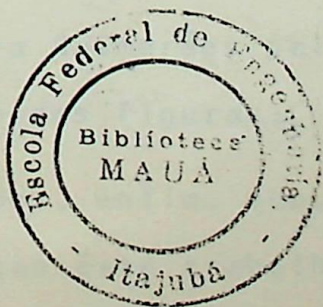


SISTEMÁTICA DE OBTENÇÃO E ALTERAÇÃO DE DEFASAMENTOS ANGULARES
DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS — ESTUDO DIDÁTICO - APLICADO —.

*Dissertação apresentada para
a obtenção do Grau de Mestre
em Ciências*



Autor: José Policarpo Gonçalves de Abreu

Orientador: Prof. Hêlio Mokarzel

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Hêlio Mokarzel, que antes de ser orientador, foi além de tudo um grande incentivador dêste trabalho e, sobretudo, atencioso quando consultado.

Aos Professores José Carlos de Oliveira, Felício Barbosa Monteiro, Celso Jadir Gorgulho Junqueira, Valberto Ferreira da Silva, Antônio Eduardo Hermeto, Jocêlio Souza de Sã, Rubens Dario Fuchs e Álvaro Pereira Rizzi, pelo incentivo no início, durante e ao final do mesmo.

Ao Professor Fernando José Costanti que, embora não pertencente ao nosso Departamento, deu-nos o indispensável apoio moral, quando mais necessitávamos.

A datilógrafa Jane Coli Junqueira e ao desenhista Anchieta Nogueira Guimarães pelo empenho e dedicação na datilografia e execução das figuras.

A todos, enfim, que, de uma forma ou de outra, colaboraram para que êste trabalho chegasse a bom têrmo.

HOMENAGEM

Ao Prof. Renato de Aquino Faria Nunes, que compreendeu, quando talvez muitos não o fizessem, o objetivo d'êste passo.

Sendo extensiva, com certo recuo no tempo, ao Prof. João Roberto Cogo.

DEDICATÓRIA

A minha esposa Silvia, que soube o que isto significava e serviu sempre como modelo a seguir, sobretudo , pela dedicação.

E, aos meus familiares também.

SUMÁRIO

	pag.
SUMÁRIO	i
PREFÁCIO	vi
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
CAPÍTULO I	
CONCEITO DE POLARIDADE E DEFASAMENTO ANGULAR	
1.1. Polaridade e Defasamento entre Tensões Senoidais	1.1
1.2. Defasamento Angular entre Tensões Senoidais	1.3
1.3. Defasamento Angular entre Fasores (Representativos de Tensões)	1.6
1.3.1. Defasagem entre Sistemas Trifásicos	1.8
CAPÍTULO II	
POLARIDADE E DEFASAMENTO ANGULAR DE TRANSFORMADORES	
2.1. Introdução	2.1
2.2. Polaridade de Transformador Monofásico	2.1
2.3. Análise de Polaridade Através de Fasores	2.6
2.4. Defasamento Angular em Transformadores Trifásicos	2.8
2.4.1. Determinação Gráfica do Defasamento Angular	2.9
2.4.2. Determinação Gráfica Simplificada do Defasamento Angular	2.16
CAPÍTULO III	
CONEXÕES E DIAGRAMAS FASORIAIS PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	
3.1. Introdução	3.1

	pag.
3.2. Estudo dos Defasamentos para as Diversas Conexões.....	3.1
3.3. Diagramas Fasoriais para Sequência de Fases Direta	3.4
3.3.1. Transformador Δ/Δ - Subtrativo (0^0)	3.4
3.3.2. Transformador Δ/Δ - Subtrativo (300^0)	3.5
3.3.3. Transformador Δ/Δ - Subtrativo (60^0)	3.6
3.3.4. Transformador Δ/Δ - Aditivo (180^0)	3.7
3.3.5. Transformador Δ/Δ - Aditivo (120^0)	3.8
3.3.6. Transformador Δ/Δ - Aditivo (240^0)	3.8
3.3.7. Transformador Y/Y - Subtrativo (0^0)	3.9
3.3.8. Transformador Y/Y - Aditivo (180^0)	3.10
3.3.9. Transformador Δ/Z - Subtrativo (0^0)	3.10
3.3.10. Transformador Δ/Z - Subtrativo (300^0)	3.11
3.3.11. Transformador Δ/Z - Subtrativo (60^0)	3.12
3.3.12. Transformador Δ/Z - Aditivo (180^0)	3.13
3.3.13. Transformador Δ/Z - Aditivo (120^0)	3.13
3.3.14. Transformador Δ/Z - Aditivo (240^0)	3.14
3.3.15. Transformador Δ/Y - Subtrativo (30^0)	3.15
3.3.16. Transformador Δ/Y - Subtrativo (330^0)	3.15
3.3.17. Transformador Δ/Y - Aditivo (210^0)	3.16
3.3.18. Transformador Δ/Y - Aditivo (150^0)	3.17
3.3.19. Transformador Y/Δ - Subtrativo (30^0)	3.18
3.3.20. Transformador Y/Δ - Subtrativo (330^0)	3.18
3.3.21. Transformador Y/Δ - Aditivo (210^0)	3.20
3.3.22. Transformador Y/Δ - Aditivo (150^0)	3.20
3.3.23. Transformador Y/Z - Subtrativo (30^0)	3.21
3.3.24. Transformador Y/Z - Subtrativo (330^0)	3.22
3.3.25. Transformador Y/Z - Aditivo (210^0)	3.23
3.3.26. Transformador Y/Z - Aditivo (150^0)	3.23

CAPÍTULO IV

DETERMINAÇÃO DO DEFASAMENTO ANGULAR, USANDO VOLTÍMETRO

4.1. Introdução	4.1
4.2. Rotação de um Triângulo em Torno do Vértice de Outro Triângulo	4.1
4.3. Obtenção de Triângulos de Tensões	4.2
4.4. Medições para a Determinação do D.A. a Partir dos Triângulos de TS e TI	4.4
4.5. Equacionamento para as Tensões a serem medidas a Partir dos Triângulos de TS e TI	4.7
4.5.1. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 0° ...	4.8
4.5.2. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 180° .	4.11
4.5.3. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 30° ..	4.13
4.5.4. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 210° ..	4.16
4.5.5. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 60° ...	4.18
4.5.6. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 240° .	4.20
4.5.7. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 120° .	4.22
4.5.8. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 300° .	4.24
4.5.9. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 150° .	4.26
4.5.10. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 330° .	4.29
4.6. Tabelas Padronizadas	4.32

CAPÍTULO V

DIAGRAMAS FASORIAIS PARA SF INVERSA E PARALELISMO COM D.A.s (A PRIORI) DISTINTOS

5.1. Introdução	5.1
5.2. Diagramas Fasoriais para Sequência de Fases Inversa	5.4
5.2.1. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.1)	5.5
5.2.2. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.2)	5.5
5.2.3. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.3)	5.5

	pag.
5.2.4. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.4)	5.6
5.2.5. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.5)	5.6
5.2.6. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.6)	5.7
5.2.7. Transformador Y/Y (Equivalente 3.3.7)	5.8
5.2.8. Transformador Y/Y (Equivalente 3.3.8)	5.8
5.2.9. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.9)	5.9
5.2.10. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.10)	5.10
5.2.11. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.11)	5.10
5.2.12. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.12)	5.11
5.2.13. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.13)	5.11
5.2.14. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.14)	5.12
5.2.15. Transformador Δ/Y (Equivalente 3.3.15)	5.12
5.2.16. Transformador Δ/Y (Equivalente 3.3.16)	5.13
5.2.17. Transformador Δ/Y (Equivalente 3.3.17)	5.14
5.2.18. Transformador Δ/Y (Equivalente 3.3.18)	5.15
5.2.19. Transformador Y/Δ (Equivalente 3.3.19)	5.15
5.2.20. Transformador Y/Δ (Equivalente 3.3.20)	5.16
5.2.21. Transformador Y/Δ (Equivalente 3.3.21)	5.16
5.2.22. Transformador Y/Δ (Equivalente 3.3.22)	5.17
5.2.23. Transformador Y/Z (Equivalente 3.3.23)	5.17
5.2.24. Transformador Y/Z (Equivalente 3.3.24)	5.18
5.2.25. Transformador Y/Z (Equivalente 3.3.25)	5.19
5.2.26. Transformador Y/Z (Equivalente 3.3.26)	5.19
5.3. Mapeamento para Mudança do D.A. por Alterações Externas	5.20
5.4. Paralelismo de Transformadores com D.A.s (em princípio) Distintos.....	5.22

CAPÍTULO VI

VERIFICAÇÕES DE LABORATÓRIO

6.1. Introdução	6.1
6.2. Medições de Tensões e Verificação da Possibilidade de Paralelismo	6.1
6.2.1. Primeiro Caso	6.1
6.2.2. Segundo Caso	6.4
6.2.3. Terceiro Caso	6.5
6.2.4. Quarto Caso	6.6

CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Transformadores Hexafásicos	7.1
7.2. Desequilíbrio e Distorções Harmônicas	7.1
7.3. Medição e Proteção	7.2
7.4. Tabela para Paralelismo	7.2
7.4.1. Uso da Tab. VII.1	7.3

BIBLIOGRAFIA	7.5
--------------------	-----

APÊNDICE I - FASORES	I.1
----------------------------	-----

APÊNDICE II - SEQUÊNCIA DE FASES	II.1
--	------

APÊNDICE III - OPERAÇÃO EM PARALELO DE TRANSFORMADORES	III.1
--	-------

APÊNDICE VI - VERIFICAÇÃO DA POLARIDADE (POR FASE) DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	IV.1
--	------

APÊNDICE V - OBTENÇÃO DA POLARIDADE ATRAVÉS DO MÉTODO: GOLPE INDUTIVO	V.1
---	-----

PREFÁCIO

A análise da polaridade e do defasamento angular de transformadores é sempre vista com certo receio pela maioria dos que operam os mesmos, sejam êles, ainda estudantes, ou, pessoal já formado.

Nos diversos cursos, por nós, já ministrados, para atendimento à indústria, aqui na universidade ou nas próprias empresas, quando fazemos algumas considerações a respeito do assunto, notamos, a princípio, um certo ceticismo quanto a veracidade da interpretação oferecida, aliado ao receio já mencionado, com relação a êste assunto.

Alguns sistemas elétricos apresentam, por vezes, falhas de operação, na medição e na proteção, devido a ligações incorretas de transformadores, sejam de potencia, de corrente (T.C.s) ou de potencial (T.P.s).

A operação em paralelo de transformadores exige, como um de seus pré-requisitos, a observância do ângulo de defasamento dos transformadores a serem colocados sob tal condição. E novamente aqui percebemos que, em grande parte dos casos, por ceticismo ou receio, se os ângulos de defasamento indicados nas placas de identificação forem exatamente os mesmos, a colocação em paralelo é efetuada sem maiores problemas. No entanto, em caso contrário, a efetuação do paralelismo é evitada. Ao final do estudo será do conhecimento dos leitores que isso não é impres

cindível, desde que algumas alterações, por vezes bem simples, sejam efetuadas.

Tudo isso nos levou à seguinte pergunta: Por que, afinal, isto ocorre? E a resposta é relativamente simples: A falta de um estudo específico, detalhado e sistemático abordando o problema, que em geral é apenas um ítem na maioria dos programas e livros que tratam de transformadores.

Pretendemos aqui, então, fazer um estudo exaustivo do assunto e propor uma sistemática de "ataque" ao problema, ou seja, uma conduta que permita, de antemão, saber com o que estamos lidando e onde, possivelmente, chegaremos.

A finalidade principal do trabalho é a de mostrar as alterações internas e/ou externas a serem efetuadas em transformadores trifásicos, de forma que transformadores com defasamentos angulares (a priori) distintos, possam operar em paralelo. (A tabela VII.1, apresentada ao final do Cap. VII, mostra como isso pode ser feito).

Por outro lado, a etapa inicial do trabalho estará assentada sobre o estudo pormenorizado de polaridade e defasamento angular e, portanto, o estudo servirá sem dúvida, para outras finalidades, como por exemplo: aplicação nas áreas de Medidas e de Proteção.

Evidentemente não nos arvoraremos em dizer que será o estudo mais completo a ser feito sobre o assunto (inclusive parte do Cap. VII dá indicações de possíveis prolongamentos para este trabalho); entretanto, afirmamos que muitos terão suas atuais (e por vezes futuras) dúvidas, a respeito deste assunto,

sanadas.

Esperamos, então, que o trabalho, aqui apresentado, venha a ser de grande valia para todos que venham, porventura, a consultá-lo.

O Autor
EFEI

Fevereiro/1980

LISTA DE ABREVIATURAS

- D.A. - Defasamento angular ou ângulo de defasamento.
- AT - Alta tensão; do lado de Alta Tensão; do lado de maior tensão; (o mesmo que TS).
- BT - Baixa Tensão; do lado de Baixa Tensão; do lado de menor tensão; (o mesmo que TI)
- TS - Tensão superior, do lado de tensão superior; do lado de maior tensão; (o mesmo que AT)
- TI - Tensão inferior, do lado de tensão inferior; do lado de menor tensão; (o mesmo que BT).
- DF - Diagramas Fasoriais ou Diagramas de Fasores.
- (AH) - No sentido Anti-Horário.
- (H) - No sentido Horário.
- SF - Sequência de fases.
- Dd - Transformador Delta(TS)/Delta(TI)
- Dy - Transformador Delta(TS)/Estrela(TI)
- Yd - Transformador Estrela(TS)/Delta(TI)
- Yy - Transformador Estrela(TS)/Estrela(TI)
- Dz - Transformador Delta(TS)/Zigue-Zague(TI)
- Yz - Transformador Estrela(TS)/Zigue-Zague (TI)

CAPÍTULO I

CONCEITO DE POLARIDADE E DEFASAMENTO ANGULAR

1.1. Polaridade e Defasamento entre Tensões Senoidais

Suponhamos que duas tensões alternadas senoidais, de mesma frequência, se apresentem, como na fig. 1.1

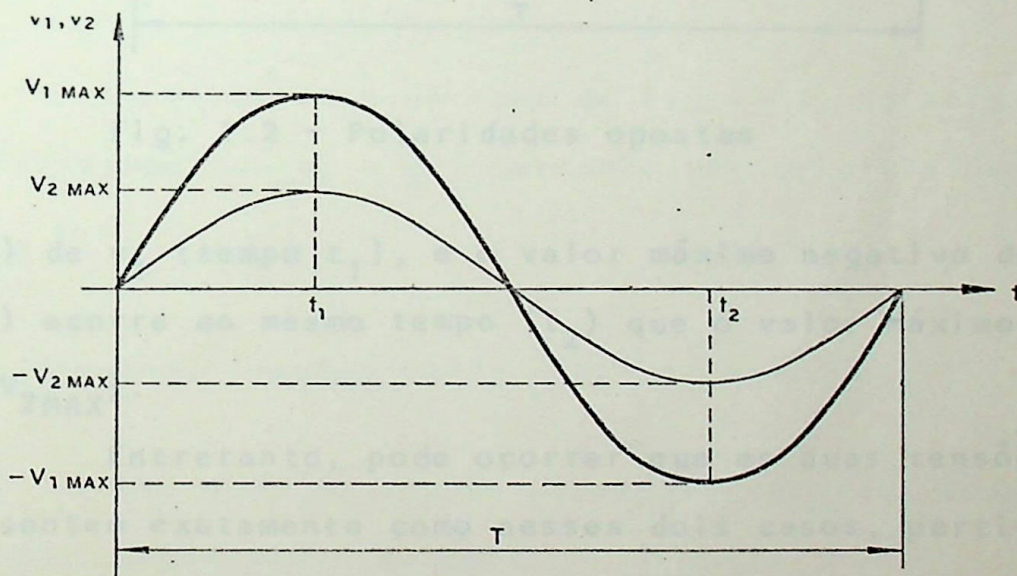


Fig. 1.1 - Mesma polaridade

Da forma como se apresentam as tensões v_1, v_2 com relação ao eixo dos tempos, dizemos que têm mesma polaridade, pois ambas apresentam, simultaneamente, valores positivos e valores negativos, ou ainda, os valores máximos positivos (V_{1MAX} e V_{2MAX}) e negativos ($-V_{1MAX}$ e $-V_{2MAX}$) ocorrem ao mesmo tempo (t_1 e t_2 , respectivamente)

Por outro lado, se as tensões v_1 e v_2 se apresentarem como na fig. 1.2, diremos que têm polaridades opostas, pois

quando uma apresenta valores positivos, a outra apresenta valores negativos e vice-versa, ou ainda, o valor máximo positivo de v_1 (V_{1MAX}) ocorre simultaneamente ao valor máximo negativo

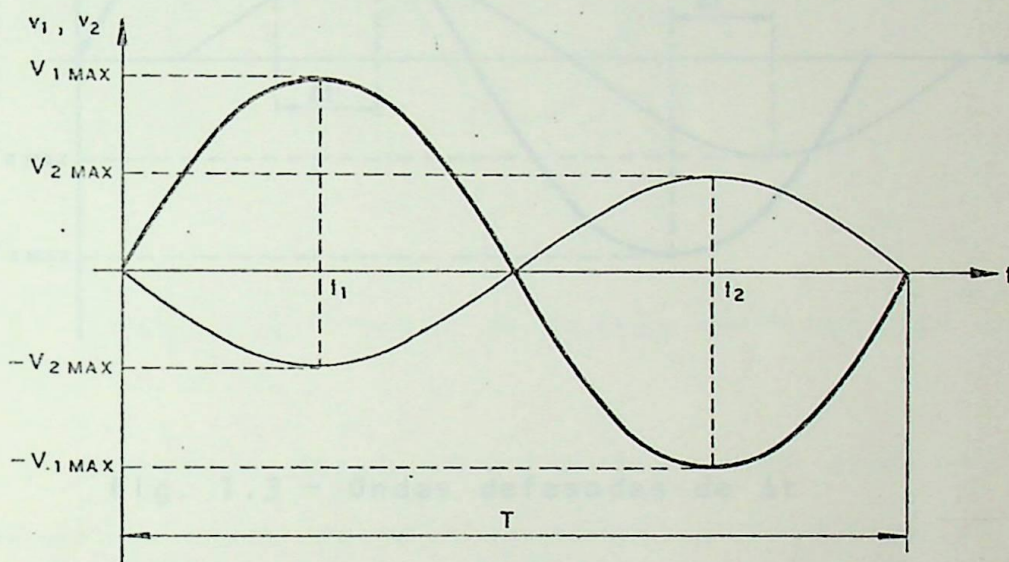


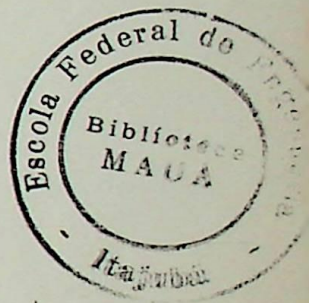
Fig. 1.2 - Polaridades opostas

($-V_{2MAX}$) de v_2 (tempo t_1), e o valor máximo negativo de v_1 ($-V_{1MAX}$) ocorre ao mesmo tempo (t_2) que o valor máximo positivo de v_2 (V_{2MAX}).

Entretanto, pode ocorrer que as duas tensões não se apresentem exatamente como nesses dois casos, particulares, mas que, por exemplo, V_{2MAX} apareça depois de um intervalo de tempo Δt após a ocorrência de V_{1MAX} . Evidentemente, como ambas as tensões tem a mesma frequência, $-V_{2MAX}$ aparecerá após o mesmo intervalo de tempo Δt da ocorrência de $-V_{1MAX}$, (Vide fig. 1.3).

Pela fig. 1.3 nota-se então que há uma defasagem de tempo (Δt) entre as ocorrências de V_{1MAX} e V_{2MAX} , e $-V_{1MAX}$ e $-V_{2MAX}$, respectivamente.

De acordo com isto no caso da fig. 1.1, mesma polaridade, podemos afirmar que $\Delta t=0$, portanto, defasagem nula.



quando uma apresenta valores positivos, a outra apresenta valores negativos e vice-versa, ou ainda, o valor máximo positivo de v_1 (V_{1MAX}) ocorre simultaneamente ao valor máximo negativo

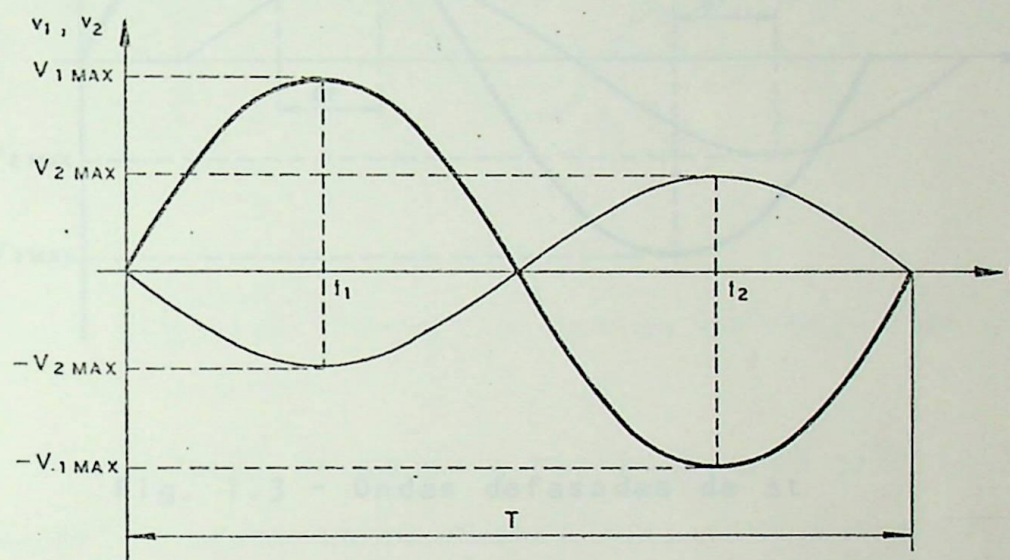
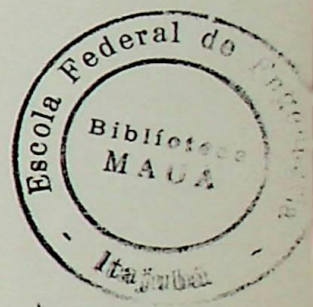


Fig. 1.2 - Polaridades opostas



$(-V_{2MAX})$ de v_2 (tempo t_1), e o valor máximo negativo de v_1 ($-V_{1MAX}$) ocorre ao mesmo tempo (t_2) que o valor máximo positivo de v_2 (V_{2MAX}).

Entretanto, pode ocorrer que as duas tensões não se apresentem exatamente como nesses dois casos, particulares, mas que, por exemplo, V_{2MAX} apareça depois de um intervalo de tempo Δt após a ocorrência de V_{1MAX} . Evidentemente, como ambas as tensões tem a mesma frequência, $-V_{2MAX}$ aparecerá após o mesmo intervalo de tempo Δt da ocorrência de $-V_{1MAX}$, (Vide fig. 1.3).

Pela fig. 1.3 nota-se então que há uma defasagem de tempo (Δt) entre as ocorrências de V_{1MAX} e V_{2MAX} , e $-V_{1MAX}$ e $-V_{2MAX}$, respectivamente.

De acordo com isto no caso da fig. 1.1, mesma polaridade, podemos afirmar que $\Delta t=0$, portanto, defasagem nula.

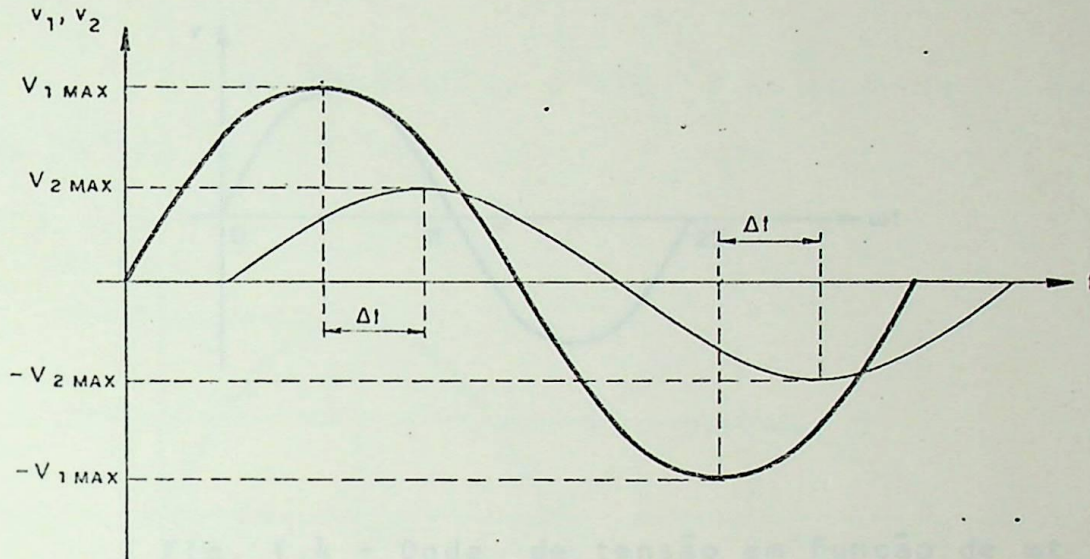


Fig. 1.3 - Ondas defasadas de Δt

Analogamente no caso da fig. 1.2, polaridade opostas, observamos que $\Delta t = \frac{T}{2}$, portanto um semiciclo de defasagem entre v_1 e v_2 .

1.2. Defasamento Angular entre Tensões Senoidais

Uma onda de tensão alternada senoidal pode ser representada, genericamente, por:

$$v = V_{MAX} \text{ sen } (\omega t)$$

A partir daí observamos que a onda de tensão pode ser representada, então, num plano cartesiano em função de ωt , que é dimensionalmente $[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \times \text{s} = \text{rad}]$ um ângulo. A fig. 1.4 a seguir, esclarece.

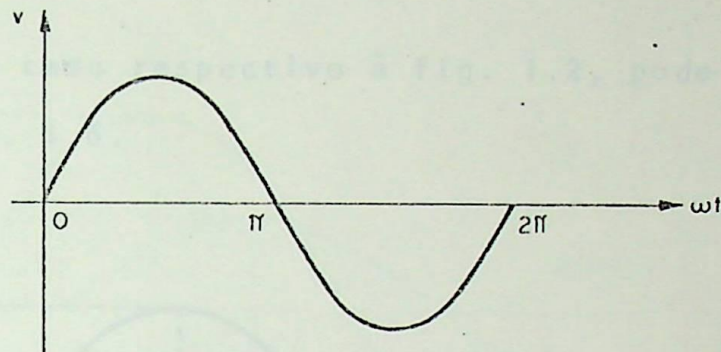


Fig. 1.4 - Onda de tensão em função de ωt

Através dessa nova representação gráfica, podemos rerepresentar os casos antes discutidos, como a seguir.

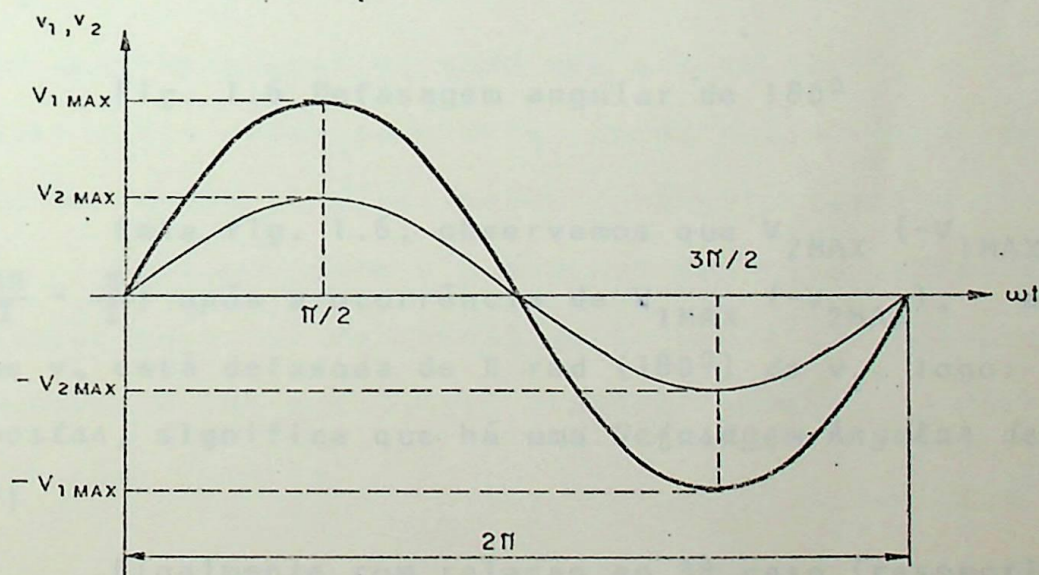


Fig. 1.5 - Defasagem angular nula

De acordo com a fig. 1.5, V_{1MAX} e V_{2MAX} ocorrem exatamente a $\omega t = \frac{\pi}{2}$ rad e $-V_{1MAX}$ e $-V_{2MAX}$ a $\omega t = \frac{3\pi}{2}$ rad, e observamos aqui que não há defasagem entre v_1 e v_2 . Portanto podemos afirmar que *Mesma Polaridade*, significa em outras palavras *Defasagem Angular Nula*.

O caso respectivo à fig. 1.2, pode ser reestudado através da fig. 1.6.

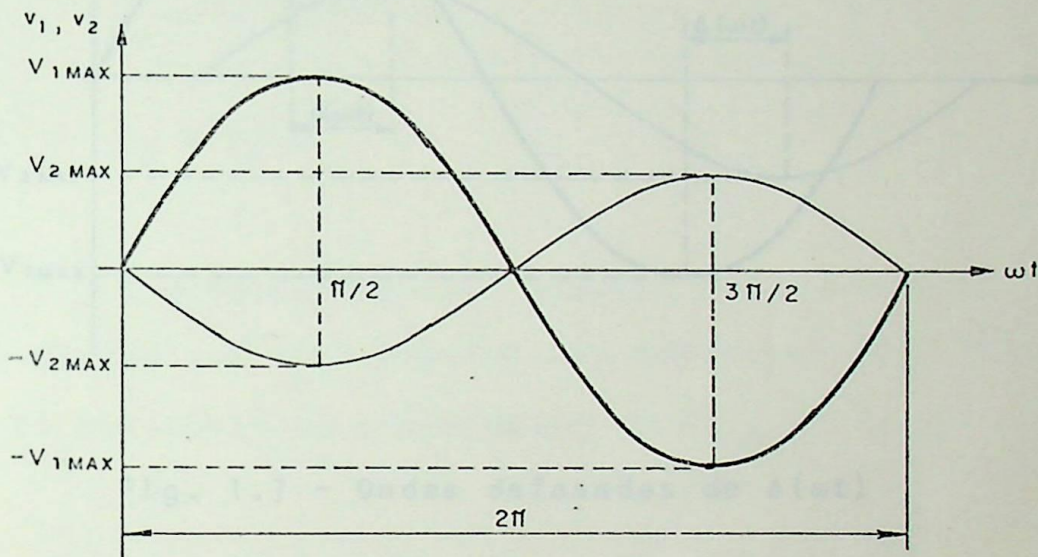


Fig. 1.6 Defasagem angular de 180°

Pela fig. 1.6, observamos que V_{2MAX} ($-V_{1MAX}$) ocorre π rad ($\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{2}$) após a ocorrência de V_{1MAX} ($-V_{2MAX}$), afirmamos então que v_2 está defasada de π rad (180°) de v_1 , logo: *Polaridades Opostas*, significa que há uma *Defasagem Angular de π rad.* (ou 180°)

Finalmente com relação ao 3º caso (respectivo à fig. 1.3), poderíamos registrar a fig. 1.7:

Através, então da fig. 1.7, poderíamos dizer que uma vez que V_{2MAX} ($-V_{2MAX}$) ocorrem após $\Delta(\omega t)$ rad da ocorrência de V_{1MAX} ($-V_{1MAX}$), existe entre v_1 e v_2 uma *Defasagem Angular de $\Delta(\omega t)$ rad* ($[\Delta(\omega t) \times 57,29]^\circ$).

Os conceitos até aqui expostos são, em engenharia elétrica, necessários a muitos estudos, entretanto, é deveras

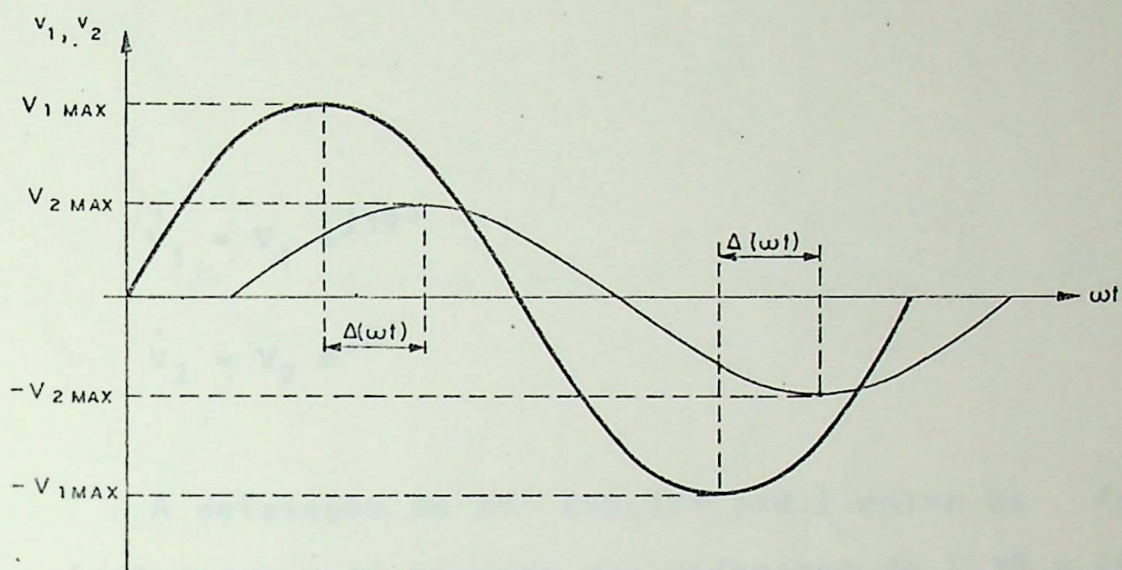


Fig. 1.7 - Ondas defasadas de $\Delta(\omega t)$

tedioso e contraproducente, toda vez que se necessita de obter a defasagem entre ondas senoidais, traçarmos o comportamento dessas ondas em função (indiretamente do ângulo (ωt)) do tempo.

Portando este é o momento oportuno de fazermos a representação fasorial das ondas de tensão (vide Apêndice I), pois a defasagem entre as ondas é perfeitamente representada através de seus fasores.

1.3. Defasamento Angular entre Fasores (Representativos de Tensões).

Seja:

$$v_1(t) = V_{1MAX} \text{ sen } (\omega t + 30^\circ)$$

$$v_2(t) = V_{2MAX} \text{ sen } (\omega t + 0^\circ)$$

donde:

$$\dot{V}_1 = V_1 e^{j30^\circ}$$

$$\dot{V}_2 = V_2 e^{j0^\circ}$$

A defasagem de 30° ($\approx 0,524$ rad.) entre os fasores \dot{V}_1 e \dot{V}_2 , indica que está havendo uma defasagem de $1,38 \times 10^{-3}$ s (para $f=60$ Hz) entre as ocorrências de V_{1MAX} e V_{2MAX} .

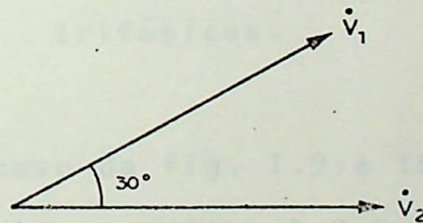


Fig. 1.8 - Defasamento entre fasores

Contudo para o estudo a ser desenvolvido trataremos sempre da defasagem angular entre os fasores representativos das ondas de tensão, uma vez que isso é válido, e por apresentarem as informações necessárias ao estudo dessas ondas de tensão.

Portanto nos nossos estudos os fasores representativos de sistemas trifásicos apresentar-se-ão defasados de 120° entre si, numa ordem pré-estabelecida, chamada de sequência de fases.

A representação de fasores de sistemas trifásicos é:

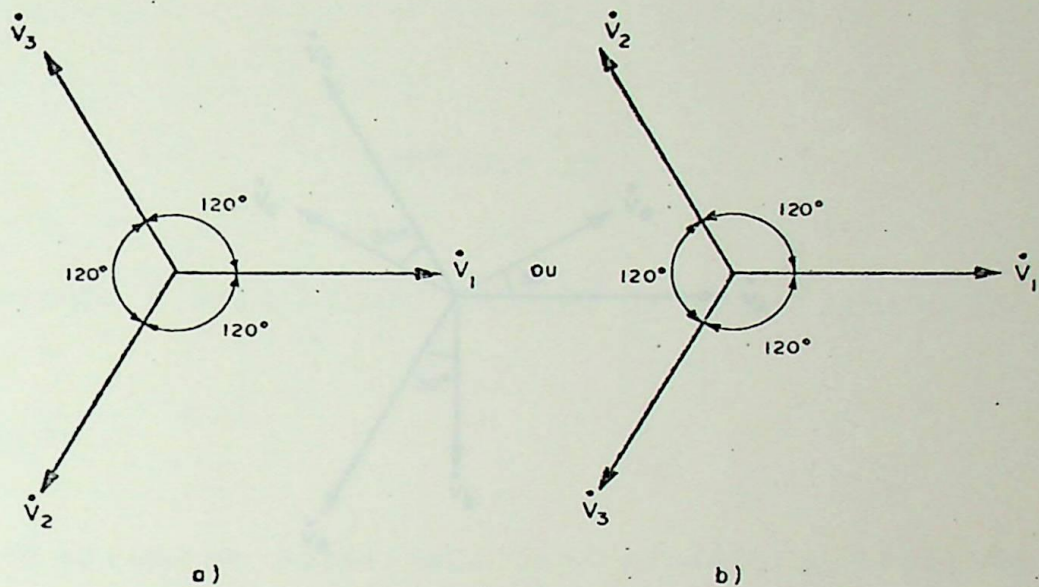


Fig. 1.9 - Fasores representativos de tensões trifásicas.

Onde no caso da fig. 1.9.a teríamos a chamada sequência de fases direta e para a fig. 1.9.b a sequência de fases inversa (vide Apêndice II).

1.3.1. Defasagem entre Sistemas Trifásicos

Tomando-se dois sistemas trifásicos e colocando - se um deles como referência, podemos fixar não só a defasagem entre as tensões de cada sistema, entre si, como a defasagem entre os dois sistemas.

Através da fig. 1.10, observamos que \dot{V}_a está defasada de \dot{V}_A de 30° . Como \dot{V}_B e \dot{V}_C estão, assim como \dot{V}_b e \dot{V}_c , defasados de \dot{V}_A , e de \dot{V}_a respectivamente, de 120° , podemos afirmar que a defasagem entre \dot{V}_b e \dot{V}_B , e \dot{V}_c e \dot{V}_C também é de 30° , respectivamente.

Entretanto, a conclusão acima exposta, só é válida ,

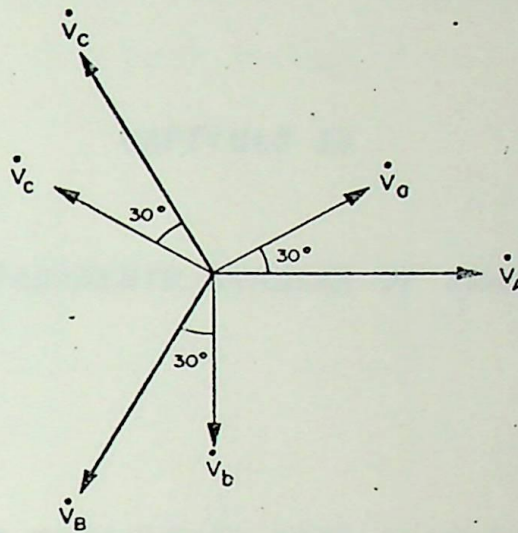


Fig. 1.10 - Defasagem entre sistemas trifásicos de tensões.

para tensões de mesmo índice (\dot{V}_A e \dot{V}_a , \dot{V}_B e \dot{V}_b , e \dot{V}_C e \dot{V}_c), se a sequência de fases for a mesma.

"Estas informações são muito importantes na análise de ângulos de defasamento de transformadores trifásicos".

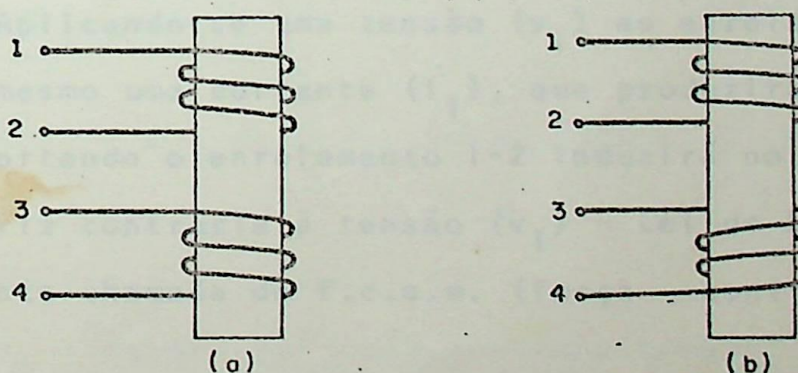
CAPÍTULO II

POLARIDADE E DEFASAMENTO ANGULAR DE TRANSFORMADORES

2.1. Introdução

O estudo de polaridade para transformadores, se resume à marcação da polaridade dos terminais dos enrolamentos, indicando-nos quais são os terminais positivos e negativos a cada instante, ou seja como se posicionam os valores instantâneos da f.c.e.m. (primário) e da f.e.m. (secundário).

A polaridade dos transformadores depende, essencialmente, de como são enroladas (sobre o núcleo) as espiras do enrolamento primário e do enrolamento secundário.



1-2 - TERMINAIS DO PRIMÁRIO
3-4 - TERMINAIS DO SECUNDÁRIO

Fig. 2.1 - Sentido de Enrolamentos

(a) concordantes

(b) discordantes

2.2. Polaridade de Transformador Monofásico.

A fim de que haja uma melhor representação do ci_r

cuito magnético para um transformador monofásico, transportaremos as informações da fig. 2.1 para a fig. 2.2.

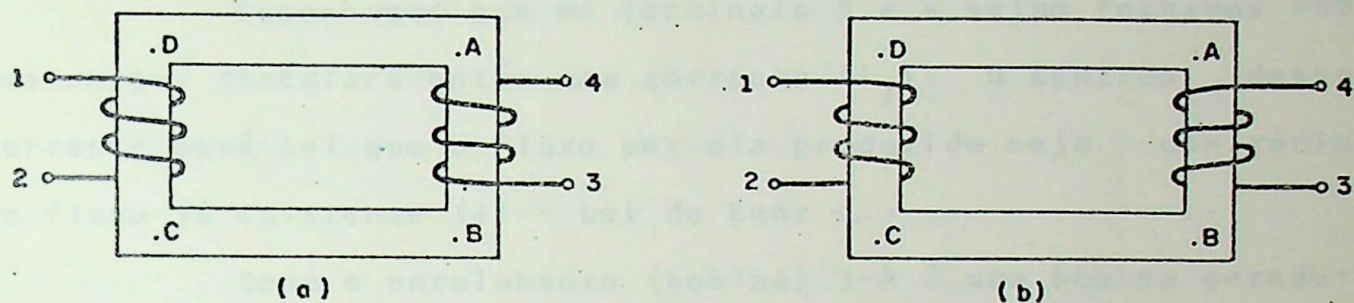


Fig. 2.2 - Transformadores monofásicos

(a) com enrolamentos concordantes

(b) com enrolamentos discordantes

A primeira vista temos a impressão de que a fig. 2.2, está errada. Entretanto, se seguirmos o caminho: $\dot{A} \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$, notamos que está de acordo com o exposto na fig. 2.1.

Aplicando-se uma tensão (v_1) ao enrolamento 1-2, circulará pelo mesmo uma corrente (i_1), que produzirá um fluxo (ϕ). Este fluxo cortando o enrolamento 1-2 induzirá no mesmo uma força eletromotriz contrária à tensão (v_1) - Lei de Lenz - e será de agora em diante chamada de f.c.e.m. (força contra-eletromotriz) (e_1).

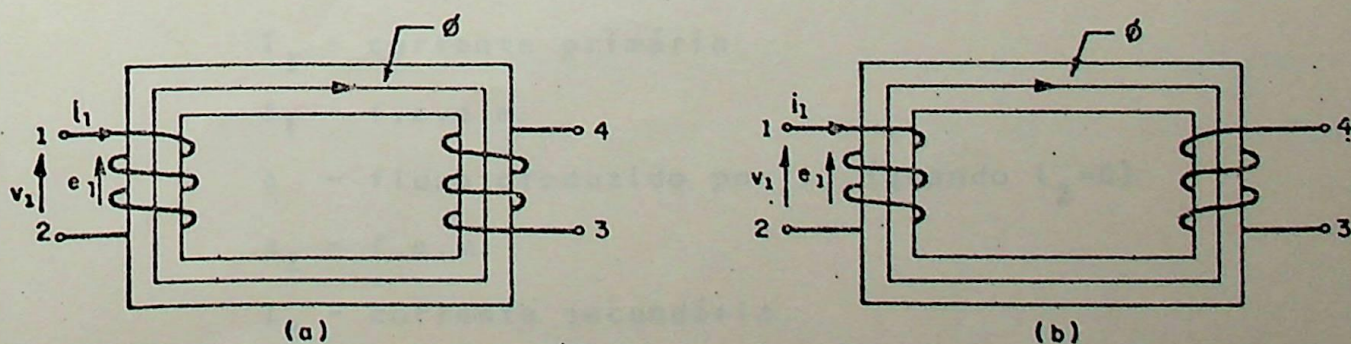


Fig. 2.3 - Sentidos instantâneos de v_1, i_1, ϕ, e_1

O fluxo cortando o enrolamento 3-4 induzirá no mesmo uma força eletromotriz, f.e.m. (\mathcal{E}_2).

Qual será o sentido instantâneo de \mathcal{E}_2 ?

Suponhamos que os terminais 3 e 4 sejam fechados sob uma carga, circulará então uma corrente (i_2). O sentido dessa corrente será tal que o fluxo por ela produzido seja contrário ao fluxo já existente (ϕ) - Lei de Lenz -.

Como o enrolamento (bobina) 3-4 é uma bobina geradora (na mesma foi gerada a f.e.m. \mathcal{E}_2), os sentidos de \mathcal{E}_2 e i_2 devem ser os mesmos. Portanto já está definido o sentido de \mathcal{E}_2 .

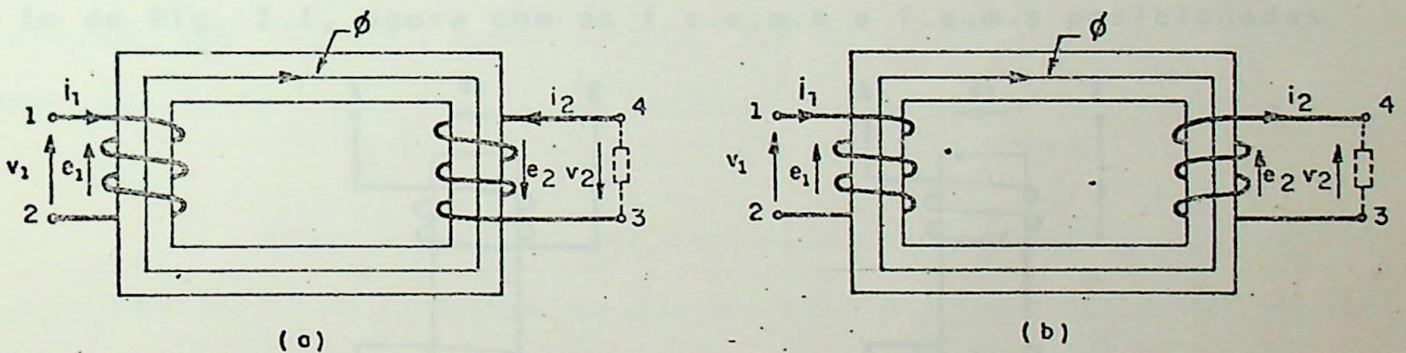


Fig. 2.4 - Sentidos instantâneos de: \mathcal{E}_2 , i_2 , v_2

Na fig. 2.4, temos:

v_1 - tensão aplicada ao transformador (tensão primária)

i_1 - corrente primária

\mathcal{E}_1 - f.c.e.m

ϕ - fluxo produzido por i_1 (quando $i_2=0$)

\mathcal{E}_2 - f.e.m.

i_2 - corrente secundária

v_2 - tensão de saída (tensão secundária - que será a

diferença entre ℓ_2 e a queda de tensão na impedância da bobina 3-4, quando houver i_2).

A observação da fig. 2.4, mostra-nos o seguinte: para a mesma posição instantânea da f.c.e.m. ℓ_1 , a f.e.m. ℓ_2 assume duas posições opostas, fig. 2.4.a e fig. 2.4.b, dependendo então somente, pois foi a única alteração efetuada, da forma como são enroladas as bobinas. Isso irá então definir a polaridade do transformador.

Para que a análise a ser agora desenvolvida, seja facilmente aplicada a transformadores trifásicos, voltamos ao modelo da fig. 2.1, agora com as f.c.e.m.s e f.e.m.s posicionadas.

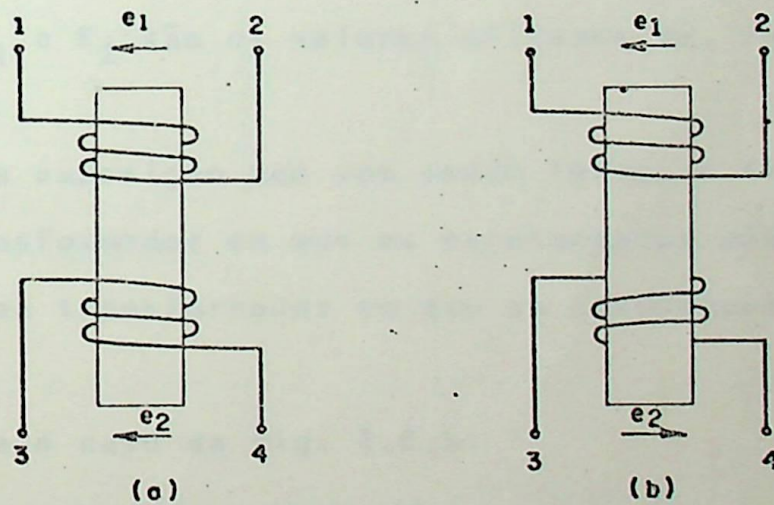


Fig. 2.5 - Sentidos instantâneos de ℓ_2 comparativamente a ℓ_1 .

Curto-circuitemos 1 e 3 e coloquemos um voltímetro entre 2 e 4, teremos então, simplificada, sem o núcleo magnético:

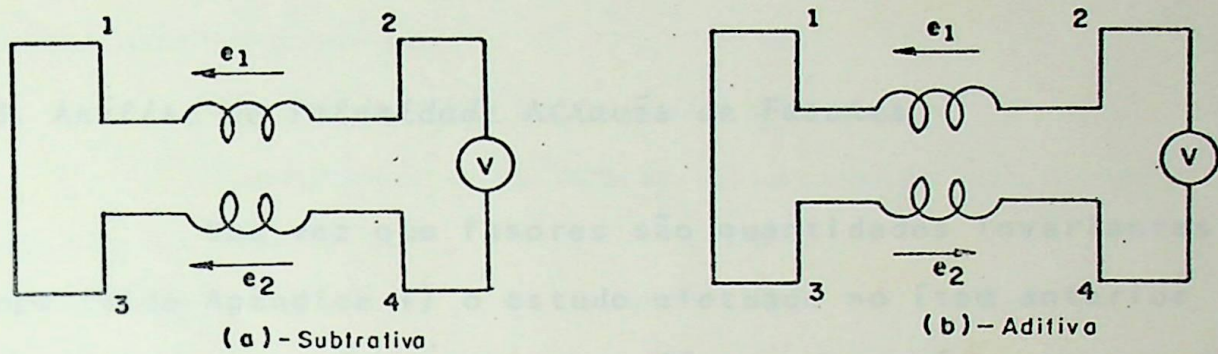


Fig. 2.6 - Verificação de polaridade

No caso da fig. 2.6.a, observamos que o voltímetro indicará: $V = E_1 - E_2$ e no caso da fig. 2.6.b, o voltímetro indicará $V = E_1 + E_2$ (onde E_1 e E_2 são os valores eficazes de, respectivamente, ℓ_1 e ℓ_2).

Pela exposição que vem sendo feita, a fig. 2.6.a corresponde ao transformador em que os enrolamentos são concordantes e a fig. 2.6.b ao transformador em que os enrolamentos são discordantes, logo:

Para o caso da fig. 2.6.a:

ENROLAMENTOS CONCORDANTES $\rightarrow V = E_1 - E_2 \rightarrow$ POLARIDADE SUBTRATIVA

e

Para o caso da fig. 2.6.b:

ENROLAMENTOS DISCORDANTES $\rightarrow V = E_1 + E_2 \rightarrow$ POLARIDADE ADITIVA

Ou seja, transformadores que tenham as bobinas do primário e do secundário enroladas no mesmo sentido, diz-se ter polaridade subtrativa e transformadores onde as bobinas do primário e do secundário estejam enroladas em sentidos opostos, diz-se ter

polaridade aditiva.

2.3. Análise de Polaridade Através de Fasores

Uma vez que fasores são quantidades invariantes no tempo (Vide Apêndice I) o estudo efetuado no ítem anterior pode ser efetuado através dos mesmos, já que nesse ítem tomava-se os sentidos instantâneos das f.e.m.s e f.c.e.m.s. Logo a verificação da polaridade através dos fasores de \dot{E}_1 e de \dot{E}_2 , pode ser efetuada sem maiores problemas.

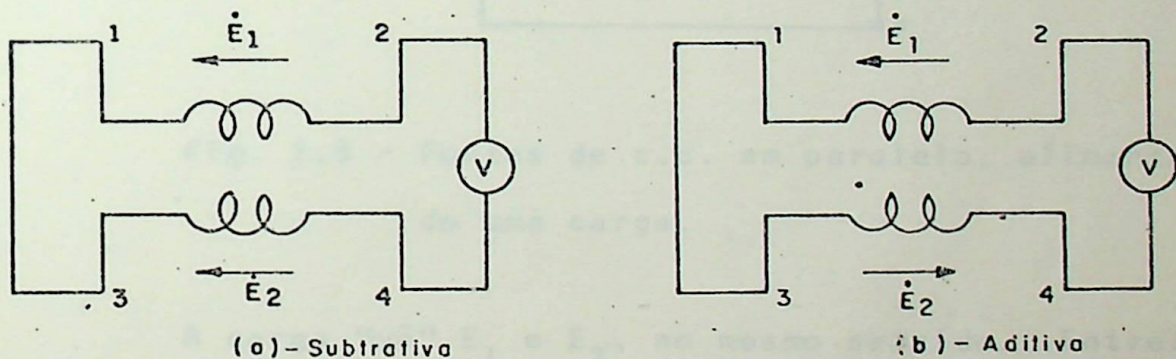


Fig. 2.7 - Verificação de polaridade com fasores

Aqui entretanto aparece um problema de "visualização" na análise de polaridade. Vejamos:

No ítem 1.2 do capítulo I afirmávamos que mesma polaridade correspondia a uma defasagem angular nula, e as figs. 1.1 e 1.5 mostravam que essa defasagem angular nula correspondia as ondas de tensão se somarem, instante por instante.

Entretanto, a fig. 2.7.a mostra que sendo o ângulo entre \dot{E}_1 e \dot{E}_2 igual a zero os fasores (e portanto as ondas de tensão) estão se subtraindo.

Onde está há incoerência?

Não há incoerência, tudo depende somente de como "visualizar" o problema.

O exemplo abaixo, sana a dúvida.

Suponhamos duas fontes alimentando uma carga, como mostrado na fig. 2.8.

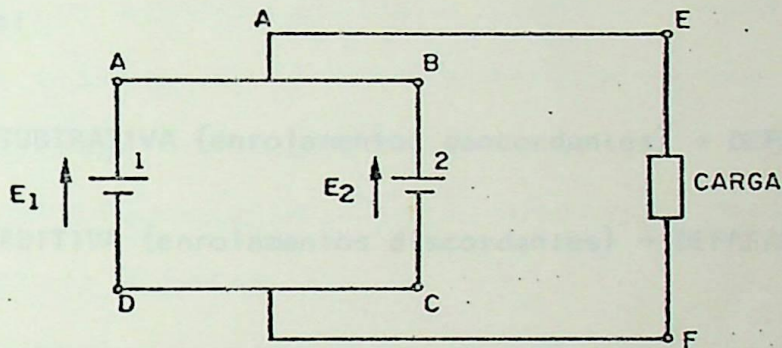


Fig. 2.8 - Fontes de c.c. em paralelo, alimentando uma carga.

A carga "vê" E_1 e E_2 , no mesmo sentido. Entretanto a fonte 2 "vê" E_1 em sentido oposto a E_2 , bem como a fonte 1 "vê" E_2 em sentido oposto a E_1 .

Ou seja, para "quem faz" o trajeto A-B-C-D-A E_1 e E_2 estão em sentidos opostos, porém, para "quem faz" o trajeto E-F, E_1 e E_2 estão no mesmo sentido. A isso é que se deve a "incoerência" acima descrita.

Conclusão

Polaridade Subtrativa - significa para "quem está do lado de fora" ^{vê} que \dot{E}_1 e \dot{E}_2 estão no mesmo sentido (defasagem-nula), mas significa para "quem está do lado de dentro" ^{vê} que \dot{E}_1 e \dot{E}_2 estão em sentidos opostos.

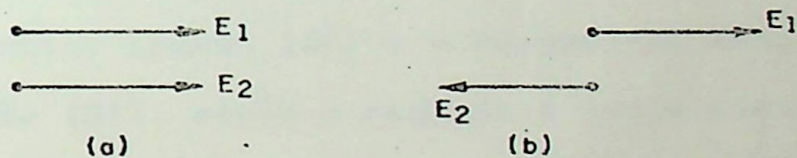
Da mesma forma que:

Polaridade Aditiva - significa para "quem está do lado de fora" que \dot{E}_1 e \dot{E}_2 estão em sentidos opostos (defasagem de 180°), mas significa para "quem está do lado de dentro" que \dot{E}_1 e \dot{E}_2 estão no mesmo sentido.

Como o interesse maior é o posicionamento dos fasores sob o ponto de vista da carga a ser alimentada, resume-se o problema assim:

POLARIDADE SUBTRATIVA (enrolamentos concordantes) \rightarrow DEFASAGEM NULA (0°)

POLARIDADE ADITIVA (enrolamentos discordantes) \rightarrow DEFASAGEM DE 180°



a - subtrativa, 0°

b - aditiva, 180°

Fig. 2.9 - Polaridade e defasagem angular

2.4. Defasamento angular em transformadores trifásicos

Sabemos que uma das principais finalidades da determinação da polaridade de transformadores é para se poder verificar se os mesmos podem ou não entrar em paralelo (vide Apêndice III).

Para transformadores monofásicos basta a observação de serem subtrativos ou aditivos, sendo: subtrativos fechados diretamente em paralelo com subtrativos, aditivos com aditivos, e

subtrativos com aditivos, desde que efetuada uma troca, bem simples, nas ligações.

No caso de transformadores trifásicos, podemos ter para cada fase, os enrolamentos concordantes (dizemos então que é subtrativo por fase) ou os enrolamentos discordantes (dizemos então que é aditivo por fase). Entretanto as tensões a serem efetivamente colocadas em paralelo nem sempre são tensões de fase, podem por vezes ser tensões de linha (tensões entre-fases), e em alguns casos tensões de linha têm defasagem com relação às tensões de fase, logo outra grandeza - que não propriamente a polaridade, mas dela dependente - será levada em consideração, e esta é: *Defasamento Angular*.

Por norma obtemos a definição dessa grandeza.

"Defasamento angular, é o ângulo medido entre uma tensão do lado de maior tensão (AT) e a respectiva tensão do lado de menor tensão (BT), porém a medição é assim efetuada: É o ângulo marcado da BT para AT no sentido anti-horário".

2.4.1. Determinação Gráfica do Defasamento Angular

Suponhamos um transformador Δ/Y , com enrolamentos concordantes, como o da fig. 2.10

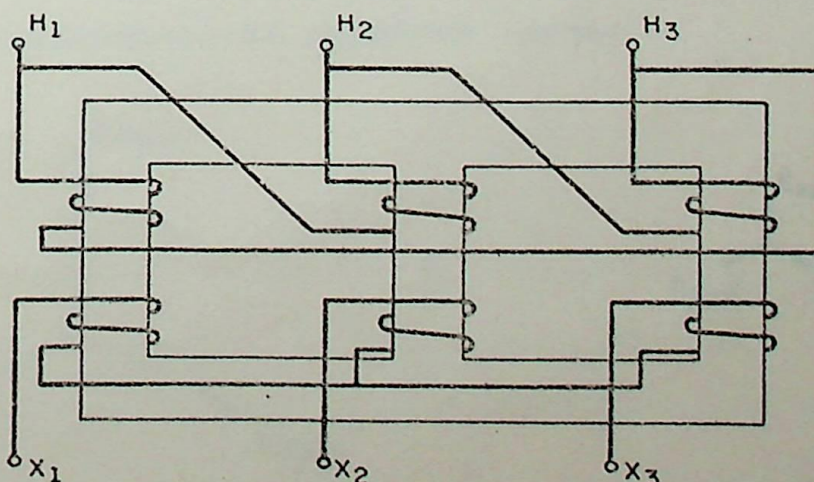


Fig. 2.10 - Transformador Δ/Y , enrolamentos concordantes

A marcação dos terminais foi efetuada segundo normas (vide Apêndice III).

Vejamos agora como colocar os fasores de f.c.e.m.s e f.e.m.s. Tendo o transformador enrolamentos concordantes, se gundo os ítems anteriores, a defasagem entre os fasores de f.c.e.m.s e f.e.m.s deve ser nula, logo:

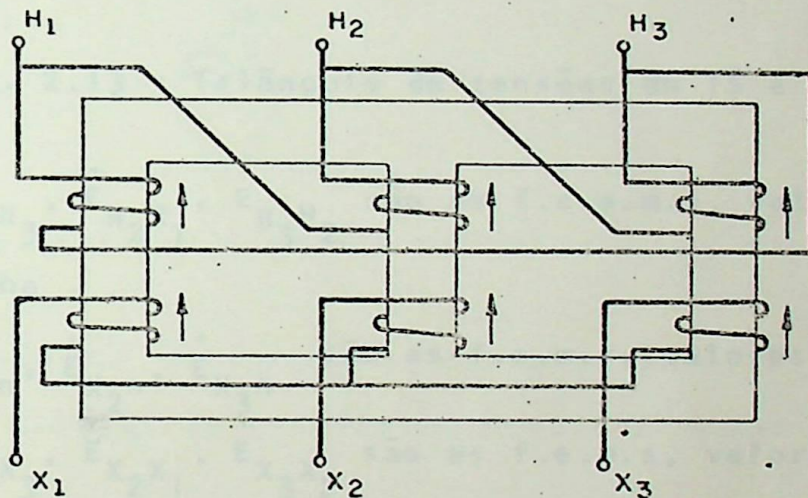


Fig. 2.11 - Colocação das setas no transformador (da fig. 2.10)

Ou seja as f.c.e.m.s e f.e.m.s podem agora ser representadas fasorialmente da seguinte forma:

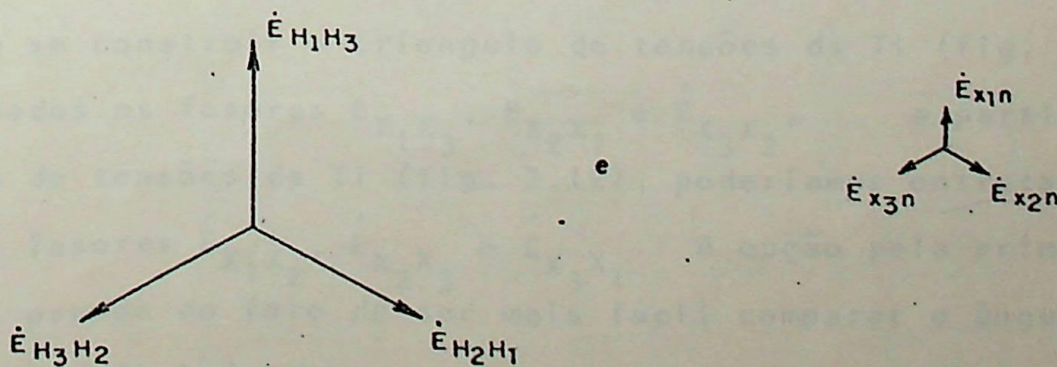


Fig. 2.12 - Estrela de tensões da TS e da TI

ou ainda:

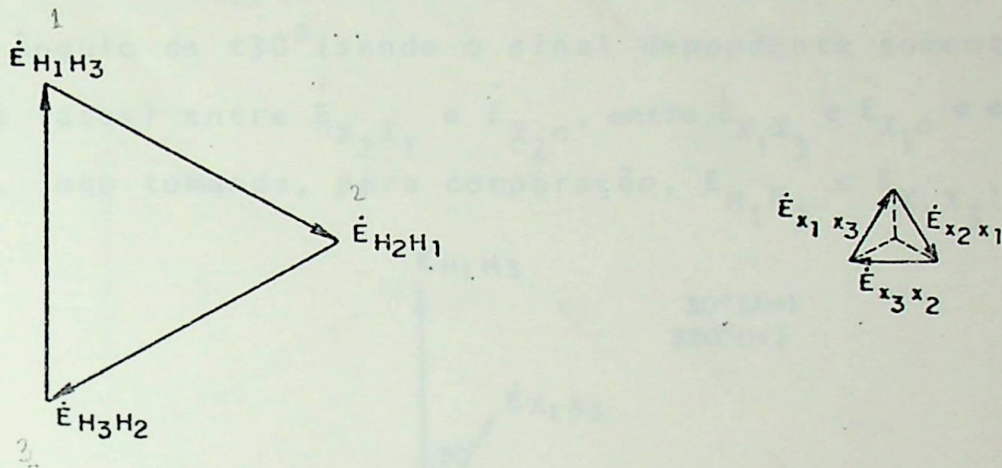


Fig. 2.13 - Triângulo de tensões da TS e da TI

onde: $\dot{E}_{H_1 H_3}$, $\dot{E}_{H_2 H_1}$, $\dot{E}_{H_3 H_2}$ são as f.c.e.m.s, valores de linha.

$\dot{E}_{x_1 n}$, $\dot{E}_{x_2 n}$, $\dot{E}_{x_3 n}$ são as f.e.m.s, valores de fase.

$\dot{E}_{x_1 x_3}$, $\dot{E}_{x_2 x_1}$, $\dot{E}_{x_3 x_2}$ são as f.e.m.s, valores de linha.

Quanto às figs. 2.12 e 2.13, duas observações importantes devem ser feitas:

- Independentemente da conexão do transformador, sempre interessa, para o estudo em desenvolvimento, as tensões de linha, portanto optaremos pela representação da fig. 2.13, preferencialmente à da fig. 2.12.
- Ao se construir o triângulo de tensões da TI (fig. 2.13) foram usados os fasores $\dot{E}_{x_1 x_3}$, $\dot{E}_{x_2 x_1}$ e $\dot{E}_{x_3 x_2}$, a partir da estrela de tensões da TI (fig. 2.12), poderíamos entretanto usar os fasores $\dot{E}_{x_1 x_2}$, $\dot{E}_{x_2 x_3}$ e $\dot{E}_{x_3 x_1}$. A opção pela primeira forma se prende ao fato de ser mais fácil comparar o ângulo obedecendo à definição de defasamento angular: "... , é o ângulo medido entre uma tensão da TS e a respectiva tensão da TI...".

Como a BT está em estrela, podemos afirmar que existe um ângulo de $\pm 30^{\circ}$ (sendo o sinal dependente somente da sequência de fases) entre $\dot{E}_{X_2 X_1}$ e $\dot{E}_{X_2 n}$, entre $\dot{E}_{X_1 X_3}$ e $\dot{E}_{X_1 n}$ e entre $\dot{E}_{X_3 X_2}$ e $\dot{E}_{X_3 n}$, logo tomando, para comparação, $\dot{E}_{H_1 H_3}$ e $\dot{E}_{X_1 X_3}$, vem:

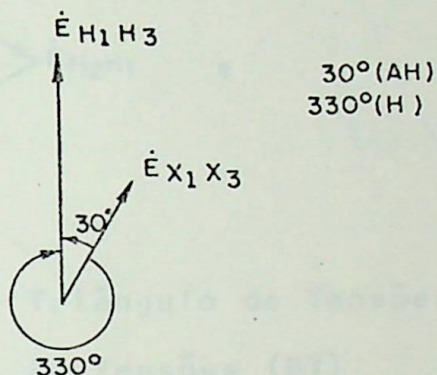


Fig. 2.14 - Defasamentos entre $\dot{E}_{H_1 H_3}$ e $\dot{E}_{X_1 X_3}$

Porém por definição defasamento angular é medido da TI para TS, no sentido anti-horário, portanto temos:

DEFASAMENTO ANGULAR : 30°

Por outro lado caso os enrolamentos sejam discordantes, deveremos ter uma defasagem entre este ângulo e o novo ângulo, a ser obtido, de 180° (vide parágrafo final do item 2.3).

Tomemos o mesmo transformador Δ/Y , somente que agora com enrolamentos discordantes, tomemos então os fasores da f.c.e.m.s e f.e.m.s a 180° , logo:

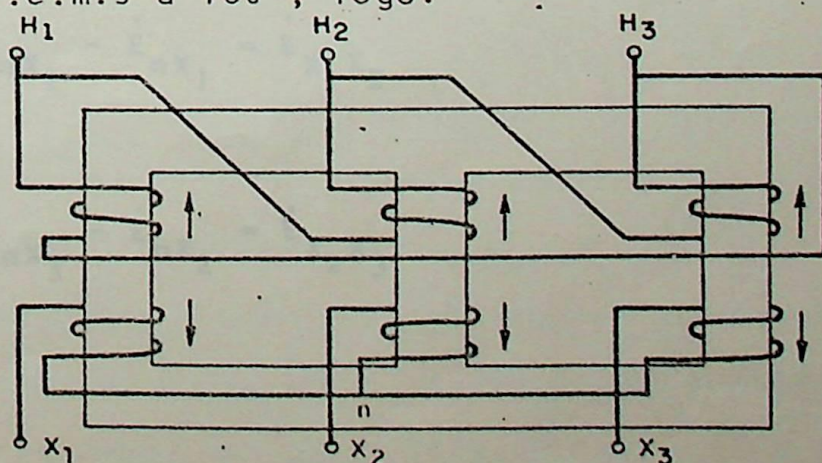


Fig. 2.15 - Transformador Δ/Y , enrolamentos discordantes

Os respectivos diagramas fasoriais seriam:

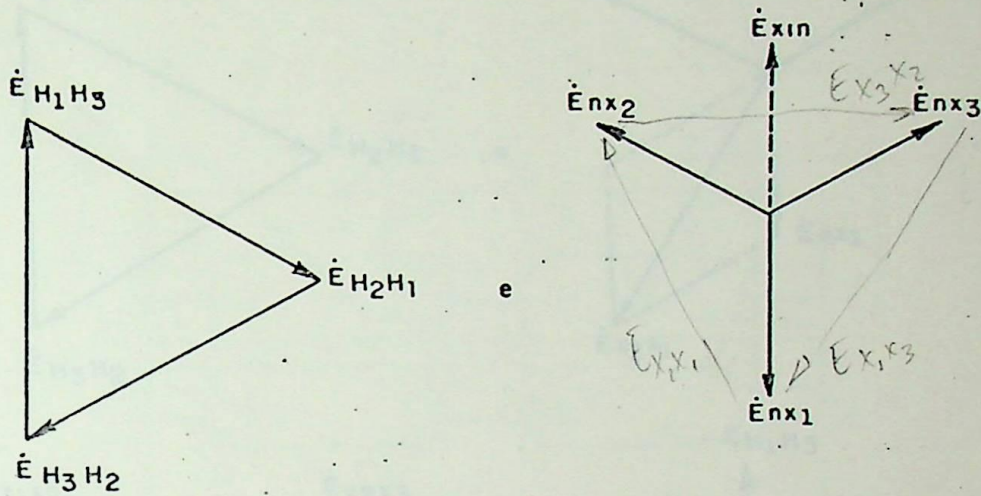


Fig. 2.16 - Triângulo de Tensões (AT) e Estrela de Tensões (BT)

Entretanto:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{nX_1} - \dot{E}_{nX_3} &= \dot{E}_n - \dot{E}_{X_1} - (\dot{E}_n - \dot{E}_{X_3}) \\ &= \cancel{\dot{E}_n} - \dot{E}_{X_1} - \cancel{\dot{E}_n} + \dot{E}_{X_3} = \\ &= -\dot{E}_{X_1} + \dot{E}_{X_3} = \dot{E}_{X_3} - \dot{E}_{X_1} = \dot{E}_{X_3 X_1} \end{aligned}$$

$$\therefore \dot{E}_{nX_1} - \dot{E}_{nX_3} = \dot{E}_{X_3 X_1}$$

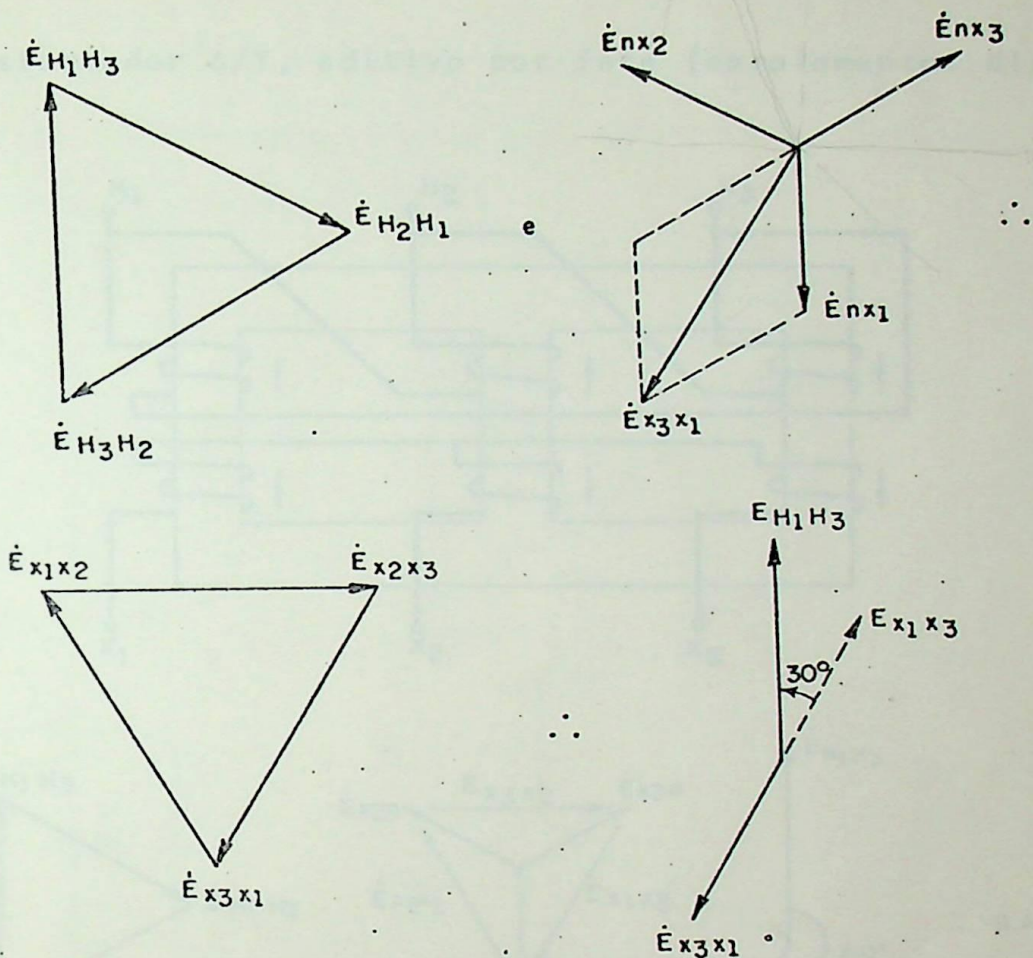
analogamente:

$$\dot{E}_{nX_2} - \dot{E}_{nX_1} = \dot{E}_{X_1 X_2}$$

e

$$\dot{E}_{nX_3} - \dot{E}_{nX_2} = \dot{E}_{X_2 X_3}$$

de onde:



DEFASAMENTO ANGULAR: 30°

Fig. 2.17 - Defasamento Angular Errado

Este é um erro, relativamente, comum!

Como pode o defasamento angular continuar sendo 30° , se houve uma inversão no sentido de enrolamento das bobinas da baixa (BT) e portanto as f.c.e.m.s e as f.e.m.s estão a 180° .

Observem que entre $\dot{E}_{H_1 H_3}$ e $\dot{E}_{x_3 x_1}$ (fig. 2.17) o ângulo é de 210° (de $\dot{E}_{x_3 x_1}$ para $\dot{E}_{H_1 H_3}$, no sentido antihorário), e portanto resultante de $30^{\circ} + 180^{\circ}$, talvez então $\dot{E}_{x_1 x_3}$ e $\dot{E}_{x_3 x_1}$ estejam com suas posições invertidas!?

Atentemos então para as figuras 2.12 e 2.16 e veremos que $\dot{E}_{x_1 n}$ (fig. 2.12) e $\dot{E}_{n x_1}$ (fig. 2.16) estão a 180° entre si o que significaria dizer que $\dot{E}_{x_1 n}$ (fig. 2.12) está a 0° com $\dot{E}_{x_1 n}$

b) Transformador Δ/Y , aditivo por fase (enrolamentos discordantes)

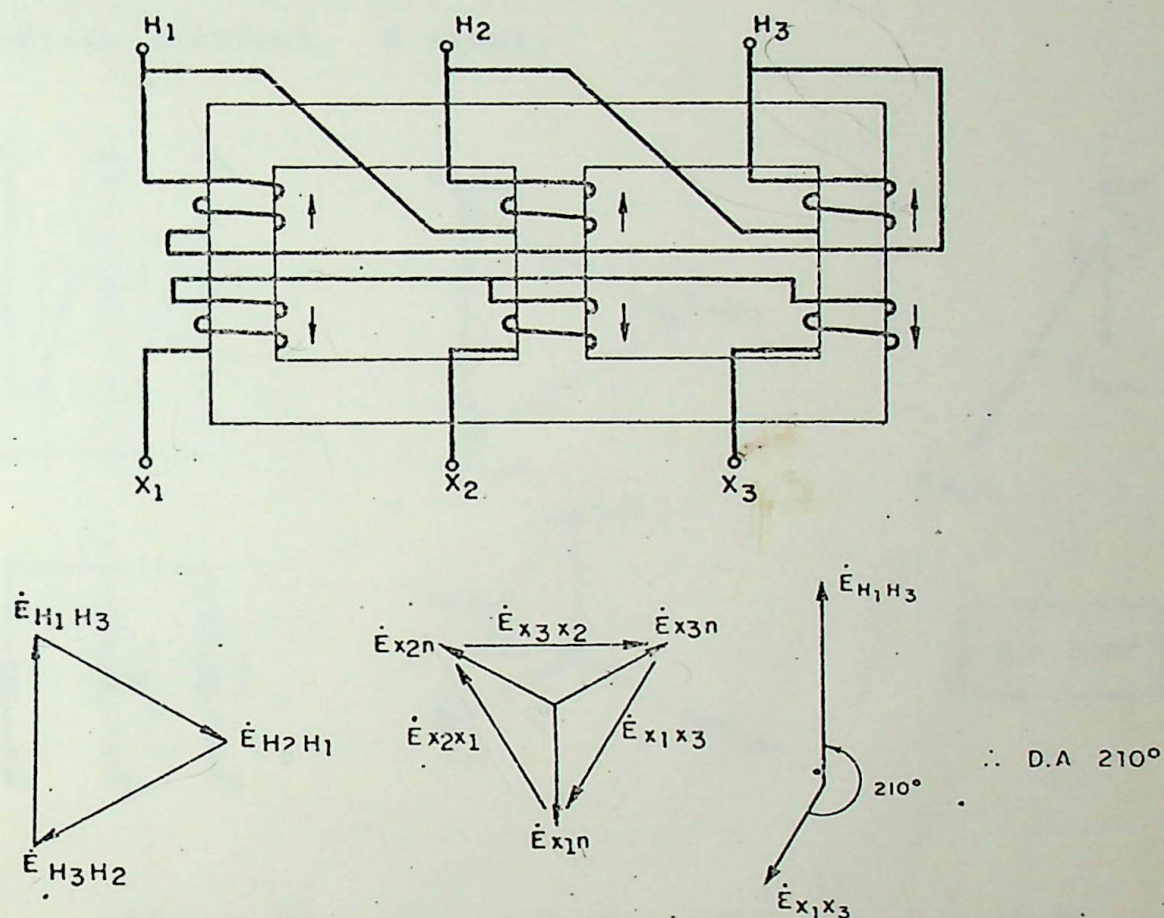


Fig. 2.19 - Transformador Δ/Y aditivo 210°

Para a obtenção correta do ângulo no caso da fig. 2.19, simplesmente partiu-se da premissa básica de que: sendo o transformador aditivo, a f.c.e.m. e a f.e.m, por fase, devem estar a 180° (Vide $\dot{E}_{H_1H_3}$ e \dot{E}_{X_1n} , $\dot{E}_{H_2H_1}$ e \dot{E}_{X_2n} , $\dot{E}_{H_3H_2}$ e \dot{E}_{X_3n}).

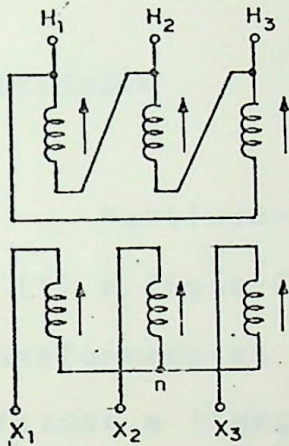
2.4.2. Determinação Gráfica Simplificada do Defasamento Angular.

É deveras tedioso e contraproducente, que toda vez que se necessite determinar o ângulo de defasamento de um transformador faça-se a representação de transformadores tal co

Da mesma forma, s \tilde{o} que exatamente ao contr \tilde{a} rio, foi tirada conclus \tilde{a} o para polaridade aditiva.

Logo: No diagrama de conex \tilde{e} es, se as setas tiverem sentidos opostos, isso quer dizer que o transformador \bar{e} subtrativo por fase, caso contr \tilde{a} rio \bar{e} aditivo.

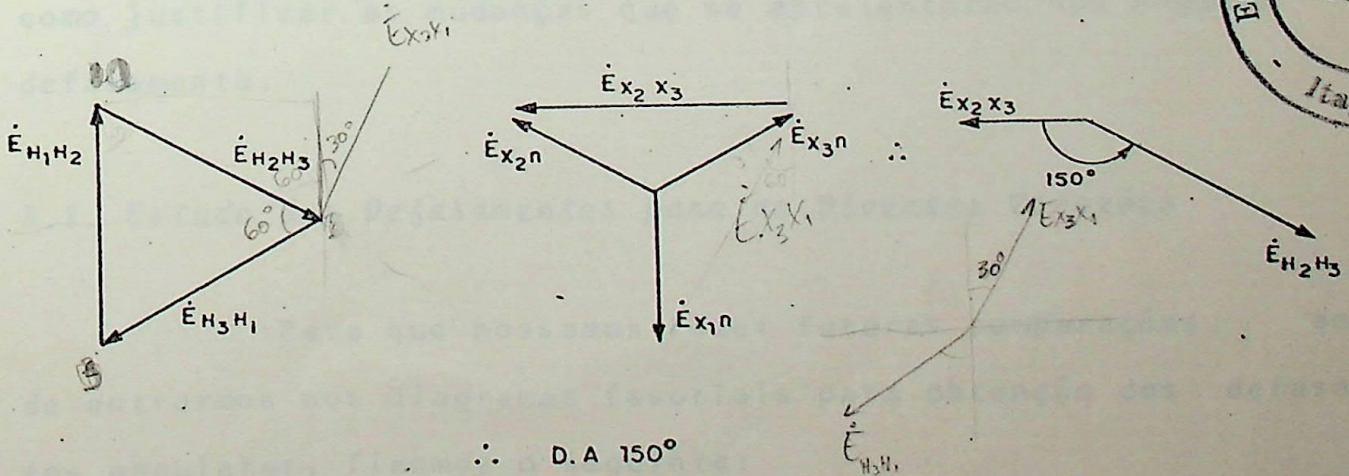
Vejam \tilde{o} s ent \tilde{a} o o seguinte caso:



Pela forma definida no par \tilde{a} grafo anterior \bar{e} ste \bar{e} um transformador aditivo por fase (setas no mesmo sentido no diagrama de conex \tilde{e} es).

Fig. 2.21 - Transformador Δ/Y , (sem n \tilde{u} cleo representado).

donde:



DEFASAMENTO ANGULAR: 150 $^{\circ}$

Fig. 2.22 - Diagrama fasorial para o transformador da Fig. 2.21.



CAPÍTULO III

CONEXÕES E DIAGRAMAS FASORIAIS
PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

3.1. Introdução

Partindo-se das três ligações mais comuns: Delta (Δ), Estrêla (Y) e Zigue-Zague (Z) pode se obter diversas conexões para transformadores trifásicos; Ainda mais, dependendo da forma de se efetuar a ligação, como por exemplo a forma com que se obtem a conexão Δ , podemos obter os mais variados ângulos de defasamento.

Nêste capítulo vamos apresentar as possíveis conexões dos transformadores trifásicos e suas prováveis alterações, bem como justificar as mudanças que se apresentarão nos ângulos de defasamento.

3.2. Estudo dos Defasamentos para as Diversas Conexões

Para que possamos fazer futuras comparações, antes de entrarmos nos diagramas fasoriais para obtenção dos defasamentos angulares, fixemos o seguinte:

a) A referência deve ser única e será dada por:

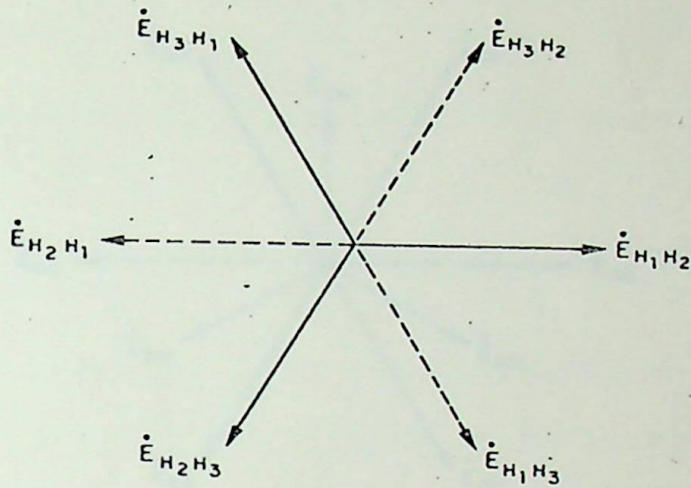


Fig. 3.1 - Tensões de referência

b) Para que não haja futuras confusões entre a marcação dos terminais e das fases da alimentação, façamos o seguinte:

- Para sequência de fases direta:

$$H_1 \equiv A ; H_2 \equiv B ; H_3 \equiv C$$

$$X_1 \equiv a ; X_2 \equiv b ; X_3 \equiv c$$

- Para sequência de fases inversa

$$H_1 \equiv B ; H_2 \equiv A ; H_3 \equiv C$$

$$X_1 \equiv b ; X_2 \equiv a ; X_3 \equiv c$$

ou

$$H_1 \equiv C ; H_2 \equiv B ; H_3 \equiv A$$

$$X_1 \equiv c ; X_2 \equiv b ; X_3 \equiv a$$

Portanto os diagramas fasoriais serão montados a partir da referência a seguir:

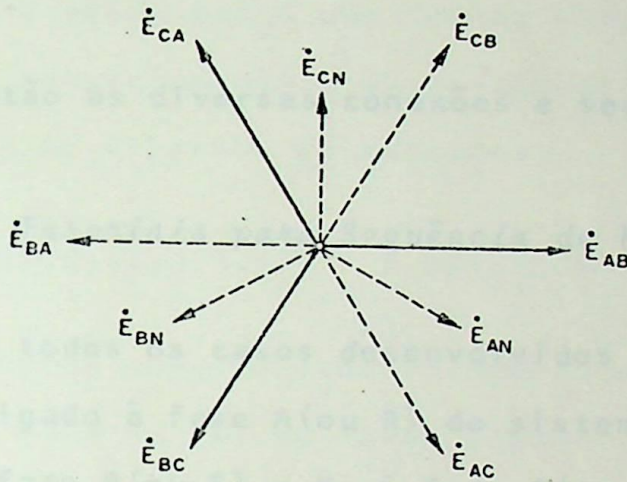


Fig. 3.2 - Referência para os Diagramas Fasoriais

- c) O defasamento angular será notado em graus (p.e. 30^0) bem como em notação horária, a saber: já que cada hora corresponde a 30^0 ($12 \times 30^0 = 360^0$), faremos uma correlação entre ambos:
- ex.1) Dy 5 - significa: Transformador Delta(Δ)/Estrela(Y) com defasamento angular de 150^0 ($5 \times 30^0 = 150^0$), pois no sentido antihorário entre o ponteiro das horas (no número 5) e o ponteiro dos minutos (no número 12), existe um ângulo de 150^0 .
- ex.2) Yd 11 - Transformador estrela(Y)/Delta(Δ) com defasamento angular de 330^0 .
- d) Nos diagramas de conexões já é levada em conta a polaridade do transformador, assim como foi feito no Cap.II, entretanto se necessário, consulte o Apêndice IV.
- e) As referências da fig. 3.2 são válidas para os diagramas fasoriais da TS, pois o que acontece com os diagramas TI é

função da TS (o transformador funciona por indução eletromagnética).

Passemos então as diversas conexões e seus respectivos D.A.s:

3.3. Diagramas Fasoriais para Sequência de Fases Direta

Em todos os casos desenvolvidos neste ítem suporemos que: H_1 está ligado à fase A (ou R) do sistema de alimentação, bem como H_2 a fase B (ou S) e H_3 à fase C (ou T).

3.3.1. Transformador Δ/Δ Subtrativo (0°)

Liguemos o transformador exatamente como na norma brasileira, então:

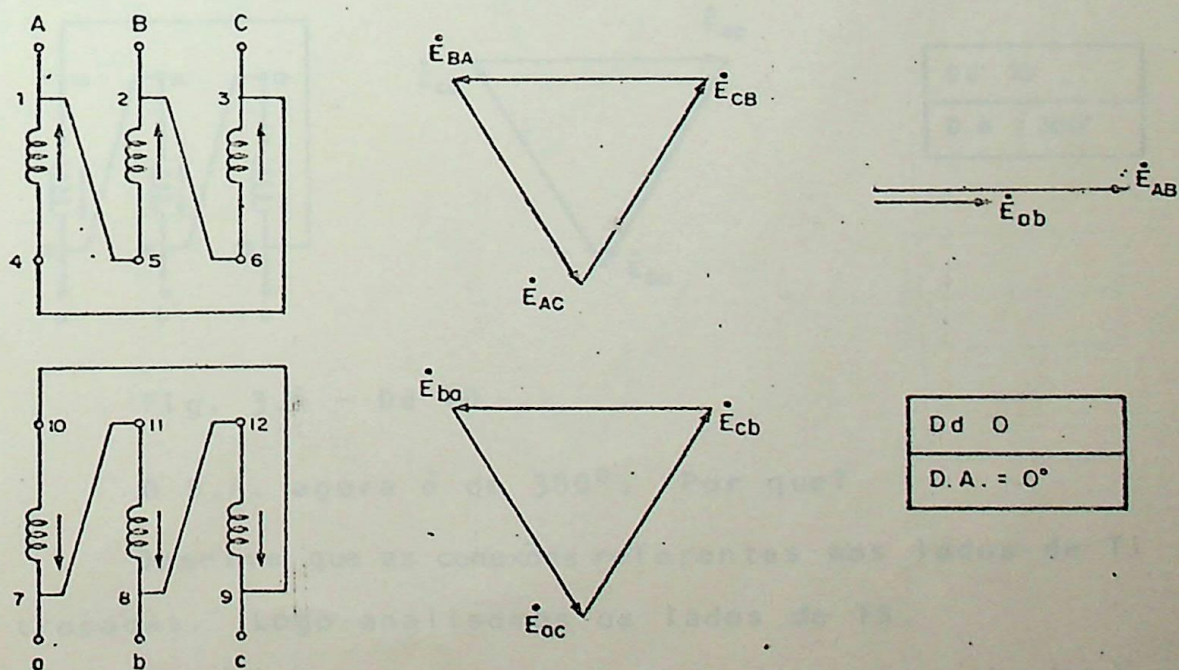


Fig. 3.3 - Dd 0

Observe na fig. 3.3, que as f.e.m.s e f.c.e.m.s foram tomadas com relação a referência indicada na fig. 3.2, e até

o último caso assim será feito.

Note ainda que o que define que o transformador é subtrativo é o posicionamento das setas de f.e.m. e f.c.e.m. (conf. Cap. II) no diagrama de conexões.

3.3.2. Transformador Δ/Δ - Subtrativo (300°)

Tomemos o mesmo transformador da fig. 3.3 e liguemos o triângulo do lado de TS, de forma contrária, então:

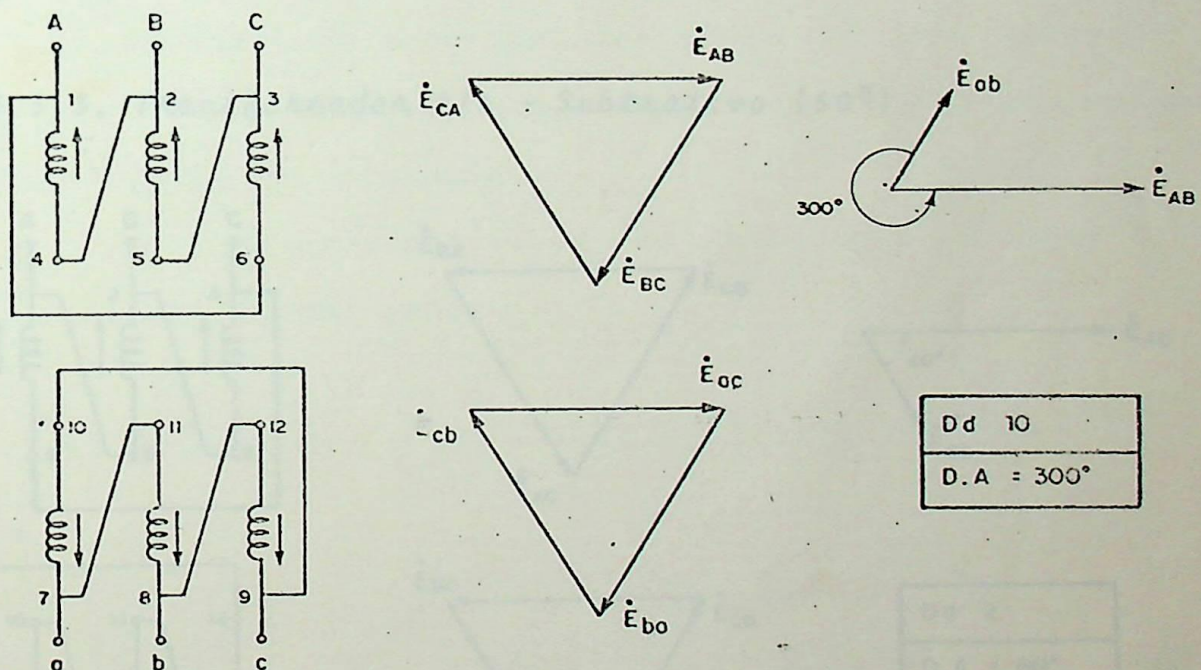


Fig. 3.4 - Dd 10

O D.A. agora é de 300° . Por que?

Observe que as conexões referentes aos lados de TI não foram trocadas. Logo analisemos os lados de TS.

A primeira bobina (da esquerda para a direita) no caso da fig. 3.3 está sob a tensão $\dot{V}_{AC} (= \dot{E}_{AC})^1$ e no caso da

1) O teste para verificação do D.A. (Cap. IV) é feito com o transformador a vazio, então podemos fazer a aproximação: $\dot{V}_{AC} \approx \dot{E}_{AC}$.

fig. 3.4, sob a tensão $\dot{V}_{AB} (\approx \dot{E}_{AB})$

Observe então que o \dot{E}_{ab} da fig. 3.4 está a 60° (AH) do \dot{E}_{ab} da fig. 3.3, o que é lógico pois \dot{V}_{AB} está a 60° (AH) de \dot{V}_{AC} (Vide fig. 3.2)

Logo o ângulo agora só pode ser 300° , pois $360^\circ - 60^\circ = 300^\circ$ (que é o ângulo (AH) entre \dot{E}_{ab} da fig. 3.4 e \dot{E}_{ab} da fig. 3.3).

Atenção:- Não esqueçamos que segundo o subitem e do item 3.2: "A referencia só é válida para os D.F. da T.S."

3.3.3. Transformador Δ/Δ - Subtrativo (60°)

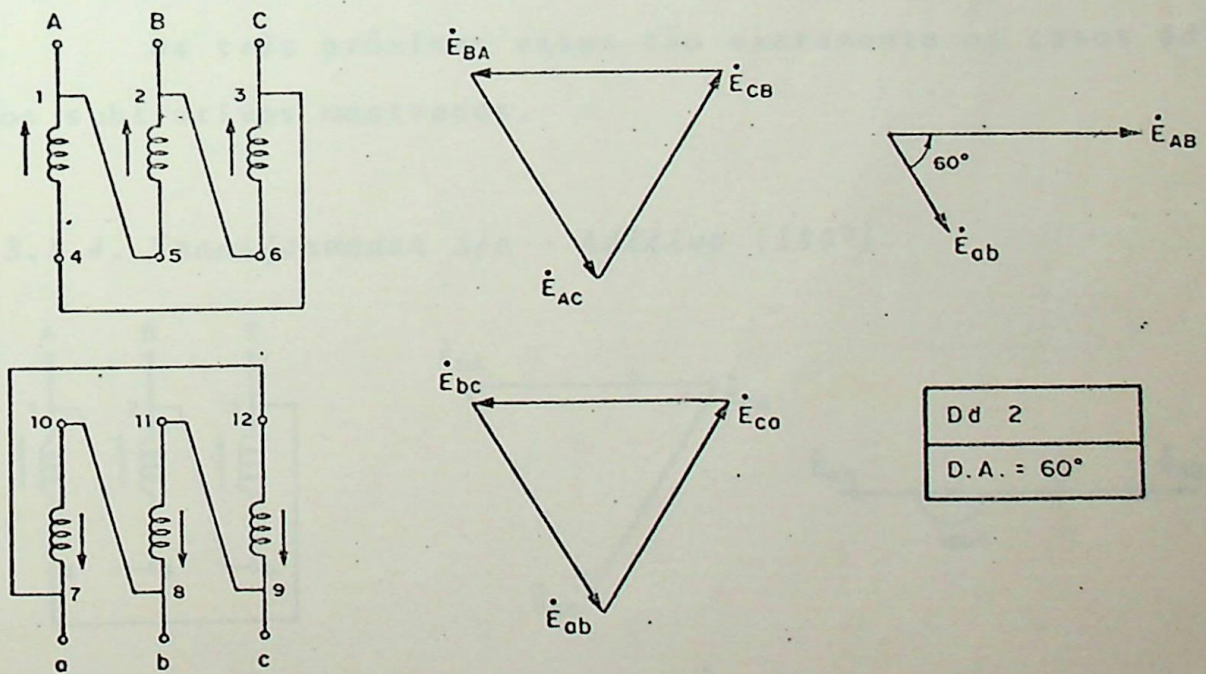


Fig. 3.5 - Dd 2

Neste caso o transformador em análise é semelhante ao da fig. 3.3; a única diferença está nos triângulos da TI que foram fechados de forma contrária.

E o D.A. agora é de 60° . Analisemos o por que.

Analisemos os D.F. da TI, pois foi nos triângulos de TI que foram feitas as mudanças.

Observemos que a primeira bobina (da esquerda para a direita) da TI da fig. 3.3 gera a f.c.e.m. \dot{E}_{ac} e a primeira bobina da TI da fig. 3.5 gera a f.c.e.m. \dot{E}_{ab} , logo \dot{E}_{ac} (fig. 3.3) e \dot{E}_{ab} (fig. 3.5) estão a 0° (vide a confirmação nas figuras). Entretanto o que interessa são f.c.e.m.s de mesmo índice, logo: \dot{E}_{ab} da fig. 3.5 está a 60° (AH) de \dot{E}_{ab} da fig. 3.3 (não esquecer que $\dot{E}_{ab} = -\dot{E}_{ba}$). Portanto o D.A. agora é de 60°

No capítulo anterior, foi visto que invertendo-se a forma de enrolar um dos lados do transformador havia uma mudança de 180° no angulo de defasamento.

Os três próximos casos são exatamente os casos aditivos dos subtrativos mostrados.

3.3.4. Transformador Δ/Δ - Aditivo (180°)

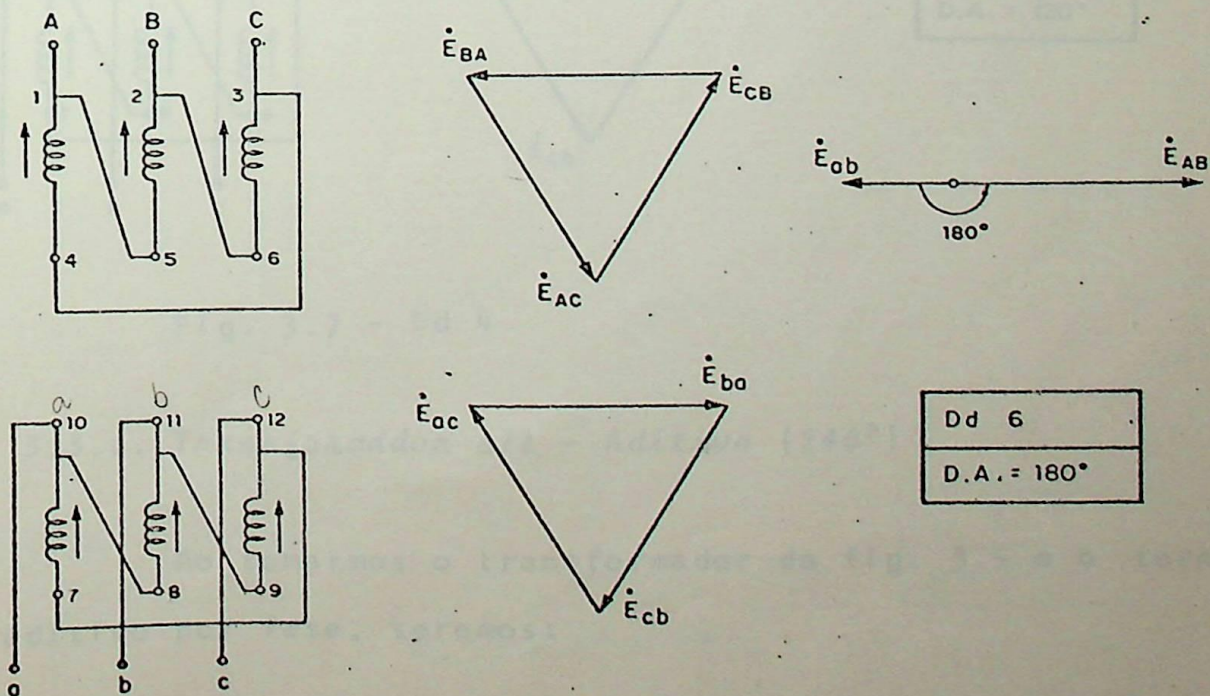


Fig. 3.6 - Dd 6

Ora, como era de se esperar a mudança de polaridade por fase do transformador do caso 3.3.1. (vide triângulo da TI comparado com o atual), resultou num com defasagem de 180° , com relação àquele.

3.3.5. Transformador Δ/Δ - Aditivo (120°)

Pelos motivos já expostos, se pegarmos o transformador da fig. 3.4 e o colocarmos como sendo aditivo, teremos:

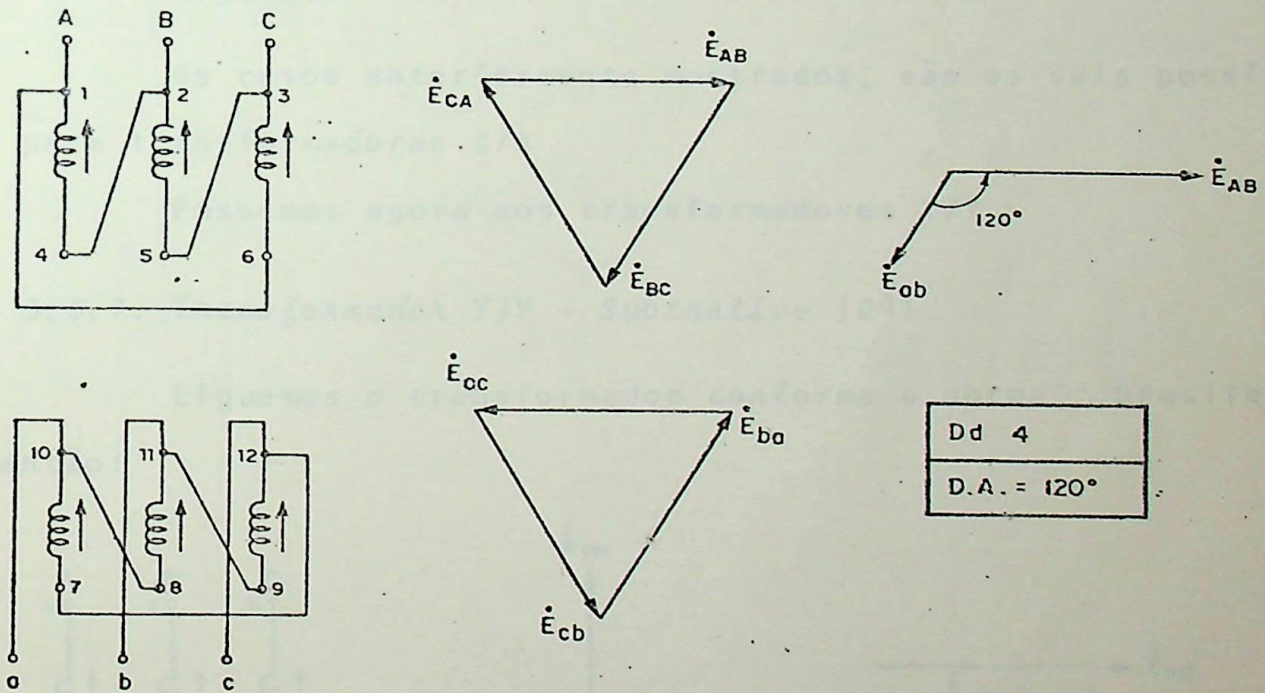


Fig. 3.7 - Dd 4

3.3.6. Transformador Δ/Δ - Aditivo (240°)

Ao tomarmos o transformador da fig. 3.5 e o torná-lo aditivo por fase, teremos:

3.9

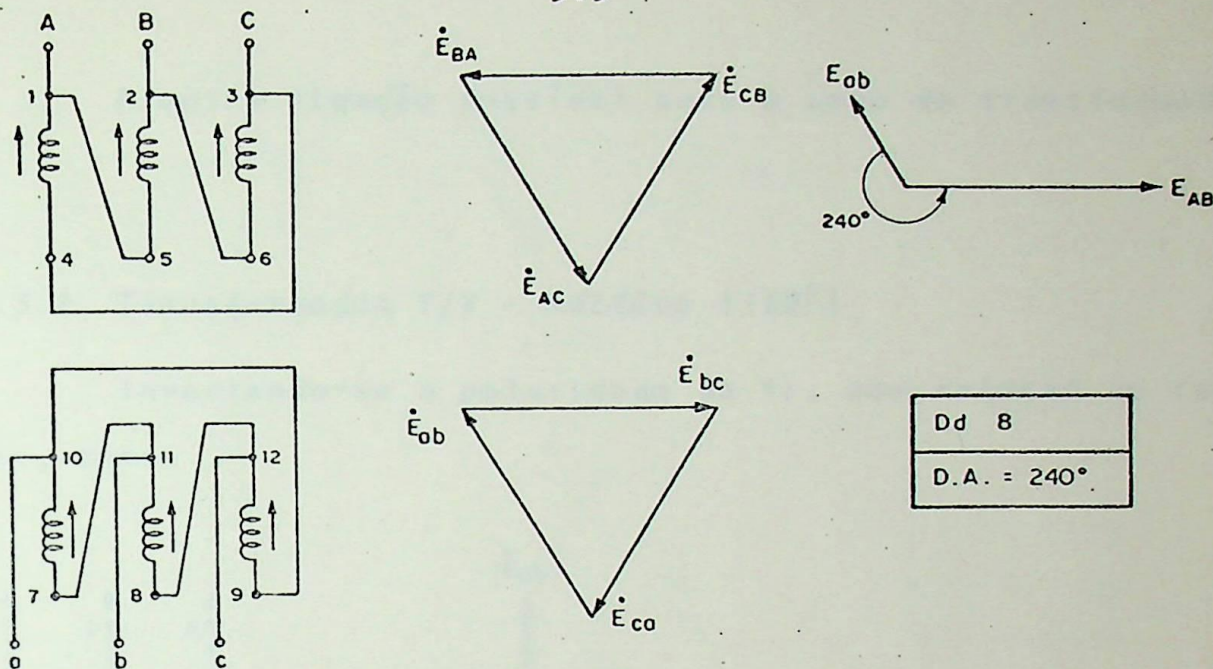


Fig. 3.8 - Dd 8

Os casos anteriormente mostrados, são os seis possíveis para transformadores Δ/Δ

Passemos agora aos transformadores Y/Y

3.3.7. Transformador Y/Y - Subtrativo (0°)

Liguemos o transformador conforme a norma brasileira, então:

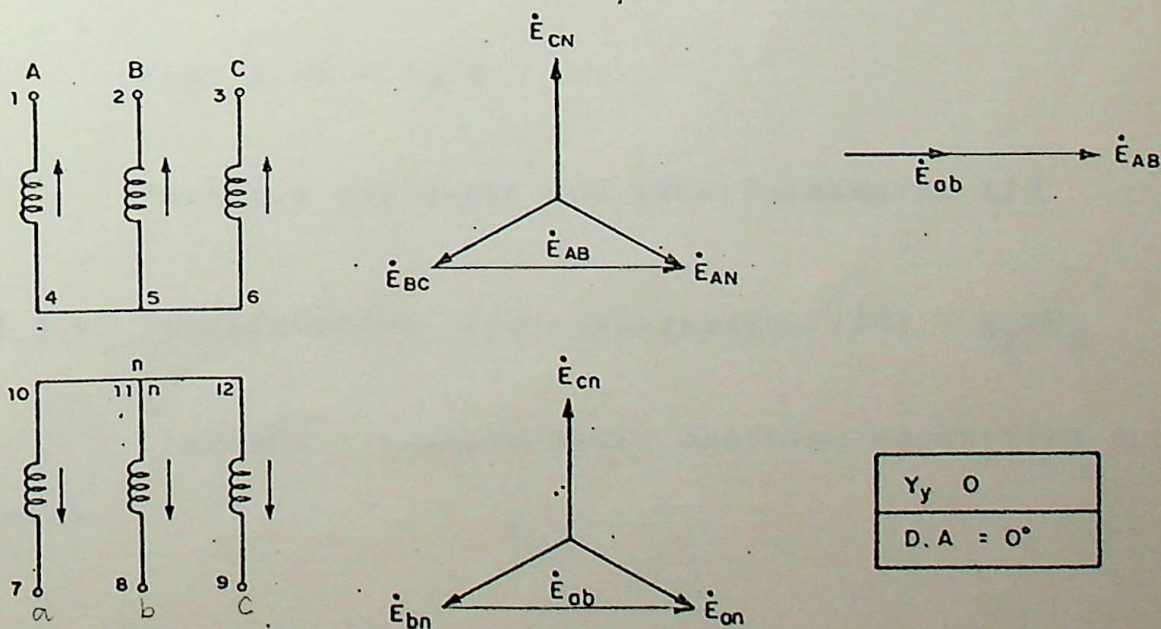


Fig. 3.9 - Yy 0

A outra ligação possível para o caso do transformador Y/Y é:

3.3.8. Transformador Y/Y - Aditivo (180°)

Invertendo-se a polaridade da T1, com relação ao caso anterior, temos

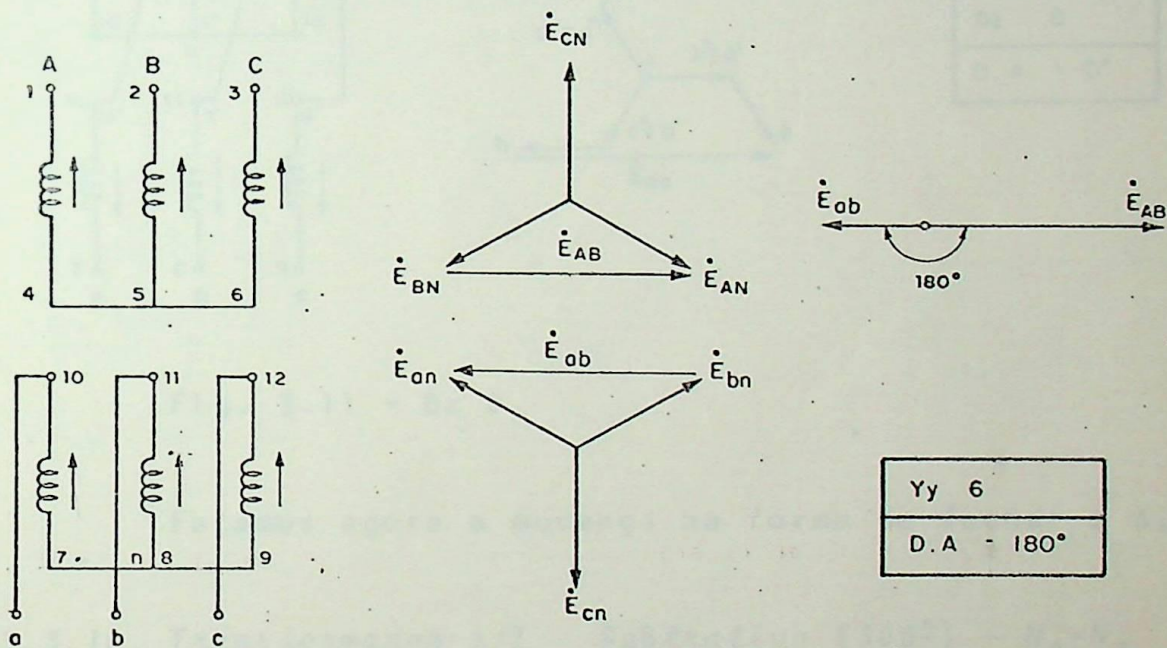


Fig. 3.10 - Yy 6

Passemos aos casos dos transformadores Δ/Z

3.3.9. Transformador Δ/Z - Subtrativo (0°) - $N_2 = N_3$

Liguemos o transformador conforme especifica a norma brasileira.

- 1) N_2 é o número de espiras das bobinas na'', nb'' e nc''.
 N_3 é o número de espiras das bobinas aa', bb' e cc'.
 Caso $N_2 \neq N_3$ os ângulos obtidos serão outros em função da variação de N_3 com N_2 . Para maiores esclarecimentos (vide nota 1).

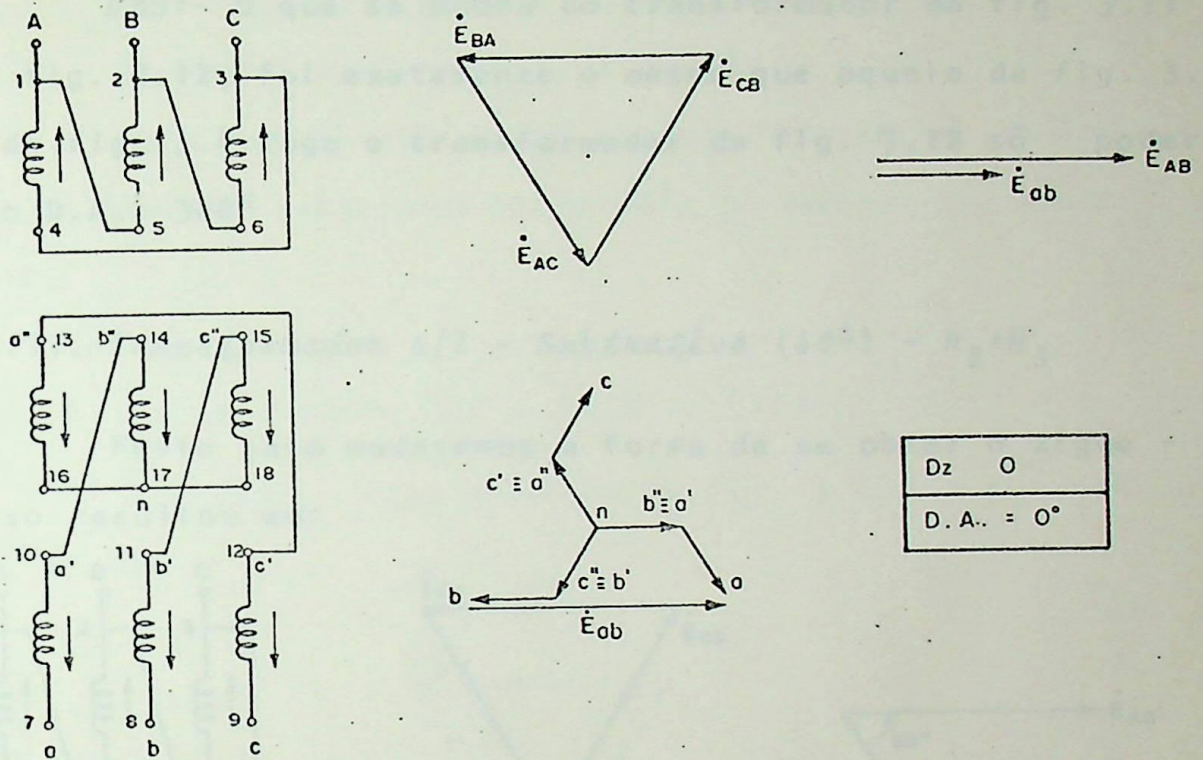


Fig. 3.11 - Dz 0

Façamos agora a mudança na forma de fechar o Δ , logo:

3.3.10. Transformador Δ/Z - Subtrativo (300°) - $N_2 = N_3$

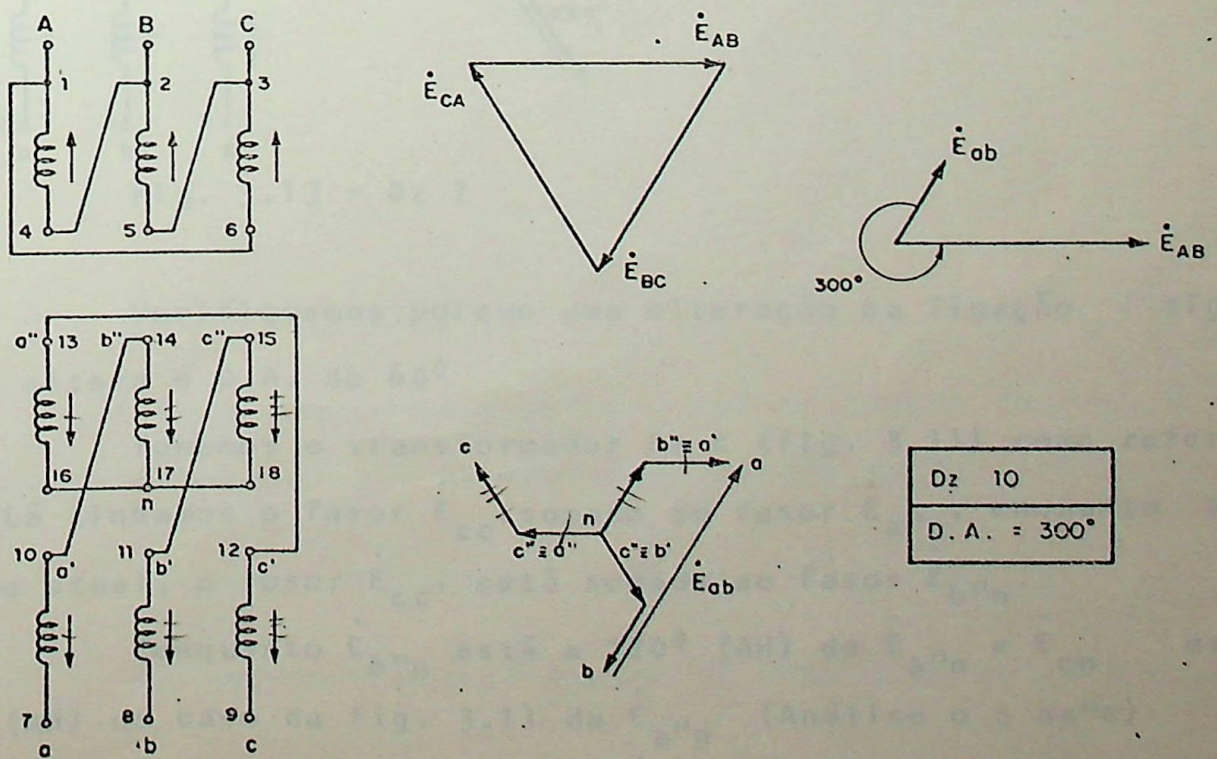


Fig. 3.12 - Dz 10

OBS:- O que se mudou do transformador da fig. 3.11 para o da fig. 3.12, foi exatamente o mesmo que aquele da fig. 3.3. para o da fig. 3.4 logo o transformador da fig. 3.12 só poderia ter como D.A.: 300^0

3.3.11. Transformador Δ/Z - Subtrativo (60^0) - $N_2=N_3$

Neste caso mudaremos a forma de se obter o zigue - zague, isso resultou em:

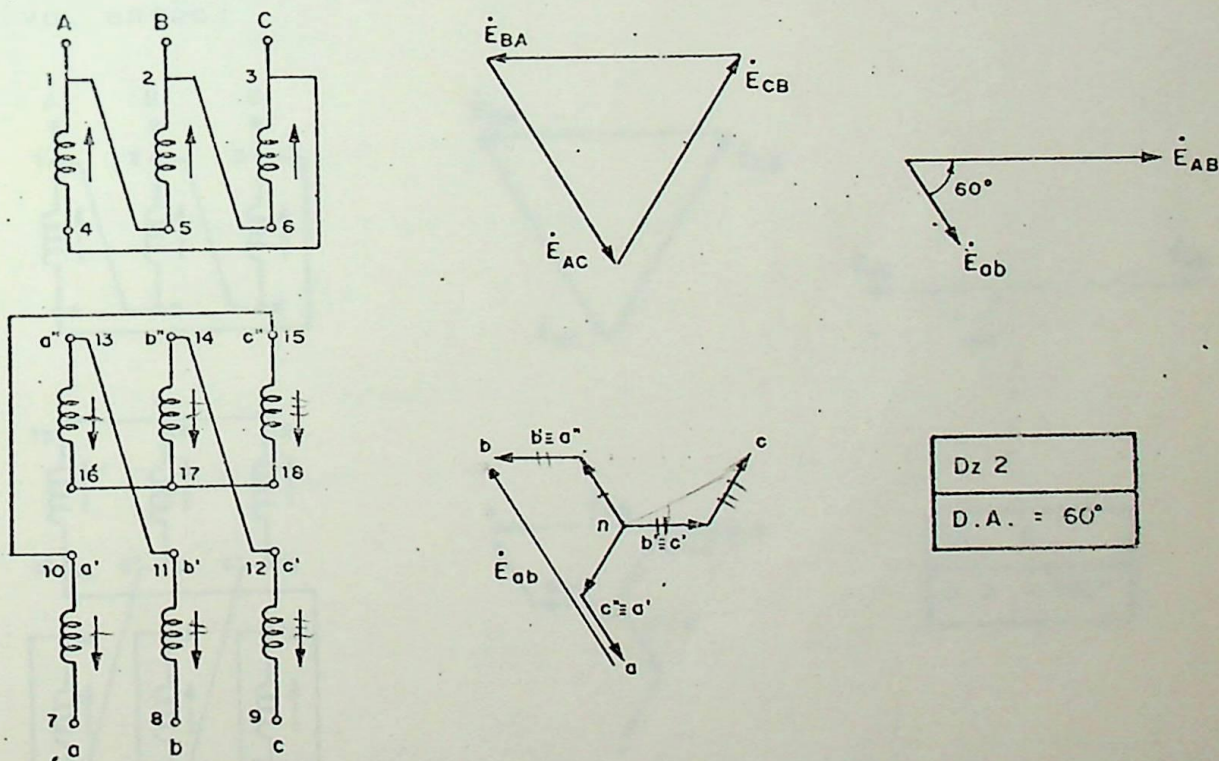


Fig. 3.13 - Dz 2

Verifiquemos porque uma alteração na ligação zigue zague, altera o D.A. de 60^0

Tomemos o transformador Dz 0 (fig. 3.11) como referência: Lá tínhamos o fasor \dot{E}_{CC} somado ao fasor $\dot{E}_{a''n}$, enquanto que no caso atual, o fasor \dot{E}_{CC} está somado ao fasor $\dot{E}_{b''n}$.

Conquanto $\dot{E}_{b''n}$ está a 120^0 (AH) de $\dot{E}_{a''n}$ e \dot{E}_{cn} está a 30^0 (AH) no caso da fig. 3.11 de $\dot{E}_{a''n}$ (Análise o Δ na "c") e \dot{E}_{cn} da fig. 3.13 está a 30^0 (H) de $\dot{E}_{b''n}$, temos $120^0 - 30^0 - 30^0 = 60^0$;

Portanto \dot{E}_{cn} da fig. 3.13 está a 60° (AH) de \dot{E}_{cn} da fig. 3.11.

Portanto o D.A. agora é de 60° .

Após estes três casos de transformadores Delta/Zigue Zague subtrativos, resta-nos agora para os mesmos analisar os aditivos.

3.3.12. Transformador Δ/Z - Aditivo (180°)

Tomemos o transformador da fig. 3.11, e tornemô-lo aditivo, então:

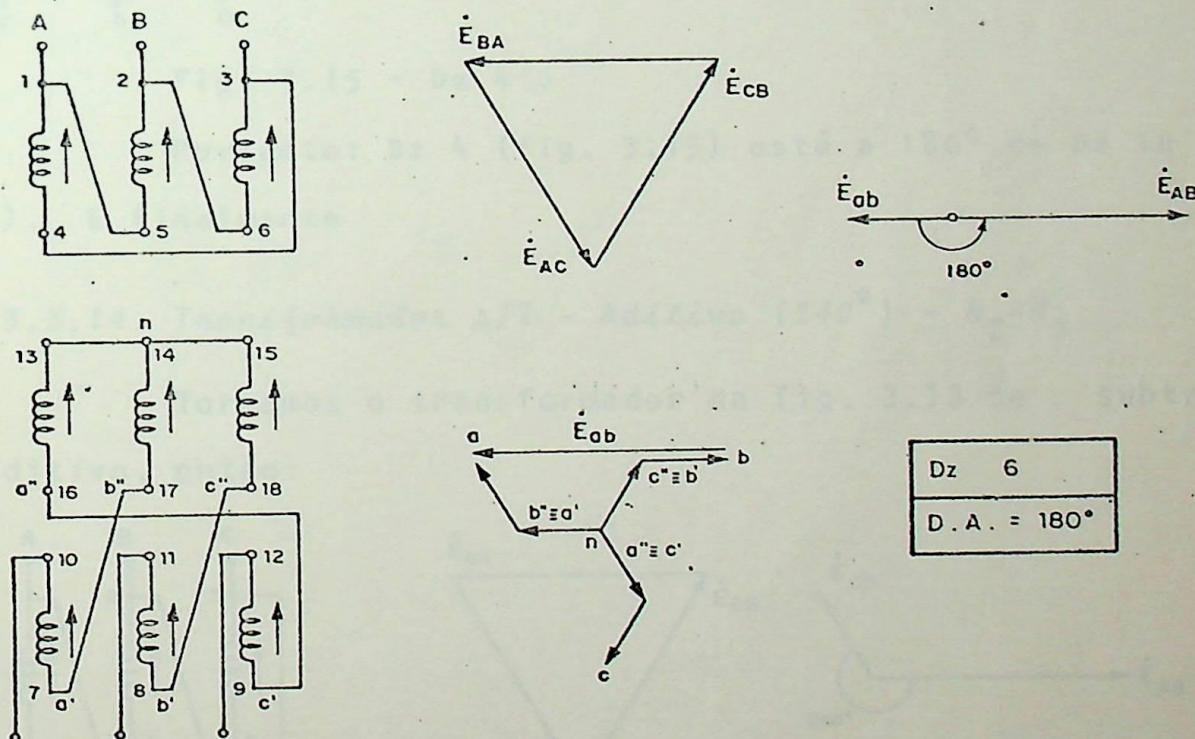


Fig. 3.14 - Dz 6

Como era de se esperar o transformador da fig. 3.14, tem uma diferença no D.A de 180° com relação do da fig. 3.11.

3.3.13. Transformador Δ/Z - Aditivo (120°) - $N_2 = N_3$

Tornando o transformador da fig. 3.12 em aditivo, te mos:

3.14

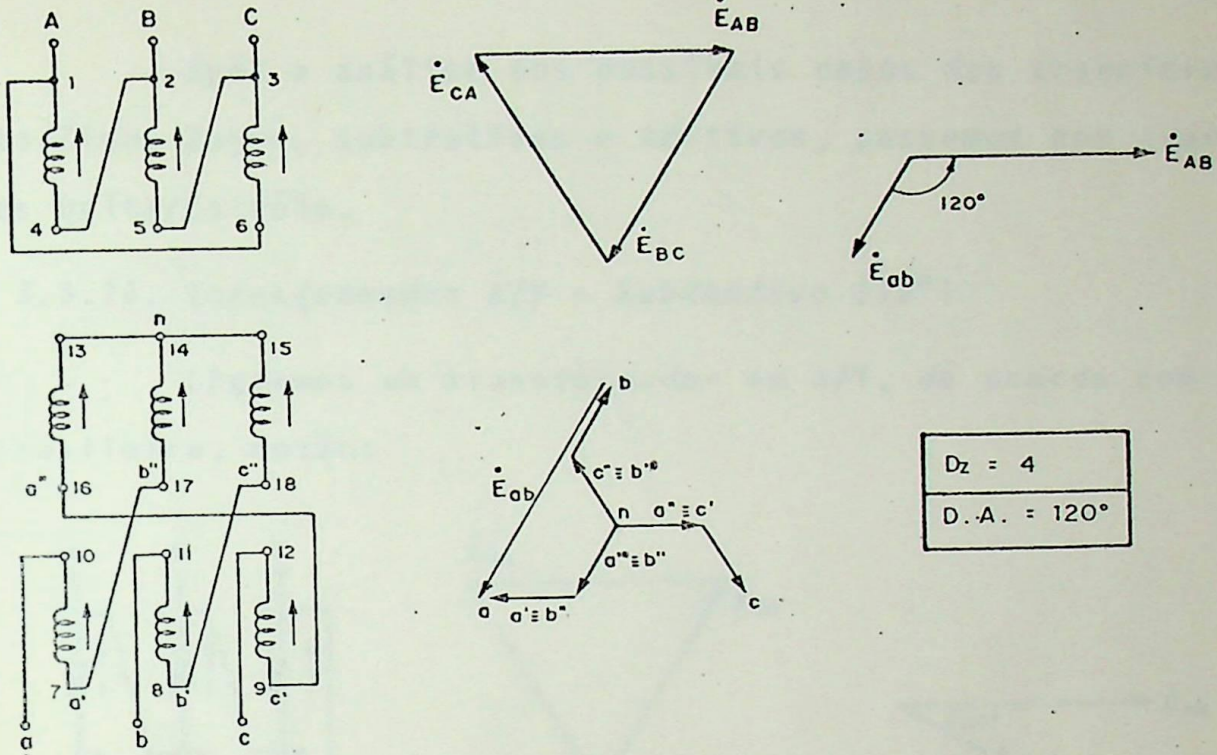


Fig. 3.15 - $D_z 4$

Portanto: $D_z 4$ (fig. 3.15) está a 180° de $D_z 10$ (fig. 3.12). E finalmente

3.3.14. Transformador Δ/Z - Aditivo (240°) - $N_2 = N_3$

Tornamos o transformador da fig. 3.13 de subtrativo em aditivo, então:

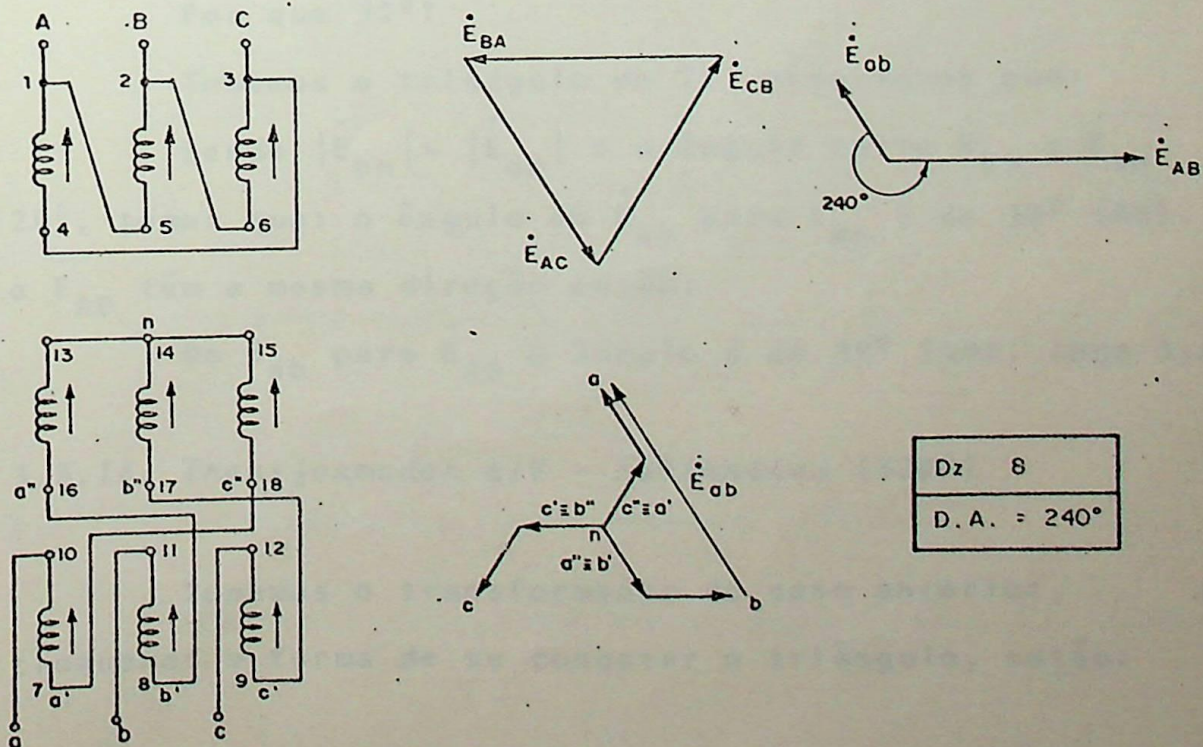


Fig. 3.16 - $D_z 8$

Após a análise dos possíveis casos dos transformadores Delta/Zigue-Zague, subtrativos e Aditivos, passemos aos transformadores Delta/Estrêla.

3.3.15. Transformador Δ/Y - Subtrativo (30°)

Liguemos um transformador em Δ/Y , de acordo com a norma brasileira, então:

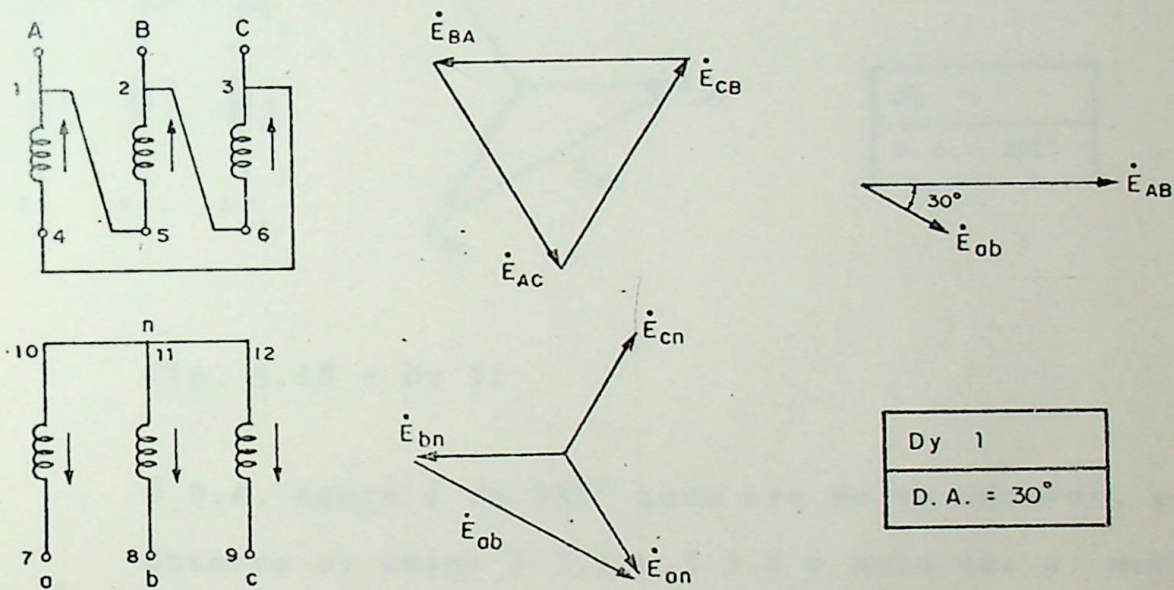


Fig. 3.17 - Dy 1

Por que 30° ?

Tomemos o triângulo da T1, observamos que:

Sendo $|\dot{E}_{bn}| = |\dot{E}_{an}|$ e o ângulo entre \dot{E}_{bn} e \dot{E}_{an} sendo de 120° , temos que: o ângulo de \dot{E}_{ab} para \dot{E}_{bn} é de 30° (AH). Como \dot{E}_{bn} e \dot{E}_{AB} têm a mesma direção então:

De \dot{E}_{ab} para \dot{E}_{AB} o ângulo é de 30° (AH), logo D.A. = 30°

3.3.16. Transformador Δ/Y - Subtrativo (330°)

Tomemos o transformador do caso anterior, somente que troquemos a forma de se conectar o triângulo, então:

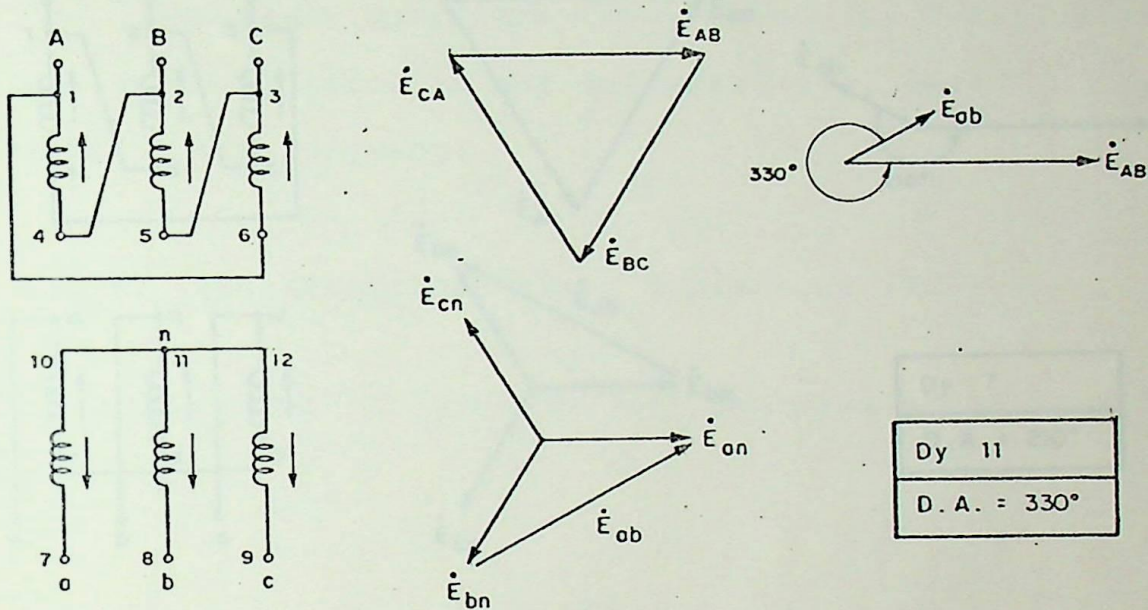


Fig. 3.18 - Dy 11

O D.A. agora é de 330° como era de se esperar, pois: Observe os casos 3.3.1 e 3.3.2 e note que a mudança na ligação de um para o outro é exatamente a mesma dos casos 3.3.15 e 3.3.16, portanto se lá o D.A. foi de 0° para 300° ; nada mais obvio que agora o D.A. saia de 30° e vá para 330° .

E D.A. 90° é possível, então? Não! Porque nos casos 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, tínhamos dois deltas (TS e TI) para efetuarmos a troca, agora só temos um delta (TS)

Passemos agora aos transformadores Delta/Estrela aditivos.

3.3.17. Transformador Δ/Y - Aditivo (210°)

Tomemos o transformador do caso 3.3.15 e tornemo-lo aditivo, logo:

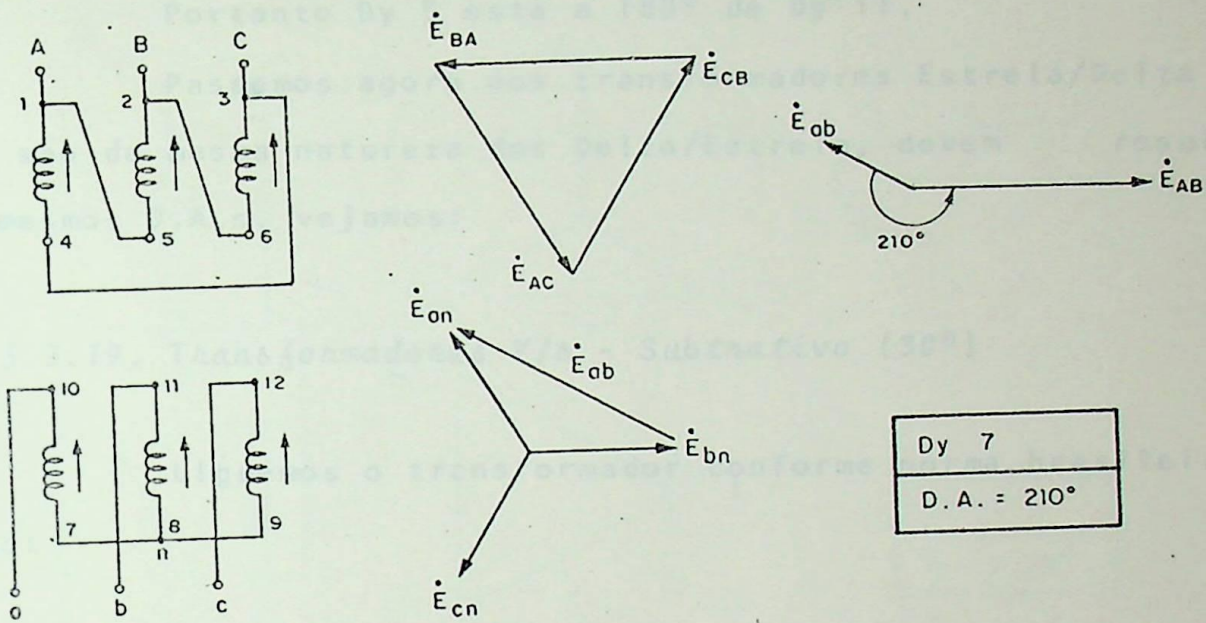


Fig. 3.19 - Dy 7

Como era de se esperar está a 180° do Dy 1.

3.3.18. Transformador Δ/Y - Aditivo (150°)

Tomemos o transformador da fig. 3.18 e façamos com que fique aditivo, então:

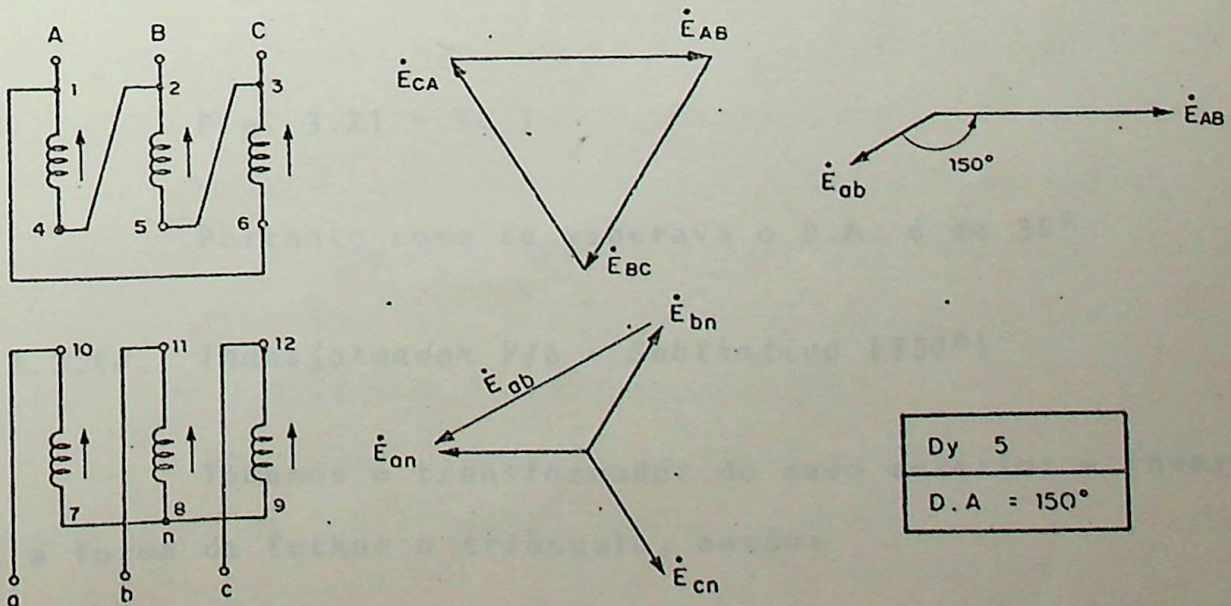


Fig. 3.20 - Dy 5

Portanto Dy 5 está a 180° de Dy 11.

Passemos agora aos transformadores Estrela/Delta que como são da mesma natureza dos Delta/Estrela, devem resultar nos mesmos D.A.s, vejamos:

3.3.19. Transformadores Y/ Δ - Subtrativo (30°)

Liguemos o transformador conforme norma brasileira, então:

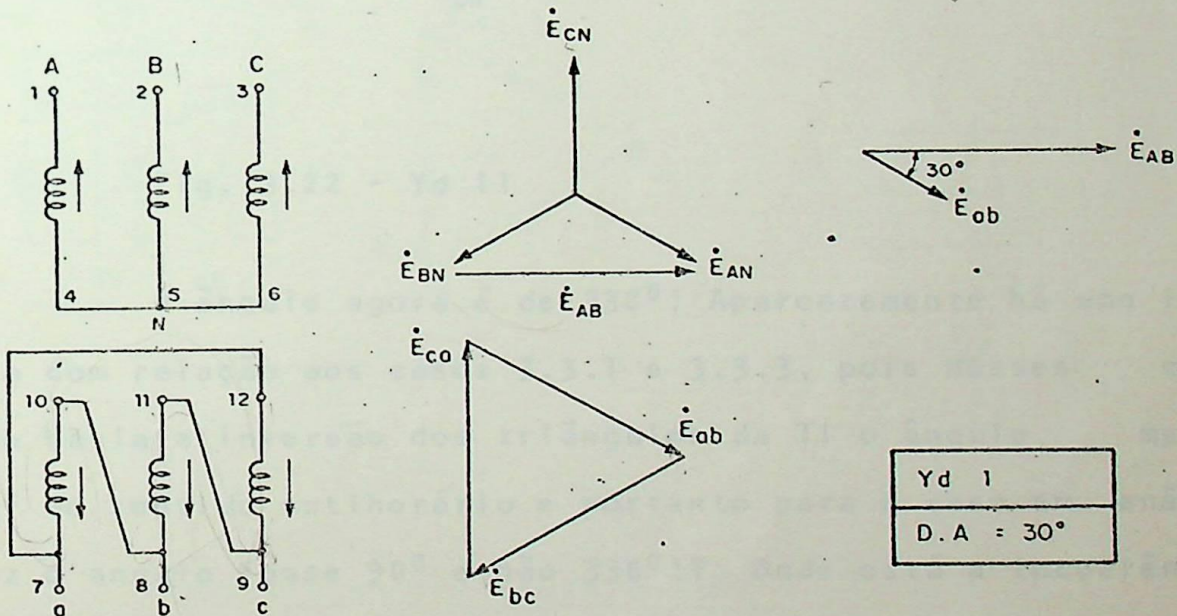


Fig. 3.21 - Yd 1

Portanto como se esperava o D.A. é de 30°

3.3.20. Transformador Y/ Δ - Subtrativo (330°)

Tomemos o transformador do caso anterior e invertamos a forma de fechar o triângulo, então:

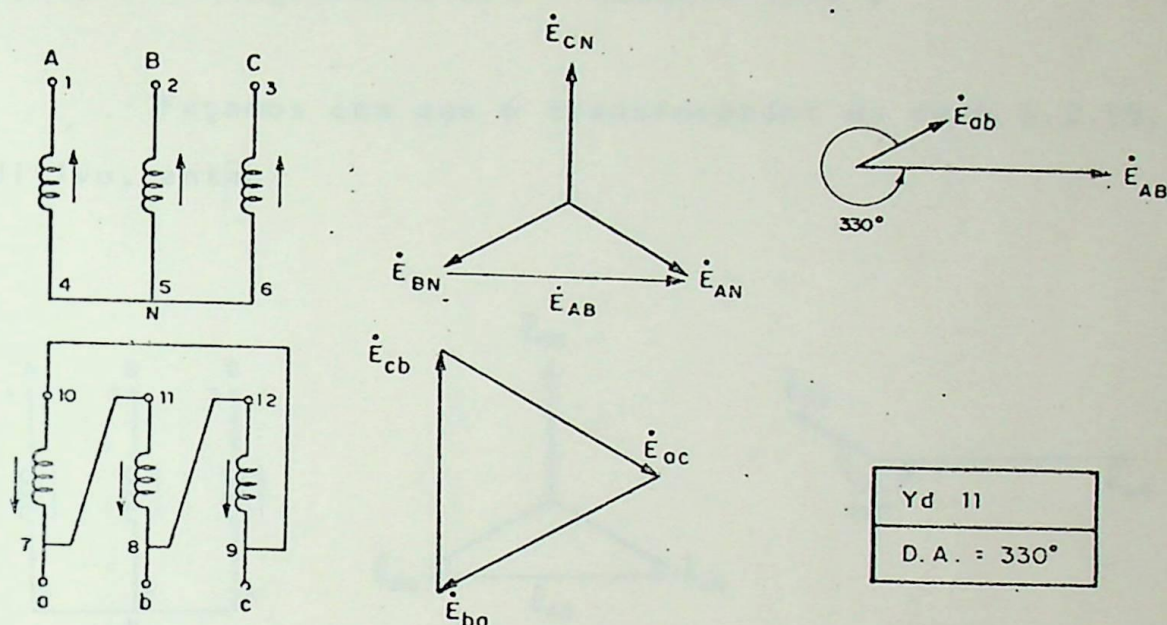


Fig. 3.22 - Yd 11

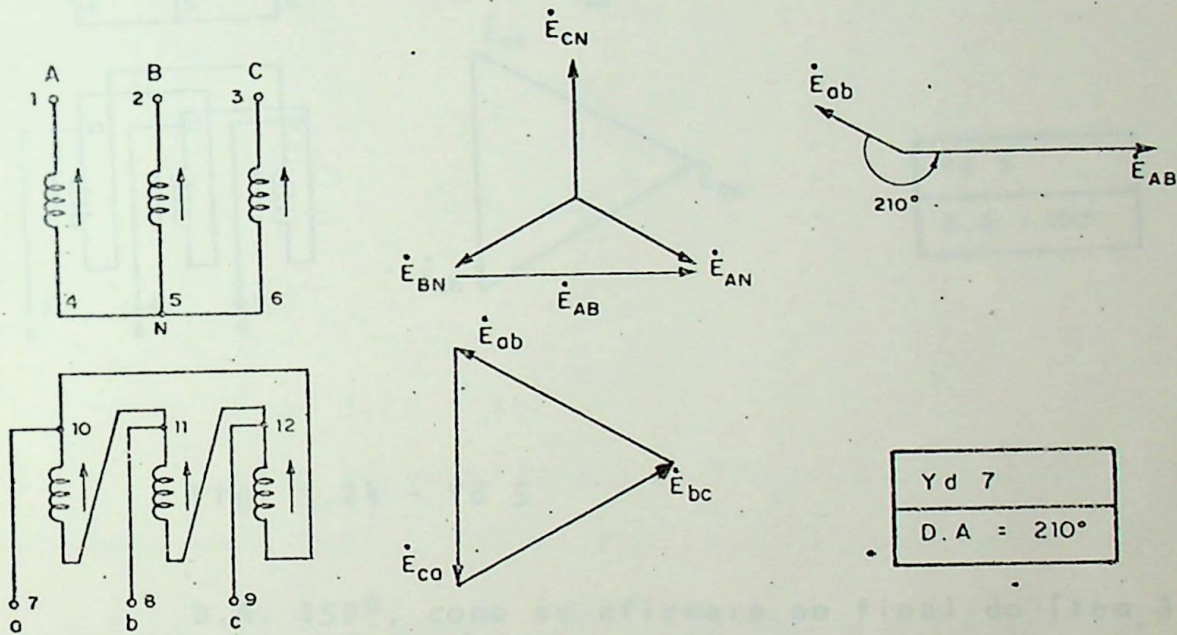
O ângulo agora é de 330^0 ! Aparentemente há uma incoerência com relação aos casos 3.3.1 e 3.3.3, pois nesses casos quando havia a inversão dos triângulos da TI o ângulo mudava de 60^0 no sentido antihorário e portanto para o caso em análise talvez o ângulo fosse 90^0 e não 330^0 ! Onde está a incoerência?

A incoerência está no fato de que o triângulo de TI do caso 3.3.19 corresponde ao do caso 3.3.3 (e não 3.3.1) e o triângulo de TI do caso 3.3.20 corresponde ao do caso 3.3.1 (e não 3.3.3). Ora do caso 3.3.1 para o 3.3.3 o D.A. caminha de 60^0 (H), logo do caso 3.3.19 para o caso 3.3.20 o D.A. também deve caminhar de 60^0 (H), portanto se no caso 3.3.19 o D.A. é 30^0 , no caso 3.3.20 o D.A. só pode ser 330^0 .

Para o caso dos Y/Δ aditivos só nos resta então esperar que sejam os D.A.s 210^0 e 150^0 , vejamos:

3.3.21. Transformador Y/Δ - Aditivo (210°)

Façamos com que o transformador do caso 3.3.19, torne se aditivo, então:

Fig. 3.23 - $Yd\ 7$

Como era de se esperar: D.A. 210°

3.3.22. Transformador Y/Δ - Aditivo (150°)

Tomemos o transformador do caso 3.3.20 e tornemo - lo aditivo, logo:

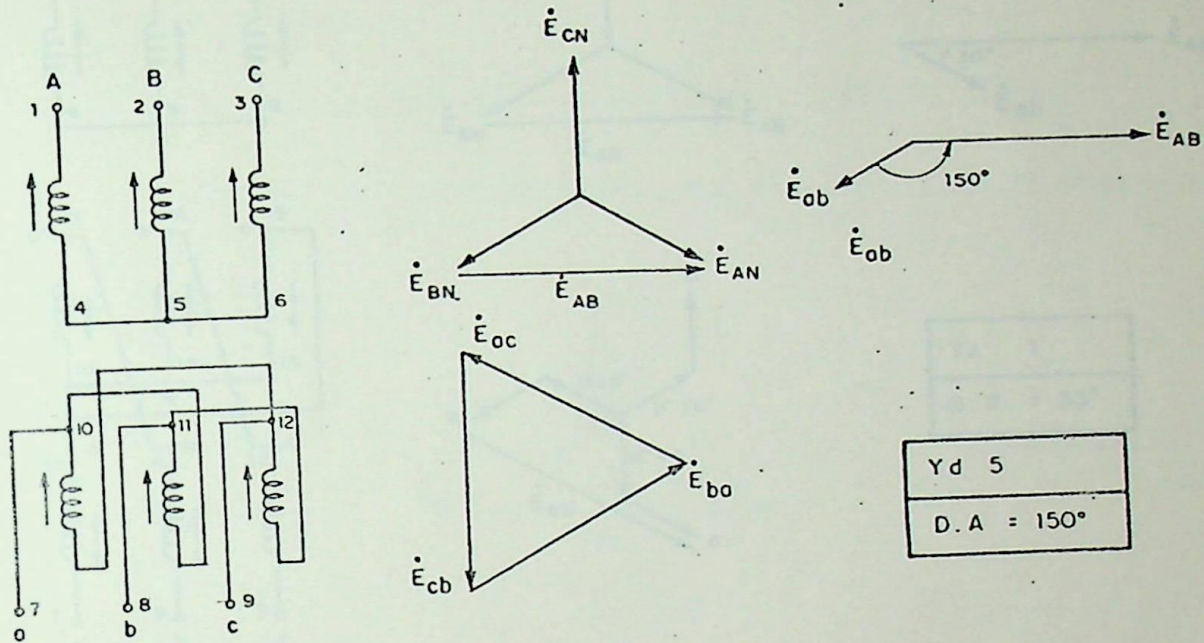


Fig. 3.24 - Yd 5

D.A. 150°, como se afirmara ao final do ítem 3.3.20.

Se os casos Delta/Estrela e Estrela/Delta apresentaram quatro possibilidades e se a conexão Zigue-Zague fornece-nos as mesmas possibilidades da conexão triângulo (Vide casos de 3.3.1 a 3.3.6 e 3.3.9 a 3.3.14) nada mais obvio do que esperar que a ligação Estrela/Zigue-Zague, também nos ofereça quatro possibilidades.

Confiramos!

3.3.23. Transformador Y/Z - Subtrativo (30°) - $N_3 = N_2$

Tomemos o caso da norma brasileira para analisar, teremos então:

3.22

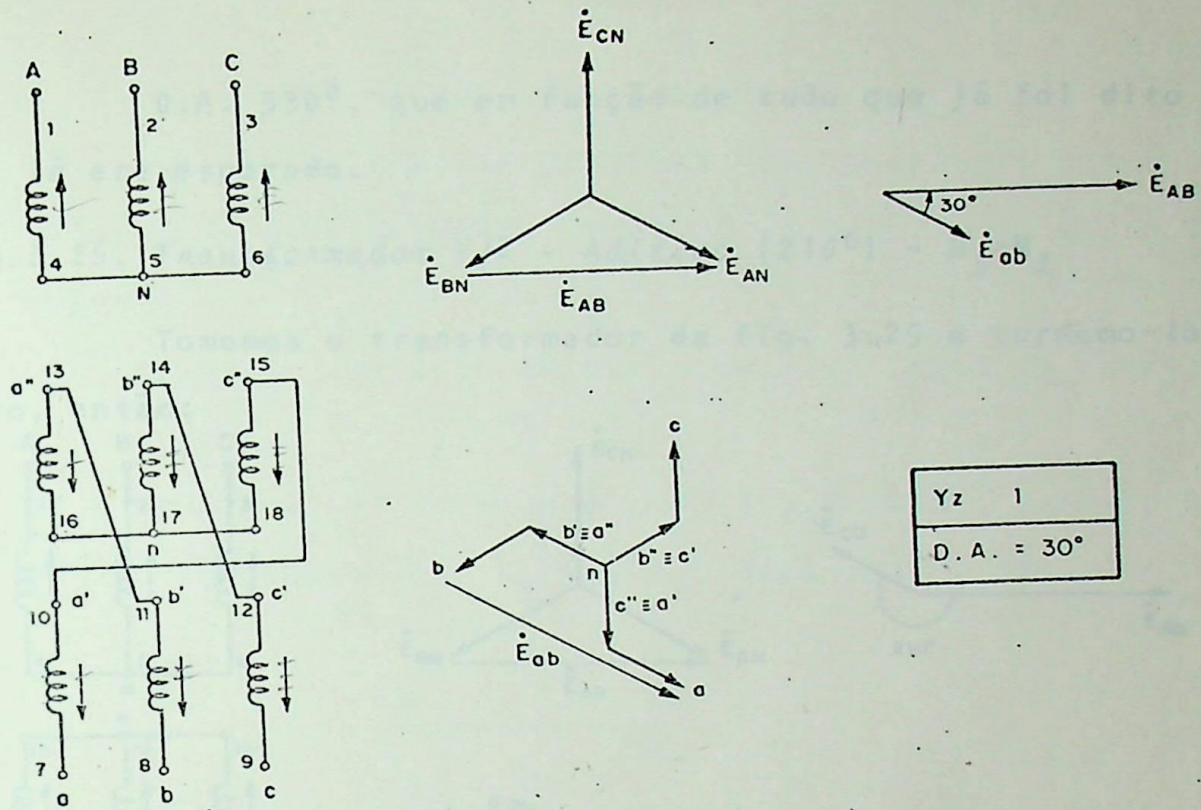


Fig. 3.25 - Yz 1

Face as considerações feitas ao final do ítem anterior nada mais lógico que esperar o D.A. como sendo 30° .

3.3.24. Transformador Y/Z - Subtrativo (330°) - $N_3 = N_2$

Mudamos a forma de se obter o Zigue-Zague, então:

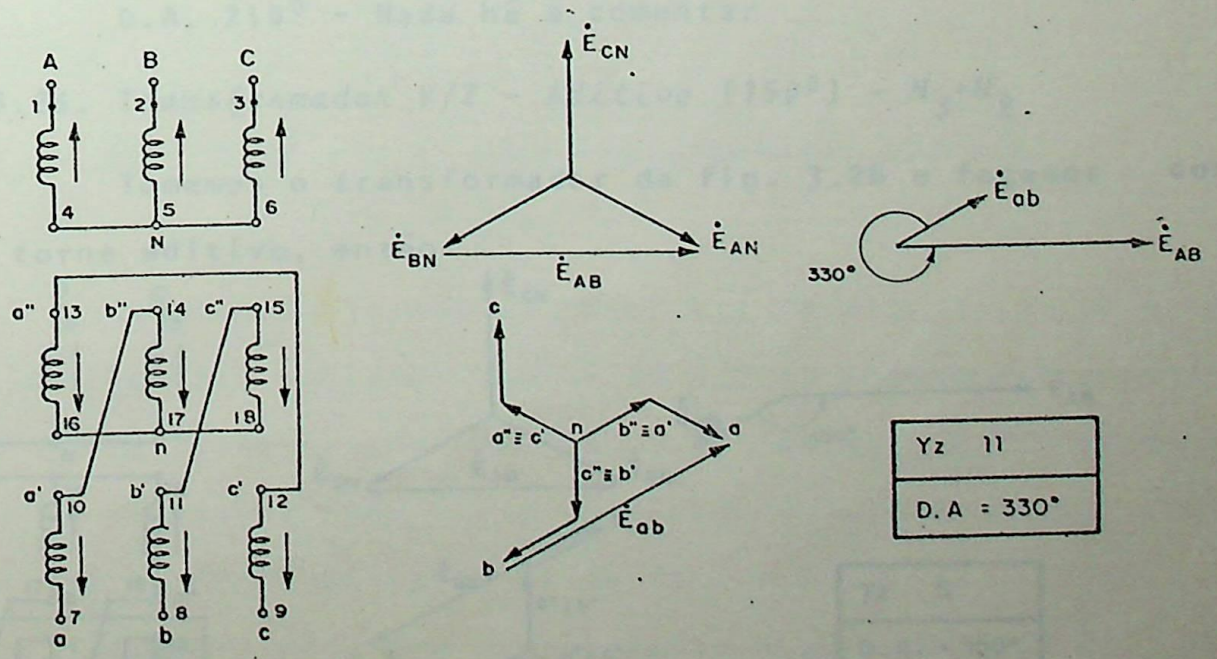


Fig. 3.26 - Yz 11

D.A. 330° , que em função de tudo que já foi dito até aqui, já era esperado.

3.3.25. Transformador Y/Z - Aditivo (210°) - $N_3 = N_2$

Tomemos o transformador da fig. 3.25 e tornemo-lo a

ditivo, então:

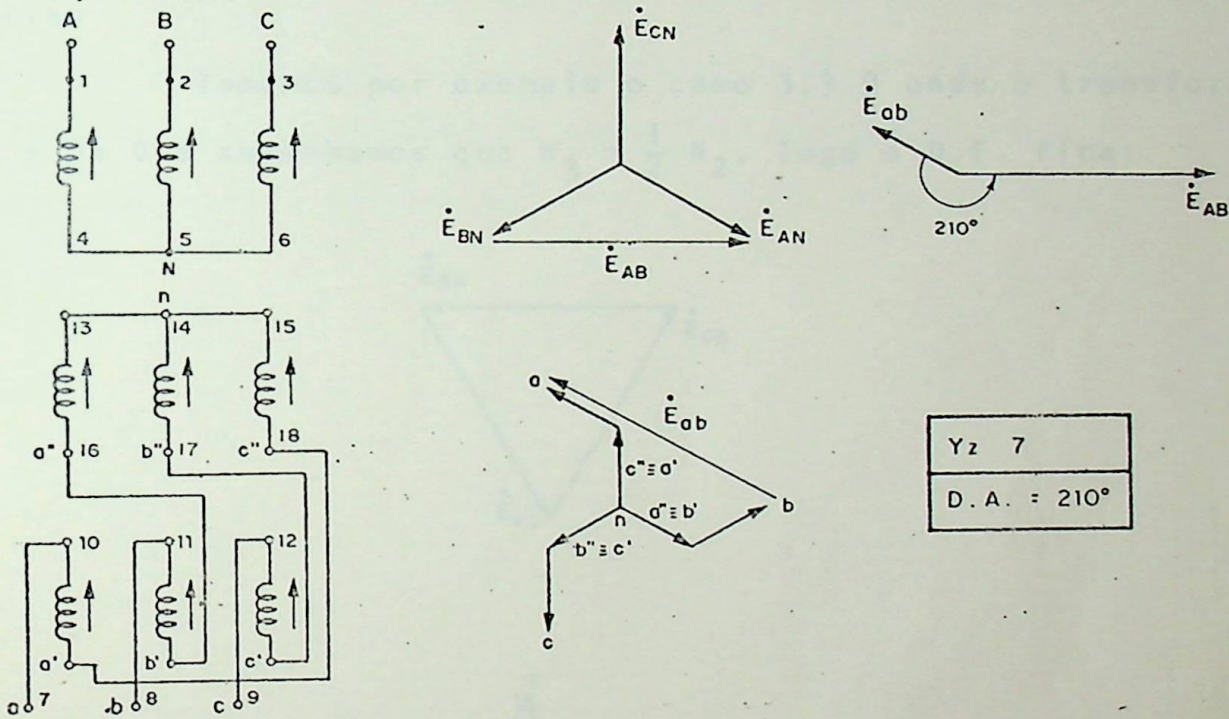


Fig. 3.27 - Yz 7

D.A. 210° - Nada há a comentar

3.3.26. Transformador Y/Z - Aditivo. (150°) - $N_3 = N_2$

Tomemos o transformador da fig. 3.26 e façamos com que se torne aditivo, então:

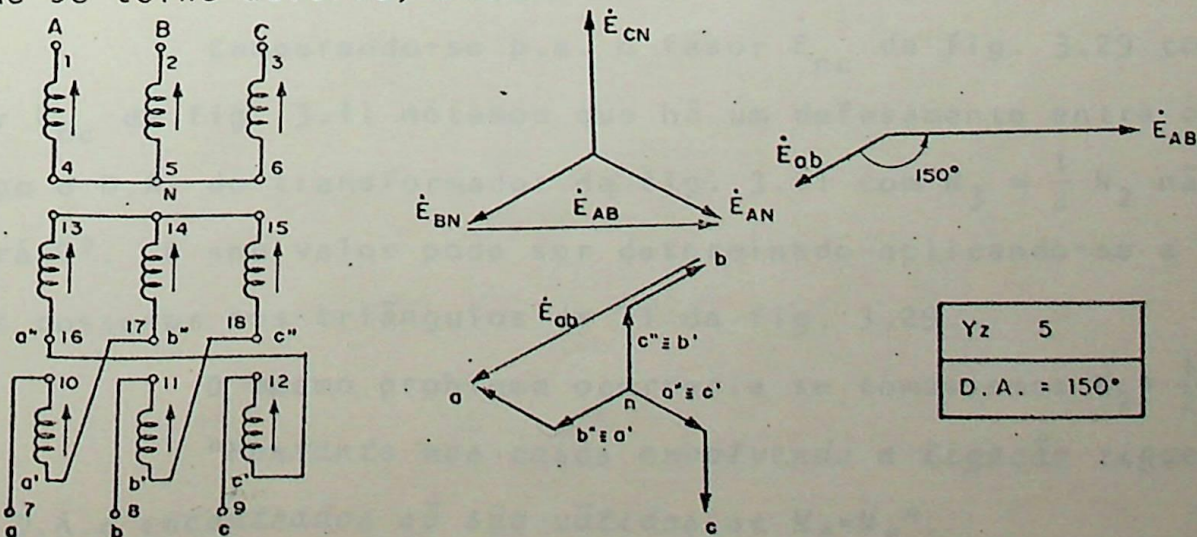


Fig. 3.28 - Yz 5

D.A. 150° - Nada há a comentar.

Após esta análise detalhada dos possíveis D.A.s, de vemos fazer duas considerações importantes para finalizar o capítulo, sejam:

Nota 1: Variação do D.A. com a variação do número de espiras

Tomemos por exemplo o caso 3.3.9 onde o transformador é $Dz 0$ e suponhamos que $N_3 = \frac{1}{2} N_2$, logo o D.F. fica:

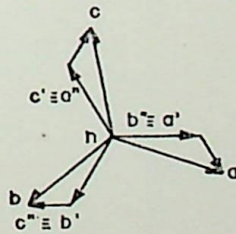
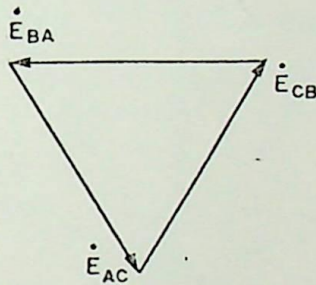


Fig. 3.29 - D.A. para transformador Δ/Z com

$$N_3 = \frac{1}{2} N_2$$

Comparando-se p.e. o fasor \dot{E}_{nc} da fig. 3.29 com o fasor \dot{E}_{nc} da fig. 3.11 notamos que há um defasamento entre os dois logo o D.A. do transformador da fig. 3.11 com $N_3 = \frac{1}{2} N_2$ não mais será 0° . O seu valor pode ser determinado aplicando-se a lei dos cossenos nos triângulos de TI da fig. 3.29.

O mesmo problema ocorreria se tomássemos $N_2 = \frac{1}{2} N_3$.

"Portanto nos casos envolvendo a ligação zigue-zague os D.A.s encontrados são válidos se $N_2 = N_3$ ".

e mais

"Um transformador com uma das conexões em zigue-zague pode ter os mais diversos defasamentos dependendo somente da relação $\frac{N_2}{N_3}$.

Nota 2: Vimos que, por exemplo, um transformador Δ/Δ pode ter até seis D.A.s, portanto, façamos um mapeamento, onde podemos observar todas as possíveis conexões e D.A.s e como sair de um D.A. e chegar a outro. A fig. 3.30 esclarece:

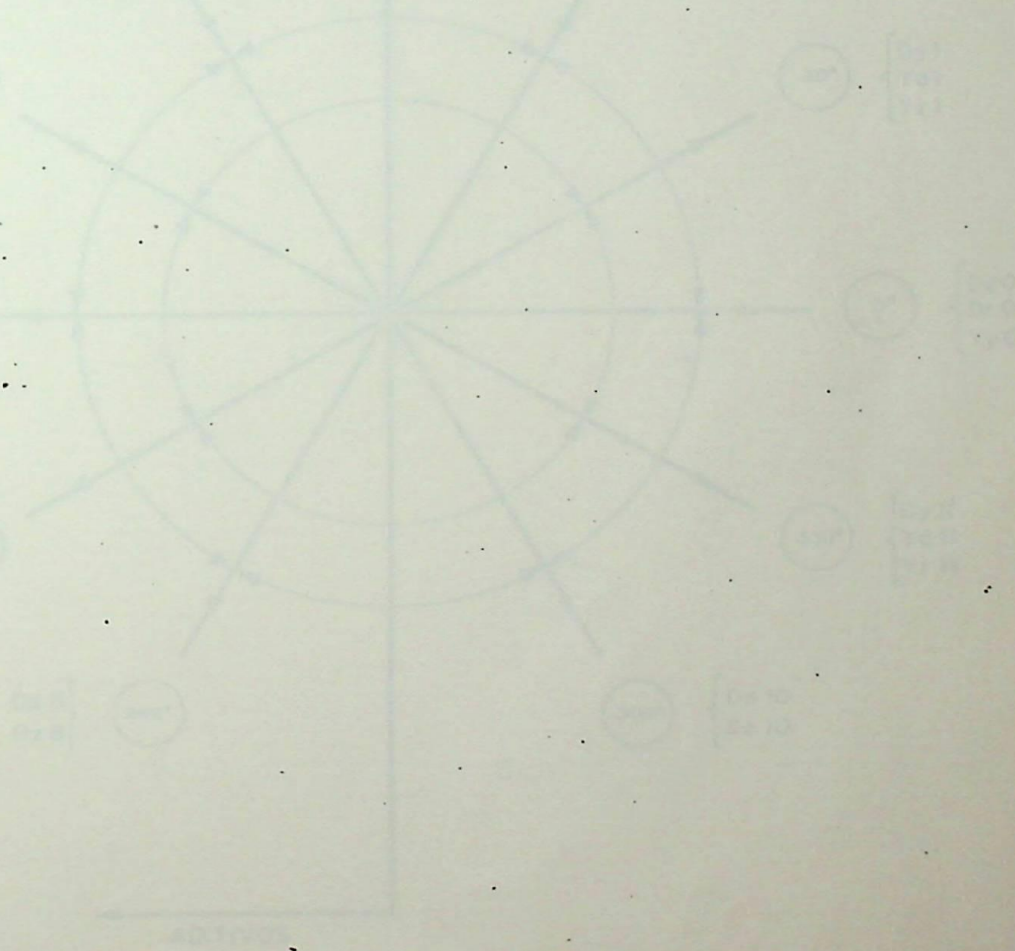


Fig. 3.30 - Mapeamento para mudança (com alteração nas ligações internas) de D.A. de um transformador, com alteração das conexões

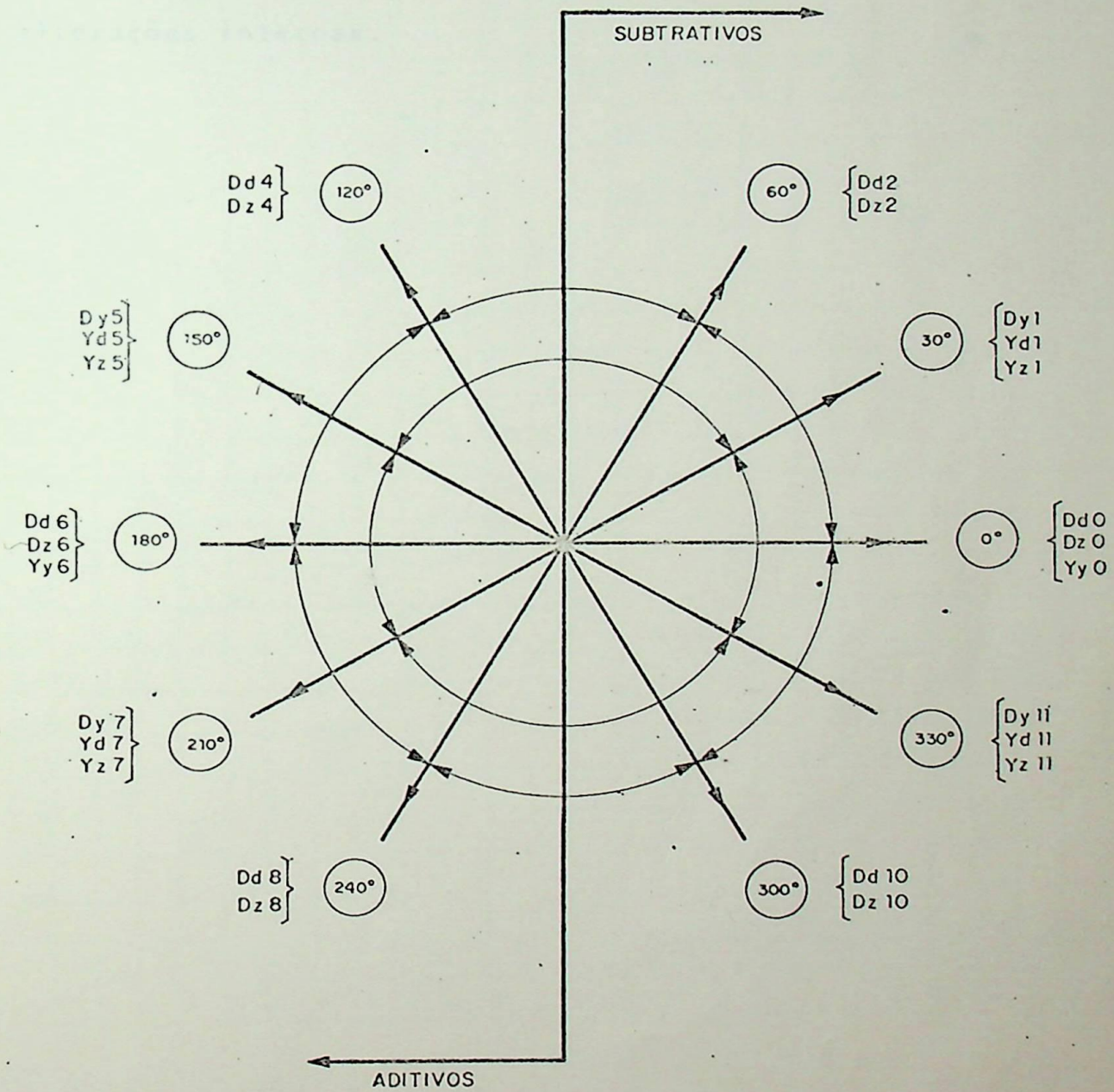


Fig. 3.30 - Mapeamento para mudança (com alterações nas ligações internas) do D.A. de um transformador, sem alterar suas conexões

A partir da fig. 3.30, foi elaborada a tabela III.1, onde estão, então, indicados as possibilidades e o "How to make" para se passar de um ângulo a outro, para a mesma conexão, com alterações internas.

TAB. III.1 - COMO ALTERAR O D.A. (MANTIDA A CONEXÃO), ATRAVÉS DE ALTERAÇÕES INTERNAS

D.A.d +	3.3	3.11	3.9	3.17	3.21	3.25	3.5	3.13	3.7	3.15	3.20	3.24	3.28	3.6	3.14	3.10	3.19	3.23	3.27	3.8	3.16	3.4	3.12	3.18	3.22	3.26
D.A.a +	Dd 0	Dz 0	Yy 0	Dy 1	Yd 1	Yz 1	Dd 2	Dz 2	Dd 4	Dz 4	Dy 5	Yd 5	Yz 5	Dd 6	Dz 6	Yy 6	Dy 7	Yd 7	Yz 7	Dd 8	Dz 8	Dd 10	Dz 10	Dy 11	Yd 11	Yz 11
Dd 0	3.3						ΔI		ΔS,P						P						ΔI,P	ΔS				
Dz 0	3.11							Z		Δ,P					P							Z,P		Δ		
Yy 0	3.9															P										
Dy 1	3.17									Δ,P							P								Δ ^F	
Yd 1	3.21										Δ,P							P							Δ ^S	
Yz 1	3.25												Z,P								P					Z ^S
Dd 2	3.5								ΔS, ΔI,P						ΔI,P						P		ΔS, ΔI, P			
Dz 2	3.13													Z,Δ P								P		Δ ^S Z,Δ ^F		
Dd 4	3.7						ΔS, ΔI,P									ΔS					Δ ^S Δ ^F		P			
Dz 4	3.15								Z,Δ P							Δ						Δ ^S Z ^F		P		
Dy 5	3.20										Δ,P															P
Yd 5	3.24											Δ,P														P
Yz 5	3.28								Z,P																	P
Dd 6	3.6	P						ΔI,P	ΔS																	
Dz 6	3.14		P						Z,P	Δ														Z		Δ,P
Yy 6	3.10			P																						
Dy 7	3.19				P																					Δ,P
Yd 7	3.23					P																				Δ,P
Yz 7	3.27						P																			Z,P
Dd 8	3.8	ΔI, P						P		ΔS, ΔI, P																ΔS, ΔI, P
Dz 8	3.16		Z,P																							Δ,Z, P
Dd 10	3.4	ΔS ₂						ΔS ₂ ΔI ₂		P												ΔS ΔI,P				
Dz 10	3.12			Δ ₄					Z,Δ ^F	P						Δ,P										Δ,Z, P
Dy 11	3.18																									
Yd 11	3.26																									
Yz 11	3.22																									

Legenda

- 1) D.A.a - D.A. atual
D.A.d - D.A. desejado
- 2) O número dentro do quadrado menor (p.e. 3.3) na 1ª coluna indica a figura referente ao ângulo indicado no quadrado maior (Dd 0) na 1ª coluna, no texto do Cap. III.
- 3) O quadrado de Intersecção, p.e., a Intersecção entre a coluna de Dd 0 e a linha de Dd 6, que é P, marca a operação a executar para alterar o D.A.
- 4) P - Inverter a polaridade por fase
 ΔS - Inverter o delta da TS
 ΔI - Inverter o delta da TI
 Δ - Inverter o delta
 Z - Inverter o zigue-zague.

Portanto: Exemplo: Tendo-se um transformador Dy 1, como obter um Dy 11? A Intersecção da linha Dy 1 com a coluna Dy 11, indica um Δ. Logo para termos Dy 11, basta Inverter a forma de fechar o Delta.

CAPÍTULO IV

DETERMINAÇÃO DO DEFASAMENTO ANGULAR, USANDO VOLTÍMETRO

4.1. Introdução

No capítulo anterior vimos a diversidade de ângulos de defasamento possíveis usando-se apenas as três conexões mais comuns: Δ , Y e Z . Propusemos ao final do capítulo as maneiras como se atuar em transformadores para se chegar a um determinado defasamento angular, partindo de um defasamento não desejado.

Entretanto fica a dúvida: o defasamento angular conseguido no capítulo III, foi obtido partindo-se do já conhecimento de como foi, internamente, conectado o transformador. Como, então, sem ter conhecimento desse fato, podemos saber a defasagem angular entre TS e TI para que possamos fazer a alteração que nos convier? É este exatamente o assunto deste capítulo.

4.2. Rotação de um Triângulo em Torno do Vértice de outro Triângulo.

Tome-se dois triângulos equiláteros, um maior e outro menor, como na fig. 4.1. Façamos com que haja a coincidência entre dois vértices, por exemplo vértices de mesmo nome (A e a) , pode então ocorrer o caso particular da fig. 4.2.a onde os lados correspondentes (\overline{AB} e \overline{ab} , \overline{BC} e \overline{bc} , \overline{CA} e \overline{ca}) formam um ângulo

CAPÍTULO IV

DETERMINAÇÃO DO DEFASAMENTO ANGULAR, USANDO VOLTÍMETRO

4.1. Introdução

No capítulo anterior vimos a diversidade de ângulos de defasamento possíveis usando-se apenas as três conexões mais comuns: Δ , Y e Z . Propusemos ao final do capítulo as maneiras como se atuar em transformadores para se chegar a um determinado defasamento angular, partindo de um defasamento não desejado.

Entretando fica a dúvida: o defasamento angular conseguido no capítulo III, foi obtido partindo-se do já conhecimento de como foi, internamente, conectado o transformador. Como, então, sem ter conhecimento desse fato, podemos saber a defasagem angular entre TS e TI para que possamos fazer a alteração que nos convier? É este exatamente o assunto deste capítulo.

4.2. Rotação de um Triângulo em Torno do Vértice de outro Triângulo.

Tome-se dois triângulos equiláteros, um maior e outro menor, como na fig. 4.1. Façamos com que haja a coincidência entre dois vértices, por exemplo vértices de mesmo nome (A e a) , pode então ocorrer o caso particular da fig. 4.2.a onde os lados correspondentes (\overline{AB} e \overline{ab} , \overline{BC} e \overline{bc} , \overline{CA} e \overline{ca}) formam um ângulo

de zero graus, ou pode ocorrer que, conforme o posicionamento do Δabc com relação ao ΔABC , o ângulo entre, p.e., \overline{AB} e \overline{ab} seja

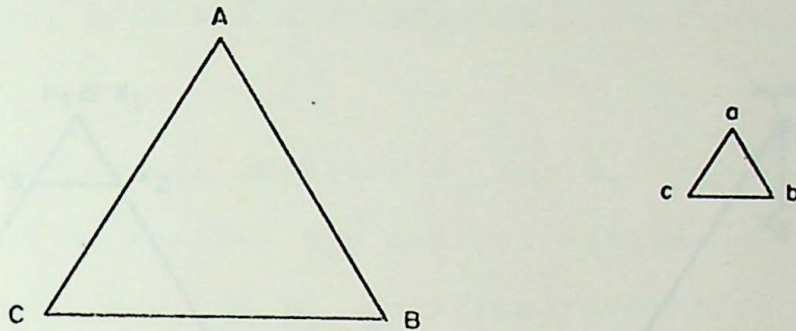


Fig. 4.1 - Triângulos equiláteros ABC e abc

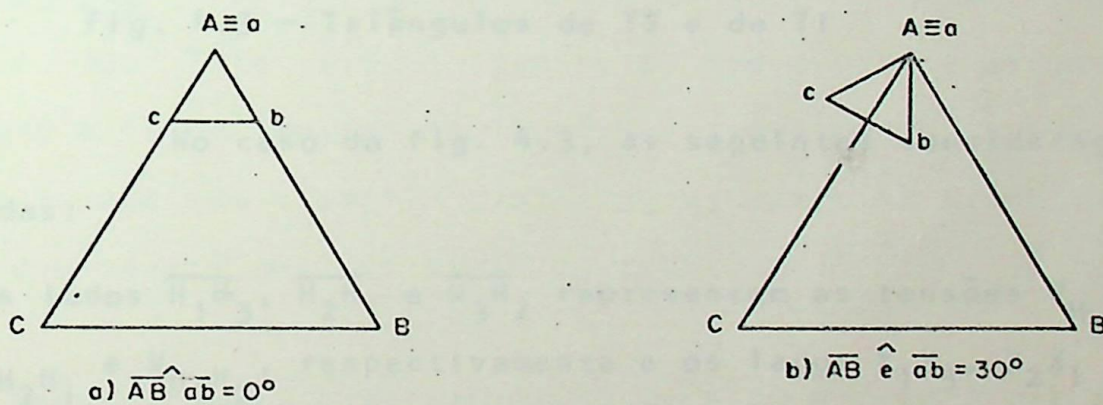


Fig. 4.2 - Triângulos com (um dos) vértices coincidentes.

qualquer. Fazemos com que o Δabc se desloque no sentido horário em torno do vértice a ($a \equiv A$) teremos então o caso da fig. 4.2.b onde o ângulo entre \overline{AB} e \overline{ab} (bem como \overline{BC} e \overline{bc} , e \overline{CA} e \overline{ca}) é de 30° . Portanto podemos ter os lados dos triângulos formando um ângulo qualquer, pela simples rotação do Δabc em torno do ponto $a \equiv A$.

4.3. Obtenção de Triângulos de Tensões

Se colocarmos os triângulos de TS e TI de um trans -

formador posicionados com um dos vértices coincidentes, como na fig. 4.3, podemos definir qual é o D.A. do mesmo. A figura esclarece:

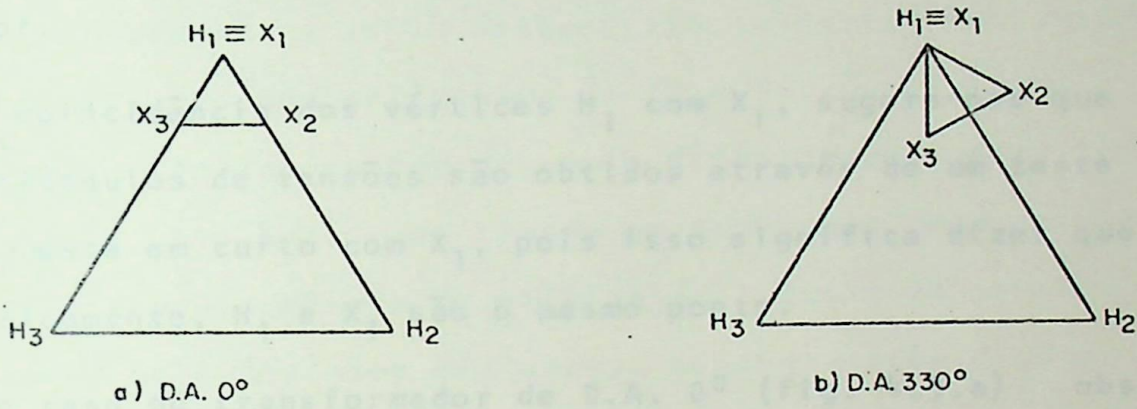


Fig. 4.3 - Triângulos de TS e de TI

No caso da fig. 4.3, as seguintes considerações são válidas:

a) Os lados $\overline{H_1H_3}$, $\overline{H_2H_1}$ e $\overline{H_3H_2}$ representam as tensões $V_{H_1H_3}$, $V_{H_2H_1}$ e $V_{H_3H_2}$, respectivamente e os lados X_1X_3 , X_2X_1 e X_3X_2 , representam, respectivamente, as tensões $V_{X_1X_3}$, $V_{X_2X_1}$ e $V_{X_3X_2}$ e os valores numéricos são:

$$V_{H_1H_3} [V] = f [V/cm] \overline{H_1H_3} [cm]$$

$$V_{H_2H_1} [V] = f [V/cm] \overline{H_2H_1} [cm]$$

$$V_{H_3H_2} [V] = f [V/cm] \overline{H_3H_2} [cm]$$

e

$$V_{X_1X_3} [V] = f [V/cm] \overline{X_1X_3} [cm]$$

$$V_{X_2X_1} [V] = f [V/cm] \overline{X_2X_1} [cm]$$

$$V_{X_3X_2} [V] = f [V/cm] \overline{X_3X_2} [cm]$$

onde f é fator de escala de execução dos triângulos $H_1H_2H_3$ e $X_1X_2X_3$.

Nota:- Lembremos ainda que $V_{H_1H_3} = K V_{X_1X_3}$, e assim por diante, onde K é a relação de transformação do transformador.

b) A coincidência dos vértices H_1 com X_1 , sugere-nos que estes triângulos de tensões são obtidos através de um teste onde H_1 está em curto com X_1 , pois isso significa dizer que, eletricamente, H_1 e X_1 são o mesmo ponto.

c) No caso do transformador de D.A. 0° (fig. 4.3.a) observamos que $V_{H_3X_2} = V_{H_2X_3}$, enquanto que no caso do transformador de D.A. 330° (fig. 4.3.b) (lembre-se que o D.A. é medido da TI para a TS no sentido antihorário) temos que $V_{H_3X_2} > V_{H_2X_2}$. Isso sugere que a partir das relações entre as diversas tensões é que haverá uma definição de cada D.A.

4.4. Medições para a Determinação do D.A. a Partir dos Triângulos de TS e TI.

Para que possamos para cada transformador, determinar o seu D.A., basta que tenhamos em mãos um voltímetro, executemos e analisemos os resultados de um teste, que deve, obrigatoriamente, tomar como "princípios" as considerações do item 4.3 e da fig. 4.3.

Relendo as considerações e revendo a fig. 4.3, tiramos as seguintes conclusões:

- 1) Deve-se colocar H_1 ligado com X_1 .
- 2) Deve-se alimentar o transformador com tensão reduzida, pois

o que interessa são as relações entre tensões e não os seus valores reais de operação, havendo portanto facilidade nas medições.

- 3) Deve-se fazer diversas medições de tensões, para que as diversas comparações possíveis definam o D.A. do transformador.
- 4) As comparações a serem feitas, são melhores visualizadas com a construção dos triângulos de TS e TI.

Quando executamos pela primeira vez estas instruções os itens 1, 2 e 4 não nos trouxeram problemas, mas no item 3 esbarramos com o problema de otimização: Quais as tensões que devem ser escolhidas para efetuarmos as comparações? Qual o mínimo de comparações a ser feito que assegura a determinação exata dos diversos D.A.s?

Quanto a primeira pergunta temos: Seis terminais (H_1, H_2, H_3, X_1, X_2 e X_3) que combinados de dois em dois fornecerão então C_2^6 possíveis tensões a serem medidas: Entretanto as tensões de TS ($V_{H_1H_3}, V_{H_2H_1}$ e $V_{H_3H_2}$) são iguais entre si logo subtraímos C_2^3 e somamos 1 para termos um valor medido, p.e., $V_{H_1H_3}$; as tensões de TI (como veremos na tabela IV.2) não são necessárias, portanto subtraímos C_2^3 e finalmente $V_{H_1X_1}$ é zero pois H_1 está ligado com X_1 , logo subtrai-se 1; como será visto pelos triângulos de TS e TI as tensões $V_{H_1X_2}, V_{H_1X_3}$ e $V_{H_2X_1}$ e $V_{H_3X_1}$ não têm interesse, logo:

$$\begin{aligned}
 N &= C_2^6 - C_2^3 + 1 - C_2^3 - 1 - 4 = \\
 &= \frac{6!}{2!(6-2)!} - \frac{3!}{2!(3-2)!} + 1 - \frac{3!}{2!(3-2)!} - 1 - 4 = \\
 &= \frac{6 \cdot 5 \cdot 4!}{2 \cdot 4!} - \frac{3 \cdot 2!}{2! \cdot 1!} + 1 - \frac{3 \cdot 2!}{2! \cdot 1!} - 1 - 4 = \\
 &= 15 - 3 + 1 - 3 - 1 - 4 = 5
 \end{aligned}$$

$$N = 5$$

Logo o número de tensões a serem lidas é em princípio cinco (vide observações no ítem 3 do teste a seguir descrito, quando veremos que em realidade podem ser apenas três).

Quanto a segunda pergunta temos: O número mínimo de comparações é quatro. Como se chegou a isso? Fazendo a análise dos diversos TS e TI (da fig. 4.4 a 4.13) e eliminando as redundâncias.

Um exemplo de que quatro é o número mínimo de comparações é dado a seguir:

Suponha que tabela IV.1 eliminemos a primeira linha, então comparemos os casos de D.A. 60^0 e D.A. 120^0 e temos:

- Para D.A. 60^0

$$V_{H_2X_3} > V_{H_3X_2}, V_{H_2X_2} < V_{H_2X_3} \text{ e } V_{H_3X_3} > V_{H_3X_2}$$

- Para D.A. 120^0

$$V_{H_2X_3} > V_{H_3X_2}, V_{H_2X_2} < V_{H_2X_3} \text{ e } V_{H_3X_3} > V_{H_3X_2}$$

Portanto com três comparações não há como saber se o D.A. é 60^0 ou 120^0 .

Após estas considerações resumimos o teste e a análise no seguinte:

Teste para Determinação do D.A. com Medições de Tensões

1. Colocar H_1 ligado com X_1
2. Aplicar tensão reduzida ($\leq V_{CC}$) ao lado de TS.

3. Medir $V_{H_1 H_3}^1$, $V_{H_2 X_2}^2$, $V_{H_2 X_3}$, $V_{H_3 X_2}$, $V_{H_3 X_3}^2$

4. Leve as medições à tabela IV.1, faça as comparações e conclua qual o D.A.

4.5. *Equacionamento para as Tensões a serem Medidas a Partir dos Triângulos de TS e TI.*

O teste e as comparações estão prontos, mas resta ainda um pequeno problema:

A medida que a relação de transformação (K) cresce, o triângulo de TI vai se tornando cada vez menor em comparação com o triângulo de TS e dependendo do voltímetro usado, pode-se não ter uma boa precisão nas leituras, o que dificulta sobremaneira as comparações a serem feitas. Propomos duas soluções:

a) Reduzir-se as medições para o triângulo de TS e as medições dos quatro (ou três) $V_{H_i X_j}$ ($i=2,3, j=2,3$) através de um TP de relação de transformação e de polaridade conhecidas.

Nota: A polaridade do TP pode ser determinada a partir do método do golpe indutivo (Vide Apêndice V).

b) Usar-se um voltímetro digital.

1) Não é estritamente necessário pois $V_{H_1 H_3} = V$ rede de alimentação

2) A análise detalhada dos triângulos de TS e TI, mostrados no item 4.5 (sub-ítem 1 a 10) mostram que sempre $\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3}$ ou seja $V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3}$, em outras palavras $V_{H_2 X_2}$ e $V_{H_3 X_3}$ aparecem ambos na tabela IV.1 por problemas de "visualização", já que numericamente são iguais.

Em ambos os casos é ainda de alto interesse, que o executor do teste tenha idéia de em quanto vai resultar as medições dos diversos $V_{H_i X_j}$; Para tanto apresentamos a seguir os triângulos de TS e TI para os diversos D.A.s e o equacionamento em cada caso dos $V_{H_i X_j}$.

A ordem de apresentação não será a ordem crescente dos ângulos, porque é de bom aviltre, que se coloque os D.A.s na sua forma natural, ou seja, transformadores que tenham D.A.s suplementares, (p.e.: 0° e 180° , 30° e 210° , etc.), que é o que se faz na tabela IV.1

OBS:- Para melhor entendimento do que se quer dizer com ordem natural, compare o sentido das desigualdades para D.A.s suplementares, na tabela IV.1.

4.5.1. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 0°

Analisemos a fig. 4.4

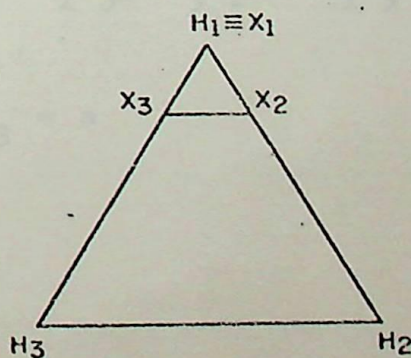


Fig. 4.4 - D.A.: 0°

Consideremos que:

$$\overline{H_1 H_3} = \overline{H_2 H_1} = \overline{H_3 H_2} = r$$

e

$$\overline{X_1 X_3} = \overline{X_2 X_1} = \overline{X_3 X_2} = s$$

como

$$V_{H_1 H_3} = f \overline{H_1 H_3}$$

e

$$V_{X_1 X_3} = f \overline{X_1 X_3}$$

Vide ítem 4.3, consideração a

vem:

$$K = \frac{V_{H_1 H_3}}{V_{X_1 X_3}} = \frac{f \overline{H_1 H_3}}{f \overline{X_1 X_3}} = \frac{f r}{f s} = \frac{r}{s}$$

logo:

$$K = \frac{r}{s}$$

Para as comparações da tabela IV.1, necessitamos dos valores de: $V_{H_2 X_2}$, $V_{H_2 X_3}$, $V_{H_3 X_2}$ e $V_{H_3 X_3}$, portanto procuremos o equacionamento de $\overline{H_2 X_2}$, $\overline{H_2 X_3}$, $\overline{H_3 X_2}$ e $\overline{H_3 X_3}$.

Chamemos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

Na fig. 4.4, temos:

$$\overline{H_1 H_3} = \overline{X_1 X_3} + \overline{H_3 X_3}$$

logo:

$$r = s + a$$

$$a = r - s, \text{ mas } s = r/K, \text{ donde:}$$

$$a = r - \frac{r}{K} \rightarrow a = \frac{(K-1)}{K} r \dots$$

$$\dots a = \frac{(K-1)}{K} r$$

- Cálculo de b e c:

Neste caso particular (Vide fig. 4.4) $b=c$.

No triângulo $H_1 H_2 X_3$, temos pela lei dos cossenos:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(60^\circ)$$

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \frac{1}{2}$$

$$b^2 = r^2 + s^2 - rs$$

$$\text{mas } s = \frac{r}{K}, \text{ logo:}$$

$$b^2 = r^2 + \frac{r^2}{K^2} - \frac{r^2}{K} = \frac{K^2 r^2 + r^2 - Kr^2}{K^2}$$

$$\text{como } b=c \rightarrow c^2 = b^2 = \frac{(K^2 - K + 1)}{K^2} r^2$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3} = \frac{K-1}{K} V_{H_1 H_3}$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

4.5.2. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 180°

Façamos a análise pela fig. 4.5:

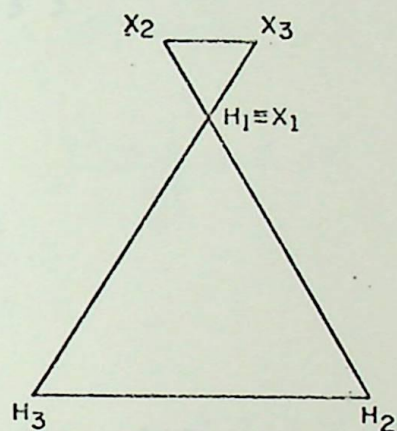


Fig. 4.5 - D.A. 180°

Consideremos que:

$$\overline{H_1 H_3} = \overline{H_2 H_1} = \overline{H_3 H_2} = r$$

e

$$\overline{X_1 X_3} = \overline{X_2 X_1} = \overline{X_3 X_2} = s$$

e novamente temos:

$$K = \frac{r}{s}$$

$$V_{H_2 X_2} = ?$$

$$V_{H_3 X_3} = ?$$

$$V_{H_2 X_3} = ?$$

$$V_{H_3 X_2} = ?$$

Chamemos novamente:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

Temos na fig. 4.5 que:

$$\overline{H_3 H_1} + \overline{X_1 X_3} = \overline{H_3 X_3}$$

$$\therefore a = r + s$$

$$a = r + \frac{r}{K}$$

$$a = \frac{Kr + r}{K} = \frac{K + 1}{K} r$$

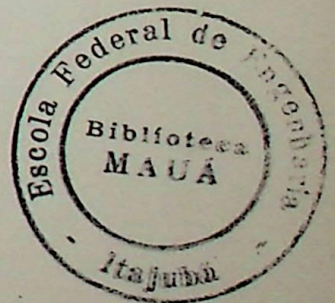
$$a = \frac{K + 1}{K} r$$

- Cálculo de b e c

No triângulo $X_3 H_1 X_2$, temos pela lei dos cossenos que:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos (120^\circ)$$

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \left(-\frac{1}{2}\right)$$



$$b^2 = r^2 + \frac{r^2}{K^2} + r \frac{r}{K}$$

$$b^2 = \frac{K^2 r^2 + r^2 + Kr^2}{K^2}$$

como $b=c$ (vide fig. 4.5), vem:

$$c^2 = b^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} r^2$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3} = \frac{K + 1}{K} V_{H_1 H_3}$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

4.5.3. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 30°

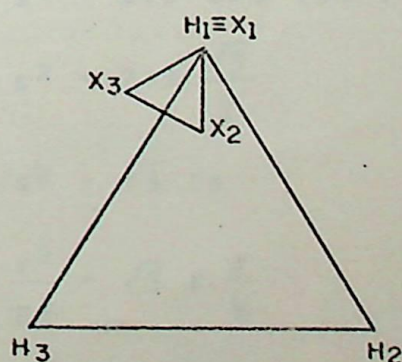


Fig. 4.6 - D.A: 30°

As considerações iniciais são as mesmas que nos dois casos anteriores.

Deseja-se:

$$V_{H_2 X_2} = ? \quad V_{H_3 X_3} = ? \quad V_{H_2 X_3} = ? \quad V_{H_3 X_2} = ?$$

Façamos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

Do triângulo $H_1 X_2 H_2$ da fig. 4.6, vem:

Pela Lei dos Cossenos:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(30^\circ)$$

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = r^2 + s^2 - \sqrt{3} rs$$

donde:

$$a^2 = r^2 + \frac{r^2}{K^2} - \sqrt{3} r \frac{r}{K}$$

$$a^2 = \frac{K^2 r^2 + r^2 - K\sqrt{3} r^2}{K^2}$$

$$\therefore a^2 = \frac{K^2 - \sqrt{3} K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

Do triângulo $H_1 X_3 H_2$, vem:

Por Pitágoras:

$$b^2 = r^2 + s^2$$

$$\therefore b^2 = r^2 + \frac{r^2}{K^2} = \frac{K^2 r^2 + r^2}{K^2}$$

logo:

$$b^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

No triângulo $H_1 H_3 X_2$, temos:

Pela Lei dos Cossenos:

$$c^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(30^\circ)$$

0 que sugere (vide cálculo de a) que $c=a$. A análise da figura confirma. Portanto:

$$c^2 = \frac{K^2 - \sqrt{3} K + 1}{K^2} r^2$$

logo:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 - \sqrt{3} K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

4.5.4. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 210°

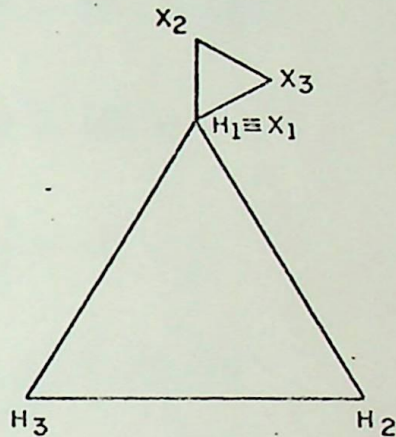


Fig. 4.7 - D.A.: 210°

Deseja-se:

$$V_{H_2 X_2} = ? \quad V_{H_2 X_3} = ? \quad V_{H_3 X_2} = ? \quad V_{H_3 X_3} = ?$$

Façamos as mesmas considerações iniciais que nos outros casos.

Tomemos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

No triângulo $H_2 H_1 X_2$, pela lei dos cossenos, temos:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(150^\circ)$$

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$a^2 = r^2 + s^2 + \sqrt{3} rs$$

$$a^2 = r^2 + \frac{r^2}{K^2} + \sqrt{3} r \frac{r}{K}$$

$$a^2 = \frac{K^2 r^2 + r^2 + \sqrt{3} K r^2}{K^2}$$

$$\therefore a^2 = \frac{K^2 + \sqrt{3} K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

No triângulo $H_2 H_1 X_3$, vem, por Pitágoras:

$$b^2 = r^2 + s^2$$

$$\therefore b^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

Da mesma forma que no caso anterior (4.5.3), aqui também $c=a$, logo:

$$c^2 = \frac{K^2 + \sqrt{3} K + 1}{K^2} r^2$$

Logo:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 + \sqrt{3} K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

4.5.5. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 60°

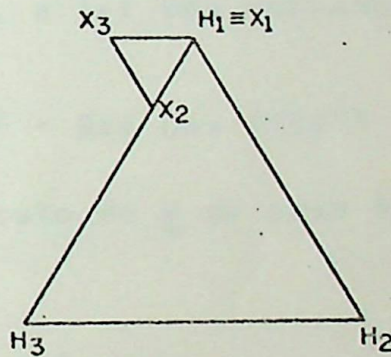


Fig. 4.8 - D.A.: 60°

Necessita-se:

$$V_{H_2 X_2} = ? , V_{H_3 X_3} = ? , V_{H_3 X_2} = ? , V_{H_2 X_3} = ?$$

Façamos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

Apliquemos a lei dos cossenos no triângulo $H_2 H_1 X_2$

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(60^\circ)$$

OBS:- O cálculo do b do caso 4.5.1 tem a mesma expressão, logo:

$$a^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

No $\Delta H_1 H_2 X_3$, a lei dos cossenos nos dá:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(120^\circ)$$

OBS:- O cálculo do b do caso 4.5.2 tem a mesma expressão, logo:

$$b^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

Na fig. 4.8, temos:

$$\overline{H_1 H_3} = \overline{H_3 X_2} + \overline{X_1 X_3}, \text{ logo:}$$

$$r = c + s \quad \therefore \quad c = r - s$$

$$\therefore c = r - \frac{r}{K} = \frac{Kr - r}{K}$$

$$c = \frac{K - 1}{K} r$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_3 X_2} = \frac{K-1}{K} V_{H_1 H_3}$$

4.5.6. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 240°

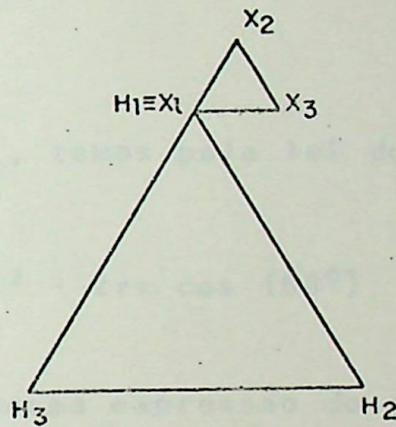


Fig. 4.9 - D.A.: 240°

$$V_{H_2 X_2} = ? \quad V_{H_3 X_2} = ? \quad V_{H_2 X_3} = ? \quad V_{H_3 X_3} = ?$$

Façamos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

No $\Delta H_2 H_1 X_2$, apliquemos a lei dos cossenos:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos (120^\circ)$$

OBS:- É a mesma equação para o cálculo do b do caso

4.5.5, logo:

$$a^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

No $\Delta H_2 H_1 X_3$, temos pela lei dos cossenos:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(60^\circ)$$

OBS:- É a mesma expressão do cálculo do a do caso 4.

5.5, logo:

$$b^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

Na fig. 4.9, temos:

$$\overline{H_3 X_2} = \overline{H_1 H_3} + \overline{X_1 X_2}$$

$$c = r + s$$

$$c = r + \frac{r}{K} = \frac{Kr + r}{K}$$

$$\therefore c = \frac{K + 1}{K} r$$

Portanto:

4.5.5, logo:

$$a^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

No $\Delta H_2H_1X_3$, temos pela lei dos cossenos:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(60^\circ)$$

OBS:- É a mesma expressão do cálculo do a do caso 4.

5.5, logo:

$$b^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

Na fig. 4.9, temos:

$$\overline{H_3X_2} = \overline{H_1H_3} + \overline{X_1X_2}$$

$$c = r + s$$

$$c = r + \frac{r}{K} = \frac{Kr + r}{K}$$

$$\therefore c = \frac{K + 1}{K} r$$

Portanto:

4.5.5, logo:

$$a^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

No $\Delta H_2 H_1 X_3$, temos pela lei dos cossenos:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(60^\circ)$$

OBS:- É a mesma expressão do cálculo do a do caso 4.

5.5, logo:

$$b^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

Na fig. 4.9, temos:

$$\overline{H_3 X_2} = \overline{H_1 H_3} + \overline{X_1 X_2}$$

$$c = r + s$$

$$c = r + \frac{r}{K} = \frac{Kr + r}{K}$$

$$\therefore c = \frac{K + 1}{K} r$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_3 X_2} = \frac{K + 1}{K} V_{H_1 H_3}$$

4.5.7. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 120°

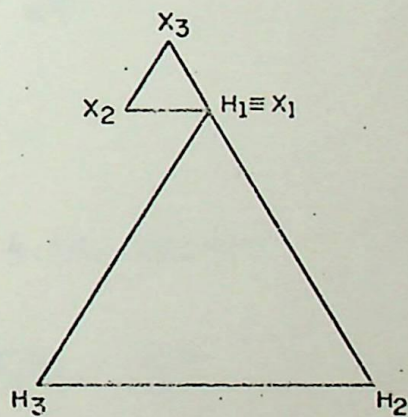


Fig. 4.10 - D.A.: 120°

Quanto valem agora:

$$V_{H_2 X_2} = ? , V_{H_3 X_3} = ? , V_{H_3 X_2} = ? \text{ e } V_{H_2 X_3} = ?$$

Façamos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

No $\Delta H_2 H_1 X_2$, aplicando-se a lei dos cossenos tem-se:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(120^\circ)$$

OBS:- Esta equação é igual àquela do cálculo do a do caso 4.5.6, logo:

$$a^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

Na fig. 4.10, temos:

$$\overline{H_2 X_3} = \overline{H_2 H_1} + \overline{X_2 X_1}$$

$$b = r + s$$

$$b = r + \frac{r}{K} = \frac{Kr + r}{K}$$

$$b = \frac{K + 1}{K} r$$

- Cálculo de c:

No $\Delta H_3 H_1 X_2$, aplica-se a lei dos cossenos e então:

$$c^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(60^\circ)$$

OBS:- O cálculo do \underline{a} do caso 4.5.5, envolve o mesmo tipo de equação, logo:

$$c^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} r^2$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_2 X_3} = \frac{K + 1}{K} V_{H_1 H_3}$$

$$V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

4.5.8. Triângulos de TS e TI e Equacionamento para D.A. 300°

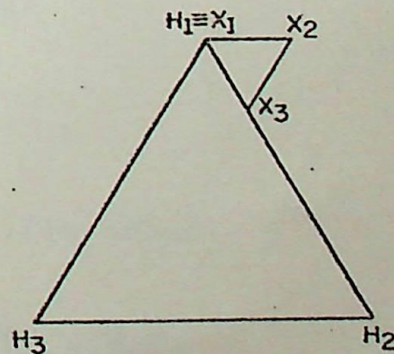


Fig. 4.11 - D.A.: 300°

Qual o valor de:

$$V_{H_2 X_2}, V_{H_3 X_3}, V_{H_2 X_3} \text{ e } V_{H_3 X_2} \quad ?$$

Façamos então:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

No $\Delta H_2 H_1 X_2$, temos pela lei dos cossenos:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(60^\circ)$$

OBS:- Esta expressão é análoga àquela do cálculo do b do caso 4.5.6, então:

$$a^2 = \frac{K^2 - K + 1}{K^2}$$

- Cálculo de b:

Na fig. 4.11, temos:

$$\overline{H_2 X_3} + \overline{X_1 X_3} = \overline{H_2 H_1}$$

logo: $b + s = r$

$$b + \frac{r}{K} = r \quad \therefore \quad b = r - \frac{r}{K} = \frac{Kr - r}{K}$$

$$\therefore b = \frac{K - 1}{K} r$$

- Cálculo de c:

No $\Delta H_3 H_1 X_2$, a lei dos cossenos nos dá:

$$c^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos (120^\circ)$$

OBS:- A equação do a do caso 4.5.7 é igual a esta, logo:

go:

$$c^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} r^2$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

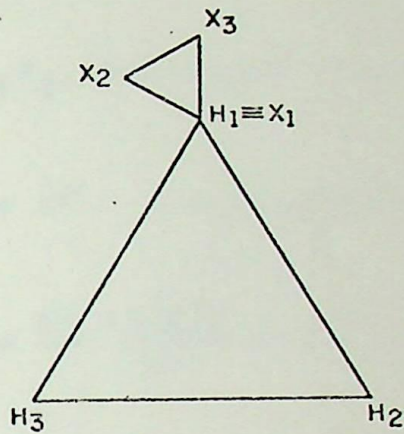
$$V_{H_2 X_3} = \frac{K - 1}{K} V_{H_1 H_3}$$

$$V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 + K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

4.5.9.. Triângulo de TS e TI e Equacionamento para D.A.150°

Quais os valores de:

$$V_{H_2 X_2}, V_{H_3 X_3}, V_{H_2 X_3} \text{ e } V_{H_3 X_2} ?$$

Fig. 4.12 - D.A.: 150°

Façamos:

$$\overline{H_2X_2} = \overline{H_3X_3} = a$$

$$\overline{H_2X_3} = b$$

$$\overline{H_3X_2} = c$$

- Cálculo de a:

Aplicamos a lei dos cossenos, no $\Delta H_2H_1X_2$, vem:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos (150^\circ)$$

OBS:- No cálculo do a do caso 4.5.4, temos a mesma equação, logo:

$$a^2 = \frac{K^2 + \sqrt{3} K + 1}{K^2} r^2$$



- Cálculo de b:

No $\Delta H_2 H_1 X_3$, aplicamos a lei dos cossenos:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(150^\circ)$$

$$\therefore b^2 = \frac{K^2 + \sqrt{3}K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

Aplicando Pitágoras ao $\Delta H_3 H_1 X_2$, temos:

$$c^2 = r^2 + s^2$$

$$\therefore c^2 = r^2 + \frac{r^2}{K^2} = \frac{K^2 r^2 + r^2}{K^2}$$

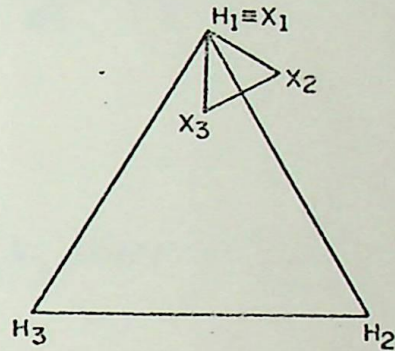
$$\therefore c^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} r^2$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = \frac{K^2 + \sqrt{3}K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = \frac{K^2 + \sqrt{3}K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

4.5.10. Triângulo de TS e TI e Equacionamento para D.A.: 330^0 Fig. 4.13 - D.A.: 330^0

Quanto valem agora:

$$V_{H_2 X_2}, V_{H_3 X_3}, V_{H_2 X_3} \text{ e } V_{H_3 X_2} \quad ?$$

Façamos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

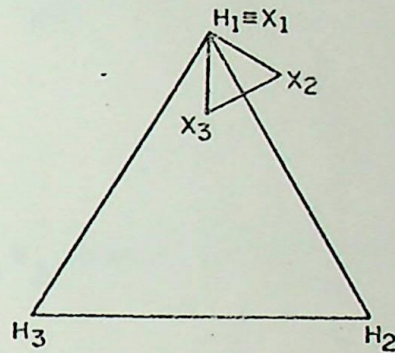
$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

No $\Delta H_2 H_1 X_2$, vem pela lei dos cossenos:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(30^0)$$

4.5.10. Triângulo de TS e TI e Equacionamento para D.A.: 330^0 Fig. 4.13 - D.A.: 330^0

Quanto valem agora:

$$V_{H_2 X_2}, V_{H_3 X_3}, V_{H_2 X_3} \text{ e } V_{H_3 X_2} \text{ ?}$$

Façamos:

$$\overline{H_2 X_2} = \overline{H_3 X_3} = a$$

$$\overline{H_2 X_3} = b$$

$$\overline{H_3 X_2} = c$$

- Cálculo de a:

No $\Delta H_2 H_1 X_2$, vem pela lei dos cossenos:

$$a^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(30^0)$$

OBS:- O cálculo do \underline{c} do caso 4.5.3, apresenta o mesmo tipo de equação, então:

$$a^2 = \frac{K^2 - \sqrt{3} K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de b:

No $\Delta H_2 H_1 X_3$ temos pela lei dos cossenos:

$$b^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(30^\circ)$$

Logo:

$$b^2 = \frac{K^2 - \sqrt{3} K + 1}{K^2} r^2$$

- Cálculo de c:

No $\Delta H_3 H_1 X_2$, aplicando Pitágoras, vem:

$$c^2 = r^2 + s^2$$

$$\therefore c^2 = r^2 + \frac{r^2}{K^2} = \frac{K^2 r^2 + r^2}{K^2}$$

$$\therefore c^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} r^2$$

Portanto:

$$V_{H_2 X_2}^2 = V_{H_3 X_3}^2 = \frac{K^2 - \sqrt{3} K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_2 X_3}^2 = \frac{K^2 - \sqrt{3} K + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

$$V_{H_3 X_2}^2 = \frac{K^2 + 1}{K^2} V_{H_1 H_3}^2$$

Com as relações obtidas pode-se montar uma tabela com pãctando todos os casos estudados (de 4.5.1 a 4.5.10). Esta tabela é a de número IV.2. A explicação de como funciona a tabela se encontra abaixo da mesma.

4.6. Tabelas Padronizadas

Com o intuito de fornecer, além de uma tabela genérica como é a tabela IV.2; tabelas com diversos valores de K, mais frequentemente usados, são fornecidas a partir da tabela IV.3.

TAB. IV.1 - RELAÇÕES ENTRE TENSÕES PARA DETERMINAÇÃO DO D.A.

DEFASAMENTOS ANGULARES →	TENSÕES A COMPARAR ↓										
	0°	180°	30°	210°	60°	240°	120°	300°	150°	330°	
$V_{H_1 H_3}$ e $V_{H_3 X_3}$	>	<	>	<	>	<	<	>	<	>	<
$V_{H_2 X_3}$ e $V_{H_3 X_2}$	=	=	>	<	>	<	>	<	>	=	<
$V_{H_2 X_2}$ e $V_{H_2 X_3}$	<	>	<	>	<	>	<	>	=	=	<
$V_{H_3 X_3}$ e $V_{H_3 X_2}$	<	>	=	=	>	<	>	<	>	<	<
TIPO DE TRANSFOR- MADOR QUANTO A POLARIDADE POR FASE →	S	A	S	A	S	A	A	S	A	S	S

Obs:- $V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3}$ - Vide nota de pé de página nº 3, referente ao final do ítem 4.4 (Teste para Determinação do D.A....).

TAB. IV.2 - VALORES DE TENSÕES, EM FUNÇÃO DE K E DE UMA TS ($V_{H_1 H_3}$), QUE OCORREM NA DETERMINAÇÃO DOS D.A.s.

RELAÇÕES DE TENSÕES EM FUNÇÃO DE K.												
TENSÕES A MEDIR	D.A. 0°	D.A. 180°	D.A. 30°	D.A. 210°	D.A. 60°	D.A. 240°	D.A. 120°	D.A. 300°	D.A. 150°	D.A. 330°	OPERAÇÃO ARITMÉTICA	VALOR BÁSICO
$V_{H_2 X_2}$	$\frac{K-1}{K}$	$\frac{K+1}{K}$	$\frac{K^2-\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-\sqrt{3}K+1}{K^2}$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_3}$	$\frac{K-1}{K}$	$\frac{K+1}{K}$	$\frac{K^2-\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-\sqrt{3}K+1}{K^2}$	X	$V_{H_1 H_3}^2$
$V_{H_2 X_3}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+1}{K^2}$	$\frac{K^2+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K+1}{K}$	$\frac{K-1}{K}$	$\frac{K^2+\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-\sqrt{3}K+1}{K^2}$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_2}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2-\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+\sqrt{3}K+1}{K^2}$	$\frac{K-1}{K}$	$\frac{K+1}{K}$	$\frac{K^2-K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+K+1}{K^2}$	$\frac{K^2+1}{K^2}$	$\frac{K^2+1}{K^2}$	X	$V_{H_1 H_3}^2$

OBS:- Como Trabalhar com a Tabela: Deve-se tomar sempre os quadradinhos de mesmo número. P.e.:

para D.A. 0°, temos que: $V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3} = \frac{K-1}{K} \times V_{H_1 H_3}$, ou seja [1], [1], [1]. Outro exemplo:

para D.A. 240°, temos $V_{H_2 X_3}^2 = \frac{K^2-K+1}{K^2} \times V_{H_1 H_3}^2$, ou seja [2], [2], [2]. E assim por diante.

TAB. IV.3

RELAÇÕES DE TENSÕES EM FUNÇÃO DE K=10 (2,2KV/220V)												
TENSÕES A MEDIR	D.A. 0°	D.A. 180°	D.A. 30°	D.A. 210°	D.A. 60°	D.A. 240°	D.A. 120°	D.A. 300°	D.A. 150°	D.A. 330°	OPERAÇÃO ARITMÉTICA	VALOR BÁSICO
$V_{H_2 X_2}$	0,9	1,1	$\approx 0,8368$	$\approx 1,1832$	0,91	1,11	1,11	0,91	$\approx 1,1832$	$\approx 0,8368$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_3}$												$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_2 X_2}$	0,91	1,11	1,01	1,01	1,11	0,91	1,1	0,9	$\approx 1,1832$	$\approx 0,8368$	X	$V^2_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_3 X_3}$												$V^2_{H_1 H_3}$
$V_{H_2 X_3}$	0,91	1,11	1,01	1,01	1,11	0,91	1,1	0,9	$\approx 1,1832$	$\approx 0,8368$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_2 X_3}$												$V^2_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_2}$	0,91	1,11	$\approx 0,8368$	$\approx 1,1832$	0,9	1,1	0,91	1,11	1,01	1,01	X	$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_3 X_2}$												$V^2_{H_1 H_3}$

TÁB. IV.4

RELAÇÕES DE TENSÕES EM FUNÇÃO DE $K = 15,45 (3,4KV/220V)$											OPERAÇÃO ARITMÉTICA	VALOR BÁSICO
TENSÕES A MEDIR	D.A. 0°	D.A. 180°	D.A. 30°	D.A. 210°	D.A. 60°	D.A. 240°	D.A. 120°	D.A. 300°	D.A. 150°	D.A. 330°		
$V_{H_2 X_2}$	$\approx 0,9353$	$\approx 1,0647$	$\approx 0,8921$	$\approx 1,1163$	$\approx 0,9395$	$\approx 1,0689$	$\approx 1,0689$	$\approx 0,9395$	$\approx 1,1163$	$\approx 0,8921$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_3}$												$V^2_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_2 X_2}$	$\approx 0,9395$	$\approx 1,0609$	$\approx 1,0042$	$\approx 1,0042$	$\approx 1,0689$	$\approx 0,9395$	$\approx 1,0647$	$\approx 0,9353$	$\approx 1,1163$	$\approx 0,8921$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_3 X_3}$												$V^2_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_2}$	$\approx 0,9395$	$\approx 1,0689$	$\approx 0,8921$	$\approx 1,1163$	$\approx 0,9353$	$\approx 1,0647$	$\approx 0,9395$	$\approx 1,0689$	$\approx 1,0042$	$\approx 1,0042$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_3 X_2}$												$V^2_{H_1 H_3}$

TAB. IV.5

RELAÇÕES DE TENSÕES EM FUNÇÃO DE $K=30(6,6KV/220V)$												
TENSÕES A MEDIR	D.A. 0°	D.A. 180°	D.A. 30°	D.A. 210°	D.A. 60°	D.A. 240°	D.A. 120°	D.A. 300°	D.A. 150°	D.A. 330°	OPERAÇÃO ARITMÉTICA	VALOR BÁSICO
$V_{H_2 X_2}$	$\approx 0,9667$		$\approx 0,9434$	$\approx 1,0588$	$\approx 0,9678$	$\approx 1,0344$	$\approx 1,0344$	$\approx 0,9678$	$\approx 1,0588$	$\approx 0,9434$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_3}$		$\approx 1,0333$										$V_{H_1 H_3}^2$
$V_{H_2 X_2}^2$			$\approx 1,0011$									
$V_{H_3 X_3}^2$												
$V_{H_2 X_3}$	$\approx 0,9678$	$\approx 1,0344$	$\approx 1,0011$	$\approx 1,0011$	$\approx 1,0344$	$\approx 0,9678$	$\approx 1,0333$	$\approx 0,9667$	$\approx 1,0588$	$\approx 0,9434$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_2 X_3}^2$												$V_{H_1 H_3}^2$
$V_{H_3 X_2}$	$\approx 0,9678$	$\approx 1,0344$	$\approx 0,9434$	$\approx 1,0588$	$\approx 0,9667$	$\approx 1,0333$	$\approx 0,9678$	$\approx 1,0344$	$\approx 1,0011$	$\approx 1,0011$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_2}^2$												$V_{H_1 H_3}^2$

TAB. IV.6

RELAÇÕES DE TENSÕES EM FUNÇÃO DE $K=50$ (11KV/220V)											OPERAÇÃO ARITMÉTICA	VALOR BÁSICO
TENSÕES A MEDIR	D.A. 0°	D.A. 180°	D.A. 30°	D.A. 210°	D.A. 60°	D.A. 240°	D.A. 120°	D.A. 300°	D.A. 150°	D.A. 330°		
$V_{H_2 X_2}$	0,98	1,02	$\approx 0,9657$	$\approx 1,0350$	0,9804	1,0204	1,0204	0,9804	$\approx 1,0350$	$\approx 0,9657$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_3}$												$V_{H_1 H_3}^2$
$V_{H_2 X_3}$	0,9804	1,0204	1,0004	1,0004	1,0204	0,9804	1,02	0,98	$\approx 1,0350$	$\approx 0,9657$	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_2 X_3}^2$												$V_{H_1 H_3}^2$
$V_{H_3 X_2}$	0,9804	1,0204	$\approx 0,9657$	$\approx 1,0350$	0,98	1,02	0,9804	1,0204	1,0004	1,0004	X	$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_2}^2$												$V_{H_1 H_3}^2$

TAB. IV.7

RELAÇÕES DE TENSÕES EM FUNÇÃO DE K = 62,73 (13,8KV/220V)										OPERAÇÃO ARITMÉTICA		VALOR BÁSICO		
TENSÕES A MEDIR	D.A. 0°	D.A. 180°	D.A. 30°	D.A. 210°	D.A. 60°	D.A. 240°	D.A. 120°	D.A. 300°	D.A. 150°	D.A. 330°				
$V_{H_2 X_2}$														$V_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_3}$	$\approx 0,9841$	$\approx 1,0160$	$\approx 0,9726$	$\approx 1,0279$	$\approx 0,9843$	$\approx 1,0162$	$\approx 1,0162$	$\approx 0,9843$	$\approx 1,0279$	$\approx 0,9726$	X			$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_2 X_2}$														$V^2_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_3 X_3}$														
$V_{H_2 X_3}$														$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_2 X_3}$	$\approx 0,9843$	$\approx 1,0162$	$\approx 1,0002$	$\approx 1,0002$	$\approx 1,0162$	$\approx 0,4843$	$\approx 1,0160$	$\approx 0,9841$	$\approx 1,0279$	$\approx 0,9726$	X			$V^2_{H_1 H_3}$
$V_{H_3 X_2}$														$V_{H_1 H_3}$
$V^2_{H_3 X_2}$	$\approx 0,9843$	$\approx 1,0162$	$\approx 0,9726$	$\approx 1,0279$	$\approx 0,9841$	$\approx 1,0160$	$\approx 0,9843$	$\approx 1,0162$	$\approx 1,0002$	$\approx 1,0002$	X			$V^2_{H_1 H_3}$

CAPÍTULO V

DIAGRAMAS FASORIAIS PARA SF INVERSA E PARALELISMO
COM D.A.s (A PRIORI) DISTINTOS

5.1. Introdução

No capítulo III, vimos os diversos D.A.s para transformadores ligados na sequência de fases direta. Vimos inclusive como mudar, através de alterações internas o D.A. de um transformador. No Capítulo IV, como determinar com um voltímetro o D.A. Neste capítulo veremos as modificações nos D.A.s quando da inversão na sequência de fases da alimentação (portanto alterações externas)¹; Para isso entretanto algumas observações devem ser feitas:

- a) A referência dos D.F. será a mesma do Cap. III, uma vez que o sistema de alimentação manterá a sequência de fases, a inversão será efetuada nos terminais do transformador, conforme subitem b do item 3.2 do Cap. III.
- b) Reescrevemos o subitem e do item 3.2 do Cap. III, que diz: "A referência só é válida para os D.F da TS, pois o que acontece com os DF da TI é função da TS".
- 1) A conjugação dos capítulos III, IV e V nos permitirá: não só obter o D.A., bem como saber que alterações internas ou externas devem ser feitas para que transformadores de D.A.s (a priori) distintos possam ser colocados em paralelo. Vide item 5.4.

c) Tomaremos como base a SF inversa B,A,C, ou seja ($H_1 \equiv B, H_2 \equiv A, H_3 \equiv C; X_1 \equiv b, X_2 \equiv a, X_3 \equiv c$). pois poderíamos ter a SF inversa C, B,A ($H_1 \equiv C, H_2 \equiv B, H_3 \equiv A; X_1 \equiv c, X_2 \equiv b, X_3 \equiv a$). A justificativa vem a seguir:

Nos casos a serem desenvolvidos, poderíamos ter:

$$(1) \begin{cases} H_1 \equiv B, H_2 \equiv A, H_3 \equiv C \\ e \\ X_1 \equiv b, X_2 \equiv a, X_3 \equiv c \end{cases}$$

ou

$$(2) \begin{cases} H_1 \equiv C, H_2 \equiv B, H_3 \equiv A \\ X_1 \equiv c, X_2 \equiv b, X_3 \equiv a \end{cases}$$

Entretanto é de se esperar que fazendo a inversão se gundo o ítem (1) ou segundo o ítem (2) tenhamos os mesmos resultados pois, só nos é possível dois casos: sequência direta e se quência inversa.

Verifiquemos!

Tomemos como exemplo o caso da fig. 3.17, e façamos com que:

$$a) H_1 \equiv B, H_2 \equiv A, H_3 \equiv C$$

e

$$X_1 \equiv b, X_2 \equiv a, X_3 \equiv c$$

Logo:

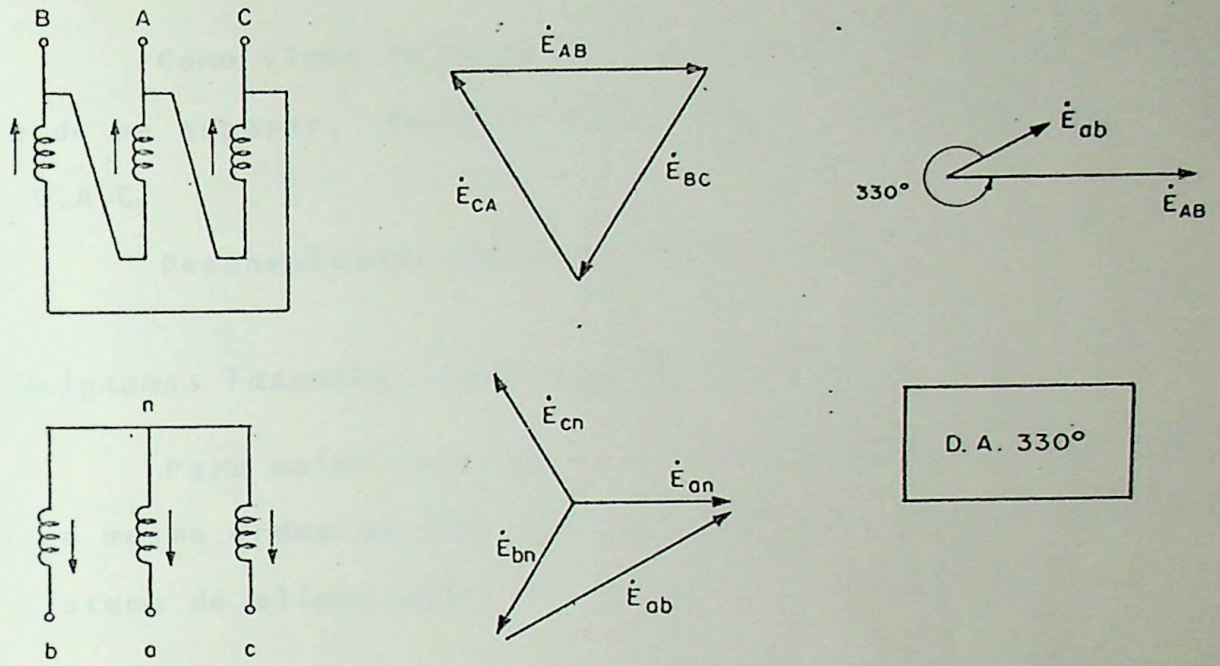


Fig. 5.1 - Transformador Δ/Y SF inversa (B,A,C)

b) $H_1 \equiv C, H_2 \equiv B, H_3 \equiv A$

e

$X_1 \equiv c, X_2 \equiv b, X_3 \equiv a$

Então:

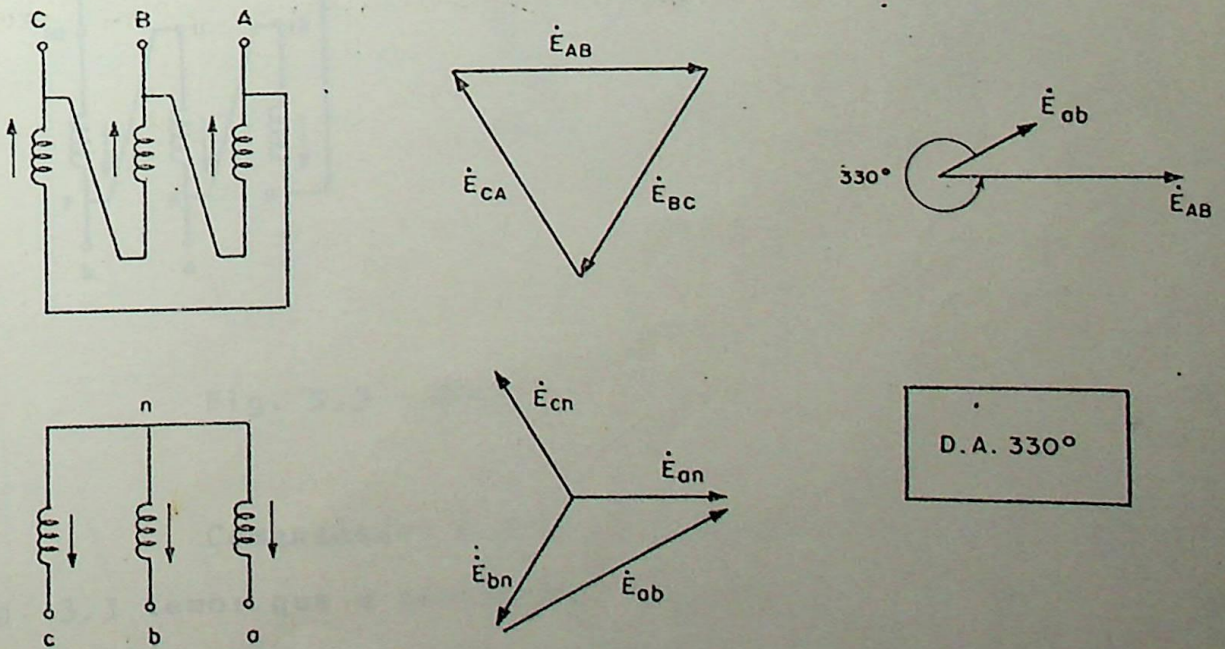


Fig. 5.2 - Transformador Δ/Y SF inversa (C,B,A)

Como vimos fazendo SF B,A,C ou C,B,A deu na mesma! Como era de se esperar. Portanto como dissemos tomaremos o caso de SF B,A,C.

Desenvolvamos então os diversos casos:

5.2. Diagramas Fasoriais para Sequência de Fases Inversa.

Para maior facilidade de comparação, colocaremos os casos na mesma ordem do Cap. III, sendo que H_1 está ligado à fase B do sistema de alimentação, H_2 à fase A e H_3 à fase C.

5.2.1. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.1)

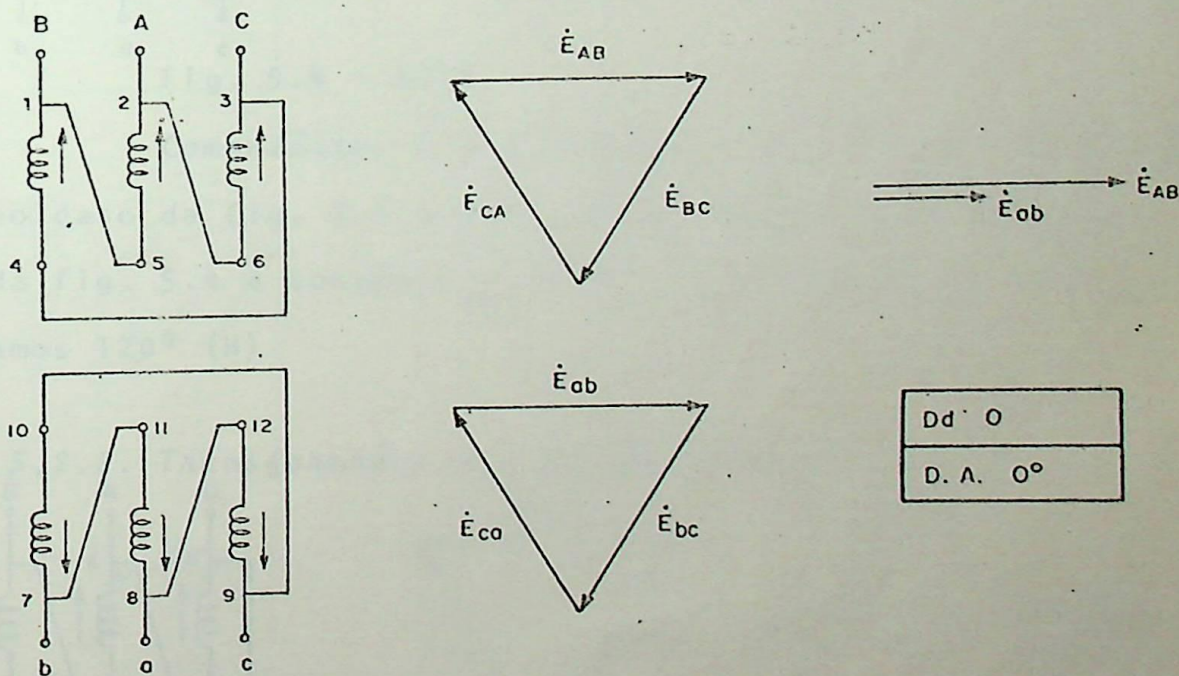


Fig. 5.3 - Dd 0

Comentário: O D.A. é o mesmo! Por que? Ora, na fig. 3.3 temos que a tensão \dot{E}_{AB} ($\dot{E}_{AB} = -\dot{E}_{BA}$) induziu a tensão \dot{E}_{ab} ($\dot{E}_{ab} = -\dot{E}_{ba}$). Já no caso da fig. 5.3 a tensão \dot{E}_{AB} induziu a tensão \dot{E}_{ab} , portanto o D.A. continuou o mesmo.

Nota Importante:- Se fixarmos uma das Tensões de AT, como foi feito no caso anterior com \dot{E}_{AB} , poderemos, então aplicar a referência a antes adotada para as tensões de BT.

5.2.2. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.2)

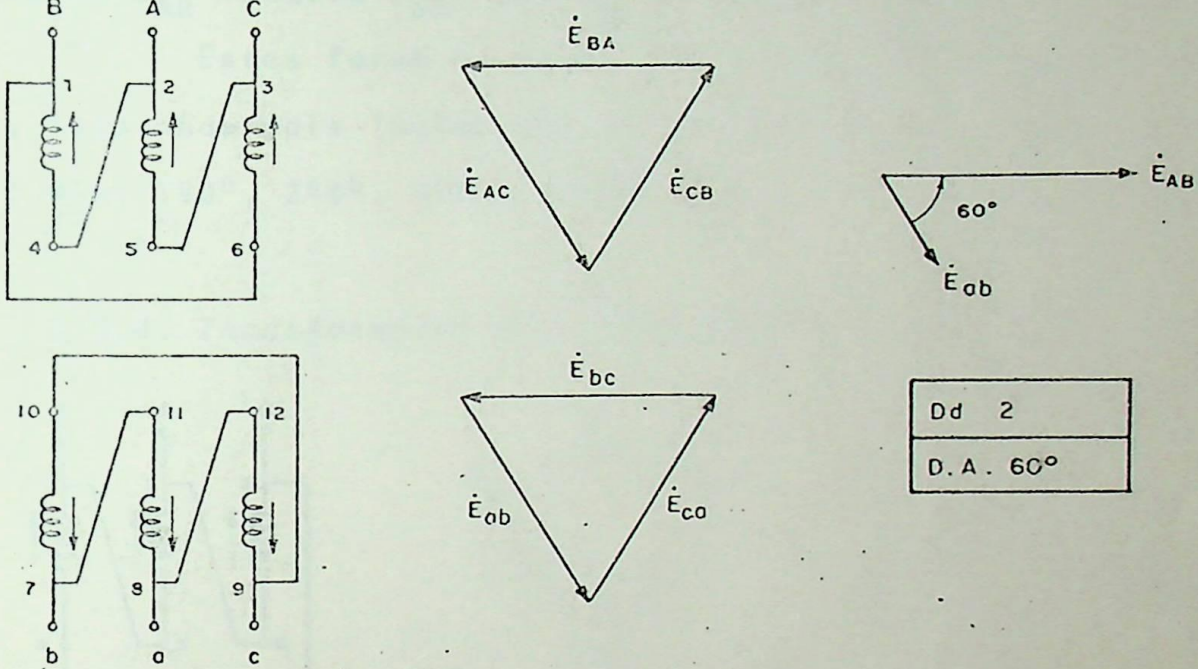


Fig. 5.4 - Dd 2

Comentário: O D.A. caminhou de 120° (H)! Por que?

Bem, no caso da fig. 3.4 a tensão \dot{E}_{AB} induziu a tensão \dot{E}_{ac} e no caso da fig. 5.4 a tensão \dot{E}_{AB} induziu a tensão \dot{E}_{cb} . De \dot{E}_{ac} para \dot{E}_{cb} temos 120° (H)

5.2.3. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.3)

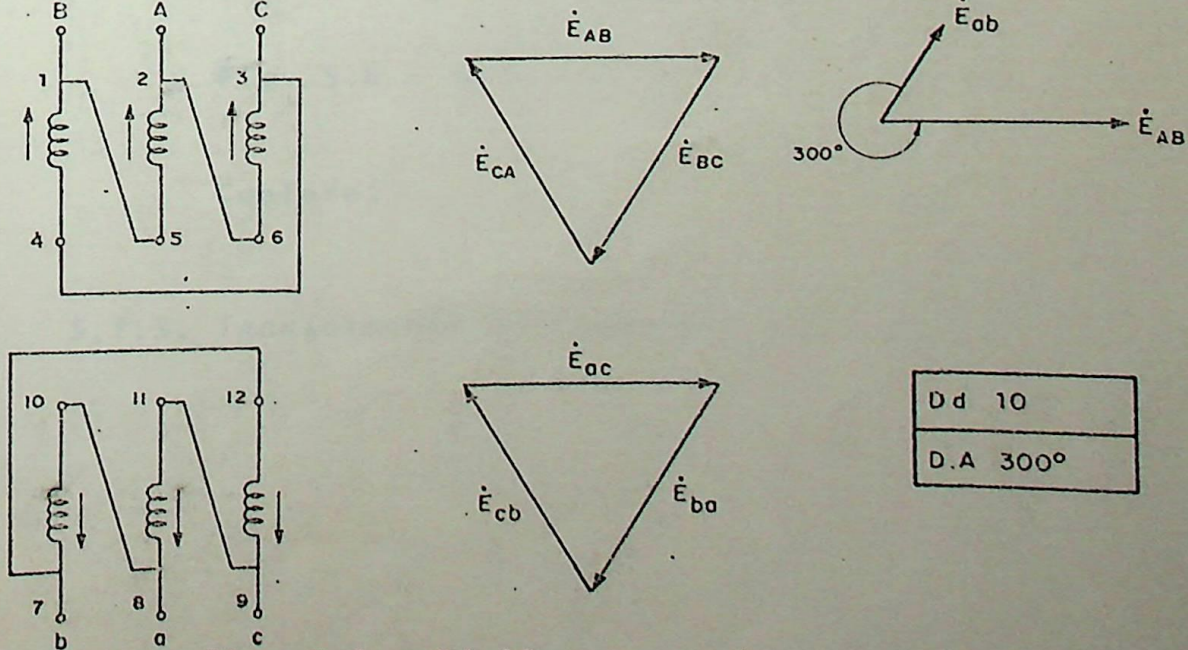


Fig. 5.5 - Dd 10

Comentário: O D.A. caminhou de 120^0 (AH)! Por que? No caso da fig. 3.5 a tensão \dot{E}_{AB} induziu \dot{E}_{cb} e no caso da fig. 5.5., a tensão \dot{E}_{AB} induziu \dot{E}_{ac} . De \dot{E}_{cb} para \dot{E}_{ac} temos 120^0 (AH).

Estes foram os casos dos transformadores Δ/Δ subtrativos, logo nada mais lógico que os Δ/Δ aditivos, a seguir, tenham os D.A.s: 180^0 , 240^0 , 120^0 . Confirmamos!

5.2.4. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.4)

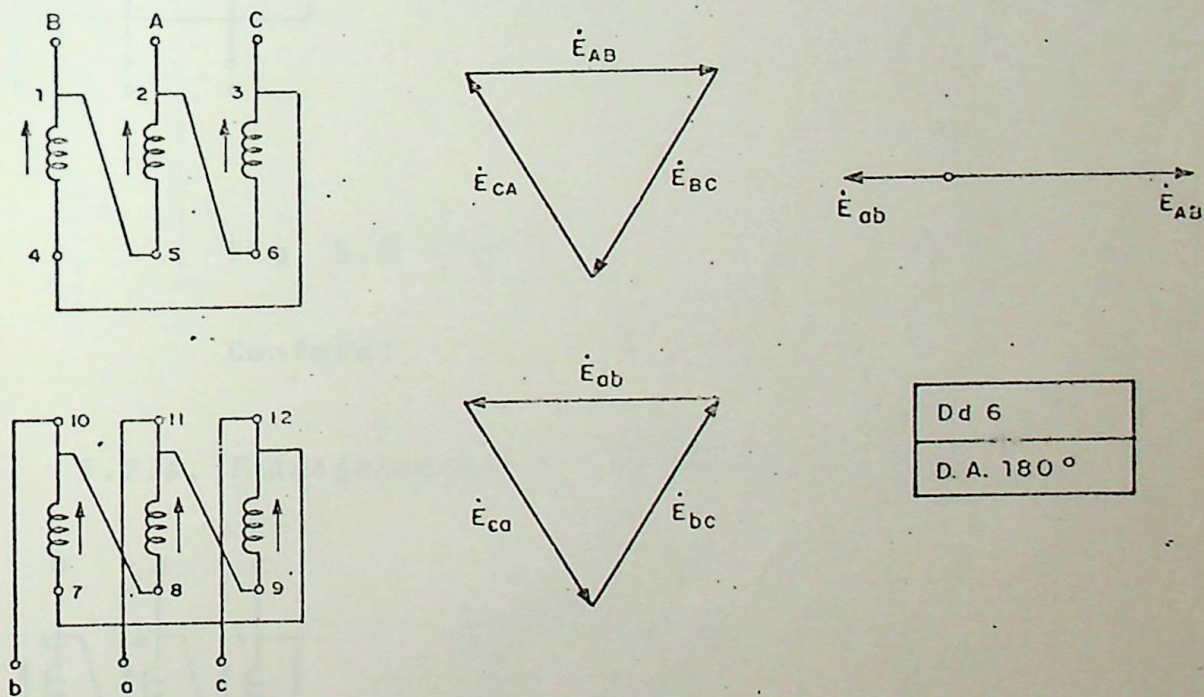
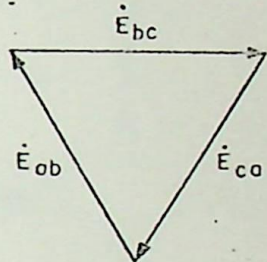
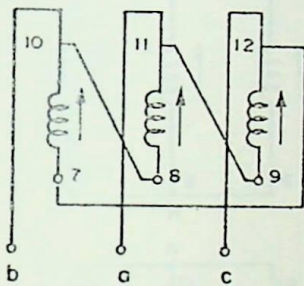
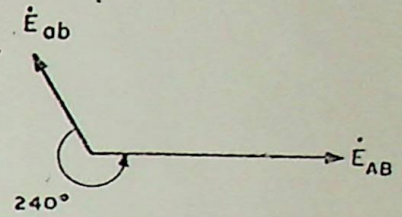
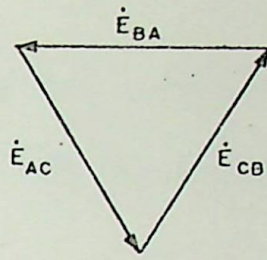
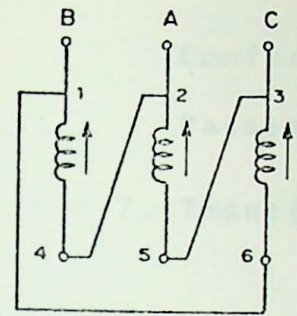


Fig. 5.6 - Dd 6

Confere!

5.2.5. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.5)

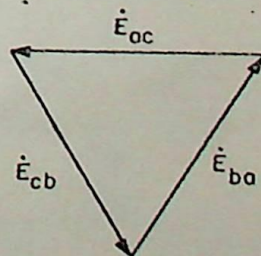
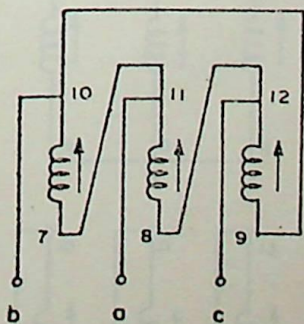
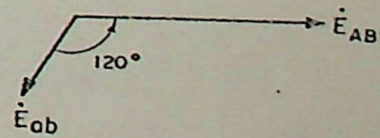
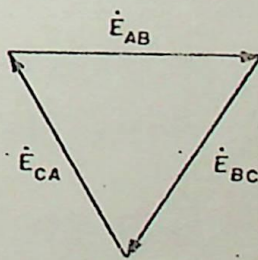
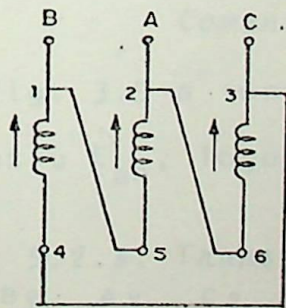


D d 8
D. A. 240°

Fig. 5.7 - Dd 8

Confere!

5.2.6. Transformador Δ/Δ (Equivalente 3.3.6)



Dd 4
D. A. 120°

Fig. 5.8 - Dd 4

Confere !

Passemos então aos transformadores Y/Y

5.2.7. Transformador Y/Y (Equivalente 3.3.7)

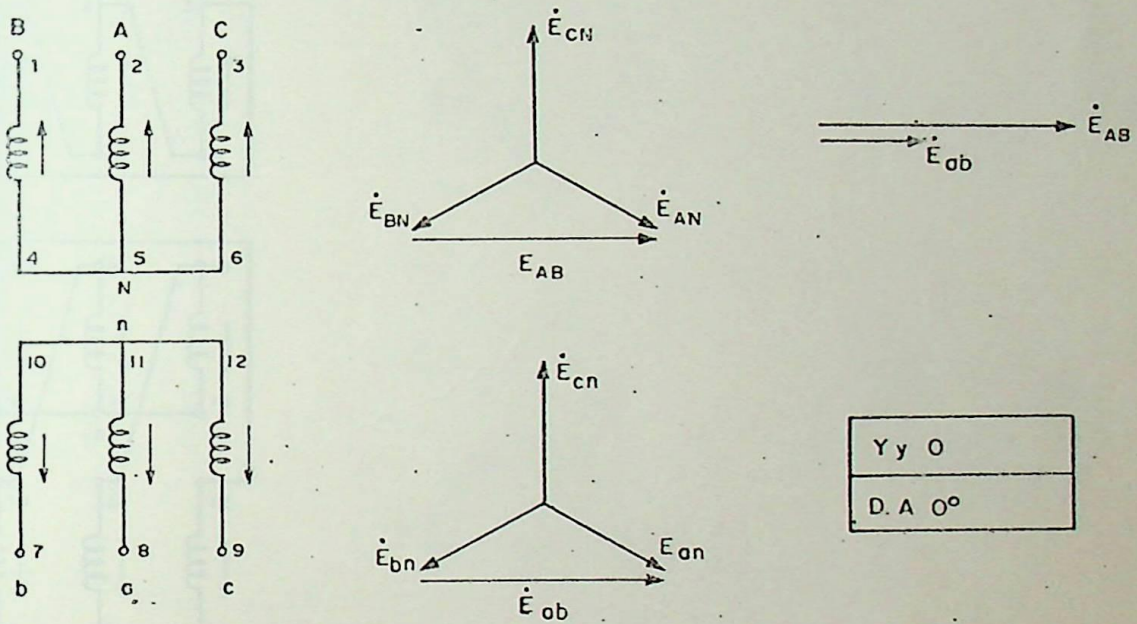


Fig. 5.9 - Yy 0

Comentário: D.A. continuou o mesmo! Por que? Ora

na fig. 3.9 a tensão \dot{E}_{AN} induziu \dot{E}_{an} e na fig. 5.9 a tensão \dot{E}_{AN} induziu \dot{E}_{an} , logo a D.A. não mudou.

5.2.8. Transformador Y/Y (Equivalente 3.3.8)

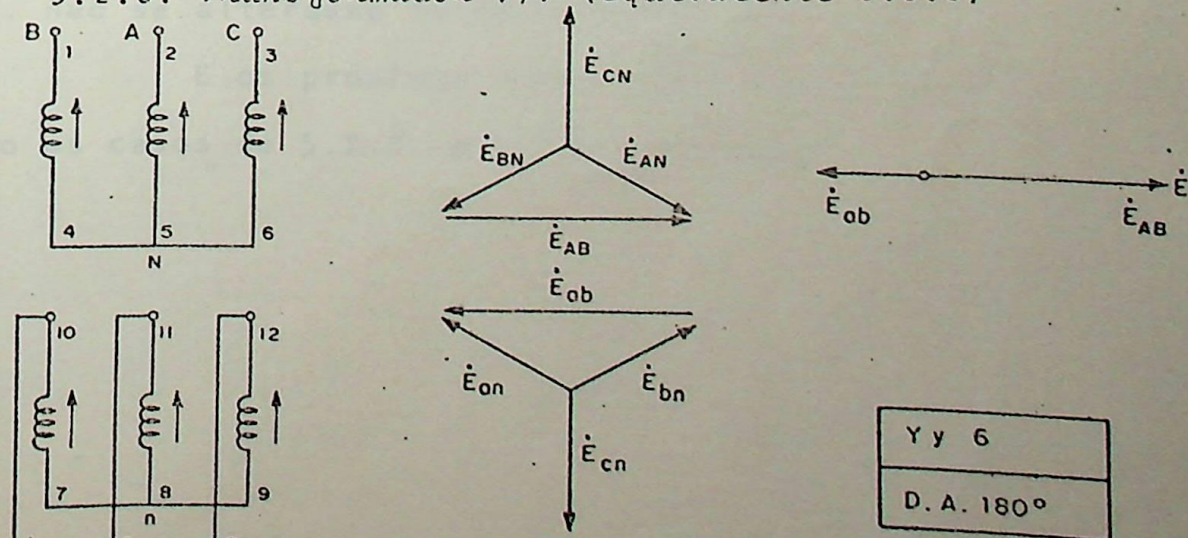


Fig. 5.10 - Yy 6

Comentário: Análogo ao anterior

Continuemos, agora com os transformadores Δ/Z .

5.2.9. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.9)

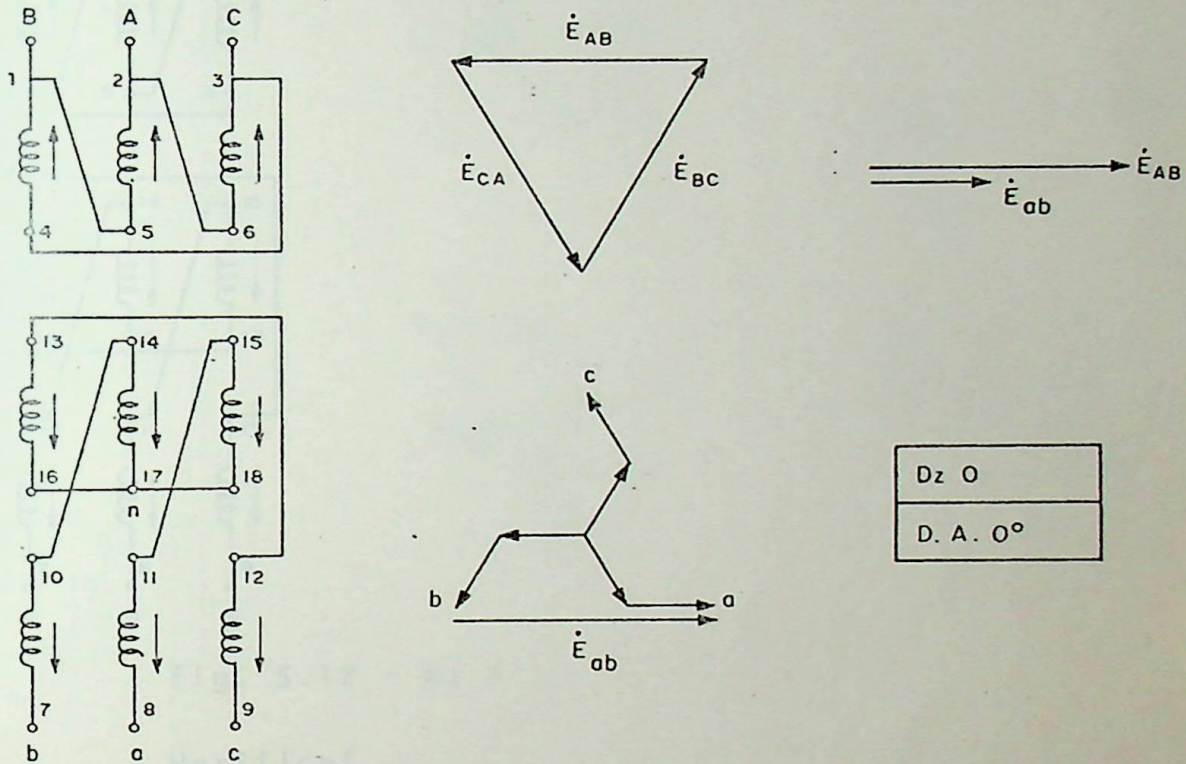


Fig. 5.11 - $D_z = 0$

Comentário: O D.A. não se alterou! Por que? No

Cap. III comentamos que as mudanças no Δ provocavam a mesma alteração que as mudanças no Z , logo era de se esperar que o D.A. não se alterasse (vide caso 5.2.1).

E os próximos cinco casos, devem então se comportar como os casos de 5.2.2. a 5.2.6. Vejamos:

5.2.10. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.10)

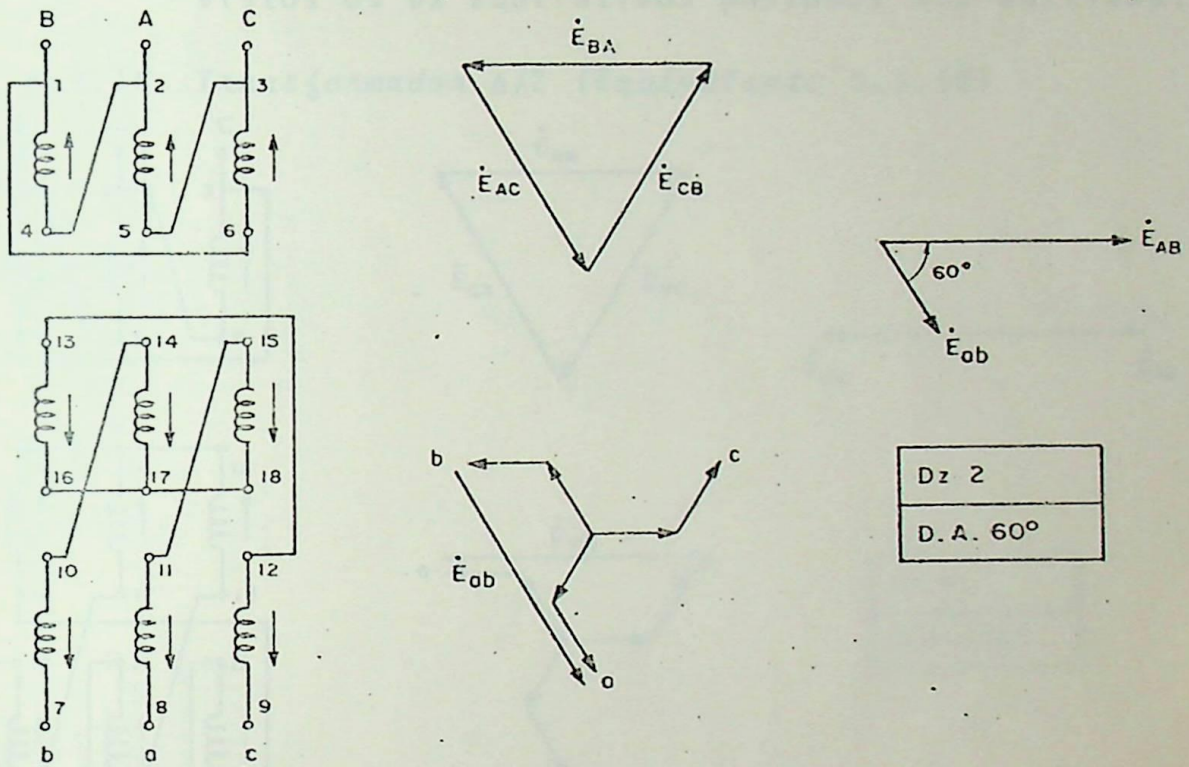


Fig. 5.12 - Dz 2

Verifica!

5.2.11. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.11)

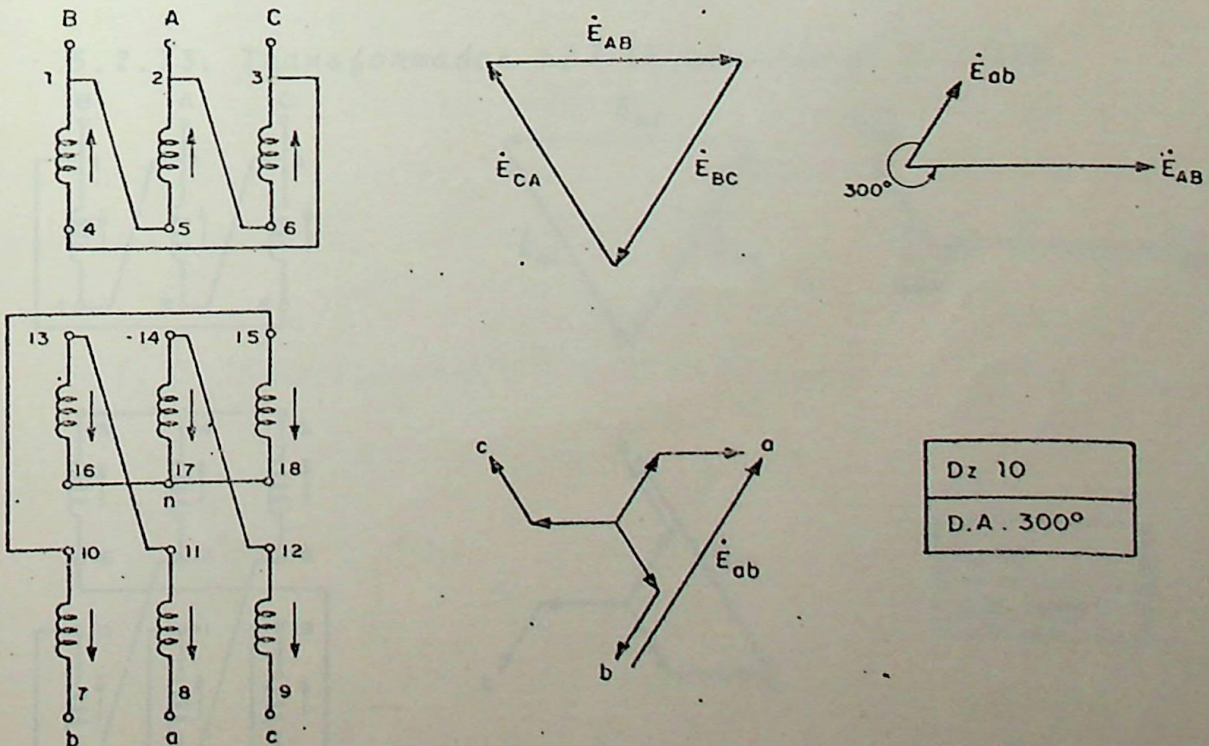


Fig. 5.13 - Dz 10

Verifica!

Vistos os Dz subtrativos passemos aos aditivos.

5.2.12. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.12)

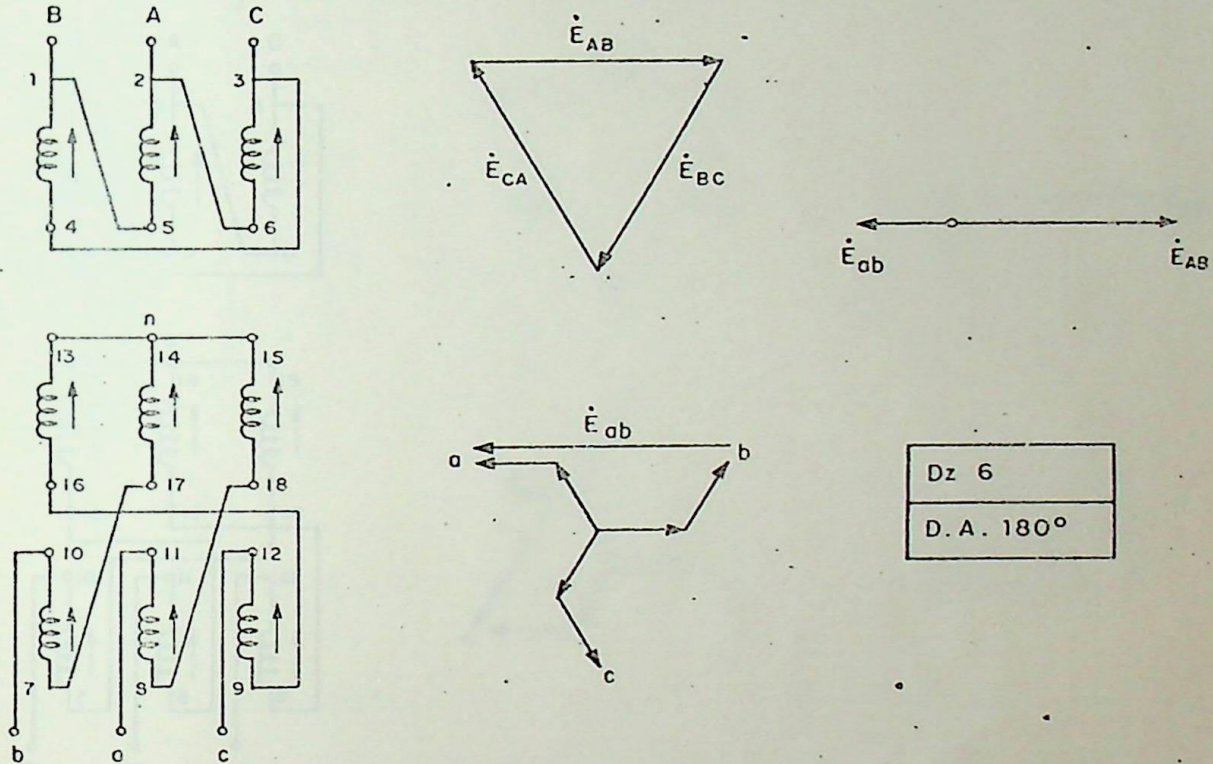


Fig. 5.14 - Dz 6

Verifica!

5.2.13. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.13)

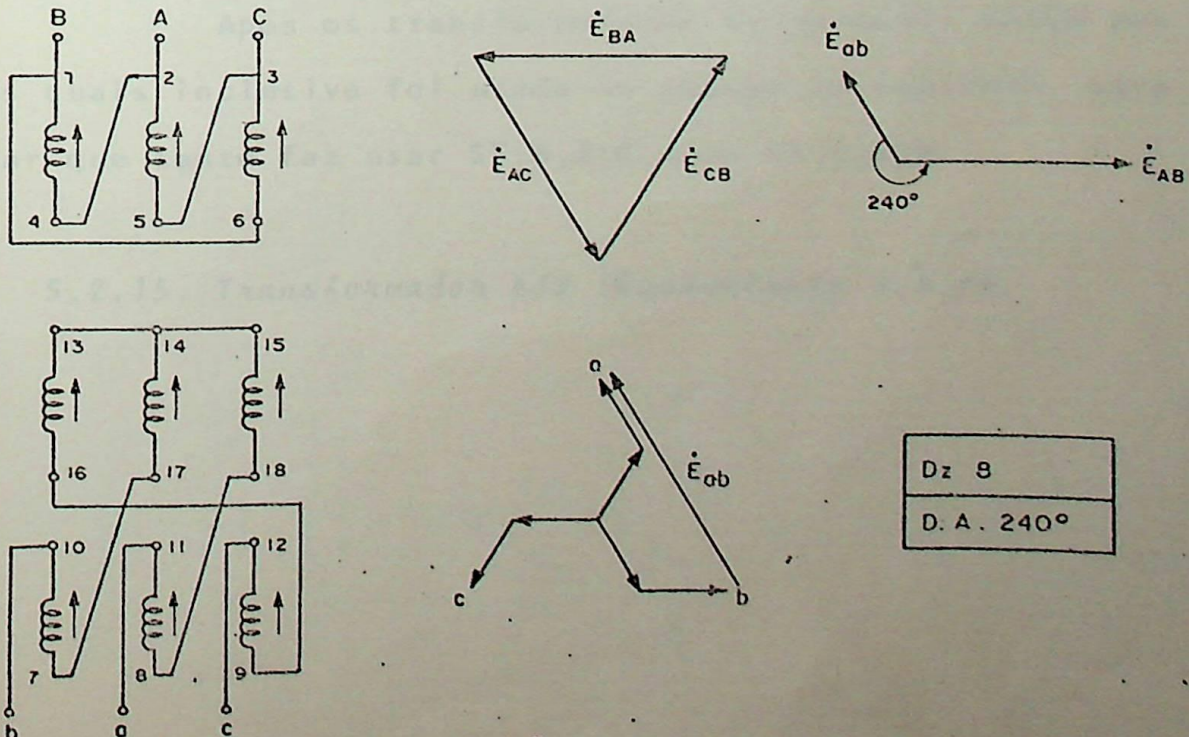


Fig. 5.15 - Dz 8

Verifica!

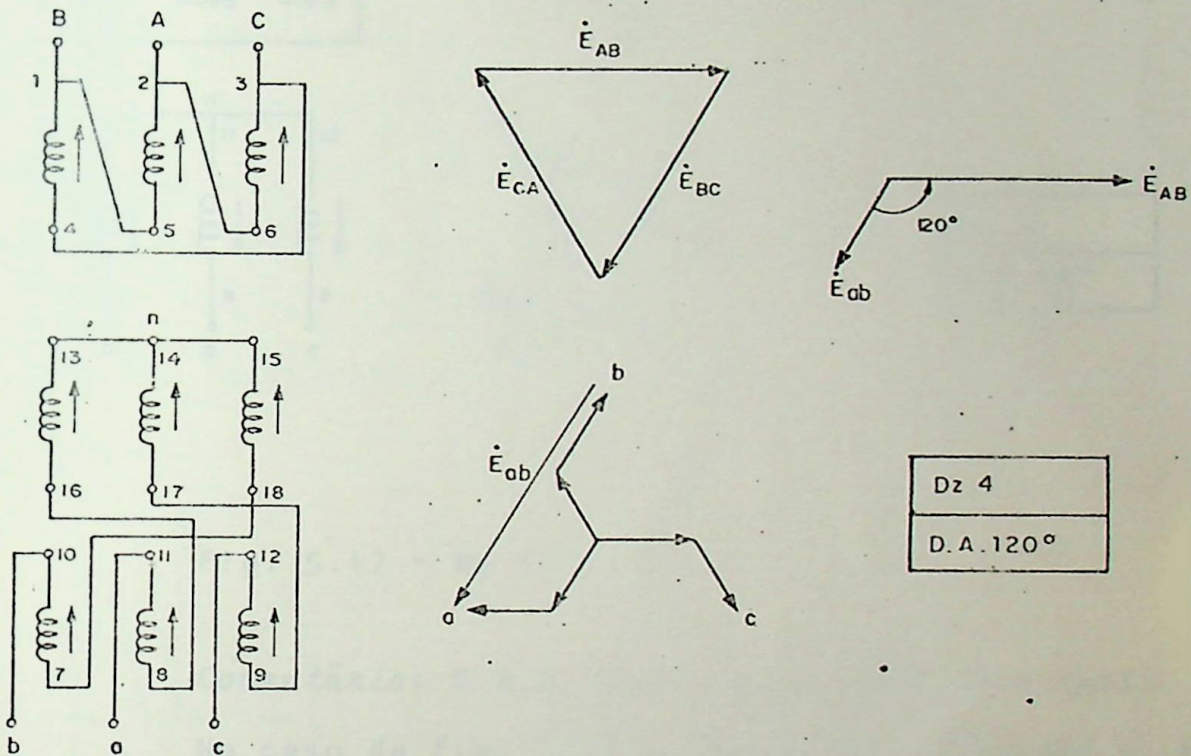
5.2.14. Transformador Δ/Z (Equivalente 3.3.14)

Fig. 5.16 - Dz 4

Verifica!

Após os transformadores Dz passemos então aos Dy, um dos quais inclusive foi usado no começo do capítulo, para mos trar que tanto faz usar SF B,A,C como SF C,B,A.

5.2.15. Transformador Δ/Y (Equivalente 3.3.15)

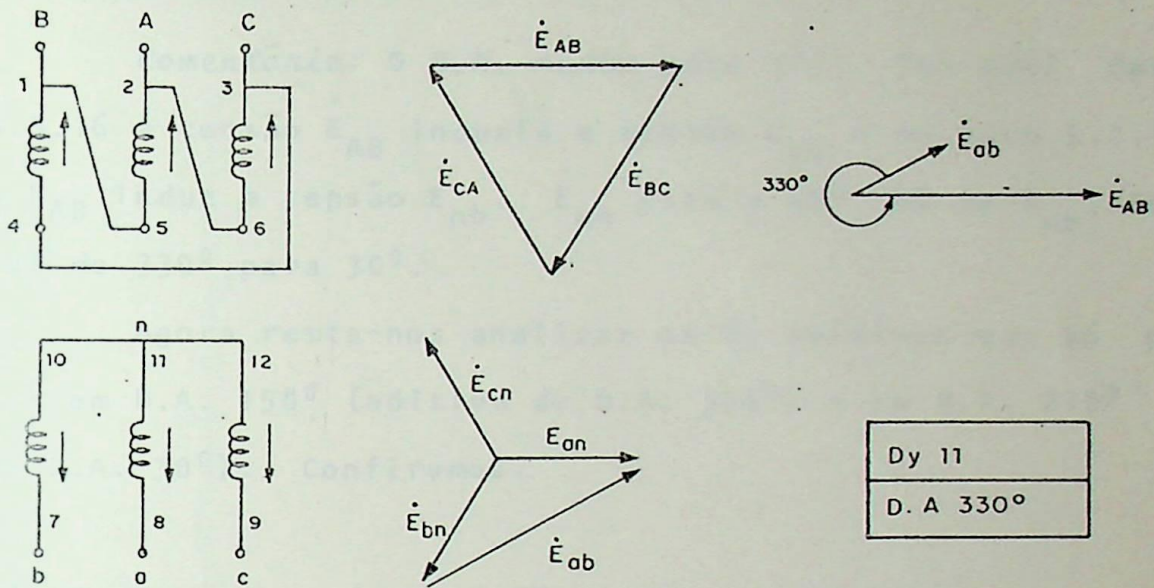


Fig. 5.17 - Dy 11

Comentário: O D.A. mudou para 330^0 ! Por que?

No caso da fig. 3.17 a tensão \dot{E}_{AB} induziu a tensão \dot{E}_{nb} e no caso da fig. 5.17 a tensão \dot{E}_{AB} induziu a tensão \dot{E}_{an} , como \dot{E}_{nb} está a 60^0 (AH) de \dot{E}_{an} o D.A. muda de 30^0 para 330^0

5.2.16. Transformador Δ/Y (Equivalente 3:3.16)

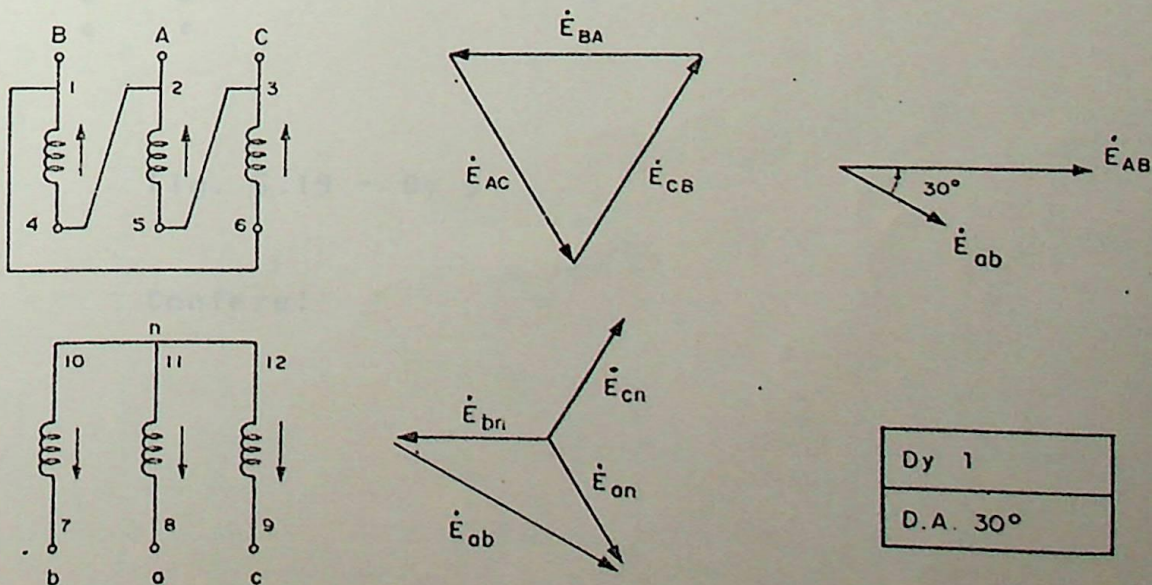


Fig. 5.18 - Dy 1

Comentário: O D.A. mudou para 30° ! Por que? Bem, no caso 3.3.16 a tensão \dot{E}_{AB} induziu a tensão \dot{E}_{an} e no caso 5.2.16 a tensão \dot{E}_{AB} induz a tensão \dot{E}_{nb} . \dot{E}_{an} está a 60° (H) de \dot{E}_{nb} , logo o D.A. vai de 330° para 30° .

Agora resta-nos analisar os Dy aditivos que só podem resultar em D.A. 150° (aditivo de D.A. 330°) e em D.A. 210° (aditivo de D.A. 30°). Confiramos.

5.2.17. Transformador Δ/Y (Equivalente 3.3.17)

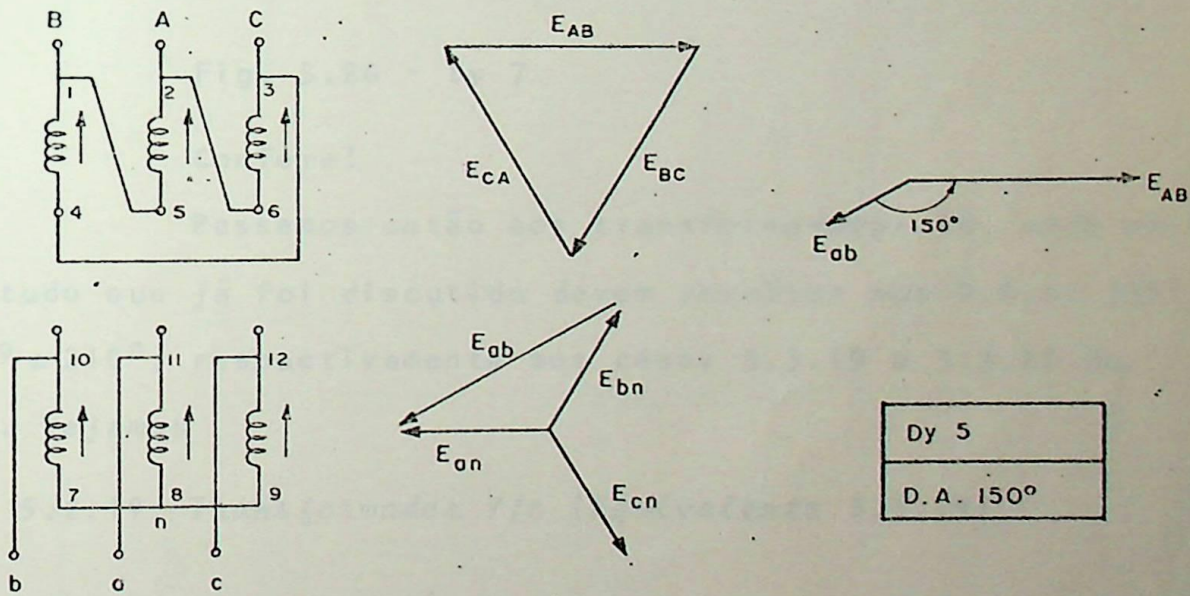


Fig. 5.19 - Dy 5

Confere!

5.2.18. Transformador Δ/Y (Equivalente 3.3.18)

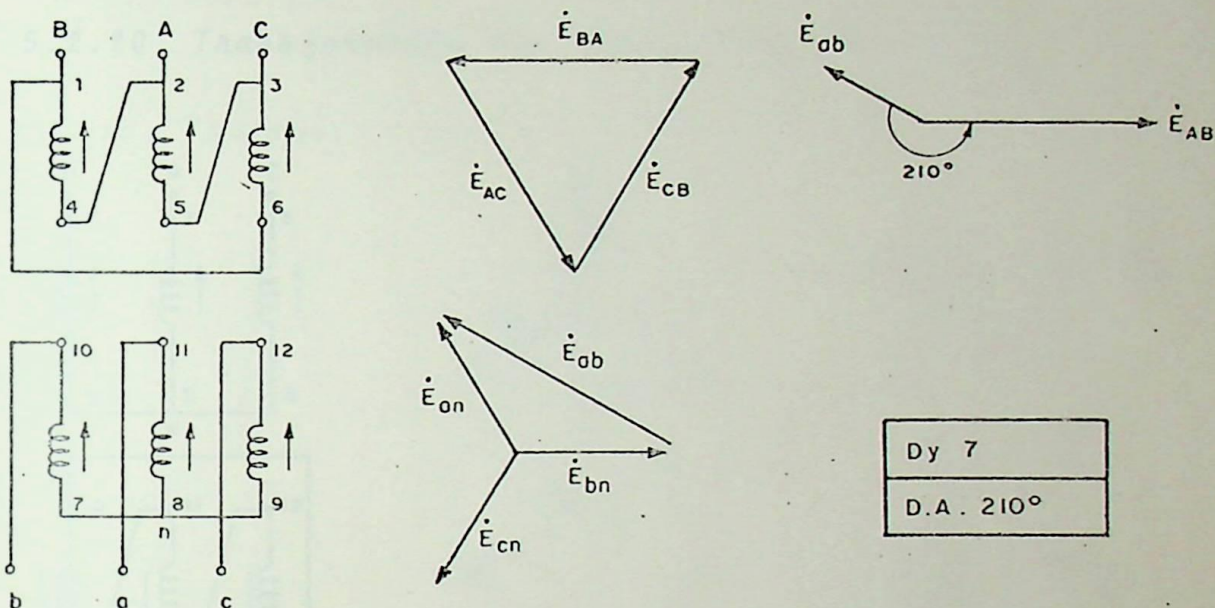


Fig. 5.20 - Dy 7

Confere!

Passemos então aos transformadores Yd, onde em função de tudo que já foi discutido devem resultar nos D.A.s: 330^0 , 30^0 , 150^0 e 210^0 , respectivamente aos casos 3.3.19 a 3.3.22 do Cap. III. Vejamos

5.2.19. Transformador Y/ Δ (Equivalente 3.3.19)

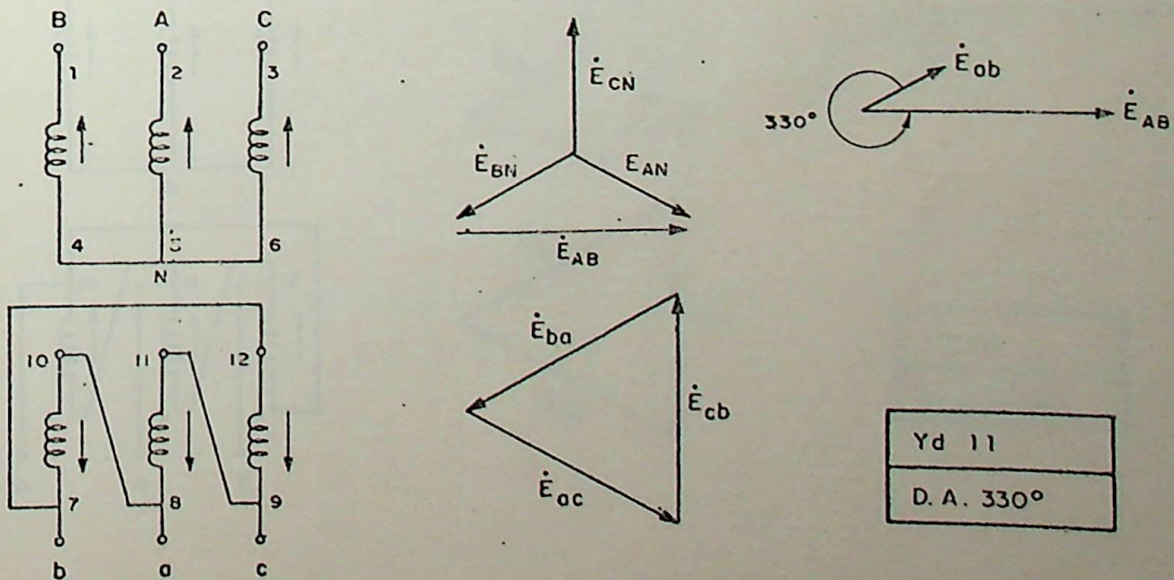


Fig. 5.21 - Yd 11

Confere!

5.2.20. Transformador Y/Δ (Equivalente 3.3.20)

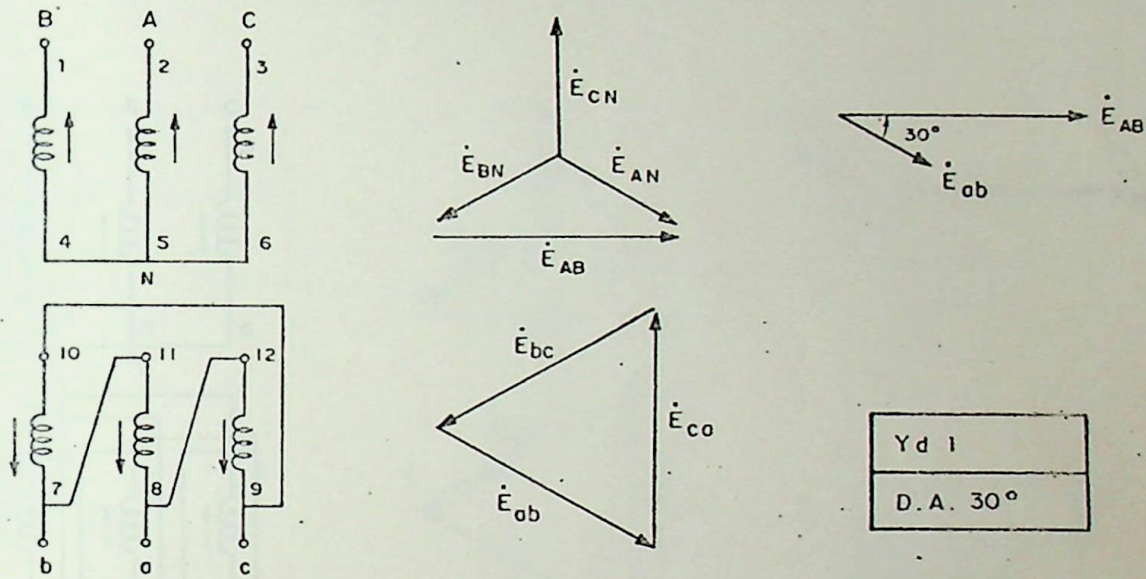


Fig. 5.22 - Yd 1

Confere!

5.2.21. Transformador Y/Δ (Equivalente 3.3.21)

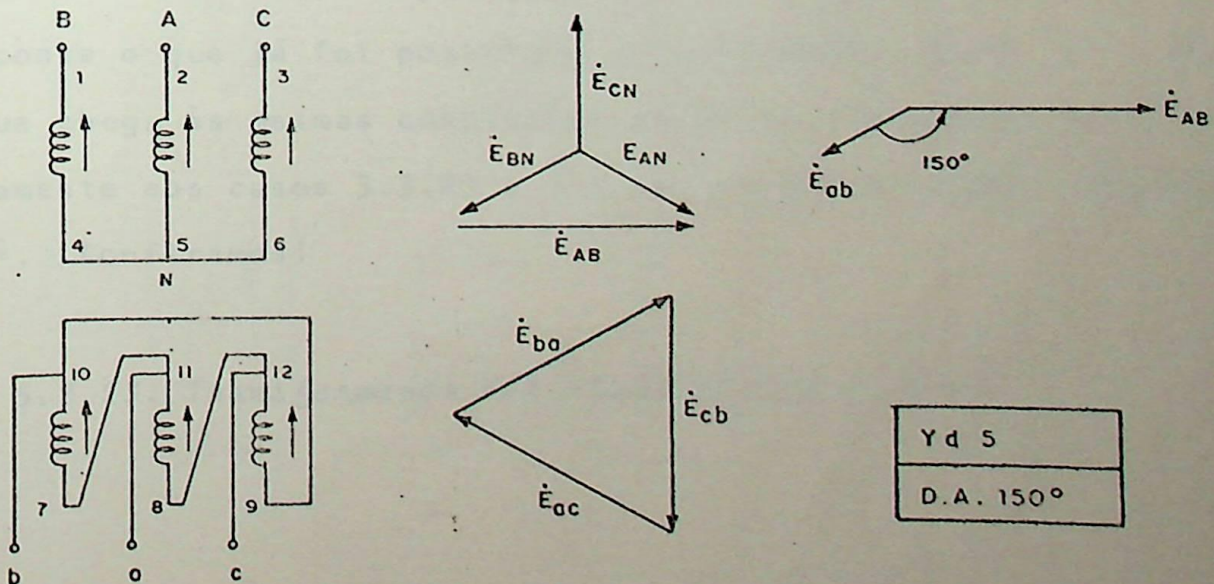


Fig. 5.23 - Yd 5

Confere!

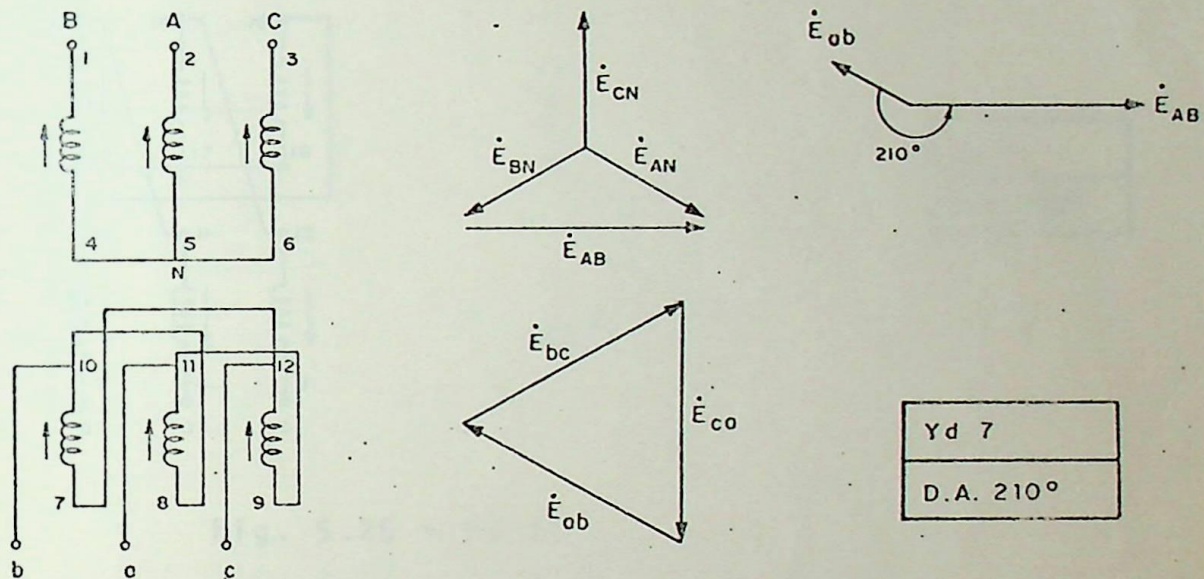
5.2.22. Transformador Y/ Δ (Equivalente 3.3.22)

Fig. 5.24 - Yd 7

Confere!

Finalmente passemos aos transformadores Yz e levando em conta o que já foi postulado anteriormente, que: 0 Zigue-Zague chega às mesmas conclusões do Delta, deveremos ter, respectivamente aos casos 3.3.23 a 3.3.26, os D.A.s: 330°, 30°, 150° e 210°. Confiramos!

5.2.23. Transformador Y/Z (Equivalente 3.3.23)

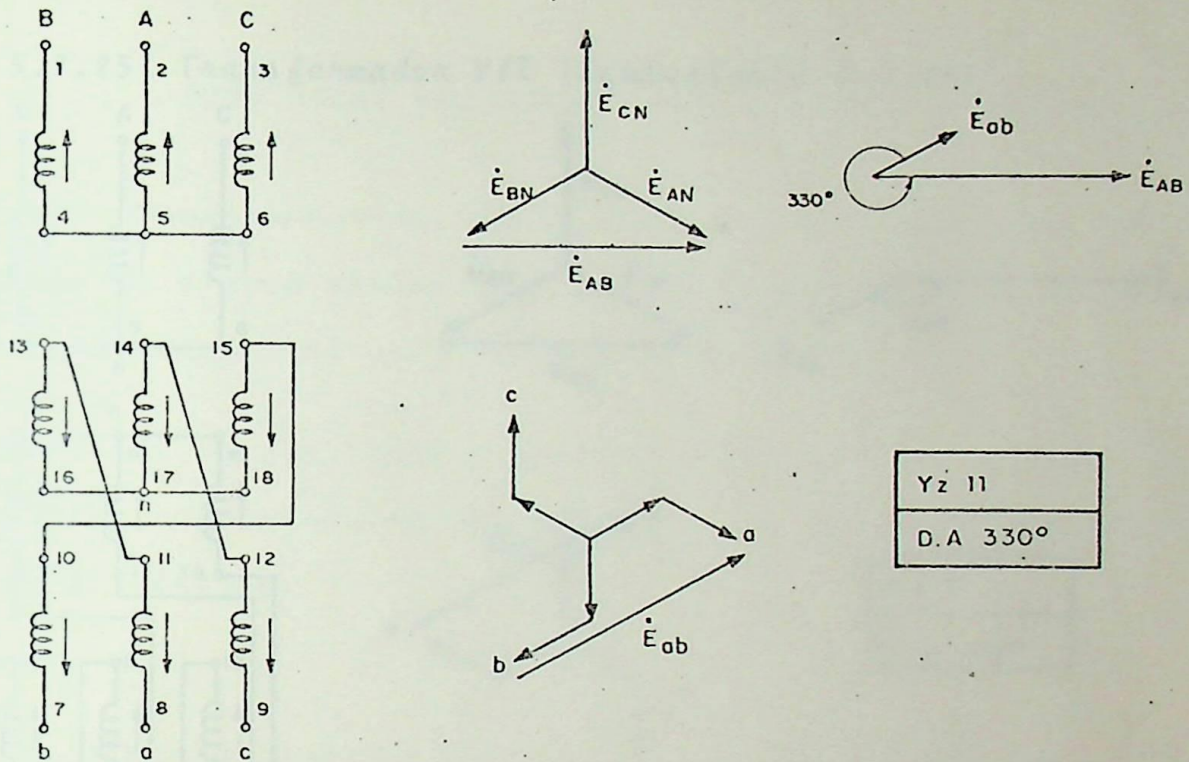


Fig. 5.25 - Yz 11.

Confere!

5.2.24. Transformador Y/Z (Equivalentente 3.3.24)

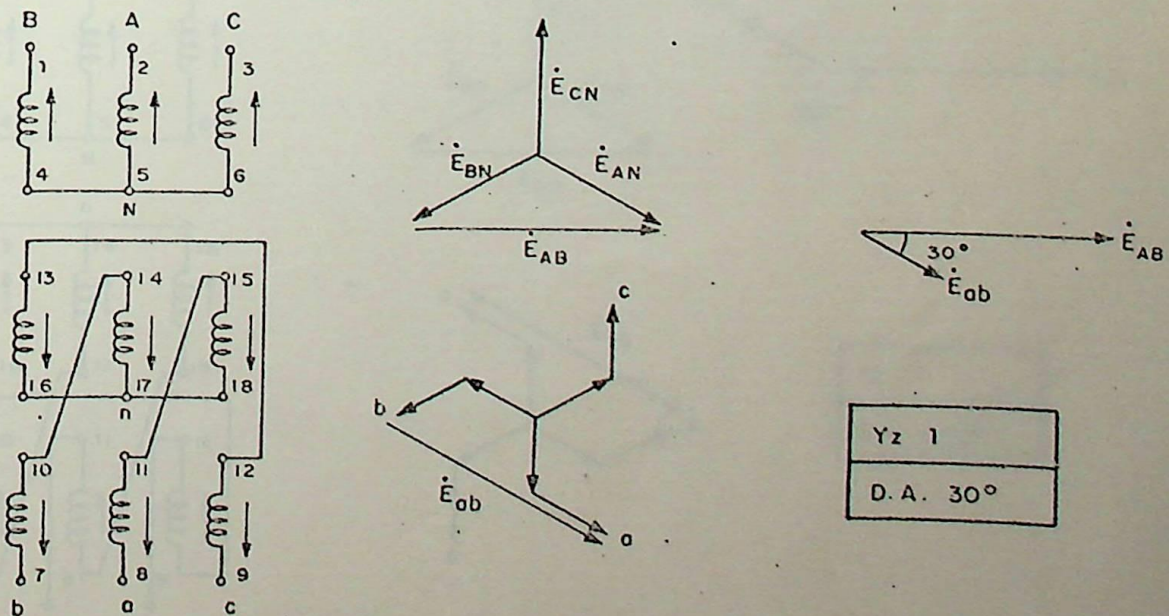


Fig. 5.26 - Yz 1

Confere!

5.2.25. Transformador Y/Z (Equivalente 3.3.25)

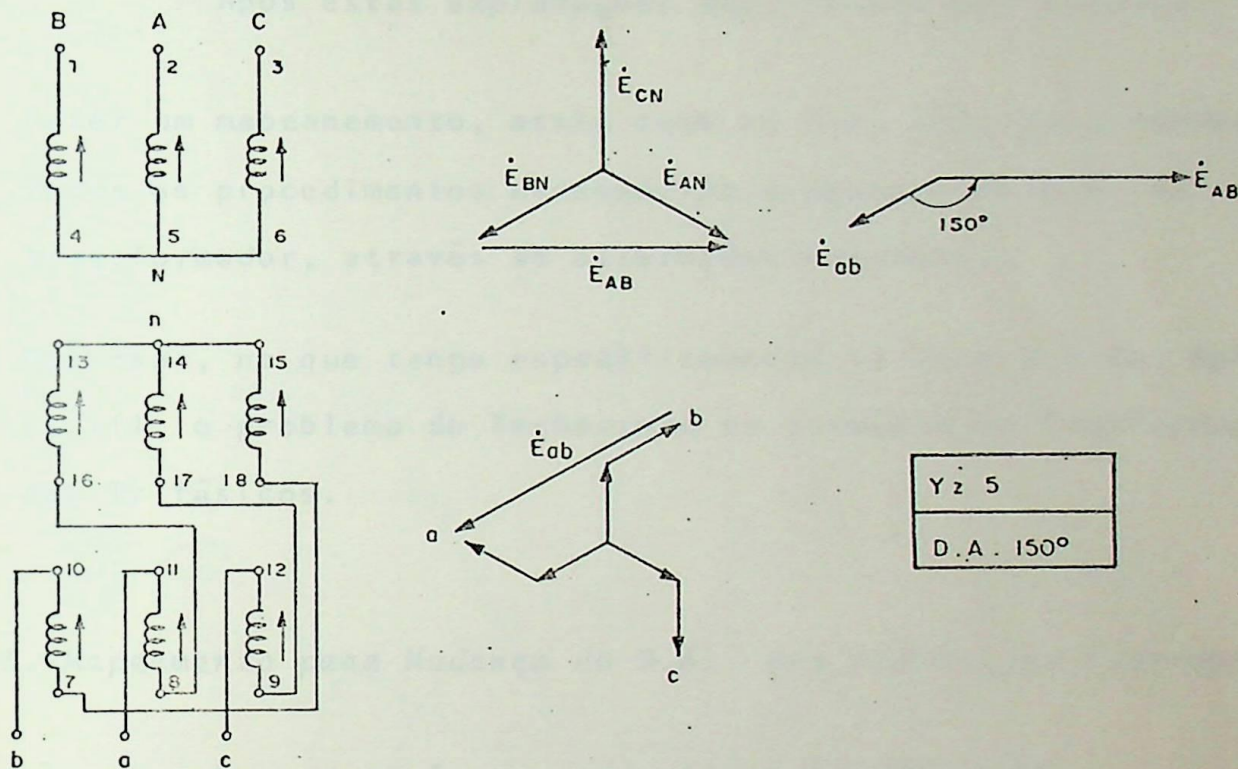


Fig. 5.7 - Yz 5

5.2.26. Transformador Y/Z (Equivalente 3.3.26)

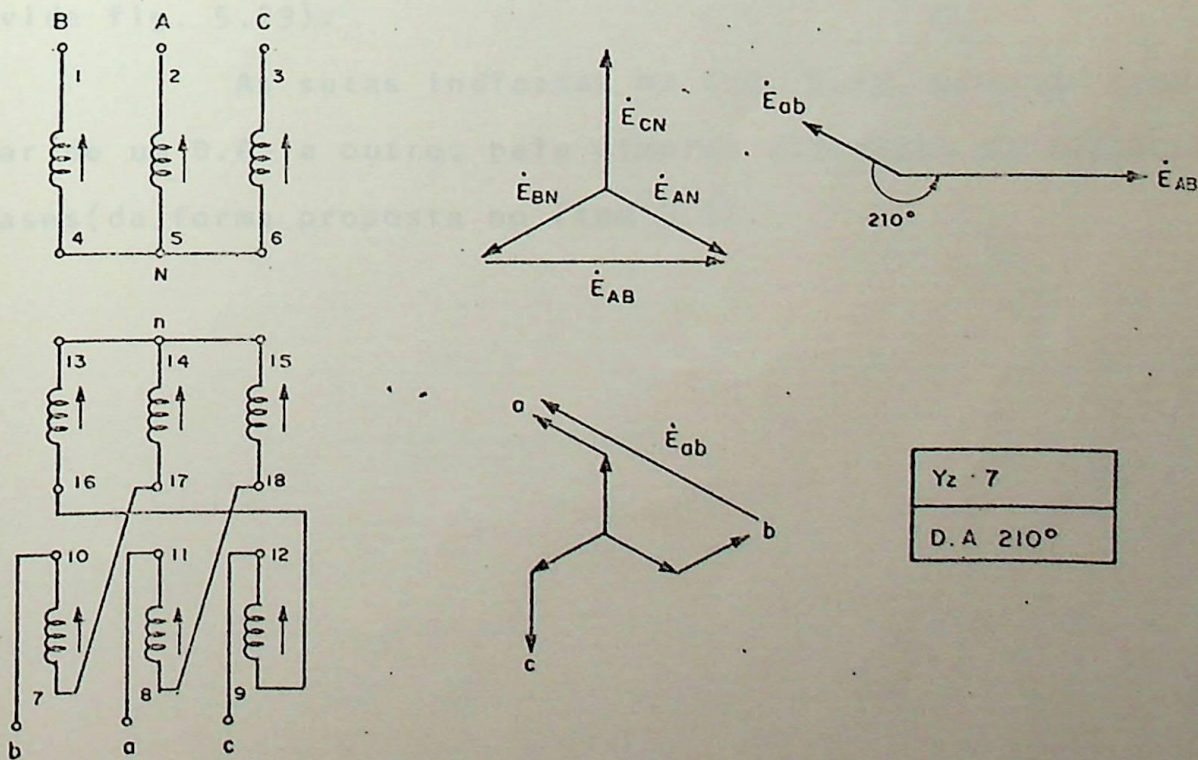


Fig. 5.28 - Yz 7

Confere!

Após estas explicações duas coisas nos ocorrem:

- a) Fazer um mapeamento, assim como no Cap. III, para condensar todos os procedimentos necessários à mudança de D.A. de um transformador, através de alterações externas.
- b) Repensar, no que tange especificamente ao ítem 3.4 do Apêndice III, o problema do fechamento em paralelo de Transformadores Trifásicos.

5.3. Mapeamento para Mudança do D.A., por Alterações Externas

Quanto ao ítem a anteriormente discutido, montamos a seguir o Mapeamento para mudança (com alterações das ligações externas) do D.A. de um transformador, sem alterar suas conexões (vide fig. 5.29).

As setas indicadas na fig. 5.29, mostram como passar de um D.A. a outro, pela simples alteração da sequência de fases (da forma proposta no ítem 5.2).

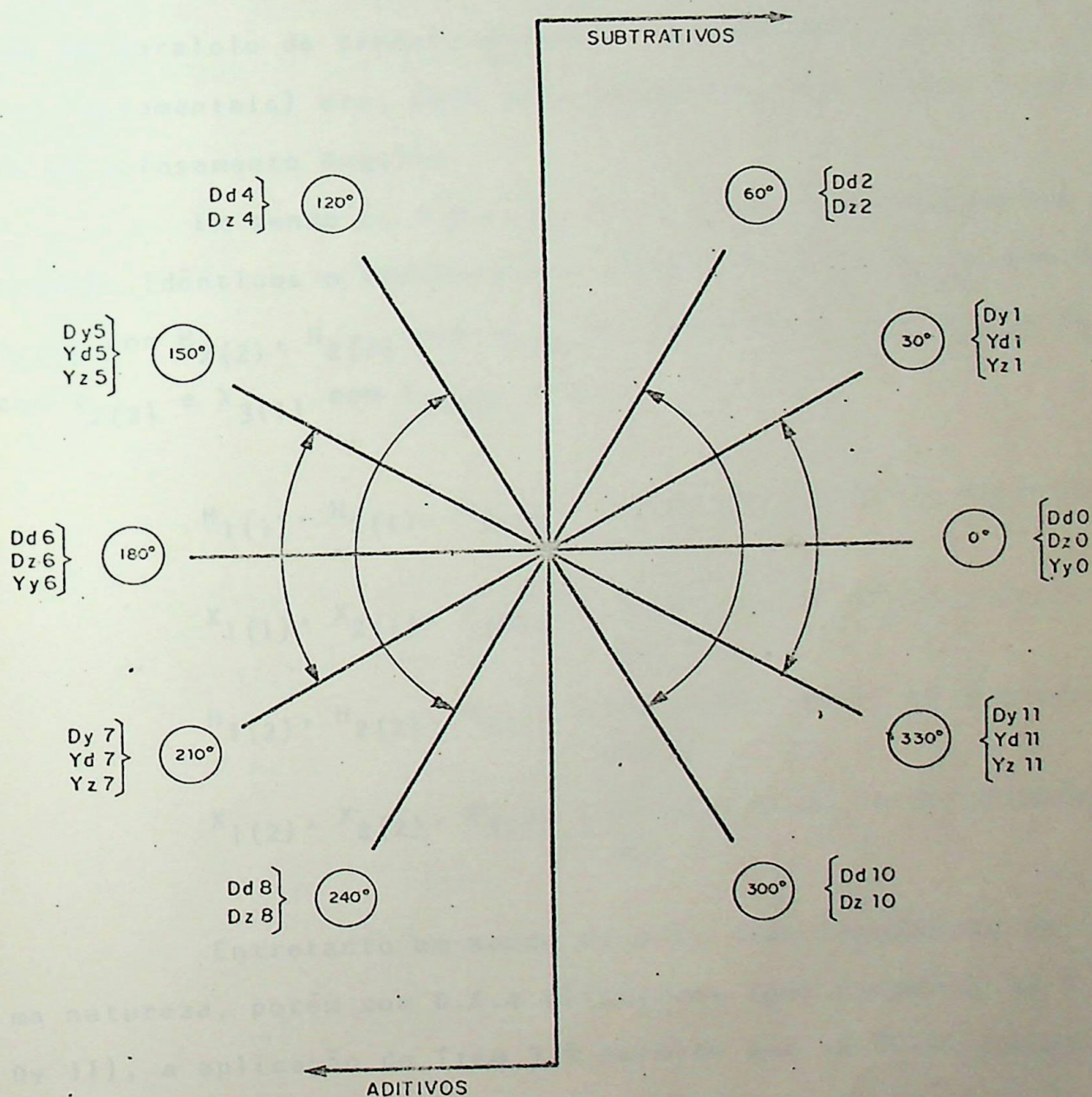


Fig. 5.29 - Mapeamento para mudança (com alterações externas) do D.A. de um transformador, sem alterar suas conexões.

5.4. Paralelismo de Transformadores com D.A. (em princípio) Distintos.

No Apêndice III listávamos as condições para a operação em paralelo de transformadores. A condição 3.3.1.b (uma das fundamentais) era, para transformadores trifásicos, relativa ao Defasamento Angular.

Em sendo os D.A.s de, p.e., dois transformadores exatamente idênticos o fechamento é direto, ou seja $H_{1(1)}$ com $H_{1(2)}$, $H_{2(1)}$ com $H_{2(2)}$, $H_{3(1)}$ com $H_{3(2)}$ e ainda $X_{1(1)}$ com $X_{1(2)}$, $X_{2(1)}$ com $X_{2(2)}$ e $X_{3(1)}$ com $X_{3(2)}$, onde:

- $H_{1(1)}, H_{2(1)}, H_{3(1)}$ - terminais de TS do transformador 1
- $X_{1(1)}, X_{2(1)}, X_{3(1)}$ - terminais de TI do transformador 1
- $H_{1(2)}, H_{2(2)}, H_{3(2)}$ - terminais de TS do transformador 2
- $X_{1(2)}, X_{2(2)}, X_{3(2)}$ - terminais de TI do transformador 2

Entretanto em sendo os dois transformadores de mesma natureza, porém com D.A.s diferentes (por exemplo: Dy 1 e Dy 11), a aplicação do item 3.4 permite que se feche ambos em paralelo, somente que não diretamente.

O exemplo abaixo esclarece:

Tínhamos em laboratório dois transformadores Δ/Y ligados conforme mostram as figs. 3.17 e 3.18. Foram verificadas todas as condições de paralelismo e todas eram compatíveis, exceto a condição de mesmo D.A., pois segundo as medições efetuadas

(de acordo com o Capítulo IV) o primeiro transformador tinha D.A. 30° e o segundo D.A. 330°

Partiu-se então para a aplicação do ítem 3.4 do Apêndice III. Após diversas medições chegou-se a conclusão que os transformadores poderiam ser colocadas em paralelo, desde que ligássemos:

$H_{1(1)}$ à fase A (ou R) da rede

$H_{2(1)}$ à fase B (ou S) da rede

$H_{3(1)}$ à fase C (ou T) da rede

e

$H_{1(2)}$ à fase B (ou S) da rede

$H_{2(2)}$ à fase A (ou R) da rede

$H_{3(2)}$ à fase C (ou T) da rede

E mais

$X_{1(1)}$ com $X_{2(2)}$

$X_{2(1)}$ com $X_{1(2)}$

$X_{3(1)}$ com $X_{3(2)}$

Ora todo esse trabalho (diversas medições com voltímetro) pode ser evitado se: Observarmos que o transformador da fig. 3.18, através da inversão da SF, se comporta como o da fig. 5.18, que tem o mesmo D.A. do transformador da fig. 3.17. Isso no caso de querermos que o D.A. final (de ambos) seja 30° . Caso contrário, basta inverter a SF do transformador da fig. 3.17, ficando então tal qual o da fig. 5.17 que tem o mesmo D.A. do da

fig. 3.18, e o D.A. final será 330^0 .

A importância disso é exatamente aquela descrita no Prefácio, ou seja permitir a colocação em paralelo de transformadores com D.A.s (em princípio) distintos, e não simplesmente dizer que: não dá!

O exemplo clássico é o de dois transformadores Δ/Y que tem as mesmas tensões, impedâncias porcentuais bem próximas, relação entre resistências e reatâncias bem próximas, mas um está funcionando normalmente e o outro está voltando de conserto e após verificação, um tem D.A. 30^0 e o outro, p.e., D.A. 330^0 . Não importa, proceda como foi descrito anteriormente e feche o paralelo!

Pela forma como foi desenvolvido este trabalho, a simplificação é ainda maior, pois os terminais a serem fechados entre si (nos nossos D.F.) apresentam a mesma identificação. Vejamos o caso do transformador da fig. 3.17 com o da fig. 5.18.

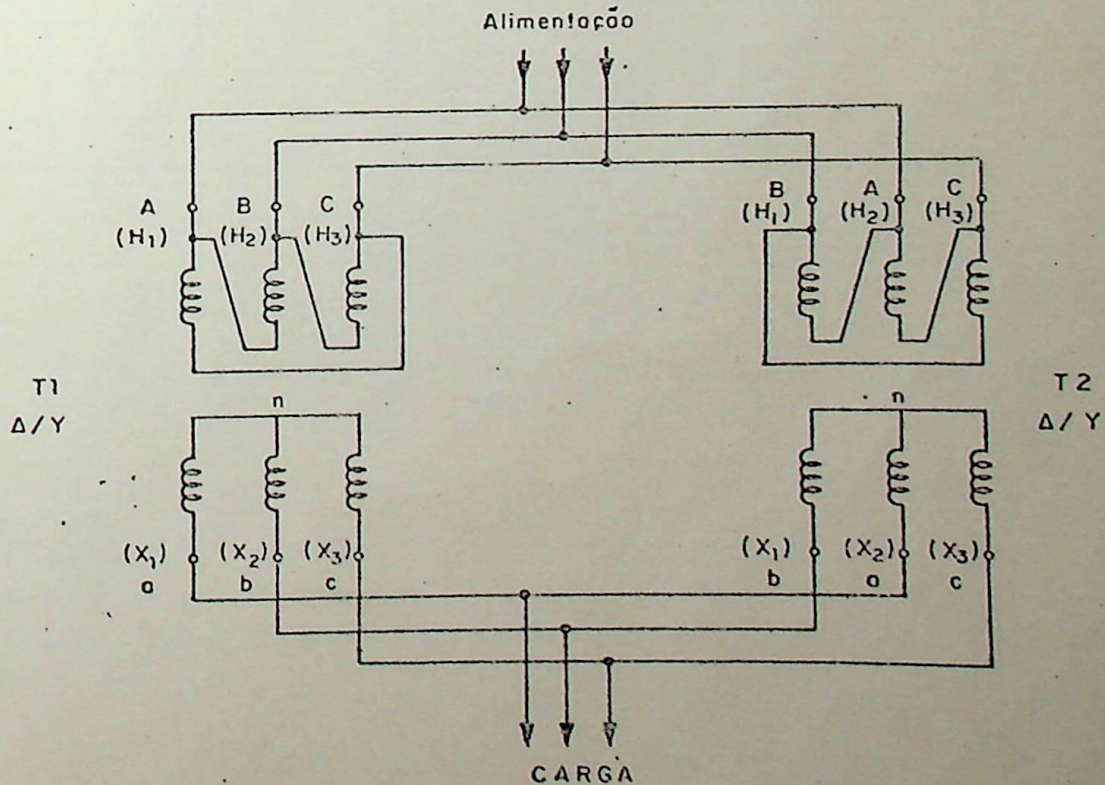


Fig. 5.30 - Transformadores em paralelo

Importante: O paralelismo foi efetuado com *simples* alterações externas.

E isso sempre é possível nos casos indicados no mapeamento da fig. 5.29.

Nos casos de modificações do D.A. não possíveis com alterações externas, resta-nos ainda o mapeamento da fig. 3.30 e a tabela III.1 para alterações internas.

Para maior facilidade do leitor, a partir da fig. 5.29 foi montada a Tabela V.1 em anexo.

TAB. V.1 - COMO ALTERAR O D.A. (MANTIDA A CONEXÃO), ATRAVÉS DE ALTERAÇÕES EXTERNAS.

D.A.d	Dd 0	Dz 0	Yz 0	Dy 1	Yd 1	Yz 1	Dd 2	Dz 2	Dd 4	Dz 4	Dy 5	Yd 5	Yz 5	Dd 6	Dz 6	Yy 6	Dy 7	Yd 7	Yz 7	Dd 8	Dz 8	Dd 10	Dz 10	Dy 11	Yd 11	Yz 11	
D.A.at	Dd 0	Dz 0	Yy 0	Dy 1	Yd 1	Yz 1	Dd 2	Dz 2	Dd 4	Dz 4	Dy 5	Yd 5	Yz 5	Dd 6	Dz 6	Yy 6	Dy 7	Yd 7	Yz 7	Dd 8	Dz 8	Dd 10	Dz 10	Dy 11	Yd 11	Yz 11	
Dd 0	-																										
Dz 0		-																									
Yy 0			-																								
Dy 1				-																					SF		
Yd 1					-																				SF		
Yz 1						-																				SF	
Dd 2							-																SF				
Dz 2								-																SF			
Dd 4									-												SF						
Dz 4										-												SF					
Dy 5											-							SF									
Yd 5												-							SF								
Yz 5													-							SF							
Dd 6														-													
Dz 6															-												
Yy 6																-											
Dy 7											SF						-										
Yd 7												SF						-									
Yz 7													SF						-								
Dd 8										SF											-						
Dz 8											SF											-					
Dd 10								SF															-				
Dz 10									SF															-			
Dy 11					SF																				-		
Yd 11						SF																			-		
Yz 11							SF																			-	
D.A.at	Dd 0	Dz 0	Yy 0	Dy 1	Yd 1	Yz 1	Dd 2	Dz 2	Dd 4	Dz 4	Dy 5	Yd 5	Yz 5	Dd 6	Dz 6	Yy 6	Dy 7	Yd 7	Yz 7	Dd 8	Dz 8	Dd 10	Dz 10	Dy 11	Yd 11	Yz 11	
D.A.d	Dd 0	Dz 0	Yy 0	Dy 1	Yd 1	Yz 1	Dd 2	Dz 2	Dd 4	Dz 4	Dy 5	Yd 5	Yz 5	Dd 6	Dz 6	Yy 6	Dy 7	Yd 7	Yz 7	Dd 8	Dz 8	Dd 10	Dz 10	Dy 11	Yd 11	Yz 11	

Legenda:

1) D.A.a - D.A. atual

D.A.d - D.A. desejado

2) SF - significa Inverter a sequência de fases.

Exemplo: Passar de Dy 1 para Dy 11 (com alteração externa): basta Inverter a sequência de fases, conforme texto do Cap. V.



CAPÍTULO VI

VERIFICAÇÕES DE LABORATÓRIO

6.1. Introdução

Nêste capítulo tomaremos dois transformadores trifásicos e os ligaremos de forma aleatória, para que possamos, en tão, fazer a verificação de tudo que foi exposto nos capítulos anteriores, e, ainda, que nos levará ao coroamento através do pró ximo capítulo.

6.2. Medições de Tensões e Verificação da Possibilidade de Paralelismo.

Os dois transformadores a serem usados são idênticos; portanto têm mesma impedância porcentual, mesma relação entre resistência e reatância e tensões de AT e BT bem próximos, lo go basta a verificação de seus D.A.s para que possamos ou não fe cha-los em paralelo.

6.2.1. Primeiro Caso

6.2.1.a. Medições de Tensões

Ligamos o primeiro transformador (T1) de acordo com a fig. 3.18, e obtivemos os seguintes resultados:

$$V_{TS} = 225 \text{ |V|}$$

$$V_{TI} = 197 \text{ |V|}$$

$$K = 1,14$$

Colocamos H_1 em curto com X_1 e obtivemos, aplicando \underline{u} ma tensão de 10 |V|, o seguinte:

Tensões Medidas:

$$V_{H_1 H_3} = 10 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_3} = V_{H_3 X_3} = 5 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_3} = 5 \text{ |V|}$$

$$V_{H_3 X_2} = 13 \text{ |V|}$$

Levamos esses resultados à Tab. IV.1 e verificamos que o D.A. de T1 era de 330° .

A título de verificação calculamos através da Tab. IV. 2 as tensões anteriormente medidas e obtivemos:

Tensões Calculadas:

$$V_{H_1 H_3} = 10 \text{ |V|} \quad (\text{tensão da fonte})$$

$$V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3} = 5,001 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_3} = 5,001 \text{ |V|}$$

$$V_{H_3 X_2} = 13,302 \text{ |V|}$$

Passemos então ao segundo transformador (T2).

Ligamos T2 conforme fig. 3.18, e obtivemos:

$$V_{TS} = 225 \text{ |V|}$$

$$V_{T1} = 193 \text{ |V|}$$

$$K = 1,17$$

Colocamos H_1 em curto com X_1 , aplicando uma tensão de 10 |V|, e obtivemos:

$$V_{H_1 H_3} = 10 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3} = 5 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_3} = 5 \text{ |V|}$$

$$V_{H_3 X_2} = 13 \text{ |V|}$$

Estes resultados na Tab. IV.1, resultaram em que o D.A. de T2 era de 330° .

6.2.1.b. Paralelismo

O paralelismo foi possível, pois; após ligarmos H_1 (T1) com H_1 (T2), H_2 (T1) com H_2 (T2), e H_3 (T1) com H_3 (T2), verificamos que:

$$V_{X_1(T1)X_1(T2)} = 0 \quad |V|$$

$$V_{X_2(T1)X_2(T2)} = 3 \quad |V|$$

$$V_{X_3(T1)X_3(T2)} = 3 \quad |V|$$

OBS:- $V_{X_1(T1)X_1(T2)}$ é zero porque $X_1(T1)$ e $X_1(T2)$ foram colocados em curto; já $V_{X_2(T1)X_2(T2)}$ e $V_{X_3(T1)X_3(T2)}$ resultaram em 3 |V|, o que não impede o paralelismo - A corrente de circulação será bem pequena -, o ideal entretanto seria que estas tensões fossem também nulas, não o sendo devido a pequena diferença entre as relações de transformação (1,14 para T1 e 1,17 para T2).

6.2.2. Segundo Caso

6.2.2.a. Medições de Tensões

Mantivemos a conexão de T1 e ligamos T2 conforme fig. 3.17, e obtivemos:

$$V_{TS} = 225 \quad |V|$$

$$V_{T1} = 193 \quad |V|$$

$$K = 1,17$$

Colocamos H_1 em curto com X_1 , sob uma tensão de 10 |V| e os resultados foram:

$$V_{H_1H_3} = 10 \quad |V|$$

$$V_{H_2X_2} = V_{H_3X_3} = 5 \quad |V|$$

$$V_{H_2 X_3} = 13 \text{ |V|}$$

$$V_{H_3 X_2} = 5 \text{ |V|}$$

E portanto de acordo com a Tab. IV.1 o D.A. de T2 agora é: 30^0

6.2.2.b. Paralelismo

Evidentemente, sendo: D.A. de T1 330^0 e de T2 30^0 , o paralelismo direto não é possível.

Faremos então alterações sobre T1

6.2.3. Terceiro Caso

Procedemos à alteração interna em T1, invertendo-se a ligação do Δ , de forma que o mesmo ficou ligado conforme fig. 3.17, e as medições de tensões, conforme se esperava resultaram em:

6.2.3.a. Medições de Tensões

$$V_{H_1 H_3} = 10 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3} = 5 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_3} = 13 \text{ |V|}$$

$$V_{H_3 X_2} = 5 \text{ |V|}$$

Que de acordo com a tab. IV.1, indicam que D.A. de T1 agora é 30^0 .

6.2.3.b. Paralelismo

Da mesma forma que no primeiro caso (6.2.1), o paralelismo

lismo foi direto, pois o D.A. de T1 e o D.A. de T2 são estritamente iguais.

6.2.4. Quarto Caso

Ao invêz de alterarmos a ligação do Δ de T1, mantemo-lo ligado conforme fig. 3.18 e invertamos a sequência de ses, de sorte que agora a sua ligação se apresente como na 5.18, então:

6.2.4.a. Medições de Tensões

$$V_{TS} = 225 \text{ |V|}$$

$$V_{TI} = 197 \text{ |V|}$$

$$K = 1,14$$

E estando H_1 em curto com X_1 , medimos:

$$V_{H_1 H_3} = 10 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_2} = V_{H_3 X_3} = 5 \text{ |V|}$$

$$V_{H_2 X_3} = 13 \text{ |V|}$$

$$V_{H_3 X_2} = 5 \text{ |V|}$$

De acordo com a tab. IV.1, o D.A. de T1 agora é 30°

6.2.4.b. Paralelismo

Ligando-se $H_1(T1)$ a $H_2(T2)$, $H_2(T1)$ a $H_1(T2)$ e $H_3(T1)$ a $H_3(T2)$, verificamos que o paralelismo era possível (nessa condição ambos tem o mesmo D.A.), sendo que os terminais de BT devem ligados: $X_1(T1)$ com $X_2(T2)$, $X_2(T1)$ com $X_1(T2)$ e $X_3(T1)$ com $X_3(T2)$

pois:

$$V_{X_1(T1)X_2(T2)} = 4 |V|$$

$$V_{X_2(T1)X_1(T2)} = 0 |V|$$

$$V_{X_3(T1)X_3(T2)} = 4 |V|$$

OBS:- A mesma observação feita no ítem 6.2.1.b é válida para este caso.

Portanto, como era de se esperar pelo que foi desenvolvido até o Cap. V, o paralelismo é possível, mesmo com transformadores onde os D.A.s são a primeira vista distintos. Basta efetuar algumas modificações, quase sempre bem simples. Este capítulo vem ademais confirmar o que se afirmara no ítem 5.4 do Cap. V.

CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Transformadores Hexafásicos

À página 45 da norma MB-128 (A.B.N.T), estão relacionados os transformadores hexafásicos, em consonância com os trifásicos da pg. 44 da mesma norma. Embora, não se tenha desenvolvido um estudo para os mesmos, os conceitos aqui apresentados assim como a sistemática desenvolvida, podem ser, desde que adequadamente, utilizados para o estudo dos transformadores hexafásicos.

7.2. Desequilíbrios e Distorções Harmônicas

Este estudo gera, ainda, a possibilidade de, através da aplicação de seus conceitos básicos, se estudar o comportamento dos D.A.s - não mais a partir do funcionamento do transformador sob um sistema simétrico de tensões trifásicos, mas - a partir de possíveis desequilíbrios e distorções harmônicas. Isso se reveste, atualmente, de grande importância, devido a crescente utilização de sistemas de conversão estática em redes industriais.

7.3. Medição e Proteção

Os fundamentos apresentados nos Cap. I e II, complementados pelo Apêndice V, servem ainda para o estudo pormenorizado da polaridade dos equipamentos em uso nas áreas de Medição e Proteção dos Sistemas Elétricos. Portanto é mais uma contribuição deste trabalho no que tange a: fixar bases para posteriores estudos.

7.4. Tabela para Paralelismo.

A grande utilidade deste trabalho é não só permitir a análise detalhada dos diversos D.A.s de transformadores trifásicos, mas, também as mudanças dos mesmos, através de alterações internas ou externas, e ainda mais, permitir o fechamento em paralelo de transformadores com D.A.s (a priori) distintos.

É portanto um estudo de grande valia para: Engenheiros, Técnicos, Estudantes de Engenharia Elétrica e, sobretudo, para os que trabalham em Concessionárias de Energia Elétrica.

E, para maior facilidade do uso do mesmo, apresentamos na tabela VII.1 (em anexo) quais os transformadores que podem ser fechados em paralelo, e - quando o paralelismo não for direto - quais as modificações a serem feitas, de forma que o mesmo, possa ainda ser efetuado.

Ainda mais, o assunto foi desenvolvido de tal forma que: Para os iniciantes o estudo é apresentado de maneira didática e bem detalhada e para os já conhecedores dos preceitos básicos, a consulta às figuras e tabelas dos Caps. III, IV e V juntamente com a tabela deste capítulo (Tab. VII.1), permite uma rá

pida análise e uma decisão a respeito do que deve ser feito para atingir o objetivo final: o paralelismo de transformadores.

7.4.1. Uso da Tab. VII.1

Para maior facilidade tomemos alguns exemplos de uso da Tab. VII.1; Vejamos:

a) Suponhamos que desejamos fechar em paralelo um transformador Dy 1 e outro Dy 11. É possível? É! Como?

Bem o cruzamento da linha Dy 1 com a coluna Dy 11, mostra: 2/3, o que quer dizer segundo a legenda :

2 - modificações internas (Tab. III.1). Consultada, a mesma diz: para passar de Dy 11 para Dy 1 - troque (inverta) a ligação do Δ . Ou

3 - modificações externas (Tab. V.1). Consultada, a mesma diz: para passar de DY 11 para Dy 1 - troque (inverta) a S.F.

Portanto, é possível! Desde que opere-se a transformação 2 ou 3.

"Evidentemente, neste caso, em termos práticos a condição 3 (inverter S.F.) é muito mais simples."

b) Desejamos fechar em paralelo transformadores Dd 0 e Dz 0. Como fazer?.

Na Tab. VII.1, o cruzamento da linha de Dd 0 com a coluna de Dz 0 tem o número 1. Logo, segundo legenda o fechamento é direto.

c) E se os transformadores forem, p.e., Dd 4 e Dd 6? Como fazer?

A Tab. VII.1 indica no cruzamento da linha de Dd 4 e Dd 6 o número 2, portanto devemos proceder à inversão ditada pela Tab. III.1.

Para finalizar temos o seguinte exemplo:

d) Como fechar em paralelo um transformador Dy 1 com Yd 5?

A tabela VII.1 indica que o número no cruzamento da linha Dy 1 com a coluna Yd 5 é 4. Isto significa que devemos transformar Yd 5 em Yd 1. O cruzamento de Yd 5 com Yd 1 tem o número 2. Portanto com a Tab. III.1 transformamos Yd 5 em Yd 1, e Dy 1 com Yd 1 tem no cruzamento da linha e coluna o nº 1, fechamento direto.

Resumindo:

Dy 1 com Yd 5?

Yd 5
Dy 1 4 Tab. VII.1

Yd 1
Yd 5 2 Tab. VII.1

Yd 5 $\xrightarrow{\text{Tab. III.1}}$ Yd 1

Yd 1
Dy 1 1 Tab. VII.1 (Fechamento Direto!)

TAB. VII.1 - POSSÍVEIS COMBINAÇÕES (DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS) PARA PARALELISMO

D.A.s → †	Dd 0	Dz 0	Yy 0	Dy 1	Yd 1	Yz 1	Dd 2	Dz 2	Dd 4	Dz 4	Dy 5	Yd 5	Yz 5	Dd 6	Dz 6	Yy 6	Dy 7	Yd 7	Yz 7	Dd 8	Dz 8	Dd 10	Dz 10	Dy 11	Yd 11	Yz 11	
Dd 0	1	1	1				2	4	2	4				2	4	4				2	4	2	4				
Dz 0	1	1	1				4	2	4	2				4	2	4				4	2	4	2				
Yy 0	1	1	1				4	4	4	4				4	4	2				4	4	4	4				
Dy 1				1	1	1					2	4	4				2	4	4					2	3	4	4
Yd 1				1	1	1					4	2	4				4	2	4					4	2	3	4
Yz 1				1	1	1					4	4	2				4	4	2					4	4	2	3
Dd 2	2	4					1	1	2	4				2	4					2	4	2	3	4			
Dz 2	4	2					1	1	4	2				4	2					4	2	4	2	3			
Dd 4	2	4					2	4	1	1				2	4					2	3	4	2	4			
Dz 4	4	2					4	2	1	1				4	2					4	2	3	4	2			
Dy 5				2	4	4					1	1	1				2	3	4	4				2	4	4	
Yd 5				4	2	4					1	1	1				4	2	3	4				4	2	4	
Yz 5				4	4	2					1	1	1				4	4	2	3				4	4	2	
Dd 6	2	4	4				2	4	2	4				1	1	1					2	4	2	4			
Dz 6	4	2	4				4	2	4	2				1	1	1					4	2	4	2			
Yy 6	4	4	2				4	4	4	4				1	1	1					4	4	4	4			
Dy 7				2	4	4					2	3	4	4			1	1	1					2	4	4	
Yd 7				4	2	4					4	2	3	4			1	1	1					4	2	4	
Yz 7				4	4	2					4	4	2	3			1	1	1					4	4	2	
Dd 8	2	4					2	4	2	3	4			2	4						1	1	2	4			
Dz 8	4	2					4	2	4	2				4	2						1	1	4	2			
Dd 10	2	4					2	3	4	2	4			2	4						2	4	1	1			
Dz 10	4	2					4	2	3	4	2			4	2						4	2	1	1			
Dy 11				2	3	4	4				2	4	4				2	4	4					1	1	1	
Yd 11				4	2	3	4				4	2	4				4	2	4					1	1	1	
Yz 11				4	4	2	3				4	4	2				4	4	2					1	1	1	
† D.A.s →	Dd 0	Dz 0	Yy 0	Dy 1	Yd 1	Yz 1	Dd 2	Dz 2	Dd 4	Dz 4	Dy 5	Yd 5	Yz 5	Dd 6	Dz 6	Yy 6	Dy 7	Yd 7	Yz 7	Dd 8	Dz 8	Dd 10	Dz 10	Dy 11	Yd 11	Yz 11	

Legenda:

- a) 1 - Paralelismo Direto
b) 2 - Paralelismo, após modificações internas sugeridas na Tabela III.1
c) 3 - Paralelismo, após alterações externas sugeridas na Tabela V.1
d) 4 - Paralelismo possível, procurar o transformador de mesma conexão e mesmo número daquele com que se quer o paralelo
(Ex. Para fechar Dy 1 com Yd 5. Procure como passar de Yd 5 para Yd 1 e então fechar Dy 1 com Yd 1).
e) - 2/3 - proceder segundo item b ou segundo item c.

BIBLIOGRAFIA

1. GENERAL ELETRIC - "Transformer Connection". |L| Ed. General Electric - Schenectady - NY - EUA - 1960
2. BLUME, L.F; BOYAJIAN, A.; CAMILLI, G.; LENNOX, T.C.; MINELLI, S.; MONTSINGER, V.M. - "Transformer Engineering". |L| - Ed John Wiley & Sons. Inc. - NY - EUA - 1951.
3. OLIVEIRA, J.C. - "Transformadores (DEL 105)". |Ap| - EFEI - Itajubá - 1973.
4. A.B.N.T. - "Especificação e Métodos de Ensaio para Transformadores (EB91 - MB128)" |N| - ABNT - 1971
5. O'KELLY, D.; SIMMONS, S. - "Introduction to Generalized Electrical Machines Theory" |L|
6. ABREU, J.P.G. de - "Ângulos de Defasamento de Transformadores Trifásicos: Sistemática de Obtenção" |Ar| - EFEI - Revista EFEI-PESQUISA - Vol. IV nº 4 - 1978.

|L| - Livros

|Ap| - Apostilas

|N| - Normas Técnicas

|Ar| - Artigos

APÊNDICE I

FASORES

Uma quantidade complexa $\bar{U} = U_{MAX} e^{j(\omega t + \phi)}$ é uma ferramenta matemática conveniente para a representação do valor instantâneo de uma grandeza senoidal em regime permanente.

Os valores instantâneos,

$$u_1(t) = U_{MAX} \cos(\omega t + \phi)$$

$$u_2(t) = U_{MAX} \sin(\omega t + \phi)$$

podem ser conseguidos a partir de:

$$u_1(t) = R_e [\bar{U}]$$

$$u_2(t) = I_m [\bar{U}]$$

onde os símbolos R_e e I_m significam, respectivamente, as projeções de \bar{U} sobre os eixos real e imaginário, que definem um plano complexo (fig. 1).

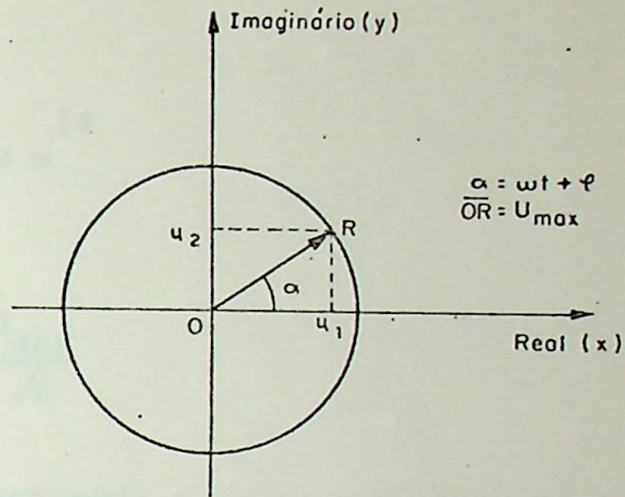


Fig. 1 - Representação de \bar{U} , u_1 e u_2 .

A quantidade complexa \bar{U} , pode então ser definida a partir das projeções sobre os eixos estacionários x e y .

$$\bar{U} = u_1(t) + ju_2(t)$$

logo

$$\bar{U} = U_{MAX} [\cos(\omega t + \phi) + j\text{sen}(\omega t + \phi)]$$

ou

$$\bar{U} = U_{MAX} e^{j(\phi t + \omega)}$$

de onde:

$$\bar{U} = U_{MAX} e^{j\phi} e^{j\omega t}$$

e multiplicando e dividindo o segundo membro por $\sqrt{2}$, vem:

$$\bar{U} = \sqrt{2} e^{j\omega t} \left(\frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} e^{j\phi} \right)$$

A parcela invariante no tempo $\left(\frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} e^{j\phi} \right)$ da quantidade complexa \bar{U} é chamada de fasor, e representada por \dot{U} , logo:

$$\dot{U} = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} e^{j\phi}$$

ou

$$\dot{U} = U e^{j\psi}$$

onde

$$U = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}}$$

U representa o valor eficaz (U é o valor indicado pelo voltímetro).

Por outro lado, \dot{U} pode ser imaginado como tendo sido obtido de um par de eixos ortogonais r e s , que estão em sincronismo com \bar{U} (ou seja gira a uma velocidade angular ω). Portanto \dot{U} está *estacionário* com relação aos eixos r e s , havendo então entre \dot{U} e, p.e., r uma defasagem angular fixa (ψ). Vide fig. 2.

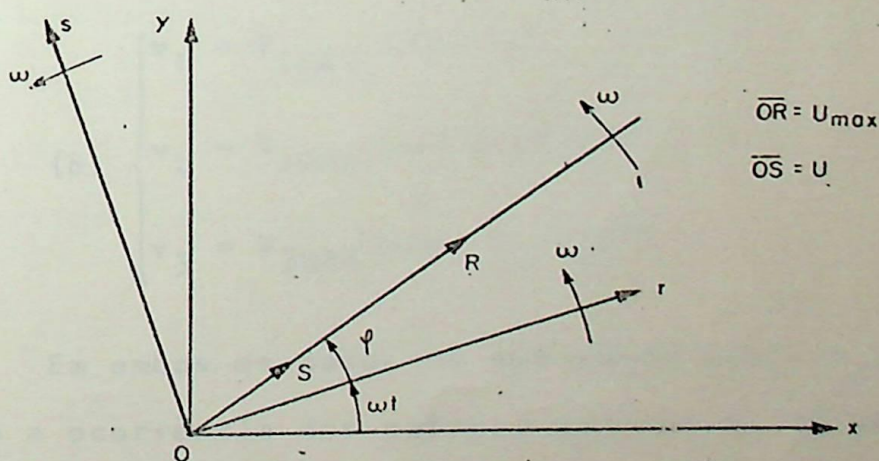


Fig. 2 - Representação de \bar{U} e \dot{U}

Do exposto e da fig. 2, concluímos que os fasores podem indicar uma defasagem angular que é decorrente do fato das respectivas quantidades complexas possuírem um atraso, ou defasagem no tempo.

APÊNDICE II

SEQUÊNCIA DE FASES

Um gerador trifásico, gera três ondas de tensões, de fasadas de 120° entre si e que podem ser representadas, por:

$$(a) \begin{cases} v_1 = V_{1MAX} \text{ sen } (\omega t) \\ v_2 = V_{2MAX} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ) \\ v_3 = V_{3MAX} \text{ sen } (\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad \text{onde } \begin{matrix} V_{1MAX} = \\ V_{2MAX} = \\ V_{3MAX} \end{matrix}$$

ou

$$(b) \begin{cases} v_1 = V_{1MAX} \text{ sen } (\omega t) \\ v_2 = V_{2MAX} \text{ sen } (\omega t + 120^\circ) \\ v_3 = V_{3MAX} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ) \end{cases}$$

Em ambos os casos há defasagem entre v_1 , v_2 e v_3 ; Entretanto a ocorrência dos valores máximos se dá em tempos diferentes:

Na fig. 1.a V_{2MAX} ocorre 120° após a ocorrência de V_{1MAX} e V_{3MAX} 120° após V_{2MAX} .

Já na fig. 1.b V_{2MAX} ocorre 120° após a ocorrência de V_{3MAX} e V_{3MAX} 120° após a V_{1MAX} .

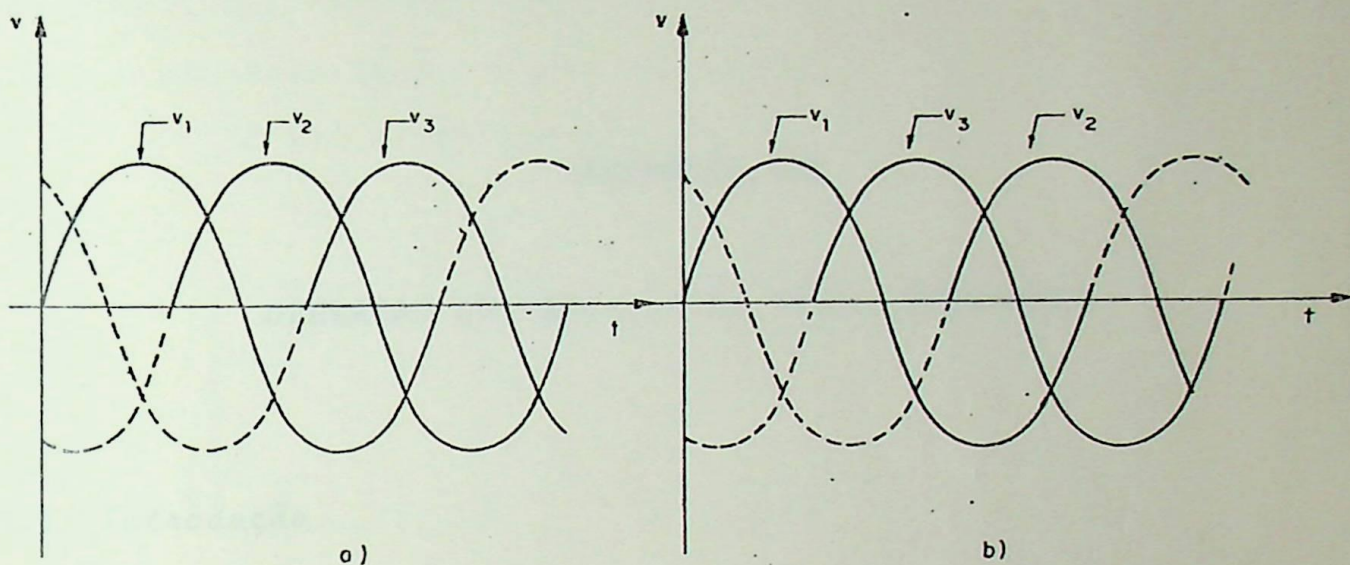


Fig. 1 - Ondas de tensões trifásicas

Devido a isso foi feita a seguinte convenção: No caso da fig. 1.a, diz-se que a sequência de fases é direta (pela ordem de ocorrência: V_{1MAX} , V_{2MAX} , V_{3MAX}) e no caso da fig. 1.b, diz-se que a sequência de fases é inversa (pela ordem de ocorrência: V_{1MAX} , V_{3MAX} , V_{2MAX}).

Essa convenção pode ser vista mais facilmente, através de diagramas fasoriais.

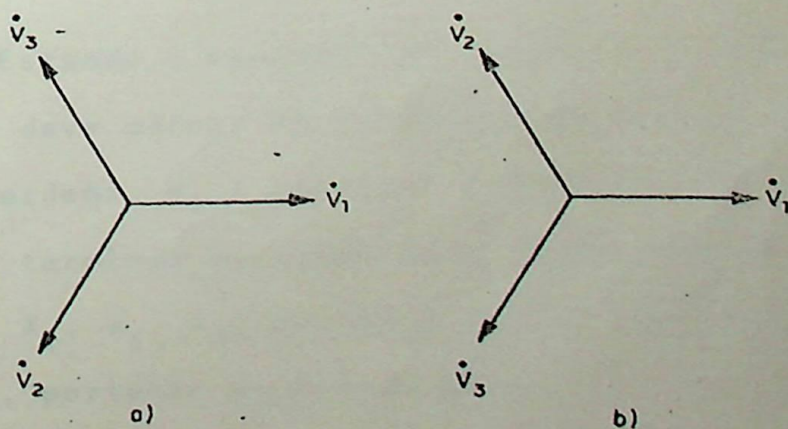


Fig. 2 - Sequência de fases

(a) Direta

(b) Inversa

APENDICE III

OPERAÇÃO EM PARALELO DE TRANSFORMADORES

3.1. Introdução

Embora não seja objetivo final do trabalho a operação em paralelo de transformadores, é de suma importância que se faça uma explanação, se bem que resumida, a respeito do assunto, pois as conclusões tiradas no mesmo serão sem dúvida de utilidade no paralelismo de transformadores.

Antes de entrarmos na operação em paralelo, vejamos como é feita a marcação dos terminais dos transformadores trifásicos.

3.2. Marcação dos Terminais

Estando o operador de frente para o lado de maior tensão (AT), deve marcar os terminais da direita para a esquerda na seguinte ordem: H_1 - terminal à direita, H_2 - terminal do centro, H_3 - terminal da esquerda. Já do lado de menor tensão (BT), temos: X_1 , X_2 , X_3 , de forma que X_1 corresponda a H_1 , X_2 a H_2 e X_3 a H_3 , portanto de frente para a BT, teremos: X_1 à esquerda, X_2 no centro e X_3 à direita.

Nota:- Nos casos em que haja neutro e o mesmo seja

acessível, deve-lhe corresponder o terminal mais à esquerda (por tanto à esquerda de X_1) e ser designado por X_0 .

A fig. 1 esclarece:

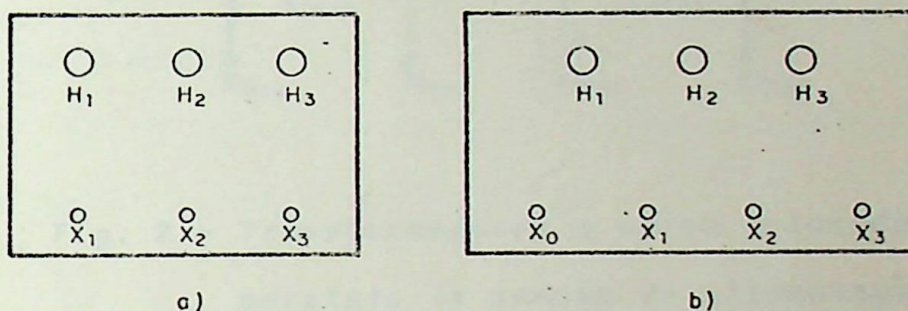


Fig. 1 - Marcação de terminais de transformadores trifásicos

(a) sem neutro (ou neutro inacessível)

(b) com neutro acessível

3.3. Condições para a Operação em Paralelo de Transformadores

3.3.1. Condições Fundamentais

3.3.1.a. Mesma Relação de Transformação (ou aproximadamente a mesma)

Uma vez que a tensão de alimentação é a mesma, para os transformadores (Vide fig. 2), devemos impor a condição de que eles tenham a mesma relação de transformação, a fim de que as tensões secundárias sejam as mesmas.

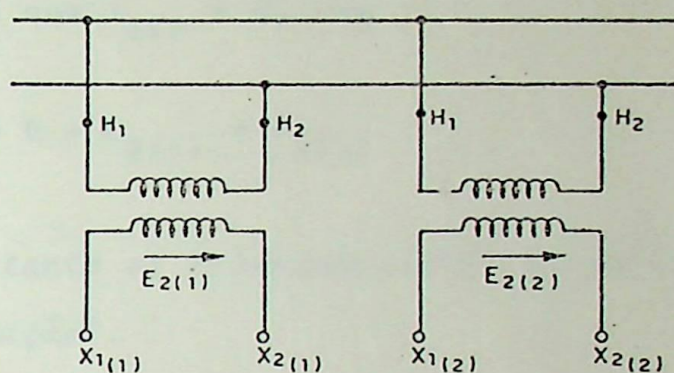


Fig. 2 - Transformadores a serem colocados em paralelo (a tensão de alimentação $\underline{\hat{u}}$ nica).

Por que as tensões secundárias ($E_{2(1)}$ e $E_{2(2)}$) devem ser as mesmas?

Suponhamos que $E_{2(1)} > E_{2(2)}$ e conectemos $X_{1(1)}$ com $X_{1(2)}$ e $X_{2(1)}$ com $X_{2(2)}$. No circuito formado pelos dois secundários, teríamos uma tensão $E_R = E_{2(1)} - E_{2(2)}$ que resultaria no aparecimento de uma corrente, chamada de corrente de circulação como mostramos:

$$I_{\text{cir}} = \frac{E_R}{\bar{Z}_{2(1)} + \bar{Z}_{2(2)}}$$

Ora esta corrente é indesejável, pois a finalidade da operação em paralelo é a de somar potência, ou seja, que os transformadores, cada um por si entregue uma certa potência (e portanto uma certa corrente) à carga. Além disso o aparecimento dessa corrente adicional (I_{cir}) é, devido ao aquecimento adicional por ela provocado, prejudicial aos transformadores.

Resta-nos então afirmar que o ideal é que I_{cir} seja nula.

Para que $I_{cir} = 0$, vem

$$E_r = 0 \rightarrow E_{2(1)} = E_{2(2)}$$

"Portanto os transformadores devem ter a mesma relação de transformação".

OBS:- Em termos práticos admite-se uma diferença das tensões secundárias em torno de 0,5%.

3.3.1.b. Polaridade (transf. Monofásicos) ou defasamento angular (transf. trifásicos) convenientes.

Pelo exposto no ítem anterior é sumamente importante que I_{cir} seja nula o que significa dizer que $E_{2(1)} = E_{2(2)}$ ou $E_R = 0$.

Porém $E_{2(1)} = E_{2(2)}$ não assegura que $E_R = 0$, senão vejamos:

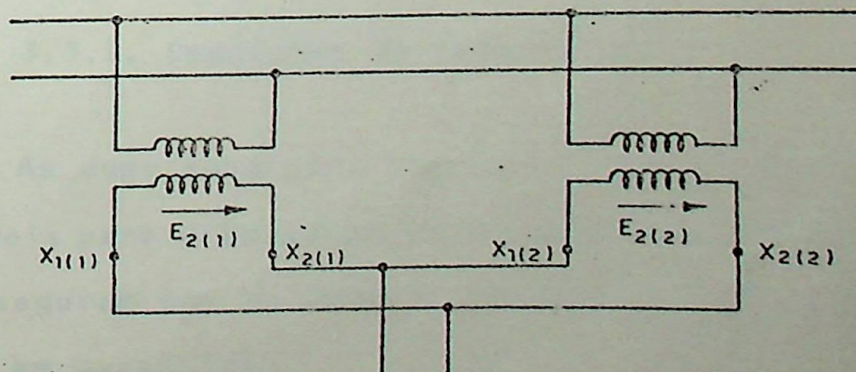


Fig. 3 - $E_R \neq 0$, devido à polaridade

No caso da fig.3, embora possamos ter $E_{2(1)} = E_{2(2)}$, E_R é não nula, pois na malha formada pelos secundários dos dois

transformadores, existe uma tensão resultante, que é dada por:

$$E_R = E_{2(1)} + E_{2(2)} \quad \therefore \quad E_R \neq 0 \text{ (o que é indesejável)}$$

Para que se resolva este problema, basta que: ligue mos $X_{1(1)}$ com $X_{1(2)}$ e $X_{2(1)}$ com $X_{2(2)}$; Então teremos:

$$E_R = E_{2(1)} - E_{2(2)}, \text{ com } E_1 = E_2, \text{ vem}$$

$$E_R = 0$$

Portanto para transformadores monofásicos (caso da fig. 3), somente seria necessária a ligação adequada dos termi nais dos transformadores (o que implicaria no conhecimento da po laridade dos mesmos).

Para o caso dos transformadores trifásicos, importa somente que as direções das tensões formem um ângulo entre si de 0° , restando então a verificação dos sentidos (a ser feito no próximo item) das tensões.

3.3.2. Condições de Otimização

As duas condições que vêm a seguir não são condições imprescindíveis para a operação em paralelo de transformadores, en tretanto asseguram que se obtenha o máximo proveito (otimizaçã, - da operação em paralelo).

3.3.2.a. Mesma Impedância Porcentual

Estando dois transformadores em paralelo, a distribui ção de potencias entre os mesmos é inversamente proporcional às

impedâncias, a saber:

$$\frac{P_1\%}{P_2\%} = \frac{Z_2\%}{Z_1\%}$$

Logo a condição ideal (ótima) é quando $Z_1\% = Z_2\%$ pois nesse caso $P_1\% = P_2\%$, ou seja ambos terão carregamento (em KVA) proporcional à sua capacidade.

3.3.2.b. Mesma Relação entre Resistência e Reatância

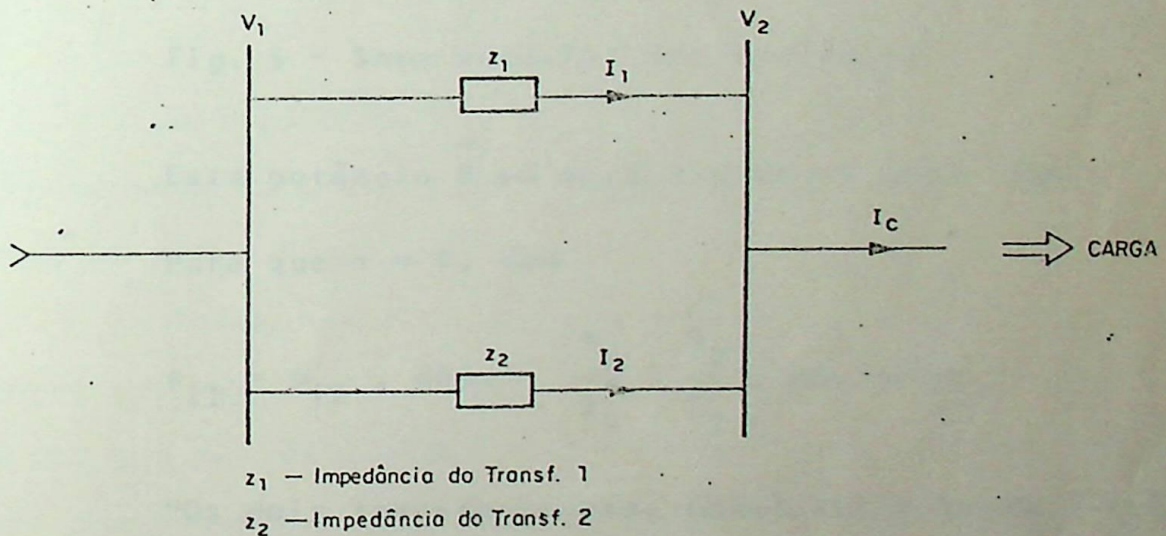


Fig. 4 - Representação esquemática do Paralelismo

Embora as impedâncias possam ter o mesmo módulo seus argumentos (ângulos) podem ser distintos, portanto as correntes terão defasamentos diferentes com relação a tensão \dot{V}_2 , pois há uma diferença de argumentos entre as impedâncias. Então: Haverá um defasamento entre as correntes, dado pela diferença entre os argumentos das impedâncias, a saber:

Suponhamos que $\psi_{i1} - \psi_{i2} = \alpha$ (ψ_{i1} é argumento de \bar{Z}_1 e ψ_{i2} é o argumento de \bar{Z}_2). Este ângulo α , será o ângulo de defasamento entre as duas correntes.

Ora, uma vez em paralelo a tensão de saída dos transformadores é única e é dada por \dot{W}_2 , portanto havendo um defasamento entre as correntes, haverá também entre as potências, de forma que:

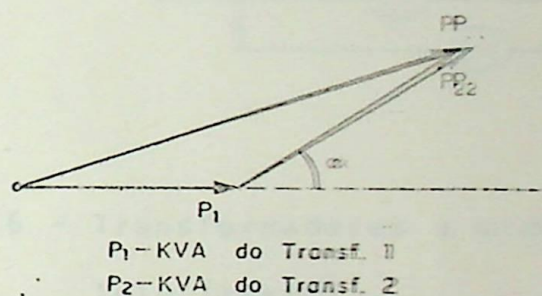


Fig. 5 - Soma vetorial das potências

Esta potência \vec{P} só será máxima se $\alpha=0$, logo:

Para que $\alpha = 0$, vem

$$\psi_{i1} = \psi_{i2}, \text{ donde } \frac{R_1}{X_1} = \frac{R_2}{X_2}, \text{ ou seja:}$$

"Os dois transformadores devem ter a mesma relação entre resistência e reatância".

3.4. Realização Prática do Paralelismo (Transformadores Trifásicos)

Tenhamos como objetivo ligar o transformador T_2 ao T_1 , conforme figura a seguir:

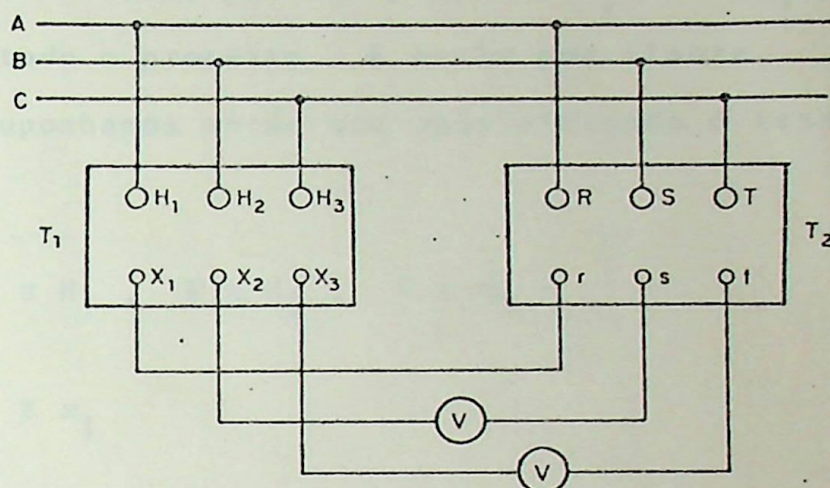


Fig. 6 - Transformadores a serem colocados em paralelo (teste)

O transformador T_1 , terá seus terminais inalterados durante o teste. Para o transformador T_2 , ter-se-á, numa primeira etapa, $R \equiv H_1$, $S \equiv H_2$ e $T \equiv H_3$

Coloca-se r em curto com x_1 e instala-se um voltímetro entre s e x_2 e depois entre t e x_3 , sendo condição para o paralelismo que nos dois casos o voltímetro acuse tensões nulas. Caso isto não ocorresse, colocar-se-ia o voltímetro entre t e x_2 e entre s e x_3 . Sendo portanto um total de 4 leituras no voltímetro.

Se ainda assim não houvesse o caso das tensões nulas colocar-se-ia agora um curto entre x_1 e s e leríamos todas as tensões possíveis (novamente 4). E ainda não se chegando a um resultado satisfatório transfere-se o curto para x_1 e t . Efetuando-se novamente 4 leituras.

Se após estas doze leituras não encontrou-se um par de tensões nulas, deve-se então efetuar uma troca dos terminais

no lado de maior tensão, por exemplo: $R \equiv H_2$, $S \equiv H_1$ e $T \equiv H_3$ e então repetir todo o processo. E assim por diante.

Suponhamos então que após efetuado o teste chegou-se a:

$$R \equiv H_1, \quad S \equiv H_2, \quad T \equiv H_3$$

$$r \equiv x_1$$

$$V_{sX_2} = 0 \quad \therefore \quad s \equiv X_2$$

$$V_{tX_3} = 0 \quad \therefore \quad t \equiv X_3$$

Logo o paralelismo será efetuado da seguinte forma:

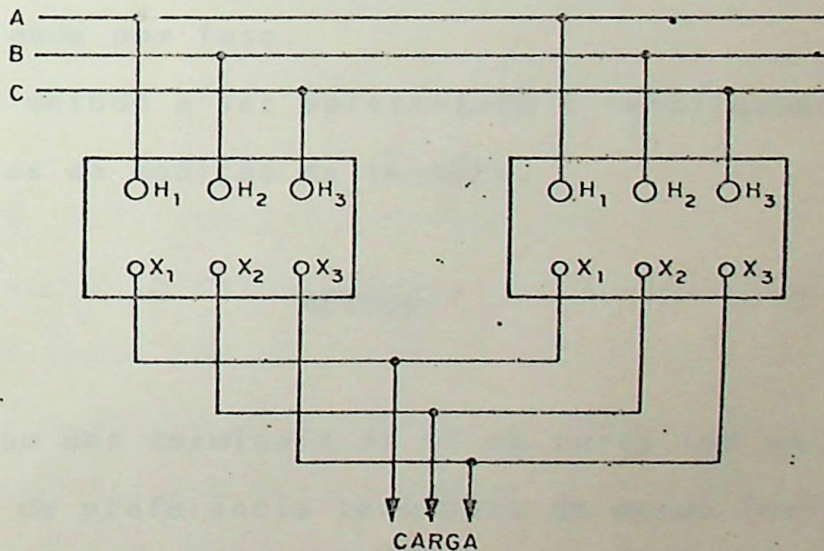


Fig. 7 - Transformadores em paralelo.

OBS:- Neste caso específico os transformadores tem mesmo ângulo de defasamento, mas é possível que transformadores de ângulos (a priori) distintos sejam colocados em paralelo, o texto do trabalho esclarecerá.

APÊNDICE IV

VERIFICAÇÃO DA POLARIDADE (POR FASE)
DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Nos diagramas de conexões de transformadores, para que se obtenha o defasamento angular, é necessário que coloquemos as setas de tensão que definirão se o transformador é subtrativo ou aditivo por fase. Precisamos então, estando o transformador já pronto, logo, sem todos os terminais de bobinas acessíveis, determinar a polaridade por fase.

O método a ser apresentado é relativamente simples, usando-se apenas da medição de tensões.

MÉTODO

1. Coloque-se um dos terminais da AT em curto com um dos terminais da BT, de preferência terminais de mesmo índice, por exemplo H_1 com X_1 ou H_2 com X_2 ou H_3 com X_3 . Adotaremos o primeiro caso, na nossa análise, ou seja H_1 ligado com X_1 .
2. Aplique-se aos terminais da AT uma tensão reduzida, de forma que facilite as medições de tensões.
3. Meça-se as tensões H_1H_2 (que é a própria tensão de alimentação) e H_2X_2 .

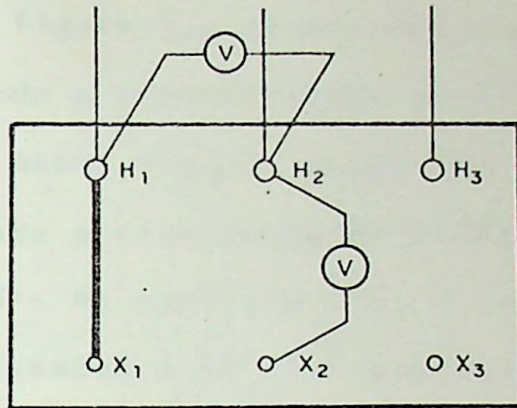
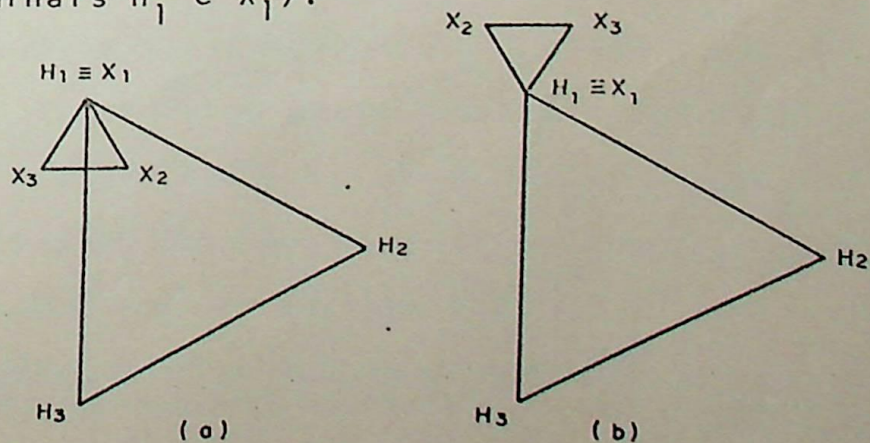


Fig. 1 - Teste de polaridade

Sendo a relação de transformação diferente da unidade ($K \neq 1$), haverá dois casos possíveis, a saber:

- a) Se $V_{H_1 H_2} > V_{H_2 X_2}$, o transformador tem polaridade subtrativa:
- b) Se $V_{H_1 H_2} < V_{H_2 X_2}$, a polaridade do transformador é aditiva.

A justificativa é também relativamente simples. Tomemos como exemplo um transformador com defasamento angular 30° (subtrativo) e outro com defasamento angular 210° (aditivo), e façamos a conjunção dos diagramas fasoriais de AT e de BT colocando-se $H_1 \equiv X_1$, uma vez que eletricamente são o mesmo ponto (estão ligado os terminais H_1 e X_1).

Fig. 2 - Diagramas de tensões: (a) 30° , (b) 210°

Na figura 2.a observamos que $\overline{H_2 X_2} < \overline{H_1 H_2}$ portanto $V_{H_1 H_2} > V_{H_2 X_2}$, sendo o transformador subtrativo 30° .

Na mesma figura, parte(b), temos que $\overline{H_2 X_2} > \overline{H_1 H_2}$ logo $V_{H_1 H_2} < V_{H_2 X_2}$, sendo o transformador aditivo 210°

OBS:- No capítulo III, é mostrado o porque de transformador com defasamento 30° ser subtrativo e com defasamento de 210° ser aditivo.

APÊNDICE V

OBTENÇÃO DA POLARIDADE ATRAVÉS DO
MÉTODO: GOLPE INDUTIVO

O método do golpe indutivo objetiva a obtenção da polaridade de transformadores com o uso de corrente contínua (vide fig. 1).

Uma vez que o valor permanente da corrente contínua não se estabelece no momento ($t=0$) do ligamento da fonte de c.c. e sim leva um certo tempo Δt para isso; Nesse intervalo de tempo Δt a variação da corrente implica numa variação de fluxo e, portanto, do aparecimento de f.e.m. no secundário do transformador¹. No desligamento da fonte, também há a indução de uma f.e.m. pois a corrente não cai instantaneamente a zero, havendo então variação da mesma e portanto do fluxo magnético.

Calcado nesse fenômeno é que se baseia o processo, descrevemo-lo então:

Ligue-se os terminais de TS a uma fonte de c.c., conforme fig. 1. Instale-se um voltímetro apropriado (com zero central) nesses terminais e observe-se o sentido da deflexão do indicador quando da ligação da fonte de c.c.. Claro está que a chave deve se encontrar na posição 1-2.

1) Em regime permanente não há variação da corrente, não havendo portanto variação do fluxo magnético e em consequência não há a indução de uma f.e.m.