

FELIPE BUZELLI AZEVEDO

**Conexões Especiais de Transformadores e suas Aplicações em Sistemas Elétricos de
Potência**

FELIPE BUZELLI AZEVEDO

Conexões Especiais de Transformadores e suas Aplicações em Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

Guaratinguetá - SP
2016

A994c	<p>Azevedo, Felipe Buzelli Conexões especiais de transformadores e suas aplicações em sistemas elétricos de potência / Felipe Buzelli Azevedo – Guaratinguetá, 2016. 65 f : il. Bibliografia: f. 63-65</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis</p> <p>1. Conversores de corrente elétrica 2. Acoplamentos 3. Transformadores elétricos 4. Sistemas de energia elétrica I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.314.261</p>
-------	--

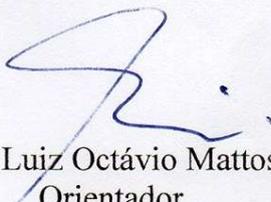
FELIPE BUZELLI AZEVEDO

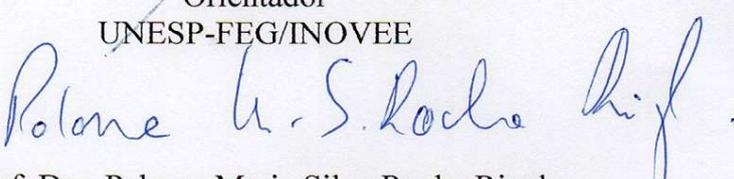
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

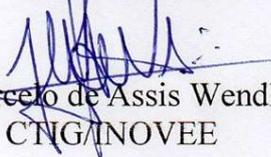
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos Reis
Orientador
UNESP-FEG/INOVEE


Prof. Dra. Paloma Maria Silva Rocha Rizol
UNESP-FEG/INOVEE


Eng. José Marcelo de Assis Wendling Júnior
CNG/INOVEE

De modo especial, dedico este trabalho aos meus pais, Orivaldo e Rosana, que sempre me apoiaram e me motivaram para alcançar meus objetivos e a minha avó, Beatriz, que de onde estiver sei que está torcendo pelo meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha mãe, Rosana que muito me ensinou e sempre me deu força e motivação para alcançar meus objetivos, e ao meu Pai, Orivaldo, que foi meu exemplo para a escolha da engenharia, e aquele que me ajudou nas tomadas de decisão mais importantes.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Luiz Otavio Mattos dos Reis* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, e que apesar das dificuldades e contra tempos, teve paciência para auxiliar e possibilitar a continuidade deste trabalho.

aos meus familiares e amigos que sempre me incentivaram e acreditaram em mim e que estiveram sempre presentes nos bons e maus momentos.

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que eu era antes”.

Marthin Luther King

RESUMO

Considerando que os sistemas multiconversores são muito utilizados em diversos ramos da indústria, se fazem importantes o estudo e a implantação de novas soluções que tragam melhorias para esses sistemas. A utilização de transformadores com conexões especiais vem sendo largamente difundida em sistemas multiconversores por permitir defasamentos angulares fora dos usuais que utilizam transformadores com conexões delta e estrela. Este trabalho visa demonstrar a possibilidade de se fazer um sistema conversor de vinte e quatro pulsos utilizando transformadores com conexões especiais, zigzague e delta estendido, que poderia ser implantado, por exemplo, num sistema de tração por corrente contínua. As principais características que devem ser estudadas de um transformador são a polaridade e seu defasamento angular no último, no caso dos transformadores com conexões especiais, podemos obter defasamentos angulares não usuais apenas variando seu “tap”, variação essa que é facilmente obtida por relações trigonométricas fundamentais. Na teoria a facilidade do cálculo para defasamento angular é comprovada em laboratório, a qual seria mais bem demonstrada utilizando transformadores com o “tap” variável.

PALAVRAS-CHAVE: Transformadores com conexões especiais. Conexão delta estendido. Conexão zigzague. Defasamento angular. Conversor de vinte e quatro pulsos.

ABSTRACT

Considering that multiconverter systems are widely used in various branches of industry, it is important to study and deploy new solutions that bring improvements to these systems. The use of transformers with special connections has been widely diffused in multiconverter systems because it allows for angular faults outside the usual ones that use transformers with delta and star connections. This work aims to demonstrate the possibility of making a twenty-four-pulse converter system using transformers with special connections (zigzag and extended delta) that could be implanted, for example, in a DC drive system. The main characteristics that must be studied of a transformer are the polarity and its angular lag, the latter, in the case of transformers with special connections with which we can obtain unusual angular deformations just by varying its "tap", this variation is easily obtained by Fundamental trigonometric relationships. In theory, the ease of calculation for angular lag is proven in the laboratory, and would be best demonstrated using transformers with variable tap.

KEYWORDS: Transformers with special connections. Extended delta connection. Zigzag connection. Angle shift. twenty-four pulse converter.

SUMÁRIO

1	MOTIVAÇÃO	09
1.1	OBJETIVOS	09
1.2	REVISÃO DA LITERATURA	10
2	TRANSFORMADORES E SUA IMPORTÂNCIA EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	11
2.1	GENERALIDADES DE UM TRANSFORMADOR	12
2.2	POLARIDADE.....	15
2.2.1	Método do transformador padrão	20
2.2.2	Método do golpe indutivo com corrente contínua	21
2.2.3	Método da corrente alternada	22
2.2.4	Método do transformador de referência de relação variável	23
2.3	DEFASAMENTO (DESLOCAMENTO) ANGULAR	23
3	TRANSFORMADORES COM CONEXÕES ESPECIAIS (ZIGUEZAGUE E DELTA ESTENDIDO)	30
3.1	CONEXÃO ZIGUEZAGUE	30
3.1.1	Obtenção de defasamentos angulares genéricos para conexão zigzeugue ..	36
3.2	CONEXÃO DELTA ESTENDIDO	43
3.1.2	Obtenção de defasamentos angulares genéricos para conexão delta estendido	49
4	RESULTADOS	56
5	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	63
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	65

1 INTRODUÇÃO

Dentro de um curso de engenharia elétrica, são muitos os assuntos abordados, dentre eles controle e automação, eletrônica, microeletrônica, instrumentação, telecomunicações e eletrotécnica.

Todas as áreas citadas são de suma importância, seja para saber como a luz chega na casa de cada cidadão ao dimensionamento de sistemas voltados para indústrias de grande porte, as quais necessitam de energia elétrica para produzir ininterruptamente e assim girar a economia de um país. Afunilando um pouco no ramo da engenharia elétrica o assunto geral que será abordado neste trabalho, será a eletrotécnica em sistemas elétricos de potência.

O início das maiores descobertas da eletrotécnica foi com Michael Faraday, que induziu uma força eletromotriz em uma bobina de arame, variando fluxo magnético, fenômeno que explica os equipamentos elétricos mais fundamentais de um sistema elétrico de potência: transformadores e geradores.

Essas máquinas elétricas possuem suas variâncias, dependendo de sua utilização. O conhecimento geral delas é fundamental, mas o conhecimento de máquinas elétricas específicas, utilizadas em casos particulares, é importante para o aprofundamento na formação de um engenheiro eletricista.

1.1 OBJETIVOS

Neste trabalho, o objetivo geral será abordar os transformadores com conexões especiais em sistemas de potência, que são em sua essência transformadores de múltiplos pulsos, largamente utilizados em sistemas multiconversores de potência.

De maneira mais específica, serão apresentados sistemas conversores de múltiplos pulsos, que estão presentes em sistemas de tração para alimentação de trens e metrô, tanto no Brasil como no mundo, e ainda serão propostos multiconversores de 24 pulsos, utilizando os transformadores com conexões especiais, os quais trazem diversas vantagens como, por exemplo, a redução de harmônicos e maior estabilidade na tensão de saída.

1.2 REVISÃO DA LITERATURA

O artigo do IEEE “*New 24-Pulse Diode Rectifier Systems for Utility Interface of High-Power AC Motor Drives*” (1997), apresenta um novo sistema utilizando um sistema multiconversor de vinte e quatro pulsos, comparando-o com um sistema de doze pulsos. Este artigo demonstra uma redução dos harmônicos apenas aumentando o número de pulsos do multiconversor, e essa alteração foi concebida alterando o transformador para uma configuração delta / delta estendido duplo, indicando a importância desta configuração diferente para transformadores retificadores.

Ainda, visando à utilização do transformador utilizando a configuração delta estendido, os professores da Escola Federal de Itajubá José Policarpo G. Abreu, Carlos A. M. Guimarães e Gilson Paulillo propuseram a utilização desses transformadores especiais para alteração do ângulo de fase da tensão de saída dos transformadores em sistemas de potência convencionais, pois os mesmos permitem defasagens não convencionais.

Salientando ainda o fato dos transformadores especiais serem tão importantes para sistemas de potência, no décimo quinto encontro regional Ibero-americano do CIGRÉ (2013), G.R. Farias, E. Maurici e N.M. Almeida da WEG e A. Péres da Universidade Regional de Blumenau demonstraram a viabilidade de se fazer sistemas multiconversores com transformadores especiais.

Materiais de aula dos Professores Reis e Rossi (2015) ofereceram embasamento teórico para o estudo do transformador com configuração zigzague, assim como a metodologia para encontrar os defasamentos angulares da citada configuração assim como poderiam ser feitos os experimentos para prova destes e de outros defasamentos.

Já o Professor Doutor Pitta (1993) em seu trabalho sobre aplicação de transformador delta estendido em conversores estáticos ofereceu o embasamento teórico para o estudo do transformador delta estendido e demonstrou a comparação entre sistemas multiconversores de múltiplos pulsos utilizando conexão zigzague e delta estendido, o que foi fundamental para a elaboração deste trabalho com apoio a desenvolvimento de texto, elaboração de figuras e tabelas.

Para outras figuras, tabelas e gráficos, o material dos professores Reis e Rossi (2015), assim com os livros de A. Ernest Fitzgerald e James Harlow foi utilizado, e ainda foram fundamentais para desenvolvimento de texto.

2 TRANSFORMADORES E SUA IMPORTÂNCIA EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Em um sistema elétrico de potência (SEP) existem diferentes níveis e tipos de corrente e tensão, e um dos principais objetivos de um bom SEP é a possibilidade de se transferir a máxima potência às cargas com o mínimo de perdas possíveis, e um dos dispositivos que está presente em um sistema com tais características é o transformador.

O transformador, mesmo não sendo um dispositivo de conversão de energia, é um equipamento de extrema importância e indispensável para muitos sistemas de conversão de energia. Para um sistema de potência, o transformador se torna significativo, pois “possibilita a geração elétrica e a transferência de energia nas tensões mais econômicas, além de permitir a utilização da energia na tensão mais adequada para um dado dispositivo em particular” [1].

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), um transformador é definido como um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos sem mudança de frequência[2].

A definição da ABNT não é tão detalhada e completa quando falamos de transformadores, pois os mesmos podem desempenhar outras funções, dentre elas operarem como equipamento de controle, mais uma importante função do transformador em um SEP.

Portanto, baseou-se como definição de transformador, a definição do American National Standards Institute (ANSI) e o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), que diz que o transformador é um equipamento estático, desprovido de partes sujeitas a movimento contínuo, utilizado em sistemas elétricos para transferir potência entre circuitos por meio de indução eletromagnética[3].

2.1 GENERALIDADES DO TRANSFORMADOR

Transformadores são máquinas elétricas, estáticas, que possuem dois ou mais enrolamentos e, que por meio de um acoplamento magnético, transferem energia, potência, entre esses enrolamentos, que são denominados primário e secundário(s)¹.

¹ Algumas vezes, pode se tornar confusa a definição de primário e secundário de um transformador, pois a energia pode fluir em ambos os sentidos, por convenção, segundo a literatura o primário é visto como sendo a "entrada"

Um transformador pode ser estudado de duas maneiras, como um caso ideal e como um caso real.

Neste trabalho, não será aprofundado no que diz respeito aos princípios básicos do funcionamento de um transformador, porém, se faz necessária uma visão geral sobre eles, logo, neste tópico, serão abordados os aspectos gerais de um transformador ideal.

Um transformador ideal consiste em um dispositivo com um mínimo de perdas, que consta de um enrolamento de entrada primário, com um número determinado de espiras N_1 , e um enrolamento de saída secundário, com um número determinado de espiras N_2 , conforme mostrado na Figura 1.

Segundo Fitzgerald (2003), um transformador pode ser dito ideal quando: as resistências dos enrolamentos forem desprezíveis, a dispersão do fluxo magnético é desprezível, ou seja, todo o fluxo magnético passará pelos enrolamentos; e não há perdas no núcleo do transformador, o núcleo possui altíssima permeabilidade de tal forma que mesmo uma pequena força magneto motriz (fmm) seja capaz de criar um fluxo, assim, uma corrente positiva, no secundário, gera uma fmm de sentido contrária a um criado por uma corrente, também positiva no primário.

Ainda na Figura 1, temos:

$v_1(t)$ – tensão no primário, variante no tempo;

$v_2(t)$ – tensão no secundário, variante no tempo;

$i_1(t)$ – corrente no primário, variante no tempo;

$i_2(t)$ – corrente no secundário, variante no tempo;

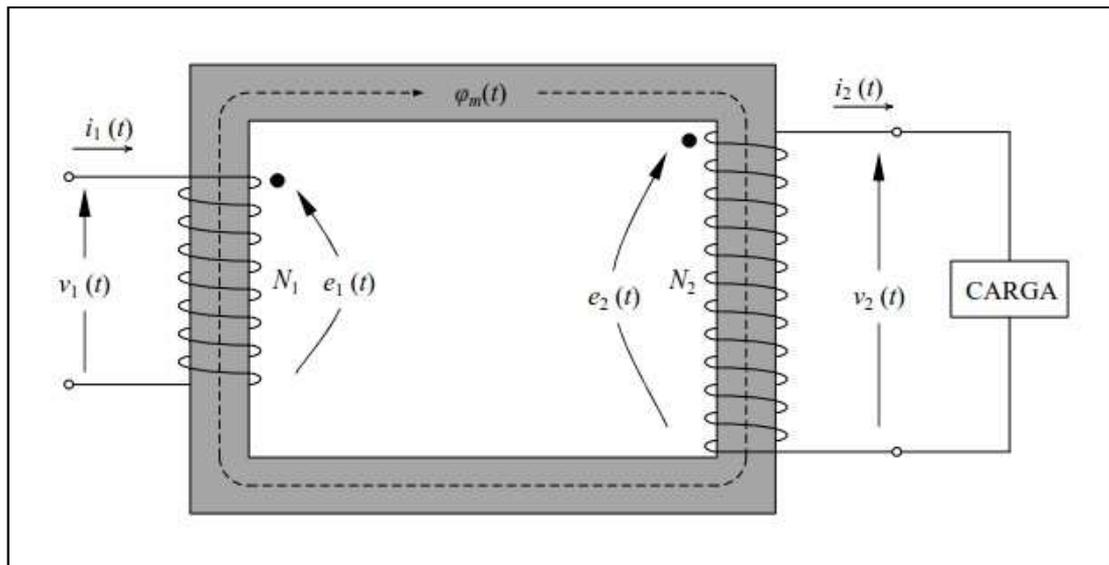
$e_1(t)$ – força contra eletromotriz, lado primário;

$e_2(t)$ - força eletromotriz induzida, lado secundário;

$\phi_m(t)$ – fluxo magnético mútuo, variante no tempo.

do transformador e o secundário, como a "saída". Uma maneira alternativa de tratar tal definição é se referir aos enrolamentos como sendo de "alta tensão" e "baixa tensão", assim eliminando a confusão de termos.

Figura 1 – Transformador Ideal com carga



Fonte: (CHAPMAN, Stephen J. Electric Machinery Fundamentals) [6]

Aplicando-se $v_1(t)$ ao primário do transformador, será estabelecido no núcleo $\phi_m(t)$, de maneira que $e_1(t)$ seja igual à tensão aplicada, logo, tem-se a Equação (1):

$$v_1(t) = e_1(t) = N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (1)$$

O mesmo fluxo magnético, no secundário produzirá $e_2(t)$ e a tensão $v_2(t)$, a qual é dada pela Equação (2).

$$v_2(t) = e_2(t) = N_2 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (2)$$

A relação entre a tensão do primário e do secundário é facilmente encontrada dividindo-se a Equação (1) pela (2), resultando na Equação (3) dada por:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (3)$$

Onde “a” será a relação de espiras do transformador.

Pela descrição de um transformador ideal, não há perdas e a corrente de magnetização é desprezível, portanto a potência de entrada (P_1) deve ser igual à potência de saída (P_2), dada pela Equação (4):

$$P_1 = v_1(t) \cdot i_1(t) = v_2(t) \cdot i_2(t) = P_2 \quad (4)$$

Ainda, isolando-se $v_1(t)$ ou $v_2(t)$ da Equação (3) e aplicando na Equação (4), tem-se que a relação entre as correntes do primário e do secundário do transformador ideal dado pela Equação (5) abaixo:

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (5)$$

Portanto, pode-se concluir que em um transformador, a tensão é transformada do primário para o secundário de maneira proporcional ao número de espiras, ou seja, se o número de espiras do enrolamento primário for maior que o número de espiras do enrolamento secundário, conseqüentemente, $v_1 > v_2$. Já para o caso da corrente, o inverso é válido, ou seja, caso o número de espiras do enrolamento primário for maior que o número de espiras do enrolamento secundário, $i_1 < i_2$.

2.2 POLARIDADE

A defasagem entre o primário e o secundário de um transformador monofásico é 0° , se a polaridade for aditiva, ou 180° se a polaridade for subtrativa.

A origem do conceito de polaridade é incerta, mas, aparentemente, os primeiros transformadores com menores tensões primárias e poucos kVAs, foram construídos pela primeira vez com polaridade aditiva.

Quando a potência e as tensões dos transformadores aumentaram, foi tomada a decisão de mudar para a polaridade subtrativa de modo que as tensões entre as buchas adjacentes nunca poderia ser maior do que a tensão primária já presente. Assim, os transformadores construídos segundo as normas ANSI, hoje são aditivos se: a tensão é 8660V ou inferior e a potência menor ou igual a 200kVA; caso contrário, eles são subtrativos.

Lembrando que a diferenciação citada, quanto à fabricação, é estritamente dos transformadores fabricados segundo a norma estadunidense.

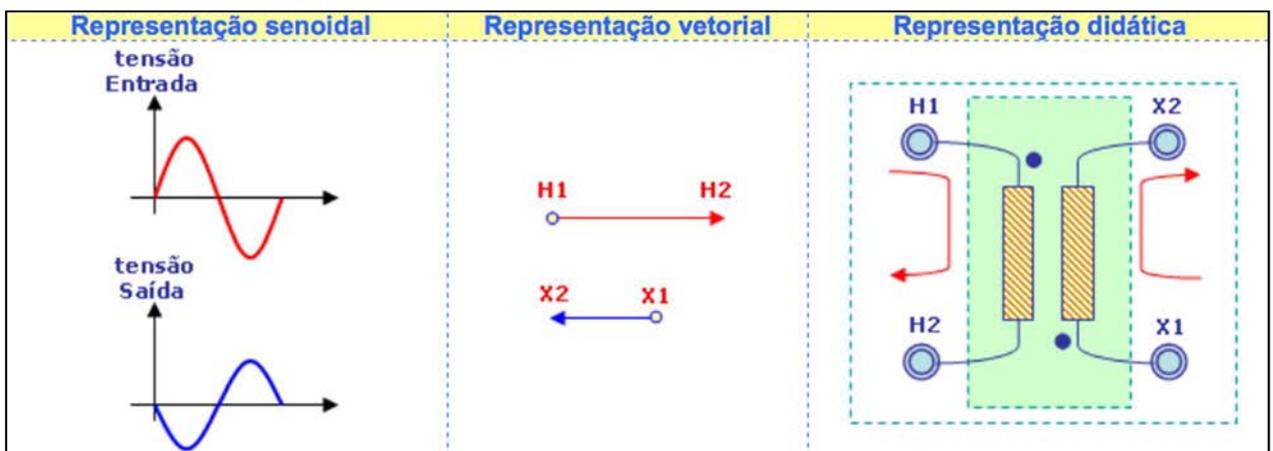
Transformadores construídos segundo a norma canadense são todos com polaridade aditiva, enquanto aqueles construídos segundo os padrões mexicanos possuem polaridade subtrativa, assim como os transformadores construídos segundo a ABNT.

“A polaridade de um transformador é a marcação existente nos terminais dos enrolamentos dos transformadores indicando o sentido da circulação de corrente em um determinado instante em consequência do sentido do fluxo produzido”. [4]

A maneira como as espiras são enroladas no enrolamento primário e secundário é o que determina a polaridade. Ainda, segundo a ABNT recomenda-se que os terminais de tensão superior sejam marcados com H_1 e H_2 e os de tensão inferior com X_1 e X_2 .

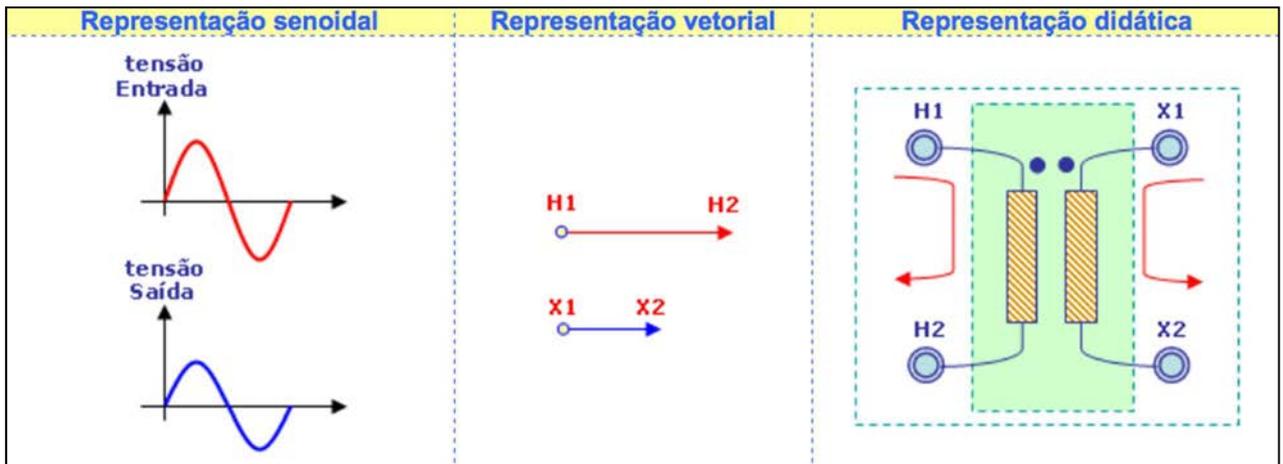
As representações da polaridade subtrativa e aditiva de um transformador monofásico são mostradas na Figura 2 e na Figura 3.

Figura 2 – Representações para polaridade subtrativa



Fonte: Clube da eletrônica – Eletricidade[11]

Figura 3 – Representações para polaridade aditiva

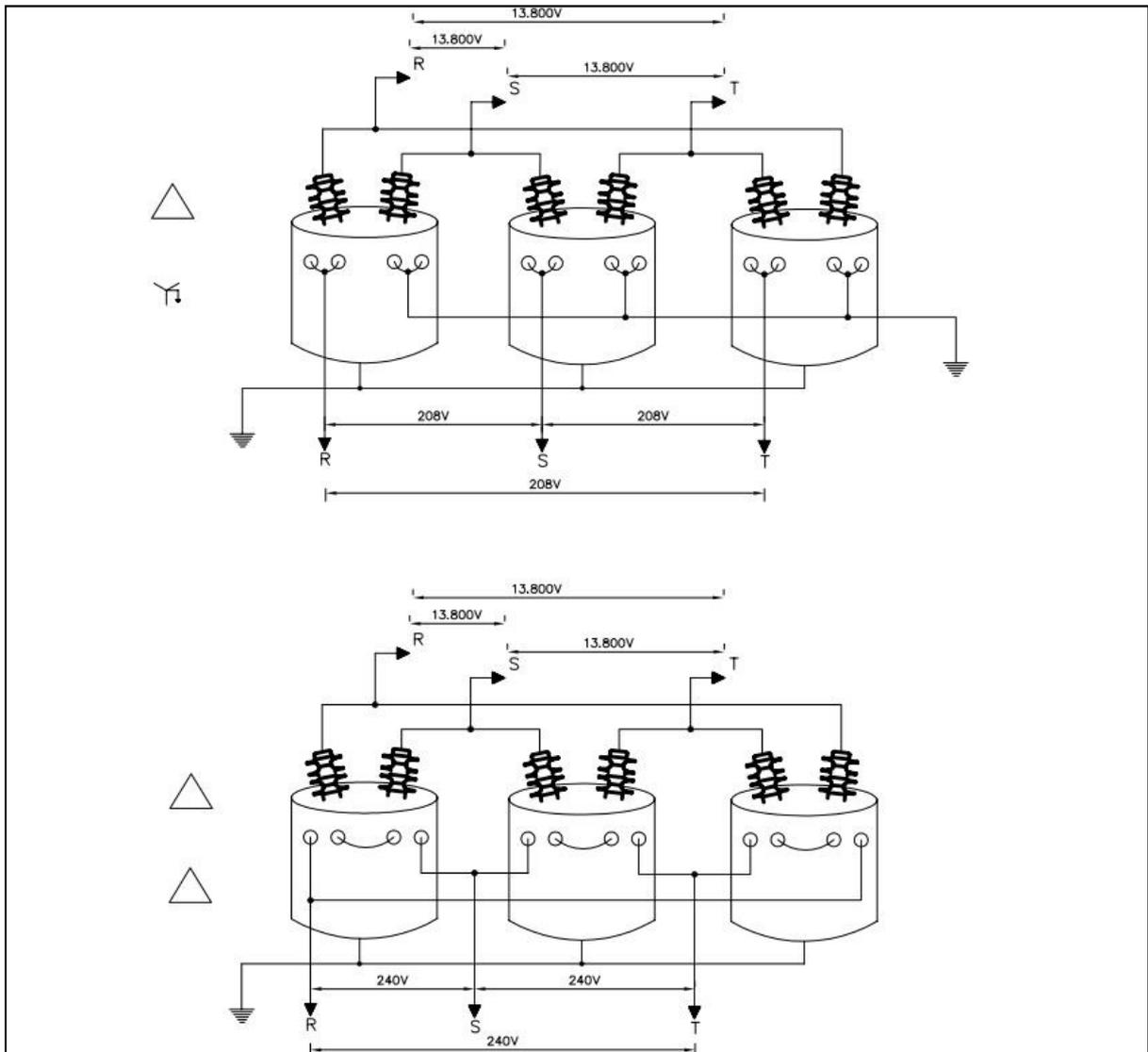


Fonte: Clube da eletrônica – Eletricidade[11]

A polaridade nos transformadores torna-se importante quando se trata de paralelismo de transformadores, pois, quando conectamos dois ou mais transformadores em paralelo, forma-se uma malha pelas conexões dos secundários então, se todos os transformadores tiverem a mesma polaridade, a soma das forças eletromotrizes (fem) se anula, ou seja, sua tensão resultante será zero, o que impede o surgimento de uma corrente de circulação com valores elevados visto que a mesma apenas seria limitada pelas impedâncias secundárias.

A Figura 4 retrata um exemplo esquemático de paralelismo de transformadores monofásicos para alimentar uma rede trifásica, método muito utilizado em várias cidades como, por exemplo, São Paulo-SP.

Figura 4 – Exemplos de Transformadores monofásicos em paralelo, configurações Delta (Δ) / Estrela (Y) e Delta (Δ) / Delta (Δ).



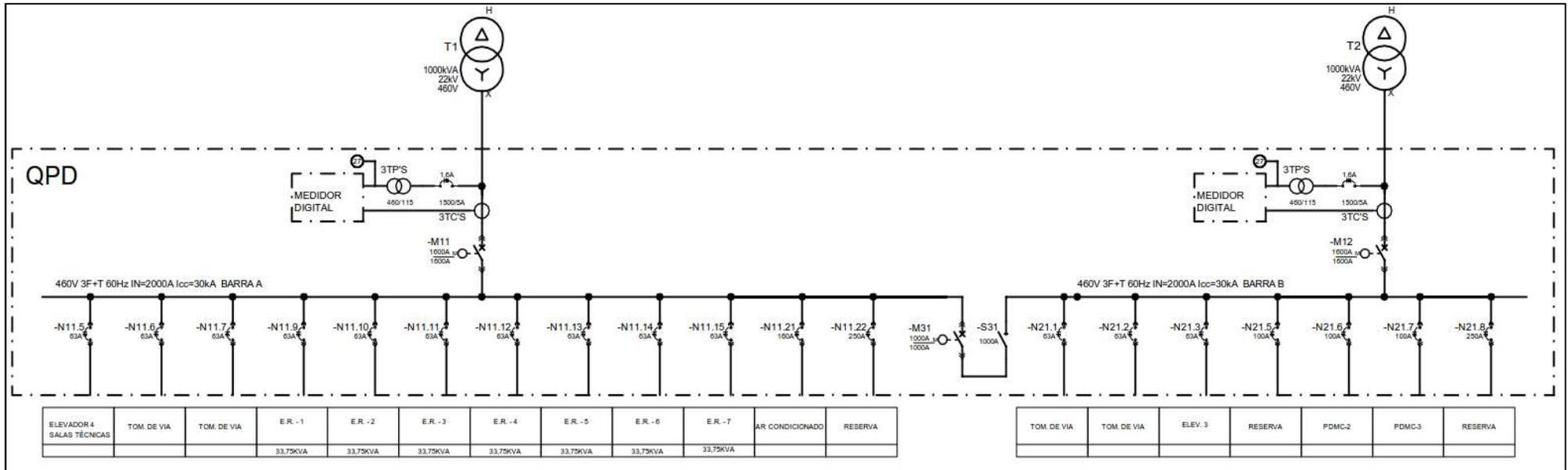
Fonte: Do autor.

Outro exemplo importante são os circuitos de medição e proteção nos quais são utilizados transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP). Caso haja uma inversão na polaridade nesses circuitos, a corrente de circulação do secundário inverterá podendo assim causar a atuação indevida da proteção ou uma leitura enganosa das medidas.

E ainda pode-se citar da importância do paralelismo de transformadores, em algumas subestações, como confiabilidade, qualidade de energia e a manutenção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

A Figura 5 demonstra a alimentação de um painel de baixa tensão com dois transformadores redundantes e ainda TC's para medição e TP's para medição e proteção.

Figura 5 – Exemplo esquemático da operação em paralelo de transformadores em subestações.



Fonte: Do autor.

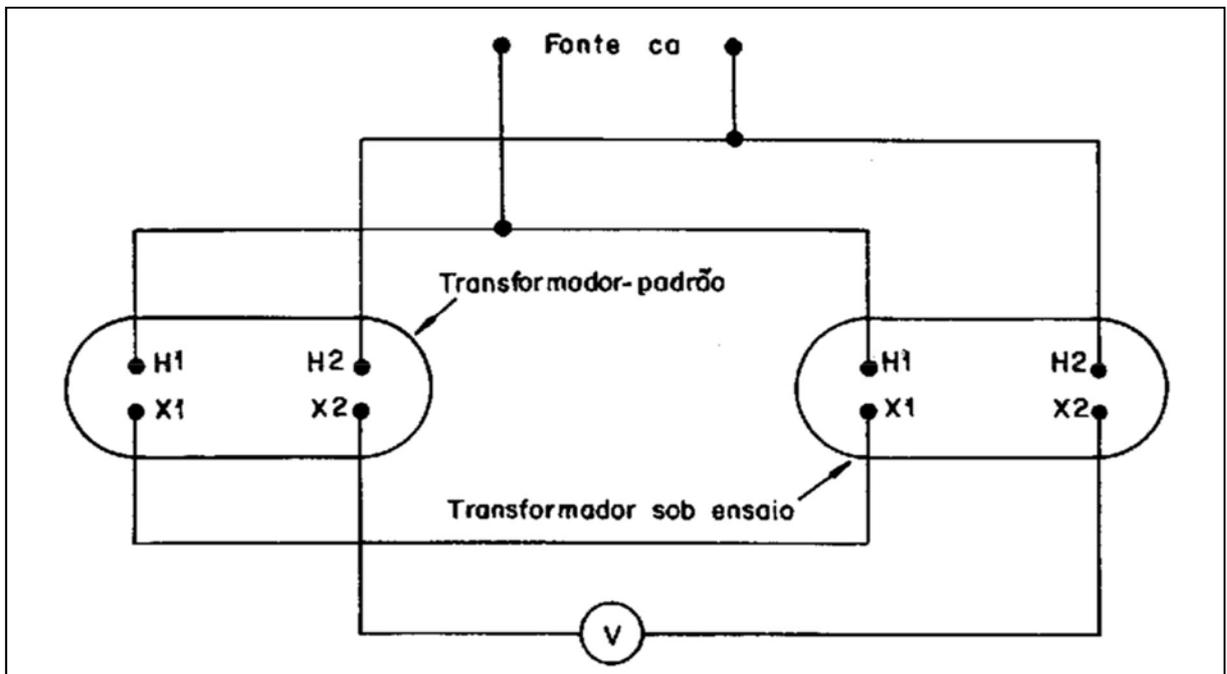
Para determinar a polaridade de transformadores monofásicos, é recomendado, segundo a norma NBR 5356 [3], utilizar os seguintes métodos²:

- Método do transformador padrão;
- Método do golpe indutivo com corrente contínua;
- Método da corrente alternada;
- Método do transformador de referência de relação variável.

2.2.1 Método do transformador padrão

O método do transformador-padrão consiste em comparar o transformador a ensaiar com um transformador-padrão de polaridade conhecida, que tenha a mesma relação de tensões nominais, de acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de ligação método do transformador padrão



Fonte: NBR 5380/1993 – Figura 4 - Anexo A [12]

² Os métodos apresentados pela norma também são utilizados para se verificar a polaridade correspondente a cada fase de um transformador polifásico.

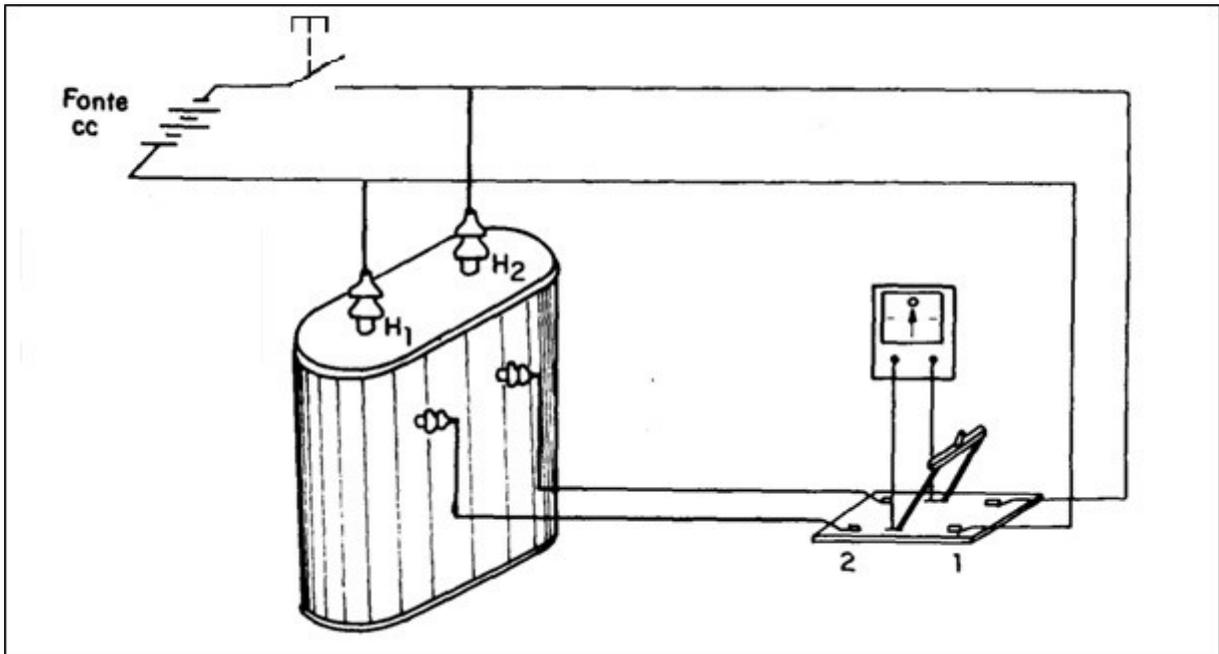
Como mostra a Figura 6, para a realização do teste, deve-se ligar em paralelo os enrolamentos de alta tensão dos dois transformadores. É necessária atenção ao fazer essa conexão, pois se devem ligar os terminais marcados com a mesma polaridade.

Após o passo anterior, deve-se ligar, na baixa tensão, os terminais da esquerda de quem olha pelo lado da baixa tensão, deixando livre os da direita. Em seguida é necessário aplicar uma tensão reduzida no enrolamento de alta tensão (H1 e H2 do transformador) e medir a tensão entre os dois terminais livres. Se o valor obtido da medição for nulo, ou praticamente nulo então, os dois transformadores tem a mesma polaridade, caso o valor da tensão medida pelo voltímetro seja o dobro da baixa tensão esperada, os dois transformadores possuem polaridades opostas.

2.2.2 Método do golpe indutivo com corrente contínua

Para a realização deste método, é necessário ligar os terminais de alta tensão a uma fonte de corrente contínua. Feito isso, instala-se um voltímetro de corrente contínua entre esses terminais a Figura 7 chave na posição 1, de maneira a se obter uma deflexão positiva no instante da comutação (golpe). Por meio de uma chave, transfere-se cada terminal do voltímetro para o terminal de baixa tensão diretamente adjacente, a Figura 7 chave na posição 2. Logo em seguida, a fonte de alimentação de corrente contínua é desligada, e observa-se o sentido de deflexão do voltímetro.

Figura 7 – Esquema de ligação para método do golpe indutivo com corrente contínua



Fonte: CUNHA (2015) [13]

A conclusão é que para quando se há duas deflexões no mesmo sentido, a polaridade é subtrativa, logo, se as deflexões são em sentidos opostos, a polaridade é aditiva.

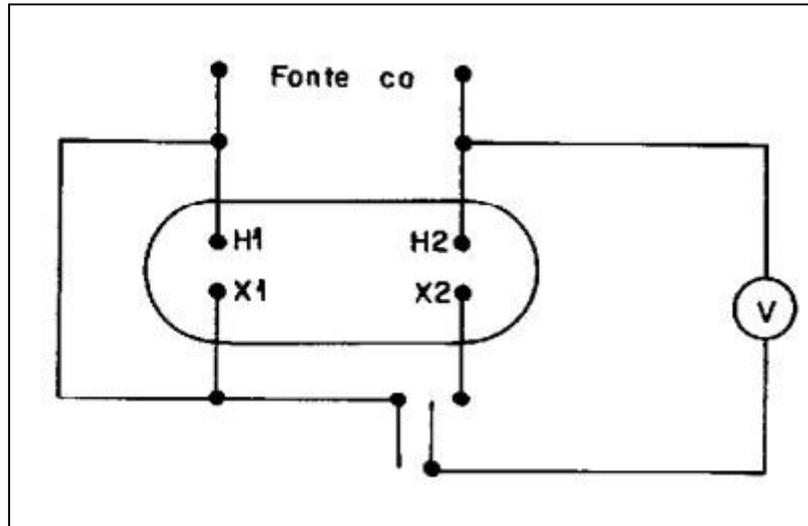
2.2.3 Método da corrente alternada

O método da corrente alternada, segundo a NBR 5356-1:2007, é iniciado conectando os terminais adjacentes, sendo um de alta e outro de baixa tensão, como mostra a Figura 8, onde os terminais H_1 e x_1 estão conectados entre si.

Feita a conexão entre os terminais adjacentes, aplica-se uma tensão alternada aos terminais de alta tensão, que seja coerente com os dados de placa do transformador, efetuando a leitura da tensão de um voltímetro, que deverá estar conectado entre os terminais de alta tensão. Após este passo, retira-se o voltímetro dos terminais de alta tensão colocando-o entre os terminais adjacentes livres, que no caso da Figura 8, são os terminais H_2 e x_2 .

Concluindo, Se a leitura feita nos terminais de alta tensão (H_1 e H_2) for maior do que a leitura feita nos terminais adjacentes (H_2 e x_2), a polaridade do transformador é subtrativa; em caso contrário, será aditiva.

Figura 8 – Esquema de ligação para método da corrente contínua



Fonte: NBR 5380/1993 – Figura 7 - Anexo A[12]

Porém, a utilização deste método é limitada para transformadores cuja relação de transformação seja no máximo 30:1, pois assim a variação de leitura dos voltímetros possa ser devidamente contemplada, se caso o transformador tenha relação de transformação maior do que a mencionada deve-se utilizar um transformador de potencial para realizar as medições.

2.2.4 Método do transformador de referência de relação variável

Para este método, se faz necessário o uso de um equipamento construído especialmente para este fim, o qual é composto por um transformador de relação variável e um indicador de tensão. Quando o indicador de tensão indicar uma deflexão nula, a polaridade é a mesma do instrumento.

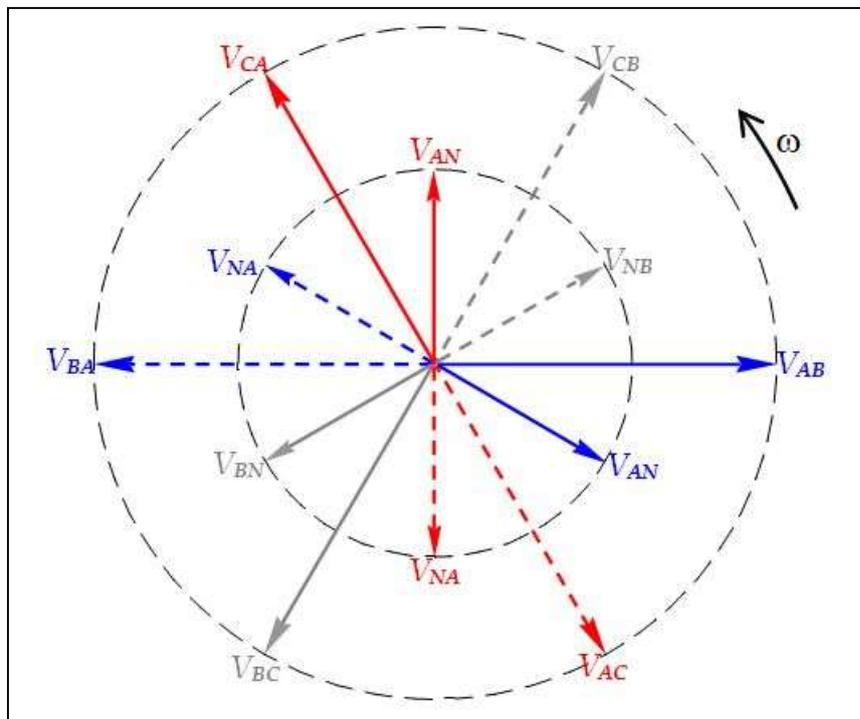
2.3 DEFASAMENTO (DESLOCAMENTO) ANGULAR

Para transformadores trifásicos, apenas o conceito de polaridade é insuficiente para apresentar uma relação devida entre as tensões induzidas nos enrolamentos primário e secundário. Isso se deve aos diversos tipos de conexões dos enrolamentos, por exemplo, delta (Δ), estrela (Y), zigzague (ZZ) ou delta estendido (ΔE), também da sequência de fases de

alimentação e até mesmo a variação do número de espiras para o caso das conexões ZZ e ΔE . Nestes casos, utiliza-se a diferença de fases (defasamento) ou deslocamento angular entre as tensões dos terminais de tensão inferior e tensão superior.

A determinação do defasamento angular seguirá uma metodologia de determinação do ângulo entre os fasores estabelecido pela norma NBR 5356. O estudo será iniciado pelo diagrama de fasores de tensão em um sistema trifásico e a defasagem das 12 tensões de um sistema trifásico, conforme ilustrado na Figura 9. A fim de exemplificar, utilizaremos o caso de transformadores com conexão Δ (horário) / Δ (horário) conforme mostrado na Figura 10.

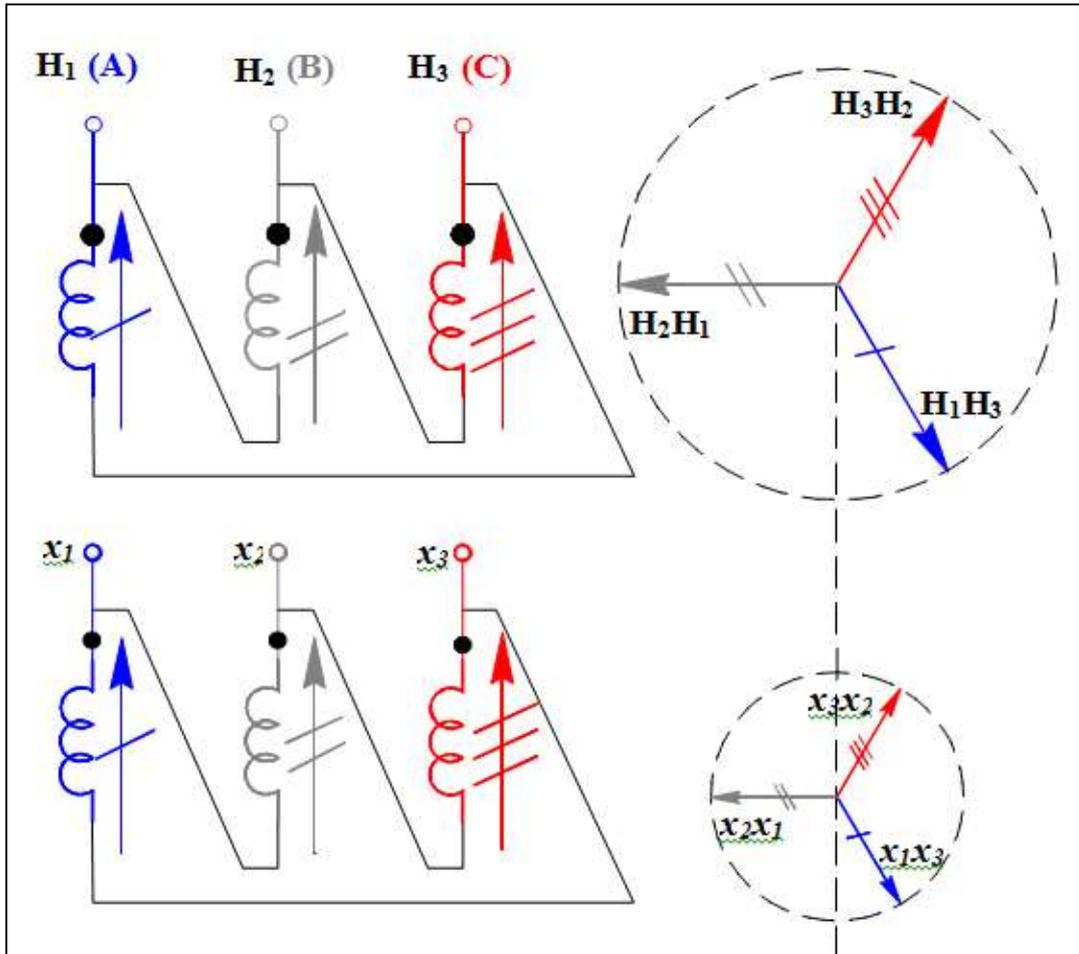
Figura 9 – Diagrama de fasores de tensão em um sistema trifásico



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015). [4]

Cabe ainda ressaltar que o prévio conhecimento do defasamento angular em transformadores será de suma importância na operação de transformadores em paralelo, bem como nas conexões devidas de TP's e TC's para circuitos de medição e proteção em sistemas elétricos. Outra aplicação importante, a qual dará ênfase o Capítulo 5 (com o uso de transformadores com conexões especiais), é na eletrônica de potência, no estudo de pontes conversoras, onde o defasamento angular de transformadores deve ser observado para obterem-se as tensões retificadas desejadas nas pontes de 12, 24, 48 pulsos.

Figura 10 - Obtenção do defasamento angular para um transformador Δ (horário) / Δ (horário).



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015). [4]

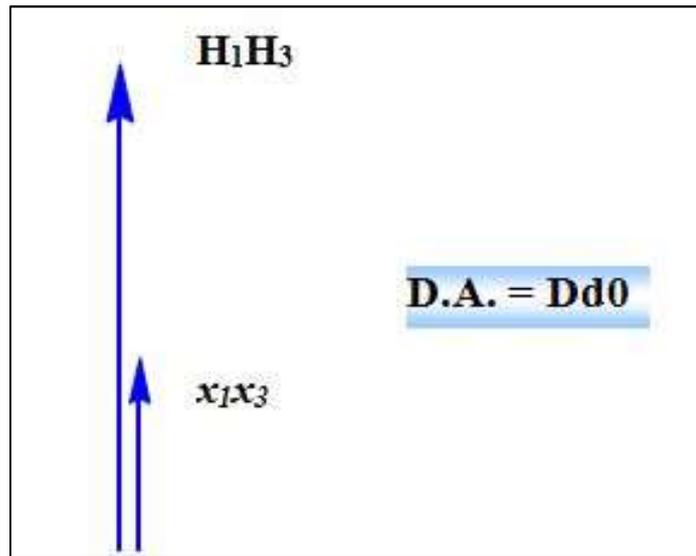
A metodologia para a determinação deve seguir os seguintes passos:

- Primeiramente, é necessária a determinação da polaridade entre as bobinas do primário e do secundário. Essa determinação pode ser feita pelos métodos apresentados no tópico 4.1 do presente trabalho. Pela Figura 10 observando a forma em que estão dispostas as conexões no transformador, percebe-se que as bobinas apresenta polaridade subtrativa, logo os fasores das respectivas fems em cada fase estarão defasados de 0° ;
- Dando sequência, observando a sequência de fase das buchas do primário (H₁, H₂, H₃), monta-se o diagrama de fasores do lado que é alimentado o transformador pela rede elétrica, segundo o diagrama de fasores de tensão mostrado na Figura 9. A partir disso, obtém-se o diagrama de fasores ilustrado na parte direita da Figura 10, ao lado

da conexão Δ do primário. O nome de cada um dos fasores deve ser atribuído de acordo com a letra e índice referente a cada uma das buchas;

- Conhecendo-se a polaridade entre as bobinas, sabe-se que cada um dos fasores induzidos nas bobinas do secundário do transformador é defasado de 0° dos respectivos fasores do primário do transformador. Posicionando o fasor do secundário de cada fase do fasor do primário, obtém-se o diagrama de fasores ilustrado pela Figura 10 ao lado do Δ do secundário de 0° . O nome atribuído a cada um dos fasores será conforme as letras designadas para as respectivas buchas do enrolamento do secundário;
- Escolhendo-se dois fasores de linha ou de fase, considerando-se sempre os mesmos índices, um de lado primário e um de lado secundário, mede-se o ângulo estabelecido entre eles. Conforme a NBR 5356, o ângulo a ser considerado é aquele definido entre o fasor de menor tensão para o fasor de maior tensão, sempre no sentido anti-horário.
- Para que a resposta seja de acordo com a norma, o fasor de maior tensão deverá ser posicionado na posição vertical, como se estivesse representando o ponteiro dos minutos em um relógio, indicando a posição 12 de um relógio. O fasor de menor tensão seguirá o mesmo deslocamento efetuado para fasor de maior tensão. A Figura 11 ilustra esta situação.

Figura 11 – Defasamento angular determinado conforme norma NBR 5356, para montagem Δ (horário) / Δ (horário).



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015). [4]

Tomando-se o ângulo formado pelo fasor de menor tensão, em relação ao fasor de maior tensão, no sentido anti-horário, o ângulo obtido vale 0° . Pela norma, deve-se informar o referido ângulo referente ao defasamento angular conforme indicado ao lado da representação de fasores da Figura 11, ou seja: D(maiúsculo) representando o delta de maior tensão; d(minúsculo) representando o delta de menor tensão; seguido do número 0 que significa a hora indicada pelos fasores caso fossem os ponteiros de um relógio. Neste caso o ângulo seria 0° .

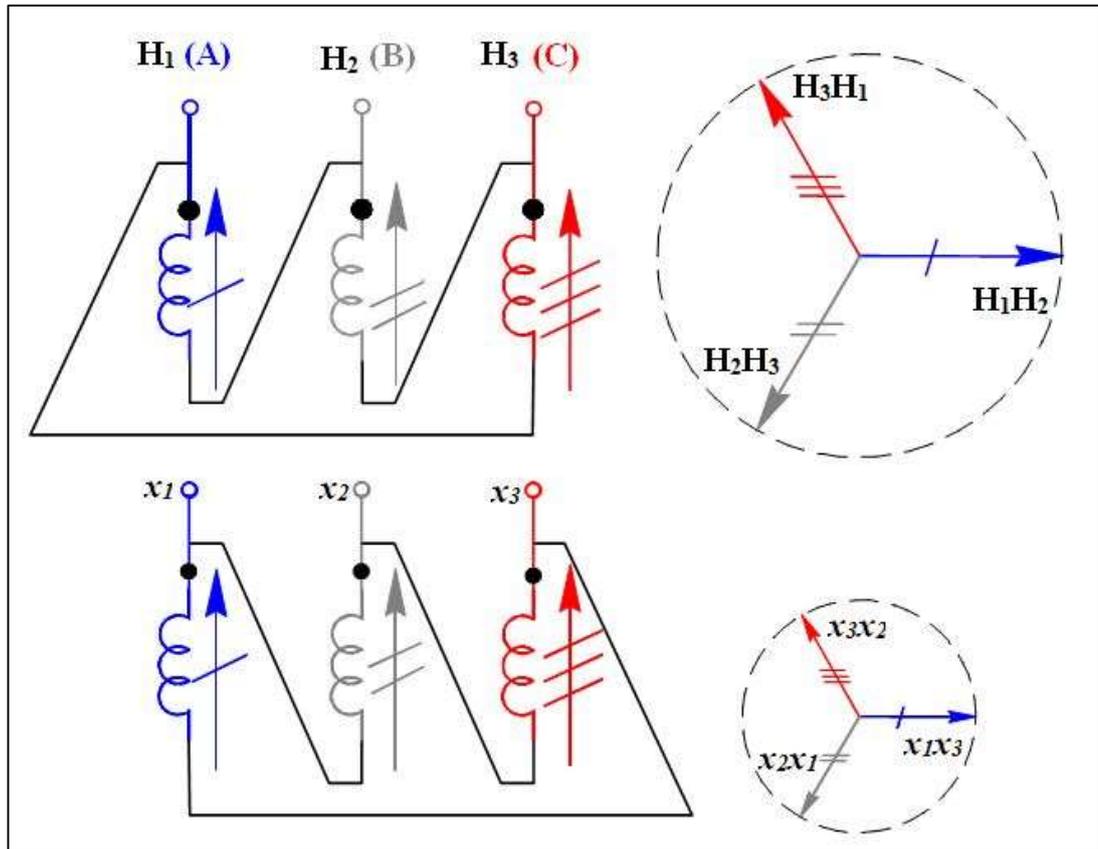
Explicado o procedimento para a determinação do defasamento angular da conexão Δ (horário) - Δ (horário), o mesmo procedimento será tomado para a determinação do defasamento angular da conexão Δ (anti-horário) - Δ (horário).

Sabe-se que uma inversão na conexão delta, de sentido horário para o anti-horário significa um deslocamento, neste caso um atraso, nos fasores de tensão de 60° , para a situação em análise, a conexão delta referente ao lado de tensão superior será invertida para delta anti-horário mantendo-se a conexão delta das bobinas de tensão inferior, conforme ilustrado na Figura 12. Assim sendo, para mesma polaridade neste caso subtrativa, o defasamento angular esperado para esta situação será de 300° .

Segundo a norma os fasores a serem comparados são os fasores de linha e com mesmo índice. Pela Figura 12 percebe-se que os índices dos fasores do primário estão invertidos com relação aos do secundário. Ou seja, se for escolhido o fasor H_2H_3 do primário, o fasor

correspondente à fase do secundário será o x_2x_3 . Pelo diagrama de fasores, na Figura 12, o referido fasor está a 180° do fasor x_3x_2 ;

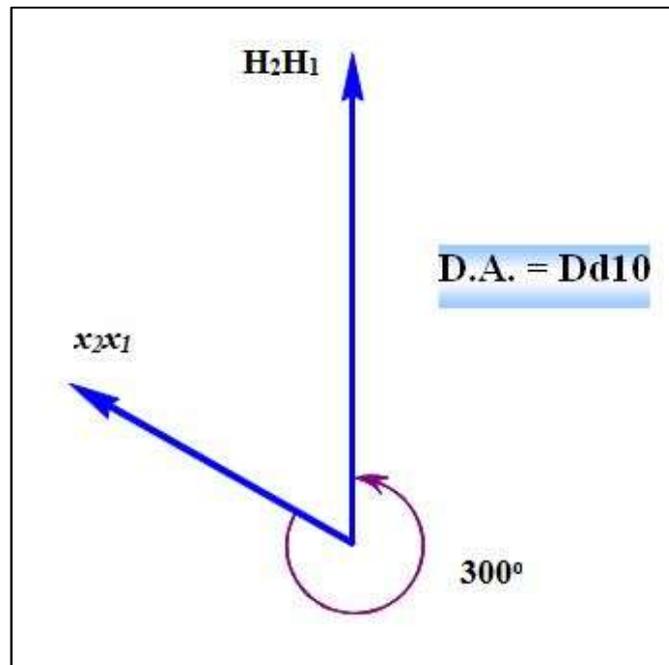
Figura 12 - Obtenção do defasamento angular para um transformador Δ (anti-horário) / Δ (horário).



Fonte: (REIS, ROSSI, 2015). [4]

Tomando-se o ângulo formado pelo fasor de menor tensão (primário) em relação ao fasor de maior tensão (secundário), no sentido anti-horário, o ângulo definido entre os fasores é 300° , conforme esperado. Pela norma a representação para o defasamento angular deve informada conforme indicado ao lado da Figura 13, ou seja: D(maiúsculo) representando o delta de maior tensão; d(minúsculo) representando o delta de menor tensão; seguido do número 10 que seria a hora indicada pelos fasores caso fossem os ponteiros de um relógio, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Defasamento angular determinado conforme norma NBR 5356, para montagem Δ (anti-horário) / Δ (horário).



Fonte: (REIS, ROSSI, 2015). [4]

Para a determinação dos ângulos entre os fasores, e a representação dos mesmos, para transformadores com conexões especiais (ZZ e ΔE), a norma ABNT NBR 5356 será seguida e apresentada no Capítulo 5.

3 TRANSFORMADORES COM CONEXÕES ESPECIAIS (ZIGUEZAGUE E DELTA ESTENDIDO)

Neste capítulo serão abordados transformadores com enrolamentos especiais, mais especificamente conexões delta estendido (ΔE) e zig-zague (ZZ).

Transformadores com conexões especiais são largamente difundidos no ramo industrial, em instalações industriais de alta potência, esses transformadores são elementos essenciais para o cancelamento das harmônicas nos sistemas retificadores a múltiplos pulsos.

Porém, seu emprego não é apenas visando a distorção harmônica no sistema, mas sim como transformadores retificadores, para sistemas multiconversores, como por exemplo, sistemas de tração elétrica em corrente contínua para sistemas metroferroviários e sistemas com conversores estáticos (siderúrgicas, metalúrgicas, indústria química, petroquímica, entre outras).

Deve-se enfatizar que é grande a perspectiva de uso dos transformadores com conexões zig-zague e delta estendido tanto no presente como futuramente, nos sistemas multiconversores citados, pois os mesmos são capazes de fornecer defasamentos angulares fora dos convencionais de 0° e 30° .

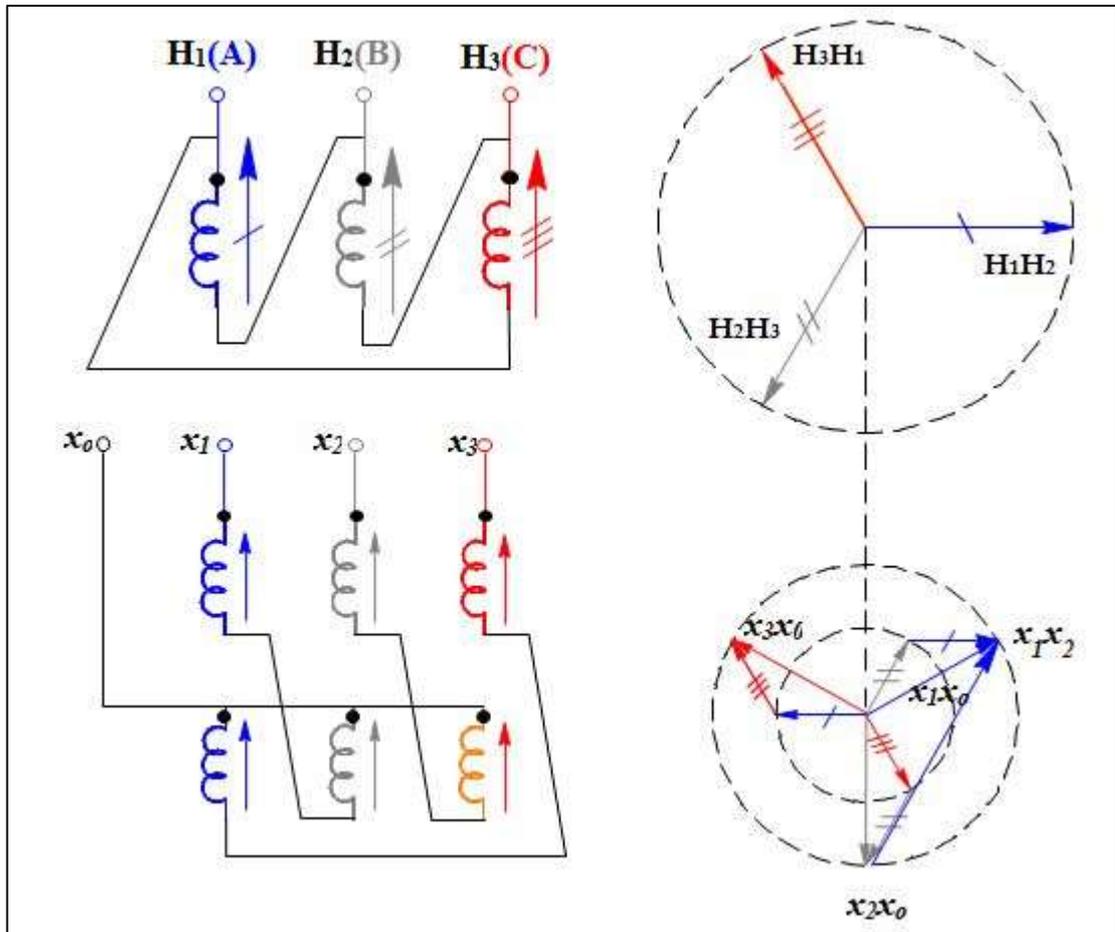
3.1 CONEXÃO ZIGUEZAGUE

A conexão zig-zague, também é conhecida como conexão estrela interconectada, é assim denominada devido a sua característica construtiva de ligação entre frações de bobinas de outras fases (pernas do núcleo) do transformador de forma idêntica a um ponto de zig-zague. Esta conexão tem algumas características das conexões Y e Δ , combinando vantagens destas, e possui a vantagem de distribuir de forma mais uniforme o fluxo produzido pelas correntes de carga, equalizando as correntes entre as fases.

O transformador zig-zague possui seis bobinas e três núcleos. A primeira bobina de cada núcleo é conectada pelo contrário à segunda bobina no núcleo seguinte. As segundas bobinas são, em seguida, ligadas em conjunto de maneira a formar o neutro e as fases são ligadas às bobinas primárias. Desta maneira, cada fase fica “casada” com outra fase e as tensões se anulam. Logo, a corrente no neutro poderia ser desconsiderada e assim, o neutro deste

transformador poderia ser aterrado. Na Figura 14 podemos verificar um transformador Δ (anti-horário)-ZZ(horário) assim como seus ângulos de defasagem, os quais serão demonstrados na sequência.

Figura 14 – Conexão e diagrama de fasores Delta (anti-horário) - Ziguezague (horário)



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015). [4]

O procedimento para a determinação do defasamento angular desta ligação é a mesma apresentada no Tópico 4.2, onde, resumidamente, encontra-se a polaridade dos grupos de bobina, montam-se os diagramas de fasores conforme o lado direito da Figura 14.

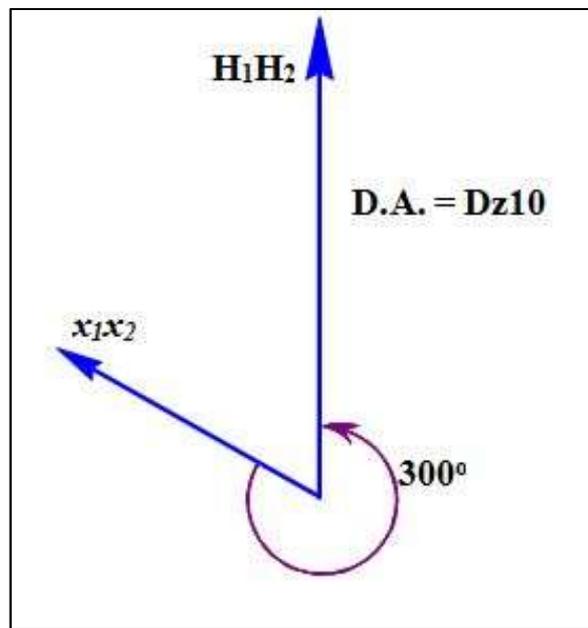
A montagem do diagrama de fasores para o ziguezague possui certa complexidade, porém, apesar de possuir seis bobinas, ainda é um transformador com três núcleos.

É conveniente iniciar a montagem pelos fasores que representam o centro da estrela da conexão, isto é o diagrama composto pelos fasores das bobinas conectadas em estrela ao final do ziguezague. Após a montagem do diagrama de fasores da estrela, percebe-se que o fasor da bucha x_1 está conectado ao fasor da fase “b” da estrela, porém este fasor está a 120° da fase “b”

e a 180° do fasor da sua respectiva fase, representando uma soma fasorial entre os respectivos fasores. Para montagem dos outros fasores segue-se o mesmo procedimento.

Cada fasor medido da ponta da bucha para o centro da estrela é denominado por: x_1x_0 , x_2x_0 e x_3x_0 . A medida do defasamento angular deve ser realizada conforme o estabelecido pela norma NBR 5356 e demonstrada anteriormente, para o caso específico deste par de conexões mediu-se o defasamento angular entre os fasores H_1H_2 e x_1x_2 . E os respectivos fasores estão indicados na Figura 15, onde se observa um ângulo de 300° entre os referidos fasores.

Figura 15 – Defasamento angular para conexão Δ (anti-horário) – ZZ (horário)



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015) [4]

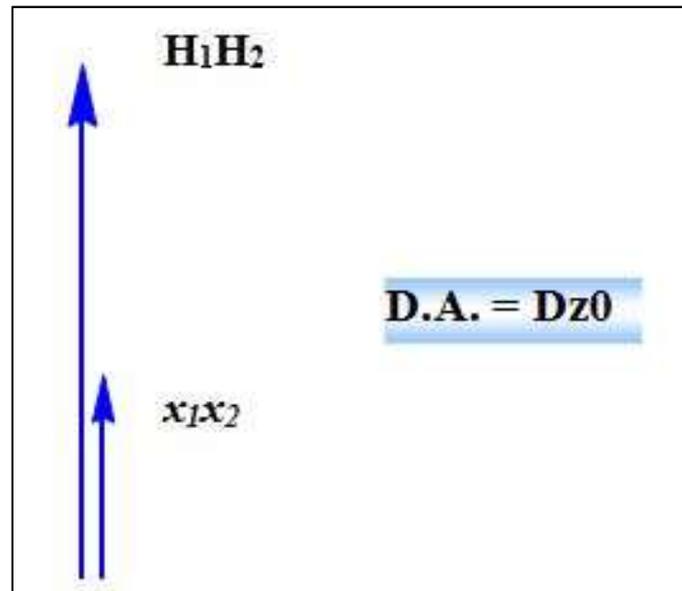
Para as outras conexões possíveis de transformadores com conexões delta-ziguezague a mesma metodologia para encontrar o defasamento angular é empregada.

Nas demais conexões, os fatores que influenciam na diferença do defasamento angular são: polaridade e sentido da conexão das bobinas (horário ou anti-horário). Portanto, fazendo o estudo do defasamento angular para um caso, os outros podem vir por consequência já que, como já demonstrado, quando variamos a polaridade da conexão, há um deslocamento fasorial de 180° . Por sua vez, quando se varia o sentido da conexão das bobinas, do sentido horário (h) para o sentido anti-horário (ah), por exemplo, temos um atraso no deslocamento fasorial da tensão em 60° .

Como exemplo, tomamos o ângulo de defasamento de 300° demonstrado na Figura 15, que mostra o defasamento de uma conexão Delta anti-horário e ziguezague horário e polaridade

subtrativa. Se acaso quiséssemos saber o defasamento angular da conexão Delta horário e Ziguezague horário, o seguinte pensamento deve ser levado em consideração: Como será alterado o sentido da conexão entre as bobinas do primário, de anti-horário para horário, devemos adiantar o fasor do terminal primário em 60° , já que conforme demonstrado anteriormente, um enrolamento de horário para anti-horário, tem um atraso de 60° , logo, no inverso, tem-se um adiantamento de 60° do fasor. Portanto, nos resulta a Figura 16.

Figura 16 - Defasamento angular para conexão Δ (horário) – ZZ (horário)



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015) [4] – Modificado pelo autor

Tomadas as premissas para a determinação do defasamento angular das diferentes configurações para transformadores com conexão delta-ziguezague os demais defasamentos angulares possíveis de se obter são mostrados na Tabela 1.

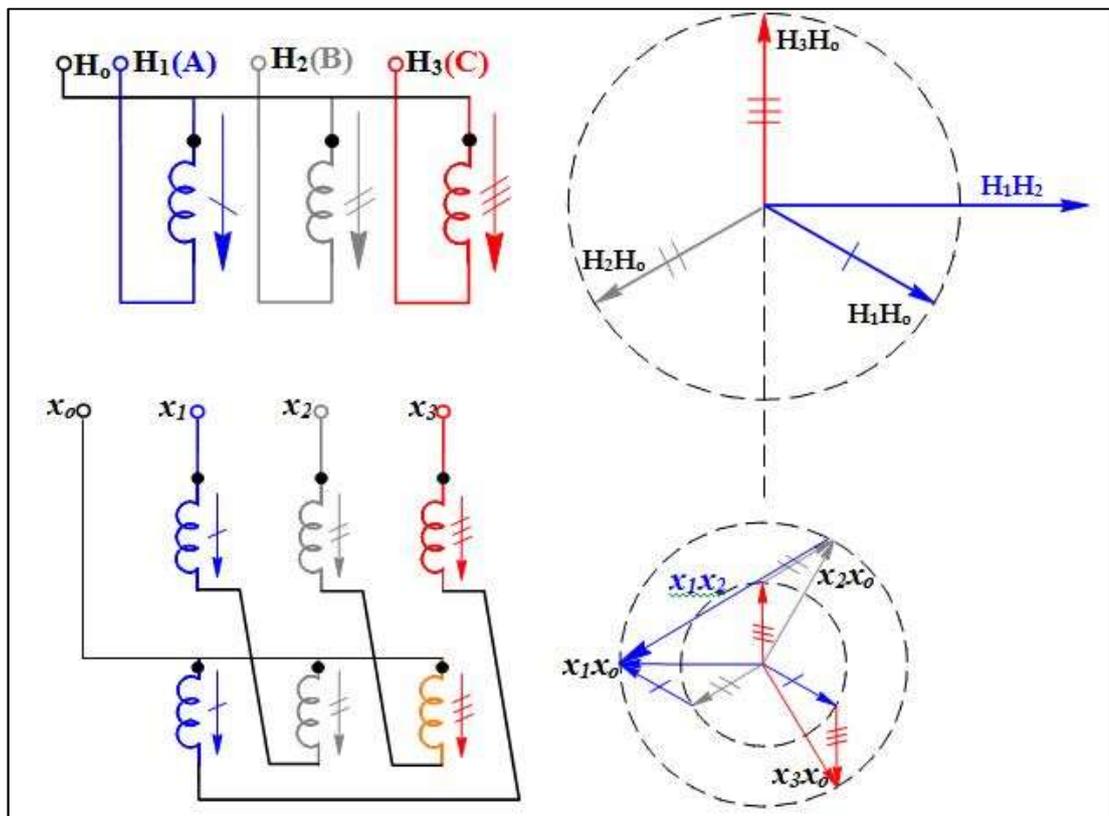
Tabela 1 – Defasamentos angulares possíveis para Delta-Ziguezague

Conexão	Polaridade	Defasamento angular	Nomenclatura segundo NBR 5356
Δ (h) - Ziguezague (ah)	Subtrativa	300°	Dz10
Δ (h) - Ziguezague (h)	Subtrativa	0°	Dz0
Δ (ah) - Ziguezague (h)	Subtrativa	60°	Dz2
Δ (h) - Ziguezague (ah)	Aditiva	120°	Dz4
Δ (h) - Ziguezague (h)	Aditiva	180°	Dz6
Δ (ah) - Ziguezague (h)	Aditiva	240°	Dz8

Fonte: Do autor

A próxima análise será para transformadores com conexão estrela (Y) – Ziguezague (ZZ) anti-horário (ah), ilustrado pela Figura 17.

Figura 17 - Conexão e diagrama de fasores Estrela - Ziguezague (horário)

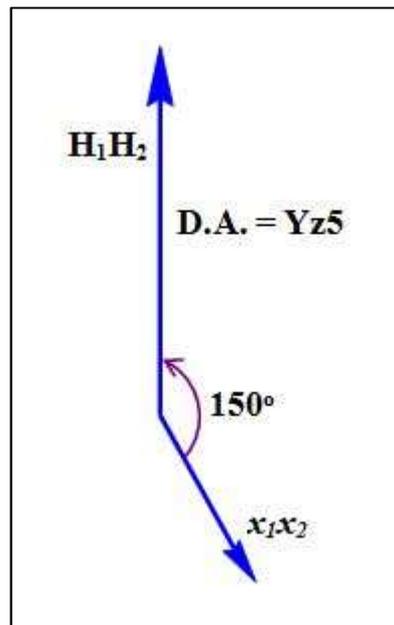


Fonte: (REIS, ROSSI, 2015) [4]

Da mesma maneira com que foi tratada anteriormente a conexão ziguezague, cada fasor medido da ponta da bucha da conexão ziguezague para o centro da estrela é denominado por:

x_1x_0 , x_2x_0 , x_3x_0 . Ainda, seguindo a norma, a medida do defasamento angular deve ser realizada da mesma maneira que anteriormente discutido. Logo, para este caso, tomaremos o par de fasores H_1H_2 e x_1x_2 para determinar o defasamento angular para a ligação demonstrada na Figura 17, o que nos resulta um ângulo de 150° , conforme mostrado na Figura 18.

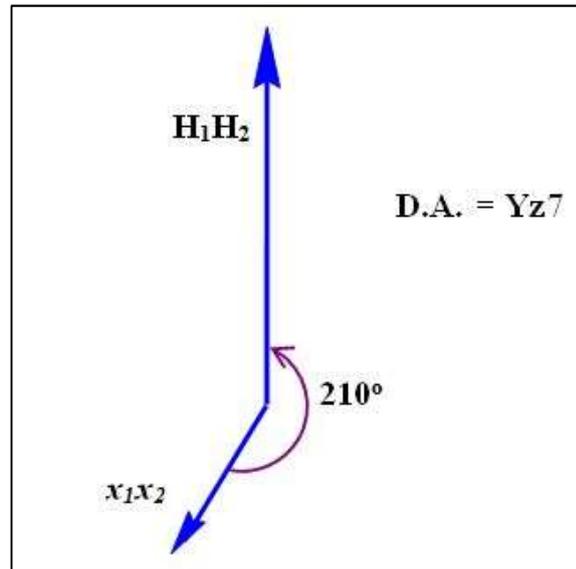
Figura 18 - Defasamento angular para conexão Y – ZZ (horário)



Fonte: (REIS, ROSSI, 2015) [4]

Ainda, para a determinação do defasamento angular para a conexão estrela (Y) – Ziguezague (anti-horário) serão utilizados de forma análoga, todos os procedimentos e premissas adotados anteriormente para as outras conexões. Logo, para a conexão citada teremos o defasamento angular mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Defasamento angular para conexão Y – ZZ (anti-horário)



Fonte: Do autor

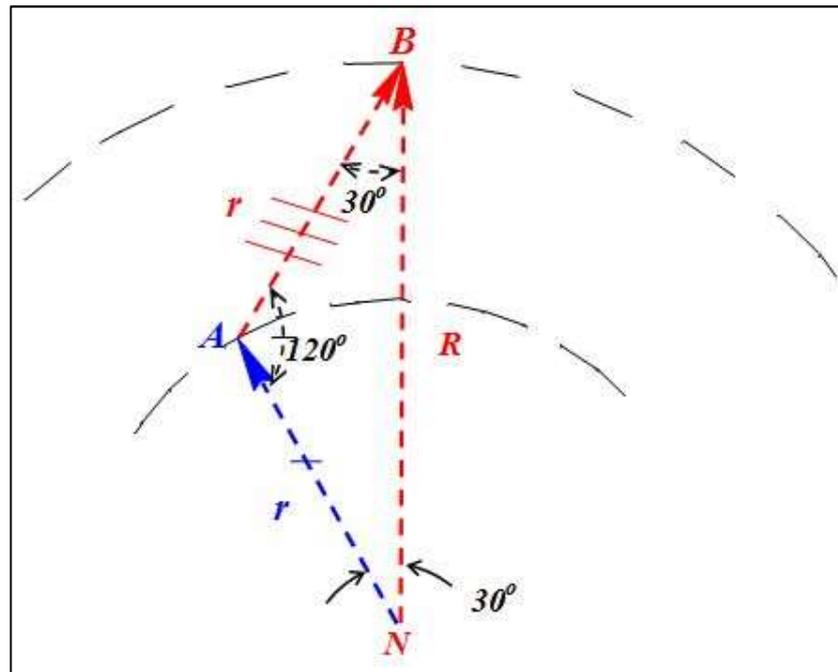
Entretanto, um dos maiores interesses na conexão zig-zague é sua capacidade de fornecer defasamentos angulares fora dos convencionais, múltiplos de 30° e diferentes de 0° , principalmente visando conversores de múltiplos pulsos. Em seguida, será demonstrada a metodologia para obter o defasamento angular necessário, por meio de alterações nos “taps” do transformador no lado do zig-zague.

3.1.1 Obtenção de defasamentos angulares genéricos para conexão zig-zague

Para a determinação de defasamentos angulares genéricos, é necessária a análise individual de uma das pernas da conexão zig-zague da Figura 14, conforme mostra o diagrama da Figura 20.

Como demonstração e análise, será utilizado um sistema multiconversor de 24 pulsos, utilizando transformador Δ / Zig-zague. Tal configuração consta com a associação de quatro conversores de seis pulsos cada, em série ou paralelo, alimentados por transformadores nos quais os sinais de tensão de saída possuam um defasamento de 15° .

Figura 20 – Diagrama fasorial representativo de uma única perna da conexão zigzague



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015) [4]

Partindo-se da Figura 20, na determinação do “tap” para obtenção um ângulo de 15° para a conexão zigzague, tem-se as Equações (6) e (7):

$$\overline{AN} = r \quad (6)$$

$$\overline{AB} = r \quad (7)$$

Pela lei dos senos, temos a Equação (8):

$$\frac{\overline{BN}}{\text{sen}120^\circ} = \frac{\overline{AN}}{\text{sen}30^\circ} \quad (8)$$

Então, da (8), obtém-se a Equação (9):

$$\overline{BN} = R = r\sqrt{3} \quad (9)$$

Logo, da Figura 21, verificamos que para o ângulo de 15°, aplicando novamente a lei dos senos no triângulo (A'NB'), tem-se as Equações (10) e (11):

$$\frac{\overline{A'N}}{\text{sen } 15^\circ} = \frac{\overline{A'B'}}{\text{sen } 45^\circ} = \frac{r\sqrt{3}}{\text{sen } 120^\circ} \quad (10)$$

$$\overline{A'N} = \frac{\text{sen } 15^\circ}{\text{sen } 120^\circ} r\sqrt{3} \quad (11)$$

Logo,

$$\overline{A'N} = 0,51763809r$$

Ainda de (10), obtém-se a Equação (12):

$$\overline{A'B'} = \frac{\text{sen } 45^\circ}{\text{sen } 120^\circ} r\sqrt{3} \quad (12)$$

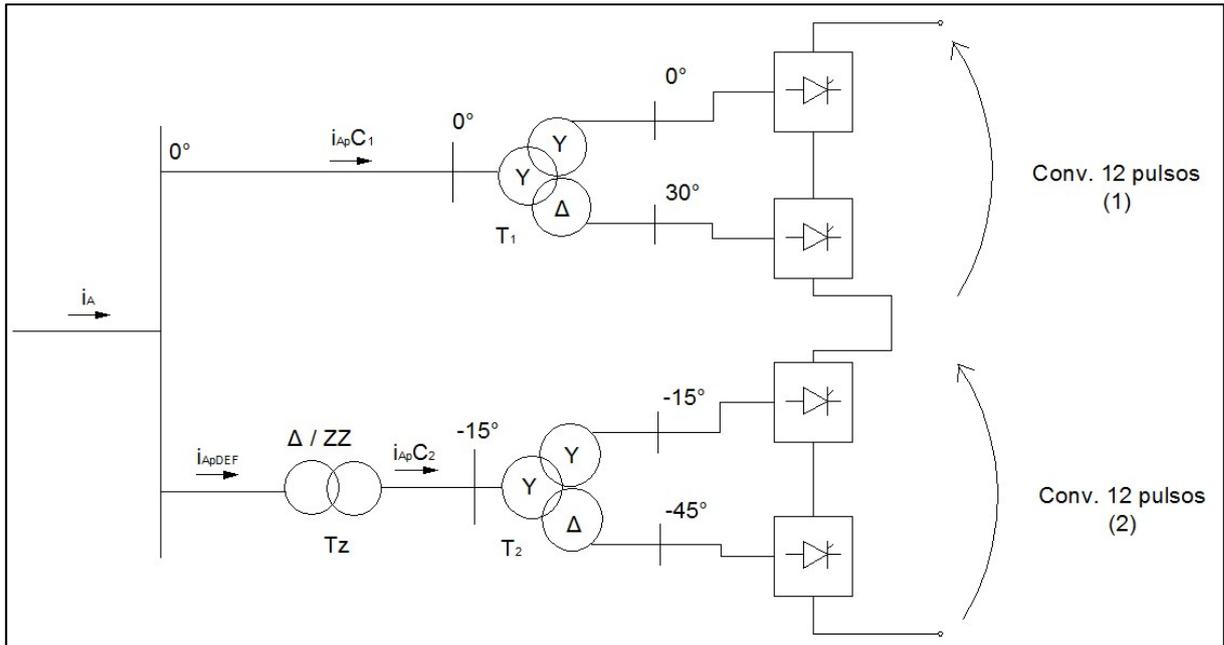
E, portanto:

$$\overline{A'B'} = r\sqrt{2} = 1,41421356r$$

Portanto, sendo o número de espiras, o mesmo para os enrolamentos AN e AB, chamando estes de N_1 , ainda considerando uma relação de espiras 1:1, deve-se fazer o seguinte ajuste nas espiras dos enrolamentos para obter-se o defasamento de 15° :

- O “*tap*” para o enrolamento AN deve ser diminuído 51,76% de $N_1 \rightarrow A'N = 51,76\% AN$;
- O “*tap*” para o enrolamento AB deve ser aumentado 41,42% de $N_1 \rightarrow A'B' = 141,42\% AB$;

Figura 22 – Configuração de um Sistema Conversor de 24 Pulsos



Fonte: Do Autor

Onde, da Figura 22, tem-se:

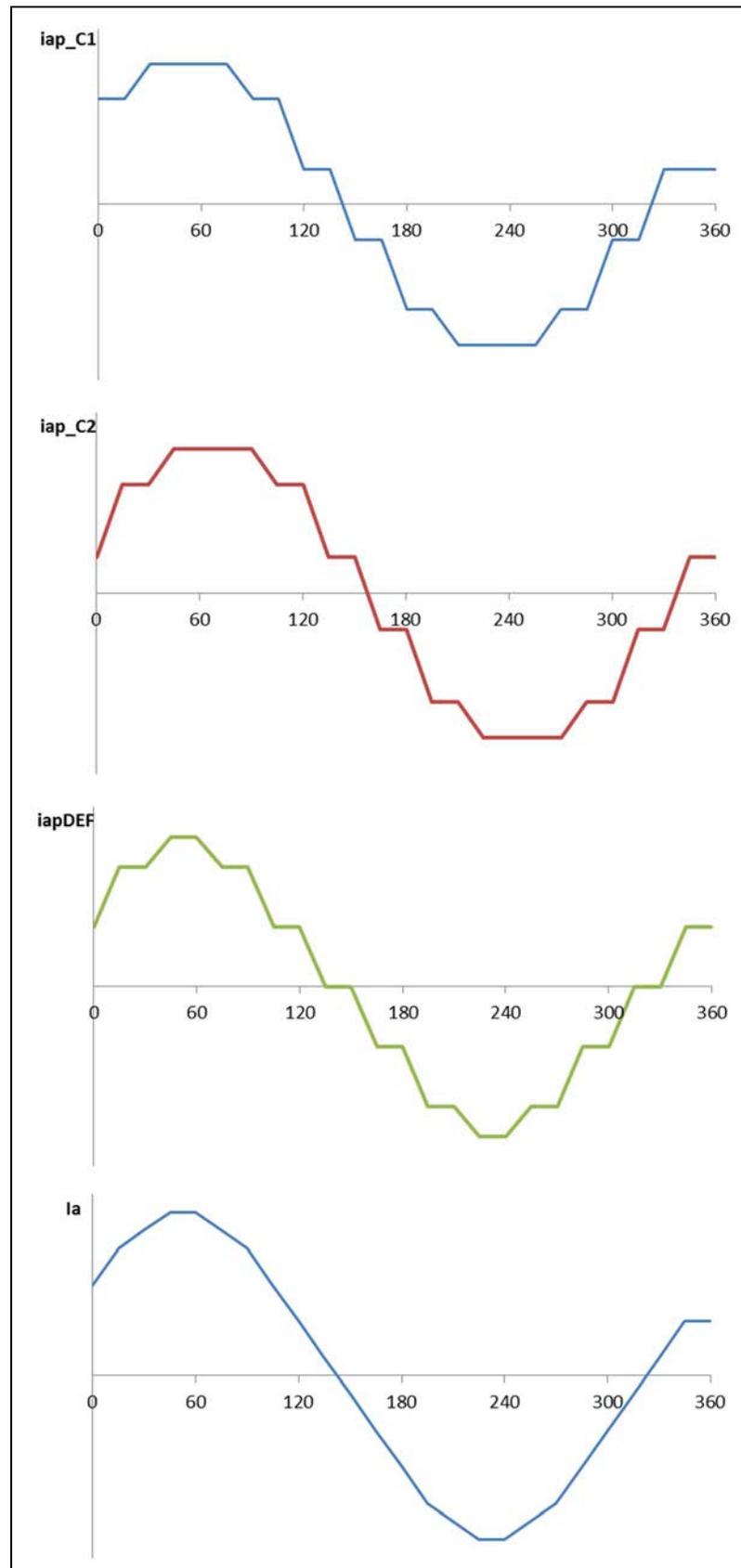
- i_{APC1} – corrente no primário do transformador T_1 ;
- i_{APC2} – corrente no primário do transformador T_2 ;
- i_{APDEF} – corrente no primário do transformador defasador T_z ;
- i_A – corrente de linha de uma fase de alimentação do sistema conversor de 24 pulsos.

Ainda da Figura 22, temos a Equação (13):

$$i_A = i_{APDEF} + i_{APC1} \quad (13)$$

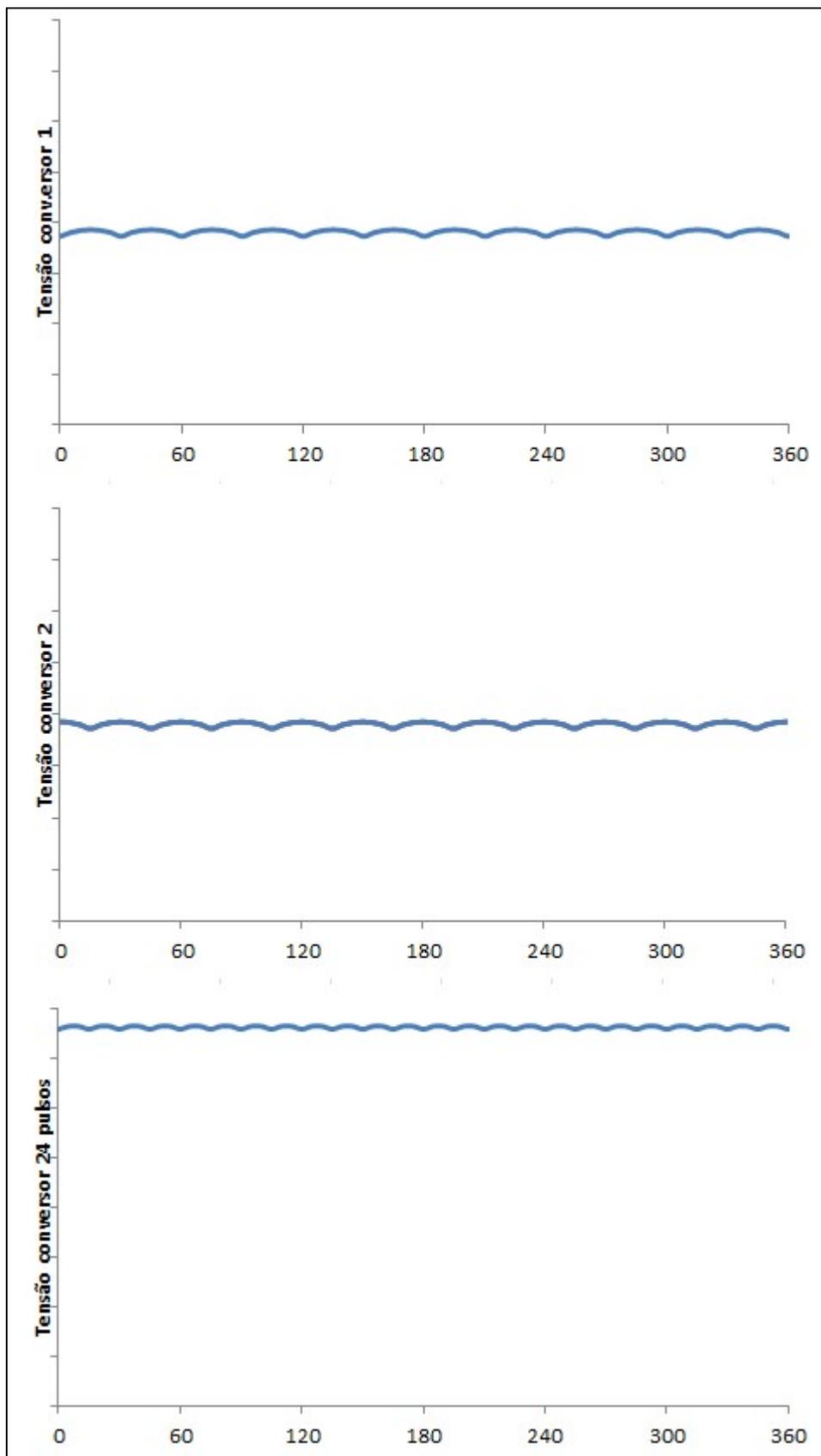
As correntes i_{APC1} , i_{APC2} , i_{APDEF} e i_A e também as tensões dos conversores 1 e 2 e tensão de saída do conversor de 24 pulsos são ilustrados nas Figuras 23 e 24, respectivamente.

Figura 23 – Correntes conversor 24 pulsos



Fonte: Do autor

Figura 24 – Tensões conversor 24 pulsos



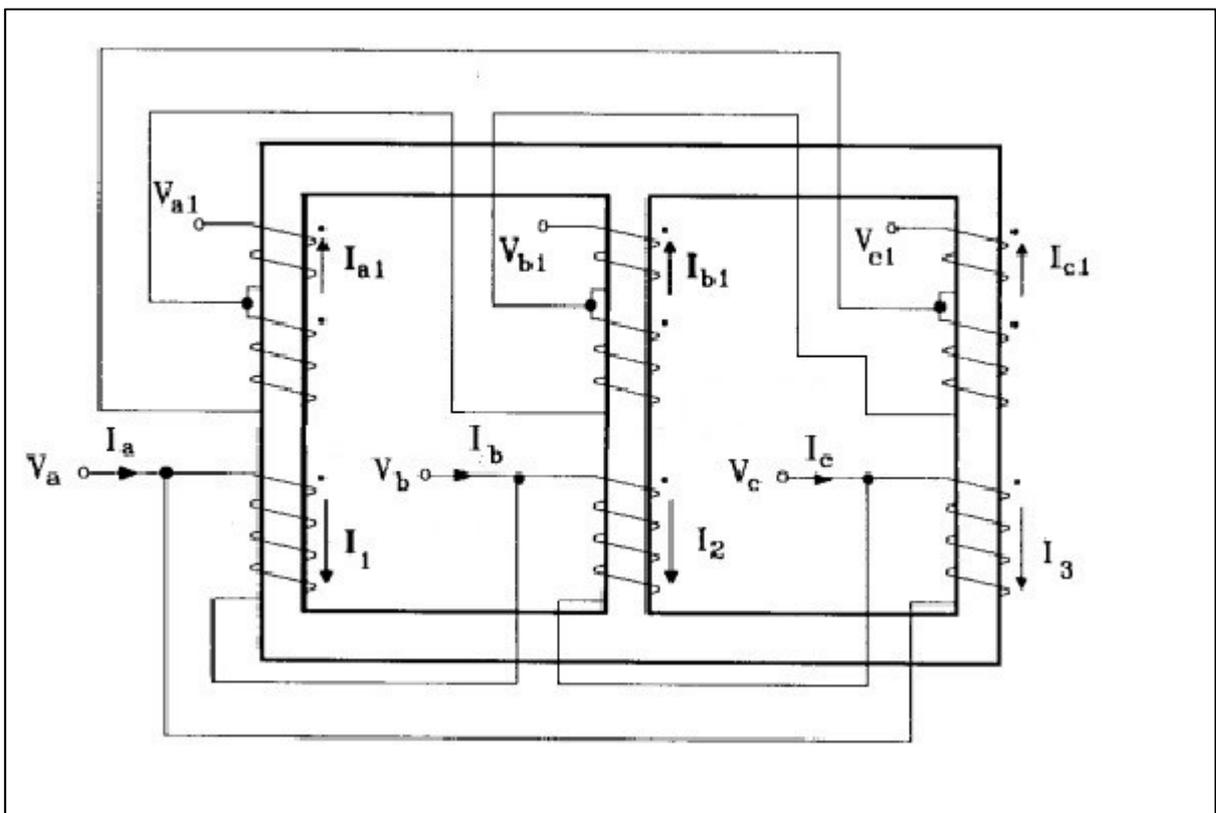
Fonte: Do autor.

3.2 CONEXÃO DELTA ESTENDIDO

A conexão delta estendido pode substituir, com algumas vantagens, algumas topologias tradicionais [5]. Esta configuração consiste em um prolongamento dos terminais do delta, industrialmente esta é a configuração a qual tem se notado a preferência para construção de conversores de múltiplos pulsos.

Na Figura 25 é demonstrado uma das formas usuais de um transformador com o secundário na configuração delta estendido, e primário em delta. Lembrando que o maior interesse na conexão delta estendido é sua capacidade de obter defasamentos fora dos usuais, múltiplos de 30° . Posteriormente será demonstrada a obtenção de diferentes defasamentos para a construção de um conversor de 24 pulsos de forma semelhante à feita para a conexão zigzague anteriormente.

Figura 25 – Configuração dos enrolamentos em transformador com conexão delta/delta-estendido com núcleo de três “pernas”



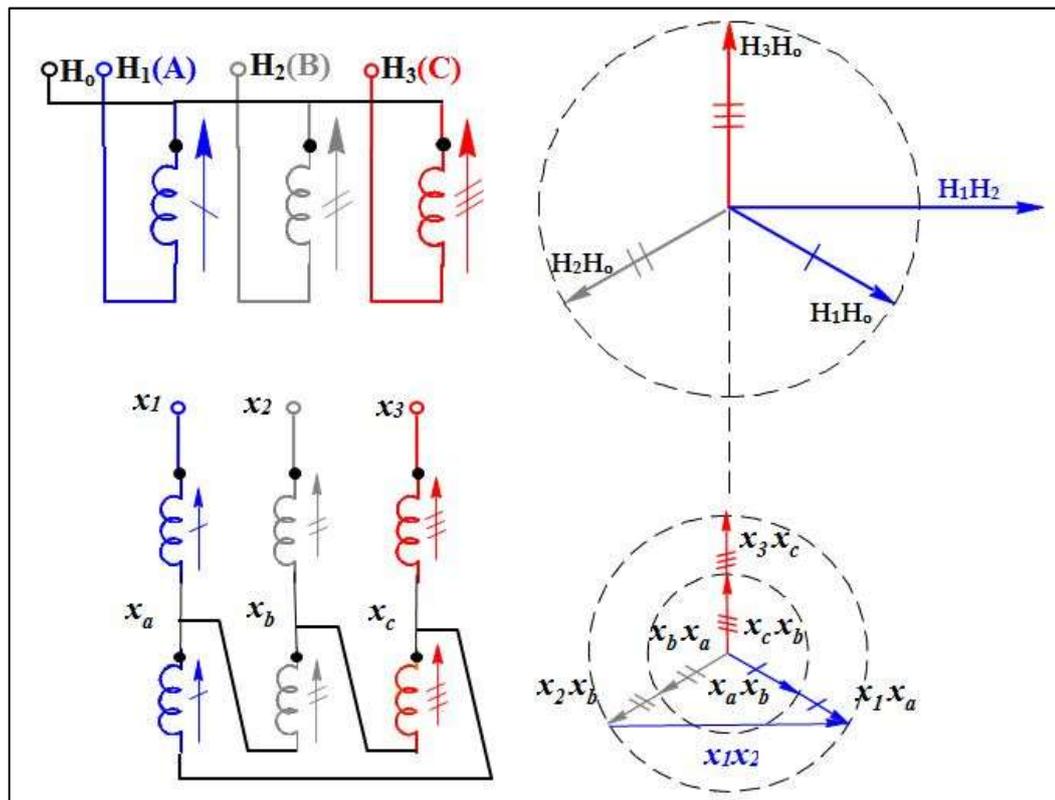
Fonte: Do autor.

Apresentada a conexão delta estendido, inicia-se a análise dos possíveis defasamentos angulares, utilizando no primário as conexões convencionais delta (Δ), estrela e no secundário, a conexão delta estendido.

Toda a metodologia apresentada anteriormente, para as outras conexões, na determinação do defasamento angular será aplicada para os casos que serão apresentados em sequência.

A Figura 26 representa um transformador com primário em estrela (Y) e secundário em delta estendido (ΔE) horário e os respectivos diagramas fasoriais. Vale ainda ressaltar que para a conexão delta estendido teremos a particularidade do fechamento do delta ser no sentido horário ou anti-horário, como ocorre também para as conexões delta e zigzague.

Figura 26 - Conexão e diagrama de fasores Estrela – Delta estendido (horário)



Fonte: Do autor.

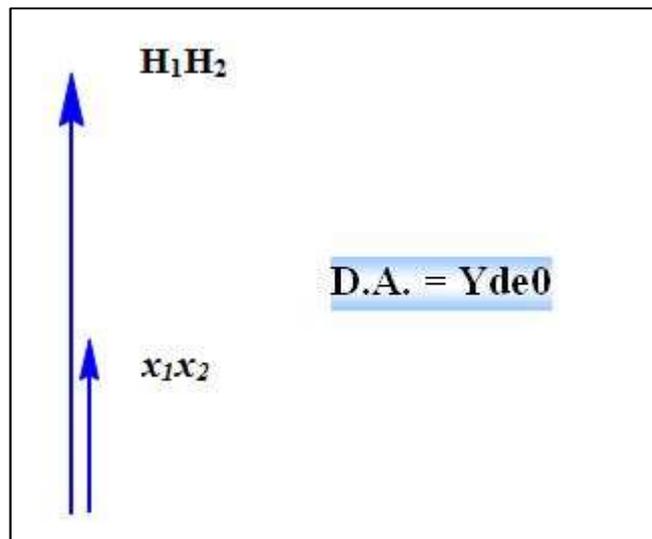
O procedimento para a determinação do defasamento angular desta ligação é a mesma apresentada no Tópico 4.2, que foi adotado para a conexão zigzague anteriormente apresentada.

A montagem do diagrama de fasores para o delta estendido é menos complexo que a conexão ziguezague. Esta, da mesma forma que o ziguezague, possui seis bobinas, porém ainda é um transformador com três núcleos.

É conveniente iniciar a montagem pelos fasores que representam o delta da conexão, isto é, o diagrama composto pelos fasores das bobinas conectadas em delta ao final da bobina encontrada logo após a localização das buchas de baixa tensão (x_1, x_2, x_3) do delta estendido. Após a montagem do diagrama de fasores do delta, percebe-se que o fasor da bucha x_1 está conectado ao fasor da fase “a” do delta, este fasor está a 120° da fase “b” e a 0° do fasor da sua respectiva fase, representando uma soma fasorial entre os respectivos fasores. Para montagem dos outros fasores segue-se o mesmo procedimento.

A medida do defasamento angular deve ser realizada conforme o estabelecido pela norma NBR 5356 demonstrada anteriormente. Para o caso específico deste par de conexões mediu-se o defasamento angular entre os fasores H_1H_2 e x_1x_2 . E os respectivos fasores estão indicados na Figura 27, onde se observa um ângulo de 0° entre os referidos fasores.

Figura 27 - Defasamento angular para conexão Y – D.E (anti-horário)



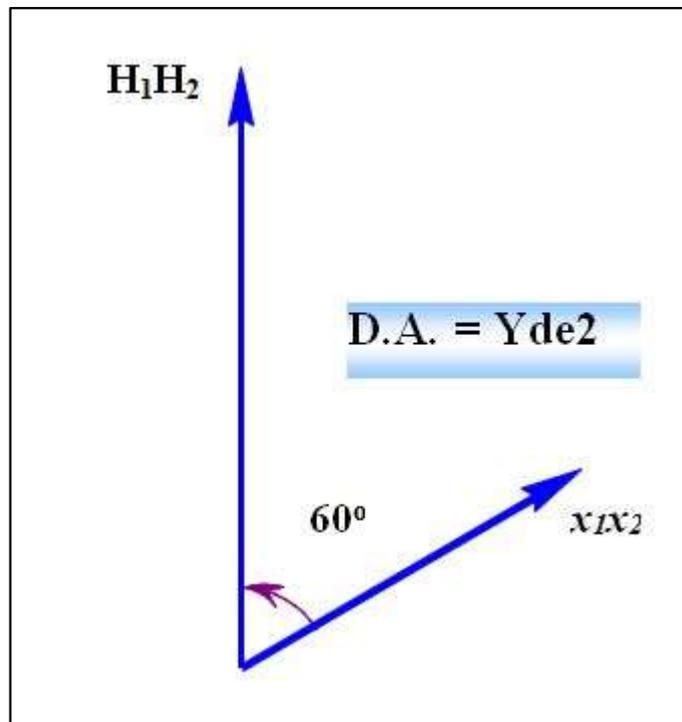
Fonte: Do autor.

Para as outras conexões possíveis de transformadores com conexões estrela-delta estendido a mesma metodologia para encontrar o defasamento angular é empregada.

Nas demais conexões, os fatores que influenciam na diferença do defasamento angular são: polaridade e sentido da conexão das bobinas (horário ou anti-horário). Portanto, fazendo o estudo do defasamento angular para um caso, os outros podem vir por consequência, o que já foi demonstrado para a conexão ziguezague.

Como exemplo, tomamos o ângulo de defasamento de 0° demonstrado na Figura 27, que mostra o defasamento de uma conexão estrela e delta estendido anti-horário e polaridade subtrativa. Se acaso quiséssemos saber o defasamento angular da conexão estrela e delta horário, o seguinte pensamento deve ser levado em consideração: Como será alterado o sentido da conexão entre as bobinas do secundário, de anti-horário para horário, devemos adiantar o fasor do terminal secundário em 60° , já que conforme demonstrado anteriormente, um enrolamento de horário para anti-horário, terá uma atraso de 60° , logo, no inverso, tem-se um adiantamento de 60° do fasor. Portanto, $0^\circ + 60^\circ = 60^\circ$, que nos resulta a Figura 28.

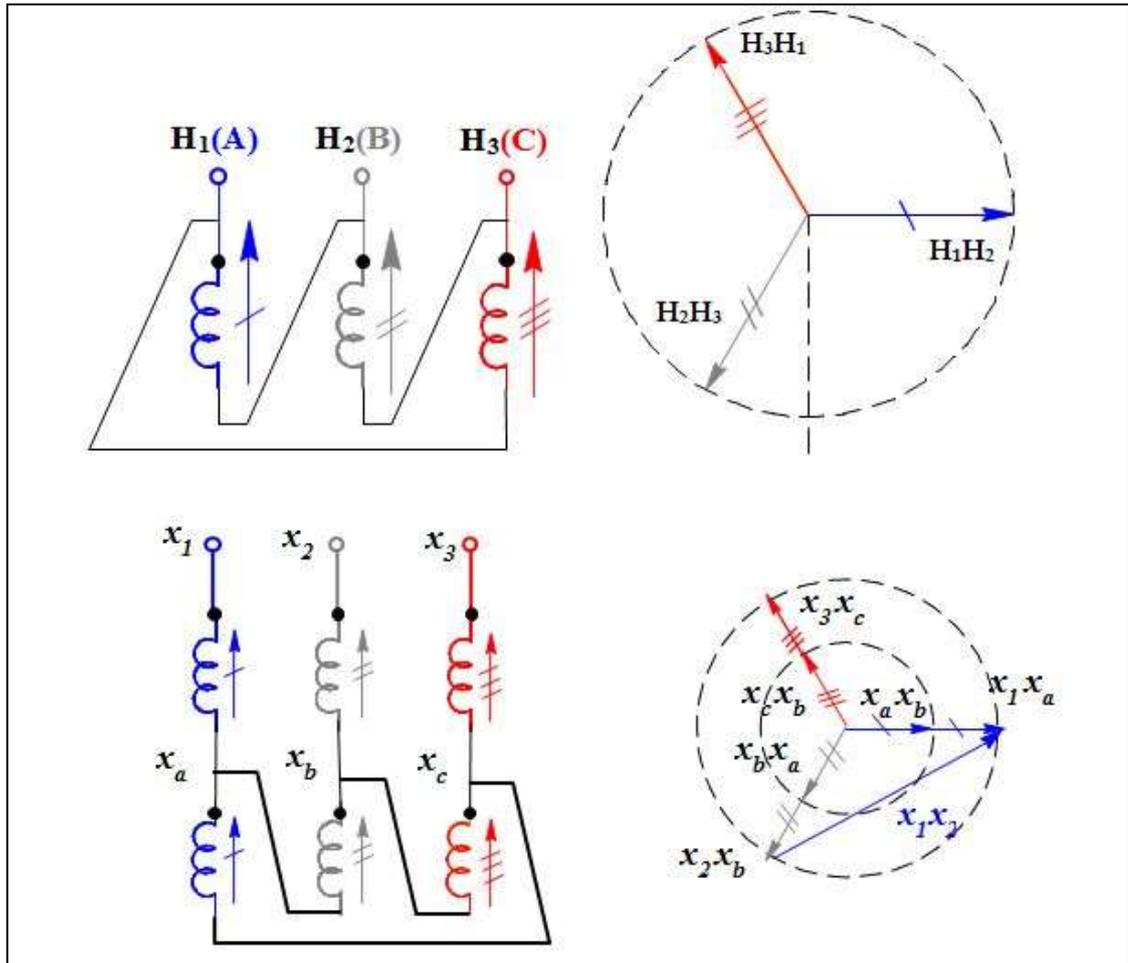
Figura 28 - Defasamento angular para conexão Y – D.E (horário)



Fonte: Do autor.

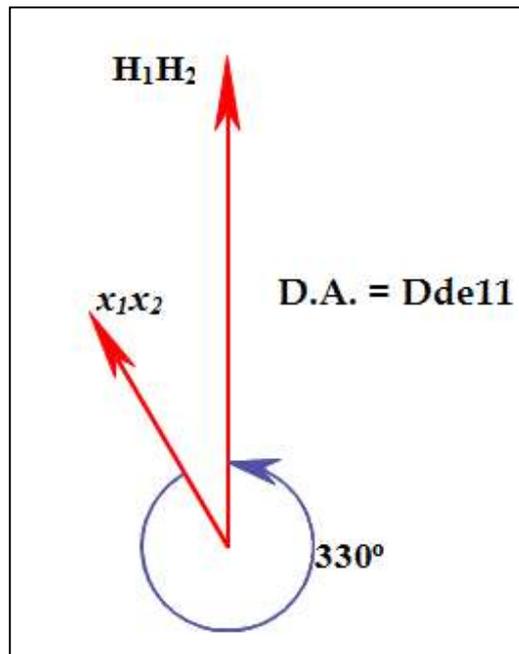
A próxima análise será para transformadores com conexão delta (horário) – delta estendido anti-horário, ilustrado pela Figura 29.

Figura 29 - Conexão e diagrama de fasores Delta (anti-horário)– Delta estendido (horário)



Fonte: Do autor.

Seguindo a norma, a medida do defasamento angular deve ser realizada da mesma maneira que anteriormente discutido. Logo, para este caso, tomaremos o par de fasores H_1H_2 e x_1x_2 para determinar o defasamento angular para a ligação demonstrada na Figura 29, o que nos resulta um ângulo de 330° , conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Defasamento angular para conexão Δ (horário) – D.E (anti-horário)

Fonte: Do autor.

Tomadas as premissas para a determinação do defasamento angular das diferentes configurações para transformador com conexão delta-delta estendido e estrela-delta estendido os defasamentos angulares possíveis de se obter são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Defasamentos angulares possíveis para Delta Estendido

Conexão	Polaridade	Defasamento angular	Nomenclatura ³
Δ (h) - Delta estendido (ah)	Subtrativa	330°	Dde11
Δ (h) - Delta estendido (h)	Subtrativa	30°	Dde1
Δ (ah) - Delta estendido (h)	Subtrativa	90°	Dde3
Y - Delta estendido (ah)	Subtrativa	0°	Yde0
Y - Delta estendido (h)	Subtrativa	60°	Yde2
Δ (h) - Delta estendido (ah)	Aditiva	150°	Dde5
Δ (h) - Delta estendido (h)	Aditiva	210°	Dde7
Δ (ah) - Delta estendido (h)	Aditiva	270°	Dde9
Y - Delta estendido (ah)	Aditiva	180°	Yde6
Y - Delta estendido (h)	Aditiva	240°	Yde8

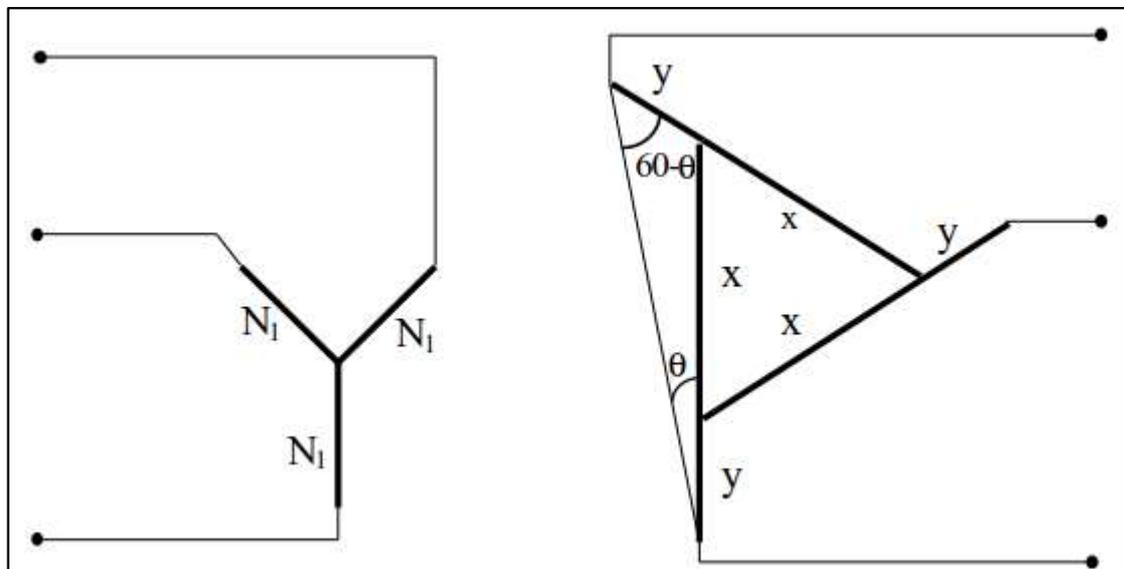
Fonte: Do autor.

³ Para a conexão delta estendido não há nenhuma recomendação da NBR 5356 quanto à nomenclatura que deve ser utilizada para esta conexão, logo, adotaremos para delta estendido “de”.

3.2.1 Obtenção de defasamentos angulares genéricos para conexão delta estendido

Para a determinação de defasamentos angulares genéricos, iremos analisar um transformador com primário em Y e secundário em delta estendido, sendo que não temos definida a relação de espiras deste transformador, a qual será definida genericamente, ou seja, não importando o número de espiras do primário, será possível determinar o número de espiras necessário em cada fase do delta e suas extensões. A Figura 31 mostra a montagem tal análise.

Figura 31 – Esquema para cálculo da Relação de espiras genérica



Fonte: (Domingues E. G.) [5]

Utilizando a lei dos senos, pode-se determinar o número de espiras para x e y a fim de se obter um defasamento angular genérico para a Figura 31, conforme Equações (14) e (15) abaixo.

$$y = \frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } 120^\circ} \times \frac{N_1}{K_N} \quad (14)$$

$$x = \left[\frac{\text{sen } (60 - \theta) - \text{sen } \theta}{\text{sen } 120^\circ} \times \frac{N_1}{K_N} \right] \quad (15)$$

onde:

N_1 – Número de espiras dos enrolamentos primário;

$$K_N = V_{1F} / V_{2F};$$

sendo:

V_{1F} – Tensão primária por fase;

V_{2F} – Tensão secundária por fase.

Como demonstração e análise, será utilizado um sistema multiconversor de 24 pulsos, utilizando quatro transformadores, sendo dois deles Δ / Delta estendido ($\pm 15^\circ$), um Y / Y (0°) e outro Y / Δ (30°). Tal configuração consta com a associação de quatro conversores de seis pulsos cada, em série, alimentados pelos transformadores citados nos quais os sinais de tensão de saída possuam um defasamento de 15° , conforme será mostrado na Figura 32.

Para a obtenção de um ângulo de 15° na configuração delta estendido, utilizaremos a equações (14), e aplicaremos como ângulo $\theta = 15^\circ$, conforme mostrado na Equação (16) abaixo:

$$y = \frac{\text{sen } 15^\circ}{\text{sen } 120^\circ} \times \frac{N_1}{K_N} \quad (16)$$

Logo:

$$y = 0,2989 \times \frac{N_1}{K_N}$$

E aplicando $\theta = 15^\circ$ também na equação (15), temos a Equação (17):

$$x = \left[\frac{\text{sen } (45^\circ) - \text{sen } 15^\circ}{\text{sen } 120^\circ} \times \frac{N_1}{K_N} \right] \quad (17)$$

Então, temos que:

$$x = 0,5176 \times \frac{N_1}{K_N}$$

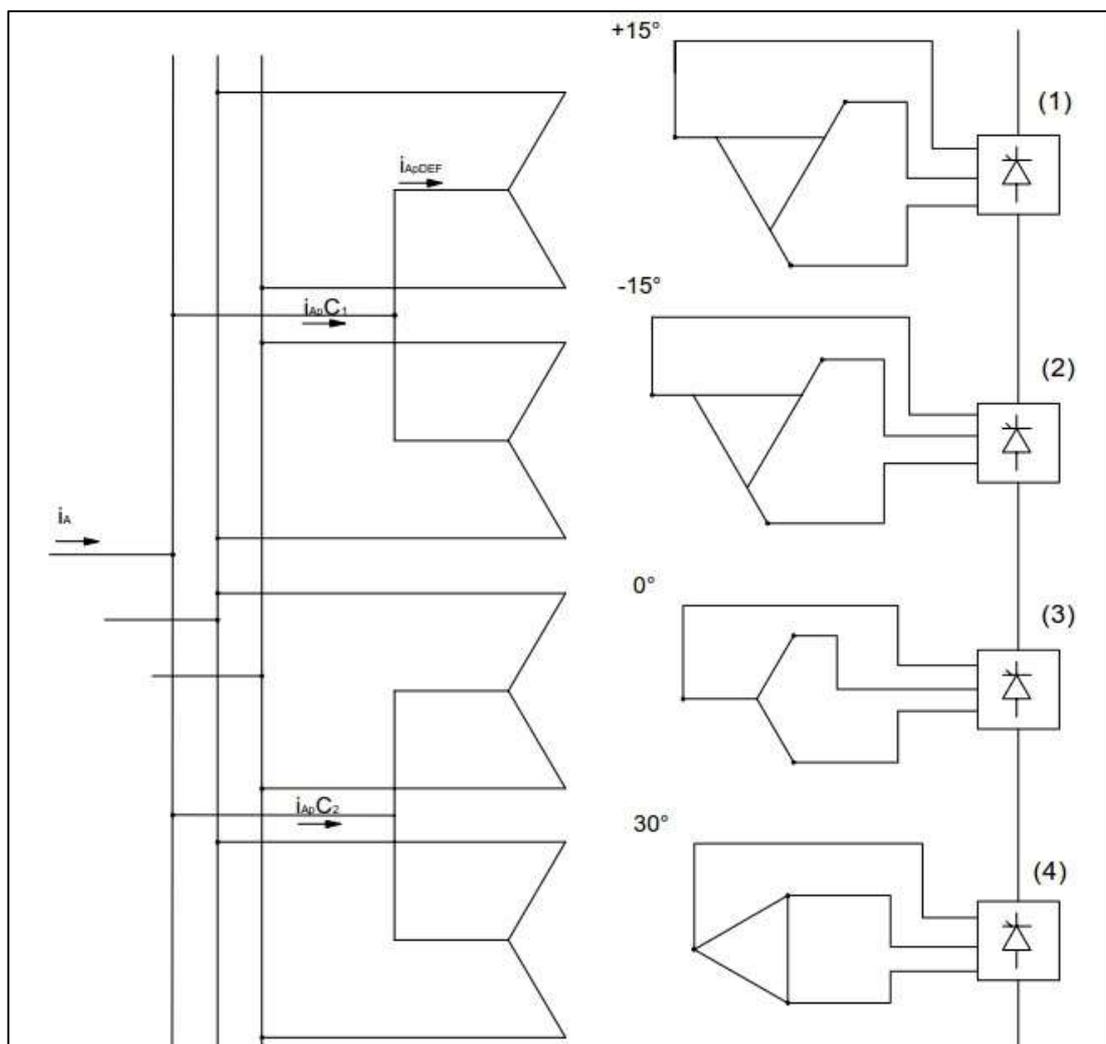
Portanto, sendo o número de espiras, o mesmo para os enrolamentos x e y, chamando este de N_1 , ainda considerando uma relação de espiras 1:1, deve-se fazer o seguinte ajuste nas espiras dos enrolamentos para obter-se o defasamento de 15° :

- O “tap” para o enrolamento x deve ser diminuído 51,76% de N_1 ;

- O “tap” para o enrolamento y deve ser diminuído 29,89% de N_1 .

Para que se obtenha o defasamento angular de -15° , conforme proposto para o multiconversor de 24 pulsos, deve-se apenas inverter a sequência de fase de alimentação do primário.

Figura 32 – Sistema conversor de vinte e quatro pulsos com transformadores delta estendido $\pm 15^\circ$ e estrela-estrela 0° e delta-estrela 30°



Fonte: Do autor

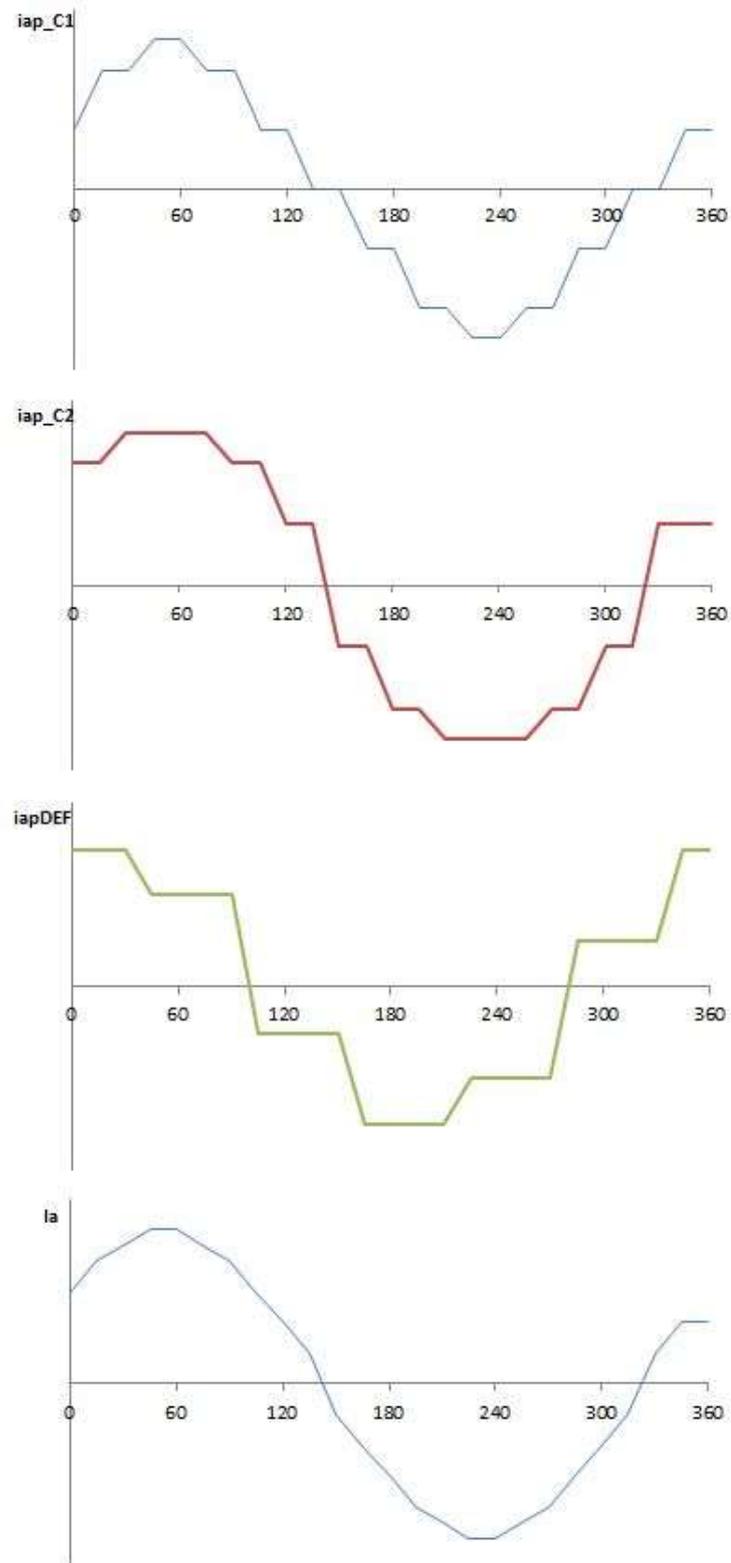
Onde, da Figura 32, tem-se:

- i_{APC1} – Corrente na fase “a” de alimentação do conversor de doze pulsos, formado pelos conversores (1) e (2);

- i_{APC_2} – Corrente na fase “a” de alimentação do conversor de doze pulsos, formado pelos conversores (3) e (4);
- i_{APDEF} – corrente na fase “a” do primário do transformador delta estendido $\pm 15^\circ$;
- i_A – corrente na fase “a” de alimentação do sistema conversor de 24 pulsos.

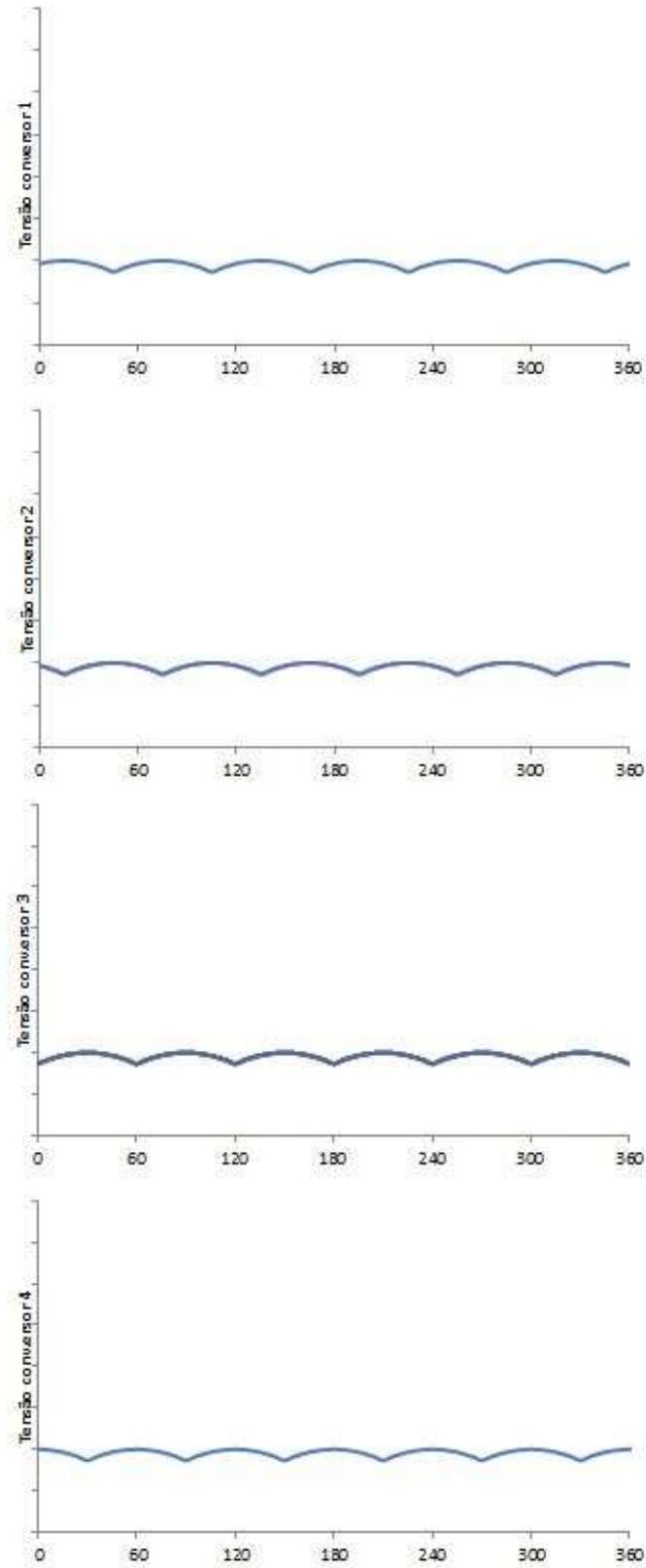
As correntes i_{APC_1} , i_{APC_2} , i_{APDEF} e i_A , as tensões dos conversores 1, 2, 3 e 4, do conversor de 24 pulsos são ilustrados nas Figuras 33 e 34, respectivamente. A tensão final resultante é mostrada na Figura 35.

Figura 33 – Correntes no conversor de 24 pulsos utilizando delta estendido



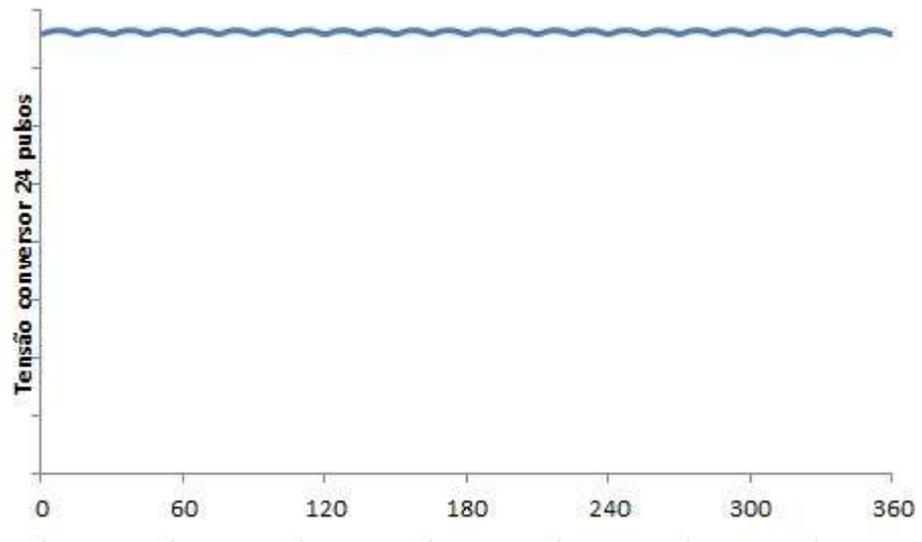
Fonte: Do Autor

Figura 34 - Tensões nos retificadores do conversor de 24 pulsos utilizando delta estendido



Fonte: Do Autor

Figura 35 – Tensão resultante do conversor de 24 pulsos utilizando delta estendido



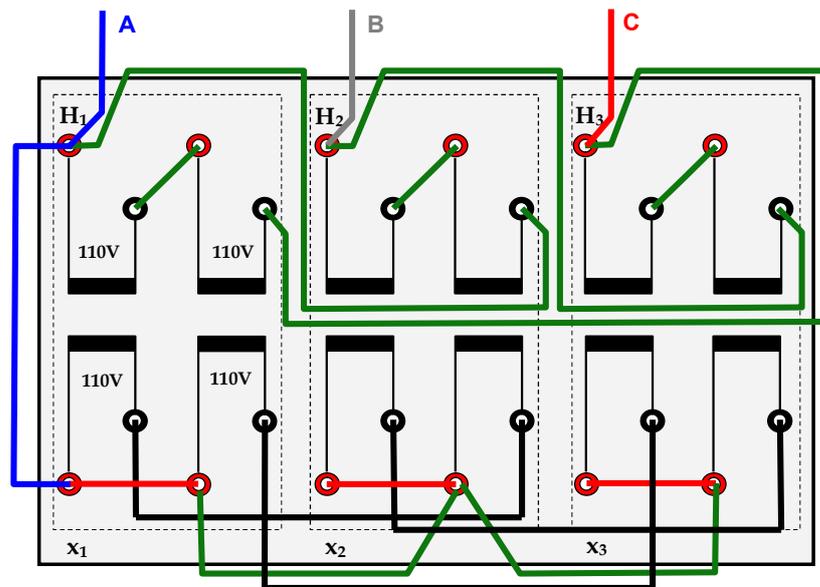
Fonte: Do Autor.

4 RESULTADOS

Em laboratório foram feitas algumas montagens a fim de se comprovar experimentalmente os defasamentos angulares e polaridade de algumas conexões apresentadas anteriormente. Não dispondo de um medidor de fases para determinar o defasamento angular para as montagens, foi utilizada uma metodologia que será descrita a seguir.

Primeiro montou-se a conexão Δ horário – Ziguezague horário, utilizando um transformador trifásico 1kVA, onde cada fase possui dois “taps”, tanto no lado primário quanto no lado secundário, o que nos permite ter um transformador com relações 1:1, 1:2 ou 2:1, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 – Montagem do transformador em laboratório, conexão $\Delta(h)$ – ZZ(h).



Fonte: Do autor

Em seguida à montagem da conexão devida no transformador, foi feita a montagem do sistema inserindo uma fonte trifásica no lado primário, sempre monitorando a corrente de uma das fases, a fim de evitar que conexões tenham sido feitas de modo errôneo e evitando danos ao transformador.

Feito isso, a fim de descobrir tanto a polaridade quanto o defasamento angular para a conexão demonstrada na Figura 36, as tensões V_{H1H3} , V_{H3X3} , V_{H2X3} , V_{H3X2} e V_{H2X2} foram medidas com um voltímetro, e comparadas da seguinte maneira: Primeiramente V_{H1H3} com V_{H3X3}

verificando se uma era menor, maior ou igual que a outra. Após esta comparação, uma segunda foi feita entre V_{H2x3} e V_{H3x2} também verificando se uma era menor, maior ou igual que a outra. E por fim, foram comparadas as tensões V_{H2x2} e V_{H3x2} fazendo a mesma verificação que foi feita para as comparações anteriores. Os valores obtidos constam na Tabela 3 e o comparativo entre os resultados na Tabela 4.

Tabela 3 – Valores medidos para determinação do defasamento angular da conexão $\Delta(h) - ZZ(h)$.

$V_{H1 H3}$	$V_{H3 x3}$	$V_{H2 x3}$	$V_{H3 x2}$	$V_{H2 x2}$
205 V	112 V	275 V	280 V	115 V

Fonte: Do Autor

Tabela 4 – Comparativo entre as tensões medidas para a conexão $\Delta(h) - ZZ(h)$.

Tensões Comparadas	Comparação
$V_{H1 H3}$ e $V_{H3 x3}$	>
$V_{H2 x3}$ e $V_{H3 x2}$	=
$V_{H2 x2}$ e $V_{H2 x3}$	<

Fonte: Do Autor

Tabela 5 – Tabela auxiliar para determinação do defasamento angular

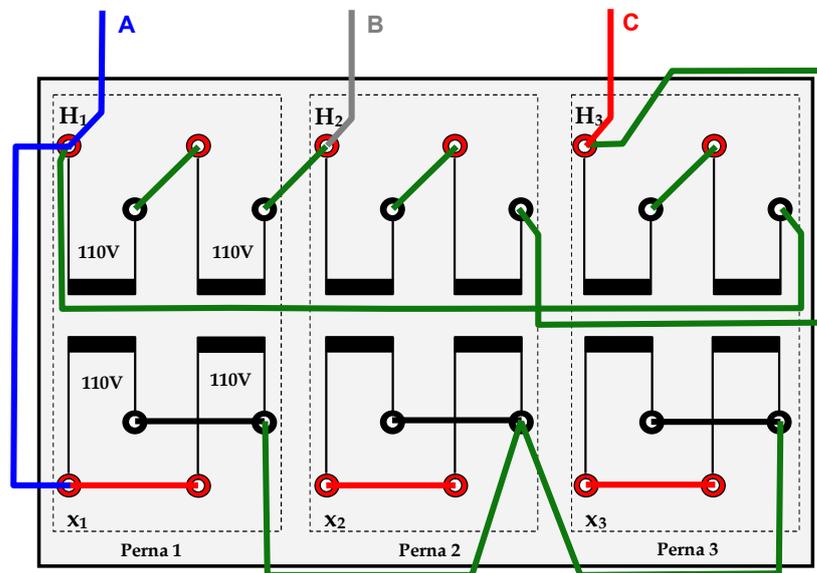
Tensões Comparadas	0°	180°	30°	210°	60°	240°	120°	300°	150°	30°
$V_{H1 H3}$ e $V_{H3 x3}$	>	<	>	<	>	<	<	>	<	>
$V_{H2 x3}$ e $V_{H3 x2}$	=	=	>	<	>	<	>	<	>	<
$V_{H2 x2}$ e $V_{H2 x3}$	<	>	<	>	<	>	<	>	=	=

Fonte: (REIS; ROSSI, 2015) [4]

Em seguida, utilizando a Tabela 5, os valores medidos para a montagem $\Delta(h) - ZZ(h)$ foram analisados e assim, a conclusão foi a seguinte: Para a montagem da Figura 36, temos defasamento angular de 0° com polaridade subtrativa, confirmando o valor demonstrado pela Tabela 1.

Após a realização do procedimento para a montagem anterior, o mesmo também foi adotado para mais três montagens, a fim de confirmar os defasamentos angulares, são elas: $\Delta(ah) - ZZ(h)$, $Y - ZZ(ah)$ e $Y - ZZ(h)$. As Figuras 37, 38 e 39 mostram a montagem dessas configurações no transformador utilizado no laboratório e os resultados medidos estão contidos nas Tabelas 6, 7, 8, 9, 10 e 11.

Figura 37 – Montagem do transformador em laboratório, conexão $\Delta(ah) - ZZ(h)$.



Fonte: Do Autor

Tabela 6 – Valores medidos para determinação do defasamento angular da conexão $\Delta(ah) - ZZ(h)$.

$V_{H1 H3}$	$V_{H3 X3}$	$V_{H2 X3}$	$V_{H3 X2}$	$V_{H2 X2}$
200 V	275 V	110V	420 V	275 V

Fonte: Do Autor

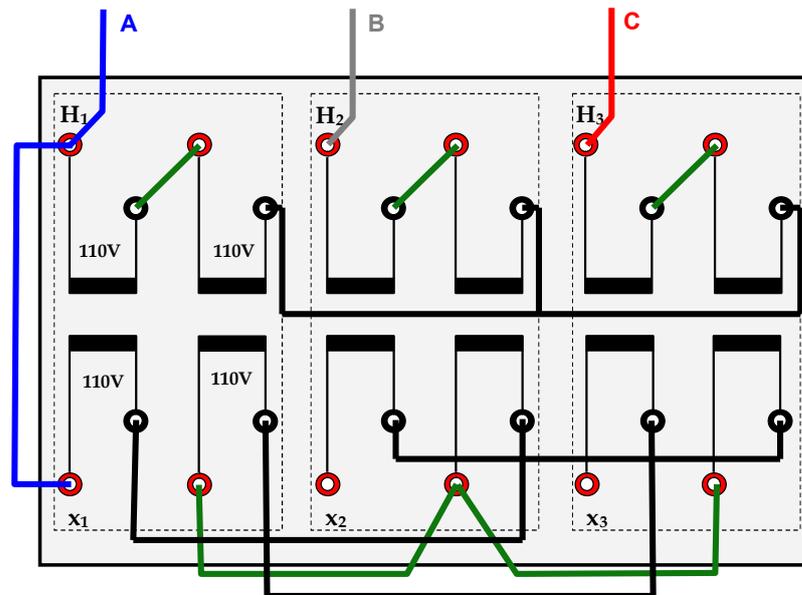
Tabela 7 – Comparativo entre as tensões medidas para a conexão $\Delta(\text{ah}) - \text{ZZ}(\text{h})$.

Tensões Comparadas	Comparação
$V_{H1 H3}$ e $V_{H3 x3}$	<
$V_{H2 x3}$ e $V_{H3 x2}$	<
$V_{H2 x2}$ e $V_{H2 x3}$	>

Fonte: Do Autor

Então, para a montagem da Figura 37, a conclusão é a seguinte: defasamento angular de 240° , confirmando o valor demonstrado pela Tabela 1.

Figura 38 – Montagem do transforma em laboratório, conexão Y – ZZ(h)



Fonte: Do Autor

Tabela 8 – Valores medidos para determinação do defasamento angular da conexão Y - ZZ (h).

$V_{H1 H3}$	$V_{H3 x3}$	$V_{H2 x3}$	$V_{H3 x2}$	$V_{H2 x2}$
200 V	104 V	100 V	275 V	100 V

Fonte: Do Autor

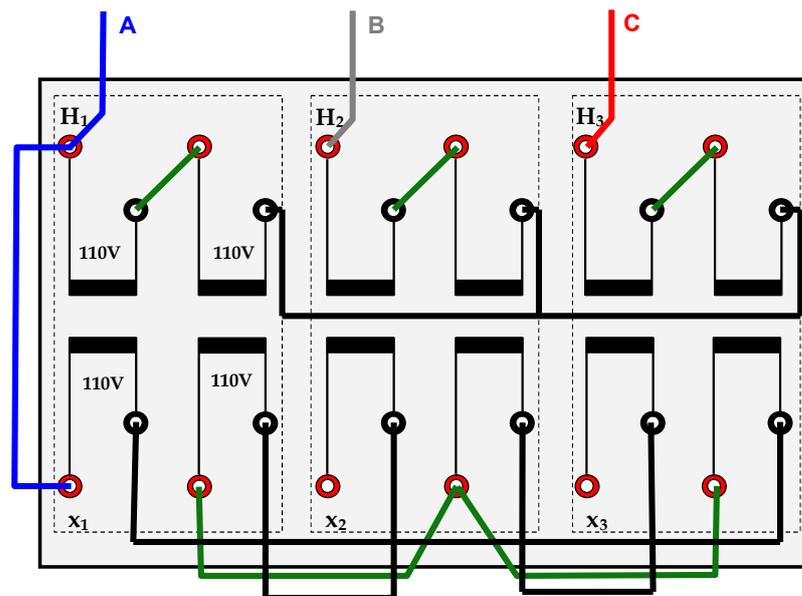
Tabela 9 – Comparativo entre as tensões medidas para a conexão Y – ZZ (h).

Tensões Comparadas	Comparação
$V_{H1 H3}$ e $V_{H3 x3}$	>
$V_{H2 x3}$ e $V_{H3 x2}$	<
$V_{H2 x2}$ e $V_{H2 x3}$	=

Fonte: Do Autor

Então, para a montagem da Figura 38, a conclusão é a seguinte: defasamento angular de 210° , confirmando o valor demonstrado pela Figura 19.

Figura 39 – Montagem do transformador em laboratório, conexão Y – ZZ(ah)



Fonte: Do autor

Tabela 10 – Valores medidos para determinação do defasamento angular da conexão Y - ZZ (ah).

$V_{H1 H3}$	$V_{H3 x3}$	$V_{H2 x3}$	$V_{H3 x2}$	$V_{H2 x2}$
200 V	100 V	270 V	100 V	100 V

Fonte: Do Autor.

Tabela 11 – Comparativo entre as tensões medidas para a conexão Y – ZZ (ah).

Tensões Comparadas	Comparação
$V_{H1\ H3}$ e $V_{H3\ x3}$	>
$V_{H2\ x3}$ e $V_{H3\ x2}$	>
$V_{H2\ x2}$ e $V_{H2\ x3}$	<

Fonte: Do autor

Então, para a montagem da Figura 38, a conclusão é a seguinte: defasamento angular de 150° , confirmando o valor demonstrado pela Figura 18.

Para o caso dos transformadores com conexão delta estendido, não foi possível realizar o mesmo procedimento adotado para o zigzague por se tratar de uma conexão especial e, para que o mesmo procedimento funcionasse, o ideal seria a utilização um transformador com tap variável, e não fixo como disponível em laboratório. Outra solução para medir corretamente o defasamento angular seria utilizar um medidor de ângulo de fase, como foi feito segundo o professor Pitta (1995) que utilizou esse equipamento especialmente nas verificações práticas do defasamento angular de transformadores especiais para conversores.

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado atingiu plenamente os objetivos delineados previamente pela teoria apresentada às quais foram comprovadas em laboratório.

Neste contexto os objetivos gerais foram atingidos uma vez que foram apresentadas as conexões especiais ziguezague e delta estendido, bem como suas características.

Em relação aos objetivos específicos pode-se dizer que o alvo foi alcançado novamente, pois foi apresentado um conversor de múltiplos pulsos utilizando os transformadores com conexões especiais, tanto ziguezague como delta estendido, os quais podem ser utilizados em sistemas de tração para trens.

Há estudos que comprovam que os multiconversores de múltiplos pulsos utilizando os transformadores com conexões especiais, para obtenção de um número maior de pulsos devido aos defasamentos angulares não convencionais, melhoram os harmônicos da rede.

O sistema atual de algumas linhas do metrô de São Paulo (Linhas 1, 2 e 3) possuem retificadores de 12 pulsos, que utilizam transformadores de duplo secundário ($\Delta - \Delta/Y$). Os mesmos poderiam ser substituídos pelos de 24 pulsos, utilizando transformadores com conexões especiais, e assim melhorar, segundo Paice (1996) as características de um conversor de 24 pulsos utilizando transformador delta estendido, como o apresentado neste trabalho, pois os mesmos possuem características de força (corrente, tensão) limpas e ainda possibilitam a eliminação de 5°, 7°, 11°, 13°, 17° e 19° harmônicos.

Portanto, verifica-se que este trabalho pode ser base para futuros estudos de harmônicos nos sistemas apresentados em comparação com sistemas de potência antigos, com possibilidade de benefícios econômicos de uma possível substituição desses sistemas antigos por outros que utilizam os transformadores com conexões especiais.

REFERÊNCIAS

- [1] FITZGERALD, A.E., KINGSLEY, C., UMANS, S.D. **Electric Machinery**. 6^a ed. Nova Iorque : McGraw-Hill, 2003.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-1**: Transformadores de Potência. Rio de Janeiro, 2007. 95 p.
- [3] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **C57.12.00**: general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers. [s.i], 2006.
- [4] ALMEIDA, A. T. L.; PAULINO, M. E. C. **Manutenção de transformadores de potência. curso de especialização em manutenção de sistemas elétricos** – Itajubá: Unifei, 2012.
- [5] FARIAS, G. R.; MAURICI, E. ; DE ALMEIDA, N.M; PÉRES, A. Transformadores para retificadores com múltiplos pulsos: comparação entre as configurações delta estendida, zigzague e polígono. ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRÉ, 15., 2013 Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR.2013.
- [6] REIS, L. O. M. dos; ROSSI, R.: **Transformadores e máquinas elétricas: defasamento angular**. Taubaté: Schooltech Treinamentos Técnicos, 2015.
- [7] DOMINGUES, E. G. et al. **Modelagem de transformadores especiais não lineares no domínio do tempo utilizando simulador SABER**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, 2016.
- [8] CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**, 4^a ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2005.
- [9] REIS, L. O. M. dos; ROSSI, R.: **Ensaio de polaridade e defasamento angular de transformadores**. Taubaté: Schooltech Treinamentos Técnicos, 2015.
- [10] PAICE, D.A. **Power electronic converters harmonics: multipulse methods for clean power**. New York, IEEE Press, 1996.

[11] CLUBE DA ELETRÔNICA. **Eletricidade**. Disponível em <<http://www.clubedaeletronica.com.br/Eletricidade/PDF/Polaridade%20de%20transformadores.pdf>>. Acesso em 20 set. 2016.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5380**: Transformador de potência. Rio de Janeiro, 1993.

[13] CUNHA, B. P. **Ligar o transformador como um autotransformador**. Disponível em: <http://eletrotecnicaatual.blogspot.com.br/2015_01_01_archive.html>. Acesso em: 30 ago.2016

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CARLSSON, L. **Extended delta converter transformer for 12-Pulse operation in HDVC projects**, Seminar on HVDC Transmission, Rio de Janeiro, Brasil, Abril, 1986.

CHOI et al. **New 24-Pulse Diode Rectifier Systems**, IEEE transactions on industry applications, v.33, n.2, p.531-541, Mar. 1997.

FARIAS, E. G. et al. **Enrolamentos de transformadores de potência para retificadores com múltiplos pulsos: comparação entre as configurações delta estendido, polígono e zigzague**. Foz do Iguaçu-PR. Brasil, 2013.

HARLOW, James H. **Electric power transformer engineering**, 1ª ed. Florida: CRC Press, 2004.

KOSOW, Irwin L. **Máquinas elétricas e transformadores** 4ª ed. Porto Alegre: Globo,1993.

PITTA, A. J. C. **Aplicação de transformadores delta-estendido em conversores estáticos**. 1993. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1993.