



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Graduação em Engenharia Elétrica

**GABRIEL MIYASAKA**

**ANÁLISE DE PERDAS TÉCNICAS EM CIRCUITOS  
SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Uberlândia  
2017

**GABRIEL MIYASAKA**

**ANÁLISE DE PERDAS TÉCNICAS EM CIRCUITOS  
SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: José Rubens Macedo Junior

---

Assinatura do Orientador

Uberlândia  
2017

**GABRIEL MIYASAKA**

**ANÁLISE DE PERDAS TÉCNICAS EM CIRCUITOS  
SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior

---

Prof. Dr. José Wilson Resende

---

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim

Uberlândia  
2017

Dedico este trabalho ao meu pai Miguel (em memória), por ter sido o grande exemplo da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me guiado durante todo esse tempo.

Ao prof. José Rubens, por ter me dado toda a ajuda necessária para a realização deste trabalho.

À minha mãe Rosiléa, por ter aberto mão de seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus e por sempre ter acreditado em mim, mesmo quando as coisas pareciam impossíveis.

Aos meus padrinhos, João e Aparecida, por terem me ajudado nos momentos em que mais precisei e por serem grandes exemplos de bondade e humildade em minha vida.

À toda minha família e amigos, pelo apoio e compreensão sempre.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo fazer uma análise de perdas em um circuito secundário de distribuição, fazendo uma comparação entre o valor contabilizado de perdas técnicas para dois diferentes métodos de cálculo. Um desses métodos leva em conta o Módulo 7 do PRODIST. Este considera apenas a impedância de sequência positiva e apenas a frequência fundamental. Assim sendo, não são consideradas perdas causadas por correntes harmônicas e nem perdas no neutro do sistema. O segundo método feito para comparação leva em conta harmônicos gerados por cargas não lineares e o circuito desequilibrado, ou seja, também são feitas medidas no neutro do sistema.

Palavras-chave: perdas técnicas, correntes harmônicas, impedância de sequência positiva, circuito desequilibrado, PRODIST.

## **ABSTRACT**

*The objective of this work is to analyze losses in a secondary distribution circuit, comparing the reported technical losses for two different calculation methods. One of these methods takes PRODIST Module 7 into account. This considers only the positive sequence impedance and only the fundamental frequency. Therefore, this not considered losses caused by harmonic currents or losses in the neutral of the system. The second method made for comparison takes into account harmonics generated by non-linear loads and the unbalanced circuit, in other words, measurements are also made in the neutral of the system.*

*Keywords: technical losses, harmonic currents, positive sequence impedance, unbalanced circuit, PRODIST.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Perdas no sistema elétrico brasileiro.....	14
Figura 2 - Crescimento das Cargas Eletrônicas nos EUA. ....	15
Figura 3 - Tensão trifásica equilibrada.....	16
Figura 4 - Tensão trifásica desequilibrada.....	17
Figura 5 - Tensões de sequência positiva. ....	18
Figura 6 - Tensões de sequência negativa.....	19
Figura 7 - Tensões de sequência zero.....	19
Figura 8 - Correntes de sequência zero na estrela com neutro. ....	20
Figura 9 - Correntes de sequência zero na configuração delta. ....	21
Figura 10 - Tensões de sequência zero na configuração estrela. ....	22
Figura 11 - Tensões no sistema em delta.....	23
Figura 12 - Sinal distorcido de corrente com as respectivas componentes de 3ª e 5ª harmônicas. ....	24
Figura 13 - Resistor de 1 ohm com uma corrente distorcida. ....	31
Figura 14 - Exemplo de tensões de terceira harmônica para um sistema equilibrado.....	33
Figura 15 - Exemplo de correntes de terceira harmônica para um sistema equilibrado.....	34
Figura 16 - Circuito desequilibrado apenas com 3º harmônico.....	37
Figura 17 - Forma de onda para análise harmônica. ....	46
Figura 18 - Forma de onda de corrente de um inversor.....	48
Figura 19 - Espectro Harmônico de corrente de um inversor. ....	48
Figura 20 - Histerese de um transformador. ....	49
Figura 21 - Forma de onda da corrente a vazio de um transformador...	49
Figura 22 - Espectro Harmônico da corrente a vazio de um transformador. ....	50
.....	50
Figura 23 - Forma de onda de corrente de uma fonte chaveada.....	50
Figura 24 - Espectro Harmônico de corrente de uma fonte chaveada...	51
Figura 25 - Forma de onda de corrente de uma lâmpada fluorescente 9W/220V com reator eletrônico. ....	52



Figura 26 - Espectro Harmônico de uma lâmpada fluorescente 9W/220V com reator eletrônico.....	52
Figura 27 - Carga utilizada na simulação.....	57
Figura 28 - Parte linear da carga. ....	58
Figura 29 - Parte não linear da carga. ....	59
Figura 30 - Percentuais de Perdas Técnicas sobre a Energia Total Injetada na Distribuidora. ....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sequência de fases de componentes harmônicas. ....	35
Tabela 2 - Regra geral para sequência de fase de componentes harmônicas.....	36
Tabela 3 - Perfil harmônico de consumidores residenciais de consumo baixo, médio e alto. ....	53
Tabela 4 - Perfil harmônico nos transformadores. ....	54
Tabela 5 - Valores de resistências dos cabos de alumínio (CA e CAA). 56	
Tabela 6 - Perfil harmônico do transformador utilizado na simulação ...	59
Tabela 7 - Resultados das perdas em Watts obtidos em simulação. ....	60
Tabela 8 - Resultados de perdas obtidos em simulação. ....	61
Tabela 9 - Montante de perdas no sistema de distribuição da Eletropaulo. .....	61
Tabela 10 - Valores em reais para cada tipo de perda. ....	65

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 As perdas de energia em um sistema elétrico.....	13
1.2 A influência dos harmônicos.....	14
2 DESEQUILIBRIO.....	16
2.1 Componentes Simétricas.....	17
2.1.1 A sequência positiva.....	18
2.1.2 A sequência negativa.....	19
2.1.3 A sequência zero.....	19
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE HARMÔNICOS.....	23
3.1 Conceito de harmônicos.....	23
3.2 Série de Fourier.....	24
3.3 Distorções harmônicas de tensão e corrente.....	26
3.3.1 Distorção Harmônica Individual.....	26
3.3.2 Distorção Harmônica Total.....	27
3.4 Valor eficaz para sinais distorcidos.....	27
3.5 Efeito térmico causado por correntes harmônicas.....	30
3.6 Sequência de fase das componentes harmônicas em sistemas equilibrados.....	31
3.6.1 Segunda ordem harmônica.....	32
3.6.2 Terceira ordem harmônica.....	32
3.6.3 Quarta ordem harmônica.....	35
3.5.4 Regra geral.....	35
3.7 Harmônicos em sistemas desequilibrados.....	36
3.7.1 Sistema desequilibrado com terceiro harmônico.....	37
3.7 Simetria de onda.....	46
3.8 Cargas que geram harmônicos.....	47
3.8.1 Inversores de frequência.....	47
3.8.2 Transformadores.....	48

3.8.3 Fontes chaveadas .....	50
3.8.4 Lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico .....	51
3.9 Perfil harmônico de cargas residenciais e comerciais .....	53
3.10 Perfil harmônico em transformadores de distribuição.....	54
4 MÓDULO 7 – PRODIST .....	55
5 ANÁLISE EXPERIMENTAL .....	55
5.1 Cabos utilizados .....	55
5.2 Cargas.....	56
5.3 Índices de distorção e correntes eficazes no transformador .....	59
5.4 Resultados obtidos .....	60
5.5 Cálculo de perdas para a ELETROPAULO .....	61
5.5.1 Perdas nas fases para a componente fundamental .....	63
5.5.2 Perdas nas fases e no neutro para a componente fundamental .....	63
5.5.3 Perdas eficazes nas fases .....	64
5.5.4 Perdas eficazes nas fases e no neutro .....	64
5.5.5 Análise econômica individual .....	65
6 CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS .....	67
Apêndice A – Monofilar simplificado da rede .....	69
A.1 Cargas 9, 10, 11,12 e 1 e transformador de 45 kVA .....	69
A.2 Cargas 2, 3, 4 e 5.....	70
A.3 Cargas 6, 7 e 8.....	71
Apêndice B – Circuito simulado no MATLAB.....	72
B.1 Cargas 9, 10, 11 e 12 e transformador de 45 kVA .....	72
B.2 Cargas 1, 2, 3 e 4.....	73
B.3 Cargas 5, 6, 7 e 8.....	74
B.4 Medições de perdas harmônicas separadas para fases, neutro e total .....	75
B.5 Medições de perdas para diferentes configurações e medições do transformador.....	76

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 As perdas de energia em um sistema elétrico

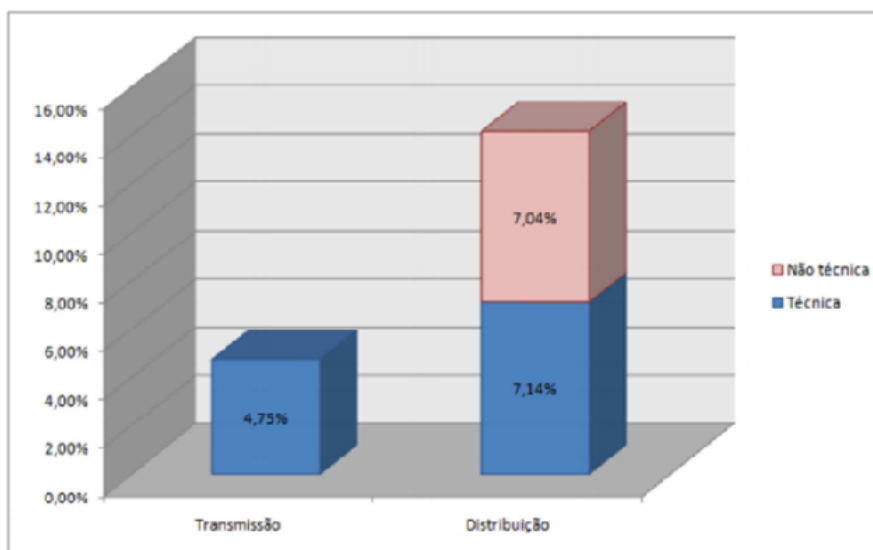
Um sistema elétrico é composto por geração, transmissão e distribuição. A geração é a parte necessária por gerar a energia que é consumida nos comércios, residências, indústrias, etc. As linhas de transmissão são as responsáveis por transportar essa energia das usinas geradoras até as redes de distribuição, sendo que essas são compostas de rede de distribuição primária, que no Brasil geralmente é em 13,8 kV, e rede de distribuição secundária, que geralmente é 220/127 V. A energia que é gerada nunca é totalmente entregue aos consumidores, e essa diferença é referente às perdas que ocorrem no meio do caminho [1].

Em relação à origem, essas perdas podem ser classificadas em técnicas e não técnicas e podem representar um grande prejuízo às transmissoras e distribuidoras de energia elétrica, visto que elas compram energia elétrica de geradoras e parte dessa energia é perdida ou extraviada.

As perdas técnicas são inerentes do próprio sistema elétrico e sempre irão existir. Elas ocorrem devido à dissipação de energia pela passagem de corrente em transformadores, ramais de ligação, linhas de transmissão, medidores de energia, entre outros. Esse tipo de perda nunca pode ser totalmente eliminada, apenas reduzida. A outra parcela é a mais preocupante e refere-se às perdas não técnicas. São chamadas de perdas, mas não ocorrem nas linhas de transmissão e nem em transformadores. São representadas pela energia que é consumida, mas não é faturada pelas concessionárias. Entram na conta os casos de fraude, furto, irregularidade na fatura e inadimplência [2].

Não é possível calcular as perdas não técnicas, mas para as técnicas existem metodologias bastante consolidadas. Sabendo o quanto é gerado, o quanto é consumido e o quanto tem-se de perdas técnicas é possível obter as perdas não técnicas. Pode-se ver pela figura 1 a porcentagem que representam no sistema elétrico brasileiro.

Figura 1- Perdas no sistema elétrico brasileiro.



Fonte: Estimação e Análise das Perdas Técnicas na Distribuição de Energia Elétrica [3].

Vê-se que metade das perdas na distribuição de energia são técnicas, enquanto essa parcela representa o total para o sistema de transmissão, por isso há uma preocupação tão grande em como esse valor é contabilizado. Em termos físico-elétricos, as perdas técnicas podem ser fortemente impactadas pela presença de componentes harmônicas, assim como pelo desequilíbrio de carga existentes nas redes elétricas.

## 1.2 A influência dos harmônicos

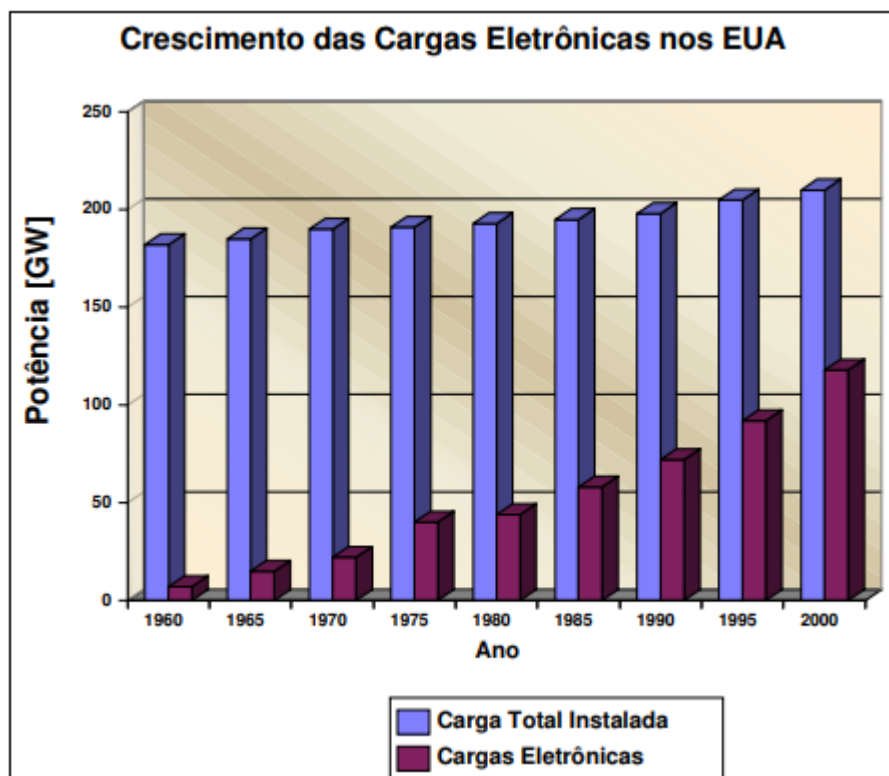
Hoje em dia a eletricidade é extremamente importante para a qualidade de vida das pessoas. Todos possuem smartphones, notebooks, ar-condicionado e televisores em casa. Esses tipos de aparelhos são bem diferentes do que se era utilizado há alguns anos atrás e isso fez com que as características da rede elétrica mudassem bastante, pois, apesar das melhorias, certos efeitos começaram a surgir quando a utilização desse tipo de carga começou a aumentar.

Até há pouco tempo atrás pouco se utilizava da eletrônica, pois era uma tecnologia que ainda estava se desenvolvendo, e até lá a maioria das cargas que eram utilizadas eram cargas lineares. Esses tipos de aparelhos são aqueles tais que, se aplicarmos uma tensão perfeitamente senoidal, a corrente também

será senoidal, de mesma frequência, estando defasada ou não. Esses equipamentos possuem em seu circuito apenas resistores, capacitores e indutores, que são todos elementos lineares. Como exemplo tem-se as lâmpadas incandescentes e os chuveiros elétricos.

Com a evolução da eletrônica, passaram a fazer parte dos equipamentos não apenas resistores, indutores e capacitores, mas também diodos, transistores, entre outros, que são componentes semicondutores onde o comportamento da corrente e da tensão é totalmente não linear. O chuveiro elétrico que era utilizado no passado possuía poucos níveis para temperatura, hoje possui um controle eletrônico muito mais sofisticado a base de chaveamentos. Apenas com esse tipo de tecnologia foi possível a criação de diversos tipos de aparelhos utilizados hoje em dia. Pela figura 2 é possível ver como se deu esse crescimento até o ano 2000 nos Estados Unidos.

Figura 2 - Crescimento das Cargas Eletrônicas nos EUA.



Fonte: Qualidade de energia: harmônicas [4].

Diante disso foi dado um avanço muito grande na área da elétrica, mas por outro lado alguns problemas também começaram a aparecer. Esses aparelhos, por serem não lineares, apresentam uma forma de onda de corrente bastante distorcida. No começo isso não representava grande problema, pois a

quantidade de cargas ainda era bem reduzida, mas a partir de certo ponto a rede elétrica começou a sentir alguns impactos que precisavam de uma regulamentação.

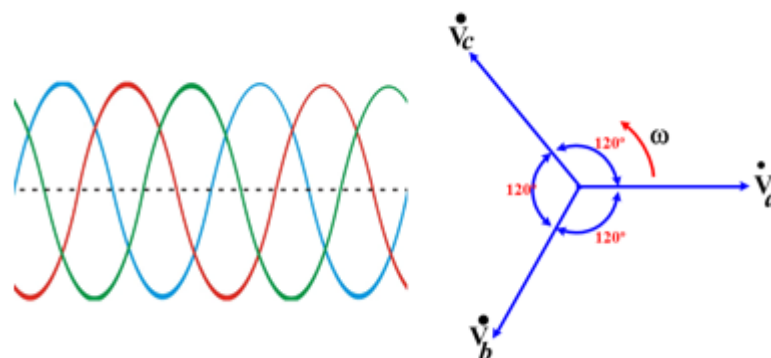
Essas ondas de corrente distorcidas podem ser decompostas em um somatório de ondas senoidais de frequências múltiplas da fundamental, chamadas de harmônicas, e de uma componente continua. Esses harmônicos ao passarem em cabos também dissipam energia e essa energia não é contabilizada pelas concessionárias no cálculo de perdas técnicas.

Atualmente as concessionárias de energia cobram, além da energia consumida, uma parcela referente às perdas técnicas devido à dissipação de energia nas redes de distribuição. Essas perdas são contabilizadas para as 3 fases e apenas para a frequência fundamental. Perdas Joulicas ocasionadas por harmônicos não são contabilizadas e nem as perdas no neutro. A grande questão é saber se isso representa uma parcela significativa, ou seja, se essas componentes harmônicas dissipam muita energia se comparadas com a fundamental e se deveriam ser também contabilizadas, assim como o neutro.

## 2 DESEQUILÍBRIO

Todo e qualquer sistema elétrico do mundo não é totalmente equilibrado. Em termos de corrente o desequilíbrio pode assumir valores extremamente elevados. Um sistema elétrico desequilibrado é aquele tal que os valores em módulo de tensão, corrente são diferentes e/ou a defasagem angular entre as três fases são diferentes de  $120^\circ$ . Pode-se ver pelas figuras 3 e 4 exemplos de tensões equilibradas e desequilibradas, respectivamente.

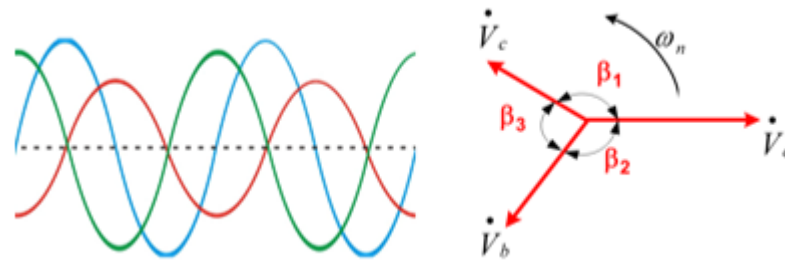
Figura 3 - Tensão trifásica equilibrada.



Fonte: Desequilíbrio de Tensão [5].



Figura 4 - Tensão trifásica desequilibrada.



Fonte: Desequilíbrio de Tensão [5].

É possível fazer a análise para esse tipo de circuito através de um método chamado de Componentes Simétricas, que transforma um sistema desequilibrado em três equilibrados, sendo possível ser feita a análise para cada um separadamente, facilitando assim o estudo do circuito.

## 2.1 Componentes Simétricas

Conhecido os valores de módulo e ângulo de fase de tensões e correntes, é possível fazer a transformação para o que é chamado de componente de sequência positiva, negativa e zero. A Equação (1) mostra como é possível obter os valores do circuito real se conhecidos os valores das 3 sequências.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde:

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad \text{e} \quad a^2 = 1 \angle -120^\circ$$

A Equação (2) mostra que fazendo o inverso é possível obter os valores das componentes se conhecidos os valores reais do circuito.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Os valores com índice zero representam a sequência zero, os valores com índice um a sequência positiva e com índice dois a sequência negativa.

Quando resolvido o problema, basta somar as diferentes sequências de fases para se obter o resultado do circuito original, como segue a seguir pelas Equações (3.a), (3.b) e (3.c).

$$\dot{V}_A = \dot{V}_{A(1)} + \dot{V}_{A(2)} + \dot{V}_{A(0)} \quad (3.a)$$

$$\dot{V}_B = \dot{V}_{B(1)} + \dot{V}_{B(2)} + \dot{V}_{B(0)} \quad (3.b)$$

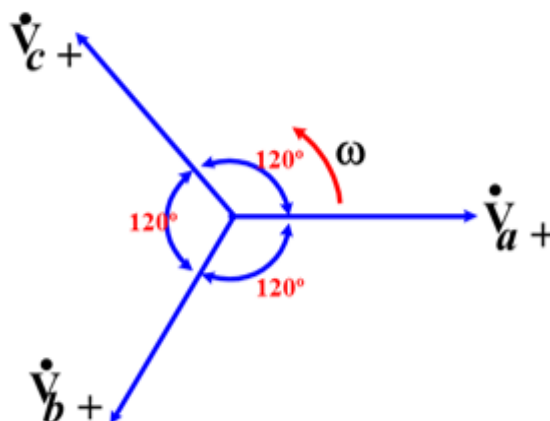
$$\dot{V}_C = \dot{V}_{C(1)} + \dot{V}_{C(2)} + \dot{V}_{C(0)} \quad (3.c)$$

O método utilizado pode ser utilizado não apenas para tensões, mas para correntes e impedâncias também e é feito do mesmo modo.

### 2.1.1 A sequência positiva

A sequência positiva é a que é mais interessante, pois é ela a responsável pelo bom funcionamento do sistema. Possui 3 tensões de mesmo módulo, defasadas  $120^\circ$  entre si e com sequência de fase *abc*, como pode ser visto pela figura 5 a seguir.

Figura 5 - Tensões de sequência positiva.

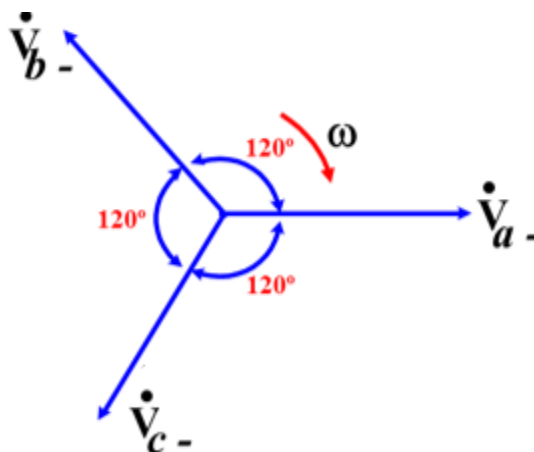


Fonte: Desequilíbrio de Tensão [5].

### 2.1.2 A sequência negativa

A sequência de fase negativa difere da positiva apenas na sequência de fase que é *cba*, como pode-se ver pela figura 6.

Figura 6 - Tensões de sequência negativa.



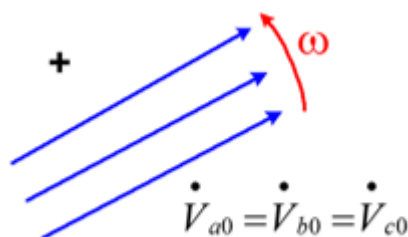
Fonte: Desequilíbrio de Tensão [5].

Essa é indesejável no sistema pois pode causar torques negativos em motores, aumentando assim as perdas, por exemplo.

### 2.1.3 A sequência zero

As componentes de sequência zero de corrente possuem mesmo módulo e mesmo ângulo de fase, como pode ser visto pela figura 7.

Figura 7 - Tensões de sequência zero.



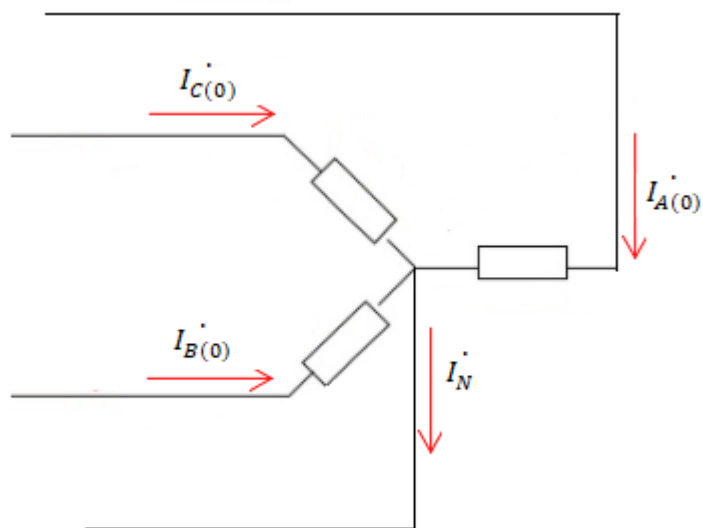
Fonte: Desequilíbrio de Tensão [5].

O problema para esse tipo de sequência é que, como estão em fase, as correntes se somam e vão para o neutro do sistema e, havendo algum relé lá, pode acabar sendo sensibilizado.

### 2.1.3.1 Correntes de sequência zero na estrela com neutro conectado

A figura 8 mostra uma carga com as componentes de sequência zero de corrente em uma carga em estrela com o neutro conectado.

Figura 8 - Correntes de sequência zero na estrela com neutro.



As correntes de fase, por serem de componente zero, são todas iguais em módulo e com a mesma defasagem, sendo dadas por:

$$I_{fase(0)} = I_{A(0)} = I_{B(0)} = I_{C(0)} \quad (4)$$

Pela lei de Kirchhoff dos nós tem-se:

$$I_N = I_{A(0)} + I_{B(0)} + I_{C(0)} \quad (5)$$

Assim, substituindo a equação (4) na equação (5) é possível obter que:

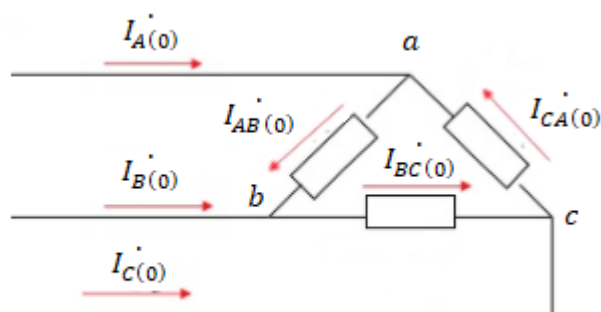
$$I_N = 3 \times I_{fase(0)} \quad (6)$$

Sendo assim é possível ver que sempre que houver uma configuração como essa, a corrente no neutro é três vezes maior que a corrente de sequência zero em cada fase, ou seja, é fácil saber esse valor, basta medir a corrente do neutro e dividir por três.

### 2.1.3.2 Correntes de sequência zero no delta

Tomando a figura 9 como exemplo, onde são mostradas as correntes de linha e de fase para as componentes de sequência zero é possível se fazer uma análise muito importante.

Figura 9 - Correntes de sequência zero na configuração delta.



As correntes de linha, de acordo com a Lei de Kirchhoff dos nós, são dadas por:

$$I_{A(0)} = I_{AB(0)} - I_{CA(0)} = 0 \quad (7.a)$$

$$I_{B(0)} = I_{BC(0)} - I_{AB(0)} = 0 \quad (7.b)$$

$$I_{C(0)} = I_{CA(0)} - I_{BC(0)} = 0 \quad (7.c)$$

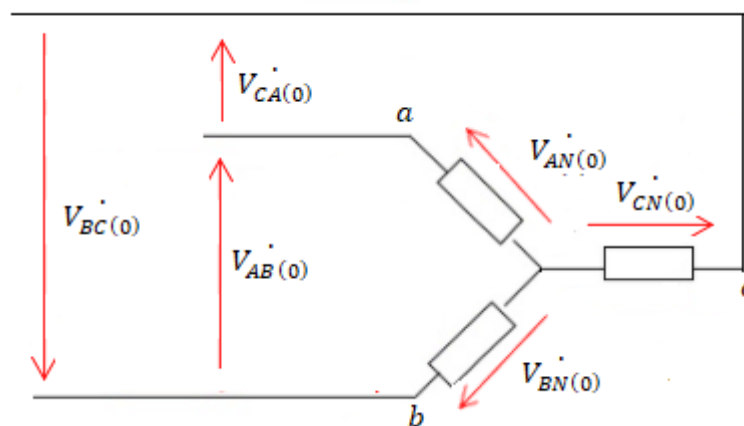
O fato das correntes de linha terem resultado em zero reside no fato de que as correntes de fase são todas iguais, com mesmo módulo e mesma defasagem, como visto anteriormente. Sendo assim, não há corrente de linha de sequência zero quando se tem uma configuração em delta, apenas de fase. O que se pode concluir disso é que a componente de sequência zero fica circulando dentro do delta e não vai para a linha.

É muito comum utilizar essa configuração em sistemas elétricos para se eliminar esse tipo de componente na linha, sendo que o delta de um transformador funciona como um filtro natural para a sequência zero de corrente.

### 2.1.3.3 Tensões de sequência zero na estrela

A figura 10 mostra as tensões de fase e linha em uma estrela.

Figura 10 - Tensões de sequência zero na configuração estrela.



As tensões de linha são dadas por:

$$V_{AB}^{(0)} = V_{AN}^{(0)} - V_{BN}^{(0)} = 0 \quad (8.a)$$

$$V_{BC}^{(0)} = V_{BN}^{(0)} - V_{CN}^{(0)} = 0 \quad (8.b)$$

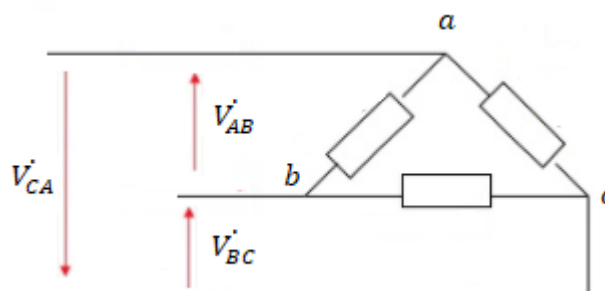
$$V_{CA}^{(0)} = V_{CN}^{(0)} - V_{AN}^{(0)} = 0 \quad (8.c)$$

Do mesmo modo que feito para as correntes no item 2.1.3.2, não existem tensões de linha de terceiro harmônico devido ao fato de que as tensões de fase possuem mesma magnitude e estão em fase.

### 2.1.3.4 Tensões de sequência zero no delta

A figura 11 mostra um esquema de um delta com tensões qualquer, sendo equilibradas ou não.

Figura 11 - Tensões no sistema em delta.



Da Equação (2) pode-se obter que:

$$V_{AB0} = \frac{1}{3} [V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}] \quad (9)$$

Como as três tensões formam um caminho fechado de vetores, a soma resultante é zero. Assim sendo:

$$V_{AB0} = 0 \quad (10)$$

Pode-se concluir que qualquer que seja o sistema, não haverá tensões de sequência zero na linha, seja conectado em delta ou em estrela.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE HARMÔNICOS

Este capítulo destina-se a entender os conceitos básicos sobre harmônicos, que são fundamentais para a realização do trabalho proposto.

#### 3.1 Conceito de harmônicos

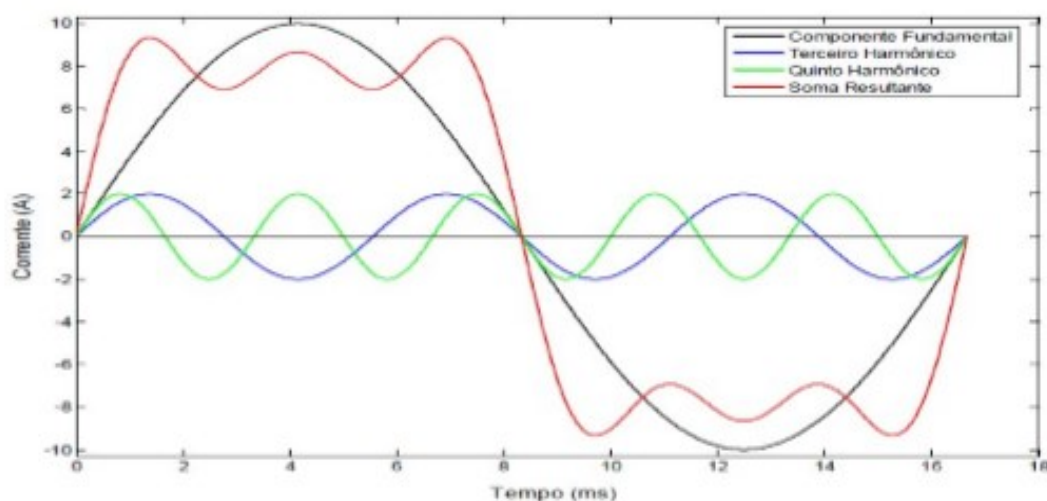
O sistema elétrico é composto por fontes geradoras, que são as responsáveis por gerar a energia, e cargas, que são as responsáveis por consumir essa energia gerada. As fontes são responsáveis por gerar a tensão que irá alimentar as cargas e essa tensão é praticamente senoidal e com frequência de 60 Hz. Como hoje em dia a maioria das cargas são eletrônicas, a forma de onda da corrente é bem distorcida, isto ocorre devido ao fato de que esse tipo de carga funciona a base de equipamentos que fazem chaveamentos

que a todo momento abrem e fecham o circuito, interrompendo e deixando a corrente de circular. Isso é feito de maneira muito rápida e, assim sendo, a corrente que deveria ser puramente senoidal começa a ficar bem deformada.

Harmônicos são ondas senoidais de tensão ou corrente de frequências múltiplas inteiras da fundamental, sendo que essa fundamental, no caso do Brasil, é a de 60 Hz. Por exemplo, a harmônica de ordem 5 ( $h=5$ ) é 5 vezes a fundamental, ou seja, 300 Hz.

Todo sinal não senoidal periódico pode ser decomposto em uma soma de sinais senoidais e de uma de componente continua. Uma vez decomposto, o sistema pode ser analisado para cada frequência separadamente e o resultado final pode ser obtido somando-se todos os resultados encontrados para cada frequência de onda. Isto é chamado de lei de superposição de efeitos.

Figura 12 - Sinal distorcido de corrente com as respectivas componentes de 3ª e 5ª harmônicas.



Fonte: Análise da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos [6].

A figura acima mostra uma componente fundamental, um terceiro harmônico (180 Hz) e um quinto harmônico (300 Hz) que somados dão origem ao sinal resultante não senoidal.

### 3.2 Série de Fourier

A Série de Fourier é a ferramenta matemática que permite decompor um sinal não senoidal periódico em uma soma de sinais senoidais de frequências múltiplas da fundamental, como segue pela Equação (11).



$$f(t) = A_0 + [A_1 \text{sen}(\omega t) + A_2 \text{sen}(2\omega t) + \dots + A_h \text{sen}(h\omega t)] + \dots \quad (11)$$

$$\dots + [B_1 \text{cos}(\omega t) + B_2 \text{cos}(2\omega t) + \dots + B_h \text{cos}(h\omega t)]$$

Em que:

$A_0$  é o valor da componente continua, dado por:  $A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$ , sendo

$T$  o período da onda;

$A_h$  são os valores das amplitudes de cada harmônica que multiplicam os termos senoidais, dadas por:  $A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(h\omega t) dt$ ;

$B_h$  são os valores das amplitudes de cada harmônica que multiplicam os termos cossenoidais, dadas por:  $B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{cos}(h\omega t) dt$ ;

$\omega$  é a frequência fundamental, em radianos por segundo;

$h$  é o múltiplo da frequência fundamental que determina a ordem harmônica;

Se for feita a soma, para cada valor de  $h$ , ou seja, para cada ordem harmônica, pode-se obter a Equação (12) em termos apenas de senos e de seus respectivos ângulos de fase.

$$f(t) = C_0 + C_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \dots + C_h \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (12)$$

Em que:

$C_0$  é o valor de amplitude da componente continua resultante;

$C_1$  é o valor de amplitude da componente fundamental resultante;

$C_h$  é o valor de amplitude da componente harmônica  $h$  resultante;

$\varphi_1$  o ângulo de fase da fundamental;

$\varphi_h$  o ângulo de fase da harmônica  $h$ ;

Esses termos também podem ser calculados da seguinte forma:

$$C_h = \sqrt{\frac{A_h^2 + B_h^2}{2}} \quad (13)$$

$$\varphi_h = \operatorname{tg}^{-1} \frac{A_h}{B_h} \quad (14)$$

Com isso foi possível decompor um sinal de onda totalmente distorcido, onde seria muito difícil de se fazer a análise, em uma somatória de sinais senoidais conhecidos, onde o estudo pode ser feito separadamente para cada frequência.

### 3.3 Distorções harmônicas de tensão e corrente

Harmônicos representam um grave problema no sistema elétrico e por causa disso é necessário se estabelecer certos limites para esse tipo de poluição. As normas do mundo inteiro definem esses limites e são bem diferentes umas das outras. Além de serem diferentes umas das outras, o nível tolerado para determinada harmônica é diferente para outra, isso ocorre devido ao fato de que, com o aumento da ordem harmônica, a amplitude de tensão e corrente diminui cada vez mais e também os limites para tensões são mais rígidos do que para as correntes, uma vez que nessa não é possível ter controle nenhum, pois o que gera correntes harmônicas são as cargas conectadas no sistema.

#### 3.3.1 Distorção Harmônica Individual

Afim de se medir a contribuição de cada componente harmônica separadamente, foi definido os índices de Distorção Harmônica Individual, sendo o de tensão e de corrente, dados pelas Equações (15) e (16), respectivamente.

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (15)$$

$$DIH_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (16)$$

### 3.3.2 Distorção Harmônica Total

Quando se deseja saber o quanto se tem de distorção juntando o efeito de todas harmônicas deve-se usar os índices de Distorção Harmônica Total, sendo o de tensão e de corrente, dados pelas Equações (17) e (18), respectivamente.

$$DTT = \sqrt{\frac{\sum_2^{h\text{máx}} V_h^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (17)$$

$$DTI = \sqrt{\frac{\sum_2^{h\text{máx}} I_h^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (18)$$

Em geral o que acontece é que a DTT é bem pequena, sendo muitas das vezes até desprezível, e a DTI muito alta. Isto ocorre devido ao fato de que tensão depende da concessionária, sendo assim é possível se ter um controle maior sobre isso, e a corrente depende da carga, e quem controla essa são os consumidores.

Esses índices dão a distorção total, causada por harmônicas de ordem 2 até uma ordem máxima que varia dependendo do lugar. No caso do Brasil, a análise feita atualmente é até para a harmônica de ordem 45. Após feita essa análise, se os índices totais estiverem altos é possível ver quais ordens podem estar causando mais problemas analisando-se os índices individuais.

### 3.4 Valor eficaz para sinais distorcidos

O valor eficaz de um sinal nada mais é do que um equivalente contínuo com o mesmo efeito térmico da corrente original analisada. Para se achar o valor eficaz de algum sinal, seja ele distorcido ou puramente senoidal, basta igualar o valor das energias dissipadas em um resistor onde ocorre a passagem de corrente, sendo uma delas a que se deseja obter esse valor e a outra a contínua. Pode-se ver como isso é feito pela Equação (19.c) para um sinal genérico  $i(t)$ .

$$E_{ca} = E_{cc} \quad (19.a)$$

$$\int_0^T Ri^2(t)dt = RI_{ef}^2T \quad (19.b)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt} \quad (19.c)$$

Pela Equação (15.c) é possível calcular o valor eficaz para qualquer corrente variável no tempo. Para uma corrente senoidal basta fazer:

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t) \quad (19.d)$$

Deste modo é calculado o valor eficaz para sinais senoidais, que é dado pela Equação (15.e), e de modo análogo ao feito para a corrente é possível achar para a tensão também, que é dada pela Equação (15f).

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (19.e)$$

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (19.f)$$

Sendo:

$V_{ef}$  = Valor eficaz de tensão;

$V_m$  = Valor de pico de tensão.

$I_{ef}$  = Valor eficaz de corrente;

$I_m$  = Valor de pico de corrente.

O interesse em se achar pico, ou máximo valor de tensão está no fato de que a isolação dos aparelhos é feita para esse valor, enquanto o interesse no valor eficaz é mais relacionado com o efeito térmico ou trabalho realizado. Quando o sistema possuir apenas uma frequência, as Equações (19.e) e (19.f)

continuam valendo, mas o que se tem é um sistema com sinais de tensões e correntes distorcidas e para isso não existe relação matemática entre valor de pico e eficaz. Utilizando a Equação (20.c) é possível achar o valor eficaz para sinais distorcidos, basta se utilizar uma onda do tipo:

$$i(t) = I_{1m} \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \dots + I_{hm} \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (20.a)$$

Substituindo a Equação (20.a) em (19.c) é possível calcular o valor eficaz para corrente, dado pela Equação (20b), em que se utiliza os picos de cada componente, ou (16.c), onde são utilizados os valores eficazes. De modo similar é possível fazer para a tensão, dada pela Equação (20.d).

$$I_{ef} = \sqrt{\left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{hm}}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (20.b)$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2} \quad (20.c)$$

$$V_{ef} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_h^2} \quad (20.d)$$

Pode-se também expressar esses valores em termos das distorções totais de tensão e corrente como segue pelas Equações (20.e) e (20.f).

$$I_{ef} = I_1 \sqrt{1 + DTI^2} \quad (20.e)$$

$$V_{ef} = V_1 \sqrt{1 + DTT^2} \quad (20.f)$$

Onde:

$I_{1m}$  = Valor de pico da corrente fundamental;

$I_{hm}$  = Valor de pico da corrente de ordem h;

$I_0$  = Valor da componente contínua de corrente;

$I_1$  = Corrente eficaz da corrente fundamental;

$I_h$  = Corrente eficaz da corrente de ordem h;

$V_1$  = Tensão eficaz da tensão fundamental;

$V_h$  = Tensão eficaz da tensão de ordem h;

$V_0$  = Valor da componente contínua de tensão.

Nota-se que os valores eficazes não dependem de ângulo de fase ou frequência, apenas das amplitudes de cada ordem. É possível observar também a dependência dos valores eficazes com o índice de distorção total.

### 3.5 Efeito térmico causado por correntes harmônicas

O efeito joule é uma lei física que relaciona a dissipação de calor com a corrente elétrica passando em um condutor. Um resistor é um componente que dissipa energia na passagem de corrente elétrica e essa energia é dissipada na forma de calor. A potência dissipada é dada pela Equação (21).

$$P = R I_{ef}^2 \quad (21)$$

Sendo:

P = Potência dada em Watts;

R = Resistência dada em Ohms;

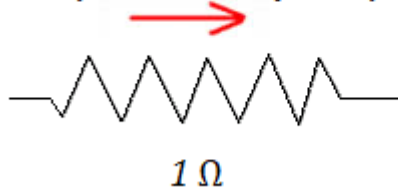
$I_{ef}$  = Corrente eficaz que passa pelo resistor.

A energia dissipada pela passagem dessa corrente representa perdas técnicas nos cabos do sistema. Essas perdas aumentam e dependem não apenas da componente fundamental, mas também das componentes harmônicas, pois já foi visto que essa corrente eficaz na Equação (21) na verdade depende de um monte de componentes, como verificado pela Equação (20c).

Para um melhor entendimento, um resistor de  $1 \Omega$  com a passagem de uma corrente harmônica  $i(t)$ , com representado na figura 13.

Figura 13 - Resistor de 1 ohm com uma corrente distorcida.

$$i(t) = 10\text{sen}(\omega t) + 5\text{sen}(3\omega t) + 3\text{sen}(5\omega t) + 2\text{sen}(7\omega t) \text{ A}$$



A potência desse resistor é dada pela Equação (21). Substituindo valores tem-se:

$$P = 1 \left[ \left( \frac{10}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left( \frac{5}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left( \frac{3}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left( \frac{2}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] \quad (22.a)$$

$$P = 69 \text{ W} \quad (22.b)$$

Sendo que se fosse apenas para a frequência fundamental, seria de:

$$P = 1 \left( \frac{10}{\sqrt{2}} \right)^2 = 50 \text{ W} \quad (23)$$

Isso dá uma potência dissipada 38% maior devido ao efeito das componentes de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

O resistor desse exemplo pode ser o cabo utilizado em redes de distribuição. Foi possível ver que as componentes harmônicas dissipam energia, sendo assim elas também limitam a capacidade desses cabos em transmitir energia. Seria como se elas estivessem “ocupando um espaço” do cabo.

### 3.6 Sequência de fase das componentes harmônicas em sistemas equilibrados

Os harmônicos presentes no sistema elétrico podem ser tanto de sequência positiva, como negativa ou zero. Toma-se como referência um sistema com correntes equilibradas e de sequência positiva dado pelas Equações (24.a), (24.b) e (24.c).

$$i_{a1} = I_{a1m} \text{sen}(\omega t) \quad (24.a)$$

$$i_{b1} = I_{b1m} \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (24.b)$$

$$i_{c1} = I_{c1m} \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (24.c)$$

### 3.6.1 Segunda ordem harmônica

Para a segunda ordem harmônica, o que se tem é dado pelas equações (25.a), (25.b) e (25.c).

$$i_{a2} = I_{a2m} \text{sen } 2x(\omega t) = I_{a2m} \text{sen } (2\omega t) \quad (25.a)$$

$$i_{b2} = I_{b2m} \text{sen } 2x(\omega t - 120^\circ) = I_{b2m} \text{sen } (2\omega t + 120^\circ) \quad (25.b)$$

$$i_{c2} = I_{c2m} \text{sen } 2x(\omega t + 120^\circ) = I_{c2m} \text{sen } (2\omega t - 120^\circ) \quad (25.c)$$

Assim sendo, a segunda harmônica é de ordem negativa, devido ao fato de que sua sequência de fase não é *abc*, mas *cba*.

### 3.6.2 Terceira ordem harmônica

Para a terceira ordem harmônica, o que se tem é dado pelas Equações (26.a), (26.b) e (26.c).

$$i_{a3} = I_{a3m} \text{sen } 3x(\omega t) = I_{a3m} \text{sen } (3\omega t) \quad (26.a)$$

$$i_{b3} = I_{b3m} \text{sen } 3x(\omega t - 120^\circ) = I_{b3m} \text{sen } (3\omega t) \quad (26.b)$$

$$i_{c3} = I_{c3m} \text{sen } 3x(\omega t + 120^\circ) = I_{c3m} \text{sen } (3\omega t) \quad (26.c)$$

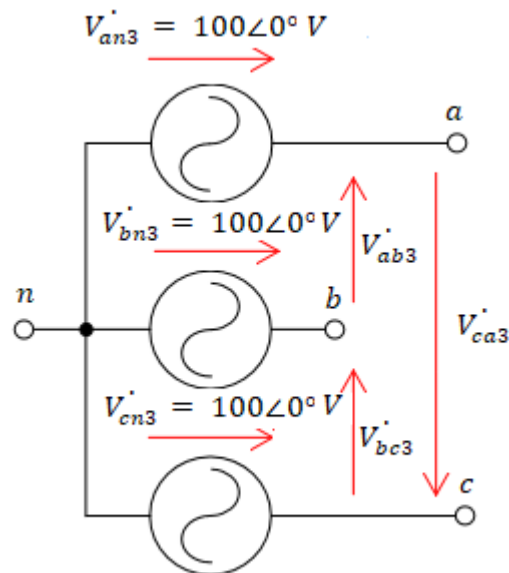
Como a terceira harmônica possui todas as correntes em fase, é de sequência zero. A mesma análise feita para as correntes também pode ser feita para as tensões.

#### 3.6.2.1 Análise da tensão de linha para a terceira harmônica em sistemas equilibrados



Como visto no item 3.6.2, a terceira harmônica em sistemas equilibrados possui a característica de possuir, além da magnitude da corrente ou tensão iguais, o mesmo defasamento angular. Vê-se pela figura 12 um exemplo de tensões de terceira harmônica em um sistema equilibrado.

Figura 14 - Exemplo de tensões de terceira harmônica para um sistema equilibrado.



Utilizando o método de componentes simétricas é possível calcular as componentes de sequência positiva, negativa e zero.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{an} \\ \dot{V}_{bn} \\ \dot{V}_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100\angle 0^\circ \\ 100\angle 0^\circ \\ 100\angle 0^\circ \end{bmatrix} \quad (27)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100\angle 0^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V \quad (28)$$

Foi possível se verificar mais uma vez que as componentes de ordem 3 possuem sequência de fase zero. As tensões de linha são dadas por:

$$V_{ab3} = V_{an3} - V_{bn3} = 100\angle 0^\circ - 100\angle 0^\circ = 0 \quad (29.a)$$

$$V_{bc3} = V_{bn3} - V_{cn3} = 100\angle 0^\circ - 100\angle 0^\circ = 0 \quad (29.b)$$

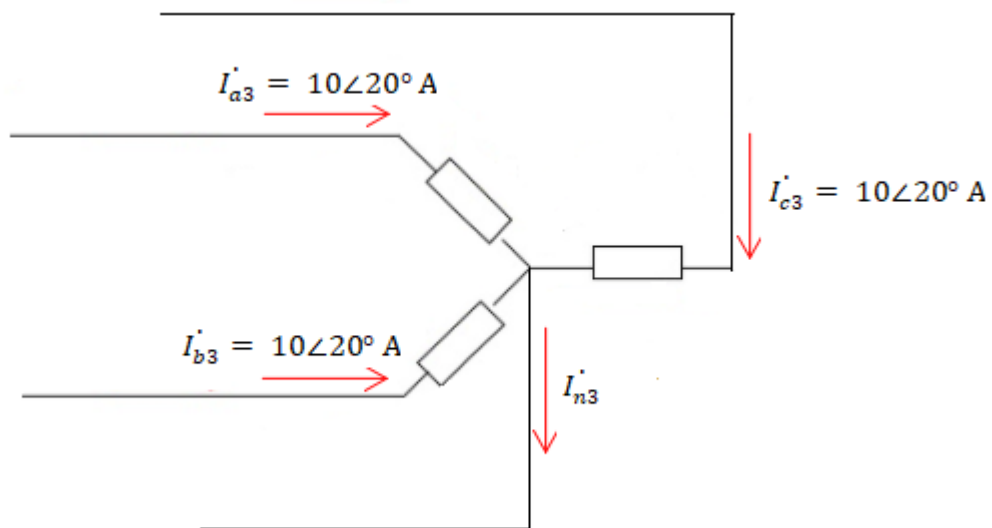
$$V_{ca3} = V_{cn3} - V_{an3} = 100\angle 0^\circ - 100\angle 0^\circ = 0 \quad (29.c)$$

A análise para o delta pode ser feita da mesma forma, sendo assim, não há tensão de linha de terceiro harmônico para sistemas equilibrados.

### 3.6.2.2 Análise da corrente de neutro para a terceira harmônica em sistemas equilibrados

Pode ser feita a análise da corrente de neutro para a componente de ordem 3 pelo exemplo da figura 15.

Figura 15 - Exemplo de correntes de terceira harmônica para um sistema equilibrado.



Utilizando o método de componentes simétricas é possível calcular as componentes de sequência positiva, negativa e zero.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10 \angle 20^\circ \\ 10 \angle 20^\circ \\ 10 \angle 20^\circ \end{bmatrix} \quad (30)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \angle 20^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (31)$$

Sendo verificado mais uma vez que componentes em fase e com mesma amplitude são de sequência zero.

Pela Lei dos nós de Kirchhoff, a corrente no neutro é dada por:

$$\dot{I}_{n3} = \dot{I}_{a3} + \dot{I}_{b3} + \dot{I}_{c3} = 10\angle 20^\circ + 10\angle 20^\circ + 10\angle 20^\circ \quad (32.a)$$

Portanto:

$$\dot{I}_{n3} = 30\angle 20^\circ A \quad (32.b)$$

Sendo assim, no neutro ela possui a amplitude três vezes maior do que a corrente em cada fase.

### 3.6.3 Quarta ordem harmônica

Para a quarta ordem harmônica, o que se tem é dado pelas Equações (22.a), (22.b) e (22.c).

$$i_{a4} = I_{a4m} \text{sen } 4x(\omega t) = I_{a4m} \text{sen } (4\omega t) \quad (33.a)$$

$$i_{b4} = I_{b4m} \text{sen } 4x(\omega t - 120^\circ) = I_{b4m} \text{sen } (4\omega t - 120^\circ) \quad (33.b)$$

$$i_{c4} = I_{c4m} \text{sen } 4x(\omega t + 120^\circ) = I_{c4m} \text{sen } (4\omega t + 120^\circ) \quad (33.c)$$

A quarta harmônica manteve o mesmo defasamento de mesma sequência de fases, logo é de sequência positiva.

### 3.5.4 Regra geral

Se for feita a análise para um maior número de frequências harmônicas, o que se nota é um padrão. Este padrão é mostrado na tabela 1.

Tabela 1 - Sequência de fases de componentes harmônicas.

Ordem harmônica	Sequência de fase
1	Positiva
2	Negativa
3	Zero

4	Positiva
5	Negativa
6	Zero
7	Positiva
8	Negativa
9	Zero
...	...

De maneira genérica, pode ser feita uma análise utilizando a tabela 2.

Tabela 2 - Regra geral para sequência de fase de componentes harmônicas.

Ordem harmônica	Sequência de fase
$h=3k+1$	Positiva
$h=3k-1$	Negativa
$h=3k$	Zero

### 3.7 Harmônicos em sistemas desequilibrados

Foi visto anteriormente que harmônicos possuem as mais variadas sequências de fase e que poderia não existir corrente no neutro do sistema ou tensões de linha, dependendo da ordem harmônica a ser analisada. O primeiro caso ocorre para harmônicos de sequência positiva e negativa então, como o 2º, 4º, 5º, 7º, etc., e o segundo para harmônicos de sequência zero. O que ocorre é que a análise foi feita baseando-se em um sistema com as correntes totalmente equilibradas, como pode ser visto nas equações do item 3.6 que foram utilizadas como base. O que se tem na vida real é um sistema totalmente desequilibrado, e neste caso qualquer harmônico pode ter sequência positiva, negativa e zero, e agora sim, essas regras continuam valendo para essas sequências.

### 3.7.1 Sistema desequilibrado com terceiro harmônico

Como visto no item 3.6.2 deste trabalho, o terceiro harmônico é de sequência zero, sendo assim as componentes de tensão e corrente possuem mesmo módulo e estão em fase. O item 2.1.3 mostrou que sempre que há essa configuração, o que acontece é:

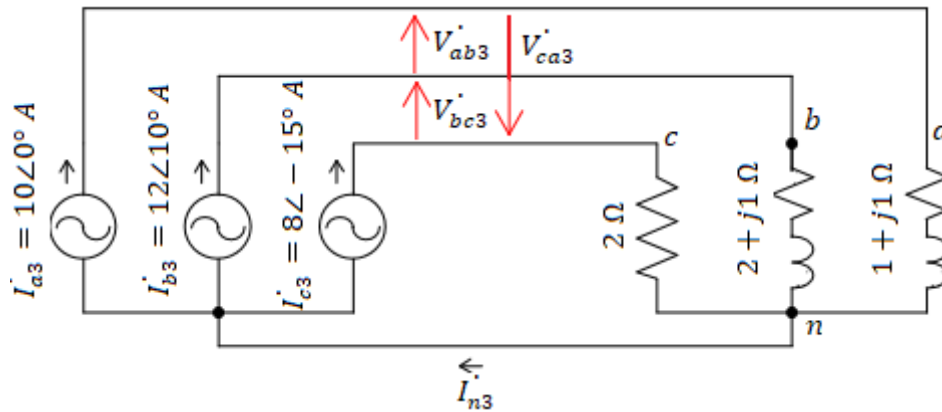
- Inexistência das tensões de linha de sequência zero;
- Corrente no neutro três vezes maior que a de fase se houver estrela conectada pelo neutro;
- Inexistência de correntes de linha de sequência zero no sistema com delta.

Sendo assim, tudo isso é válido para o terceiro harmônico, e de maneira mais geral, para os harmônicos de ordem  $3k$ , pois todos esses são de sequência zero, como foi visto na tabela 2.

Um ponto a ser considerado é que toda a análise feita no item 3.6 é para circuitos equilibrados. O que se tem na vida real são redes totalmente desequilibradas, e assim tudo que foi visto sobre sequência de fase para harmônicos não é mais válido.

Como exemplo temos o circuito representado pela figura 16. As tensões nele representadas são puramente de 180 Hz, ou seja, de ordem 3. Os valores das reatâncias já foram feitos para 180 Hz.

Figura 16 - Circuito desequilibrado apenas com 3º harmônico.



Para um melhor entendimento, pode ser feita uma análise utilizando o Método de Componentes simétricas.

### 3.7.1.1 Cálculo das componentes das correntes

Utilizando a Equação (2), temos que:

$$\begin{bmatrix} I_{3(0)} \\ I_{3(1)} \\ I_{3(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a3} \\ I_{b3} \\ I_{c3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10\angle 0^\circ \\ 12\angle 10^\circ \\ 8\angle -15^\circ \end{bmatrix} \quad (34.a)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} I_{3(0)} \\ I_{3(1)} \\ I_{3(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,85\angle 0,03^\circ \\ 1,63\angle 133,63^\circ \\ 1,74\angle -42,85^\circ \end{bmatrix} A \quad (34.b)$$

A Equação (1) pode ser reorganizada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_{a3} \\ I_{b3} \\ I_{c3} \end{bmatrix} = I_{3(0)} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + I_{3(1)} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} + I_{3(2)} \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Substituindo (34.b) em (35) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a3} \\ \dot{I}_{b3} \\ \dot{I}_{c3} \end{bmatrix} = 9,85 \angle 0,03^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 1,63 \angle 133,63^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} + 1,74 \angle -42,85^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \quad (36.a)$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a3} \\ \dot{I}_{b3} \\ \dot{I}_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,85 \angle 0,03^\circ \\ 9,85 \angle 0,03^\circ \\ 9,85 \angle 0,03^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,63 \angle 133,63^\circ \\ 1,63 \angle 13,63^\circ \\ 1,63 \angle -106,37^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,74 \angle -42,85^\circ \\ 1,74 \angle 77,15^\circ \\ 1,74 \angle -162,85^\circ \end{bmatrix} \quad (36.b)$$

Sendo a primeira matriz referente à sequência zero, a segunda à positiva e a terceira à negativa. Ainda que se trate de componentes de terceira harmônica, em condições desequilibradas surgem componentes de sequência positiva e negativa nesta mesma frequência. Sobre esse aspecto, é muito comum se encontrar, por exemplo, afirmações de que tensões de linha não apresentam componentes de terceira harmônica. Mas isso somente será verdadeiro em sistemas totalmente equilibrados. Na verdade, o correto seria afirmar que tensões de linha não apresentam componentes de sequência zero, uma vez que não se pode afirmar que toda componente de terceira harmônica seja de sequência zero.

### 3.7.1.2 Cálculo das componentes das impedâncias

Novamente utilizando-se a Equação (2), mas agora para as componentes das impedâncias, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} Z_{(0)} \\ Z_{(1)} \\ Z_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{an} \\ Z_{bn} \\ Z_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + j1 \\ 2 + j1 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (37.a)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} Z_{(0)} \\ Z_{(1)} \\ Z_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,80 \angle 21,80^\circ \\ 0,64 \angle 165^\circ \\ 0,17 \angle 105^\circ \end{bmatrix} \Omega \quad (37.b)$$

Reorganizando o circuito como feito no item anterior tem-se:

$$\begin{bmatrix} Z_{an} \\ Z_{bn} \\ Z_{cn} \end{bmatrix} = Z_{(0)} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + Z_{(1)} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} + Z_{(2)} \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Substituindo (37.b) em (38):

$$\begin{bmatrix} Z_{an} \\ Z_{bn} \\ Z_{cn} \end{bmatrix} = 1,80\angle 21,80^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 0,64\angle 165^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} + 0,17\angle 105^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \quad (39.a)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} Z_{an} \\ Z_{bn} \\ Z_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,80\angle 21,80^\circ \\ 1,80\angle 21,80^\circ \\ 1,80\angle 21,80^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,64\angle 165^\circ \\ 0,64\angle 45^\circ \\ 0,64\angle -75^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,17\angle 105^\circ \\ 0,17\angle -135^\circ \\ 0,17\angle -15^\circ \end{bmatrix} \quad (39.b)$$

Como no item anterior, a primeira matriz diz respeito à componente de sequência zero, a segunda à sequência positiva e a terceira à sequência negativa.

### 3.7.1.3 Cálculo das componentes das tensões de fase.

É possível se calcular as componentes de sequência das tensões de fase, uma vez obtidos valores das componentes das impedâncias e das correntes.

#### 3.7.1.3.1 Fase A

Para o cálculo das quedas de tensão é utilizada a regra da sequência que diz que uma queda  $IZ$  de determinada ordem deverá corresponder a soma das ordens individuais de  $Z$  e  $I$ . Para a componente zero da fase A o que se tem é:



$$V_{an(0)} = Z_{an(2)}xI_{a3(1)} + Z_{an(1)}xI_{a3(2)} + Z_{an(0)}xI_{a3(0)} \quad (40.a)$$

$$V_{an(0)} = 0,17\angle 105^\circ x 1,63\angle 133,63^\circ + 0,64\angle 165^\circ x 1,74\angle -42,85^\circ + 1,80\angle 21,80^\circ x 9,85\angle 0,03^\circ \quad (40.b)$$

$$V_{an(0)} = 17,33\angle 24,90^\circ \text{ V} \quad (40.c)$$

Para a componente positiva:

$$V_{an(1)} = Z_{an(0)}xI_{a3(1)} + Z_{an(2)}xI_{a3(2)} + Z_{an(1)}xI_{a3(0)} \quad (41.a)$$

$$V_{an(1)} = 1,80\angle 21,80^\circ x 1,63\angle 133,63^\circ + 0,17\angle 105^\circ x 1,74\angle -42,85^\circ + 0,64\angle 165^\circ x 9,85\angle 0,03^\circ \quad (41.b)$$

$$V_{an(1)} = 9,16\angle 160,16^\circ \text{ V} \quad (41.c)$$

Para a componente negativa:

$$V_{an(2)} = Z_{an(1)}xI_{a3(1)} + Z_{an(0)}xI_{a3(2)} + Z_{an(2)}xI_{a3(0)} \quad (42.a)$$

$$V_{an(2)} = 0,64\angle 165^\circ x 1,63\angle 133,63^\circ + 1,80\angle 21,80^\circ x 1,74\angle -42,85^\circ + 0,17\angle 105^\circ x 9,85\angle 0,03^\circ \quad (42.b)$$

$$V_{an(2)} = 3,02\angle -8,06^\circ \text{ V} \quad (42.c)$$

Obtidas as três componentes já é possível se obter o valor real da tensão da fase A, dado por:

$$V_{an} = V_{an(0)} + V_{an(1)} + V_{an(2)} \quad (43.a)$$

$$V_{an} = 17,33\angle 24,90^\circ + 9,16\angle 160,16^\circ + 3,02\angle -8,06^\circ \quad (43.b)$$

$$V_{an} = 14,2\angle 44,68^\circ \text{ V} \quad (43.c)$$

### 3.7.1.3.2 Fase B

Para a componente de sequência zero da fase B o que se tem é:

$$V_{bn(0)} = Z_{bn(2)}xI_{b3(1)} + Z_{bn(1)}xI_{b3(2)} + Z_{bn(0)}xI_{b3(0)} \quad (44.a)$$

$$V_{bn(0)} = 0,17\angle -135^\circ \times 1,63\angle 13,63^\circ + 0,64\angle 45^\circ \times 1,74\angle 77,15^\circ \quad (44.b)$$

$$+ 1,80\angle 21,80^\circ \times 9,85\angle 0,03^\circ$$

$$V_{bn(0)} = 17,33\angle 24,90^\circ \text{ V} \quad (44.c)$$

Para a componente de sequência positiva:

$$V_{bn(1)} = Z_{bn(0)} \times I_{b3(1)} + Z_{bn(2)} \times I_{b3(2)} + Z_{bn(1)} \times I_{b3(0)} \quad (45.a)$$

$$V_{bn(1)} = 1,80\angle 21,80^\circ \times 1,63\angle 13,63^\circ + 0,17\angle -135^\circ \times 1,74\angle 77,15^\circ \quad (45.b)$$

$$+ 0,64\angle 45^\circ \times 9,85\angle 0,03^\circ$$

$$V_{bn(1)} = 9,16\angle 40,16^\circ \text{ V} \quad (45.c)$$

Para a componente de sequência negativa:

$$V_{bn(2)} = Z_{bn(1)} \times I_{b3(1)} + Z_{bn(0)} \times I_{b3(2)} + Z_{bn(2)} \times I_{b3(0)} \quad (46.a)$$

$$V_{bn(2)} = 0,64\angle 45^\circ \times 1,63\angle 13,63^\circ + 1,80\angle 21,80^\circ \times 1,74\angle 77,15^\circ \quad (46.b)$$

$$+ 0,17\angle -135^\circ \times 9,85\angle 0,03^\circ \text{ V}$$

$$V_{bn(2)} = 3,02\angle 111,94^\circ \text{ V} \quad (46.c)$$

Obtido os valores das três componentes, como feito no item anterior, é possível o cálculo do valor real da tensão de fase, dado por:

$$V_{bn} = V_{bn(0)} + V_{bn(1)} + V_{bn(2)} \quad (47.a)$$

$$V_{bn} = 17,33\angle 24,90^\circ + 9,16\angle 40,16^\circ + 3,02\angle 111,94^\circ \quad (47.b)$$

$$V_{bn} = 26,88\angle 36,55^\circ \text{ V} \quad (47.c)$$

### 3.7.1.3.3 Fase C

O cálculo da componente de sequência zero de tensão da fase C é feito do seguinte modo:

$$V_{cn(0)} = Z_{cn(2)} \times I_{c3(1)} + Z_{cn(1)} \times I_{c3(2)} + Z_{cn(0)} \times I_{c3(0)} \quad (48.a)$$

$$V_{cn(0)} = 0,17\angle -15^\circ \times 1,63\angle -106,37^\circ + 0,64\angle -75^\circ \times 1,74\angle \quad (48.b)$$

$$-162,85^\circ + 1,80\angle 21,80^\circ \times 9,85\angle 0,03^\circ$$

$$V_{cn(0)} = 17,33 \angle 24,90^\circ \text{ V} \quad (48.c)$$

Para a sequência positiva:

$$V_{cn(1)} = Z_{cn(0)} x I_{c3(1)} + Z_{cn(2)} x I_{c3(2)} + Z_{cn(1)} x I_{c3(0)} \quad (49.a)$$

$$V_{cn(1)} = 1,80 \angle 21,80^\circ x 1,63 \angle -106,37^\circ + 0,17 \angle -15^\circ x 1,74 \angle \quad (49.b)$$

$$-162,85^\circ + 0,64 \angle -75^\circ x 9,85 \angle 0,03^\circ$$

$$V_{cn(1)} = 9,16 \angle -79,84^\circ \text{ V} \quad (49.c)$$

Para a sequência negativa:

$$V_{cn(2)} = Z_{cn(1)} x I_{c3(1)} + Z_{cn(0)} x I_{c3(2)} + Z_{cn(2)} x I_{c3(0)} \quad (50.a)$$

$$V_{cn(2)} = 0,64 \angle -75^\circ x 1,63 \angle -106,37^\circ + 1,80 \angle 21,80^\circ x 1,74 \angle \quad (50.b)$$

$$-162,85^\circ + 0,17 \angle -15^\circ x 9,85 \angle 0,03^\circ$$

$$V_{cn(2)} = 3,02 \angle -128,06^\circ \text{ V} \quad (50.c)$$

Agora é possível o cálculo do valor real da tensão de fase:

$$V_{cn} = V_{cn(0)} + V_{cn(1)} + V_{cn(2)} \quad (51.a)$$

$$V_{cn} = 17,33 \angle 24,90^\circ + 9,16 \angle -79,84^\circ + 3,02 \angle -128,06^\circ \quad (51.b)$$

$$V_{cn} = 16 \angle -14,83^\circ \text{ V} \quad (51.c)$$

### 3.7.1.4 Cálculo das componentes das tensões de linha

Com os valores de todas as componentes das três tensões de fase é possível ser feito o cálculo das componentes das tensões de linha. Para a sequência zero o que se tem é:

$$\begin{bmatrix} V_{ab(0)} \\ V_{bc(0)} \\ V_{ca(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{an(0)} \\ V_{bn(0)} \\ V_{cn(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{bn(0)} \\ V_{cn(0)} \\ V_{an(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17,33 \angle 24,90^\circ \\ 17,33 \angle 24,90^\circ \\ 17,33 \angle 24,90^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 17,33 \angle 24,90^\circ \\ 17,33 \angle 24,90^\circ \\ 17,33 \angle 24,90^\circ \end{bmatrix} \quad (52.a)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(0)} \\ \dot{V}_{bc(0)} \\ \dot{V}_{ca(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (52.b)$$

Pela Equação (52.b) acima é possível se verificar mais uma vez que não há componentes de sequência zero em tensões de linha.

O cálculo das componentes positivas é realizado do mesmo modo.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(1)} \\ \dot{V}_{bc(1)} \\ \dot{V}_{ca(1)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{V}_{an(1)} \\ \dot{V}_{bn(1)} \\ \dot{V}_{cn(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_{bn(1)} \\ \dot{V}_{cn(1)} \\ \dot{V}_{an(1)} \end{bmatrix} & (53.a) \\ &= \begin{bmatrix} 9,16 \angle 160,16^\circ \\ 9,16 \angle 40,16^\circ \\ 9,16 \angle -79,84^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 15,87 \angle 40,16^\circ \\ 9,16 \angle -79,84^\circ \\ 9,16 \angle 160,16^\circ \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(1)} \\ \dot{V}_{bc(1)} \\ \dot{V}_{ca(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15,87 \angle -169,84^\circ \\ 15,87 \angle 70,16^\circ \\ 15,87 \angle -49,84^\circ \end{bmatrix} V \quad (53.b)$$

O cálculo da sequência negativa é feito da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(2)} \\ \dot{V}_{bc(2)} \\ \dot{V}_{ca(2)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{V}_{an(2)} \\ \dot{V}_{bn(2)} \\ \dot{V}_{cn(2)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_{bn(2)} \\ \dot{V}_{cn(2)} \\ \dot{V}_{an(2)} \end{bmatrix} & (54.a) \\ &= \begin{bmatrix} 3,02 \angle -8,06^\circ \\ 3,02 \angle 111,94^\circ \\ 3,02 \angle -128,06^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3,02 \angle 111,94^\circ \\ 3,02 \angle -128,06^\circ \\ 3,02 \angle -8,06^\circ \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(2)} \\ \dot{V}_{bc(2)} \\ \dot{V}_{ca(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5,23 \angle -38,06^\circ \\ 5,23 \angle 81,94^\circ \\ 5,23 \angle -158,06^\circ \end{bmatrix} V \quad (54.b)$$

Agora, com as três componentes, é possível se calcular os valores reais das tensões de linha, dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(0)} \\ \dot{V}_{bc(0)} \\ \dot{V}_{ca(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(1)} \\ \dot{V}_{bc(1)} \\ \dot{V}_{ca(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab(2)} \\ \dot{V}_{bc(2)} \\ \dot{V}_{ca(2)} \end{bmatrix} \quad (55)$$

Substituindo os valores já obtidos anteriormente:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15,87 \angle -169,84^\circ \\ 15,87 \angle 70,16^\circ \\ 15,87 \angle -49,84^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 5,23 \angle -38,06^\circ \\ 5,23 \angle 81,94^\circ \\ 5,23 \angle -158,06^\circ \end{bmatrix} \quad (56.a)$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,98 \angle -152,36^\circ \\ 21,02 \angle 73,07^\circ \\ 15,07 \angle -69,08^\circ \end{bmatrix} V \quad (56.b)$$

Sendo assim, harmônicos em circuitos desequilibrados não possuem apenas uma componente específica como foi visto no item 3.5.4, ou seja, não há uma regra geral para se afirmar que uma componente harmônica é de determinada sequência, a menos que o sistema seja equilibrado. Na verdade, nesse tipo de circuito, cada harmônico pode ter sequência positiva, negativa e/ou zero, e não apenas uma delas. Foi possível se ver também que em um circuito desequilibrado há sim tensões de linha de terceiro harmônico, sendo assim a regra comumente utilizada para cada ordem harmônica deixa de existir para sistemas desequilibrados. Mas também foi visto pela Equação (52.b) que para a sequência negativa tudo ainda continua valendo. Conclui-se então que as regras antes vista para harmônicos não existem para circuitos desequilibrados, mas para as sequências positivas, negativas e zero de cada harmônico, as definições clássicas continuam verdadeiras.

As cargas elétricas não são equilibradas e muito menos lineares. Assim sendo, pode-se ter:

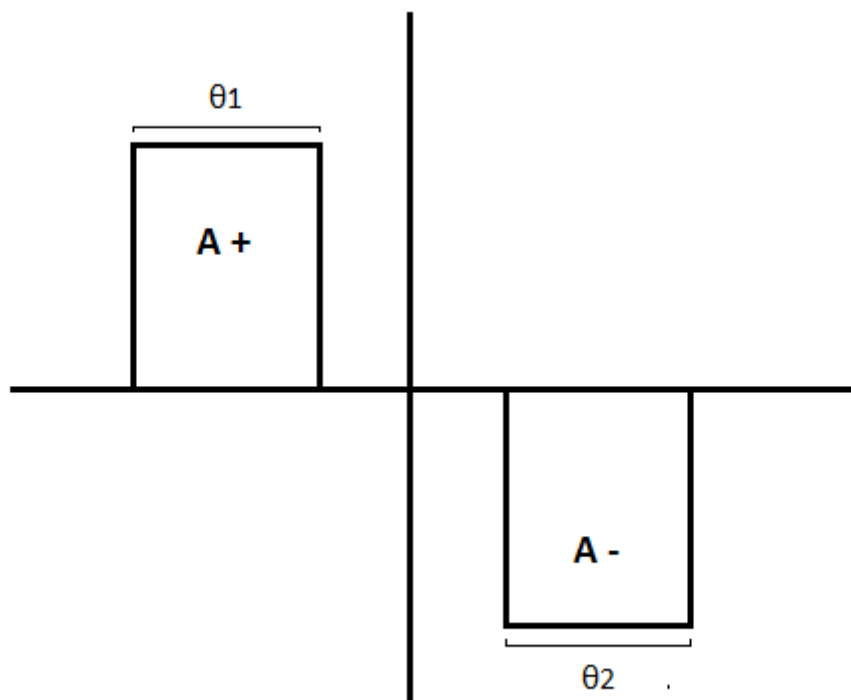
- Tensões de linha com harmônicos de ordem múltipla de 3;
- Correntes de linha com harmônicos de ordem múltipla de 3 quando houver um delta no sistema;
- Correntes no neutro para harmônicos de ordem 5, 7, etc.

### 3.7 Simetria de onda

Quando aplicada a série de Fourier, podem existir alguns casos em que algumas das harmônicas não existem. Deste modo, se a onda a ser analisada apresentar certas características que serão mostradas a seguir, já é possível se saber quais os harmônicos existem em maior ou menor quantidade.

Seja uma forma de onda como a apresenta na figura 11.

Figura 17 - Forma de onda para análise harmônica.



Existem cinco configurações possíveis, sendo elas:

- $\theta_1 = \theta_2 \neq 120^\circ$ ,  $A_+ = A_-$  e existência de simetria: as harmônicas presentes são de ordem  $h=1, 3, 5, 7, 9, \dots$
- $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$ ,  $A_+ = A_-$  e existência de simetria: as harmônicas presentes são de ordem  $h=1, 5, 7, 11, 13, \dots$
- $\theta_1 = \theta_2 \neq 120^\circ$ ,  $A_+ \neq A_-$  e existência de assimetria: as harmônicas presentes são de ordem  $h=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, \dots$
- $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$ ,  $A_+ \neq A_-$  e existência de assimetria: as harmônicas presentes são de ordem  $h=1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, \dots$
- $\theta_1 \neq \theta_2$ ,  $A_+ \neq A_-$  e existência de assimetria: as harmônicas presentes são de ordem  $h=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$

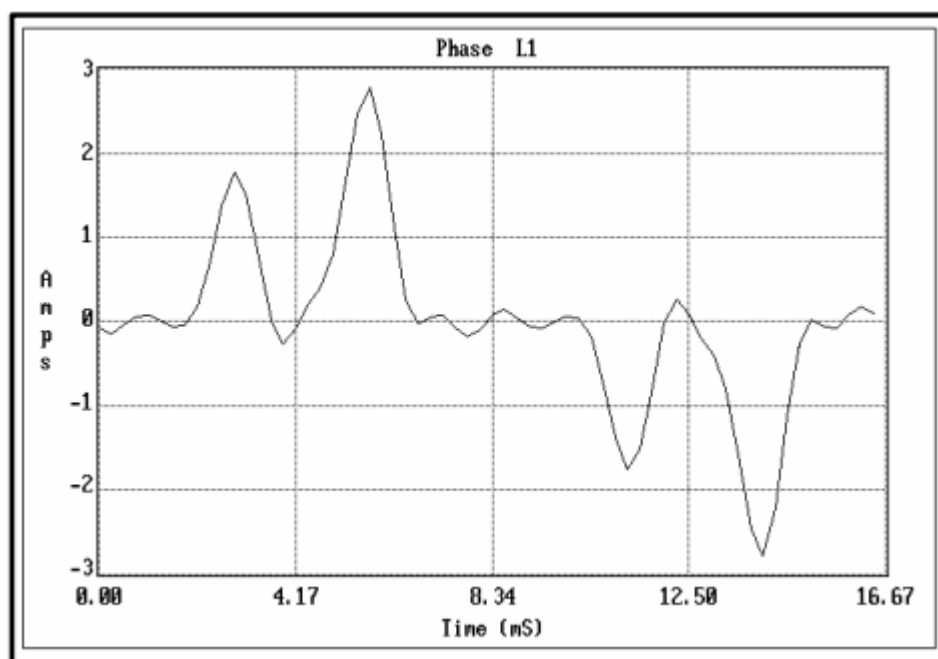
O sistema elétrico possui geralmente formas de onda bastante simétricas, sendo assim as harmônicas de ordem pares quase não existem e de ordem zero também.

### **3.8 Cargas que geram harmônicos**

#### **3.8.1 Inversores de frequência**

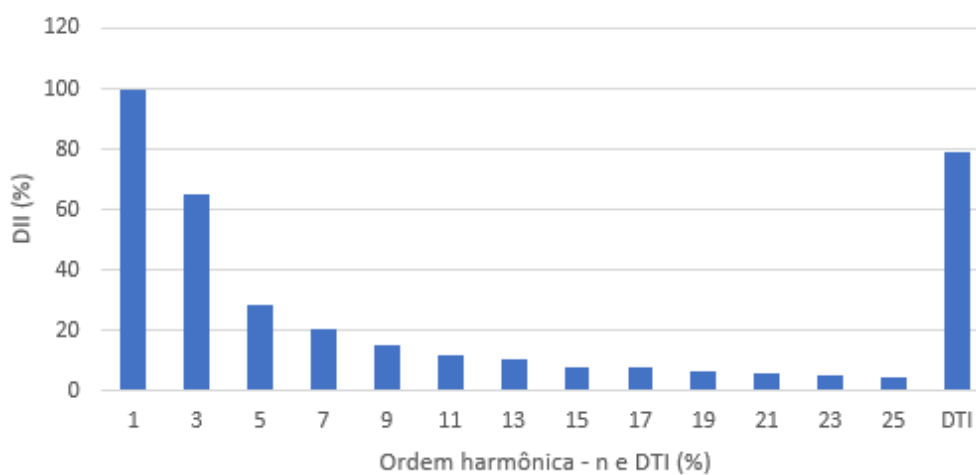
Inversores de frequência são muito utilizados em indústrias para se fazer o acionamento e o controle de velocidade de motores. Seu objetivo é fazer esse controle de velocidade através da variação da frequência em sua saída. Para isso ele deve trabalhar em altas frequências “recortando” a forma de onda de tensão para que fique a mais senoidal possível. Isso tudo é feito através chaveamentos em alta frequência. Pela figura 18 é possível ver a forma de onda de corrente, e pela figura 19, o Espectro Harmônico.

Figura 18 - Forma de onda de corrente de um inversor.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

Figura 19 - Espectro Harmônico de corrente de um inversor.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

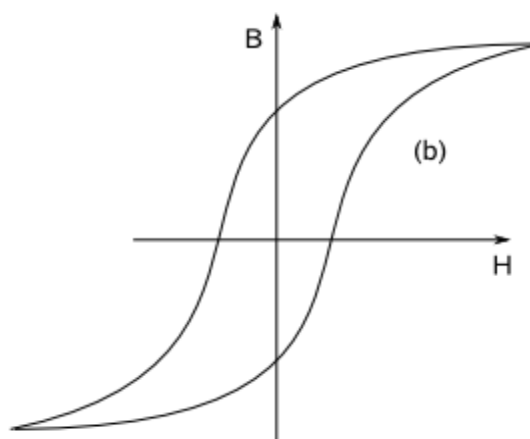
### 3.8.2 Transformadores

Transformadores são equipamentos feitos de cobre e ferro, sendo que esse ferro na maioria das vezes são chapas de aço silício. O silício é um material



que possui Histerese, sendo assim é saturado e não linear. Pela figura 20 é possível ver como é a curva de Histerese de um transformador.

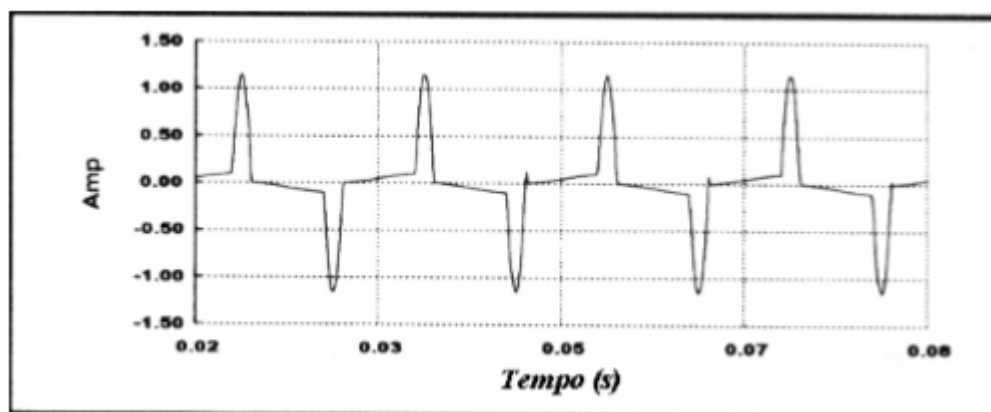
Figura 20 - Histerese de um transformador.



Fonte: Magnetismo de materiais [8].

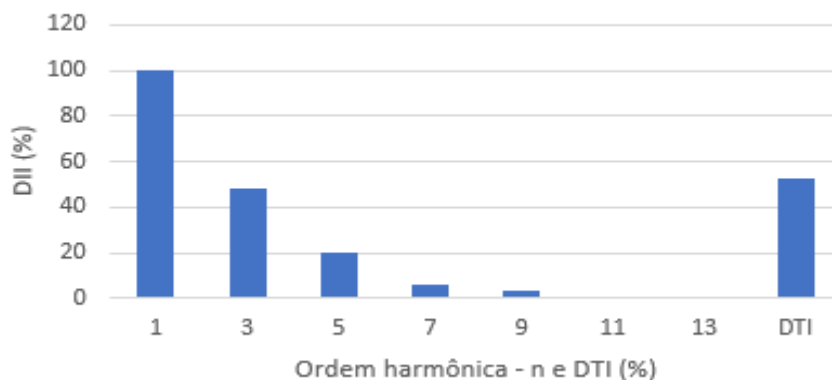
O material magnético do transformador possui capacidade de saturação, sendo assim ele produz harmônicos. A figura 21 mostra a forma da corrente a vazio de um transformador e a figura 22 mostra o Espectro Harmônico dessa corrente.

Figura 21 - Forma de onda da corrente a vazio de um transformador.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

Figura 22 - Espectro Harmônico da corrente a vazio de um transformador.



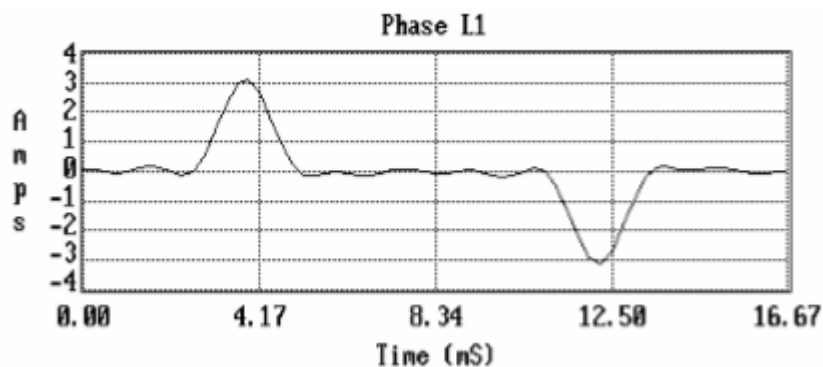
Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

Essa corrente a vazio do transformador varia dependendo do tipo de transformador. Para transformadores de distribuição, essa corrente fica em torno de 5% da nominal, enquanto que para transformadores de força, essa corrente fica em torno de apenas 1% da nominal, sendo que o terceiro harmônico, por exemplo, representa uma parcela menor ainda.

### 3.8.3 Fontes chaveadas

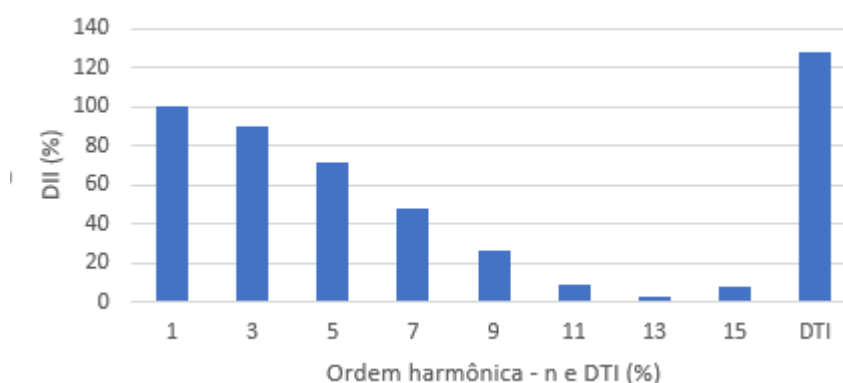
São fontes utilizadas para se fazer o controle de tensão de uma carga através de um circuito comutador. Esse equipamento funciona a base de chaveamentos, distorcendo assim totalmente a forma de onda da corrente, como é visto nas figuras 23 e 24.

Figura 23 - Forma de onda de corrente de uma fonte chaveada.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

Figura 24 - Espectro Harmônico de corrente de uma fonte chaveada.



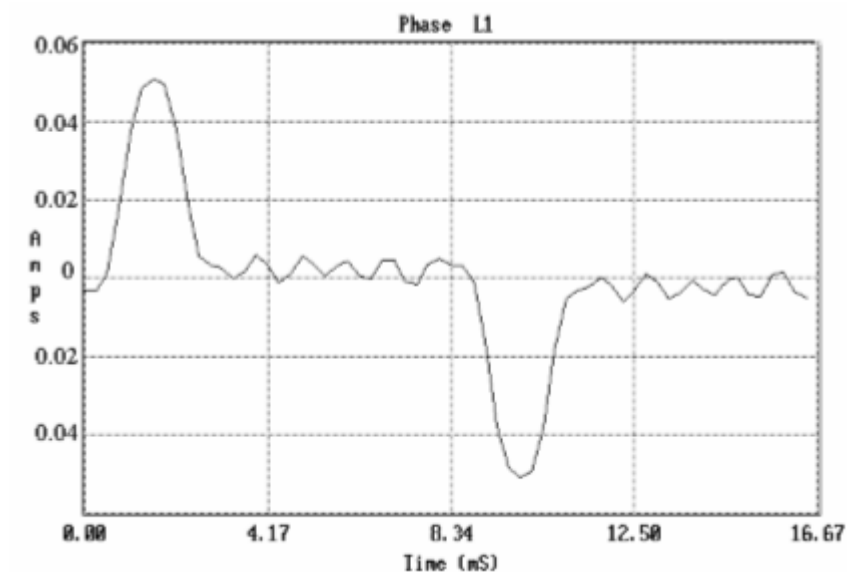
Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

Esse tipo de fonte é bastante utilizada para cargas residenciais e comerciais, em aparelhos tais como: Televisores, microcomputadores, celulares, etc. Pode-se ver que a DTI chega a 128%, sendo a que a maior contribuição é a 3ª harmônica, com um DII de 90%, seguida da 5ª, com um DII de 71%. Como são muito utilizadas em residências, o circuito secundário de distribuição fica muito comprometido devido ao efeito das harmônicas geradas por essas cargas.

#### 3.8.4 Lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico

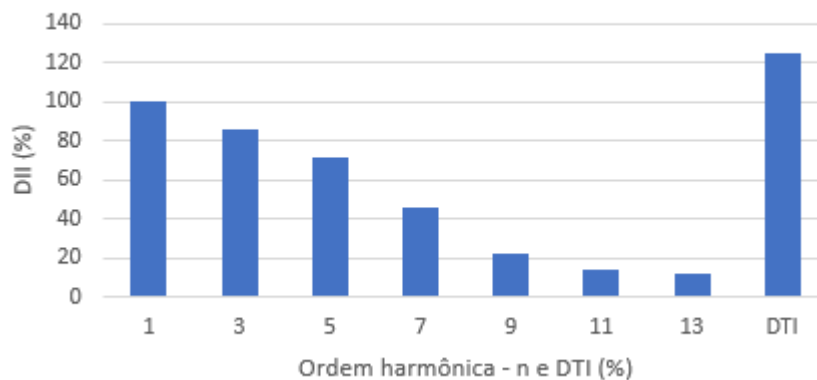
Reatores são utilizados para se reduzir a corrente afim de se garantir as características elétricas que o equipamento, que no caso é a lâmpada, vão trabalhar. Como o próprio nome já diz, são eletrônicos, e se são eletrônicos, funcionam a base de chaveamentos, sendo assim distorcem significativamente a forma de onda de corrente, como pode ser visto pelas figuras 25 e 26, onde foi mostrado a corrente e o Espectro Harmônico para uma lâmpada de 9W/220V com reator eletrônico.

Figura 25 - Forma de onda de corrente de uma lâmpada fluorescente 9W/220V com reator eletrônico.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

Figura 26 - Espectro Harmônico de uma lâmpada fluorescente 9W/220V com reator eletrônico.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência [7].

Possuem uma grande distorção tendo uma DTI de 124%, sendo que a terceira harmônica possui uma DII de 86% e a 5ª de 71%. Esses números já são bem expressivos para uma lâmpada, mas o que acontece é que várias lâmpadas estão ligadas a todo momento, sendo assim as harmônicas vão se somando uma a uma, podendo causar impactos bem grandes na rede.

### 3.9 Perfil harmônico de cargas residenciais e comerciais

Um estudo realizado por [9] mostrou como é o perfil harmônicos de residências e comércios. Na primeira parte do trabalho foi feita a análise para 1 consumidor de consumo baixo, dois de consumo médio e um de consumo alto, sendo que essa definição foi realizada da seguinte forma:

- Consumo abaixo de 200 kWh/mês – consumo baixo
- Consumo entre 200 e 500 kWh/mês – consumo médio
- Consumo acima de 500 kWh/mês – consumo alto

Para realizar essas medidas foi utilizado um TC do tipo janela para fornecer a corrente ao instrumento de medição. O tempo de coleta foi de 24 horas, sendo possível o levantamento da curva de consumo e de distorção durante esse período, sendo feito coletas de dados de hora em hora.

A tabela 3 traz as correntes eficazes médias, o THD de corrente e tensão médios durante a coleta de dados das respectivas residências no período de 24 horas e também o consumo mensal de cada uma (valor informado pela concessionária).

Tabela 3 - Perfil harmônico de consumidores residenciais de consumo baixo, médio e alto.

No.	Consumo médio (kWh/mês)	I <sub>eficaz</sub> médio (A)			THD <sub>I</sub> -médio (%)			THD <sub>V</sub> -médio (%)		
		I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
1	Baixo – 89	1,28			7,62			1,61		
2	Médio 1 – 212	1,93			23,54			1,32		
3	Médio 2 – 296	2,61			11,92			1,46		
4	Alto - 690	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
		3,17	3,35	1,04	5,52	13,70	61,51	1,24	1,42	1,66

Fonte: Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica [9].

Pode-se ver pela tabela 3 que consumidores baixos não apresentam grandes níveis de distorção. Isso ocorre pois eles geralmente possuem menor poder aquisitivo, sendo assim a maioria não possuem, por exemplo, ar condicionado em casa, sendo este um grande responsável por injetar harmônicos na rede elétrica.

Além desse perfil médio, foi levantado por [9] dados de THD para cada hora de cada uma dessas residências, e para os consumidores comerciais foi feito o mesmo, além do fato de que a análise feita foi para específicos tipos de comércio, como por exemplo venda de roupas, computadores, curso de informática, agência de turismo e prédio comercial.

Cada um desses consumidores apresentou um comportamento bem diferente de consumo e THD, e para cada horário que era realizada a medida, esses valores variavam ainda mais.

### 3.10 Perfil harmônico em transformadores de distribuição

As cargas residenciais apresentadas na tabela 3 eram alimentadas por um transformador de 45 kVA, enquanto as cargas comerciais eram alimentadas por um de 22 kVA e outros dois transformadores de 75 kVA e 112,5 kVA alimentavam cargas residenciais e comerciais. Foram feitas as mesmas coletas para todos esses transformadores, como mostra a tabela 4.

Tabela 4 - Perfil harmônico nos transformadores.

No.	I <sub>eficaz</sub> médio (A)				THD <sub>I</sub> -médio (%)				THD <sub>V</sub> -médio (%)		
	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>n</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>n</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
1	38,58	43,08	45,88	17,60	7,48	8,33	8,24	26,90	1,21	1,07	1,33
2	76,81	100,41	82,41	35,89	9,65	8,35	8,34	51,63	1,84	1,75	1,83
3	103,65	128,49	97,69	35,59	10,14	6,48	6,00	55,22	1,85	1,82	1,77
4	169,32	138,50	193,71	55,73	14,20	13,69	20,35	165,35	1,67	1,51	1,54

- 1) Transformador de consumidores **residenciais** (45 k VA)
- 2) Transformador de consumidores **residenciais e comerciais** (75 kVA)
- 3) Transformador de consumidores **residenciais e comerciais** (112,5 kVA)
- 4) Transformador de consumidores **comerciais** (225 kVA)

Fonte: Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica [9].

Esses dados de harmônicos coletados para os transformadores são valores médios, sendo que as coletas eram feitas da mesma forma que para as residências, sendo estas de hora em hora, durante um período de 24 horas. Os harmônicos coletados para esses dados foram os de ordem 3, 5, 7, 9, 11 além da corrente fundamental.

## **4 MÓDULO 7 – PRODIST**

Afim de se criar uma metodologia para estabelecer critérios para o cálculo de perdas em redes de distribuição, foi criado o módulo 7 do PRODIST. Esse módulo cria metodologias para cálculo de perdas em medidores de energia, transformadores, cabos, etc. O objetivo aqui é fazer um estudo das perdas por efeito Joule nos cabos de uma rede de distribuição.

Para o cálculo de perdas, segundo o item 4.8 do MÓDULO 7, se considera apenas a impedância de sequência positiva. Sendo assim, não há componente negativa ou zero, ou seja, não fazem análise de perdas no neutro do sistema.

Outro ponto importante a ser levado em conta é que todo o cálculo de perdas é feito apenas para a componente fundamental, ou seja, 60 Hz. Sabe-se que em um sistema elétrico sempre haverá harmônicos, e isso pode representar prejuízo para a concessionária de energia, sendo que esses harmônicos também estão ocupando o cabo causando efeito Joule, ou seja, perdas.

## **5 ANÁLISE EXPERIMENTAL**

Com o auxílio do MATLAB, foi feita uma análise de parte de uma rede de distribuição com 12 diferentes cargas sendo alimentadas por um transformador de 45 kVA. As cargas foram colocadas com um certo grau de desequilíbrio e, além disso, foram colocadas em algumas delas fontes de corrente em paralelo com harmônicos de ordem 3, 5 e 7 para representar a sua não linearidade. Os harmônicos escolhidos foram esses pois são os mais significativos em uma rede de distribuição, como visto no item 3.8 onde foi mostrado o Espectro Harmônico de algumas cargas residenciais. É possível ver todo o circuito que foi simulado pelo Apêndice A.

### **5.1 Cabos utilizados**

O PRODIST possui valores regulatórios para os diferentes tipos de cabos da rede de distribuição. O ANEXO II do módulo 7 disponibiliza todos esses

valores. Pela tabela 5 estão os valores para cabos de alumínio CA e CAA que foram utilizados na simulação. Também é possível se verificar quais os cabos que foram utilizados em cada trecho da simulação pelo Apêndice A ou B.

Tabela 5 - Valores de resistências dos cabos de alumínio (CA e CAA).

Cabo	Resistência 55 °C (ohms/km)
6 AWG	2,469
4 AWG	1,551
3 AWG	1,229
2 AWG	0,975
1 AWG	0,774
1/0 AWG	0,613
2/0 AWG	0,486
3/0 AWG	0,386
4/0 AWG	0,306
250 MCM	0,259
266,8 MCM	0,245
300 MCM	0,217
336,4 MCM	0,195
350 MCM	0,185
397,5 MCM	0,165
450 MCM	0,145
477 MCM	0,138
500 MCM	0,131
556,5 MCM	0,119

Fonte: PRODIST [10].

Esses valores de resistência são para a temperatura de 55 °C, como pode ser observado pelo item 4.8 do MÓDULO 7 do PRODIST, que diz que deve ser considerada apenas a impedância de sequência positiva obtida à temperatura de 55 °C [10].

O item 4.14 diz que, caso a distribuidora não possua o cadastro dos ramais de ligação, é adotado um comprimento regulatório de 15 metros. No item 4.14.1 é dado o comprimento máximo admissível para esses ramais, sendo de 30 metros [10]. O comprimento utilizado para todos os ramais foi de 30 metros.

## 5.2 Cargas

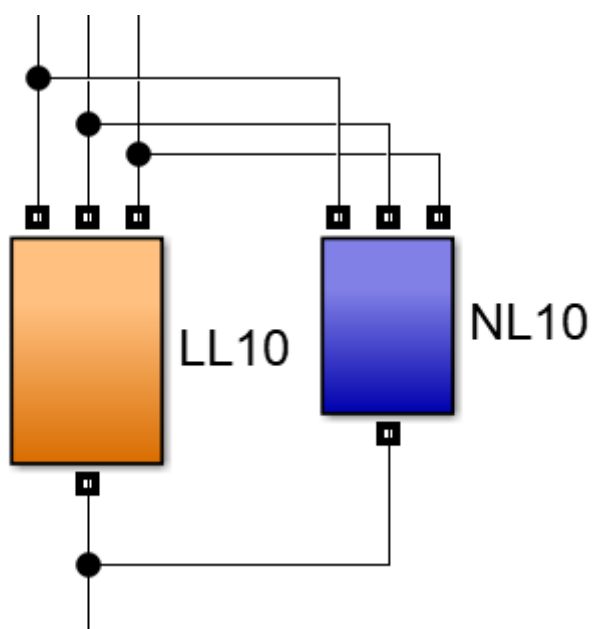
As cargas foram colocadas de modo a se manter as mesmas características de correntes eficazes e THD de corrente da tabela 4. As medições realizadas por [9] nos transformadores foram para a fundamental e os



harmônicos de ordem 3, 5, 7, 9 e 11, e a simulação será feita apenas para os mais significativos destes, sendo os de ordem 3, 5, 7, sendo desconsiderados todos os outros. Isso pôde ser feito também devido ao fato de que as perdas estão relacionadas ao quadrado da corrente eficaz, e esta está relacionada ao nível de distorção total presente e não por determinadas ordens harmônicas, como já foi visto pela Equação (20e).

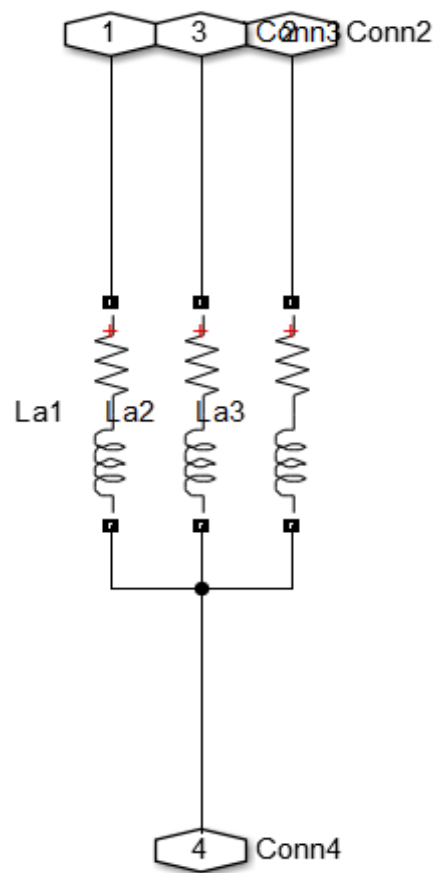
As cargas, por serem não lineares e desequilibradas, foram representadas por uma carga RL desequilibrada em paralelo com fontes de corrente de 3º, 5º e 7º harmônicos. Esse conjunto todo representa a não linearidade da carga.

Figura 27 - Carga utilizada na simulação.



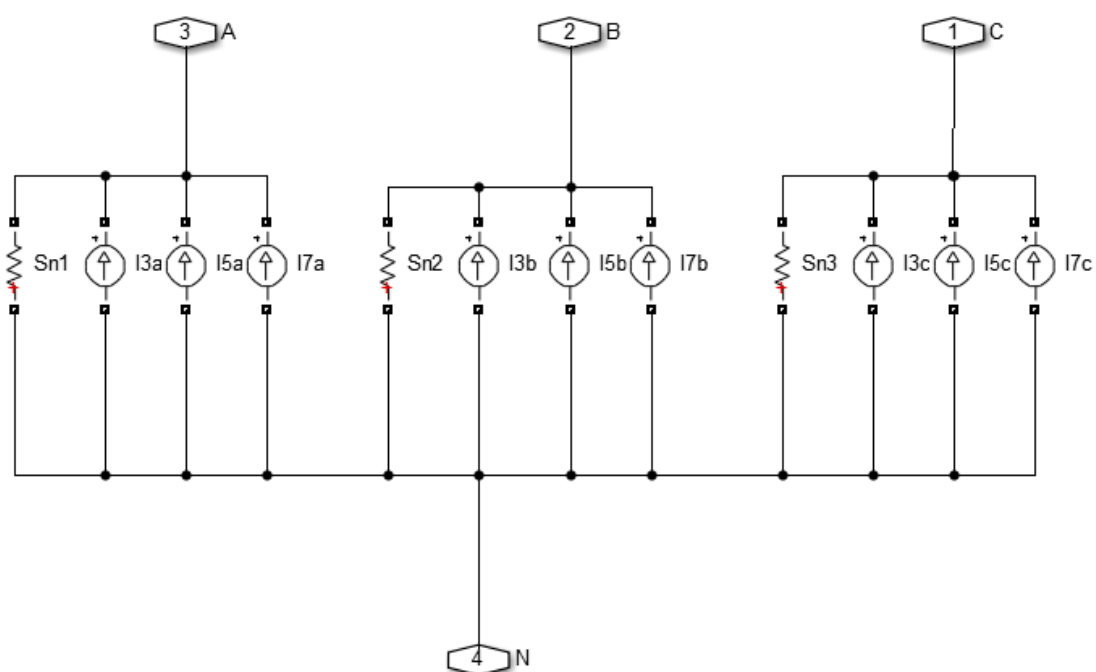
O subsistema chamado de LL10 representa a carga RL, como segue pela figura 28.

Figura 28 - Parte linear da carga.



O subsistema chamado NL10 são fontes de corrente harmônicas em paralelo com a carga RL, como segue pela figura 29.

Figura 29 - Parte não linear da carga.



### 5.3 Índices de distorção e correntes eficazes no transformador

O transformador utilizado para alimentar as cargas foi de 45 kVA. As cargas foram feitas afim de se manter a máxima de semelhança para uma rede de distribuição real, sendo utilizada a tabela 4 para se ter uma base dos valores médios de correntes eficazes e THD de corrente nas três fases e no neutro do transformador, conforme tabela 6, que mostra as medidas coletadas no transformador da simulação.

Tabela 6 - Perfil harmônico do transformador utilizado na simulação

Perfil harmônico do transformador		
Correntes	Valores eficazes (A)	THD (%)
Ia	105.3	7.721
Ib	113.3	7.237
Ic	98.29	10.65
In	20.43	88.51

Os valores de THD para cada uma das correntes ficaram bem próximos da tabela 4, sendo assim a simulação representa bem o que ocorre em um circuito secundário de distribuição.

## 5.4 Resultados obtidos

Para os resultados, foram obtidos os resultados das perdas Joulicas nos cabos de uma rede de distribuição, sendo analisadas quatro configurações possíveis, sendo essas:

1. Perdas nas fases para a componente fundamental – É o que se é medido hoje em dia. Essa configuração leva em conta apenas a componente de sequência positiva para as impedâncias do sistema e apenas a componente fundamental, ou seja, as perdas no neutro e as perdas devido às componentes harmônicas são desconsideradas.
2. Perdas nas fases e no neutro para a componente fundamental – Para a análise desse tipo de perda as perdas no neutro também foram contabilizadas e, ainda como no primeiro caso, foi considerada apenas a componente fundamental para o cálculo de perdas.
3. Perdas eficazes nas fases – Foram consideradas as componentes harmônicas. No caso da simulação, foram utilizadas as de ordem 3, 5 e 7, sendo que se encontram em maior intensidade na rede.
4. Perdas eficazes nas fases e no neutro – Foram consideradas as componentes harmônicas e a análise foi feita para as 3 fases e para o neutro. Esse caso representa o que acontece na realidade, visto que uma rede sempre possuirá harmônicos e sempre será desequilibrada, ou seja, sempre existirá corrente no neutro.

Tabela 7 - Resultados das perdas em Watts obtidos em simulação.

<b>Frequências consideradas</b>	<b>Locais da análise</b>	<b>Valores (W)</b>
<b>Componente fundamental</b>	Perdas nas fases	604.3
	Perdas fases+neutro	611
<b>Valores eficazes</b>	Perdas nas fases	609.3
	Perdas fases+neutro	621.5

Nota-se um aumento significativo nas perdas quando são consideradas as componentes harmônicas e o neutro do sistema.

A tabela 8 mostra os resultados obtidos individualmente na simulação. Este pode ser conferido no Apêndice B.4.

Tabela 8 - Resultados de perdas obtidos em simulação.

	Perdas nas fases (W)	Perdas no neutro (W)	Perdas totais (W)
Fundamental	604,3	6,72	611
Ordem 3	1,301	3,892	5,193
Ordem 5	4,076	0,1286	4,205
Ordem 7	0,05554	1,12	1,175
Eficazes	609,7	11,86	621,5

## 5.5 Cálculo de perdas para a ELETROPAULO

Através da simulação realizada é possível se fazer uma estimativa para uma rede real. Pela tabela 9 podemos ver dados da Eletropaulo para o período base de dezembro de 2013 a novembro de 2014 [12].

Tabela 9 - Montante de perdas no sistema de distribuição da Eletropaulo.

Descrição	Montantes (MWh/ano)	% da Energia Injetada
Energia Injetada (EI)	51.493.148,371	100,000%
Energia Fornecida (EF)	46.315.444,599	89,945%
Perdas na Distribuição (PD)	5.177.703,772	10,055%
Perdas Técnicas (PT)	2.631.282,794	5,110%
Perdas Não Técnicas (PNT)	2.546.420,978	4,945%

Fonte: Nota Técnica nº 0040/2015 - SRD/ANEEL [12].

Sendo que:

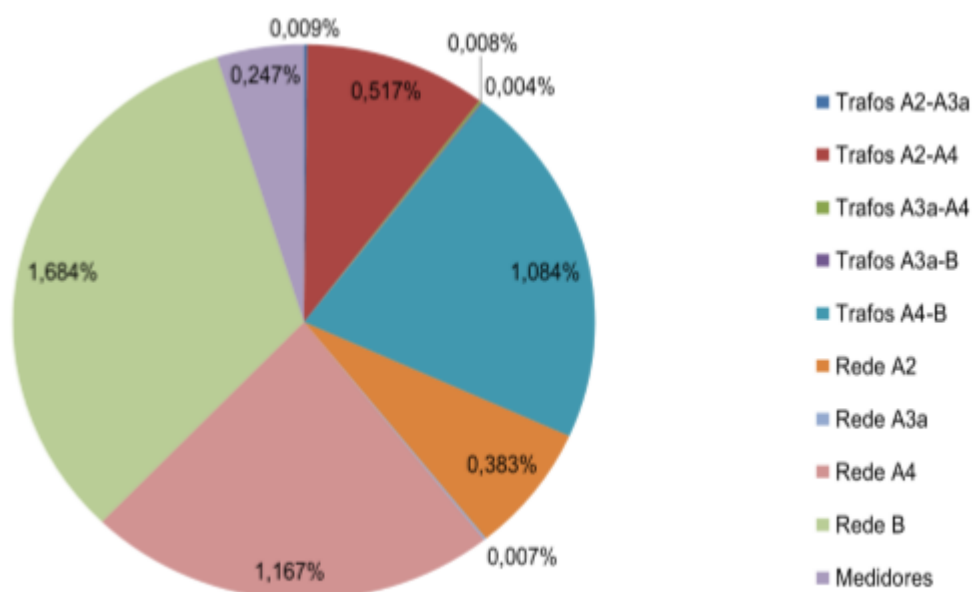
Energia Injetada - EI: energia ativa medida proveniente de agentes supridores (transmissores, outras distribuidoras e geradores) e da geração própria necessária para atendimento do mercado da distribuidora e das perdas ocorridas no sistema de distribuição [10];

Energia Fornecida - EF: energia ativa entregue medida ou estimada, nos casos previstos pela legislação, a outras distribuidoras, às unidades consumidoras cativas e livres, mais o consumo próprio [10];

Perdas na Distribuição - PD: corresponde à diferença entre a Energia Injetada e a Energia Fornecida [10].

Com os dados de perdas técnicas fornecidos pela Tabela 9 ainda não é possível se fazer o cálculo da contribuição harmônica. Para isso é preciso saber qual o percentual de cada Perda Técnica. Com o gráfico da Figura 30 é possível se obter isso.

Figura 30 - Percentuais de Perdas Técnicas sobre a Energia Total Injetada na Distribuidora.



Fonte: Nota Técnica nº 0040/2015 - SRD/ANEEL [12].

Com o gráfico da Figura 30 é possível saber a quantidade de cada parcela de Perda Técnica, visto que é dado o percentual de cada uma sobre a Energia Total Injetada na Distribuidora. Esse valor é possível ser obtido na Tabela 9, dado pelo montante de 51.493.148,371 MWh/ano.

A tabela faz a divisão por subgrupos tarifários. Essa divisão é feita do seguinte modo:

- Rede A2 – Consumidores atendidos por tensões de 88 kV a 138 kV;
- Rede A3 – Consumidores atendidos por tensão de 69 kV;
- Rede A4 – Consumidores atendidos por tensões de 2.3 kV a 44 kV;

- Rede B – Atendimento residencial (subgrupo B1), atendimento rural (subgrupo B2), atendimento demais classes (subgrupo B3) e iluminação pública (subgrupo B4).

A simulação feita foi para um circuito secundário de distribuição (220/127V), sendo assim a parcela a ser analisada no gráfico é a referente à Rede B que é o grupo tarifário referente a consumidores atendidos por 220/127V.

#### 5.5.1 Perdas nas fases para a componente fundamental

Como a análise é feita apenas para as fases e para a componente fundamental, não há a adição de nenhum valor aqui, sendo o montante total devido a Perdas Técnicas na Rede B dado por:

$$PT_{RedeB} = \frac{1,684}{100} \times 51.493.148,371 = 867.144,6186 \text{ MWh/ano} \quad (57)$$

Se for considerado o valor de R\$ 165,00/MWh o valor total será de R\$ 143.078.862,10 que é o valor que é cobrado hoje em dia.

#### 5.5.2 Perdas nas fases e no neutro para a componente fundamental

Se for incluído as perdas do neutro nas contas, há um significativo aumento, como pode-se observar pela tabela 7.

$$\frac{\text{Perdas fases + neutro}_{\text{componentes fundamentais}}}{\text{Perdas fases}_{\text{componentes fundamentais}}} = \frac{611}{604,3} = 1,01109 \quad (58)$$

Nota-se um aumento de 1,109% nos valores de Perdas Técnicas calculados no item 5.5.1. Sendo assim esse valor, quando considerado o neutro, passa a ser:

$$PT_{RedeB} = 1,01109 \times 867.144,6186 = 876.761,2524 \text{ MWh/ano} \quad (59)$$

Houve um aumento bem expressivo de 9616,63382 MWh/ano. Se for considerado o valor de R\$ 165,00 reais/MWh para as perdas técnicas, tem-se um total de R\$ 1.586.744,74.

### 5.5.3 Perdas eficazes nas fases

Quando é considerada a corrente eficaz no cálculo das perdas, ou seja, o efeito das harmônicas também há uma diferença bem significativa.

$$\frac{Perdas\ fases_{eficazes}}{Perdas\ fases_{componentes\ fundamentais}} = \frac{609,7}{604,3} = 1,008936 \quad (60)$$

Nota-se um aumento de 0,8936% nos valores de Perdas Técnicas calculados no item 5.5.1. Sendo assim esse valor, quando considerado o efeito das harmônicas e desconsiderado o neutro, passa a ser:

$$PT_{RedeB} = 1,008936 \times 867.144,6186 = 874.893,3873 \text{ MWh/ano} \quad (61)$$

Houve um aumento de 7748,768725 MWh/ano. Novamente, se for considerado o valor de R\$ 165,00 reais/MWh para as perdas técnicas, tem-se um total de R\$ 1.278.546,84.

### 5.5.4 Perdas eficazes nas fases e no neutro

Este é o caso onde a diferença é a maior possível, que é quando é considerado o efeito de todas as componentes harmônicas tanto nas fases quanto no neutro.

$$\frac{Perdas\ fases + neutro_{eficazes}}{Perdas\ fases_{componentes\ fundamentais}} = \frac{621,5}{604,3} = 1,02846 \quad (62)$$

Sendo assim, houve um aumento de 2,846% e o novo valor para as Perdas Técnicas para a Rede B passaria a ser de:



$$PT_{RedeB} = 1,02846 \times 867.144,6186 = 891.823,5544 \text{ MWh/ano} \quad (63)$$

A diferença neste caso é de 24678,93585 MWh/ano. Para este caso agora, com R\$ 165,00/MWh, o prejuízo chega a R\$ 4.072.024,42.

### 5.5.5 Análise econômica individual

Pode-se fazer uma conta para cada uma das perdas da tabela 8. A tabela 10 fornece o valor em reais para cada tipo de perda e para cada uma das frequências e também para os valores eficazes.

Tabela 10 - Valores em reais para cada tipo de perda.

	Perdas nas fases (R\$)	Perdas no neutro (R\$)	Perdas totais (R\$)
<b>Fundamental</b>	143078862,1	1591080,512	144665207,2
<b>Ordem 3</b>	308035,0812	921500,7962	1229535,877
<b>Ordem 5</b>	965066,096	30448,35622	995609,1594
<b>Ordem 7</b>	13150,09101	265180,0853	278202,3216
<b>Eficazes</b>	144357408,9	2808067,688	147151270,5

É importante lembrar que todos os valores obtidos foram feitos com base em um valor de R\$ 165,00 / MWh, para a Rede B da Eletropaulo para um período base de dezembro de 2013 a novembro de 2014 e considerando que a rede seria como a simulada, sendo consideradas as medições feitas por [9] na qual foram tirados valores médios de um transformador durante o período de 24 horas, sendo feitas medidas de hora em hora.

## 6 CONCLUSÕES

Foi possível ver neste trabalho que harmônicos representam um grande problema devido a dissipação de energia nas diversas partes de um sistema elétrico. A análise feita foi para um circuito secundário de uma rede de distribuição, sendo essa composta por 12 tipos de cargas diferentes, sendo que em algumas delas foram colocadas fontes de corrente em paralelo para representar a sua não linearidade. Além disso foram colocadas com certo grau de desequilíbrio para representar mais fielmente o que acontece na realidade. O

prejuízo para o pior caso, que é da análise para as perdas eficazes no neutro e nas fases, chegou a R\$ 4.072.024,42 durante o período de um ano. Esse prejuízo é apenas para o circuito secundário da Eletropaulo. Se for analisado o sistema inteiro os prejuízos serão ainda maiores.

Distorções harmônicas e desequilíbrio são reais e existem em todo e qualquer sistema, sendo assim, quando há a passagem de correntes harmônicas em cabos e equipamentos, ocorre a dissipação de energia. Quanto mais distorção harmônica tiver no sistema, maior será essa dissipação de energia, ou seja, maiores as perdas e menos potência útil poderá ser transmitida para as cargas, pois esses harmônicos limitam a capacidade de transmissão de energia. Além disso tudo, com essa dissipação ocorre também a diminuição da vida útil de cabos e equipamentos. Assim sendo, podem estar representando grande prejuízo para a concessionária de energia, uma vez que os consumidores os produzem, mas não são cobrados por eles.

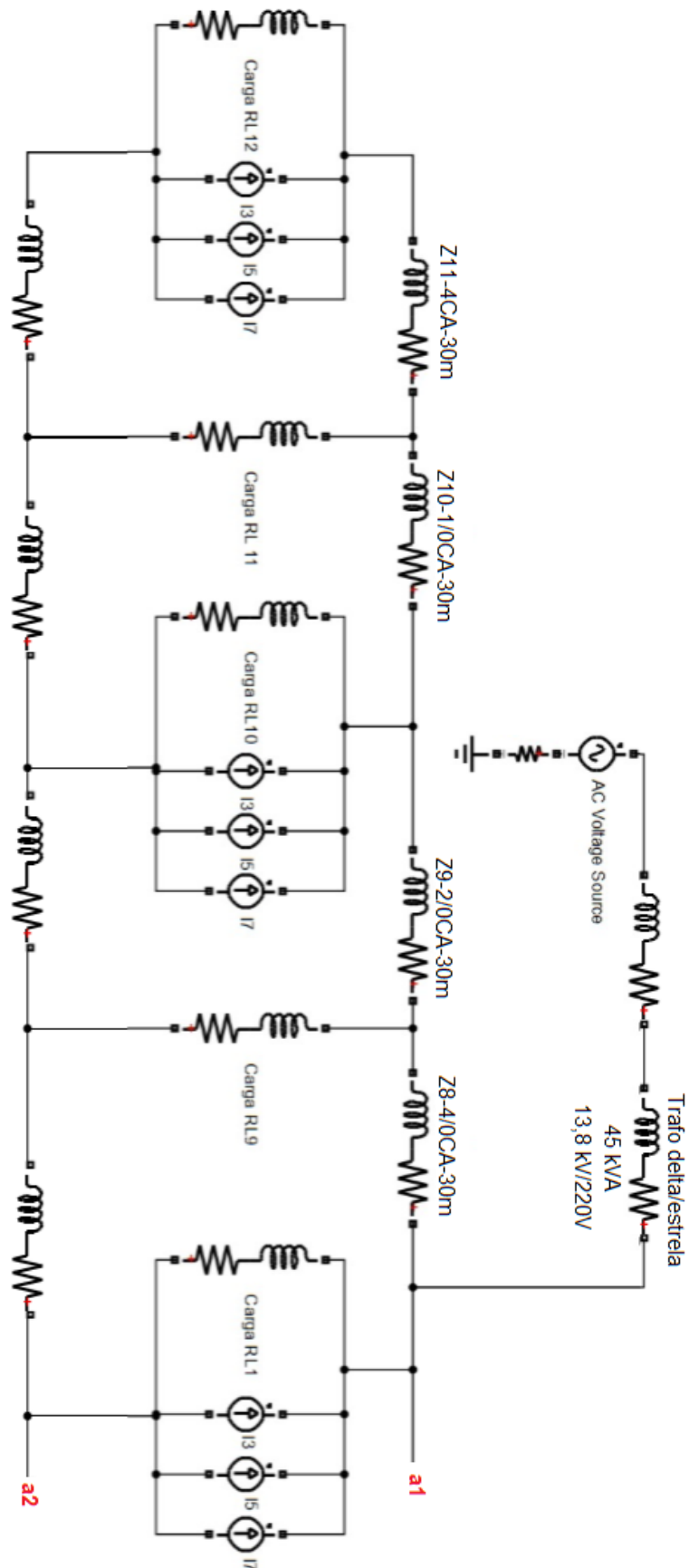
## REFERÊNCIAS

- [1] CURADO, Maria Isabel Coutinho. **Localização de Perdas Não Técnicas de Energia em Sistemas de Distribuição Utilizando o Método PQ**. 2015. 119 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- [2] A. Feltrin; M. Oliveira. **Gestão das Perdas de Energia em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Tutoriais do XVII Congresso Brasileiro de Automática. Campinas, 2008.
- [3] L. Queiroz. **Estimação e Análise das Perdas Técnicas na Distribuição de Energia Elétrica**. 2010. 155f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas – Campinas, 2010.
- [4] PROCOBRE. Qualidade de energia: harmônicas. In: WORKSHOP INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO, 1, 2003, Campinas, 2003
- [5] OLIVEIRA, José Carlos de. **Desequilíbrio de Tensão**. Uberlândia: Grupo de Qualidade da Energia Elétrica, 2017. 33 slides, color.
- [6] COGO, João Roberto. Análise da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos. Apostila, Escola Federal de Itajubá, Itajubá-MG: Editora EFEI , Setembro de 1996.
- [7] GARCIA, Flávio Resende. **Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. Disponível em: <[http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf\\_reativa/ap\\_harmonicosSEPCap.pdf](http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCap.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2017.
- [8] SOARES, Marcos. **Magnetismo de materiais**. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/elemag/eletrm0260.shtml>>. Acesso em: 25 out. 2017.
- [9] PIRES, Igor Amariz. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. 2006. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- [10] BRASIL. ANEEL. . **PRODIST: Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição**. 2015. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo7\\_Revisao\\_4-2\\_.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo7_Revisao_4-2_.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2017.

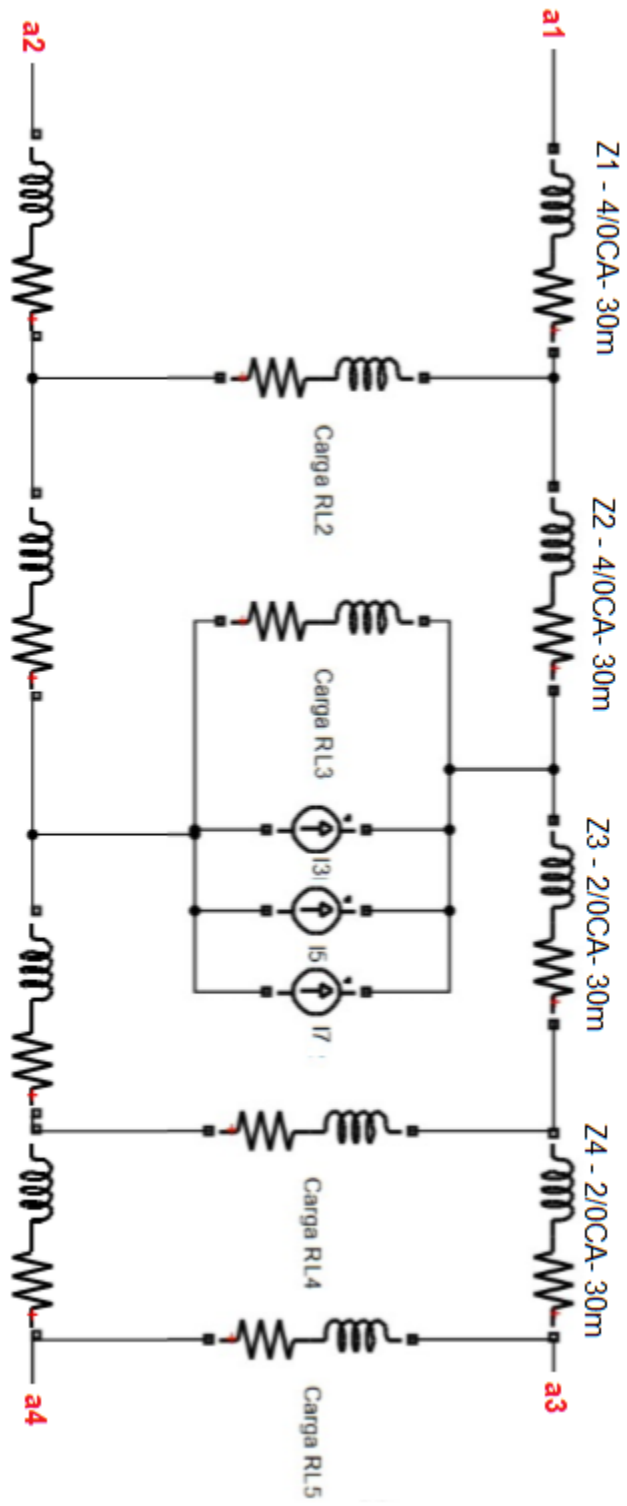
- [11] OLIVEIRA, Marcelo Escobar de. **Avaliação de Metodologias de Cálculo de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2009. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2009.
- [12] ANEEL. **Nota Técnica nº 0040/2015 - SRD/ANEEL**: Análise das contribuições enviadas no âmbito da Audiência Pública nº 25/2015 relativas ao cálculo das perdas na distribuição aplicado à 4º Revisão Tarifária Periódica da Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S/A - Eletropaulo. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/025/resultado/nota\\_tecnica\\_0040\\_srd.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/025/resultado/nota_tecnica_0040_srd.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2017
- [13] OLIVEIRA, José Carlos de. **Distorções Harmônicas**. Uberlândia: Grupo de Qualidade da Energia Elétrica, 2017. 84 slides, color.

## Apêndice A – Monofilar simplificado da rede

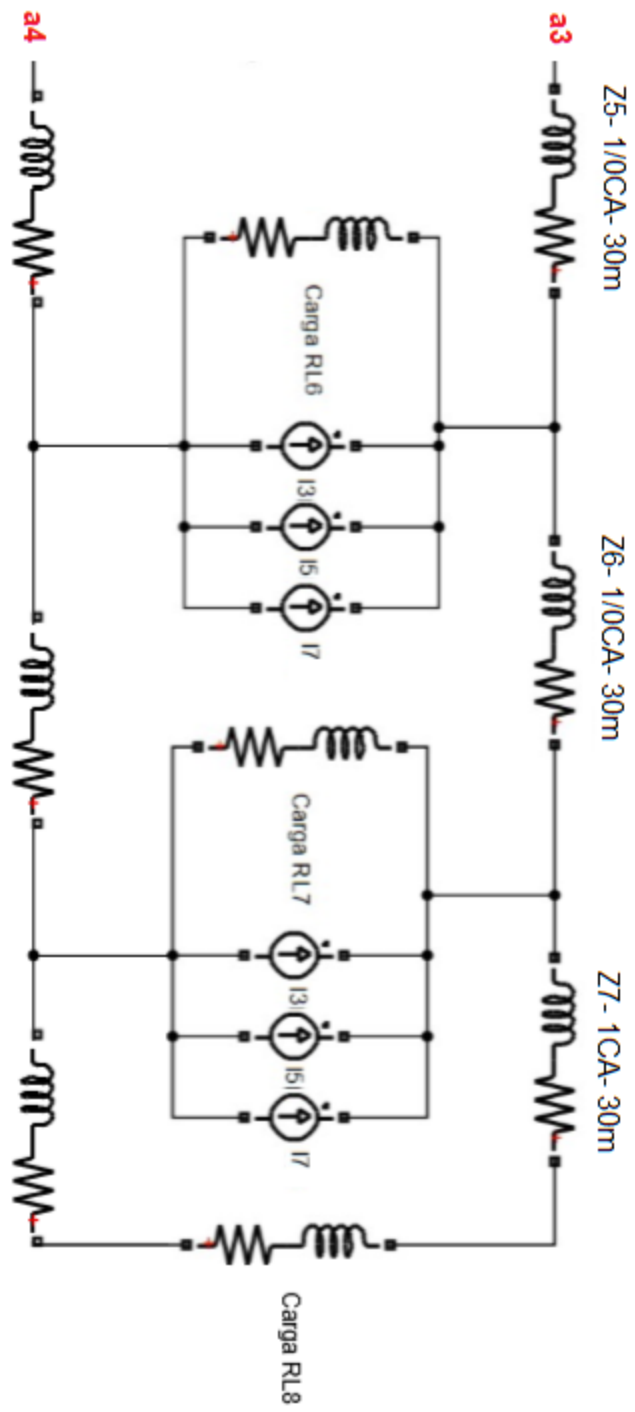
### A.1 Cargas 9, 10, 11,12 e 1 e transformador de 45 kVA



## A.2 Cargas 2, 3, 4 e 5

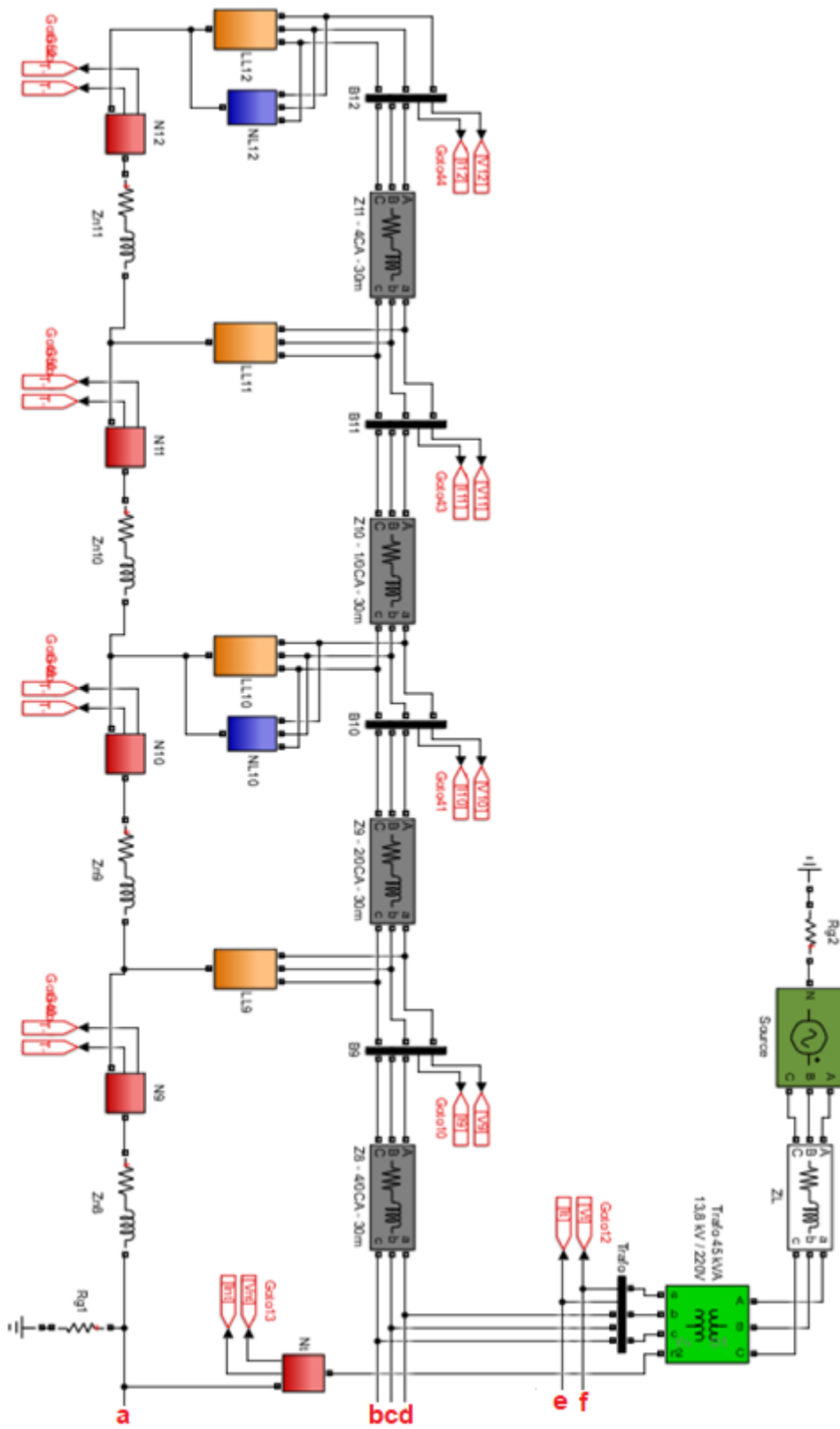


## A.3 Cargas 6, 7 e 8



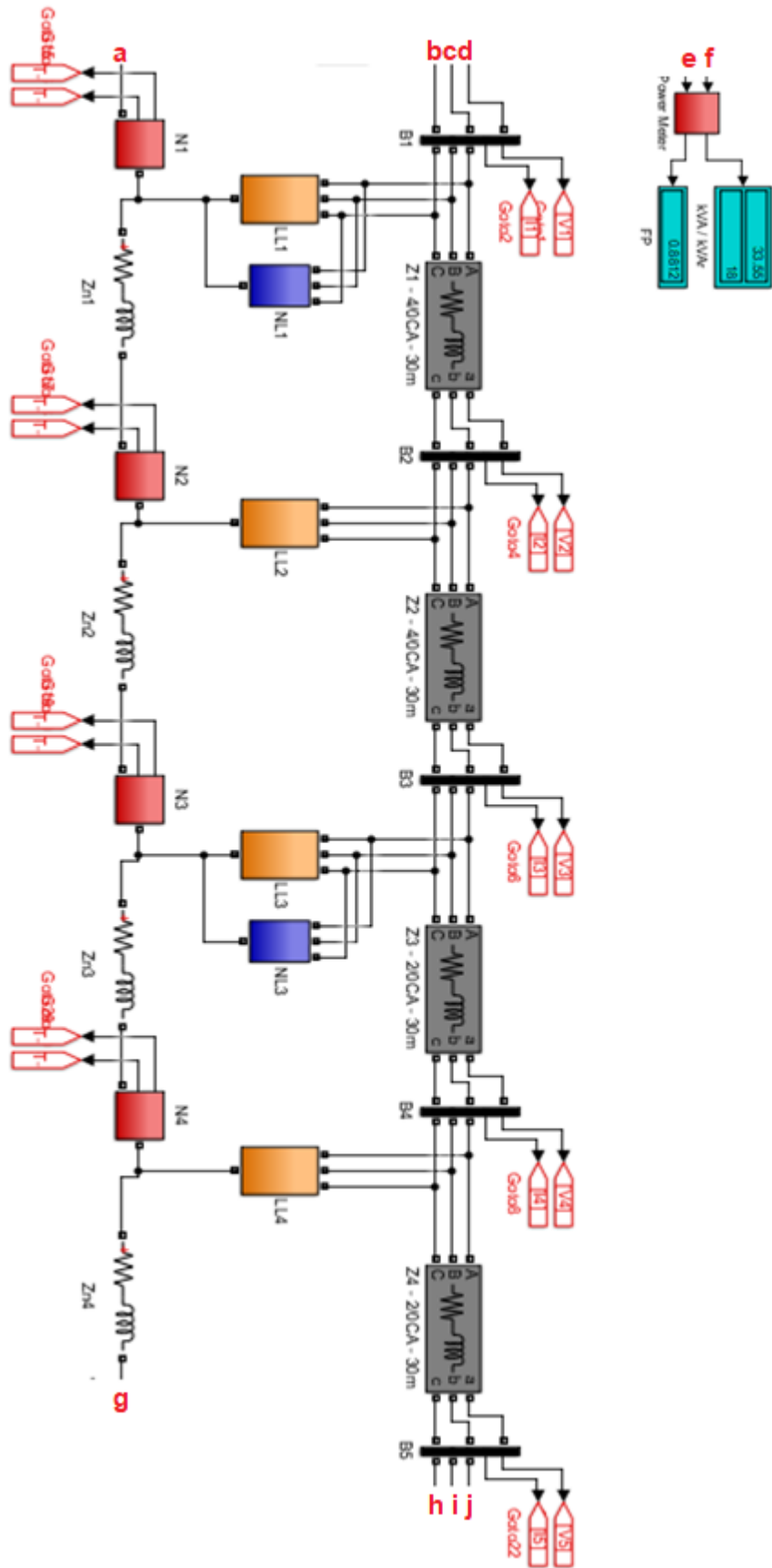
## Apêndice B – Circuito simulado no MATLAB

### B.1 Cargas 9, 10, 11 e 12 e transformador de 45 kVA

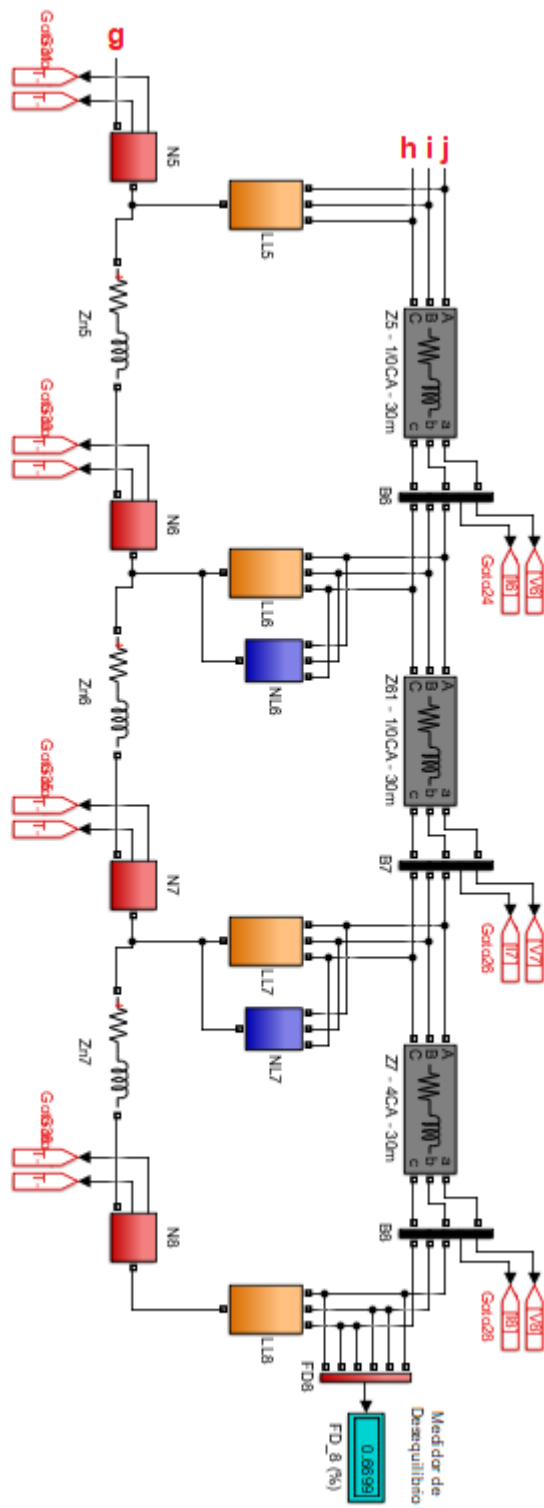




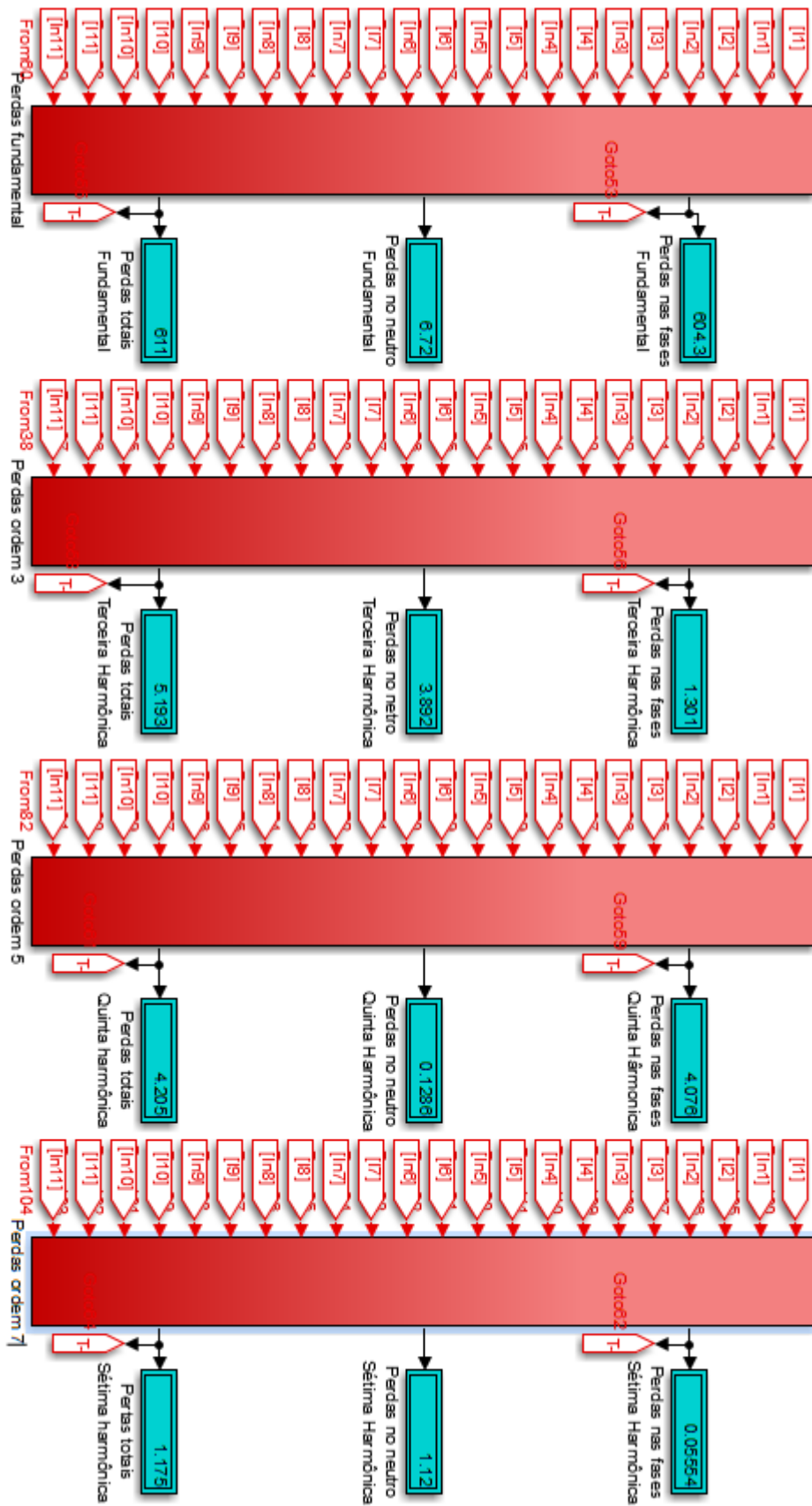
### B.2 Cargas 1, 2, 3 e 4



B.3 Cargas 5, 6, 7 e 8



## B.4 Medições de perdas harmônicas separadas para fases, neutro e total



## B.5 Medições de perdas para diferentes configurações e medições do transformador

