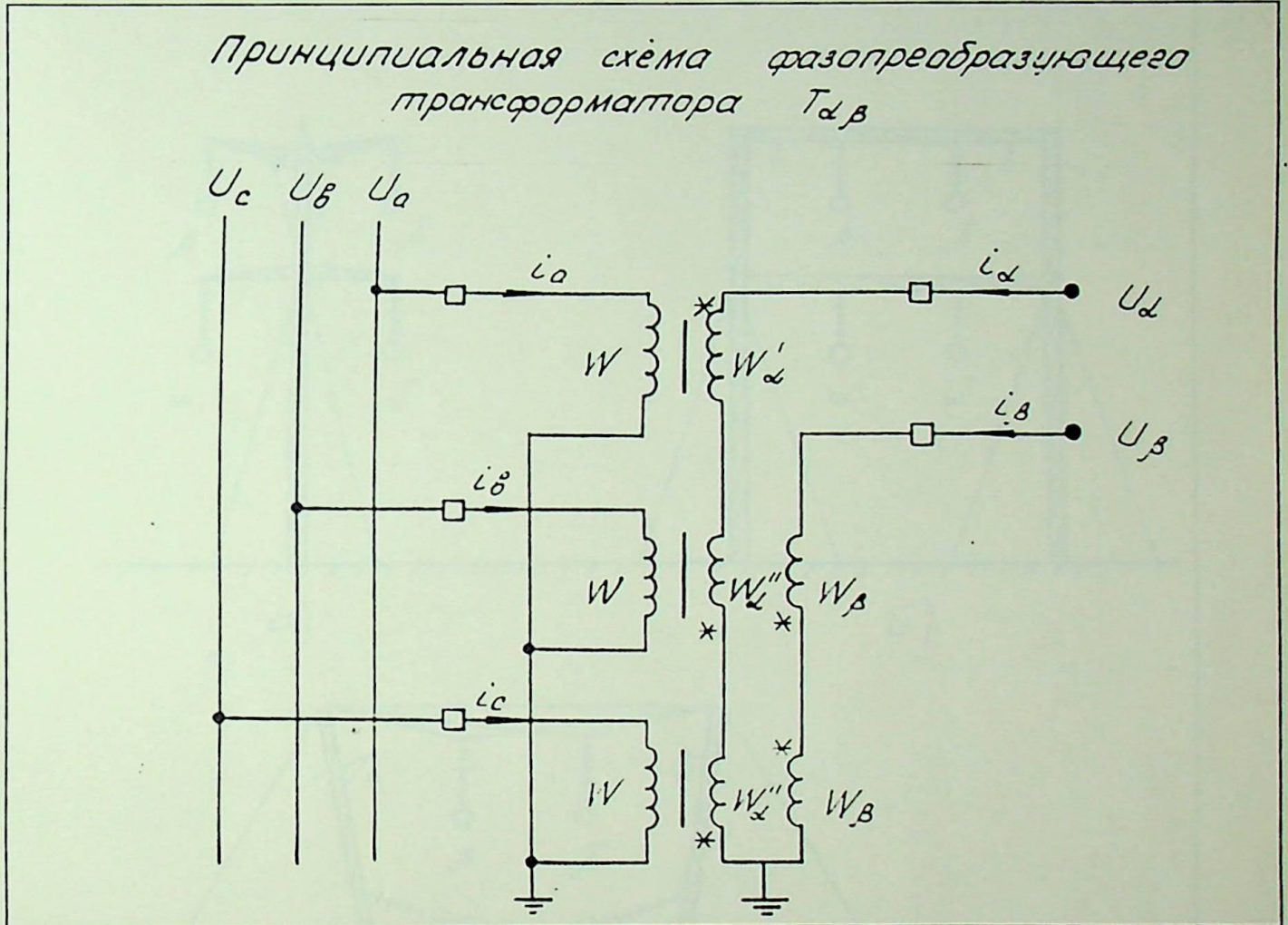


Figura II.2 - Conexão Le Blanc trifásica-bifásica

Referências Bibliográfica

[1] III-Seminário Brasil-URSS - "Transmissão em meio comprimento de onda" - ELETROBRÁS - RJ - 22 E 23 de maio de 1991.

[2] TAYLOR, W.T. Transformer Practice. New York, Ed. McGraw-Hill Book Company, 1913.

[3] BLUME, L.F. et alli Transformer Engeneering. New York, Ed. John Wiley & Sons Inc., 1951.

[4] STIGANT, S.A. & FRANKLIN, A.C. The J & P Transformer Book. 10 ed. London, Newnis-Butterworths, 1973. 166p.

[5] QUEVEDO, C. P. Eletromagnetismo. São Paulo, Ed. McGraw-Hill Book Company, 1940.

[6] GENERAL ELETRIC. Transformer Connections. New York, Schenectady, June 1960. 80p.

[7] OLIVEIRA, J.C. de et alli. Transformadores: Teoria e ensaios. São Paulo - Ed. Egard Blücher, 1984.

[8] E.E. STAFF. Magnetic Circuits and Transformers - Ed. John Wiley & Son, Inc. New York, 1965.

[9] ROBBA, E.J. Introdução aos sistemas elétricos de potência. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1972.

[10] ABREU, J. P. G.. Desenvolvimento e implementação de um transformador com relação de transformação complexa variável - "Phasor Controller". FEE-UNICAMP, Campinas - S.P., julho 1991.

[11] LAZAR, IRWIN. Electrical Systems analysis and design for industrial plants. New York, Ed. Mc Graw-Hill Inc., 1980.

