



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

TUTORIAL
SISTEMA HEXAFÁSICO PARA
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor: Guilherme Leal Xavier

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo Jr.

Uberlândia
2017

CAPÍTULO 1

SISTEMAS ELÉTRICOS HEXAFÁSICOS

1) Introdução

Muito embora o pleno reconhecimento de que a distribuição de energia elétrica, em corrente alternada, se dá através de arranjos trifásicos, o presente trabalho visa analisar o sistema de distribuição hexafásico em busca de uma otimização técnica e econômica da distribuição de energia elétrica, sobretudo no que diz respeito à qualidade da energia elétrica.

Apresentando deste a transformação de um sistema trifásico em hexafásico, este tutorial visa apresentar subsídios para o início dos estudos em sistema dotados de seis fases. As análises aqui compreendidas, levam em consideração o uso do sistema hexafásico, para distribuição de energia elétrica, em comparação com o já existente sistema trifásico em circuito duplo.

2) Fundamentação Teórica

Atualmente, a geração, transmissão, distribuição e utilização de energia elétrica são feitas por meio de circuitos trifásicos. Neste caso, temos um conjunto de 3 (três) tensões defasadas de 120° uma da outra. Nomeando as 3 (três) fases como a , b e c , podemos representar as tensões de um sistema trifásico pela notação fasorial, conforme equação (1.1), onde V_ϕ é o módulo da tensão de fase.

$$\begin{aligned}V_{an} &= V_\phi \angle 0^\circ \\V_{bn} &= V_\phi \angle -120^\circ \\V_{cn} &= V_\phi \angle 120^\circ\end{aligned}\tag{1.1}$$

Na Figura 1.1, temos a representações das tensões na forma de diagrama fasorial. Tanto na equação (1.1) quanto na Figura 1.1, a representação das tensões trifásicas considerada é equilibrada e de “sequência direta” ou “positiva” (abc).

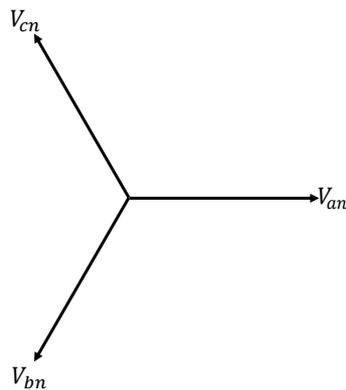


Figura 1.1– Diagrama fasorial de um conjunto de tensões trifásicas equilibradas com sequência abc.

Como a fundamentação teórica a respeito do sistema elétrico trifásico é bastante difundida, este capítulo visa apresentar o embasamento para compreensão do sistema elétrico hexafásico. Tal sistema, é composto por 6 (seis) fases com defasamento de 60° em relação as fases. Nomeando as 6 (seis) fases como *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *f*, assim como no sistema trifásico, podemos representar as tensões de fase do sistema hexafásico pela notação fasorial, conforme apresentado na equação (1.2).

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= V_\phi \angle 0^\circ \\
 V_{bn} &= V_\phi \angle -60^\circ \\
 V_{cn} &= V_\phi \angle -120^\circ \\
 V_{dn} &= V_\phi \angle 180^\circ \\
 V_{en} &= V_\phi \angle 120^\circ \\
 V_{fn} &= V_\phi \angle 60^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Na Figura 1.2, é apresentado um sistema de tensões hexafásico, equilibrado, na forma de diagrama fasorial, para sequência direta.

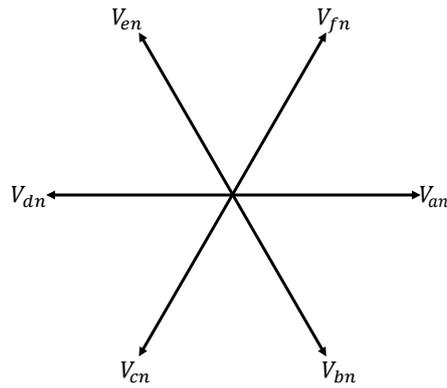


Figura 1.2 – Diagrama fasorial de um conjunto de tensões hexafásicas equilibradas com sequência direta.

As tensões apresentadas para o sistema hexafásico, representa as tensões de fase-terra. Assim como no sistema trifásico, o sistema hexafásico também tem as tensões de linha (fase-fase), porém com algumas ressalvas no que diz respeito ao módulo da tensão. No sistema hexafásico, pode-se obter 3 (três) diferentes níveis de tensão de linha, dependendo das fases associadas.

Verificando inicialmente as tensões de linhas obtidas a partir das fases com um defasamento de 60° , obtemos as seguintes tensões de linha: V_{ab} , V_{bc} , V_{cd} , V_{de} , V_{ef} e V_{fa} . Na Figura 1.3, temos a resultante da tensão de linha V_{ab} , apresentada na forma de diagrama fasorial. O resultado é obtido a partir da soma vetorial das tensões da fase a e b .

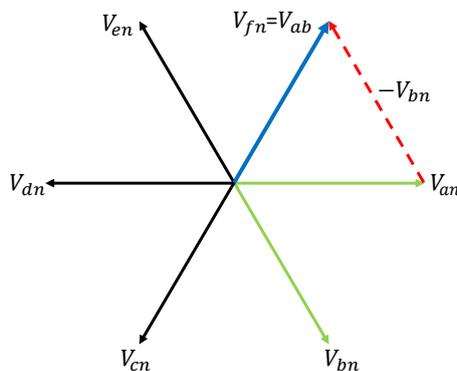


Figura 1.3 – Diagrama fasorial resultante da tensão de linha V_{ab} .

Na equação (1.3), são obtidos as tensões de linha para o sistema hexafásico a partir das tensões de fase defasadas de 60° .

$$\begin{aligned}
V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} = V_{\phi} \angle 0^{\circ} - V_{\phi} \angle -60^{\circ} = V_{\phi} \angle 60^{\circ} \\
V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} = V_{\phi} \angle -60^{\circ} - V_{\phi} \angle -120^{\circ} = V_{\phi} \angle 0^{\circ} \\
V_{cd} &= V_{cn} - V_{dn} = V_{\phi} \angle -120^{\circ} - V_{\phi} \angle 180^{\circ} = V_{\phi} \angle -60^{\circ} \\
V_{de} &= V_{dn} - V_{en} = V_{\phi} \angle 180^{\circ} - V_{\phi} \angle 120^{\circ} = V_{\phi} \angle -120^{\circ} \\
V_{ef} &= V_{en} - V_{fn} = V_{\phi} \angle 120^{\circ} - V_{\phi} \angle 60^{\circ} = V_{\phi} \angle 180^{\circ} \\
V_{fa} &= V_{fn} - V_{an} = V_{\phi} \angle 60^{\circ} - V_{\phi} \angle 0^{\circ} = V_{\phi} \angle 120^{\circ}
\end{aligned} \tag{1.3}$$

Portanto, para o sistema hexafásico, as tensões de linha, obtidas a partir das tensões de fase com defasamento de 60° , possuem módulo igual as tensões de fase. As tensões de fase formam um conjunto equilibrado de tensões hexafásico, adiantado de 60° em relação ao conjunto de tensões de fase.

Outro nível de tensão que pode ser obtido no sistema hexafásico, é o resultante da associação das tensões de fase defasadas em 120° . Neste caso, temos como resultado as seguintes tensões de linha: V_{ac} , V_{bd} , V_{ce} , V_{df} , V_{ea} e V_{fb} . Na Figura 1.4, a tensão de linha V_{ac} obtido através da soma vetorial das tensões de fase a e c .

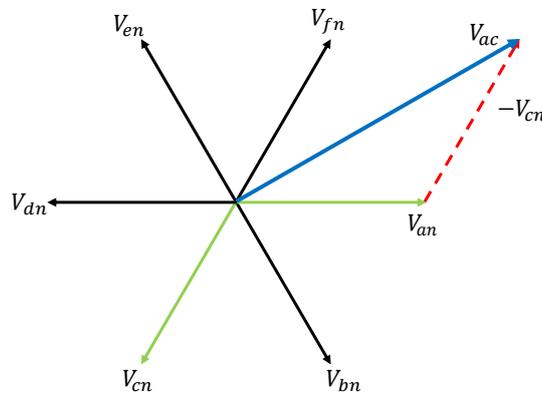


Figura 1.4 – Diagrama fasorial resultante da tensão de linha V_{ac} .

Na equação (1.4), é apresentado as tensões de linha para o sistema hexafásico, a partir das tensões de fase defasadas de 120° .

$$\begin{aligned}
V_{ac} &= V_{an} - V_{cn} = V_{\phi} \angle 0^{\circ} - V_{\phi} \angle -120^{\circ} = \sqrt{3}V_{\phi} \angle 30^{\circ} \\
V_{bd} &= V_{bn} - V_{dn} = V_{\phi} \angle -60^{\circ} - V_{\phi} \angle 180^{\circ} = \sqrt{3}V_{\phi} \angle -30^{\circ} \\
V_{ce} &= V_{cn} - V_{en} = V_{\phi} \angle -120^{\circ} - V_{\phi} \angle 120^{\circ} = \sqrt{3}V_{\phi} \angle -90^{\circ} \\
V_{df} &= V_{dn} - V_{fn} = V_{\phi} \angle 180^{\circ} - V_{\phi} \angle 60^{\circ} = \sqrt{3}V_{\phi} \angle -150^{\circ} \\
V_{ea} &= V_{en} - V_{an} = V_{\phi} \angle 120^{\circ} - V_{\phi} \angle 0^{\circ} = \sqrt{3}V_{\phi} \angle 150^{\circ} \\
V_{fb} &= V_{fn} - V_{bn} = V_{\phi} \angle 60^{\circ} - V_{\phi} \angle -60^{\circ} = \sqrt{3}V_{\phi} \angle 90^{\circ}
\end{aligned} \tag{1.4}$$

Desta forma, o sistema hexafásico possui o nível de tensão de linha $\sqrt{3}$ vezes maior que a tensão de fase, assim como no sistema trifásico. Pela equação (1.4), conclui-se que o sistema hexafásico tem um conjunto de tensões de linhas equilibradas com módulo $\sqrt{3}$ vezes maior e adiantado de 30° em relação as tensões de fase.

O terceiro nível de tensão de linha no sistema hexafásico é advindo da tensão entre as fases com defasamento de 180° . Dessa forma, obtemos as seguintes tensões de linha: V_{ad} , V_{be} , V_{cf} , V_{df} , V_{eb} e V_{fc} . Realizando a soma fasorial das tensões de linha da fase a e d , cujo defasamento é de 180° , obtemos a tensão de linha V_{ad} , Figura 1.5.

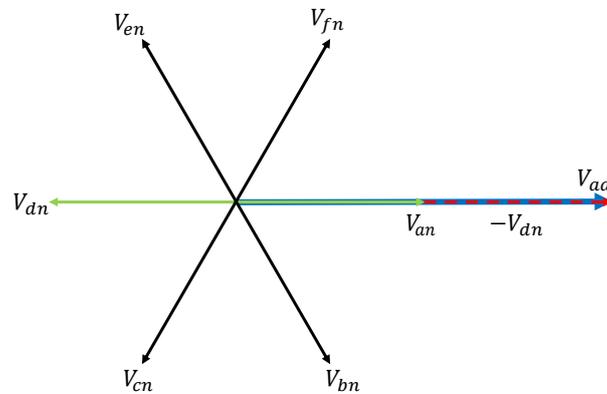


Figura 1.5 – Diagrama fasorial resultante da tensão de linha V_{ad} .

Realizando o mesmo procedimento feito anteriormente, obtemos as demais tensões de linha, equação (1.5), ambas para fases com defasamento de 180° .

$$\begin{aligned}
V_{ad} &= V_{an} - V_{dn} = V_{\phi} \angle 0^{\circ} - V_{\phi} \angle 180^{\circ} = 2V_{\phi} \angle 0^{\circ} \\
V_{be} &= V_{bn} - V_{en} = V_{\phi} \angle -60^{\circ} - V_{\phi} \angle 120^{\circ} = 2V_{\phi} \angle -60^{\circ} \\
V_{cf} &= V_{cn} - V_{fn} = V_{\phi} \angle -120^{\circ} - V_{\phi} \angle 60^{\circ} = 2V_{\phi} \angle -120^{\circ} \\
V_{da} &= V_{dn} - V_{an} = V_{\phi} \angle 180^{\circ} - V_{\phi} \angle 0^{\circ} = 2V_{\phi} \angle 180^{\circ} \\
V_{eb} &= V_{en} - V_{bn} = V_{\phi} \angle 120^{\circ} - V_{\phi} \angle -60^{\circ} = 2V_{\phi} \angle 120^{\circ} \\
V_{fc} &= V_{fn} - V_{cn} = V_{\phi} \angle 60^{\circ} - V_{\phi} \angle -120^{\circ} = 2V_{\phi} \angle 60^{\circ}
\end{aligned} \tag{1.5}$$

Neste caso, as tensões de linha resultantes das tensões de fase, com defasamento de 180° , formam um sistema hexafásico equilibrado com módulo duas vezes maior.

3) Concepção de um sistema hexafásico a partir de um sistema trifásico

Um sistema com 6 (seis) fases pode ser obtido diretamente de um gerador elétrico hexafásico ou a partir de um sistema trifásico. Para conversão de um sistema trifásico em hexafásico é necessário o uso de um transformador trifásico-hexafásico, este, considerado um tipo especial de transformadores. Diante disso, como esta topologia de transformador não faz parte da linha de produção dos fabricantes, seu uso torna-se inviável.

Para concepção do sistema hexafásico, a opção mais factível a ser adotada é o uso de 2 (dois) transformadores trifásicos convencionais, adotando diferentes conexões de seus enrolamentos. O objetivo do uso de ligações diferentes é proporcionar um defasamento angular nas tensões de um transformador em relação ao outro, compondo assim o sistema hexafásico.

Adotando dois transformadores trifásicos, temos duas formas para prover o defasamento necessário para obter o sistema hexafásico. Primeiro, é manter as tensões de um dos transformadores com a mesma defasagem do primário em relação ao secundário, enquanto o outro transformador deverá proporcionar um defasamento angular de 180° das tensões do primário em relação ao secundário. A segunda forma é utilizar um dos transformadores com defasamento angular de 30° , das tensões do primário em relação ao secundário, enquanto o outro deverá ter um defasamento de -30° . Dessa forma, nas duas alternativas apresentadas resultará um sistema com 6 (seis) fases com defasamento angular de 60° entre as tensões de fase.

Os transformadores usados para a conversão de um sistema trifásico para um sistema hexafásico, conforme mencionado anteriormente, pode ser tanto do tipo elevador de tensão, quanto abaixador de tensão. A escolha dependerá do sistema que deseja

converter, como por exemplo, de geração para transmissão, transmissão para distribuição ou de distribuição para distribuição em níveis de tensões diferentes.

Para retornar um sistema hexafásico para o sistema trifásico, deve-se proceder da mesma forma de quando da conversão. Utilizar dois transformadores com conexões similares da conversão trifásico para hexafásico.

Na sequência são apresentadas as diversas conexões de transformadores que possibilita a conversão do sistema trifásico em hexafásico. Para tanto, não será evidenciado a relação de transformação dos mesmos, visto que, para a conversão esse fator não é relevante. Porém, é importante salientar que os dois transformadores utilizados para conversão de trifásico para hexafásico, ou vice-versa, devem possuir a mesma relação de transformação.

Vale ressaltar ainda que, quando apresentado a conexão dos transformadores a um sistema trifásico, este será considerado de sequência direta, ou seja, *ABC*.

As marcações dos terminais, H para alta tensão e X para baixa tensão, são aqui utilizados apenas para fins de ilustração.

3.1. Transformadores com defasamento angular de 0° e 180°

Conforme mencionado anteriormente, uma das maneiras de obter o sistema hexafásico é através do uso de 2 (dois) transformadores, sendo um com defasamento angular de 0° e o outro com 180°. O defasamento angular, entre as tensões do secundário em relação ao primário, de 0° pode ser obtido nos transformadores com as seguintes conexões:

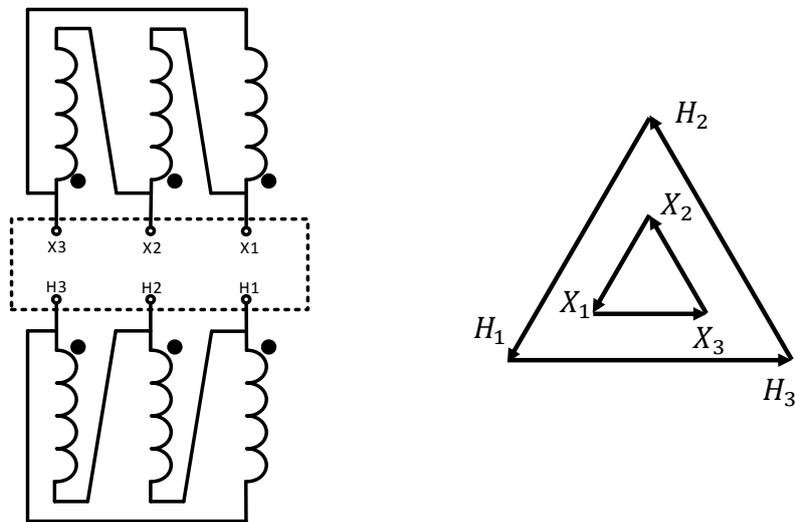
- Transformador Dd0 (Conexão delta-delta);
- Transformador Yy0 (Conexão estrela-estrela);
- Transformador Dz0 (Conexão delta-zigue zague);

Já o defasamento angular de 180°, pode ser obtido com as seguintes conexões:

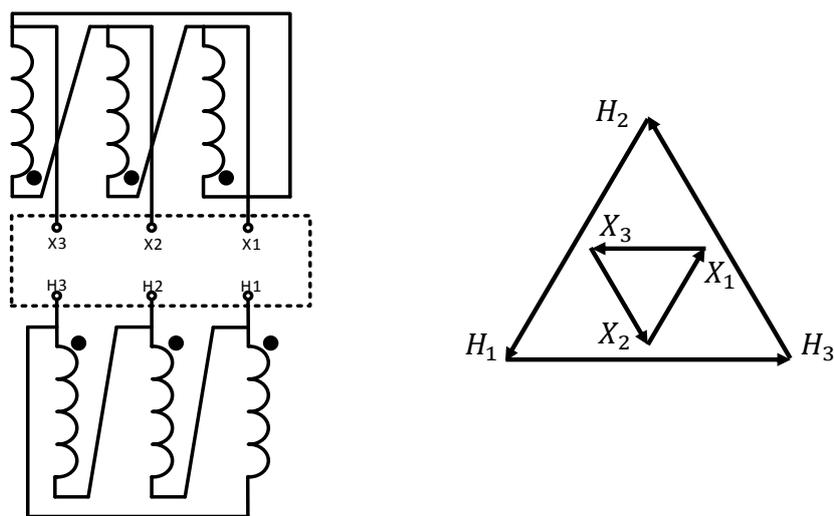
- Transformador Dd6 (Conexão delta-delta invertido);
- Transformador Yy6 (Conexão estrela-estrela invertido);
- Transformador Dz6 (Conexão delta-zigue-zague invertido);

Dessa forma, uma das possíveis maneiras de converter um sistema trifásico em hexafásico é utilizando dois transformadores trifásicos, por exemplo um Dd0 e outro Dd6. Depois, caso seja necessário retornar do sistema hexafásico para o trifásico, é necessário utilizar outro conjunto de transformadores com as mesmas conexões.

Na Figura 1.6, temos a conexão dos transformadores em Dd0 e em Dd6, com seus respectivos diagramas fasoriais. No primeiro transformador, Dd0, as tensões do secundário estão em fase com as tensões do primário. Para o transformador Dd6, delta-delta invertido, as tensões do secundário estão defasadas em 180° graus em relação as tensões do primário.



(a)



(b)

Figura 1.6 – Conexão do transformador trifásico com seu respectivo diagrama fasorial das tensões. (a) Dd0 (b) Dd6

Conectando dois transformadores, conforme conexões apresentadas na Figura 1.6, a um sistema trifásico, com as respectivas fases *A*, *B* e *C*, resulta em um sistema hexafásico, Figura 1.7. Note que as fases do secundário, dos dois transformadores, devem ser arranjadas para obter um defasamento angular de 60° entre as fases adjacentes.

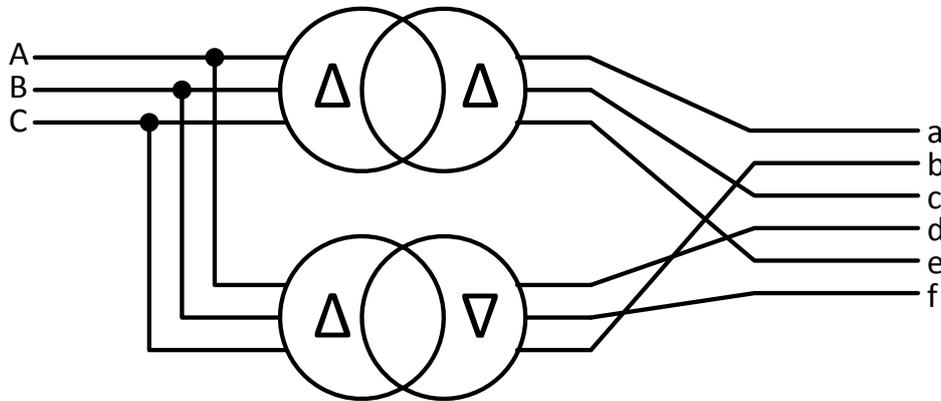


Figura 1.7 – Conversão sistema trifásico para hexafásico com transformador Dd0 e Dd6.

Desta forma, obtemos um sistema com 6 (seis) fases, ambas com defasamento de 60° entre as fases adjacentes, Figura 1.8.

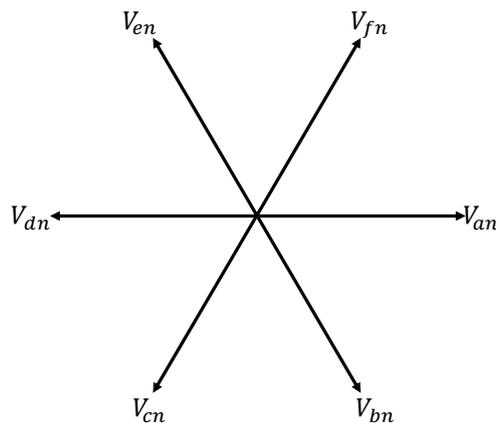


Figura 1.8 – Diagrama fasorial das tensões de fase do sistema hexafásico com transformadores Dd0 e Dd6.

Com esses mesmos valores de defasamento angular, podemos ainda obter um sistema hexafásico a partir de outras conexões de transformadores trifásicos. A Figura 1.9 apresenta o diagrama de ligação para os transformadores trifásicos para obter, tanto o defasamento angular de 0° , quanto o defasamento de 180° . Pelos seus respectivos diagramas fasoriais, evidencia o defasamento angular entre as tensões do secundário em relação ao primário. Na conexão em estrela, existe ainda a possibilidade do acesso ao neutro, caso necessário.

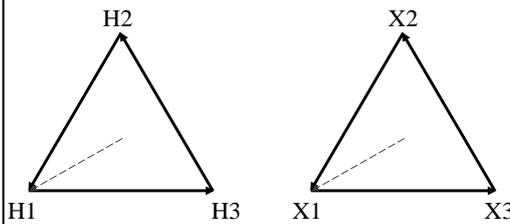
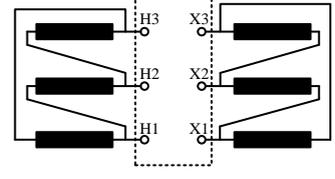
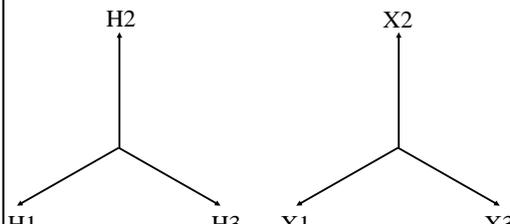
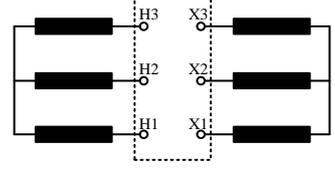
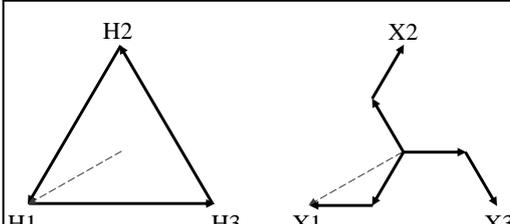
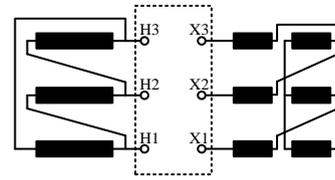
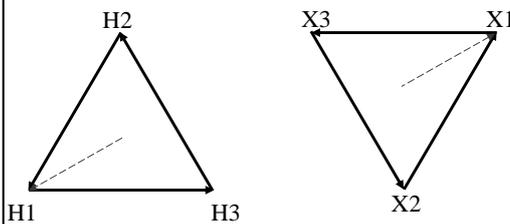
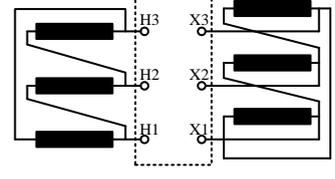
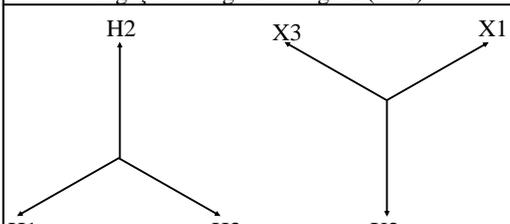
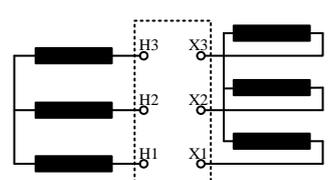
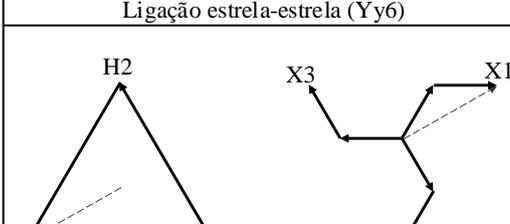
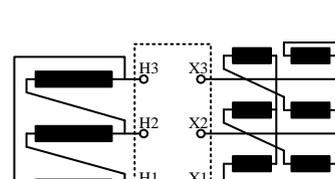
	Deslocamento angular	Diagrama de ligações
Deslocamento angular 0°	 <p>Ligação triângulo-triângulo (Dd0)</p>	
	 <p>Ligação estrela-estrela (Yy0)</p>	
	 <p>Ligação triângulo-ziguezague (Dz0)</p>	
Deslocamento angular 180°	 <p>Ligação triângulo-triângulo (Dd6)</p>	
	 <p>Ligação estrela-estrela (Yy6)</p>	
	 <p>Ligação triângulo-ziguezague (Dz6)</p>	

Figura 1.9 – Diagrama de ligações para transformadores trifásicos com defasamento angular de 0° e 180° , com seu respectivos diagramas fasoriais.

3.2. Transformadores com defasamento angular de 30° e -30°

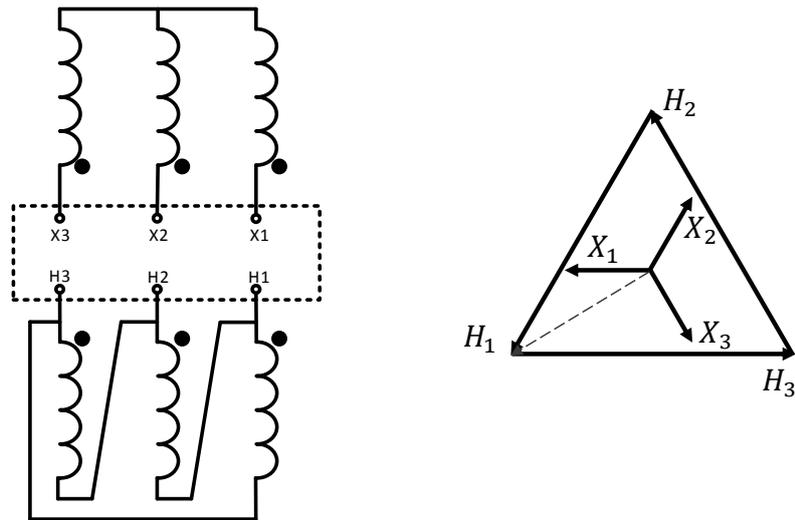
O defasamento angular, entre as tensões do secundário em relação ao primário, de 30° pode ser obtido nos transformadores com as seguintes conexões:

- Transformador Dy1 (Conexão delta-estrela);
- Transformador Yd1 (Conexão estrela-delta);
- Transformador Yz1 (Conexão estrela-zig-zag);

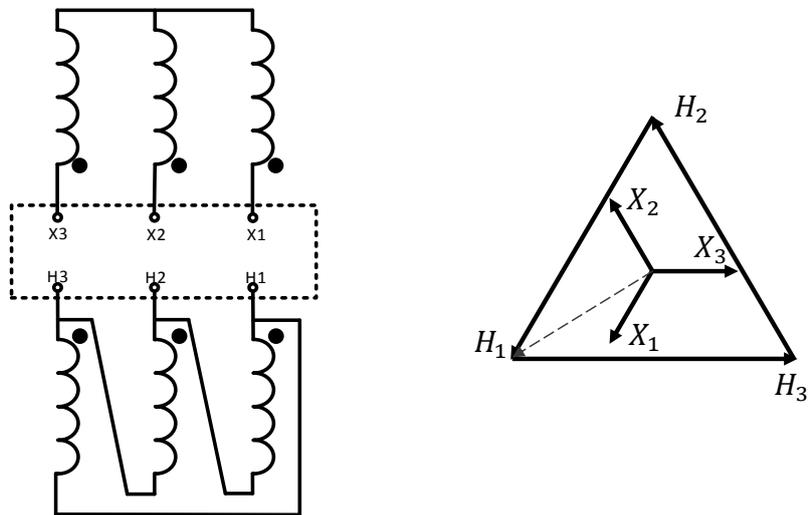
Já o defasamento angular de -30° pode ser obtido com as seguintes conexões:

- Transformador Dy11 (Conexão delta-estrela invertido);
- Transformador Yd11 (Conexão estrela-delta invertido);
- Transformador Yz11 (Conexão estrela-zigue zague invertido);

Dessa forma, um exemplo para obter o sistema hexafásico é utilizando dois transformadores trifásico com conexão delta-estrela. Porém, enquanto um dos transformadores deverá possuir o primário conectado em delta e o secundário em estrela, Dy1, o outro transformador deve possuir o seu primário em delta invertido com o secundário em estrela, Dy11, conforme esquema da Figura 1.10. Note que no caso da Figura 1.10 (a), a tensão de fase do secundário está defasada de 30° da tensão do primário, enquanto na Figura 1.10 (b), o defasamento é de -30° .



(a)



(b)

Figura 1.10 – Conexão do transformador trifásico com seu respectivo diagrama fasorial das tensões. (a) Dy1 (b) Dy11

Da mesma forma, as fases no secundário dos transformadores devem ser arranjadas para manter um defasamento angular de 60° entre as fases adjacentes. Para o exemplo dos transformadores Dy1 e Dy11, as 6 fases devem ser dispostas conforme Figura 1.11.

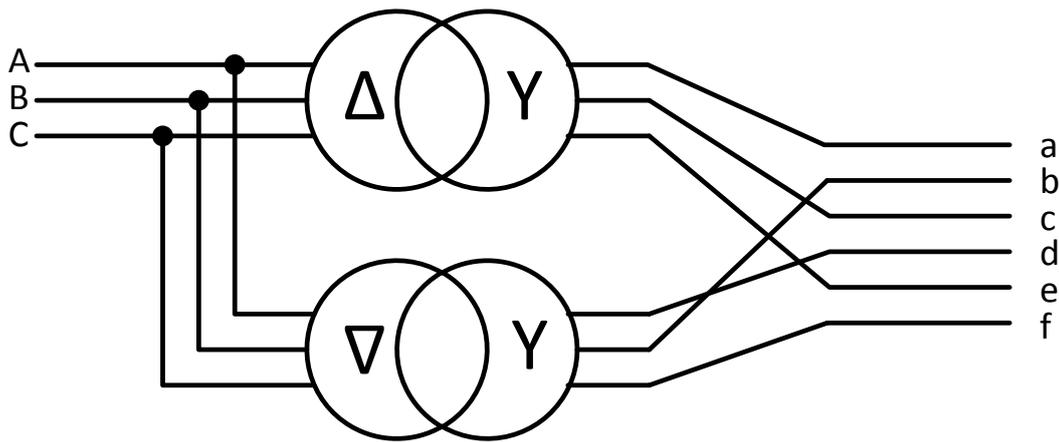


Figura 1.11 – Conversão sistema trifásico para hexafásico com transformador Dy1 e Dy11.

Portanto, com esse arranjo consegue converter o sistema trifásico em um sistema hexafásico com defasamento angular de 60° entre as tensões, Figura 1.12.

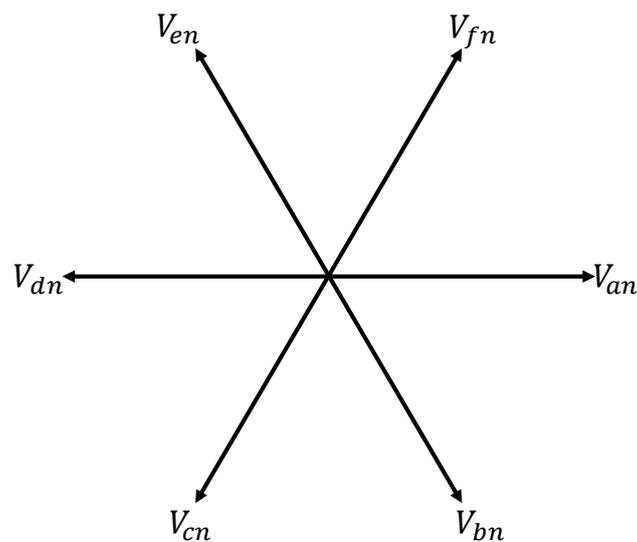


Figura 1.12 – Diagrama fasorial das tensões de fase do sistema hexafásico com transformadores Dy1 e Dy11.

Para obter o sistema hexafásico, a partir de transformadores trifásico com defasamento de 30° e -30° , pode-se ainda utilizar outras conexões. Na Figura 1.13, temos as conexões dos transformadores para obter o defasamento tanto de 30° , quanto de -30° , com seus respectivos diagramas fasoriais.

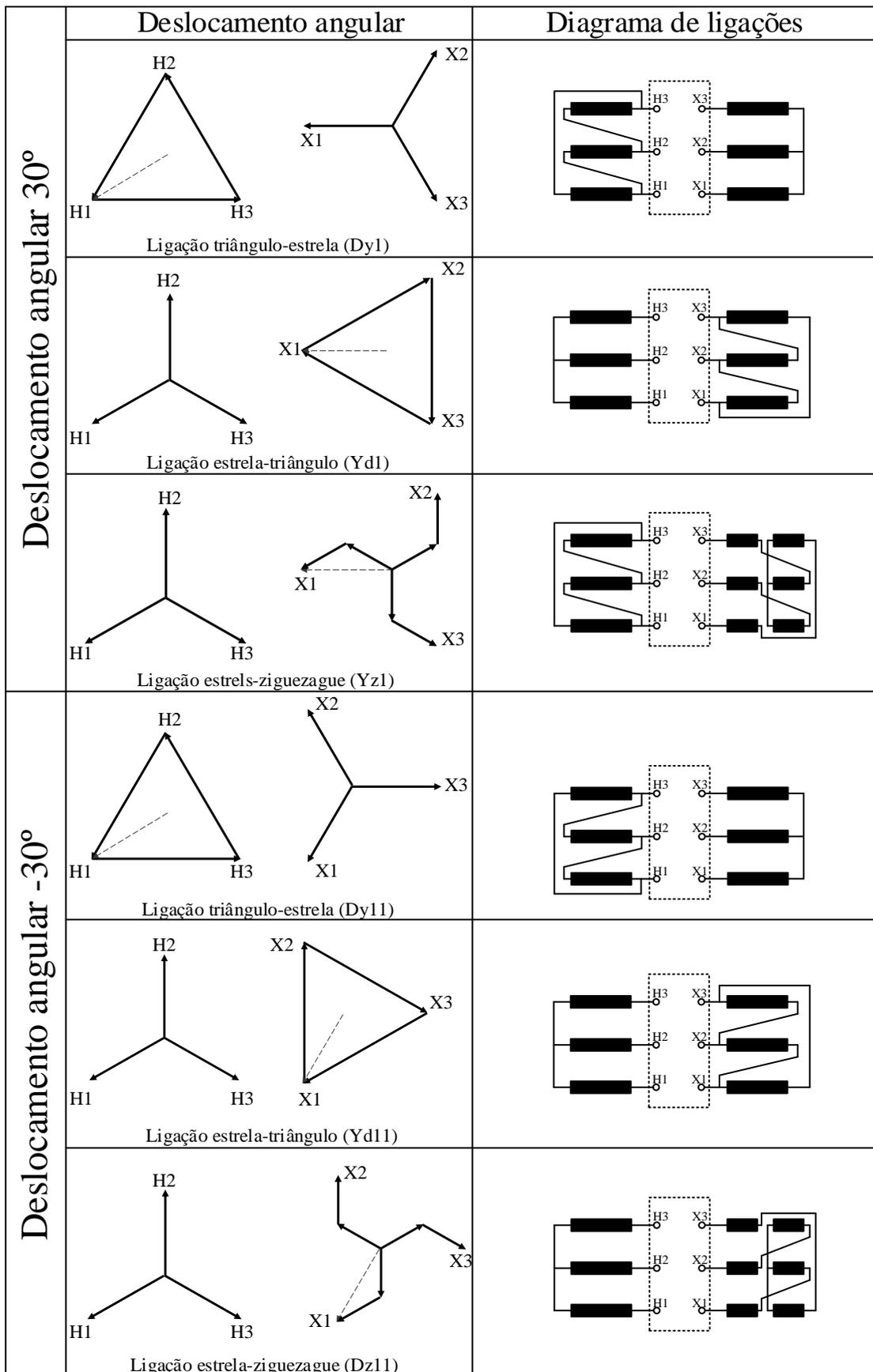


Figura 1.13 – Diagrama de ligações para transformadores trifásicos com defasamento angular de 30° e -30°, com seu respectivos diagramas fasoriais.

4) Componentes simétricos para sistema hexafásico

Desenvolvido pelo Dr. Fortescue, o “Método de Componentes Simétricos aplicado à solução de Circuitos Polifásicos” é uma ferramenta bastante utilizada na resolução de circuitos elétricos desbalanceados. Segundo o Teorema de Fortescue, um conjunto de N fasores desequilibrados pode ser representado por um sistema com mesmo número de fasores equilibrados.

Neste contexto, podemos aplicar tal teorema ao sistema hexafásico. Dessa forma, seis fasores desequilibrados (tensão ou corrente) podem ser decompostos em seis sistemas de fasores equilibrados. Os seis conjuntos equilibrados são:

1. Componente de sequência primeira (Positiva)
2. Componente de sequência segunda
3. Componente de sequência terceira
4. Componente de sequência quarta
5. Componente de sequência quinta (Negativa)
6. Componente de sequência sexta (Zero)

O conjunto de fasores desequilibrados com seis fases é composto pela soma vetorial das componentes de sequência daquela mesma fase. As tensões de um sistema hexafásico desequilibrado, corresponde a soma vetorial das componentes das seis sequências, conforme equação (1.6).

$$\begin{aligned}V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} + V_{a4} + V_{a5} + V_{a6} \\V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} + V_{b4} + V_{b5} + V_{b6} \\V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} + V_{c4} + V_{c5} + V_{c6} \\V_d &= V_{d1} + V_{d2} + V_{d3} + V_{d4} + V_{d5} + V_{d6} \\V_e &= V_{e1} + V_{e2} + V_{e3} + V_{e4} + V_{e5} + V_{e6} \\V_f &= V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} + V_{f4} + V_{f5} + V_{f6}\end{aligned}\tag{1.6}$$

A componente de sequência primeira (sequência positiva) é escolhida como o conjunto de 6 (N) fasores de igual magnitude e espaçados em 60° ($360/N$). As demais sequências são definidas com fasores espaçados em $m \cdot \frac{360}{N}$, onde m é correspondente a cada sequência. Assim, a componente de sequência segunda é definida a partir de fasores

espaçados em $2 \cdot \frac{360}{6}$, resultando em 120° . Seguindo a mesma lógica para as demais, obtemos a sequência terceira espaçada em 180° , a sequência quarta em 240° , a sequência quinta em 300° (sequência negativa) e a sequência sexta em 360° ou 0° (sequência zero).

Considerando um sistema composto por seis fases, sendo nomeadas como a, b, c, d, e e f , admitindo a sequência direta “abcdef”, seus fasores de tensão desequilibrados podem ser decompostos em seis conjuntos de fasores equilibrados. Na Figura 1.14, temos os fasores das componentes simétricas para uma tensão hexafásica desequilibrada.

Na aplicação do teorema de componentes simétricas é necessário a utilização de um operador que causa uma rotação no fasor. Para o caso do sistema hexafásico é adotado o operador b , que provoca uma rotação de 60° no sentido anti-horário, equação (1.7).

$$b = 1 \angle 60^\circ \quad (1.7)$$

A Figura 1.15 apresenta o diagrama fasorial para as várias potências do operador b .

Referenciando a Figura 1.14, a equação (1.8) faz a relação entre as componentes de sequência da fase b e a fase a (referência) utilizando o operador b . Relações similares podem ser feitas para as demais fases.

$$\begin{aligned} V_{b1} &= b^5 V_{a1} \\ V_{b2} &= b^4 V_{a2} \\ V_{b3} &= b^3 V_{a3} \\ V_{b4} &= b^2 V_{a4} \\ V_{b5} &= b V_{a5} \\ V_{b0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Utilizando essas relações, com o auxílio do operador b , podemos representar o conjunto das tensões do sistema hexafásico na forma de matriz, equação (1.9).

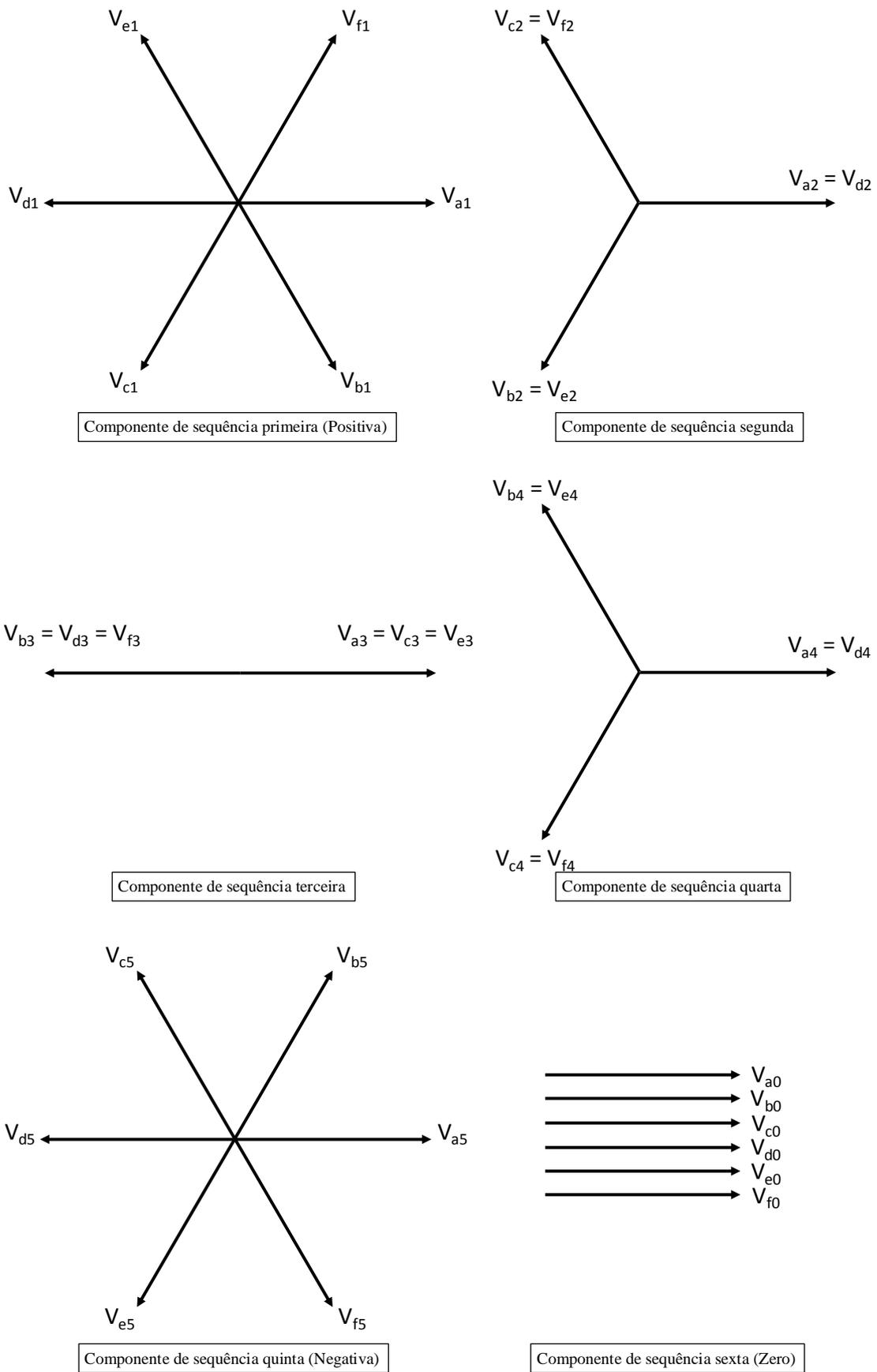


Figura 1.14 – Componentes simétrica de tensão desequilibrado para um sistema hexafásico

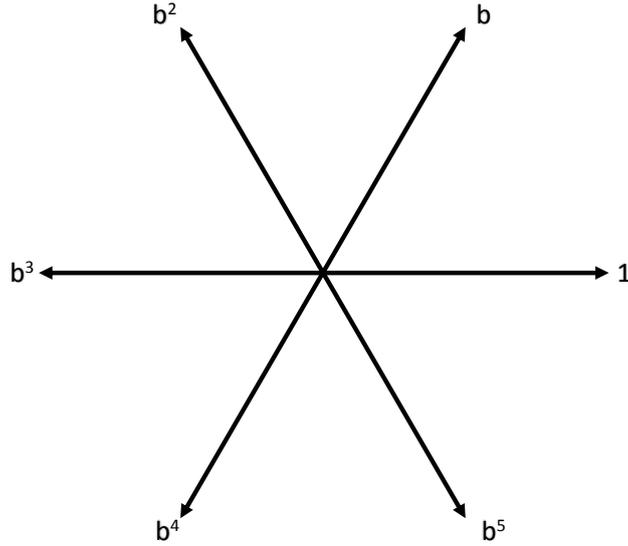


Figura 1.15 – Diagrama fasorial das várias potências do operador b.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^3 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a3} \\ V_{a4} \\ V_{a5} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

A equação (1.9) pode ainda ser escrita na forma da equação (1.10), onde A é chamada de matriz de transformação de componente simétrica para seis fases.

$$\overline{V}_p = [A] \overline{V}_s \quad (1.10)$$

A matriz inversa de A é dada na equação (1.11).

$$A^{-1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b^3 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Com o uso da matriz inversa da transformação de componentes simétricos, podemos obter as tensões de componentes simétricas a partir das tensões desequilibradas do sistema, conforme equação (1.12).

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a3} \\ V_{a4} \\ V_{a5} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b^3 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

As componentes simétricos das demais fases, podem ser obtidas a partir da equação (1.8) juntamente com o auxílio da Figura 1.14.

5) Análise dos tipos de faltas em sistemas hexafásico

Vários tipos de falta podem ocorrer no sistema elétrico trifásico, como curto-circuito trifásico, trifásico-terra, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. No caso do sistema hexafásico essa lista fica um pouco maior. Neste sistema, composto por seis fases, pode ocorrer os seguintes tipos de curto-circuito:

- 1) Fase-terra (FT);
- 2) Duas fases (FF);
- 3) Duas fases e terra (FFT);
- 4) Três fases (FFF);
- 5) Três fases e terra (FFFT);
- 6) Quatro fases (FFFF);
- 7) Quatro fases e terra (FFFFT);
- 8) Cinco fases (FFFFF);
- 9) Cinco fases e terra (FFFFFT);
- 10) Seis fases (FFFFFF);
- 11) Seis fases e terra (FFFFFFT).

Para analisar a severidade de cada tipo de falta e determinar a corrente de falta, pode-se utilizar a ferramenta de componentes simétricas. No caso de faltas no sistema

hexafásico, um fator que influencia na determinação da corrente é a tensão. Em uma falta envolvendo duas fases podemos ter uma tensão de fase igual, $\sqrt{3}$ vezes maior e ainda o dobro da tensão fase-terra. Portanto, um curto-circuito entre as fases *ab*, será diferente da falta entre as fases *ac*, que por sua vez será diferente também do curto entre as fases *ad*.

Neste contexto, existe a possibilidade de 120 combinações para ocorrência de curto-circuito em um circuito hexafásico. A Tabela 1, apresenta para cada tipo de falta a quantidade de combinações possível entre as seis fases do sistema hexafásico.

Tabela 1 – Número de combinações de faltas por tipo em sistema hexafásico.

Tipo de Falta	Número total de combinações
6 Fases	1
6 Fases e Terra	1
5 Fases	6
5 Fases e Terra	6
4 Fases	15
4 Fases e Terra	15
3 Fases	20
3 Fases e Terra	20
2 Fases	15
2 Fases e Terra	15
1 Fase e Terra	6
TOTAL	120

É importante analisar cada tipo de falta, considerando a combinação das fases a fim de verificar a intensidade de corrente no sistema e o comportamento da tensão nas fases em falta e nas fases sã.

6) Adaptação de estrutura do sistema trifásico para hexafásico

Para concepção da linha hexafásica é necessário realizar adaptações nas estruturas de suporte dos condutores. Atualmente, o padrão adotado para a distribuição de energia elétrica é o circuito trifásico, sendo possível utilizar a rede aérea ou subterrânea, sendo que esta última não será aqui abordado. Na rede aérea encontramos três possíveis topologias (convencional, compacta e isolada) com utilização de diferentes tipos de condutores.

A rede de distribuição aérea convencional adota o cabo de alumínio nu, ou seja, o condutor não possui camada de isolamento, nem proteção. A rede aérea compacta é

construída utilizando como condutor elétrico, o cabo de alumínio protegido. Este tipo de cabo possui uma proteção não isolante. Portanto, este tipo de rede deve obedecer um certo afastamento entre os condutores, de acordo com sua classe de tensão. Por fim, temos ainda a rede aérea isolada, que neste caso é adotado como condutor o cabo de alumínio isolado multiplexado.

Nesta parte do trabalho, será proposto a estrutura para o sistema hexafásico a ser utilizado em rede aérea convencional e compacta. Estas estruturas são nada mais do que uma adaptação das estruturas de circuito duplo trifásico existentes. Como no circuito hexafásico, as tensões entre as fases adjacentes possuem magnitude iguais as tensões fase-terra, ou seja, a tensão tem uma menor amplitude quando comparado ao circuito trifásico, o afastamento entre as fases, na estrutura hexafásica, pode ser menor. Esta redução na distância entre as fases do circuito hexafásico, pode resultar em estrutura mais compactas, além de impactar nas constantes de linha da rede elétrica.

Para a rede aérea convencional com circuito trifásico duplo, utilizando condutor de alumínio nu, é adotado a estrutura da Figura 1.16. Para o sistema hexafásico, o afastamento adotado entre as fases é reduzido, proporcionando uma estrutura mais compacta. Na Figura 1.17, temos a proposta para estrutura da rede de distribuição aérea convencional adaptada para o sistema hexafásico.

Na Figura 1.18, temos a estrutura utilizada para redes de distribuição energia em circuito trifásico duplo do tipo compacta. Como o cabo utilizado é protegido, o afastamento requerido entre os condutores, para este tipo de estrutura, é menor quando comparado a rede convencional. Como proposta para rede hexafásica compacta, temos a estrutura da Figura 1.19. Neste caso deve ser realizada uma adaptação do suporte isolante dos condutores, de forma que acomode os seis condutores.

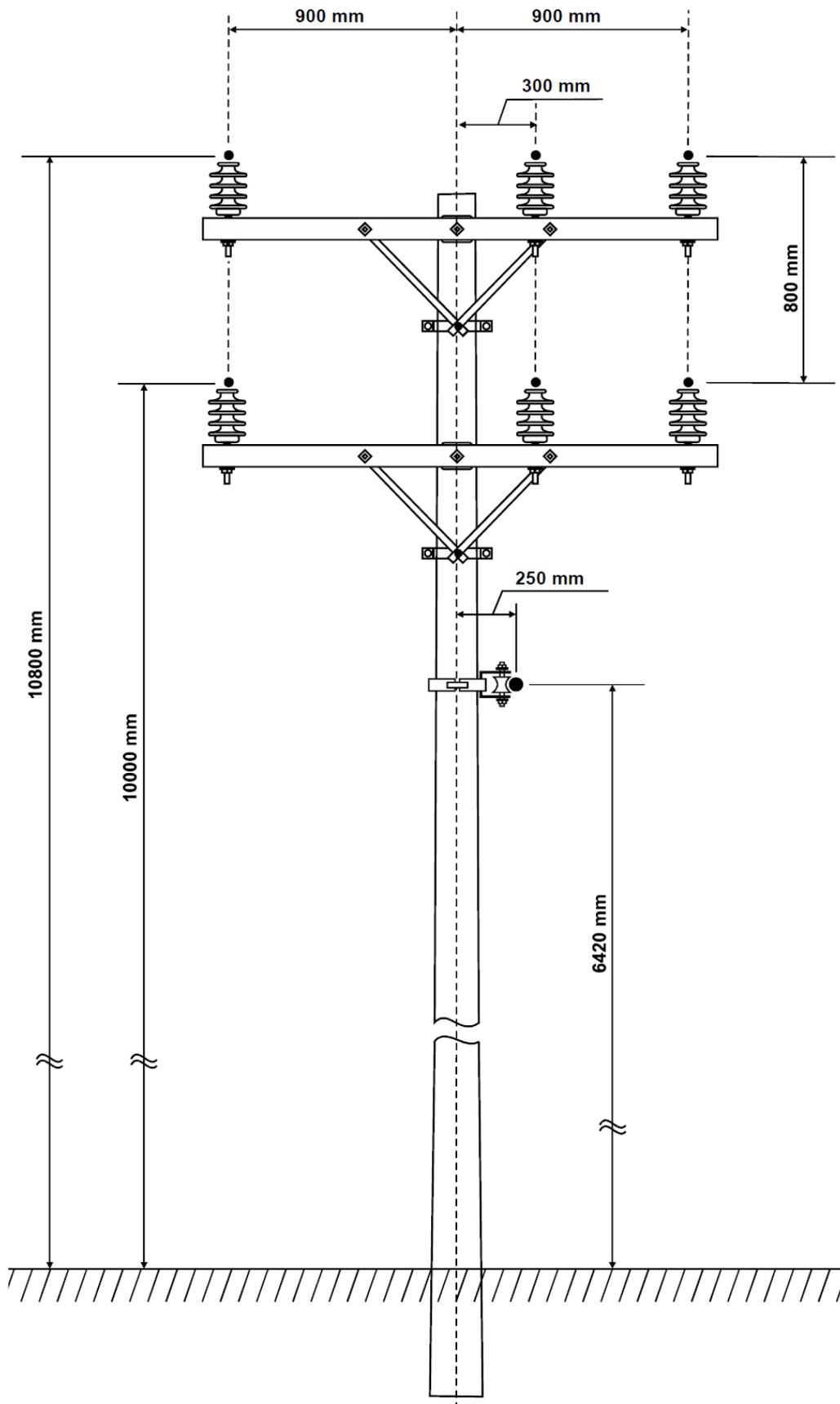


Figura 1.16 – Estrutura de rede aérea convencional para circuito trifásico duplo.

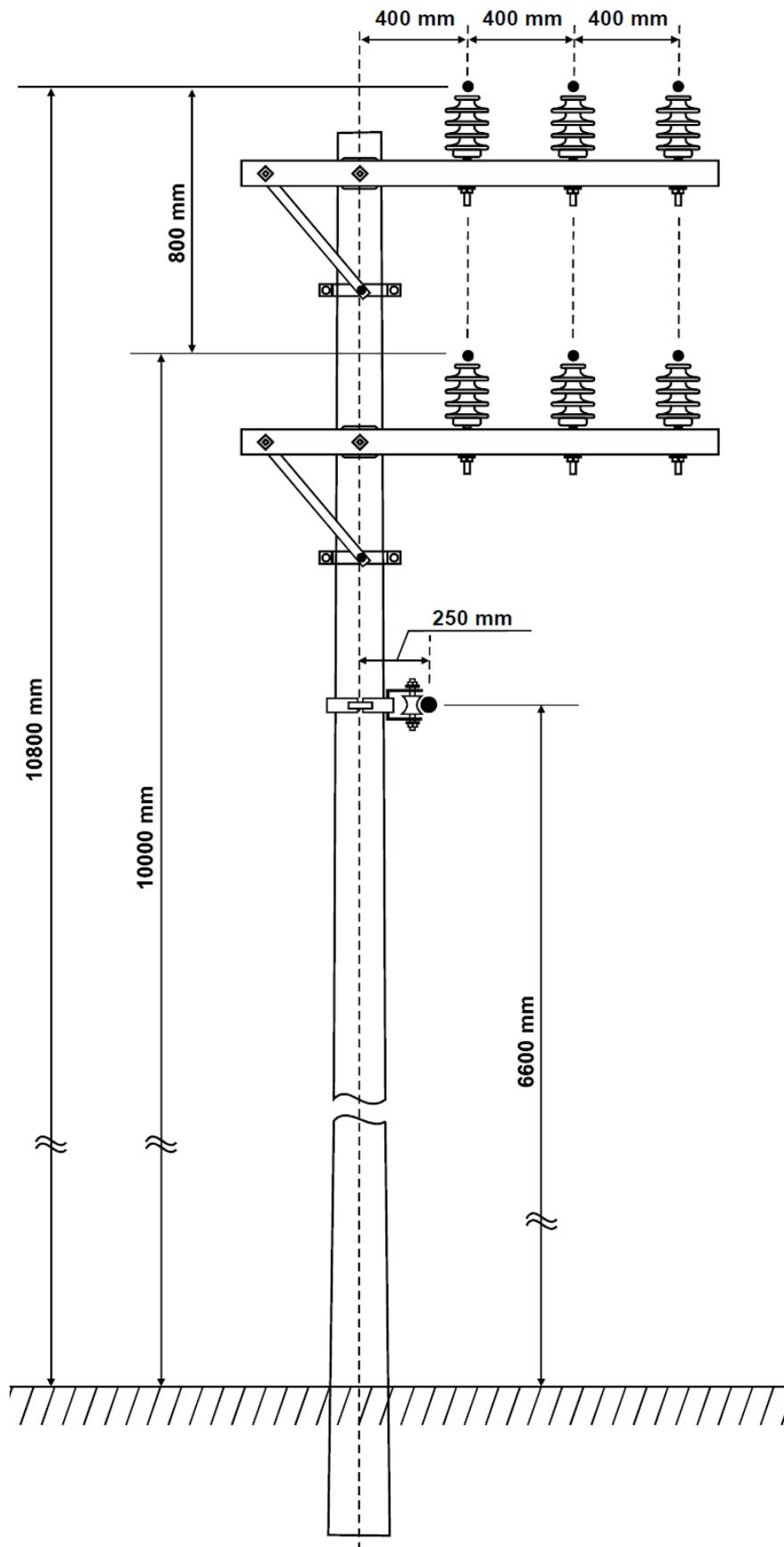


Figura 1.17 – Estrutura de rede aérea convencional para circuito hexafásico.

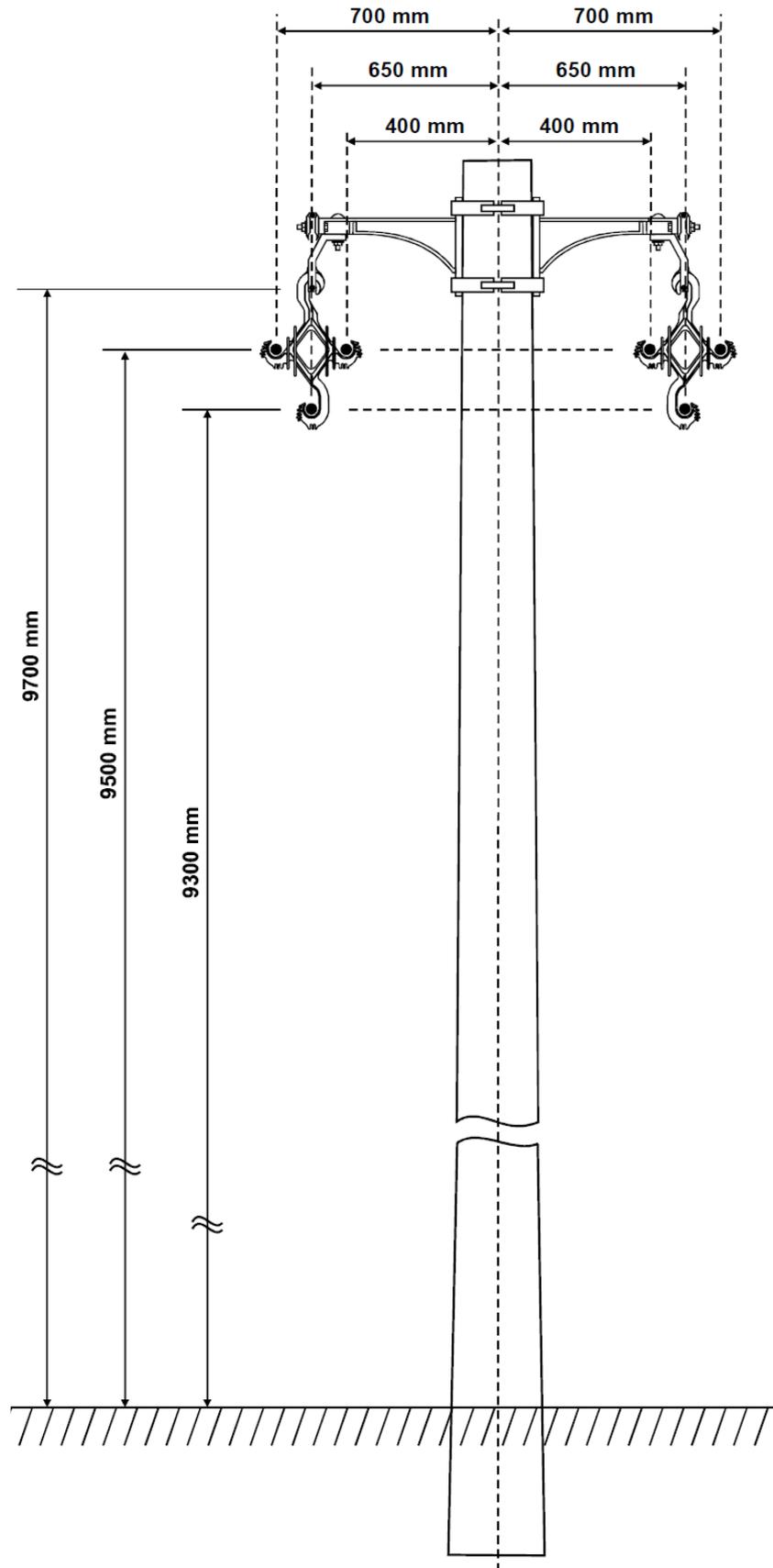


Figura 1.18 – Estrutura de rede aérea compacta para circuito trifásico duplo.

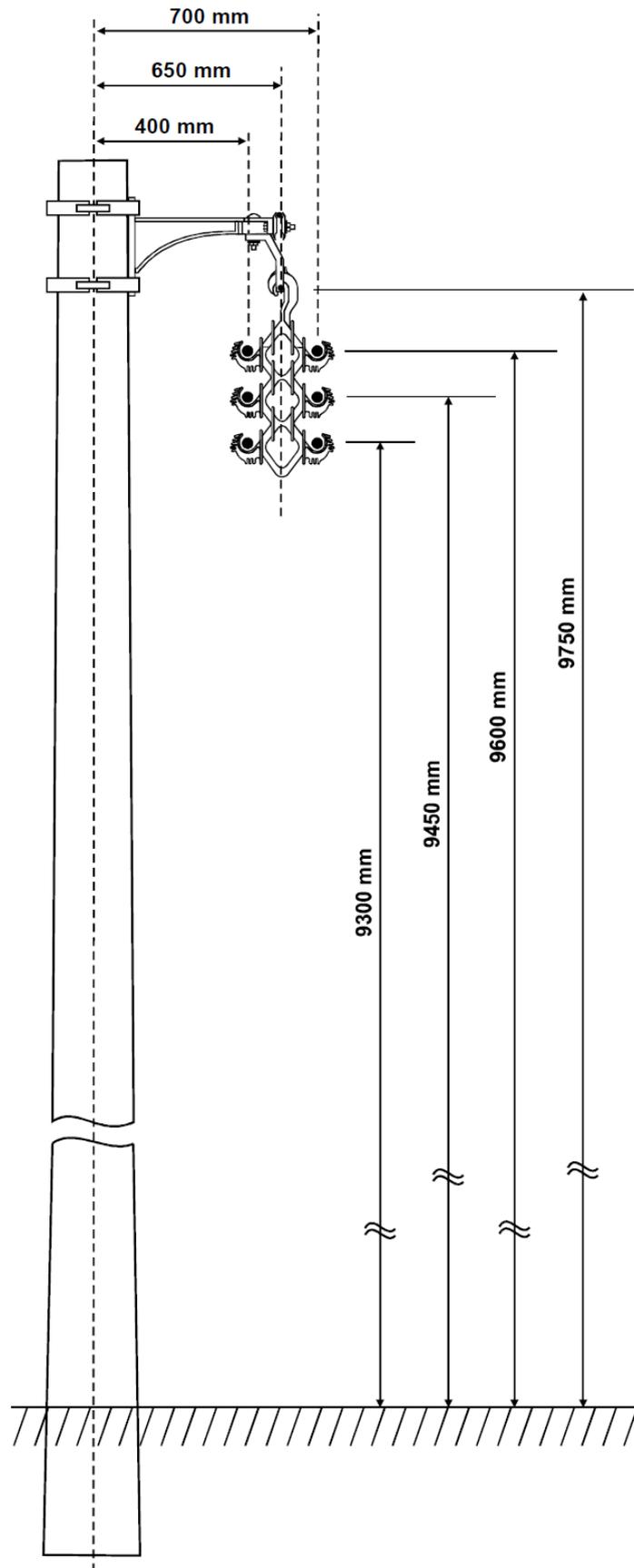


Figura 1.19 – Estrutura de rede aérea compacta para circuito hexafásico.

Uma preocupação que se deve ter, tanto no projeto, quanto na construção da rede de distribuição hexafásica, é no tocante à disposição das fases na estrutura. Atualmente, as redes de distribuição trifásica não possuem uma padronização da disposição de fases. Porém, para rede hexafásica, este item é de extrema importância. O que permite a estrutura da rede hexafásica ser mais compacta é o fato da tensão entre as fases adjacentes serem iguais a tensão fase-terra. Neste contexto, temos que obedecer a disposição das fases nas redes hexafásica conforme Figura 1.20 para a rede convencional, e Figura 1.21 para rede compacta.

Nesta disposição, deve-se ainda preocupar com a distância entre as fases opostas, pois a tensão entre as fases opostas é o dobro da tensão fase-terra. Portanto, este espaçamento deve atender aos limites mínimos de espaçamento de acordo com o nível de tensão. Esta questão não foi verificada neste trabalho, devendo ser abordado em trabalhos futuros. O espaçamento mais preocupante é em relação as fases *B* e *E*.

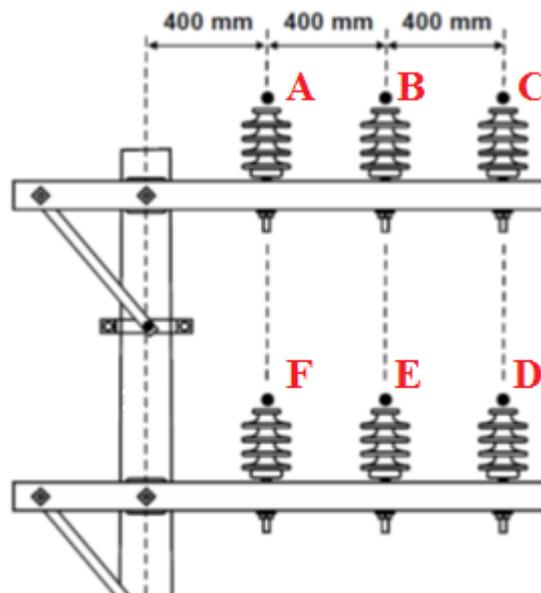


Figura 1.20 – Disposição das fases na estrutura da rede convencional hexafásica.

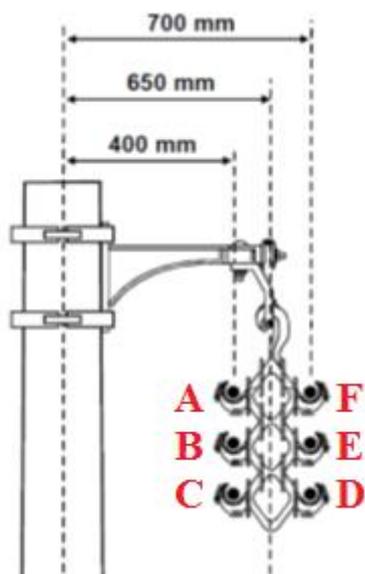


Figura 1.21 – Disposição das fases na estrutura da rede compacta hexafásica.

7) Parâmetros de linha para rede hexafásica

O comportamento elétrico de uma rede elétrica, varia dependendo de seu comprimento e de seus parâmetros elétricos. Os parâmetros de linha são: a resistência elétrica, a indutância, a capacitância e a condutância de dispersão.

A resistência elétrica dos condutores é uma característica intrínseca do material condutor e da frequência (efeito pelicular) da corrente alternada que percorre o mesmo. Esta resistência é que define uma parcela das perdas em um sistema elétrico. A indutância e capacitância dependem principalmente do meio em que se encontra a rede elétrica e suas proporções geométricas. A indutância depende também da natureza magnética dos condutores e ainda da frequência da rede. A condutância de dispersão representa as perdas provenientes do dielétrico as quais são proporcionais ao quadrado da tensão.

Para o cálculo dos parâmetros da linha hexafásica, deve-se definir a disposição geométrica dos condutores, item abordado no tópico anterior, e o condutor elétrico a ser adotado na rede. Os dados referentes as características construtivas dos condutores, são disponibilizados pelo fabricante.

Com auxílio da rotina “RLC Line Parameters” do software Matlab e usando a disposição geométrica da rede, citados no tópico anterior, podemos obter os parâmetros elétricos para rede de distribuição hexafásica.

As características construtivas de condutores elétricos são fornecidas pelos fabricantes. Na Tabela 2, encontramos os dados referentes aos condutores de alumínio,

nu, para as seções padronizadas mais comum em redes de distribuição aérea convencional. Já na Tabela 3, temos as características construtivas dos condutores de alumínio protegido utilizados nas redes de distribuição compacta, classe 15kV.

Tabela 2 – Características construtivos do cabo de alumínio nu.

AWG/MCM	Diâmetro Nominal do Cabo	Resistência Elétrica CC a 20° C	Capacidade de Condução de Corrente
	mm	Ω/km	A
6	4,65	2,1826	103
4	5,88	1,3650	115
3	6,60	1,0799	135
2	7,41	0,8595	152
1	8,34	0,6785	200
1/0	9,36	0,5387	205
2/0	10,50	0,4281	235
3/0	11,79	0,3395	270
4/0	13,26	0,2684	315

Tabela 3 – Características construtivos do cabo de alumínio protegido, classe 15kV.

Seção	Diâmetro Nominal do Cabo	Resistência Elétrica CC a 20° C	Capacidade de Condução de Corrente
mm^2	mm	Ω/km	A
35	7,1	0,868	171
50	8,2	0,641	205
70	9,8	0,443	257
95	11,5	0,320	315
120	13,0	0,253	365
150	14,4	0,206	415

Com as dimensões geométricas dos condutores para cada tipo de rede, juntamente com as características construtivas dos condutores, obtemos os valores de resistência, indutância e capacitância, tanto de sequência positiva quanto para sequência zero. Essas grandezas são obtidas na rotina “RLC Line Parameters” do software Matlab. Na Tabela 4 e Tabela 5 estão dispostos os parâmetros de linha para a rede aérea convencional com circuito trifásico duplo e circuito hexafásico, respectivamente.

Tabela 4 – Parâmetros de linha para a rede aérea convencional, circuito trifásico duplo.

Cabo [AWG/MCM]	Resistência [Ω /km]		Indutância [mH/km]		Capacitância [nF/km]	
	r_1	r_0	x_1	x_0	C_1	C_0
6	2,1827	2,3556	1,2801	5,289	9,2447	5,5163
4	1,3651	1,538	1,2332	5,2421	9,6272	5,6943
3	1,08	1,253	1,21	5,219	9,8275	5,7867
2	0,85964	1,0326	1,1869	5,1958	10,037	5,8828
1	0,67868	0,85162	1,1632	5,1722	10,26	5,9848
1/0	0,53892	0,71186	1,1402	5,1491	10,488	6,0882
2/0	0,42838	0,60132	1,1172	5,1261	10,726	6,1954
3/0	0,33985	0,51279	1,094	5,1029	10,977	6,3078
4/0	0,26884	0,44178	1,0705	0,50794	11,244	6,4266

Tabela 5 – Parâmetros de linha para a rede aérea convencional, circuito hexafásico.

Cabo [AWG/MCM]	Resistência [Ω /km]		Indutância [mH/km]		Capacitância [nF/km]	
	r_1	r_0	x_1	x_0	C_1	C_0
6	2,1827	2,3556	1,1258	5,5977	10,445	4,9407
4	1,3651	1,538	1,0788	5,5508	10,932	5,0821
3	1,08	1,253	1,0557	5,5527	11,188	5,1551
2	0,85964	1,0326	1,0326	5,5045	11,458	5,2307
1	0,67868	0,85162	1,0089	5,4808	11,747	5,3106
1/0	0,53892	0,71186	0,98583	5,4578	12,044	5,3912
2/0	0,42838	0,60132	0,96284	5,4348	12,355	5,4744
3/0	0,33985	0,51279	0,93966	5,4116	12,685	5,5612
4/0	0,26884	0,44179	0,91614	0,53881	13,039	5,6525

Os parâmetros de linha para a rede aérea compacta são apresentados na Tabela 6, para circuito trifásico duplo, e na Tabela 7, para o circuito hexafásico.

Tabela 6 – Parâmetros de linha para a rede aérea compacta, circuito trifásico duplo.

Cabo [mm ²]	Resistência [Ω /km]		Indutância [mH/km]		Capacitância [nF/km]	
	r_1	r_0	x_1	x_0	C_1	C_0
35	0,86814	1,0417	0,91669	5,7602	12,915	4,3209
50	0,64119	0,81471	0,88788	5,7314	13,364	4,3828
70	0,44327	0,61679	0,85222	5,6957	13,966	4,4623
95	0,32037	0,49389	0,82021	5,6637	14,533	4,5366
120	0,2355	0,40902	0,79567	5,6392	15,039	4,5955
150	0,20657	0,38009	0,7752	5,6187	15,469	4,646

Tabela 7 – Parâmetros de linha para a rede aérea compacta, circuito hexafásico.

Cabo [mm ²]	Resistência [Ω/km]		Indutância [mH/km]		Capacitância [nF/km]	
	r ₁	r ₀	x ₁	x ₀	c ₁	c ₀
35	0,86814	1,0417	0,84494	5,9037	14,244	5,7922
50	0,64119	0,8147	0,81613	5,8749	14,799	5,9226
70	0,44327	0,61678	0,78047	5,8392	15,55	6,0935
95	0,32037	0,49388	0,74847	5,8072	16,292	6,2567
120	0,25347	0,42698	0,72393	5,7827	16,912	6,3885
150	0,20657	0,38009	0,70345	5,7622	17,468	6,5034

Note que em ambas as estruturas, o valor de resistência não varia quando comparado o circuito trifásico duplo com o circuito hexafásico, devido ao fato da resistência ser função do condutor. Como é utilizado o mesmo cabo, tanto para circuito trifásico duplo quanto para circuito hexafásico, a resistência será a mesma para ambas topologias.

Quando comparamos a indutância do circuito trifásico duplo com a do circuito hexafásico, é notório uma redução do valor da indutância de sequência positiva. O motivo desta redução é devido ao fato do encurtamento do afastamento das fases obtido na rede com circuito hexafásico. Para a capacitância o efeito é contrário, no circuito hexafásico a capacitância de sequência positiva é maior que a do circuito trifásico duplo. A capacitância tende a aumentar a medida que o afastamento entre as fases é reduzido.

8) Análise da queda de tensão ao longo do alimentador hexafásico em comparação ao trifásico com circuito duplo

Uma questão de suma importância na análise do desempenho da rede de distribuição é no que tange a queda de tensão ao longo do alimentador. Principalmente em ramais longos, esse ponto deve ser verificado para garantir o perfeito desempenho das cargas conectadas nesta rede.

O objetivo deste tópico é analisar a queda de tensão ao longo de um alimentador hexafásico em comparação a um alimentador trifásico de circuito duplo. A queda de tensão mencionada ocorre sobre a impedância intrínseca do condutor elétrico.

Na Figura 1.22, temos representado, de forma trivial, uma fase da rede de distribuição que interliga a fonte, barra 1, até a carga, barra 2. Ao conectar uma carga na

barra 2, surge uma corrente no circuito. Esta corrente circulando pelo condutor, resultará em uma queda de tensão sobre a impedância da linha. A tensão na carga será menor do que a tensão disponibilizada pela fonte. A queda de tensão depende da corrente que circula pela rede e das características do material condutor, que por sua vez depende do comprimento do circuito.

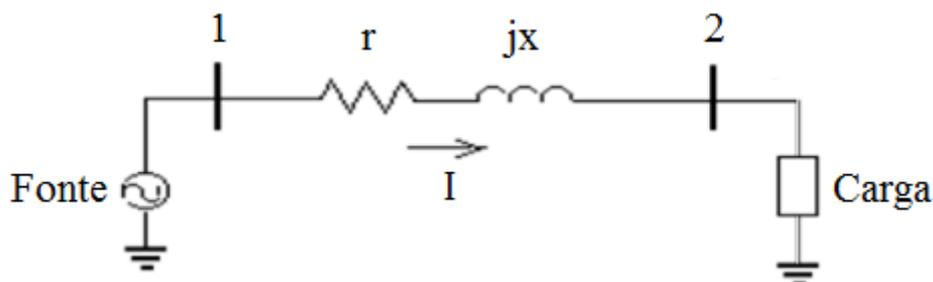


Figura 1.22 – Circuito equivalente da distribuição de energia elétrica, por fase.

Pela equação (1.13), temos a tensão disponibilizada na barra 2, que se encontra conectada a carga.

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - (r + jx)\dot{I} \quad (1.13)$$

Para encontrar a queda de tensão ao longo do alimentador, tanto hexafásico quanto trifásico duplo, é necessário saber a corrente que circula pelo alimentador, o seu comprimento e a tensão na fonte. Para análise realizada aqui, será admitido um alimentador de distribuição com os dados constados na Tabela 8. Será adotado uma rede com tensão de linha de 13,8 kV.

Tabela 8 – Dados do ramal alimentador analisado.

Comprimento do ramal	Fator de potência		Carregamento em relação a capacidade máxima de condução de corrente do cabo	Tensão na Fonte (Barra 1)	
	km	Cos θ		θ	Módulo [V]
2	0,92 Ind.	-23,07 °	50%	7.967,43	0°

Será analisado a queda de tensão para diversos tipos de cabos para mesma topologia de rede. Com base na equação (1.13), podemos determinar a tensão na carga juntamente com a queda de tensão ao longo do alimentador.

Analisando a rede de distribuição de energia convencional, temos na Tabela 9, tanto a queda de tensão ao longo do alimentador, quanto a tensão na carga para rede com

circuito trifásico duplo para diversos tipos de cabos. Nesta análise é considerado que ambos os circuitos possuem o mesmo comprimento e o mesmo carregamento.

Tabela 9 – Tensões para a rede convencional com circuito trifásico duplo.

Condutor	Corrente	Impedância		Queda de tensão no condutor		Tensão na carga	
		AWG/MCM	A	r ₁ [Ω]	x ₁ [Ω]	Módulo [V]	Ângulo [°]
6	51,5	4,365	0,965	230,25	-10,61	7741,24	0,31
4	57,5	2,730	0,930	165,84	-4,27	7802,06	0,09
3	67,5	2,160	0,912	158,27	-0,18	7809,16	0,00
2	76	1,719	0,895	147,31	4,42	7820,57	-0,08
1	100	1,357	0,877	161,60	9,79	7808,23	-0,20
1/0	102,5	1,078	0,860	141,32	15,50	7831,35	-0,28
2/0	118	0,857	0,842	141,18	21,44	7836,20	-0,38
3/0	135	0,680	0,825	144,29	27,44	7839,65	-0,49
4/0	157,5	0,538	0,807	152,75	33,26	7840,15	-0,61

Agora adotando o sistema de distribuição de energia elétrica convencional hexafásico, com o mesmo carregamento do circuito trifásico duplo, temos na Tabela 10 os valores de queda de tensão na linha e a tensão na carga.

Comparando as duas topologias, temos uma ligeira redução da queda de tensão ao longo do alimentador hexafásico, quando comparado com o sistema trifásico duplo, conforme Tabela 11. Essa redução é graças a redução da reatância indutiva da linha, conforme apontado na determinação das constantes de linha do tópico anterior. Com o aumento do carregamento ou do comprimento da rede esta diferença tende a aumentar.

Tabela 10 – Tensões para a rede convencional hexafásica.

Condutor	Corrente	Impedância		Queda de tensão no condutor		Tensão na carga	
		AWG/MCM	A	r ₁ [Ω]	x ₁ [Ω]	Módulo [V]	Ângulo [°]
6	51,5	4,365	0,849	229,03	-12,07	7743,62	0,35
4	57,5	2,730	0,813	163,81	-6,48	7804,70	0,14
3	67,5	2,160	0,796	155,38	-2,84	7812,24	0,06
2	76	1,719	0,779	143,44	1,29	7824,03	-0,02
1	100	1,357	0,761	155,60	6,19	7812,76	-0,12
1/0	102,5	1,078	0,743	134,20	11,52	7835,98	-0,20
2/0	118	0,857	0,726	131,95	17,20	7841,48	-0,29
3/0	135	0,680	0,708	132,54	23,11	7845,70	-0,38
4/0	157,5	0,538	0,691	137,87	29,03	7847,17	-0,49

Tabela 11 – Comparação da queda de tensão ao longo do alimentador para rede convencional.

3Φ	6Φ	Diferença
2,89%	2,87%	0,02%
2,08%	2,06%	0,03%
1,99%	1,95%	0,04%
1,85%	1,80%	0,05%
2,03%	1,95%	0,08%
1,77%	1,68%	0,09%
1,77%	1,66%	0,12%
1,81%	1,66%	0,15%
1,92%	1,73%	0,19%

Analisando agora a rede de distribuição compacta, temos na Tabela 12 a queda de tensão ao longo do alimentador e a tensão no ponto de conexão da carga para circuito trifásico duplo.

Adotando a rede de distribuição compacta hexafásica, com mesmo carregamento da rede com circuito trifásico duplo, temos a queda de tensão na linha e a tensão no ponto de conexão da carga apresentados na Tabela 13.

Tabela 12 – Tensões para a rede compacta com circuito trifásico duplo.

Condutor	Corrente	Impedância		Queda de tensão no condutor		Tensão na carga	
		r ₁ [Ω]	x ₁ [Ω]	Módulo [V]	Ângulo [°]	Módulo [V]	Ângulo [°]
35	85,5	1,736	0,691	159,78	-1,37	7807,70	0,03
50	102,5	1,282	0,669	148,28	4,49	7819,62	-0,09
70	128,5	0,887	0,643	140,70	12,86	7830,33	-0,23
95	157,5	0,641	0,618	140,25	20,91	7836,58	-0,37
120	182,5	0,507	0,600	143,34	26,73	7839,67	-0,47
150	207,5	0,413	0,584	148,52	31,67	7841,42	-0,57

Tabela 13 – Tensões para a rede compacta hexafásica.

Condutor	Corrente	Impedância		Queda de tensão no condutor		Tensão na carga	
		mm ²	A	r ₁ [Ω]	x ₁ [Ω]	Módulo [V]	Ângulo [°]
35	85,5	1,736	0,637	158,13	-2,92	7809,51	0,06
50	102,5	1,282	0,615	145,79	2,56	7821,79	-0,05
70	128,5	0,887	0,588	136,73	10,50	7833,03	-0,18
95	157,5	0,641	0,564	134,48	18,30	7839,87	-0,31
120	182,5	0,507	0,546	135,95	24,04	7843,47	-0,40
150	207,5	0,413	0,530	139,50	29,01	7845,72	-0,49

Como no caso da rede convencional, na rede compacta temos também uma redução na queda de tensão ao longo do alimentador hexafásico, quando comparado com o circuito trifásico duplo.

Tabela 14 – Comparação da queda de tensão ao longo do alimentador para rede compacta.

3Φ	6Φ	Diferença
2,01%	1,98%	0,02%
1,86%	1,83%	0,03%
1,77%	1,72%	0,05%
1,76%	1,69%	0,07%
1,80%	1,71%	0,09%
1,86%	1,75%	0,11%

9) Análise das perdas técnicas e queda de tensão do sistema trifásico duplo comparado com o hexafásico

De posse das constantes de linha da rede de distribuição hexafásica é possível ainda determinar as perdas técnicas e a queda de tensão ao longo do alimentador hexafásico e comparar com o sistema trifásico duplo.

As perdas no processo de distribuição de energia podem ser representadas basicamente por quatro tipos de perdas produzidas no condutor.

a) Perdas joule na resistência - ΔP_1 (W)

Esta perda é diretamente proporcional ao quadrado da corrente que circula no cabo, portanto, varia de acordo com o carregamento da rede. A energia é dissipada ao longo do cabo, dessa forma, a proporção da perda depende do material condutor.

$$\Delta P_1 = RI^2$$

Onde:

R – Resistência do cabo elétrico (Ω);

I – Corrente circulando no condutor (A).

b) Perdas no dielétrico - ΔP_2 (W)

Esta perda é diretamente proporcional ao quadrado da tensão e a condutância do cabo.

$$\Delta P_2 = GV^2$$

Onde:

G – Condutância de dispersão do dielétrico ($1/\Omega$);

V – Tensão entre o núcleo e a isolamento do cabo (V).

c) Perdas no dielétrico magnetizante - ΔP_3 (W)

Esta perda é diretamente proporcional à frequência e ao quadrado da corrente.

$$\Delta P_3 = I^2 \omega L \tan \delta$$

Onde:

I – Corrente de carregamento (A);

ω – Frequência angular (rad/s);

L – Indutância do cabo (H);

$\tan \delta$ = Perdas dielétrica no cabo.

d) Perdas no dielétrico polarizante- ΔP_4 (W)

Esta perda é diretamente proporcional à frequência e ao quadrado da tensão.

$$\Delta P_4 = V^2 \omega C \tan \delta$$

Onde:

V – Tensão entre o núcleo e a isolação do cabo (V);

ω – Frequência angular (rad/s);

C – Capacitância do cabo (F);

$\tan\delta$ = Perdas dielétrica no cabo.

Os quatro tipos de perdas acima citadas, representam basicamente as perdas de potência ativa no sistema elétrico de potência. Adicionalmente, podem ocorrer em sistemas com alta tensão as perdas por efeito corona.

O fator $\tan\delta$ representa as perdas de energia no isolante. Perdas dielétricas acima das admissíveis levam a um aquecimento do isolante, podendo levar à sua destruição, uma vez que as propriedades isolantes são afetadas pela elevação de temperatura.

Comparando o sistema hexafásico com o circuito trifásico duplo, para os dois primeiros tipos de perdas não teremos diferenças. Como estas perdas estão atreladas ao condutor, a tensão e a corrente da rede elétrica, para as duas tecnologias essas grandezas são iguais. Na comparação das distintas topologias, haverá discrepâncias nos dois últimos tipos de perdas. O fato de isso ocorrer é em razão da impedância reativa e capacitiva serem diferentes na rede trifásica com circuito duplo, comparada com a rede hexafásica.

Estes dois últimos tipos de perdas, representam uma parcela muito pequena em comparação com a perda total, sendo que a maior parcela é representada pelas perdas joulicas. Portanto, a diferença nas perdas totais será praticamente irrisória quando comparado o circuito hexafásico com o circuito trifásico duplo.

10) Análise das componentes harmônicas no sistema hexafásico

Um ponto que pode justificar a adoção do sistema de distribuição hexafásico é o fato da possibilidade da redução das emissões das correntes harmônicas no sistema elétrico. Com uma presença de cargas eletrônicas cada dia maior no sistema, a qualidade da energia elétrica é um ponto que deve ser monitorado para evitar danos em equipamentos. As cargas eletrônicas são consideradas uma das principais responsáveis pela geração de correntes harmônicas e consequentemente distorção da forma de onda da tensão e corrente.

Como o fluxo harmônico é no sentido da carga para a fonte, instalando cargas potencialmente perturbadoras no sistema hexafásico, dependendo do ângulo de cada harmônica pode ocorrer uma redução da amplitude de cada ordem.

A concepção do sistema hexafásico se dá a partir da adoção de dois transformadores trifásico com diferentes defasamento, conforme já apresentado anteriormente. Este defasamento que é responsável pela redução do conteúdo harmônico, porém, da mesma forma pode também amplificar.

Dado o circuito da Figura 1.23, temos a concepção de um ramal hexafásico a partir de um sistema trifásico. No sistema hexafásico, temos duas cargas do tipo não linear conectadas, ambas trifásicas, sendo cada uma em um transformador.

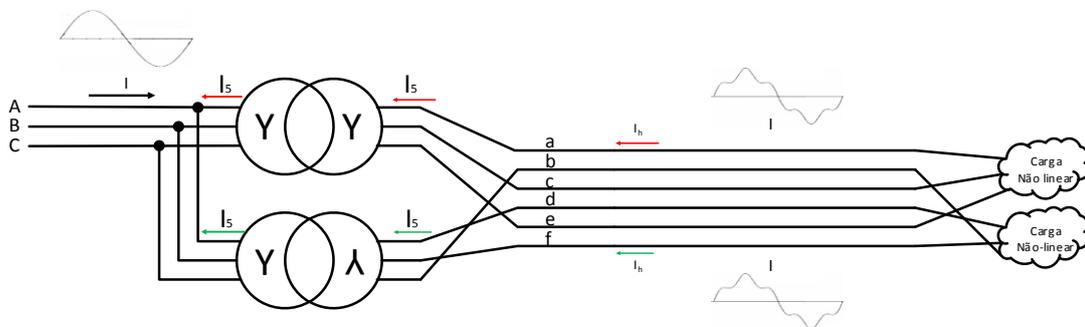


Figura 1.23 – Sistema hexafásico alimentando carga não linear.

Supondo que cada carga gera uma corrente com mesma amplitude e ângulo de quinta ordem, por exemplo. Esta corrente, ao passar pelo transformador, terá sua amplitude e defasamento angular alterado, dependendo da relação de transformação e do tipo de conexão das bobinas do equipamento.

Como exemplo, vamos analisar a conexão estrela-estrela e estrela-estrela invertida. No primeiro, não existe defasamento angular entre as tensões e correntes do primário para secundário. Já no segundo, temos um defasamento angular de 180° . Considerando que a corrente de quinta ordem harmônica está sendo gerada na carga, ao passar no primeiro transformador não haverá modificação no defasamento angular. Porém, a corrente que passa no segundo transformador, sofrerá um defasamento de 180° , ficando em oposição a corrente do primeiro transformador. Se as amplitudes das correntes forem iguais e com defasamento angular de 180° uma em relação a outra, haverá o cancelamento da corrente nesta ordem harmônica. No caso das amplitudes serem diferentes, não haverá o cancelamento, as duas correntes serão somadas de forma fasorial.

Na Figura 1.24, temos em um diagrama unifilar as correntes no primário dos transformadores. Como a amplitude das correntes são iguais e estão defasadas de 180° , haverá o cancelamento das mesmas. Apesar de ter apresentado apenas a corrente de 5ª ordem, o mesmo ocorre nas demais ordens.

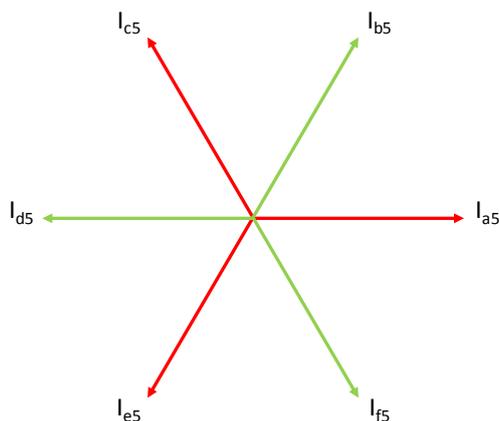


Figura 1.24 – Diagrama fasorial das correntes no primário dos transformadores.

O grande empecilho desta técnica, é que a amplitude e o ângulo variam muito de acordo com a operação da carga. A corrente é uma grandeza que não se pode controlar. Não podemos definir o ângulo de cada componente harmônica de corrente. Assim sendo, dependendo da operação da carga, na soma fasorial das correntes dos dois transformadores, pode ocorrer tanto a redução quanto o aumento da corrente naquela determinada ordem.

O mesmo pode ocorrer no caso de geração distribuída conectada na rede hexafásica, como na geração não consegue controlar o ângulo de cada ordem harmônica, não se pode garantir que cada gerador injete na rede uma corrente com o mesmo espectro harmônico.

a) Estudo de caso

A título de demonstração do exposto anteriormente, analisaremos o comportamento de uma rede hexafásica com carga não linear. Para realizar tal análise, o circuito da Figura 1.25 foi montado no *software* Matlab Simulink. O sistema hexafásico foi concebido a partir de um sistema trifásico com o uso de dois transformadores trifásico (45 kVA, 13.800/220-127 V), sendo um Dy1 e outro Dy11.

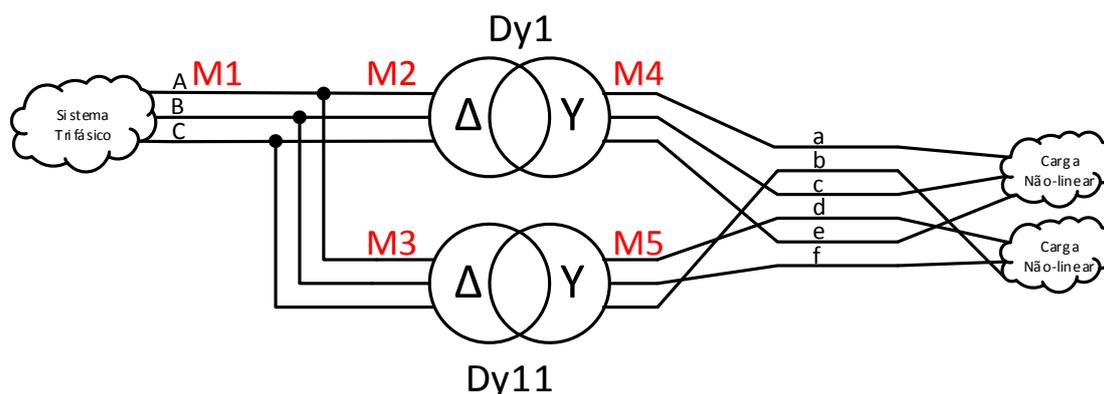


Figura 1.25 – Sistema hexafásico alimentando carga não linear.

Um equivalente de carga do tipo não-linear foi conectado em cada ramal dos transformadores trifásico no sistema hexafásico. As cargas são trifásicas e de potências iguais. Quanto as correntes harmônicas produzidas pela carga, foram adotados os valores apresentados na Tabela 15. Nesta tabela, consta ainda a sequência de fase (do sistema hexafásico) adotada para conexão das cargas. Ambas as cargas são equilibradas.

Tabela 15 – Módulo e ângulo da corrente (% de I_n) gerada pela carga não linear.

Ordem Harmônica	Fase do sistema hexafásico					
	A/D		C/F		E/B	
	Módulo [A]	Ângulo	Módulo [A]	Ângulo	Módulo [A]	Ângulo
3ª	1	0°	1	0°	1	0°
5ª	20	0°	20	120°	20	240°
7ª	10	0°	10	240°	10	120°

A medição de corrente foi realizada em cinco pontos de monitoração, denominados na sequência de M1 a M5. Na Figura 1.25, consta a localização de cada ponto de medição de corrente.

Na Figura 1.26 e na Figura 1.27, temos a forma de onda no ramal de alimentação das cargas do tipo não linear, medição realizada nos pontos M4 e M5, respectivamente. Na Tabela 16, temos as distorções harmônicas individuais e totais de corrente para cada fase, ambas no secundário do transformador Dy1.

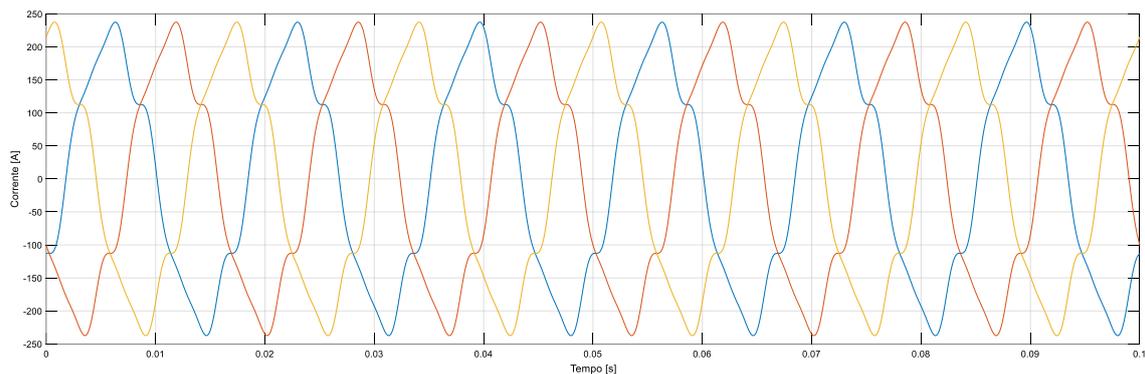


Figura 1.26 – Corrente no ponto de medição M4.

Tabela 16 – Distorção harmônica de corrente (% de I_n) no ponto de medição M4.

Ordem Harmônica	Fase					
	A		C		E	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
3ª	0,63%	156,9°	0,55%	156,7°	0,58%	158,0°
5ª	10,47%	145,1°	10,45%	265,2°	10,44%	25,0°
7ª	4,55%	135,8°	4,56%	15,9°	4,55%	255,6°
DHTi	11,43%		11,41%		11,40%	

Já no secundário do transformador Dy11, as distorções de corrente, tanto individual quanto total, estão na Tabela 17. Com a potência das cargas dos dois ramais são iguais, o conteúdo harmônico é praticamente igual.

Devido a diferença do defasamento angular dos dois transformadores, as formas de onda e o ângulo de cada ordem harmônica são diferentes nos dois ramais.

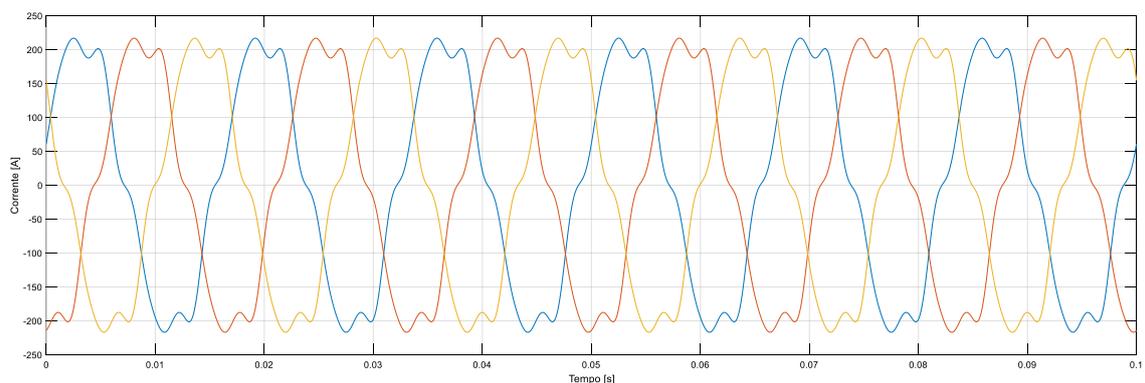


Figura 1.27 – Corrente no ponto de medição M5.

Tabela 17 – Distorção harmônica de corrente (% de I_n) no ponto de medição M5.

Ordem Harmônica	Fase					
	D		F		B	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
3ª	0,61%	160,0°	0,58%	155,4°	0,58%	155,9°
5ª	10,46%	265,0°	10,45%	25,0°	10,44%	145,0°
7ª	4,53%	15,9°	4,54%	255,7°	4,52%	135,6°
DHTi	11,41%		11,41%		11,39%	

As correntes no primário dos transformadores são medidas nos pontos M2 e M3. Na Figura 1.28, temos a forma de onda da corrente no ponto de medição M2, a qual possui o conteúdo harmônico, juntamente com a distorção harmônica total, constante na Tabela 18. Como o transformador possui a conexão Dy, a componente de terceira ordem é anulada no delta do transformador.

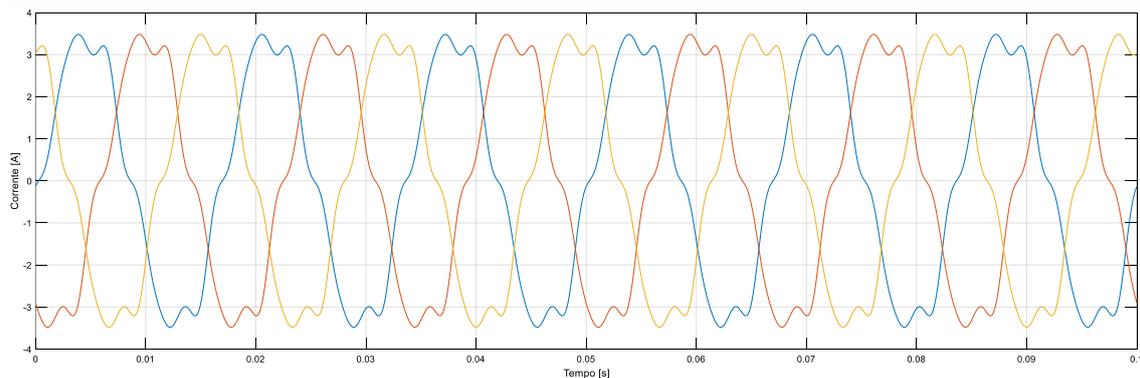


Figura 1.28 – Corrente no ponto de medição M2.

Tabela 18 – Distorção harmônica de corrente (% de I_n) no ponto de medição M2.

Ordem Harmônica	Fase					
	A		B		C	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
3ª	0,05%	158,3°	0,02%	2,2°	0,03%	-35,8°
5ª	10,42%	115,1°	10,39%	235,0°	10,41%	-5,1°
7ª	4,53%	165,8°	4,54%	45,6°	4,52%	-74,4°
DHTi	11,36%		11,34%		11,35%	

Da mesma forma, temos na Figura 1.29, a forma de onda no ponto de medição M3. Seu conteúdo harmônico é apresentado na Tabela 19. Note que a componente de 3ª ordem é praticamente anulada no delta do transformador.

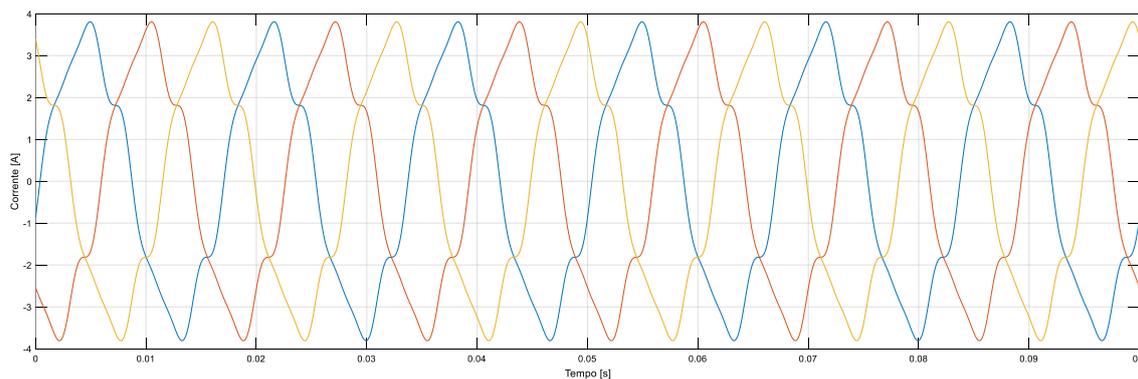


Figura 1.29 – Corrente no ponto de medição M3.

Tabela 19 – Distorção harmônica de corrente (% de I_n) no ponto de medição M3.

Ordem Harmônica	Fase					
	A		B		C	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
3ª	0,03%	206,2°	0,03%	35,4°	0,01%	-55,2°
5ª	10,41%	-65,1°	10,41%	55,0°	10,40%	174,9°
7ª	4,50%	-14,3°	4,52%	225,8°	4,51%	105,4°
DHTi	11,34%		11,35%		11,33%	

Comparando a Tabela 18 e Tabela 19, percebe-se que o conteúdo harmônico individual de cada ramal está defasado em, praticamente, 180°, ou seja, eles são opostos um em relação ao outro. Neste caso, como os dois ramais estão ligados em um ponto comum, as suas correntes irão se somar de formar fasorial.

Na Figura 1.30, temos a corrente no ponto de medição M1, que é a corrente total do sistema. Na Tabela 20, temos o conteúdo harmônico da corrente. Nota-se que a distorção harmônica total é praticamente nula. Ou seja, a forma de onda da corrente não apresenta deformação. Neste caso o que houve foi a anulação da corrente harmônica, pois na soma fasorial as correntes estão defasadas em 180°.

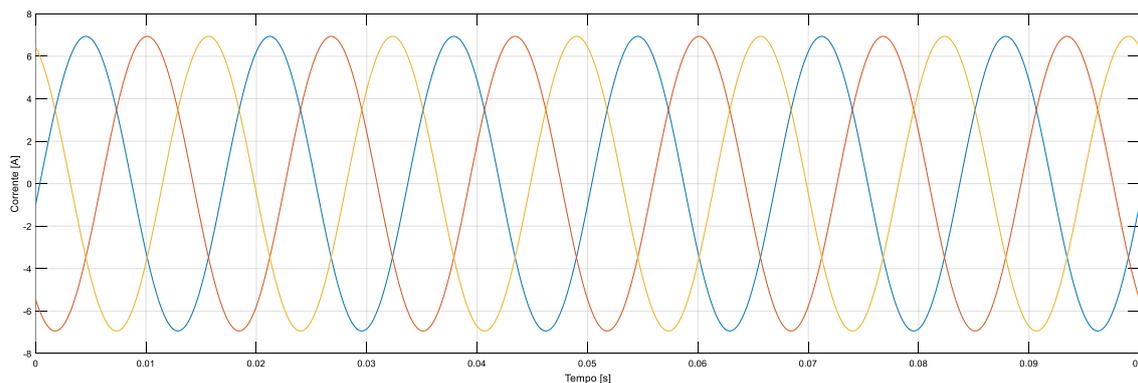


Figura 1.30 – Corrente no ponto de medição M1.

Tabela 20 – Distorção harmônica de corrente (% de I_n) no ponto de medição M1.

Ordem Harmônica	Fase					
	A		B		C	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
3ª	0,04%	178,3°	0,02%	23,8°	0,02%	-38,8°
5ª	0,02%	181,5°	0,01%	17,3°	0,01%	-23,7°
7ª	0,01%	181,7°	0,01%	12,9°	0,01%	-16,5°
DHTi	0,09%		0,06%		0,09%	

Somente ocorre esta situação, por causa do defasamento angular dos transformadores, que proporciona um conjunto de tensão trifásico defasado em 180° de um ramal em relação ao outro, e por causa também da carga ser equilibrada. No caso de uma variação do ângulo da corrente harmônica, ou alteração da sequência de fase, ou desequilíbrio da carga, haverá alterações na distorção harmônica total de corrente no ponto de acoplamento do sistema.

11) Sistema de distribuição trifásico a dois condutores derivado do sistema hexafásico

Com adoção da rede de distribuição de energia elétrica hexafásica, uma possibilidade que surge é a concepção de um circuito trifásico a partir de dois condutores do circuito hexafásico. Porém, ao contrário do que acontece no uso deste artifício para sistema trifásico, no sistema hexafásico não há a necessidade de um transformador defasador para obter o defasamento de 60° entre as duas fases. No próprio sistema hexafásico, as tensões entre as fases adjacentes já possuem o defasamento de 60° , Figura 1.2.

Na Figura 1.31 temos o diagrama do sistema para obtenção de um sistema trifásico a partir de dois condutores conectados em um sistema trifásico. As duas fases devem ter defasamento de 60° entre elas. Por isso, pode-se utilizar qualquer fase juntamente com outra adjacente. Neste caso, para exemplificar, utilizou a fase *A* e *B*. Conforme apresentado na Figura 1.3, a tensão entre a fase *A* e *B* de um sistema hexafásico possui módulo igual a tensão de fase-terra e defasamento angular de 60° .

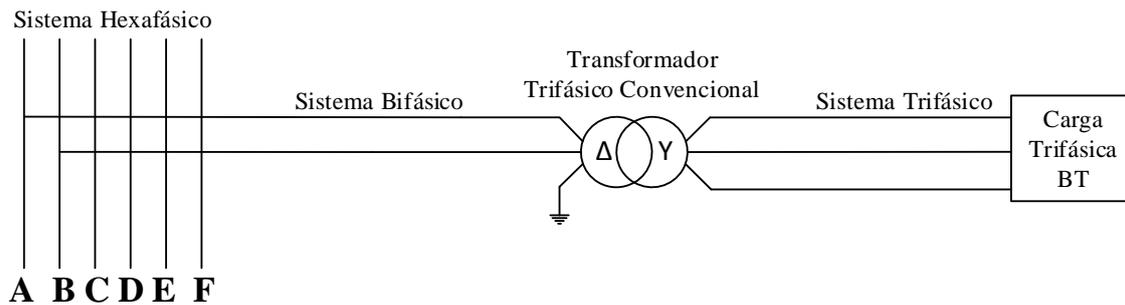


Figura 1.31 – Diagrama do sistema trifásico a dois fios a partir de um sistema hexafásico.

Na Figura 1.32 temos um detalhe da conexão do transformador trifásico e das tensões nas bobinas do transformador trifásico.

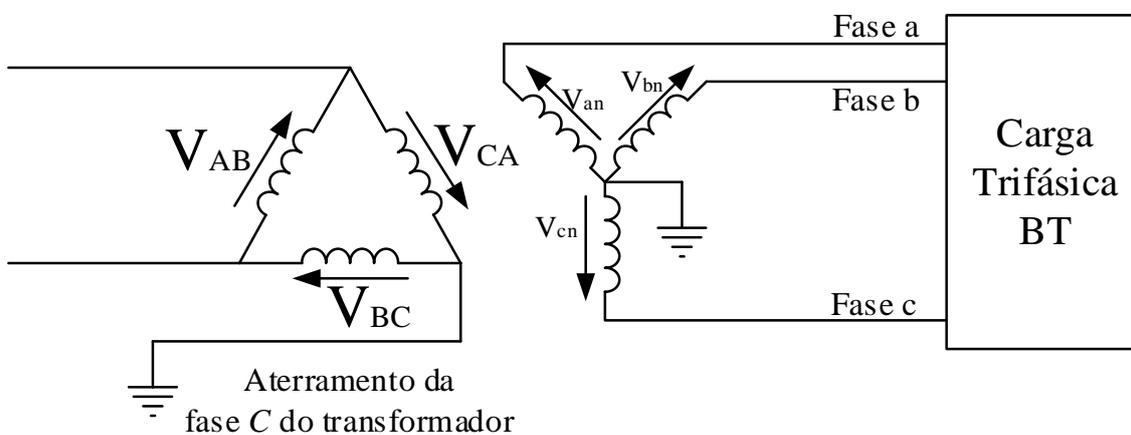


Figura 1.32 – Diagrama do transformador alimentado com duas fases e uma fase aterrada.

O primário do transformador trifásico é alimentado com duas fases (*A* e *B*) do sistema hexafásico e a entrada para a fase *C* é conectada ao aterramento. Portanto, as tensões disponíveis no primário do transformador são apresentadas em (1.14).

$$\begin{aligned}
V_{AN} &= 1,0 \angle 0^\circ pu \\
V_{BN} &= 1,0 \angle -60^\circ pu \\
V_{CN} &= 0,0 pu
\end{aligned}
\tag{1.14}$$

Dessa forma, nas bobinas do transformador trifásico, teremos o conjunto de tensões de linha apresentados em (1.15). Note que, o conjunto de tensões de linha nas bobinas do transformador trifásico são equilibradas, ou seja, possuem mesmo módulo e defasamento de 120° uma em relação a outra.

$$\begin{aligned}
V_{AB} &= V_{AN} - V_{BN} = (1,0 \angle 0^\circ) - (1,0 \angle -60^\circ) = 1,0 \angle 60^\circ pu \\
V_{BC} &= V_{BN} - V_{CN} = (1,0 \angle -60^\circ) - 0,0 = 1,0 \angle -60^\circ pu \\
V_{CA} &= V_{CN} - V_{AN} = 0,0 - (1,0 \angle 0^\circ) = (1,0 \angle 180^\circ) pu
\end{aligned}
\tag{1.15}$$

A tensão no secundário do transformador irá depender da relação de transformação (a) do mesmo. A equação (1.16) representa a relação de transformação.

$$a = \frac{V_p}{V_s}
\tag{1.16}$$

Onde:

a = relação de transformação;

V_p = tensão nominal na bobina do primário;

V_s = tensão nominal na bobina do secundário.

Para transformador trifásico com as bobinas do primário conectadas em delta e as do secundário conectadas em estrela, a relação de transformação, considerando 1 pu a tensão de fase, é representada pela equação (1.17).

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{1 \cdot \sqrt{3}}{1} = \sqrt{3}
\tag{1.17}$$

Para o transformador trifásico de distribuição, com conexão delta-estrela, a tensão na bobina do primário do transformador é a tensão de linha do sistema trifásico, 13.800 V. Aplicando a tensão de linha no primário, por indução eletromagnética, resultará na bobina do secundário a tensão de fase, 127 V. Neste caso em questão, o módulo da tensão aplicada na bobina do transformador é igual ao módulo da tensão de fase (1 pu).

Dando sequência ao desenvolvimento matemático em pu, a partir da equação (1.16), temos no secundário do transformador o conjunto de tensões apresentadas na equação (1.18).

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{V_{AB}}{a} = \frac{1,0 \angle 60^\circ}{\sqrt{3}} = 0,5777 \angle 60^\circ \text{ pu} \\ V_{bn} &= \frac{V_{BC}}{a} = \frac{1,0 \angle -60^\circ}{\sqrt{3}} = 0,5777 \angle -60^\circ \text{ pu} \\ V_{cn} &= \frac{V_{CA}}{a} = \frac{1,0 \angle 180^\circ}{\sqrt{3}} = 0,5777 \angle 180^\circ \text{ pu} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Conforme apresentado em (1.18), as tensões de fase no secundário do transformador perfazem um sistema trifásico equilibrado. Todavia, o módulo da tensão de fase no secundário do transformador, será $\frac{1}{\sqrt{3}}$ vezes menor que o valor nominal do mesmo. Dessa forma, utilizando um transformador de distribuição delta-estrela, com relação de transformação 13.800/220-127 V, a tensão de fase no secundário seria 73,32 V ao invés de 127. Enquanto a tensão de linha seria 127 V ou invés de 220 V.

Para solucionar esta questão, podemos utilizar um transformador com outra relação de transformação, como por exemplo, o transformador delta-estrela com relação de 13.800/380-220 V. Neste caso, teremos a tensão de 7.967,43 V nas bobinas do primário deste transformador, resultando uma tensão de fase no secundário de 127 V e de linha 220 V.

11.1. Estudo de caso

A comprovação da metodologia elucidada anteriormente, será feita a partir da avaliação computacional do sistema. Para tal objetivo, utilizou-se o circuito da Figura 1.33, onde estão demarcados os pontos de medição Figura 1.31. Um ramal bifásico em média tensão é derivado de uma rede de distribuição hexafásica, para alimentação de uma carga trifásica.

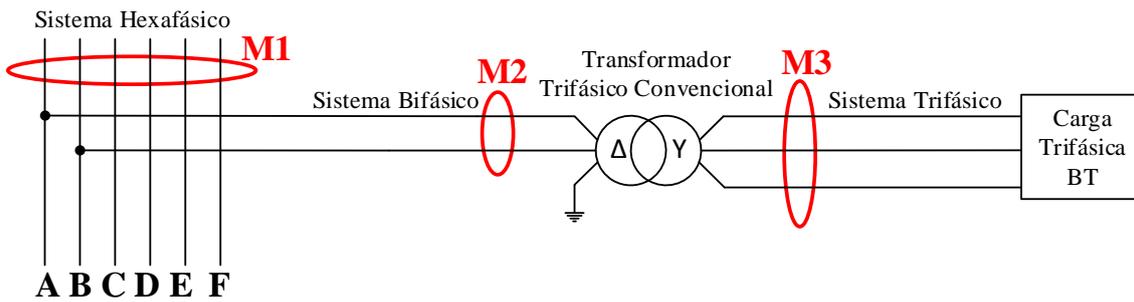


Figura 1.33 – Pontos de medição do sistema simulado.

A concepção do sistema hexafásico já foi abordado nos itens anteriores, portanto, aqui partiremos do sistema concebido. O sistema hexafásico se trata de uma rede de distribuição de energia elétrica com tensão fase-terra de 7.967,43 V. O conjunto de tensão está equilibrado e as fases adjacentes possuem defasamento angular de 60° . Na Figura 1.34 temos a forma de onda da tensão no ponto de medição M1.

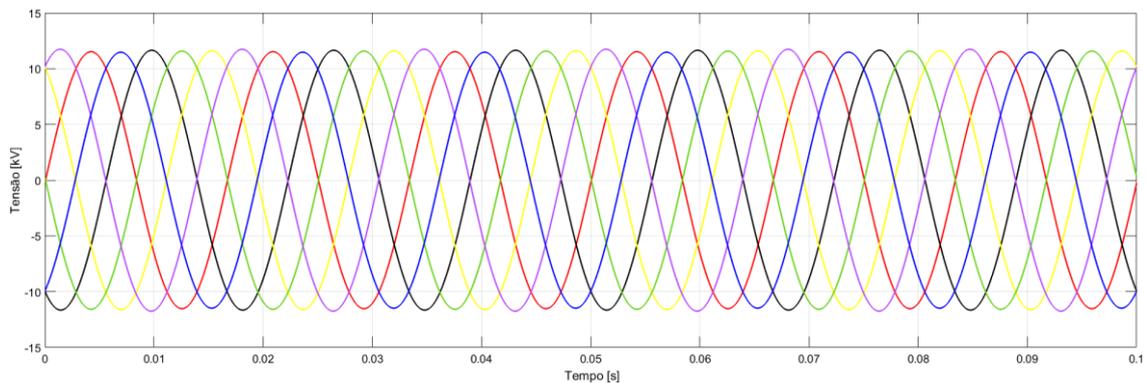


Figura 1.34 – Tensão do sistema hexafásico, ponto de medição M1.

Para construção do ramal bifásico, foram utilizadas as fases *A* e *B* do sistema hexafásico, por já possuírem a defasagem necessária de 60° . Na Figura 1.35 comprovamos o defasamento de 60° entre as fases. Com esse defasamento, a tensão de linha V_{AB} é igual a tensão de fase, ou seja, 7.967,43 V.

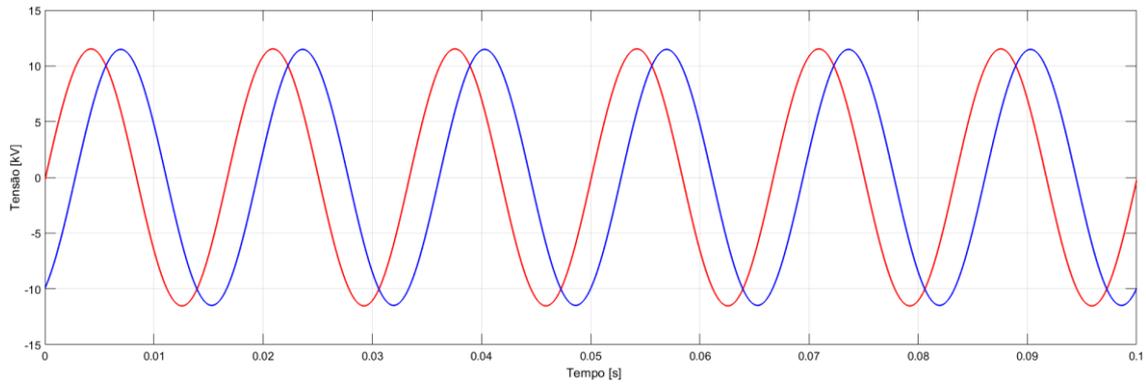


Figura 1.35 – Tensão do sistema bifásico, ponto de medição M2.

Já a corrente do ramo bifásico é apresentada na Figura 1.36. Note que, com o defasamento de 60° entre as tensões, o defasamento entre as correntes de linha é de 120° .

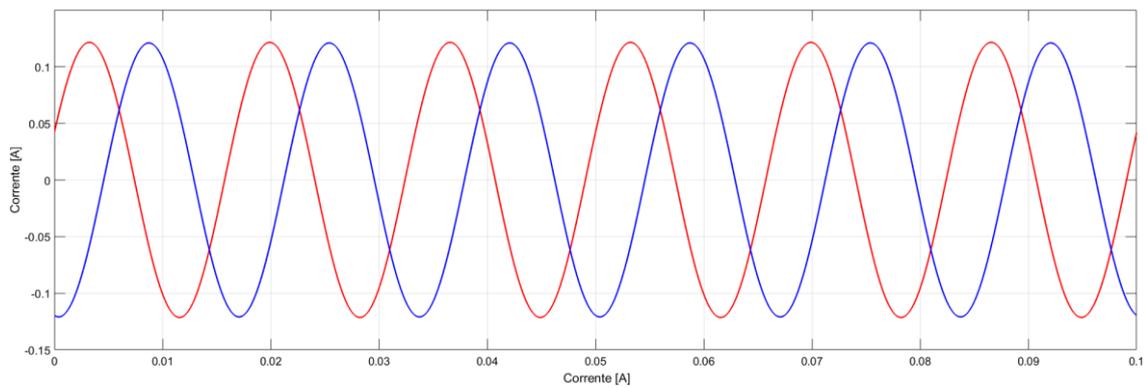


Figura 1.36 – Corrente no sistema bifásico, ponto de medição M2.

A título de comprovação, na Figura 1.37 temos a tensão de fase nas bobinas do transformador trifásico. Note que, temos um conjunto de tensões trifásicas equilibradas. A tensão de linha eficaz no primário é 7.967,43 V, sendo que a tensão nominal do transformador é 13.800 V. Está é a razão de se utilizar um transformador com relação de transformação 13.800/380-220 V, para obter a tensão 220-127 V no secundário.

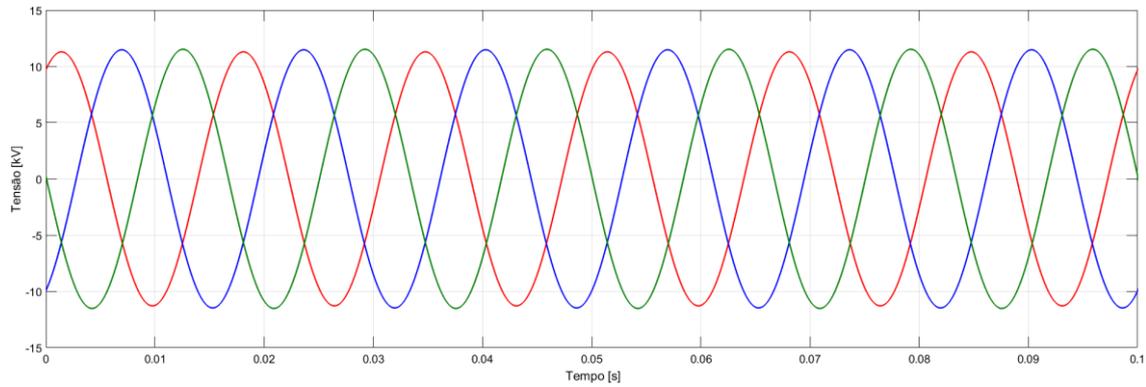


Figura 1.37 – Tensão nas bobinas do primário do transformador trifásico.

Como nas bobinas do primário do transformador temos um conjunto de tensões trifásicas equilibradas, no secundário teremos também um sistema trifásico equilibrado. Na Figura 1.38 temos a tensão no ponto de medição M3. A tensão de fase e de linha, valor eficaz, são 220 e 127 V, respectivamente.

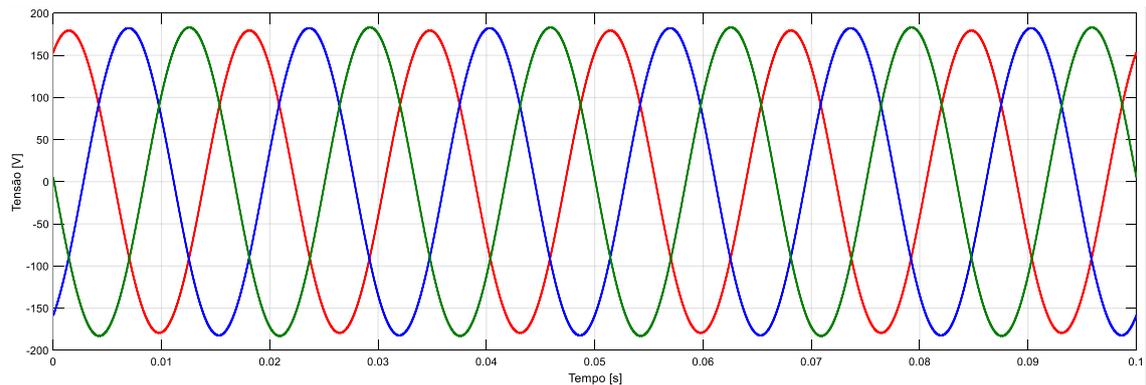


Figura 1.38 – Tensão do sistema trifásico, ponto de medição M3.

Por fim, a corrente de linha no ponto de medição M3. Este valor irá depender da carga conectada no sistema trifásico. Sendo que, o aumento dessa carga implicará em aumento da corrente na rede bifásica, que por sua vez, aumenta o desequilíbrio das tensões no sistema hexafásico.

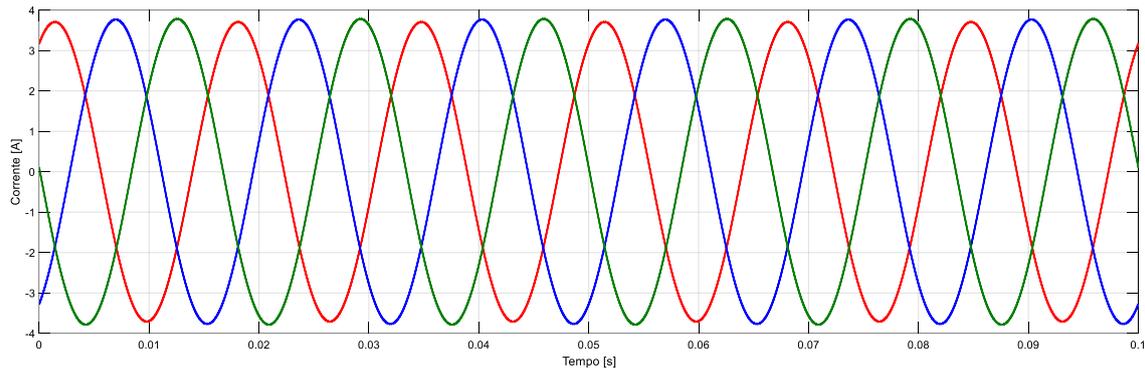


Figura 1.39 – Corrente no sistema trifásico, ponto de medição M3.

12) Conclusão

Este tutorial apresentou um embasamento teórico para auxílio nos estudos ao tocante da distribuição de energia elétrica utilizando sistema hexafásico. A concepção do sistema dotado de seis fases é facilmente obtida a partir do uso de transformadores trifásicos convencionais com defasamento angular diferente.

O sistema hexafásico traz como vantagem a possibilidade de trabalhar com três diferentes níveis de tensões de linha. Além da tensão de linha com módulo $\sqrt{3}$ vezes maior que tensão de fase, como no sistema trifásico, temos ainda a tensão de linha com mesmo módulo da tensão de fase e ainda com o dobro de tensão de fase.

Com a tensão de linha igual a tensão de fase, surge uma outra vantagem do sistema hexafásico, que é o uso de estruturas mais compactadas. Estas estruturas mais compactadas, impactaram nos valores das constantes de linha da rede. A impedância e capacitância da linha varia com a distância dos cabos das fases. Com o nível de tensão menor, a rede hexafásico resultou em indutâncias na faixa de 10% menores comparadas com a rede trifásica.

A redução da indutância implicou em uma pequena redução na queda de tensão. Esta redução, entretanto, não leva a um ponto determinante na escolha para adoção desta tecnologia. No sistema de distribuição, a resistência predomina em relação reatância indutiva. Por isso, a maior queda no sistema está na resistência, que é igual para ambas tecnologias.

Na questão de redução de conteúdo harmônico, o sistema hexafásico apresenta como uma alternativa para alimentação de cargas com características não lineares. Porém,

como o ângulo das correntes harmônicas variam de forma aleatória durante sua operação, este fato não pode ser determinante na escolha do sistema hexafásico.

Por fim, analisamos o sistema trifásico a dois fios extraído do sistema hexafásico. Somente este ponto não pode ser determinante para utilizar o sistema hexafásico para distribuição de energia elétrica, pois já se consegue este artifício nas redes trifásicas.

Após analisar todos esses pontos apresentados, não se levantou relevantes benefícios do sistema de distribuição hexafásico quando comparado com o sistema trifásico com circuito duplo.