

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL  
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**ROBSON GLICÉRIO SILVA**

**QUALIDADE DE ENERGIA: INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS EM MOTORES  
ELÉTRICOS**

**JOÃO MONLEVADE**

**2019**

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL  
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**ROBSON GLICÉRIO SILVA**

**QUALIDADE DE ENERGIA: INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS EM MOTORES  
ELÉTRICOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica da Faculdade Doctum de João  
Monlevade, como parte dos requisitos  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Prof. MSc. Rubem Geraldo  
Vasconcelos Machado.**

**JOÃO MONLEVADE**

**2019**

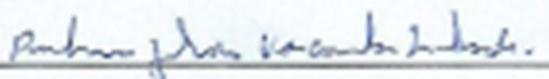
**FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

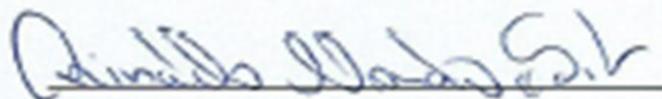
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: QUALIDADE DE ENERGIA: INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS EM MOTORES ELÉTRICOS, elaborado pelo aluno ROBSON GLICÉRIO SILVA foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

**BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

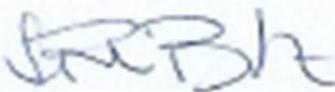
João Monlevade, 10 de JULHO 2019



Prof. MSc. Rubem Geraldo Vasconcelos Machado



Prof. Esp. Rinaldo Nonato e Silva



Prof. Esp. Ana Regina Lara Bretz

## RESUMO

O presente trabalho retrata a importância do tema Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e procura abordar os principais distúrbios responsáveis pelo seu comprometimento. Especificamente, centra seus esforços em distúrbios relacionados às distorções harmônicas na alimentação de motores elétricos. Foram abordadas as referências normativas, nacionais e internacionais, relacionadas às distorções harmônicas e apresentado os padrões adotados por cada uma. Foram realizadas simulações computacionais por software para identificar e analisar o comportamento do motor elétrico frente aos distúrbios harmônicos em sua alimentação. Para isto foi utilizado o circuito equivalente de um modelo de motor elétrico e realizado a modelagem matemática do circuito e extraindo parâmetros para avaliação do desempenho do motor. Os valores de referência das taxas de distorções harmônicas para as simulações foram extraídos das normas verificando os valores máximos permitidos. Um comparativo dos valores permissíveis de distorções harmônicas entre as normas nacionais e internacionais foi realizado, apresentando o comportamento do motor mediante entradas com estes distúrbios. Como resultado das simulações, o motor elétrico apresentou redução no fator de potência, redução no rendimento, aumento na corrente de alimentação e oscilações de potência de saída. Por último, foram abordados as formas de eliminação das harmônicas através da aplicação de filtros no sistema elétrico permitindo melhorar a qualidade de energia na alimentação dos motores.

**Palavras-chave:** Qualidade de energia; Distorções harmônicas; Influência em Motores Elétricos.

## ABSTRACT

The present work portrays the importance of the topic of Electric Power Quality (PQ) and seeks to address the main disturbances responsible for its commitment. Specifically, center their forms in distimented on the harmonic distortions in the power supply of electric motors. The normative references, national and international, related to the harmonic distortions and presented by the standards adopted by each were addressed. Software computational simulations were performed to identify and analyze the behavior of the electric motor in relation to the harmonic disturbances in its power supply. In this work we used the equivalent circuit of an electric motor model and performed the mathematical modeling of the circuit and extracting parameters to evaluate the performance of the motor. The reference values of the harmonic distortion rates for the simulations were extracted from the standards by checking the maximum permitted values. A comparison of the permissible values of harmonic distortions between the national and international standards was made, showing the behavior of the motor through inputs with these disturbances. As a result of the simulations, the motor showed a reduction in power factor, reduction in efficiency, increase in current and output power oscillations. Finally, the ways of eliminating harmonics were addressed through the application of filters in the electrical system, allowing to improve the quality of energy in the motors' power supply.

**Keywords:** Power quality; Harmonic distortion; Influence on electric motors.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motor de Indução .....	17
Figura 2 - Conjugado do Motor de Indução .....	19
Figura 3 - Conjugado induzido versus velocidade mecânica .....	20
Figura 4 - Circuito Equivalente por Fase de um Motor de Indução .....	22
Figura 5 - Diagrama do Fluxo de Potência de um Motor de Indução .....	24
Figura 6 - Circuito Equivalente com Indicação de Perdas .....	25
Figura 7 - Esquema Unifilar Representando a Impedância do Circuito de Alimentação.....	44
Figura 8 - Forma de Onda da Tensão x Corrente para Cargas Elétricas Lineares ...	45
Figura 9 - Forma de Onda da Tensão x Corrente para Cargas Elétricas Não Lineares .....	46
Figura 10 - Componentes Harmônicas.....	47
Figura 11 - Espectro Harmônico.....	49
Figura 12 - Decomposição da Forma de Onda de Correntes Harmônicas.....	50
Figura 13 - Controle de Frequência Variável com Forma de Onda PWM Típica .....	57
Figura 14 - Diagrama de Bloco de Inversor de Frequência.....	58
Figura 15 - Fator de Redução de Conjugado x Distorção Harmônica .....	59
Figura 16 - Rampa de Aceleração da Tensão.....	61
Figura 17 - Forma de Onda na Saída da <i>Soft-starter</i> .....	62
Figura 18 - Curva de Magnetização do Núcleo do Transformador.....	65
Figura 19 - Corrente de Magnetização Causada pelo Fluxo no Núcleo .....	65
Figura 20 - Filtros Amortecidos 1ª ordem (a) – 2ª ordem (b) – 3ª ordem (c) – Tipo “C” .....	98
Figura 21 - Filtro Passivo de Sintonia Simples .....	99
Figura 22 - Filtros Passivos de Dupla Sintonia.....	100
Figura 23 - Filtragem ativa: Geradores ideais de corrente (a); de tensão (b).....	101
Figura 24 - Classificação dos filtros ativos .....	102
Figura 25 - Filtro Ativo em Série.....	104
Figura 26 - Filtro ativo série - monofásico .....	104
Figura 27 - filtro ativo em derivação - monofásico.....	105
Figura 28 - Filtro Ativo em Derivação .....	106
Figura 29 - Filtro Híbrido .....	107

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Correntes e Tensões Trifásicas na Fundamental.....	70
Gráfico 2 - Potência Trifásica na Fundamental.....	71
Gráfico 3 - Correntes e Tensões Trifásicas na 5ª Harmônica – PRODIST.....	73
Gráfico 4 - Correntes e Tensões Trifásicas na 5ª Harmônica – IEEE .....	73
Gráfico 5 - Potência Trifásica na 5ª Harmônica - PRODIST .....	74
Gráfico 6 - Potência Trifásica na 5ª Harmônica - IEEE .....	75
Gráfico 7 - Correntes e Tensões Trifásicas na 7ª Harmônica - PRODIST.....	77
Gráfico 8- Correntes e Tensões Trifásicas na 7ª Harmônica - IEEE .....	78
Gráfico 9 - Potência Trifásica na 7ª Harmônica - PRODIST .....	78
Gráfico 10 - Potência Trifásica na 7ª Harmônica - IEEE.....	79
Gráfico 11 - Correntes e Tensões Trifásicas na 11ª Harmônica - PRODIST .....	81
Gráfico 12 - Correntes e Tensões Trifásicas na 11ª Harmônica - IEEE.....	82
Gráfico 13 - Potência Trifásica na 11ª Harmônica - PRODIST.....	83
Gráfico 14 - Potência Trifásica na 11ª Harmônica - IEEE.....	83
Gráfico 15 - somatório de harmônicas - PRODIST.....	85
Gráfico 16 - somatório de harmônicas - IEEE.....	86
Gráfico 17 - Potência trifásica no somatório de harmônicas - PRODIST.....	86
Gráfico 18 - Potência trifásica no somatório de harmônicas - IEEE .....	87
Gráfico 19 - representação do surto de tensão - elevação.....	90
Gráfico 20 - curva da corrente original x corrente com distúrbio de elevação.....	90
Gráfico 21 - harmônicos provenientes do surto de tensão - elevação.....	91
Gráfico 22 - representação do surto de tensão - afundamento .....	92
Gráfico 23 - curva da corrente original x corrente com distúrbio de afundamento .....	92
Gráfico 24 - harmônicos provenientes do surto de tensão - afundamento .....	93
Gráfico 25 - representação do surto o de tensão - afundamento.....	94
Gráfico 26 - curva da corrente original x corrente com distúrbio de afundamento .....	94
Gráfico 27 - harmônicos provenientes do surto de tensão - afundamento .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelo Motor de Indução Trifásico .....	27
Tabela 2 - Fenômenos Eletromagnéticos.....	30
Tabela 3 - Módulos PRODIST.....	36
Tabela 4 - Terminologia .....	36
Tabela 5 - Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	37
Tabela 6 - Níveis de Referência para Distorções Harmônicas Individuais.....	38
Tabela 7 - Limites de Distorção de Tensão – IEEE.....	39
Tabela 8 - Limites de Distorção de Corrente para Sistemas entre 120 V a 69 kV.....	39
Tabela 9 - Limites de Distorção de Corrente para Sistemas entre 69,001 kV a 161 k V.....	40
Tabela 10 - Limites de Distorção de Corrente para sistemas > 161 kV.....	40
Tabela 11 - Ordem, Frequência e Sequência das Harmônicas.....	51
Tabela 12 - Perdas Resistivas para Harmônica Fundamental .....	71
Tabela 13 - Perdas Resistivas na 5 <sup>a</sup> Harmônica .....	76
Tabela 14 - comparativo da condição ideal x distorcida – 5 <sup>a</sup> harmônica.....	76
Tabela 15 - Perdas Resistivas na 7 <sup>a</sup> Harmônica .....	80
Tabela 16 - comparativo da condição ideal x distorcida – 7 <sup>a</sup> harmônica.....	80
Tabela 17 - Perdas resistivas na 11 <sup>a</sup> harmônica .....	84
Tabela 18 - comparativo da condição ideal x distorcida – 11 <sup>a</sup> harmônica.....	84
Tabela 19 - Perdas Resistivas no somatório de harmônicas.....	88
Tabela 20 - comparativo da condição ideal x distorcida – somatório de harmônicas	88

## ABREVIATURAS E SIGLAS

°C - Graus Célsius

A - Ampér

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

Bliq - Campo magnético Líquido

Br - Campo magnético do rotor

Bs - Campo magnético do estator

C - Capacitor

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

CCT - Capacitores Chaveados a Tiristores

CLP - Controlador Lógico Programável

DC - Direct Current

DHI - Taxa de Distorção Harmônica Individual

DHT - Taxa de Distorção Harmônica Total

DIT - Demais Instalações de Transmissão

DTD - Distorção Harmônica por Demanda

Er - Tensão no rotor

F - Frequência

FFT - Fast Fourier Transform

FMM - Força Magneto Motriz

FP - Fator de Potência

GTO - Gate Turn Off

Hz - Hertz

I - Corrente elétrica

I1 - Corrente no estator

I2 - Corrente no rotor

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor

In - Corrente Harmônica

Ir - Corrente no rotor

kA - KiloAmpér

kV - KiloVolt

L - Indutor

MIT - Motor de Indução Trifásico

MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

ONS - Operador Nacional do Sistema

PAC - Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica

pu - Por unidade

PWM - Pulse Width Modulation

QEE - Qualidade de Energia Elétrica

R - Resistor

R1 - Resistência do estator

R2 - Resistência do rotor

RCT - Reatores Controlados a Tiristores

V - Tensão elétrica

Vn - Tensão Harmônica

W - Watts

Zn - Impedância da Linha

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Contexto Geral.....	12
1.2 Estrutura do trabalho .....	14
<b>2 MOTOR DE INDUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>3 QUALIDADE DE ENERGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1 Descrição dos Principais Fenômenos Eletromagnéticos.....	29
3.1.1 Transitórios.....	29
3.1.2 Variação de Curta Duração.....	31
3.1.4 Flutuação de Tensão.....	33
3.1.5 Variação de Frequência .....	33
3.1.6 Distorção na forma de onda “harmônica” .....	34
<b>4 NORMAS TÉCNICAS .....</b>	<b>35</b>
4.1 PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional .....	35
4.2 IEEE .....	38
4.3 IEC .....	40
4.4 Considerações das Normas .....	42
<b>5 DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....</b>	<b>43</b>
5.1 Caracterização das Cargas.....	44
5.1.1 Cargas Elétricas Lineares .....	44
5.1.2 Cargas Elétricas Não Lineares.....	45
5.1.3 Cargas Elétricas Sensíveis.....	51
5.2 Taxa de Distorção Harmônica Individual .....	52
5.3 Taxa de Distorção Harmônica Total.....	53
5.4 Taxa de Distorção da Demanda .....	54
<b>6 ACIONAMENTOS .....</b>	<b>56</b>
6.1 Conversores CC/CA .....	56
6.2 Soft-starters .....	60
6.3 Fornos a Arco .....	62
6.4 Transformadores.....	63
<b>7 INFLUÊNCIAS DAS DISTORÇÕES NOS EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>66</b>
7.1 Condutores .....	66
7.2 Transformadores.....	66
7.3 Capacitores.....	67
7.4 Medidores de Energia .....	67
7.5 Iluminação.....	67
7.6 Relés de Proteção .....	68
7.7 Máquinas Rotativas.....	68
<b>8 INFLUÊNCIA DAS HARMÔNICAS NOS MOTORES - SIMULAÇÕES.....</b>	<b>69</b>
8.1 Avaliação na Frequência Fundamental .....	70
8.2 Avaliação na 5ª harmônica .....	72
8.3 Avaliação na 7ª harmônica .....	77
8.4 Avaliação na 11ª harmônica .....	81
8.5 Avaliação no somatório de harmônicos.....	85
8.6 Avaliação na ocorrência de um surto.....	89
<b>9 FILTROS PARA HARMÔNICAS .....</b>	<b>96</b>
9.1 Filtros Passivos.....	96
9.1.1 Amortecido .....	97

9.1.2 Sintonizado.....	99
<b>9.2 Filtros Ativos .....</b>	<b>100</b>
9.2.1 Princípios Básicos dos Filtros Ativos.....	101
9.2.2 Classificação dos Filtros Ativos .....	102
9.2.3 Filtro Ativo Série.....	103
9.2.4 Filtro Ativo em Derivação .....	105
<b>9.3 Filtros Híbridos.....</b>	<b>106</b>
<b>10 CONCLUSÃO .....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>111</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto Geral

A energia elétrica está presente em quase todas as atividades desenvolvidas pelo homem. Desde a sua descoberta ela se tornou imprescindível e propiciou um desenvolvimento tecnológico em todas as áreas e setores, possibilitando a implementação de novos sistemas, facilidade na execução de tarefas e ampliação de novos mercados.

Para que a energia chegue ao consumidor final ela deve passar por processos de geração, transmissão e distribuição. As primeiras experiências nestes processos, no século XIX, já demonstraram uma necessidade de preocupação quanto à qualidade de energia. Neste período a qualidade de energia elétrica limitava-se apenas às interrupções sustentadas, ou seja, a quantidade de desligamentos que o sistema elétrico era submetido.

Na década de 1970 e 1980, começaram as discussões incessantes relacionadas às distorções harmônicas e cintilação luminosa pelo setor elétrico nacional. Como resultado, surgiram procedimentos impostos pelas concessionárias visando o atendimento à demanda de novas cargas industriais. Somente, em dezembro de 1996, com a lei de nº 9.427, instituiu-se a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com o objetivo de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização da energia elétrica no país.

A crescente demanda pelo controle de energia elétrica para os sistemas responsáveis pelo acionamento de máquinas elétricas e controles industriais conduziu ao desenvolvimento de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência. Enquanto que a potência trata de equipamentos de potência estáticos e rotativos para a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, a eletrônica cuida dos circuitos e dispositivos de estado sólido para o processamento de sinais permitindo alcançar os objetivos de controle desejados (RASHID, 1999).

Conseqüentemente, a aplicação da eletrônica de potência permitiu aumentar o nível de rendimento e controlabilidade do sistema. Porém, a sua utilização contribuiu para o surgimento de problemas no sistema elétrico, uma vez que estas são cargas não lineares e promovem distorções harmônicas impactando diretamente na qualidade de energia.

Estas distorções surgem, na maioria dos casos, dentro da própria instalação do consumidor. Dentre as principais cargas geradoras de harmônicas estão os retificadores, conversores, fornos a arco, entre outros dispositivos encontrados nas plantas industriais. Estas distorções provenientes destas cargas contribuem para a redução de vida útil de diversos equipamentos conectados ao mesmo barramento, aquecimento de condutores, redução do fator de potência, alterações de impedância da linha, elevação de corrente e atuações de proteções indevidas dentre outros.

Matematicamente, os sinais associados às distorções harmônicas podem ser decompostos em infinitas componentes, cada uma com uma frequência que é múltiplo inteiro da frequência fundamental e com uma amplitude diversa (decomposição em Série de Fourier). Assim, matematicamente, tem-se opções de modelar estas distorções em formas de onda de tensão e corrente mais facilmente interpretáveis.

A relevância dos problemas relacionados às distorções harmônicas incentivou a criação de normas específicas e procedimentos para a tratativa deste assunto, incluindo o estabelecimento de limites máximos aceitáveis no sistema elétrico, uma vez, que as distorções harmônicas causam impactos tanto para as concessionárias quanto para o consumidor final. Neste sentido, a engenharia tem buscado novas soluções para o atendimento às normas, minimizando os impactos na qualidade de energia elétrica.

O objetivo desse trabalho é apresentar uma abordagem teórica dos impactos das alterações na qualidade de energia elétrica provenientes de diversos distúrbios, com um detalhamento específico das distorções harmônicas na alimentação dos motores elétricos de indução, permitindo, compreender o comportamento e desempenho dos motores frente a estes distúrbios. A ausência de coleta de dados reais levou à necessidade de utilização de ferramenta computacional para simulação dos distúrbios na alimentação dos motores, através da modelagem matemática do circuito equivalente de um motor real apresentado no livro “*Fundamentos de Máquinas Elétricas – CHAPMAN, 2013*”. Desta forma, o comportamento do motor sob influência dos distúrbios harmônicos, em diferentes níveis, pôde ser avaliado.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi organizado de maneira a apresentar os principais conceitos relacionados à qualidade de energia elétrica, com um detalhamento das distorções harmônicas na alimentação de motores elétricos de indução. Desta forma, para se alcançar o objetivo, o assunto foi desenvolvido em capítulos com a organização descrita nos parágrafos seguintes.

Inicialmente, é abordado o conceito de motor elétrico de indução (capítulo 2), apresentando sua forma construtiva, as características de funcionamento e os parâmetros de avaliação de desempenho, com o objetivo de compreender as variáveis que interferem no seu funcionamento. Além disso, apresenta-se o modelo do circuito equivalente que foi utilizado nas simulações computacionais.

Em seguida, procurou-se apresentar, no capítulo de qualidade de energia (capítulo 3), os distúrbios responsáveis pelas alterações na mesma, descrevendo os principais fenômenos eletromagnéticos: transitórios, variação de curta e longa duração, flutuação de tensão, variação de frequência e harmônicos.

Em normas técnicas (capítulo 4) são abordadas as referências normativas, nacionais e internacionais, relacionadas às distorções harmônicas e apresentado os padrões adotados por cada uma.

Na sequência, em distorções harmônicas (capítulo 5), são apresentadas as fontes causadoras, a caracterização das cargas e os meios de obtenção dos percentuais das distorções. No capítulo 6, foram abordados os principais tipos de acionamentos eletrônicos de motores de indução e uma abordagem teórica dos fornos a arco e transformadores.

No capítulo 7, influência das distorções harmônicas nos equipamentos, é abordado os problemas que estas distorções causam nos condutores, capacitores, transformadores, medidores de energia, relés de proteção e máquinas rotativas demonstrando de que forma elas contribuem para a degradação destes.

Em seguida, no capítulo 8, são realizadas simulações computacionais demonstrando os efeitos das distorções harmônicas na alimentação de motores elétricos, com base na avaliação dos parâmetros demonstrados no capítulo de motores elétricos e no modelo do circuito equivalente definido.

No capítulo 9, foram explanados os meios de atenuação das distorções harmônicas, através de filtros, demonstrando as diversas configurações de aplicações.

Por fim, no capítulo 10, foram apresentados os resultados e as considerações finais relacionadas ao tema escolhido e sugestões de trabalhos futuros que foram identificados durante a elaboração deste trabalho.

## 2 MOTOR DE INDUÇÃO

Segundo Fitzgerald (2006), os motores de indução são máquinas elétricas de excitação simples, nas quais uma tensão alternada CA é aplicada nos terminais dos enrolamentos no estator (armadura) e aos terminais do rotor. A tensão aplicada na armadura é de excitação de frequência e potencial, normalmente constante, proveniente de um barramento polifásico ou monofásico. No rotor a tensão aplicada é uma tensão induzida, sem conexão física de fios, de potencial e frequência variáveis originadas da relação entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor.

A construção dos motores de indução é baseada no princípio de funcionamento de um transformador. O motor possui um conjunto de enrolamentos defasados entre si de  $120^\circ$  na qual damos o nome de armadura. Esta é a parte fixa onde se produz o campo magnético girante.

Conforme descrito em Chapman (2013), ao alimentar a armadura com correntes alternadas de mesma intensidade com defasamento de  $120^\circ$  entre si surgirá um campo magnético girante de intensidade constante. A velocidade de rotação deste campo magnético é a velocidade síncrona. O movimento relativo do campo magnético girante provoca uma *FMM (Força Magneto-Motriz)* induzida nos enrolamentos do rotor, e esta indução faz surgir um campo magnético no rotor que irá interagir com o campo magnético girante do estator (armadura) promovendo, assim, a rotação do rotor.

Existem dois tipos de rotores que são utilizados nos motores de indução. Rotor em gaiola de esquilo e rotor bobinado. Neste trabalho será utilizado como referência apenas os motores que utilizam rotor em gaiola de esquilo que são os mais comuns nas indústrias atualmente, devido seus baixos custos de aquisição e manutenção em relação aos motores de rotor bobinado.

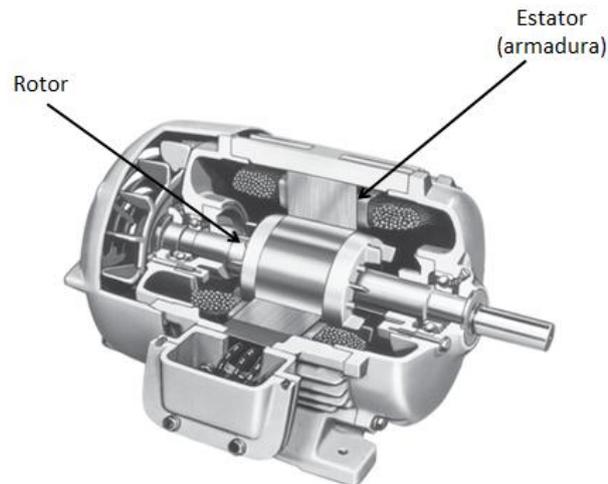
O rotor em gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de alumínio (condutores), montadas paralelamente entre si e ligadas nas suas extremidades por dois anéis condutores, também em alumínio, que curto-circuitam os condutores. Desta forma, a potência de saída será uma potência mecânica. (FRANCHI, 2008).

Nesta seção serão mostradas as equações que são utilizadas para análise dos motores de indução. O objetivo é compreender onde se origina o conjugado,

quais os fatores que o afetam, bem como as equações que denotam as perdas inerentes ao seu funcionamento.

É possível visualizar na figura 1, o formato básico de um motor de indução gaiola de esquilo.

Figura 1 - Motor de Indução



Fonte: Chapman (2013)

A velocidade síncrona do motor pode ser obtida através da equação 1.

$$n_{sin} = \frac{120 f_{se}}{P} \quad (1)$$

Em que:

$n_{sin}$  é a velocidade síncrona

$f_{se}$  é a frequência aplicada ao estator em hertz

$P$  é o número de polos do motor.

A velocidade do rotor é diferente da velocidade síncrona e essa diferença é denominada escorregamento (equação 2), expresso normalmente como sendo uma fração da velocidade síncrona.

$$S = \frac{n_{sin} - n}{n_{sin}} \quad (2)$$

Em que:

S = é o escorregamento

n = velocidade do rotor

O campo magnético girante no entreferro induz tensões com a frequência de escorregamento nos enrolamentos do rotor. Essa tensão induzida é expressa conforme a equação 3.

$$e_{ind} = N_C \emptyset \omega s e n \omega t \quad (3)$$

Em que:

$N_C$  é o número de espiras

$\emptyset$  é fluxo que atravessa a bobina

$\omega$  é a velocidade angular do rotor

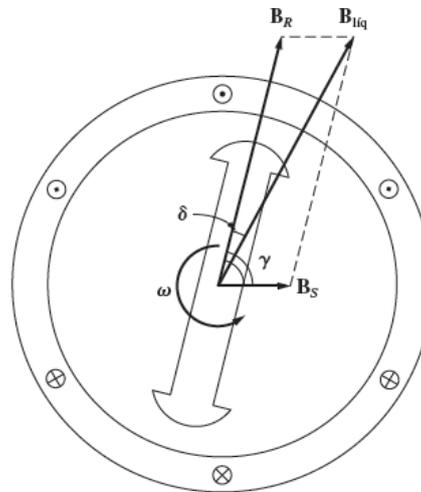
As correntes que circulam no rotor são determinadas pelas magnitudes das tensões induzidas e pela impedância do rotor na frequência de escorregamento. A frequência do rotor (equação 4) é diretamente proporcional à diferença entre a velocidade do campo magnético  $n_{sin}$  e a velocidade do rotor  $n_m$  para qualquer velocidade intermediária (CHAPMAN, 2013).

$$f_{re} = S f_e \quad (4)$$

Nesta equação,  $f_{re}$  é a frequência do rotor.

O produto vetorial dos campos magnéticos do rotor  $B_R$  e os campos magnéticos do estator  $B_S$  é proporcional ao conjugado do motor. A interação destes campos magnéticos resultará em um vetor  $B_{liq}$  conforme demonstra a figura 2. O conjugado induzido, portanto, é expresso de acordo com a equação 5.

Figura 2 - Conjugado do Motor de Indução



Fonte: Chapman (2013)

$$T_{ind} = k B_R B_{liq} \text{sen} \delta \quad (5)$$

Em que:

$B_{liq}$  é o vetor resultante do produto vetorial de  $B_R$  e  $B_S$

$\delta$  é o ângulo entre  $B_R$  e  $B_{liq}$

$K$  é a constante que depende dos aspectos construtivos da máquina

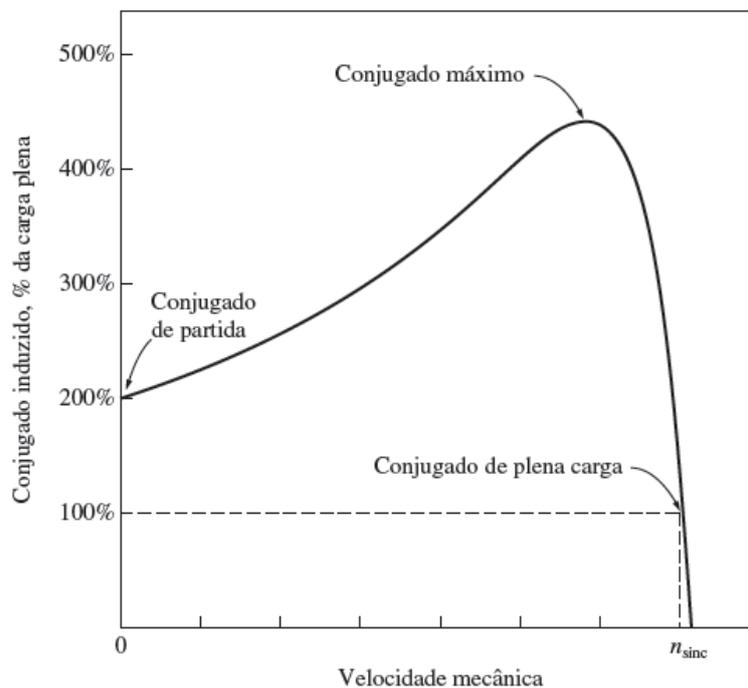
Observa-se que se o rotor girar na velocidade síncrona do estator, ou seja, se o escorregamento for zero, então não haverá tensão induzida no rotor. Se a tensão induzida for zero não haverá corrente no rotor e nem campo magnético, conseqüentemente o motor perde velocidade através de perdas por atrito até parar por completo.

Quando o motor opera a vazio, o campo magnético induzido será muito pequeno sendo utilizado apenas para superar as perdas rotacionais do motor. Nota-se que à medida que a carga aumenta no seu eixo a velocidade diminui e o escorregamento aumenta. Desta forma, haverá mais movimento entre o campo magnético do rotor e o campo magnético do estator, produzindo uma tensão no rotor  $E_R$  mais elevada, e conseqüentemente, uma corrente  $I_R$  maior. Em decorrência do aumento da corrente  $I_R$ , o campo magnético  $B_R$  também irá aumentar, aumentando assim o ângulo entre a corrente do rotor e o campo magnético  $B_R$ . Esta cadeia de eventos promove o aumento do conjugado no motor.

Segundo Chapman (2013), o motor de indução tem limitações quanto ao seu conjugado. O conjugado máximo ocorre quando ao aumentar a carga no eixo o  $\sin \delta$  diminui mais do que aumenta o termo  $B_R$  ao passo que um novo aumento de carga faz com que o conjugado diminua e o motor para, ou seja, se o  $\delta > 90^\circ$ .

A figura 3 demonstra a curva característica do conjugado versus velocidade no motor de indução.

Figura 3 - Conjugado induzido versus velocidade mecânica



Fonte: Chapman (2013)

A curva de velocidade versus conjugado de um motor de indução revela informações extremamente importantes sobre o funcionamento do mesmo. Dividindo a curva em três regiões para análise podemos chegar à seguinte conclusão.

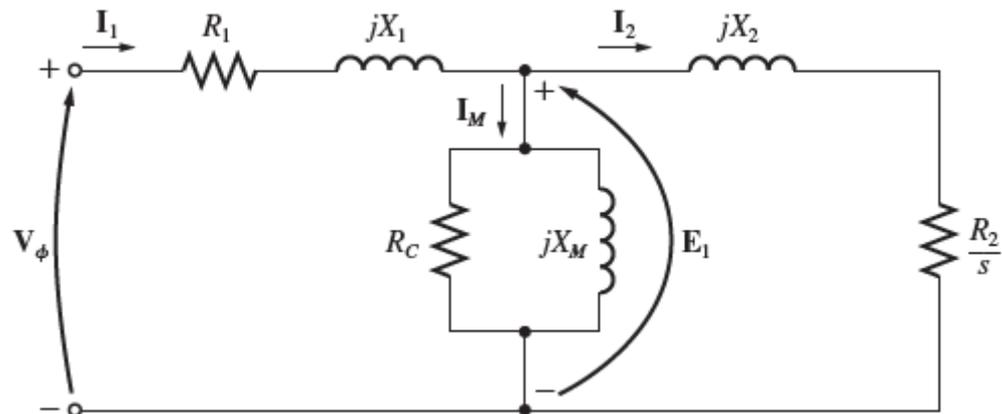
- I. Na primeira região, avaliando o gráfico da direita para a esquerda, o escorregamento do motor é muito baixo e aumenta praticamente de forma linear com o incremento de carga e a velocidade mecânica do rotor diminui de forma aproximadamente linear com a carga. Os motores de indução em condições normais de operação em regime permanente trabalham nesta região onde o escorregamento é próximo de zero. A reatância do motor, nesta região, é muito baixa se

tornando desprezível, ao passo que a corrente do rotor cresce linearmente com o escorregamento.

- II. Considerando a segunda região como região de escorregamento moderado nota-se que a frequência do rotor é maior do que antes (conforme demonstra a equação 3 devido aumento do escorregamento) e a reatância do rotor é da mesma ordem de magnitude da resistência do rotor. A corrente do rotor, portanto, não cresce tão rapidamente como antes. O conjugado máximo do motor ocorre no ponto onde, para um incremento de carga, o aumento da corrente de rotor é equilibrado exatamente pela diminuição do fator de potência do rotor.
- III. Na terceira região, considerada escorregamento elevado. O conjugado induzido diminui com o aumento de carga, porque o incremento da corrente de rotor é completamente vencido pela diminuição do fator de potência do rotor.

As considerações sobre os fluxos e desempenho dos motores de indução podem ser observadas e analisadas através de um circuito equivalente, conforme ilustra a figura 4. Segundo (DEL TORO, 2003) um circuito equivalente é uma interpretação do circuito das equações que descrevem o comportamento do dispositivo. A interpretação e análise serão muito próximas ao circuito real, permitindo entender o comportamento do motor frente aos distúrbios em sua alimentação, bem como, através das equações, compreender onde ocorrem as perdas e como elas ocorrem. Para análise de um modelo trifásico utiliza-se a representação apenas de uma fase, levando em consideração um sistema equilibrado.

Figura 4 - Circuito Equivalente por Fase de um Motor de Indução



Fonte: Chapman (2013)

Em que:

$V_\phi$  - tensão de fase aplicada ao estator

$I_1$  - corrente no estator

$R_1$  - Resistência dos enrolamentos do estator

$jX_1$  - Reatância do estator

$I_M$  - Corrente de magnetização

$R_c$  - resistência de perda no núcleo

$jX_M$  - reatância de magnetização

$I_2$  - corrente no rotor

$jX_2$  - reatância do rotor

$\frac{R_2}{s}$  - resistência do rotor

$E_1$  - tensão induzida no rotor

Segundo Fitzgerald (2006), o circuito equivalente permite ainda determinar uma ampla variedade de características de desempenho das máquinas de indução polifásica em regime permanente. Este desempenho está relacionado com a eficiência da máquina, ou seja, o quanto de energia é gasto no processo de conversão entre energia elétrica em energia mecânica (potência de saída do motor). Neste sentido e com base no circuito modelo expresso na figura 4, distúrbios eletromagnéticos na alimentação do motor podem causar variações nos valores esperados de operação normal. Estes distúrbios podem afetar o conjugado do

motor, a velocidade de rotação, a capacidade de partida em plena carga e o rendimento.

As equações 6 e 7, extraídas de uma modelagem matemática do circuito equivalente da figura 4, traduz o comportamento da corrente e impedância do circuito. Podemos, portanto, modelar as equações e obter informações cruciais para cada situação do motor.

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (6)$$

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{\frac{R_2}{S} + jX_2}} \quad (7)$$

Em que:

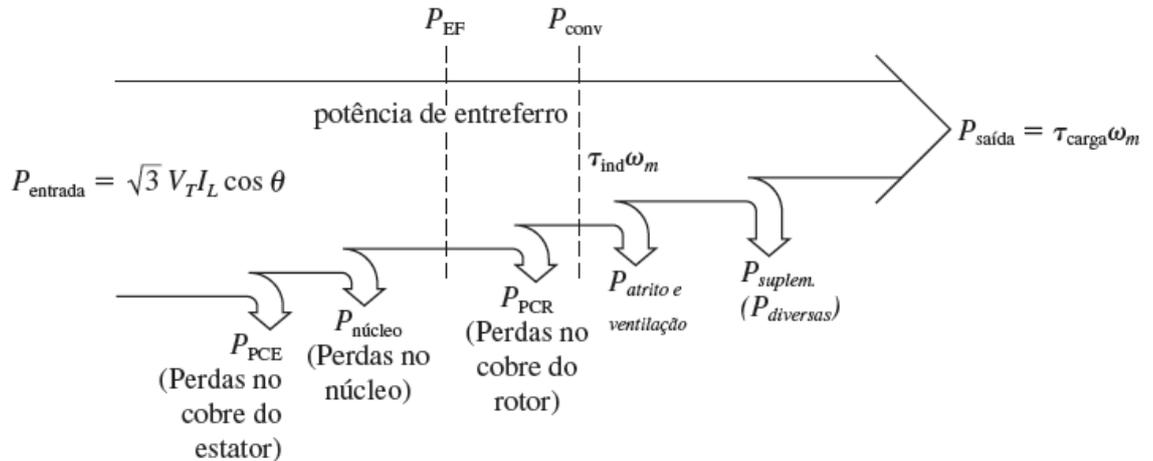
$G_C$  é a condutância ( $1/R_C$ )

$B_M$  é a susceptância ( $1/X_M$ )

As relações entre a potência elétrica de entrada no motor e a potência mecânica de saída estão demonstradas no diagrama de fluxo de potência conforme figura 5. Este diagrama revela os tipos de perdas em um motor de indução desde sua alimentação ao conjugado de saída mecânico.

Conforme mencionado anteriormente e com base nas equações do circuito equivalente, as perdas do motor são fracionadas por cada elemento do dispositivo sendo possível sua análise e interpretação.

Figura 5 - Diagrama do Fluxo de Potência de um Motor de Indução



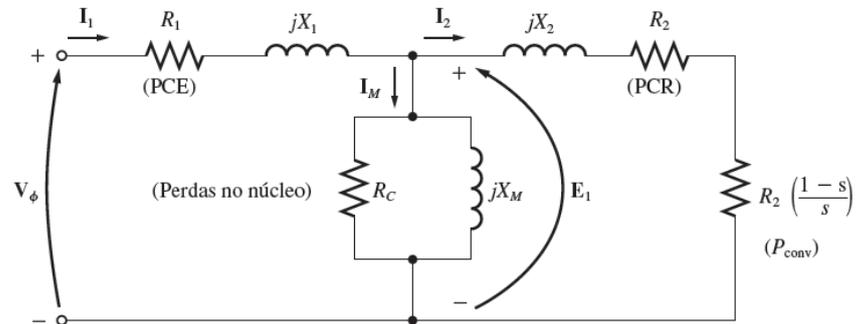
Fonte: Chapman (2013)

Em que:

- A potência de entrada  $P_{\text{entrada}}$  é fornecida na forma de tensões e correntes trifásicas
- $P_{\text{PCE}}$  são perdas no cobre do estator (onde ocorrem as primeiras perdas)
- $P_{\text{núcleo}}$  são perdas que ocorrem no núcleo (perdas por histerese e corrente parasita).
- $P_{\text{PCR}}$  são perdas que ocorrem no rotor (após a transferência de energia do estator para o rotor através do entreferro).
- $P_{\text{conv}}$  é a potência convertida da forma elétrica para a forma mecânica.
- $P_{\text{AeV}}$  são perdas por atrito e ventilação.
- $P_{\text{suplem}}$  são as demais perdas no motor
- $P_{\text{saída}}$  é a potência de saída para o motor.

Conhecendo o fluxo de potência e o circuito equivalente da figura 6 podemos estratificar as perdas relacionadas ao estator, entreferro, e ao rotor como descrito na sequência.

Figura 6 - Circuito Equivalente com Indicação de Perdas



Fonte: Chapman (2013)

As perdas no cobre do estator podem ser obtidas a partir da equação 8:

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (8)$$

A resistência dos enrolamentos do cobre do estator (armadura) é representada pelo resistor  $R_1$  no circuito equivalente. Estas perdas estão relacionadas ao aquecimento resistivo que ocorre nos enrolamentos do estator, as quais variam com o quadrado da corrente  $I_1$  que está associada à impedância equivalente conforme equação (6). O motor apresenta elementos indutivos na sua constituição, e portanto a reatância indutiva será afetada com a variação da frequência variando assim a impedância equivalente do motor refletindo na corrente  $I_1$ . As perdas no cobre são perdas por efeito Joule, pois o aquecimento provocado pela corrente dissipa energia em forma de calor.

As perdas no núcleo são dadas pela equação:

$$P_{núcleo} = 3E_1^2 G_C \quad (9)$$

As perdas no núcleo são representadas pelo resistor  $R_C$  e a reatância  $jX_M$  no circuito equivalente. Estas perdas são relativas às correntes parasitas (correntes de *Foucault*) e perdas por histerese. A primeira ocorre devido ao fluxo magnético que percorre o núcleo e faz induzir tensões que farão circular corrente elétrica através da resistência do núcleo gerando aquecimento, dissipando energia em forma de calor, (efeito Joule). A segunda se dá devido à necessidade de energia para realizar a

reorientação dos domínios do núcleo ferromagnético a cada ciclo de uma corrente alternada aplicada ao núcleo (perdas por histerese).

As perdas no núcleo variam com o quadrado da tensão  $E_1$  que é a tensão induzida no rotor. Conforme a equação 3, o motor operando em baixas velocidades aumentará as perdas no núcleo.

A potência no entreferro é dada pelas equações 10 e 11.

$$P_{EF} = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{núcleo} \quad (10)$$

$$P_{EF} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (11)$$

A potência no entreferro é a potência entregue ao rotor após as perdas relativas ao estator e ao núcleo. A potência varia com o quadrado da corrente  $I_2$  e este varia de acordo com a impedância ( $R_2 + jX_2$ ) e em dependência de  $E_1$ .

As perdas resistivas reais do circuito do rotor pela equação:

$$P_{PCR} = 3I_R^2 R_2 \quad (12)$$

As perdas associadas ao rotor são representadas pelas perdas elétricas em  $R_2$  no circuito equivalente e estas variam com o quadrado da corrente que circula pelo rotor. A corrente  $I_R$  depende da impedância do rotor ( $R_R + jX_R$ ) e consequentemente a impedância irá variar com a frequência no rotor.

Após as perdas no cobre do estator, no núcleo e no rotor a potência é convertida em potência mecânica e pode ser calculada pela equação:

$$P_{conv} = P_{EF} - P_{PCR}$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1-S}{S} \right) \quad (13)$$

Finalmente depois de subtrair as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares a potência entregue à saída é dada pela equação 14. As perdas por atrito são causadas pelo atrito dos rolamentos do motor enquanto que as perdas por ventilação são causadas pelo atrito das partes móveis do motor e o ar contido na

carcaça do motor. Verificamos que quanto maior a velocidade do motor, maiores serão as perdas por atrito e ventilação. As perdas suplementares são perdas que não se encaixam em nenhuma das categorias anteriores e são consideradas, por convenção, representando 1% da carga total (CHAPMAN, 2013).

$$P_{saída} = P_{conv} - P_{AeV} - P_{suplem} \quad (14)$$

Em síntese, a qualidade de energia fornecida na alimentação dos motores deve ser levada em consideração, uma vez que esta é fator influenciador no desempenho dos motores elétricos de indução.

A proposta deste trabalho é demonstrar através de simulações as influências dos distúrbios eletromagnéticos nos motores de indução com foco principal nas distorções harmônicas. Para isso, será utilizado um modelo de motor elétrico que será o propulsor das análises.

O modelo do motor a ser utilizado durante as simulações foi extraído do livro “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, (CHAPMAN, 2013), pag. 326. O qual apresenta os seguintes dados mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Modelo Motor de Indução Trifásico

Motor de Indução Trifásico (Gaiola de Esquilo) ligado em "Y"	
Tensão de Linha	460 V
Potência	25 HP
Frequência	60 Hz
Nº Polos	4
S (escorregamento)	2,20%
R1	0,641 ohms
R2	0,332 ohms
X1	1,106 ohms
X2	0,464 ohms
Xm	26,3 ohms

Fonte: Chapman (2013)

### 3 QUALIDADE DE ENERGIA

O termo qualidade de energia é um conceito geral. Para Bach (2014), pode ser definido como fornecimento de energia elétrica para os usuários afim de que possam utilizá-la no sistema elétrico, sem interferência ou interrupção no seu fornecimento. Neste sentido, podemos citar alguns parâmetros que são avaliados para a medição de uma boa qualidade da energia elétrica, que são; variações de tensão, afundamento de tensão, interrupções, quedas de energia, apagões, desequilíbrio de tensão, ressonância, harmônicas, inter-harmônica, ruído, sobretensão e distorções harmônicas.

As alterações na qualidade de energia podem ser provocadas por descargas atmosféricas, inserção de grandes blocos de cargas, desligamento de grandes geradores, curto circuito, e até mesmo por equipamentos eletrônicos conectados ao barramento elétrico. Estes últimos promovem alterações contínuas e é um dos principais agentes influenciadores na qualidade de energia elétrica.

Atualmente, as empresas têm buscado melhorias constantes em seus processos produtivos e estas melhorias englobam a utilização da tecnologia que se desenvolve em larga escala ao passar dos anos e que permite automatização e controle de processos produtivos. Para este fim, segundo Ramalhete (2009), a eletrônica é a peça fundamental, pois apresenta capacidade de processamento mais rápido, mais eficiente e aumenta a produtividade.

Contudo, a utilização de dispositivos eletrônicos trouxe dois grandes destaques na observância da qualidade de energia. Em primeiro lugar destaca-se a natureza destas cargas, pois são ditas cargas não lineares aquelas que provocam distorções na forma de onda da corrente e tensão contribuindo para uma baixa qualidade de energia no sistema elétrico. Em segundo lugar estas mesmas cargas são sensíveis aos distúrbios eletromagnéticos, ou seja, são vulneráveis a distúrbios transitórios, interrupções de curta duração entre outros.

Neste sentido, de acordo com Figueiredo (2004), a melhor definição encontrada para uma boa qualidade de energia elétrica está associada a um fornecimento contínuo, sem interrupção, seguro, e adequado para os equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o bem-estar das pessoas e o meio ambiente.

Portanto, em virtude destas alterações na QEE torna-se necessário conhecer os fenômenos que a afetam para desenvolver métodos de atenuação e ou mitigação desses a fim de buscar uma boa qualidade de energia no sistema elétrico.

### **3.1 Descrição dos Principais Fenômenos Eletromagnéticos**

Os problemas relacionados à QEE englobam uma gama de distúrbios nos sistemas elétricos, os quais são preocupantes tanto para as concessionárias de energia quanto das indústrias brasileiras.

Para Figueiredo (2004), o termo distúrbio elétrico refere-se a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos que influenciam as formas de onda de tensão e corrente, em um dado tempo e local, em um sistema elétrico de potência. Podemos classificar os distúrbios conforme o tempo típico de duração e intensidade padrão. As classificações em diversas categorias, com seus atributos, são importantes para que possamos classificar os resultados das medições e descrever os fenômenos eletromagnéticos que podem causar problemas de QEE.

Segundo (IEEE Std, 1159-1992), conforme indicado na tabela 2, os distúrbios são divididos em: transitórios, com variação de curta duração, com variação de longa duração, com distorção de forma de onda, com flutuação de tensão e com variação de frequência.

#### **3.1.1 Transitórios**

São classificados como transitórios os eventos indesejáveis no sistema, que são de curta duração, porém podem implicar tensões e correntes nos equipamentos que superam as condições nominais de funcionamento. Os transitórios são nomeados em duas categorias: impulsivo e oscilatório.

Geralmente o transitório impulsivo é causado por descargas atmosféricas provocando alterações repentinas nas condições de estado permanente da tensão e corrente e a sua polaridade é positiva ou negativa, isto é, unidirecional. Este transitório ocasiona degradação ou falha imediata dos isolamentos de equipamentos elétricos (PADILLA, 2008).

Tabela 2 - Fenômenos Eletromagnéticos

<b>Categorias</b>	<b>Componentes espectral Típico</b>	<b>Duração típica</b>	<b>Amplitude de tensão típica</b>
<b><u>Transitórios</u></b>			
Impulsivos			
Nano segundos	5 ns (subida)	< 50 ns	
Micro segundos	1 ms (subida)	50 ns - 1 ms	
Milissegundos	0,1 ms (subida)	> 1 ms	
Oscilatórios			
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
Média frequência	5 - 500 kHz	20 ms	0 - 8 pu
Alta frequência	0,5 - 5 MHz	5 ms	0 - 4 pu
<b><u>Variações de curta duração</u></b>			
Instantânea			
Afundamento de tensão		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
Salto de tensão		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
Momentânea			
Interrupção		0,5 ciclos - 3 s	< 0,1 pu
Afundamento de tensão		30 ciclos - 3 s	0,1 - 0,9 pu
Salto de tensão		30 ciclos - 3 s	1,1 - 1,4 pu
Temporária			
Interrupção		3 s - 1 min	< 0,1 pu
Afundamento de tensão		3 s - 1 min	0,1 - 0,9 pu
Salto de tensão		3 s - 1 min	1,1 - 1,2 pu
<b><u>Variações de longa duração</u></b>			
Interrupção sustentada		> 1 min	0,0 pu
Subtensões		> 1 min	0,8 - 0,9 pu
Sobretensões		> 1 min	1,1 - 1,2 pu
Desequilíbrio de tensão		Regime	0,5 - 2%
<b><u>Distorção de forma de onda</u></b>			
Componente CC		Regime	0 - 0,1 %
Harmônicos	0 - 100% harmônico	Regime	0 - 20 %
Interharmônicos	0-6 kHz	Regime	0 - 2%
Cortes		Regime	
Ruído	Banda de espectro	Regime	0 - 1 %
<b><u>Flutuações de tensão</u></b>	< 25 kHz	Intermitente	0,1 - 7 %
<b><u>Variações de frequência</u></b>		< 10 s	

Como medida preventiva para este tipo de perturbação, todas as edificações devem apresentar sistemas de proteção contra descargas atmosféricas devidamente aterradas com o intuito de drenar o correspondente surto de tensão ou corrente para a malha de aterramento.

Já o transitório oscilatório pode ser gerado através de um transitório impulsivo o qual pode excitar circuitos ressonantes do sistema elétrico. Estes transitórios oscilatórios versam em correntes ou tensões que têm a polaridade de seus valores instantâneos mudada rapidamente. Estes fenômenos podem ocorrer devido operações no sistema elétrico tais como, chaveamento de banco de capacitores, energização de linhas de transmissão, comutações, etc.

Segundo Padilha (2008), pode-se classificar os transitórios oscilatórios em função de sua frequência, podendo ser baixa ( $< 5$  kHz), média (de 5 kHz a 500 kHz) ou alta frequência ( $> 500$ kHz). Estes transitórios estão presentes em sistemas de potência (redes de transmissão e distribuição) e nas redes elétricas do consumidor.

### 3.1.2 Variação de Curta Duração

As variações de tensão de curta duração, geralmente, são advindas de uma condição de falta no sistema elétrico ou pela energização de cargas que requerem elevadas correntes de partida. Estas variações podem ser classificadas em três distintas: elevação de tensão, afundamento de tensão e interrupções rápidas.

A elevação de tensão (*swell*) ocorre quando a tensão eficaz sofre um aumento entre 1,1 e 1,8 pu, ocorrendo em um intervalo de 0,5 ciclo a 1 minuto. Conforme a norma (IEEE Std, 1159-1992) a classificação se dá em três categorias: instantâneos, momentâneos e temporários.

Normalmente, os motivos mais comuns para estas elevações de tensão estão associados as faltas no sistema em geral, saída de grandes cargas ou energização de bancos de capacitores. Quando da ocorrência de faltas no sistema, estas elevações de tensão ocorrem na fase não atingida pela falta. No entanto, a severidade desta elevação de tensão durante a condição de falta é determinada pela localização da falta, impedância do sistema e características de aterramento.

O afundamento de tensão (*sag*) é uma variação depressiva momentânea do valor eficaz da tensão da ordem de 0,1 a 0,9 pu ocorrendo num intervalo de 0,5 ciclo a 1 minuto e são originadas normalmente devido entrada de grandes cargas no

sistema ou partida de grandes motores. Da mesma forma que a elevação de tensão, os afundamentos são subdivididos em três categorias: instantâneos, momentâneos e temporários.

Quando há ocorrência de faltas nos sistemas elétricos, os afundamentos de tensões ocorrem devido à circulação de corrente de falta pela impedância do sistema, levando a uma queda de tensão no ponto de interesse.

A depressão de tensão, segundo Padilla (2008), pode provocar a parada de equipamentos eletrônicos levando à paralização de processos produtivos e o assunto tem sido alvo de preocupações para os órgãos de pesquisa de qualidade de energia elétrica.

Já as interrupções rápidas acontecem quando a tensão eficaz da fonte ou a corrente de carga tem um caimento de 0.1 pu, por um período de tempo entre 0,5 ciclo e 1 minuto. As interrupções rápidas são resultado de faltas no sistema, falhas em equipamentos e mau funcionamento de dispositivos de controle. Quando causadas por faltas no sistema da concessionária, têm seu tempo determinado pelo tempo de operação de dispositivos de proteção do sistema elétrico. Quando causadas por mal funcionamento de equipamentos ou por falhas de conexões, têm um tempo de duração irregular.

### 3.1.3 Variação de Longa Duração

As variações de longa duração são desvios de valor eficaz da tensão, à frequência fundamental, com tempo superior a 1 minuto. Entretanto, são considerados distúrbios de regime permanente. Estas variações podem ser classificadas em três distintas: sobretensões, subtensões ou interrupções sustentadas.

São caracterizadas sobretensões o aumento no valor eficaz da tensão para 1,1 a 1,2 pu durante um tempo superior a 1 minuto. Geralmente, elas podem ser originadas devido a saída de grandes blocos de carga, ajustes incorretos de taps de transformadores ou ainda entrada de banco de capacitores.

Ao contrário da sobretensão, a subtensão é caracterizada pela redução do valor eficaz da tensão para 0,8 a 0,9 pu por um período superior a 1 minuto. Tais oscilações podem ser provocadas devido a saída de banco de capacitores, entrada

de blocos de carga no sistema. Os valores nominais são reestabelecidos somente após atuação dos dispositivos reguladores de tensão.

A interrupção sustentada é o decaimento da tensão ao valor zero por um tempo superior a 1 minuto. Este evento é de natureza permanente e requer atuação manual para restabelecer a energia do sistema elétrico. Elas podem ocorrer de forma planejada ou inesperada. De acordo com Padilla (2008), grande parte das interrupções sustentadas é de forma inesperada, e são causadas por queima de fusíveis, falhas em componentes de circuito alimentador e atuação de disjuntores de proteção.

#### 3.1.4 Flutuação de Tensão

Entende-se por flutuação de tensão variações aleatórias da magnitude da tensão em que não excedem a faixa de 95% a 105% do valor nominal. As cargas que apresentam variação de corrente, principalmente da componente reativa, podem causar flutuação de tensão. Os laminadores, fornos a arco e máquinas de solda são cargas que normalmente geram mais distúrbios desta natureza nos sistemas de distribuição e transmissão de energia.

O principal efeito deste fenômeno é denominado cintilação *Flicker*, pois cintilação é o resultado da flutuação de tensão em cargas de iluminação e pode ser observado pelo olho humano.

#### 3.1.5 Variação de Frequência

A frequência elétrica está relacionada à rotação dos geradores do sistema. A ANEEL estabelece que em condições normais de operação e em regime permanente, as instalações devem operar dentro dos limites de frequência determinados entre 59,9Hz e 60,1Hz. Em resumo, a frequência depende do balanço entre a geração disponível e a carga e em caso de desequilíbrio pequenas variações de frequência deverão ocorrer.

As variações nos valores dos limites das condições normais e aceitáveis de operação, definido pelas normas, geralmente, são causadas por desconexão de grandes blocos de cargas, faltas no sistema de transmissão e saída de grandes parques de geração.

Quando há variação de frequência, estas podem comprometer a operação normal de máquinas rotativas, porém, devido à interconexão dos sistemas elétricos, é raro tais distúrbios ocorrerem.

### 3.1.6 Distorção na forma de onda “harmônica”

Denomina-se harmônica a distorção da forma de onda que se apresenta de forma similar em cada múltiplo inteiro da frequência fundamental. A distorção da forma de onda é o desvio em regime permanente, da forma de onda da corrente ou tensão em relação ao sinal senoidal puro, ou seja, da frequência fundamental, no Brasil 60Hz (Pomilio et al., 2017).

Este tipo de distorção geralmente é imposto por componentes que apresentam relação não linear entre corrente e tensão como, motores e transformadores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Há também outros componentes não lineares que são cargas eletrônicas que apresentam materiais semicondutores.

A distorção harmônica de tensão resulta da queda de tensão provocada pela passagem de corrente (injetada por uma carga não linear) pela impedância do sistema.

O fenômeno das harmônicas no sistema elétrico deve ser tratado como sendo em regime permanente. A distorção de forma de onda, advindas pelos componentes harmônicos, deve estar presente, continuamente, por pelo menos alguns segundos.

## **4 NORMAS TÉCNICAS**

O setor energético brasileiro conta com órgãos que regulamentam e fiscalizam a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica no país. Estes órgãos gerenciam toda a matriz energética e estabelecem procedimentos e normas visando manter a estabilidade nos diversos setores. Além disso, existem outros órgãos que trazem recomendações e normas técnicas internacionais referenciando padrões e valores aceitáveis para operação segura do sistema elétrico.

Nesta seção serão abordadas as normas nacionais e internacionais referentes às distorções harmônicas.

### **4.1 PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional**

O PRODIST são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Os documentos constituem-se de 11 módulos, conforme tabela 3.

O documento normativo relacionado à qualidade de energia é o Módulo 8, que define: a terminologia; caracteriza fenômenos, parâmetros e valores de referência; a conformidade de tensão em regime permanente; e as perturbações na forma de onda da tensão. Aplica-se estes documentos aos consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição, produtores de energia, distribuidores, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT e ao Operador Nacional do Sistema – ONS. Em relação a harmônicos, o PRODIST referência os valores máximos de distorções na rede.

Tabela 3 - Módulos PRODIST

Módulos - PRODIST	
1	Introdução
2	Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
3	Acesso ao Sistema de Distribuição
4	Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
5	Sistemas de Medição
6	Informações Requeridas e Obrigações
7	Cálculo de Perdas na Distribuição
8	Qualidade de Energia Elétrica
9	Ressarcimento de Danos Elétricos
10	Sistema de Informação Geográfica Regulatório
	Fatura de Energia Elétrica e Informações
11	Suplementares

Fonte: ANEEL (2016)

A tabela 4 apresenta a terminologia utilizada para as grandezas avaliadas na qualidade de energia.

Tabela 4 - Terminologia

<b>Identificação da Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT <sub>h</sub> %
Distorção harmônica total de tensão	DTT %
Tensão harmônica de ordem h	V <sub>h</sub>
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	H <sub>máx</sub>
Ordem harmônica mínima	H <sub>min</sub>
Tensão fundamental medida	V <sub>1</sub>

Fonte: ANEEL (2016)

As equações para determinar os valores das grandezas DIT<sub>h</sub> e DTT % são:

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

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (16)$$

A tabela 5 demonstra os valores de referências das taxas de distorções harmônicas totais que são permitidos pelo PRODIST. Para cada nível de tensão de barramento as taxas de distorções variam.

Tabela 5 - Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT) [%]
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	3

Fonte: ANEEL (2016)

O PRODIST regulamenta as emissões de harmônicos pela taxa de distorção harmônica individual em função da tensão, conforme tabela 6. As taxas variam em função da ordem harmônica e da tensão de barramento.

Tabela 6 - Níveis de Referência para Distorções Harmônicas Individuais

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
	$V_n < 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$
2	2,5	2	1,5	1
3	6,5	5	4	2
4	1,5	1	1	0,5
5	7,5	6	4,5	2,5
6	1	0,5	0,5	0,5
7	6,6	6	4	2
8	1	0,5	0,5	0,5
9	2	1,5	1,5	1
10	1	0,5	0,5	0,5
11	4,5	3,5	3	1,5
12	1	0,5	0,5	0,5
13	4	3	2,5	1,5
14	1	0,5	0,5	0,5
15	1	0,5	0,5	0,5
16	1	0,5	0,5	0,5
17	2,5	2	1,5	1
18	1	0,5	0,5	0,5
19	2	1,5	1,5	1
20	1	0,5	0,5	0,5
21	1	0,5	0,5	0,5
22	1	0,5	0,5	0,5
23	2	1,5	1,5	1
24	1	0,5	0,5	0,5
25	2	1,5	1,5	1
> 25	1,5	1	1	0,5

Fonte: ANEEL (2016)

## 4.2 IEEEE

A IEEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) fornece conhecimento mais prático e teórico do assunto de qualidade de energia elétrica (QEE) e tornou-se referência mundial neste quesito.

Dentre as recomendações da IEEEE está a IEEEE 519 (*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*),

utilizado como guia para os projetos de sistemas elétricos que possuem cargas não lineares. Os limites estabelecidos são para operações em regime permanente e em situações de pior caso. Estes limites são apenas recomendações e não exigências.

As concessionárias de energia devem limitar a tensão harmônica fase-neutro no PAC – Ponto de Acoplamento Comum conforme tabela 7.

Tabela 7 - Limites de Distorção de Tensão – IEEE

Tensão PAC	Harmônica Individual [%]	Distorção harmônica total [%]
$\leq 1,0$ kV	5	8
$1,0$ kV $\leq U \leq 69$ kV	3	5
$69,001$ kV $\leq U \leq 161$ kV	1,5	2,5
$\geq 161$ kV	1	1,5

Fonte: IEEE Standard 519-1992

Os limites de correntes harmônicas também são recomendados conforme tabela 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Limites de Distorção de Corrente para Sistemas entre 120 V a 69 kV

<b>Máxima corrente de distorção harmônica em percentagem de IL</b>						
<b>Ordem harmônica individual (Harmônicas ímpares)</b>						
Isc/ IL	$< 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
$< 20^*$	4	2	1,5	0,6	0,3	5
$> 20$ e $< 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
$> 50$ e $< 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
$< 100$ e $< 1000$	12	5,5	5	2	1	15
$> 1000$	15	7	6	2,5	1,4	20

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites indicados acima às harmônicas ímpares

Distorções de corrente resultam em uma componente contínua

\* todo equipamento de geração de energia é limitado a estes valores de distorção de corrente, independentemente do valor real de Isc/IL

Fonte: IEEE Standard 519 -1992

Tabela 9 - Limites de Distorção de Corrente para Sistemas entre 69,001 kV a 161 kV

Máxima corrente de distorção harmônica em percentagem de IL						
Ordem harmônica individual (Harmônicas ímpares)						
Isc/ Il	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
< 20*	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
> 20 e < 50	3,5	1,78	1,25	0,5	0,25	4
> 50 e < 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
< 100 e < 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Fonte: IEEE Standard 519 -1992

Tabela 10 - Limites de Distorção de Corrente para sistemas > 161 kV

Máxima corrente de distorção harmônica em percentagem de IL						
Ordem harmônica individual (Harmônicas ímpares)						
Isc/ Il	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
< 25*	1	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
> 25 e < 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: IEEE Standard 519 -1992

### 4.3 IEC

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) publica documentos para uso internacional, no formato de normas, relatórios técnicos e manuais, trata-se de uma organização mundial de normatização, promovendo a cooperação internacional no quesito normas, recomendações e orientações no contexto elétrico e eletrônico.

No âmbito da qualidade de energia, esta organização disponibiliza diversos documentos tratando de definições dos fenômenos e seus indicadores, valores limites e procedimentos, métodos para medição e avaliação do desempenho. A IEC 61000 – *Electromagnetic Compatibility* (EMC) traz recomendações relacionadas aos indicadores de qualidade do produto, bem como orientações que podem auxiliar nas

avaliações dos fenômenos que alteram os padrões de fornecimento de energia elétrica nas redes de distribuição.

Quanto aos harmônicos, a IEC traz algumas recomendações de acordo com a configuração do sistema elétrico.

- IEC 61000-3-2 – *Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)*: aborda os limites de injeção de harmônicas nos sistemas de distribuição com corrente nominal de até 16 A por fase.

- IEC 61000-3-4 - *Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A*: direcionado aos equipamentos elétricos e eletrônicos com corrente nominal maior que 16 A por fase e alimentados por corrente alternada pelo sistema de distribuição com tensão nominal de até 240 V, monofásica, dois ou três fios; tensão nominal de até 600 V, trifásico, três ou quatro fios; frequência nominal de 50 ou 60 Hz. Retrata as informações referentes a avaliação das conexões de equipamentos a rede elétrica bem como os impactos sobre os indicadores de distorções harmônicas.

- IEC 61000-3-6 – *Assessment of emission for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*. O documento apresenta recomendações para avaliações de emissões de harmônicas dos consumidores conectados nos sistemas de média, alta e extra-alta tensão.

- IEC 61000-3-12 – *Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage system with input current  $> 16$  A and  $\leq 75$  A per phase*: Regulamenta os limites de injeção de correntes harmônicas no sistema de distribuição, no sentido de definir a emissão de harmônica de equipamentos eletrônicos e elétricos com corrente nominal superior a 16 A e inferior a 75 A por fase, conectados em redes com tensão nominal até 240 V, monofásica, 2 ou 3 fios; tensão nominal até 600 V, trifásico, 3 ou 4 fios e frequência de 50, 60 Hz.

- IEC 61000-3-14- *Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems*: Informações de base sobre requisitos para a conexão em sistemas de distribuição em baixa tensão de instalações perturbadoras, que caracterizam por: emissão de correntes harmônicas, interharmônicas, variações e desequilíbrio de tensão e flutuações.

- IEC 61000-4-7 – *General guide on harmonic and interharmonic measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment*

*connected thereto*: referência a instrumentação destinada para a medição de componentes espectrais de frequência abaixo de 9 kHz, sobrepostas à componente fundamental do sistema de fornecimento de energia em 50 e 50 Hz.

- IEC 61000-4-30 – *Power quality measurement methods*: A IEC 61000-4-30 define critérios e métodos para a medição dos indicadores de qualidade de energia elétrica nas redes a 50 e 60Hz, utilizando metodologias que garantem resultados repetíveis e confiáveis independentemente da implementação do método.

#### **4.4 Considerações das Normas**

Cada norma apresenta valores de referências diferentes, algumas mais conservadoras, outras menos. Portanto vale ressaltar que, quanto menor os valores destas distorções admitidos, o sistema irá operar com mais segurança e confiabilidade.

Os valores de referência descritos no PRODIST são resultados de compilações obtidas das análises dos termos, definições, critérios e valores de referência relatados na literatura técnica científica, baseando-se também em normas internacionais como a IEC 61000-4-30.

Em comparação com as normas europeias e americanas os valores da PRODIST são mais tolerantes. Portanto, o setor elétrico brasileiro está susceptível a um maior problema de qualidade de energia.

## 5 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Segundo Garcia (2016), a presença de harmônicas no sistema de potência tem sido vista como indesejável, pois acarreta gastos financeiros desnecessários para concessionárias e usuários, a partir de paradas no processo produtivo. De maneira geral, os harmônicos, são responsáveis por perdas ôhmicas, por solicitações anormais de isolamentos e pela má operação de equipamentos.

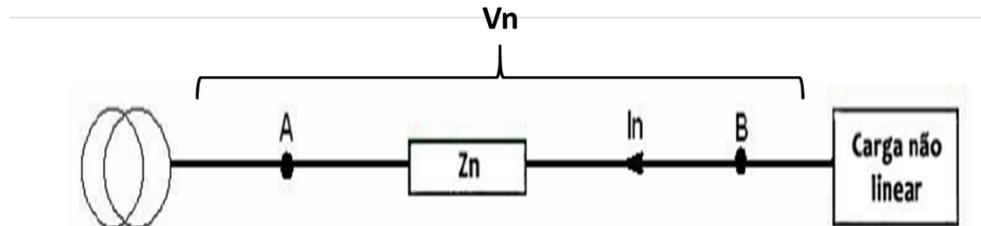
De acordo com Vasconcelos (2011), recursos utilizados no cotidiano das empresas, como máquinas rotativas, iluminação, fornos elétricos, grandes laminadores e etc., auxiliam no processo produtivo. No entanto, a automatização e a flexibilização deste processo, trazem alguns problemas adicionais que nem sempre são observados pelos empresários. Garcia (2016) afirma que estes problemas estão relacionados à qualidade de energia e muitos consumidores não sabem a que tipos de distúrbios estão sendo expostos e de que forma eles influenciam no desempenho do processo produtivo.

O uso da eletrônica de potência para soluções de aumento de eficiência e produtividade das empresas provocam distúrbio de QEE devido injeção de harmônicas na rede elétrica causada por cargas não lineares dos componentes eletrônicos. Segundo Ramalhetete et al. (2009), houve um crescimento considerável no uso de dispositivos não lineares que na sua forma estrutural utilizam semicondutores (tiristores, diodos, GTO's, IGBT's, etc.), para retificação, controle de velocidade, partidas de motores, etc. Existem ainda outras cargas que, mesmo não utilizando a eletrônica de potência, se comportam como cargas não lineares, como é o caso de fornos elétricos a arco.

Cargas não lineares, quando alimentadas, geram correntes harmônicas que circulam na rede ao passo que as tensões harmônicas aparecem devido à circulação destas correntes harmônicas pela impedância do circuito de alimentação, ou seja, provocam alterações nas senóides de tensão levando a outros distúrbios, conforme pode-se ver na figura 7. Essa figura representa a conexão de cargas não lineares com o sistema de geração interligados por um barramento nos pontos A e B. A impedância total do sistema está representada por  $Z_n$ ,  $I_n$  é a corrente harmônica

que circula entre a geração e a carga e  $V_n$  é a tensão harmônica gerada a partir da circulação da corrente  $I_n$  no sistema.

Figura 7 - Esquema Unifilar Representando a Impedância do Circuito de Alimentação



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2003

Observa-se também que, a impedância do sistema irá variar em função da frequência da corrente nele aplicada e para cada corrente harmônica ( $I_n$ ) de ordem  $n$  corresponde a uma impedância de circuito de alimentação  $Z_n$ . A circulação da corrente harmônica de ordem  $n$  em  $Z_n$  provoca uma tensão harmônica  $V_n$ , ou seja, os equipamentos interligados a este sistema elétrico receberão uma tensão com a forma de onda distorcida. Para Schneider Electric e PROCOBRE (2003), seria como se as cargas não lineares rejeitassem uma corrente harmônica na rede em direção da fonte de alimentação.

## 5.1 Caracterização das Cargas

Em relação às distorções, podemos caracterizar as cargas de um sistema elétrico em três classes, sendo elas a carga elétrica linear, carga elétrica não linear e cargas elétricas sensíveis.

### 5.1.1 Cargas Elétricas Lineares

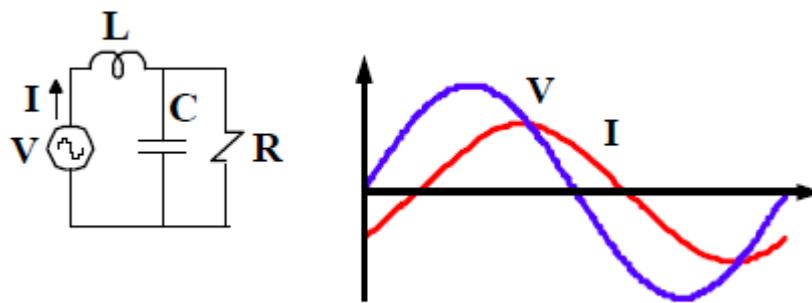
É classificado como carga elétrica linear aquela que tem um comportamento linear no que se refere à corrente que circula em relação à tensão aplicada. Pelo princípio da linearidade podemos dizer que este descreve a relação linear entre causa e efeito, ou seja, se uma fonte que alimenta o circuito for multiplicada por uma

constante, as respostas deste circuito serão multiplicadas também pela mesma constante. Na teoria de sistemas, este comportamento linear do circuito pode ser avaliado segundo a verificação dos princípios da aditividade e homogeneidade.

Cargas lineares são constituídas e/ou podem ser modeladas por elementos passivos como: capacitores, indutores, resistores ou por associação destes.

Segundo Figueiredo (2006), estes elementos não contribuem diretamente na distorção da forma de onda da tensão, sendo assim, a forma de onda da corrente ( $I$ ) será um espelho da forma de onda da tensão ( $V$ ), conforme figura 8, apresentando as mesmas distorções harmônicas encontradas na tensão, podendo ocorrer uma defasagem angular quando da presença de elementos indutivos e/ou capacitivos.

Figura 8 - Forma de Onda da Tensão x Corrente para Cargas Elétricas Lineares



Fonte: Figueiredo (2006)

### 5.1.2 Cargas Elétricas Não Lineares

As cargas elétricas não lineares, ao contrário das cargas lineares, não apresentam o mesmo comportamento da corrente em relação à tensão, e esta relação não é constante, portanto, torna-se impossível fazer uma previsão imediata sobre a relação das grandezas de corrente e tensão como é feito para as cargas lineares.

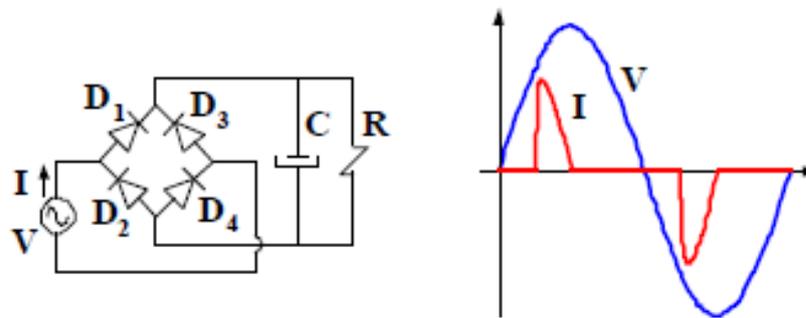
Segundo Tavares (2010), a relação entre corrente e tensão não pode ser descrita por uma equação linear, e, portanto, a carga absorve uma corrente harmônica mesmo quando a tensão que alimenta esta carga seja puramente senoidal.

Os semicondutores, como diodos, transistores e outros, atuam no circuito elétrico realizando um chaveamento na corrente de acordo com a tensão aplicada

em seus terminais, desta forma, verifica-se a descontinuidade da forma de onda da corrente e sua elevada distorção em relação à tensão senoidal da alimentação conforme demonstra a figura 9.

Figueiredo (2006), descreve que a distorção harmônica encontrada na tensão de alimentação pode influenciar nas formas de onda da corrente e nas harmônicas produzidas por cargas elétricas não lineares e que esses efeitos dependem da natureza do funcionamento destas cargas, bem como dos componentes utilizados no circuito de comando.

Figura 9 - Forma de Onda da Tensão x Corrente para Cargas Elétricas Não Lineares



Fonte: Figueiredo (2006)

Entre as cargas não lineares de grande porte, podemos citar alguns equipamentos de partida e controle que são normalmente utilizados nas indústrias, sendo os inversores de frequência, conversor CA/CC, *soft-start* e retificadores utilizados para controle de partida e de velocidades nos motores de indução, sistemas de transmissão de corrente contínua e nos processos eletroquímicos.

Destacam-se também as cargas concentradas: fornos a arco, máquinas de solda, reatores controlados a tiristores (RCTs), capacitores chaveados a tiristores (CCTs) etc. que produzem harmônicos na rede e necessitam de meios para sua mitigação/atenuação.

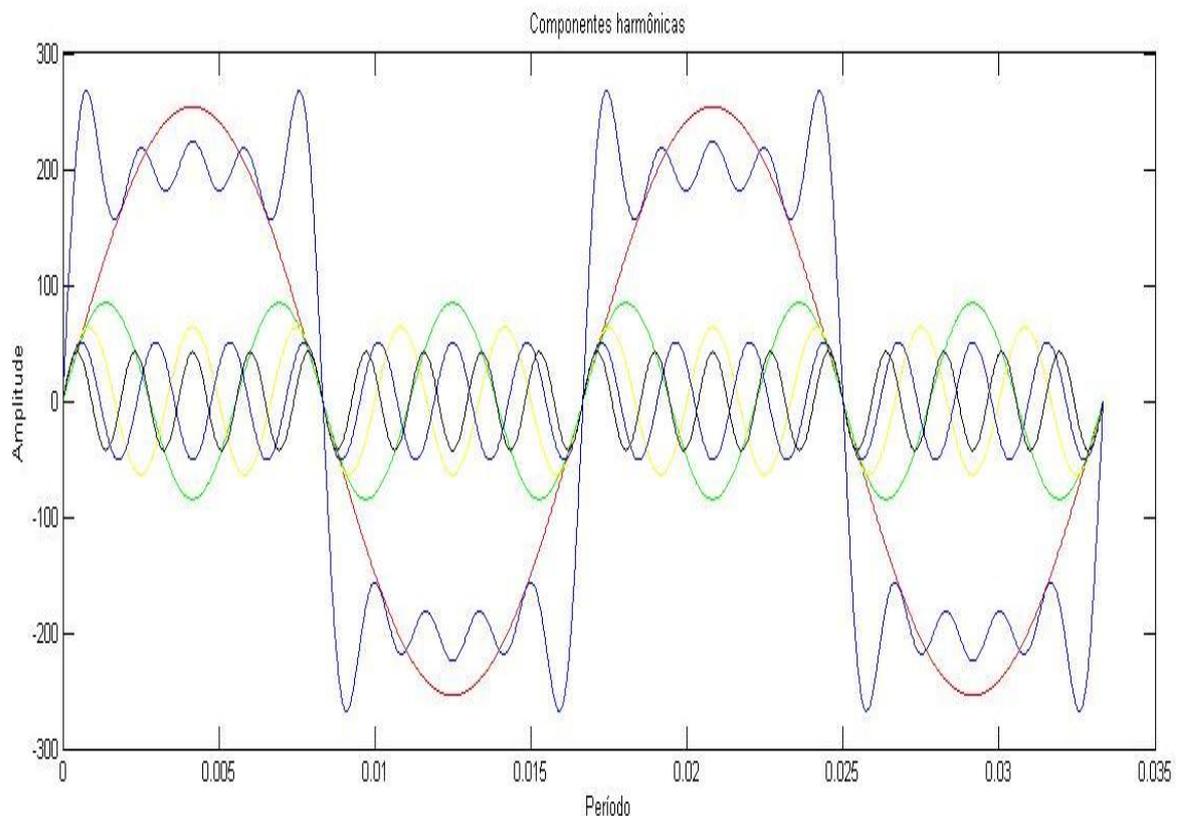
Segundo Garcia (2016), através de estudos das ondas não senoidais periódicas podemos analisar matematicamente as distorções nas formas de onda da tensão e corrente. Desta forma, um sinal distorcido pode ser decomposto em vários sinais de diferentes amplitudes e frequências.

Neste sentido, para quantificar as componentes harmônicas nos sinais distorcidos são utilizadas diversas formas matemáticas para este fim, dentre elas

estão a Transformada de Wavelett e a Transformada Rápida de Fourier (*FFT*). Neste estudo utiliza-se apenas a Transformada Rápida de Fourier que é atualmente a mais utilizada e empregada nos analisadores e medidores de energia disponíveis no mercado.

Para um melhor entendimento de como as componentes harmônicas se somam à fundamental observe a figura 10, em que pode-se visualizar que, somando-se vários sinais senoidais, pode-se obter uma representação do sinal original que, no caso, é uma onda de pulsos retangulares. A frequência fundamental está representada pela senoide cor de rosa. Esta é a forma de onda ideal para o sinal elétrico do sistema, portanto, devido à presença de cargas não lineares conectadas a rede elétrica surgem outras frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental.

Figura 10 - Componentes Harmônicas



Fonte: O AUTOR

As características das cargas influenciam na ordem de cada harmônica, ou seja, a rede elétrica pode apresentar harmônicas de 3<sup>o</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e *n*-ésima ordem de harmônicas em virtude do comportamento das cargas conectadas ao barramento. A frequência fundamental irá se somar às frequências múltiplas e então o sinal da rede elétrica será um sinal distorcido conforme apresenta a senóide cor verde claro de maior amplitude na figura 10. É este sinal distorcido que irá influenciar na QEE.

A *FFT* permite decompor o sinal distorcido e encontrar todas as componentes harmônicas somadas a ele e, desta forma, obtém-se o conteúdo espectral de um sinal periódico com período *T*. A decomposição deste sinal em funções seno e cosseno resultam na determinação das amplitudes e as fases relativas das componentes harmônicas, que são as componentes múltiplas inteiras da fundamental, definida por  $f_1 = 1/T$ . Os termos e coeficientes dos somatórios das funções seno e cosseno é dado pela equação 17.

$$f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \text{sen}(n\omega_1 t) \quad (17)$$

$$\text{Sendo, } \omega_1 = \frac{2\pi}{T}$$

Em que:

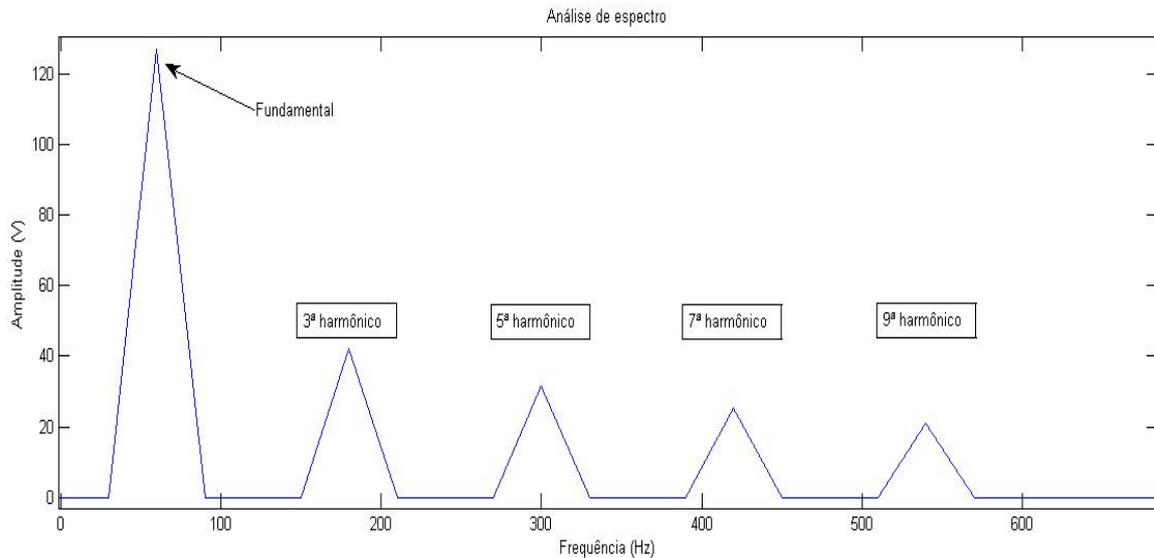
$A_0$  = termo constante que representa uma componente contínua “CC” quando existente.

$A_n$  e  $B_n$  = são os coeficientes e representam as amplitudes de cada frequência harmônica.

Nos dois termos com somatórios temos a definição das componentes harmônicas do sinal original. Diz-se que para  $n=1$  temos a frequência fundamental, e pra  $n \neq 1$  temos cada uma das infinitas harmônicas (expressas por seno e/ou cosseno) necessárias à composição do sinal original  $f(x)$ .

A figura 11 exemplifica a decomposição do sinal periódico mostrado na figura 10. Observe que a *FFT* decompôs o sinal distorcido e apresentou todas as componentes harmônicas bem como a suas respectivas amplitudes.

Figura 11 - Espectro Harmônico



Fonte: O AUTOR

As equações que demonstram como sinais de tensão e corrente distorcidos podem ser expressos, visando análises de harmônicas no sistema elétrico, são:

$$V(\omega t) = V_0 + V_{max} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_{2max} \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_{hmax} \cdot \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (18)$$

$$I(\omega t) = I_0 + I_{max} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + I_{2max} \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_{hmax} \cdot \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (19)$$

Nestas equações:

$V_0$  indica a componente contínua de tensão

$I_0$  expressa a componente contínua de corrente

$V_{max}$  e  $I_{max}$  são, respectivamente, as amplitudes máximas de tensão e corrente

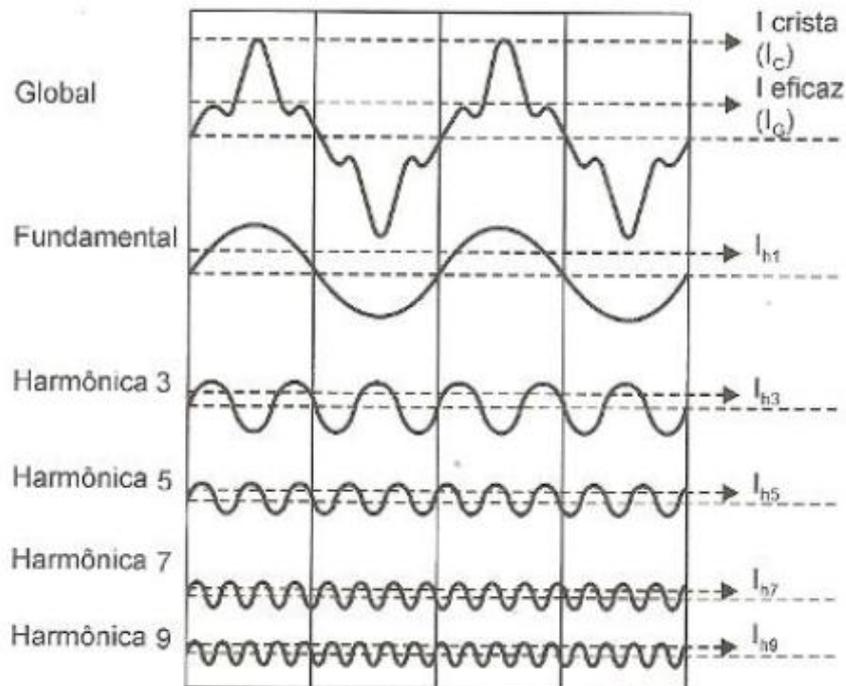
$\omega$  é a frequência angular

$h$  é um número inteiro.

Para análise da qualidade da energia, a transformada de Fourier tem se mostrado como uma importante ferramenta para detectar as variações que ocorrem nas ondas de tensão e corrente, e após análises e comparações com sinais padrões, nos permite determinar a gravidade ou não destas distorções ocorridas no sistema (FIGUEIREDO, 2004).

A figura 12 apresenta a decomposição da forma de onda da corrente, com base na componente fundamental e suas múltiplas, que neste caso são 3ª, 5ª, 7ª e 9ª harmônicas.

Figura 12 - Decomposição da Forma de Onda de Correntes Harmônicas



Fonte: Martinho (2009)

Analisando a figura 12 podemos dizer que o sinal global é a soma, ponto a ponto, da componente Fundamental e, dos sinais harmônicos formados por senóides perfeitas de ordem 3ª, 5ª, 7ª e 9ª, alterando apenas a frequência e amplitude do sinal.

Podemos também classificar os sinais das harmônicas quanto a sua sequência, podendo ser positiva, negativa ou zero. Na tabela 11 apresenta-se a ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Tabela 11 - Ordem, Frequência e Sequência das Harmônicas

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	N*60	-

Fonte: PROCOBRE, 2001

As harmônicas de sequência positiva possuem a mesma sequência de fase dos fasores que compõem uma corrente normal da frequência fundamental e são defasados de 120°, sendo iguais em magnitude. As harmônicas de sequência negativa diferem da positiva apenas por apresentarem sequência de fase oposta a fundamental.

Segundo Silva (2007), as harmônicas de sequência zero, como a positiva e a negativa, também se constituem de três fasores iguais em magnitude, mas com deslocamento de fases zero, sendo concorrentes em direção.

Entretanto, as harmônicas principais por provocarem aquecimentos indesejáveis nos condutores elétricos são as de sequência positiva e negativa. As harmônicas de sequência zero se somam no condutor neutro fazendo com que circule uma corrente harmônica cuja amplitude é três vezes maior do que a corrente harmônica nos demais condutores (PROCOBRE, 2001).

### 5.1.3 Cargas Elétricas Sensíveis

Cargas elétricas sensíveis estão cada vez mais presentes nos comércios, residências e indústrias. Estas cargas, por sua vez, sofrem danos não apenas por tensões de regime fora da faixa especificado, mas também por variações de tensão de curta duração. CLP (Controladores Lógico Programáveis), equipamentos eletrônicos micro processados, dentre outros, são exemplos de cargas sensíveis.

Portanto, a QEE é um fator essencial para o bom funcionamento destes equipamentos. O problema é que os consumidores não imaginam a que tipo de distúrbios estão sujeitos, se são por problemas como afundamentos de tensão, harmônicos, desequilíbrio de tensão ou outro distúrbio.

## 5.2 Taxa de Distorção Harmônica Individual

A Taxa de distorção harmônica individual (DHI%) determina o percentual da componente harmônica presente na rede elétrica em relação a componente fundamental e pode ser calculado por:

$$DHI\% = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (20)$$

Em que,  $I_h$  é o valor *RMS* da componente harmônica de corrente a ser calculada e  $I_1$  o valor eficaz da componente fundamental da corrente (FUCHS, 2008).

A taxa de distorção harmônica individual pode ser expressa tanto para a tensão  $DHI_V$  quanto para a corrente  $DHI_i$ . O percentual do seu valor é calculado através da relação entre a componente harmônica e a componente fundamental (PROCOBRE, 2003).

A taxa de distorção harmônica individual é calculada a partir da relação entre a tensão harmônica ( $V_h$ ) de ordem  $n$  e a tensão fundamental ( $V_1$ ). O valor de referência da tensão fundamental para a determinação da DHI pode ser considerado sob três aspectos distintos. O primeiro utiliza-se o valor medido em tempo de operação, o segundo consiste em utilizar a tensão nominal do barramento definido e o terceiro utiliza-se um valor de tensão arbitrário definido pelo usuário. A equação para o cálculo da  $DHI_V$  pode ser expressa como:

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (21)$$

Em que:

$V_1$  é a tensão eficaz da fundamental;

$V_h$  é a tensão eficaz de ordem  $h$ ;

De forma análoga, os mesmos conceitos podem ser aplicados para as correntes. Segundo (GARCIA, 2016), quanto ao valor a ser definido como corrente fundamental, este deverá ser igual ao nominal para o ponto de medição ou, alternativamente, adotado como a corrente de carga para a demanda máxima. Estas

opções visam contornar os problemas oriundos quando baixos carregamentos são impostos aos pontos de medição. A equação para o cálculo da  $DHI_l$  pode ser expresso como:

$$DHI_l = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (22)$$

Em que:

$I_1$  é a corrente eficaz da fundamental;

$I_h$  é a corrente eficaz de ordem  $h$ ;

Mediante os dados de  $DHI_v$  e  $DHI_l$  pode-se elaborar o espectro harmônico do sinal distorcido, que permite uma visão geral de qual componente harmônica está sendo mais impactante na distorção total do sinal.

### 5.3 Taxa de Distorção Harmônica Total

O somatório de todas as componentes harmônicas nos sinais de corrente e tensão e a ação conjunta destas, podem ser representadas pela taxa de distorção harmônica total. Desta forma, a DHT é expressa por uma composição quadrática das distorções individuais, fato este que resulta numa distorção eficaz resultante.

Segundo Pires (2010), a DHT é, possivelmente, o principal indicador utilizado para quantificar a distorção harmônica de determinado ponto. Usa-se o DHT para contabilizar a quantidade de harmônicos presentes em uma onda, ou, em outras palavras, quão distorcida uma onda está em relação a uma onda puramente senoidal.

De uma forma genérica o DHT para um sinal  $y$ , pode ser expresso pela equação:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y h^2}}{y_1} \quad (23)$$

Em que:

$y_1$  é o valor do sinal fundamental;

$y_h$  é o valor da componente harmônica de ordem  $n$ ;  
 $h$  é a ordem da harmônica;

A equação 23 é definida na norma *IEC 61000-2-2* e a ordem da harmônica pode ser limitada em  $h$  a 50. Utiliza-se o índice de DHT para a obtenção da distorção harmônica total de corrente ( $DHT_I$ ) e de tensão ( $DHT_V$ ) e calcula-se com os valores de corrente e tensão fundamental no horário da medição.

As equações que definem a  $DHT_V$  e a  $DHT_I$  são dadas como sendo:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \quad (24)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} I_h^2}}{I_1} \quad (25)$$

Em que:

$V_h$  é a tensão harmônica individual de ordem  $h$ , expressa em Volt ou pu;

$I_h$  é a corrente harmônica individual de ordem  $h$ , expressa em Ampere ou pu;

$h$  é a ordem harmônica considerada;

$h_{m\acute{a}x}$  é a máxima ordem harmônica considerada;

$V_1$  é a tensão fundamental, expressa em Volt ou pu;

$I_1$  é a corrente fundamental, expressa em Ampere ou pu;

Os índices de distorção harmônica total de tensão e corrente são os indicadores mais usados pelas normas internacionais e nacionais para avaliar o nível de distorção de um determinado sinal.

#### 5.4 Taxa de Distorção da Demanda

A norma IEEE 519 utiliza o índice de taxa de distorção da demanda (DTD) para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de

corrente da carga. O DTD é calculado em relação à corrente máxima da carga, esta é a principal diferença entre o DTD e o DHT (NUNES, 2007). A equação 26 determina o DTD:

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} I_h^2}}{I_L} \quad (26)$$

Em que:

$I_L$  é a corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema.

$I_h$  é valor rms da componente de corrente harmônica h.

## 6 ACIONAMENTOS

Os motores elétricos estão presentes nos mais diversos setores de produção e realizam operações variadas de acordo com a aplicação necessária. Com o avanço da tecnologia e a necessidade de mais controle operacional surgiram, então, os acionamentos eletrônicos. Estes acionamentos permitem controlar velocidade, corrente de partida e conjugado na carga em circunstâncias desejáveis operacionalmente.

Segundo Rashid (1999), o controle dos acionamentos das máquinas de corrente alternada requer, geralmente, algoritmos complexos que podem ser implementados através de microprocessadores ou microcomputadores, juntamente com conversores de potência de chaveamento rápido. Contudo, o uso da eletrônica nestes dispositivos acarreta problemas relacionados à qualidade de energia elétrica devido incidência de harmônicos provocados pelos seus componentes não lineares.

Além disso, existem outros tipos de acionamentos que, conectados à rede, mesmo que não estejam acionando motores elétricos, contribuem para a alteração na QEE, e dessa forma, os motores elétricos conectados ao mesmo barramento serão impactados por estes distúrbios.

Nesta seção serão abordados os tipos de acionamentos eletrônicos principais de motores de indução e uma abordagem teórica de fornos a arco e transformadores, que são agentes influenciadores na QEE.

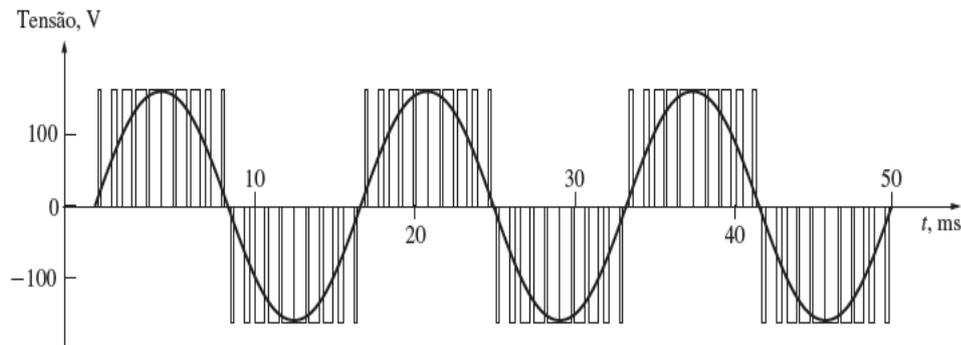
### 6.1 Conversores CC/CA

Os conversores CC/CA têm a função de converter uma tensão contínua CC em uma tensão alternada CA simétrica com amplitude e frequência desejadas. A tensão CA e a frequência de saída podem ser fixas ou variáveis. Aplica-se na saída dos conversores, quando a tensão CC é fixa, o controle *PWM (Pulse Width Modulation)* que é um controle através de modulação por largura de pulso. Este controle permite uma variação da tensão e frequência de saída variando o ganho do inversor, que é definido como a relação entre a tensão de saída CA e a tensão de entrada CC.

Segundo Chapman (2013), tanto a frequência e a tensão de saída podem ser variadas independentemente através do controle PWM.

A figura 13 exemplifica a forma de onda de saída de um conversor utilizando um controle PWM. Conforme descrito por (RASHID, 1999), as formas de onda na saída dos conversores ideais deveriam ser puramente senoidais, porém não o são. Estas são não-senoidais e apresentam componentes harmônicos.

Figura 13 - Controle de Frequência Variável com Forma de Onda PWM Típica

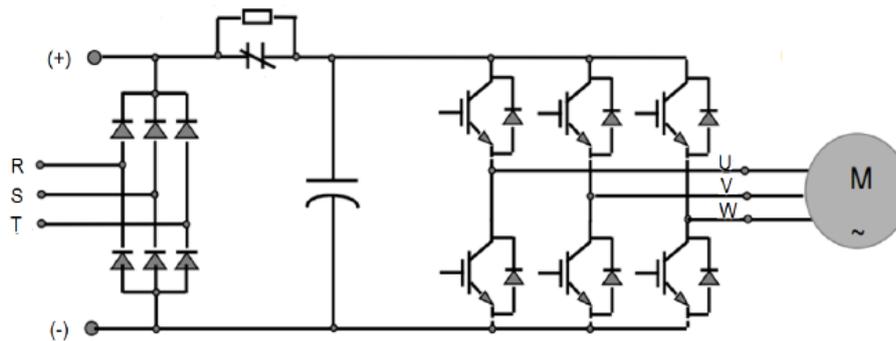


Fonte: CHAPMAN (2013)

Observa-se que o nível da tensão eficaz é controlado pelo tempo, ou fração do tempo, a qual a tensão está ligada, ao passo que a frequência é controlada pela polarização dos pulsos, através da taxa de chaveamento entre pulsos negativos e pulsos positivos. Nota-se ainda que a tensão de saída é quadrada, pois a modulação PWM consiste no chaveamento de transistores, controlando o tempo de estado ligado e desligado. Este chaveamento geralmente é realizado por GTOs (*Gate Turn-off Thyristor*), MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBT (*Insulated Bipolar Transistor*).

Nos motores de indução o controle de velocidade, utilizando inversores de frequência, é baseado na alteração da frequência estatórica. Desta forma, pode-se alterar a velocidade síncrona conforme mostrado na equação 1. Para obtenção de tensão e frequência variável é necessário que o inversor passe por três etapas que são conhecidas como: Retificação, Link DC e Transistores conforme pode-se ver na figura 14.

Figura 14 - Diagrama de Bloco de Inversor de Frequência



Fonte: RASHID (1999)

A retificação é o primeiro processo nos inversores, pois recebem a energia alternada da rede de alimentação e através de diodos fazem a retificação para tensão contínua. O Link DC é o barramento de corrente contínua que armazena a energia retificada pelos diodos nos bancos de capacitores. Os transistores são elementos que fazem a inversão novamente da tensão proveniente do link DC, porém com frequência e tensão variáveis de acordo com o ajuste dos parâmetros necessários do usuário.

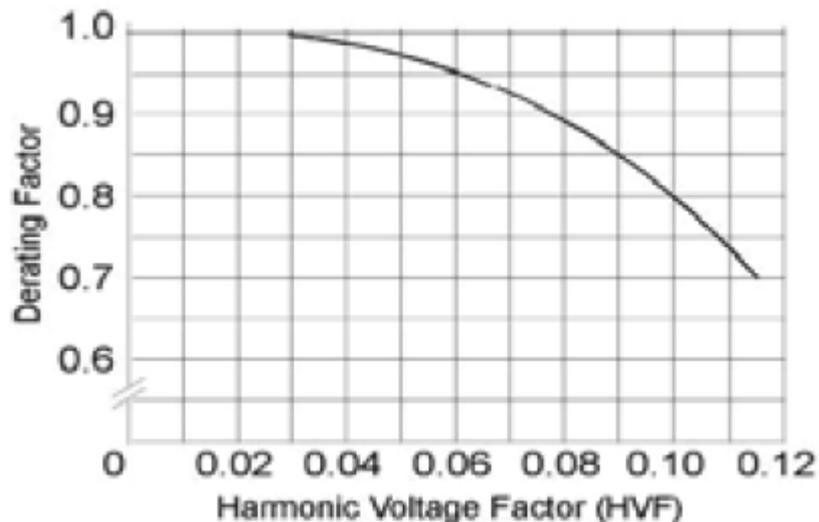
Estes recursos do inversor permitem controlar o motor elétrico de modo a atender às necessidades do processo produtivo. Portanto, a sua utilização promove alterações na qualidade de energia fornecida aos motores e à rede elétrica. Ambos serão afetados por componentes harmônicos que surgem a partir da retificação da tensão alternada e através do chaveamento na saída do inversor. As componentes harmônicas geradas na retificação poluem a rede de alimentação enquanto que as harmônicas geradas na modulação afetam o motor elétrico acionado pelo inversor.

As harmônicas produzidas pelo inversor no lado CA é expressa como  $h = np \pm 1$ , em que  $p$  é o número de pulsos do inversor e  $n = 1, 2, 3..$  Portanto, para um inversor de 6 pulsos serão produzidas as harmônicas de 5ª e 7ª ordem.

Na saída do inversor, as componentes harmônicas geradas no processo de chaveamento dos transistores interferem no desempenho do motor, pois este não receberá uma tensão perfeitamente senoidal. A isolação das espiras do motor será afetada devido à presença de harmônicos e, para se evitar a queima do motor, é necessário especificar motores muito mais robustos (FRANCHI, 2008).

Outro fator importante é a elevação da temperatura do motor provocado pelas tensões harmônicas provenientes da modulação PWM. Neste caso, para manter a elevação da temperatura do motor dentro de sua classe de isolamento, é necessário reduzir o torque (MAMEDE, 2005). A figura 15 abaixo demonstra o fator de redução de conjugado em função da distorção harmônica.

Figura 15 - Fator de Redução de Conjugado x Distorção Harmônica



Fonte: MAMED (2005)

Segundo (FRANCHI, 2008), o cálculo para o rendimento do motor acionado por conversores de frequência é definido por:

$$\eta_r = \frac{F_{rth}^2}{\frac{1}{\eta} + F_{rth}^2 - 1} \quad (27)$$

Nesta equação:

$\eta_r$  : rendimento do motor trabalhando com o inversor de frequência

$\eta$  : rendimento do motor alimentado por uma onda senoidal

$F_{rth}$ : Fator de redução de conjugado por distorção harmônica.

Pode-se observar, através da equação, que quanto mais próximo do valor unitário do fator de redução, o motor terá maior rendimento, ou seja, à medida que se reduz as tensões harmônicas no motor, este tende a ter o mesmo rendimento que teria ao ser alimentado por uma tensão puramente senoidal.

Segundo Pires (2008), as harmônicas de alta frequência na entrada dos motores de indução ocorrem tanto em função da alimentação dos motores por meio de conversores estáticos para aplicações que necessitam controle de velocidade, quanto em função da presença de outros equipamentos eletrônicos conectadas à mesma linha de potência CA, os quais poluem as redes elétricas com harmônicas de tensão e correntes.

Ainda segundo Pires (2008), para a avaliação das perdas decorrentes de harmônicas provenientes da modulação PWM, basta que sejam levadas em conta as perdas harmônicas em frequências próximas à frequência de comutação. Frequências de comutação de até 20 kHz que são consideradas típicas de aplicações industriais com motores de indução alimentados por conversores baseados em tiristores *IGBTs*. Devem ser consideradas, portanto, as perdas nos condutores e as perdas no núcleo magnético. Frequências de comutação elevadas promovem redução de correntes harmônicas levando a redução de perdas nos condutores que estão associadas a elas além da tendência da diminuição do ruído dos motores. Porém, as harmônicas de fluxo de ordem superior levam o aumento das perdas no núcleo.

Em decorrência destas combinações de perdas em cada modo de operação dos conversores é importante ressaltar que, a frequência ótima de comutação depende de cada aplicação particular e está ligada não apenas as perdas no conversor, mas no desempenho geral do motor de indução.

## **6.2 Soft-starters**

As *soft-starters* tem a função de auxiliar na partida dos motores elétricos, assegurando a aceleração e desaceleração progressivas e permite adaptação da velocidade às condições de operação. A tensão de alimentação no motor é feita gradativamente durante sua partida, reduzindo a corrente de pico e promovendo uma partida suave sem golpes (FRANCHI, 2008).

*Soft-starters* são chaves de partida estática microprocessadas, projetadas para a proteção do motor elétrico de indução trifásicos. São compostas por tiristores, pela qual é ajustado o seu ângulo de disparo controlando a tensão aplicada ao

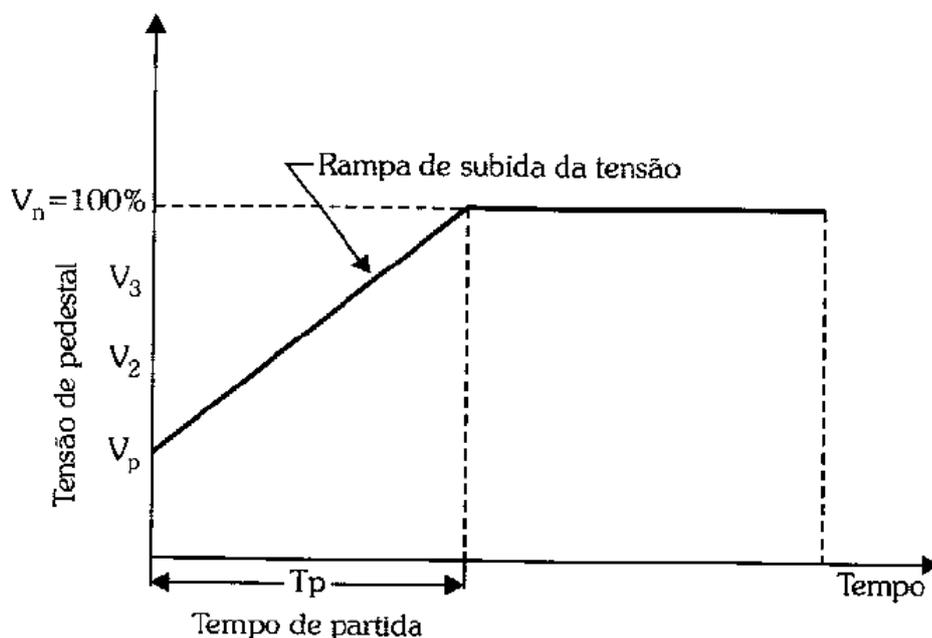
estator do motor. Com o ajuste correto do disparo, o conjugado e a corrente são entregues à carga de acordo com a sua necessidade.

Algumas vantagens do uso das *soft-starter* são descritas como sendo:

- Redução na tensão de partida (ajustada por um tempo pré-definido);
- Proteção térmica do motor e do controlador;
- Proteção mecânica do equipamento movimentado devido diminuição dos golpes e redução de corrente de partida;
- Proteção contra falta de fase, subcorrente, sobre-corrente, etc.

A figura 16 demonstra a rampa da tensão de aceleração de uma *soft-starter*. Observa-se que há uma tensão de partida inicial  $V_P$  que é responsável pelo conjugado inicial que aciona a carga. A partir dessa tensão a rampa segue um tempo de partida  $T_P$  até atingir o valor da tensão nominal.

Figura 16 - Rampa de Aceleração da Tensão

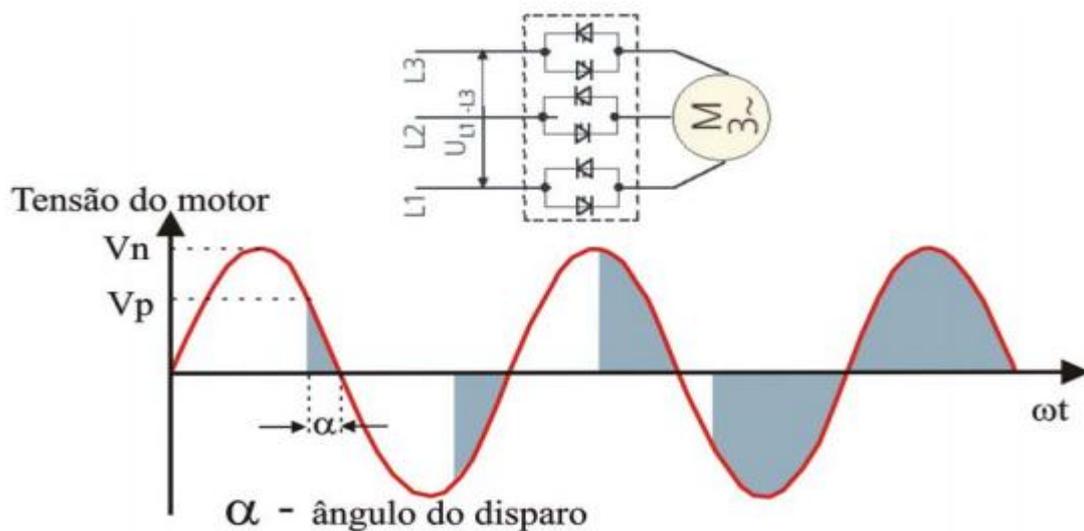


Fonte: FRANCHI, 2008

Desta forma, a forma de onda da tensão no motor elétrico é aumentada gradativamente conforme mostra a figura 17. A parte sombreada da figura 17 representa a parte da tensão que está sendo enviada ao motor. No primeiro semi-ciclo ocorre o disparo no ângulo  $\alpha$ , e nos próximos semi-ciclos este ângulo vai sendo

ajustado para entregar a tensão nominal ao fim da rampa de partida. Em regime permanente o motor estará sendo alimentado por uma senoíde completa.

Figura 17 - Forma de Onda na Saída da *Soft-starter*



Fonte: ACCO, et. al., 2005

Apesar das grandes vantagens da utilização destes dispositivos de partida suave, a não linearidade dos tiristores contribui para a alteração na qualidade de energia, causando distorções na tensão da rede elétrica. Estas alterações podem provocar avaria e mau funcionamento de outras cargas conectadas ao mesmo barramento. O ângulo de disparo dos tiristores interfere na taxa de distorção harmônica. À medida que o ângulo de disparo é aumentado, diminuem-se as distorções harmônicas na rede (FREITAS, 2011).

As distorções harmônicas irão acontecer na aceleração e desaceleração do motor, pois neste meio intervalo, geralmente, as soft-starters não atuam mais no circuito, pois são utilizados contadores para o by-pass dos tiristores. Desta forma, a tensão em regime permanente será a mesma tensão da rede elétrica.

### 6.3 Fornos a Arco

Ultimamente, os fornos a arco vêm ganhando espaço dentro nas indústrias devido as suas vantagens em relação aos fornos não elétricos ou à combustão.

Estes fornos apresentam maior rendimento e não poluem tanto o meio ambiente com a queima de combustíveis fósseis (GARCIA, 2016).

O uso dos fornos a arco é aplicado no processo de fabricação do aço e também na fabricação de ligas de ferro e outros metais. Aplica-se, também, para a fusão de metais não ferrosos e de pequenas quantidades de aço ou gusa.

Segundo Simonetti (2010), durante o processo de fusão da sucata metálica em aço sob a forma líquida exige uma grande solicitação de energia elétrica devido a formação de elevadas correntes elétricas, acima de 30kA, que surgem a partir da formação do arco elétrico derivado da ocorrência de curto-circuito entre os eletrodos do forno elétrico a arco que passa pelo material metálico, a uma tensão de até 1200V.

A operação dos fornos a arco implica na alteração da QEE, pois a formação do arco elétrico é o principal fator para a geração de harmônicos na rede elétrica, devido a não linearidade entre a tensão de arco e a corrente. Essa relação não linear varia em função do comprimento do arco e das características do meio condutor do plasma como pressão, seção transversal, temperatura, tipo de gás, etc.

Segundo Pomilio et al. (2017), o comprimento do arco é uma variável de controle realizada através da elevação dos eletrodos sobre o material a ser fundido. No ponto mais crítico, que é a ignição para iniciar a fusão, os eletrodos são abaixados até se curto-circuitarem através da sucata. A fusão começa com o início da condução e os eletrodos são posicionados de forma a manter constante a relação corrente/tensão de arco, ou seja, a resistência do arco. Devido à lentidão do controle em relação à dinâmica do próprio arco, a corrente tende a variar bastante em cada fase, é nesse momento que surgem as alterações na QEE, pois estas variações provocam flutuação de tensão, modificam o nível de harmônicas e desequilíbrios momentâneos.

## **6.4 Transformadores**

Os transformadores podem ser descritos como máquinas estáticas que tem como função a conversão de valores de tensão ou isolamento. Fundamentalmente constitui-se de dois ou mais enrolamentos acoplados através de um fluxo magnético, onde são realizadas trocas de energia entre dois ou mais sistemas elétricos. Quando uma tensão alternada é conectada ao enrolamento primário do transformador surgirá

um fluxo magnético proporcional à tensão, frequência e número de espiras do primário. O fluxo gerado estabelece um enlace com o secundário, induzindo nele uma tensão cujo valor dependerá do número de espiras do enrolamento secundário (FITZGERALD, 2006).

Segundo Chapman (2013), a corrente responsável pelo fluxo magnético gerado no primário consiste em duas componentes que são: corrente de magnetização  $i_M$  e corrente de perdas no núcleo  $i_h$ , em que  $i_M$  é necessária para produção do fluxo no núcleo do transformador e  $i_h$  é responsável pelas perdas por histerese e por corrente parasita no núcleo.

A figura 18 mostra a curva de magnetização do núcleo de um transformador. Como os valores da corrente que é necessária para produzir um dado fluxo são comparados com o fluxo no núcleo é possível construir um gráfico da corrente de magnetização, conforme figura 19, que circula no enrolamento do núcleo. Podemos obter o valor do fluxo através da equação:

$$\phi_p = \frac{V_M}{\omega N_p} \text{sen } \omega t \text{ (Wb)} \quad (28)$$

Em que:

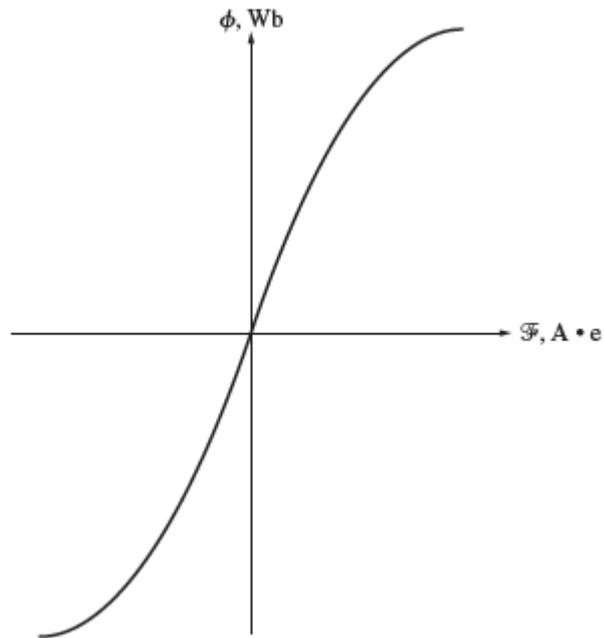
$\phi_p$  é o fluxo magnético no núcleo;

$V_M \text{sen } \omega t$  é a tensão primária aplicada na entrada do transformador;

$N_p$  é o número de espiras do enrolamento do primário do transformador;

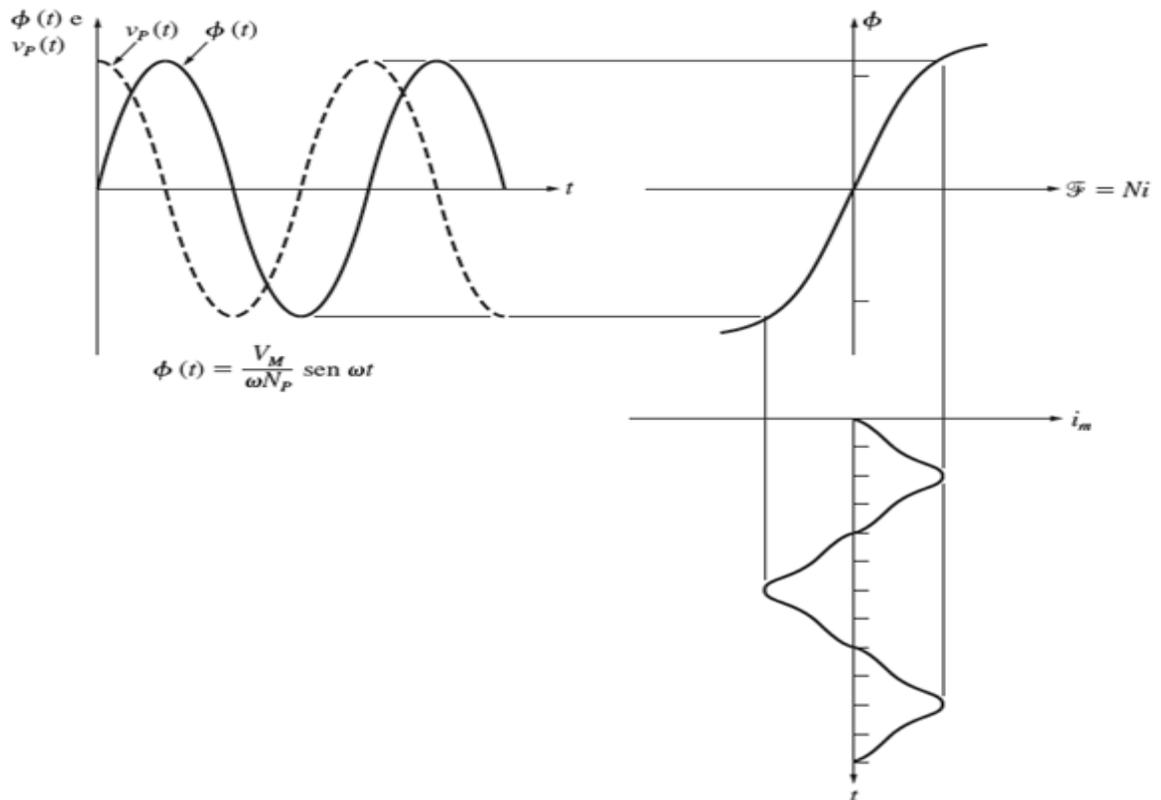
Pode-se observar, através da figura 19, que a corrente de magnetização  $i_M$  do transformador não é senoidal. As componentes de frequência mais elevadas da  $i_M$  são devido à saturação magnética do núcleo do transformador. Quando o fluxo atinge o ponto de saturação do núcleo, um pequeno incremento no fluxo de pico demandará um aumento muito grande na corrente de magnetização de pico. As componentes de frequência mais elevadas da corrente de magnetização podem ser bem elevadas quando comparadas com a componente fundamental. Geralmente, quanto mais o transformador opere saturado maiores serão as componentes harmônicas (CHAPMAN, 2013).

Figura 18 - Curva de Magnetização do Núcleo do Transformador



Fonte: Chapman (2013)

Figura 19 - Corrente de Magnetização Causada pelo Fluxo no Núcleo



Fonte: Chapman (2013)

## 7 INFLUÊNCIAS DAS DISTORÇÕES NOS EQUIPAMENTOS

### 7.1 Condutores

As componentes harmônicas de correntes provocam maior aquecimento nos condutores quando comparado com o aquecimento causado apenas pela frequência fundamental da corrente. Existem duas formas de analisar este aquecimento.

A primeira forma é devido ao efeito pelicular que é a redução da área de passagem de corrente elétrica por elevação da frequência da rede, ou seja, a corrente irá circular na parte mais externa do condutor. Há a possibilidade da ocorrência do efeito de proximidade que é a influência dos campos eletromagnéticos dos condutores adjacentes distorcendo a distribuição de corrente no condutor.

A segunda forma é a elevação da corrente de neutro em sistemas trifásicos a quatro fios alimentando cargas não lineares. Aparelhos eletrônicos geram níveis de harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem, junto com as harmônicas triplas, ou seja, as harmônicas ímpares múltiplas de três. Para cargas não lineares mesmo equilibradas, as harmônicas triplas são de sequência zero, somando-se no condutor neutro, podendo chegar a níveis de corrente superior ao da fase (CARVALHO, 2013).

No dimensionamento de condutores neutros é comum utilizar cabos da mesma seção transversal que os de fase, porém, para situações como esta, eles estarão sobrecarregados.

### 7.2 Transformadores

A presença de harmônicos promove o aumento de perdas no transformador, aumenta a temperatura e reduz a vida útil. Existe a possibilidade de ocorrência de ressonância entre a indutância do transformador e os capacitores do sistema elétrico, e na ocorrência desta, tem-se estresses na isolação mecânica pela elevação da temperatura e vibrações no núcleo que podem chegar a níveis audíveis.

Harmônicos de correntes provocam perdas no cobre, devido efeito pelicular, dissipando energia em forma de calor denominada efeito Joule. As perdas causadas pelas correntes parasitas aumentam com o quadrado da corrente e o quadrado da frequência.

Observa-se também que o efeito das reatâncias de dispersão amplia, visto que seu valor aumenta com a frequência. Outro fator que se associa à dispersão são as correntes induzidas pelo fluxo disperso, o qual passa a circular nos enrolamentos, no núcleo e nas partes metálicas adjacentes aos enrolamentos.

### 7.3 Capacitores

Uma das maiores preocupações quanto aos capacitores é a ocorrência de ressonância, uma vez que este efeito causa sobretensões e sobrecorrentes que afetam os capacitores e o sistema elétrico.

A reatância do capacitor é inversamente proporcional à frequência, ou seja, a medida que a frequência se eleva a impedância do capacitor diminui, tornando-o um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. Na ocorrência deste fenômeno há aquecimento e stress no dielétrico do capacitor que leva a uma redução de vida útil do componente.

A IEEE Std. 18-2012 apresenta recomendações dos valores limites de operação dos capacitores para sobretensões e sobrecorrentes.

- 1,1 pu da tensão nominal, e fator de crista  $< 1,2 * \sqrt{2}$ , incluindo harmônicos
- 1,35 pu da corrente nominal, somando a fundamental e harmônicos.

### 7.4 Medidores de Energia

Em geral estes aparelhos indutivos podem ser afetados pela presença de harmônicos de corrente e harmônicos de tensão. De acordo com o espectro harmônico no qual submete o instrumento, os erros podem ser positivos ou negativos.

### 7.5 Iluminação

As lâmpadas incandescentes são sensíveis às variações de tensão e reduzirá sua vida útil ao ser submetido a distorções harmônicas. Se a distorção provocar aumento na tensão de alimentação haverá elevação da temperatura no filamento e pode levar a queima de lâmpadas.

Em lâmpadas de descargas ocorre ruído audível quando da presença de harmônicos. Capacitores dos reatores eletromagnéticos que corrigem o fator de

potência entram em ressonância que é comum na faixa de 75 a 80 Hertz, não interagindo com o sistema de alimentação (PIRES, 2006).

## **7.6 Relés de Proteção**

Harmônicos podem interferir no desempenho de um relé de proteção levando a operações indevidas ou retardo e/ou não operação quando necessário.

Segundo Pires (2006), a influência das harmônicas em uma onda senoidal provoca alterações no pico de corrente, diferenciando do valor esperado de um relé de proteção. Há também alterações no desempenho do relé devido o ângulo das harmônicas e da frequência fundamental.

Devido à variedade de relés de proteção torna-se muito difícil definir como o mesmo responderá a este fenômeno. Cada fabricante terá uma performance diferente de outro.

## **7.7 Máquinas Rotativas**

Aumento de perdas no ferro e no cobre em decorrência do sobreaquecimento, contribuindo, principalmente, para baixa eficiência e afetando o conjugado disponível. Harmônicos no fluxo produzem alterações no acionamento, como componentes instantâneos de conjugado que atuam em sentidos contrários ao da fundamental, como ocorre com a 5<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, e 17<sup>a</sup>, etc. ordem.

Serão abordadas nas seções seguintes, como foco deste trabalho, as influências de harmônicos nos motores de indução bem como as medidas de controle e mitigação ou minimização destes impactos negativos.

## 8 INFLUÊNCIA DAS HARMÔNICAS NOS MOTORES - SIMULAÇÕES

Conforme demonstrado nas seções anteriores, as harmônicas promovem alterações na qualidade de energia elétrica e estas alterações acarretam perdas de energia e mau funcionamento dos equipamentos elétricos ligados à rede.

Tomando como exemplo o modelo do motor elétrico, conforme tabela 1, definido na primeira seção deste trabalho, foram realizadas simulações que permitem interpretar e entender o comportamento do motor elétrico quando da incidência de harmônicos em sua alimentação, bem como avaliar onde as alterações ocorrem, quais são os impactos causados pelas harmônicas e de que forma elas podem interferir no funcionamento do motor elétrico. Por definição, os valores das resistências  $R_1$  e  $R_2$  terão seus valores fixos, independente da frequência de alimentação, desprezando o efeito pelicular.

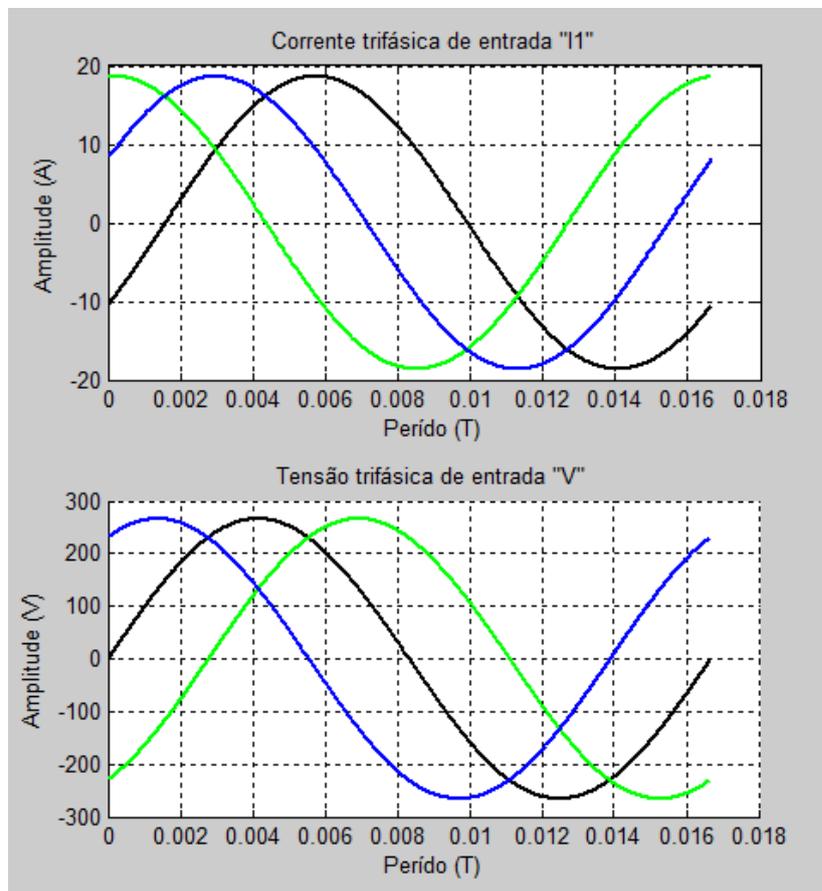
Foram consideradas somente as harmônicas ímpares para as simulações. Normalmente, as harmônicas de ordem par ( $2^o$ ,  $4^a$ ,  $6^a$ , etc.) são raras nas redes elétricas industriais. Isso ocorre uma vez que os dispositivos eletrônicos que incorporam funções de retificação/inversão (os grandes geradores de harmônicas), sejam eles trifásicos ou monofásicos, normalmente operam com retificações de onda completa e geram, na linha de alimentação, sinais distorcidos, porém, simétricos e periódicos (NERY, 2016). Através da teoria de Fourier é possível evidenciar matematicamente que para todo sinal que possua simetria de meia onda seus componentes pares são anulados, ou seja, os termos  $A_n$  e  $B_n$ , existentes na equação 17, correspondentes à decomposição em série de Fourier, são nulos para  $n=2, 4, 6$ , etc. Sendo assim, pode-se julgar que, a priori, a eventual presença de harmônicas pares é sinal de que o controle dos semicondutores nos dispositivos de retificação/inversão encontra-se desajustado.

As simulações foram realizadas por *software* Matlab, obedecendo às equações de motores elétricos em acordo com a literatura apresentada em (CHAPMAN, 2013).

## 8.1 Avaliação na Frequência Fundamental

Para a avaliação do comportamento do motor frente aos distúrbios em sua alimentação, primeiro é apresentado o comportamento deste em condições ideais de operação. Considerando um sistema trifásico equilibrado e trabalhando sob as condições ideais projetadas para o motor na frequência de 60 Hz obtêm-se os resultados expressos no gráfico 1.

Gráfico 1 - Correntes e Tensões Trifásicas na Fundamental

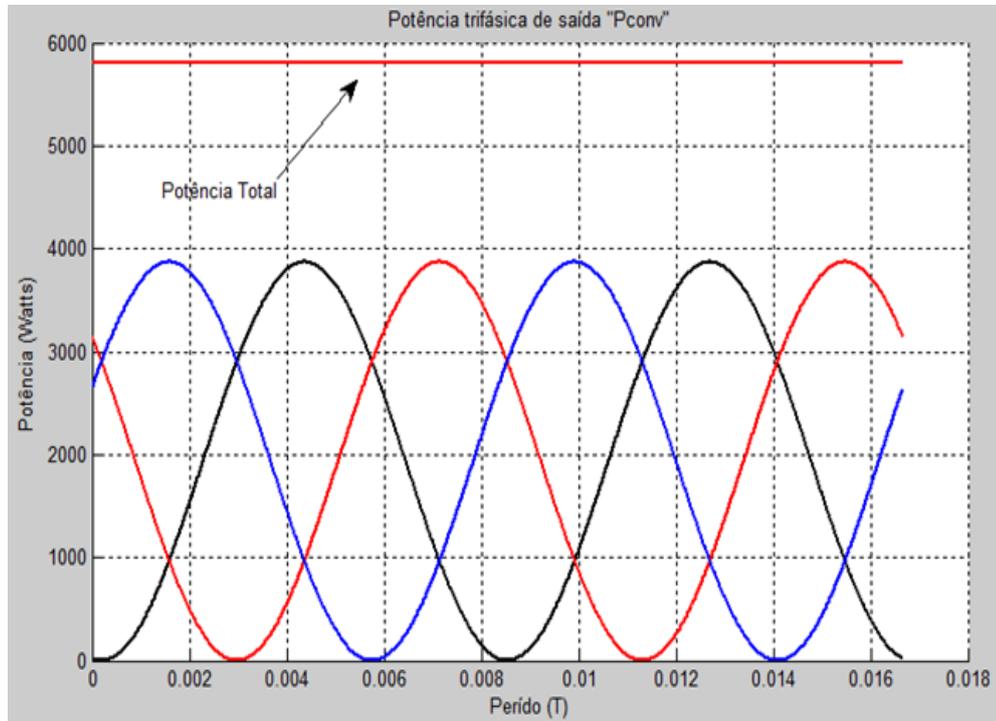


Fonte: O AUTOR

Nestas condições, as correntes estão defasadas aproximadamente  $35^\circ$  em relação à tensão, o fator de potência (FP) do motor é  $0,82$ , conforme esperado no projeto deste. Nota-se ainda que as formas de onda das tensões e correntes são puramente senoidais. A potência trifásica do motor aparece equilibrada e constante,

forneendo, portanto, os valores esperados obtidos no ensaio do motor, conforme pode ser observado no gráfico 2.

Gráfico 2 - Potência Trifásica na Fundamental



Fonte: O AUTOR

As perdas resistivas na frequência fundamental de 60 Hz são demonstradas na tabela 12:

Tabela 12 - Perdas Resistivas para Harmônica Fundamental

Perdas resistivas		
Variável analisada	Para F = 60 Hz	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	18,63	667
R1 (Ω)	0,641	
I2, saída (A)	16,19	261
R2 (Ω)	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2028
<b>Fator de Potência</b>		<b>0,82</b>

Fonte: O AUTOR

Pode-se observar que, em condições de operação ideal, ou seja, na ausência de distorções, a corrente nominal de entrada equivale a 18,63 Amperes. As perdas totais são aproximadamente 2kW e o motor apresenta fator de potência de 0,82.

Geralmente, ao se projetar um motor para atender um determinado equipamento, são estes parâmetros que são avaliados. Desta forma, os dispositivos de proteção, cabeamento e potência mecânica de saída são dimensionados de forma a atender estas especificações (dados de placa do motor). Com base nessas informações, as simulações subsequentes mostram o que ocorre com o motor mediante sinais de entrada distorcidos (harmônicos).

As referências de amplitude dos sinais harmônicos foram extraídas da tabela 6 (padrões adotados pela PRODIST) e tabela 7 (padrões adotados pela IEEE). A resposta do motor sob influência dos limites impostos por cada uma foi comparada.

Para as simulações o circuito equivalente foi submetido às harmônicas ímpares de sequência positiva e negativa, conforme tabela 11. As harmônicas de sequência zero não terão influência no modelo do motor definido nas simulações, uma vez que este é trifásico, que não possui condutor neutro e que supõe-se equilibrado.

## **8.2 Avaliação na 5ª harmônica**

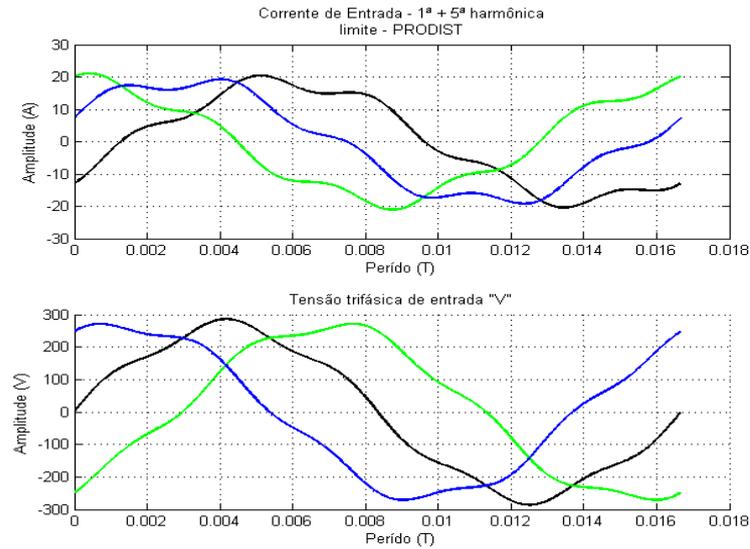
Para a 5ª harmônica, os valores permissíveis de taxa de distorção harmônica individual da PRODIST e *IEEE*, considerando um barramento menor que 1kV, são 7,5% e 5% respectivamente, valores baseados na tabela 6 e 7. Nesta simulação consta o somatório do sinal fundamental 60 Hz e o sinal harmônico de 5ª ordem equivalente a 300 Hz.

A 5ª harmônica é de sequência negativa, ou seja, o fluxo produzido por ela tem orientação contrária ao fluxo produzido pela fundamental. Esse fluxo tende a frear o motor causando aquecimento indesejado e oscilações de potência mecânica no eixo do motor.

O gráfico 3 e 4 traduz o comportamento das correntes e tensões trifásicas mediante entrada deste sinal distorcido. Nesta condição, houve alterações na forma de onda da tensão e corrente. Observa-se que elas não são mais perfeitamente senoidais, como apresentado na frequência fundamental. Além disso, uma deformação ocorreu nas amplitudes de cada fase e a impedância do motor sofreu

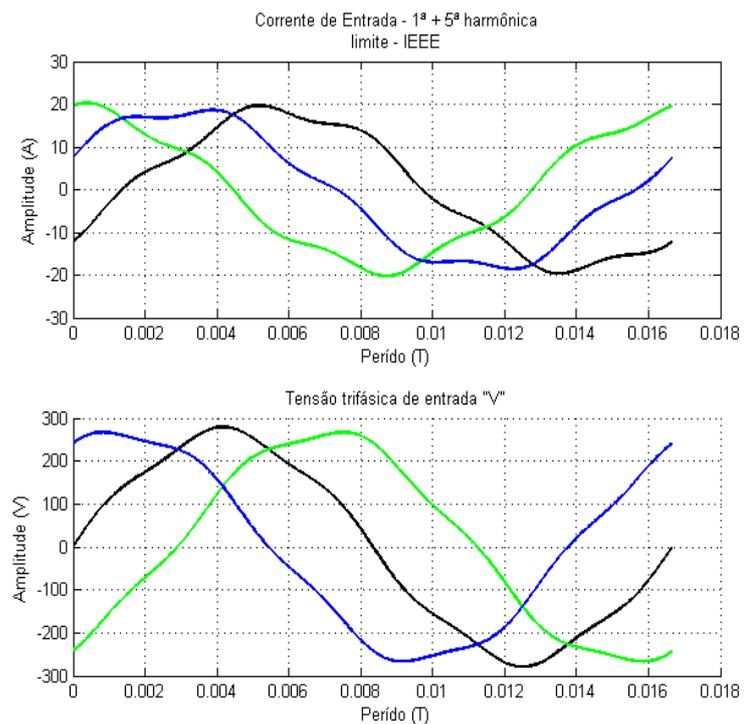
alteração. Essa cadeia de eventos provocou redução no fator de potência, redução do rendimento, aumento de corrente de entrada e conseqüentemente aumento nas perdas resistivas.

Gráfico 3 - Correntes e Tensões Trifásicas na 5ª Harmônica – PRODIST



Fonte: O AUTOR

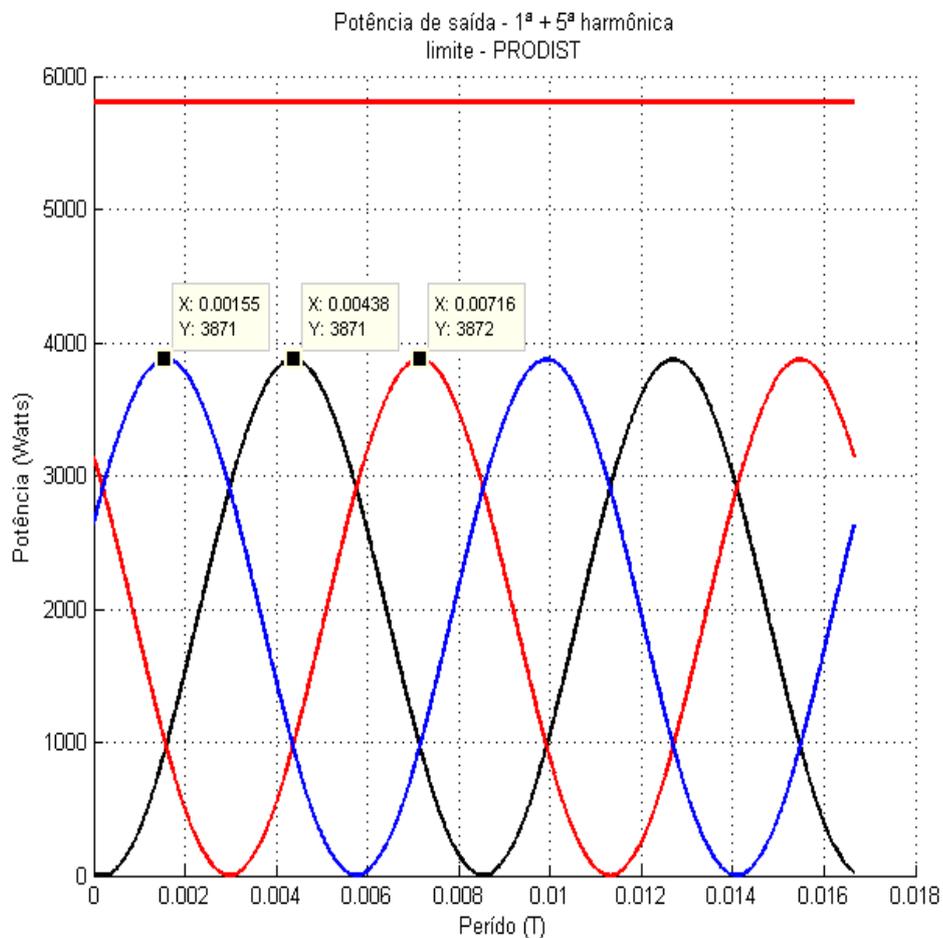
Gráfico 4 - Correntes e Tensões Trifásicas na 5ª Harmônica – IEEE



Fonte: O AUTOR

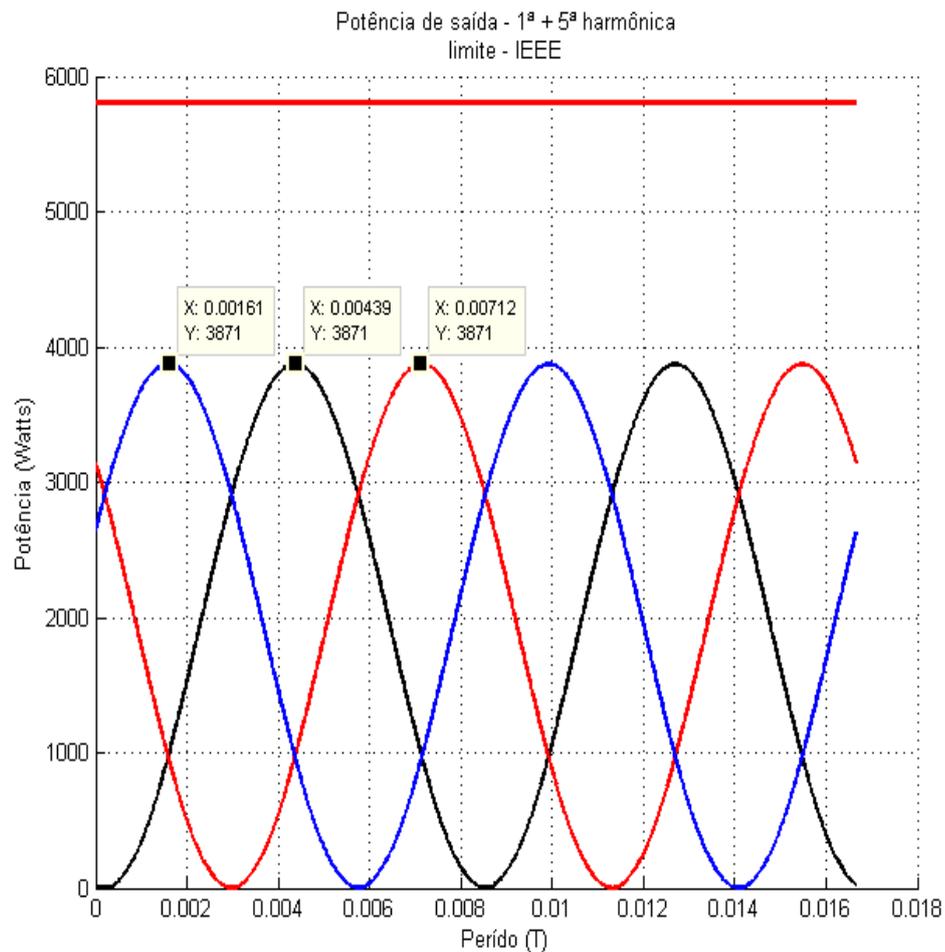
O gráfico 5, simulação no padrão PRODIST, apresenta uma pequena oscilação na potência de saída na fase 3. No gráfico 6, padrão *IEEE*, essa oscilação não existe, isso por causa da pequena diferença de amplitude do sinal da distorção harmônica de 5ª ordem. Essa diferença em 1,5% faz com que o motor apresente mais perdas ainda, ou seja, uma rede elétrica adotando o padrão *IEEE*, alimentando um motor elétrico terá menos perdas se comparado ao padrão PRODIST. Essa afirmação pode ser verificada na tabela 13.

Gráfico 5 - Potência Trifásica na 5ª Harmônica - PRODIST



Fonte: O AUTOR

Gráfico 6 - Potência Trifásica na 5ª Harmônica - IEEE



Fonte: O AUTOR

Observa-se que a 5ª harmônica provocou elevação na corrente de alimentação do motor, um incremento de 12% mediante aos valores PRODIST e 8,2% no padrão *IEEE*. Essa variação provocou aumento das perdas resistivas, contribuindo para o aquecimento do motor. O Fator de potência também apresentou alteração. Houve uma redução de 6% e 3,7% mediante aos valores PRODIST e *IEEE* respectivamente.

A tabela 14 demonstra um comparativo entre os valores ideais projetados e os valores sob influência da 5ª harmônica.

Tabela 13 - Perdas Resistivas na 5ª Harmônica

Perdas resistivas - PRODIST		
Variável analisada	Para F = 60 Hz + 5ª harmônica	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	21,15	860,1
R1 (Ω)	0,641	
I2, saída (A)	18,68	347,4
R2 (Ω)	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2307,5
<b>Fator de Potência</b>		<b>0,77</b>

Perdas resistivas - IEEE		
Variável analisada	Para F = 60 Hz + 5ª harmônica	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	20,31	793,47
R1 (Ω)	0,641	
I2, saída (A)	17,85	317,52
R2 (Ω)	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2211
<b>Fator de Potência</b>		<b>0,79</b>

Fonte: O AUTOR

Tabela 14 - comparativo da condição ideal x distorcida – 5ª harmônica

Comparativo de simulações – 5ª harmônica			
Variáveis analisadas	Condição Ideal	PRODIST	IEEE
I1, entrada (A)	18,63	21,15	20,31
I2, saída (A)	16,19	18,68	17,85
Total (Perdas resistivas) Watts	2028	2307,5	2211
Fator de Potência	0,82	0,77	0,79

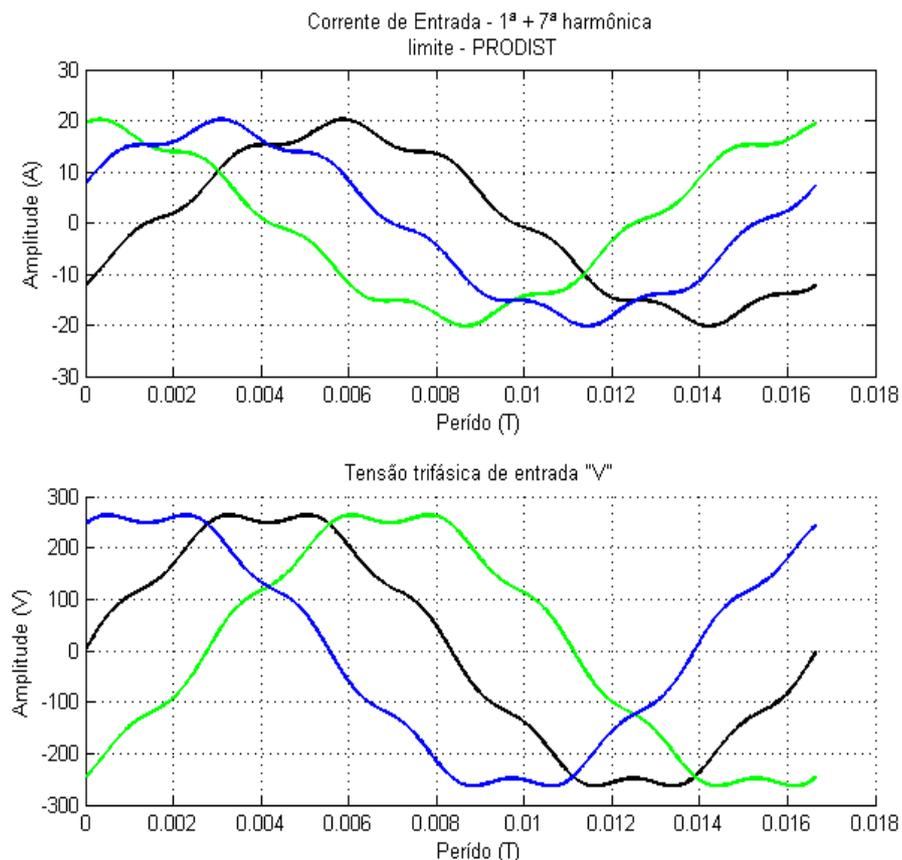
Fonte: O AUTOR

### 8.3 Avaliação na 7ª harmônica

Na 7ª harmônica, o percentual máximo permitido pela PRODIST e *IEEE* é de 6,6% e 5% respectivamente. O sinal distorcido de 420 Hz foi somado ao sinal fundamental 60 Hz e obtido valores para avaliação e comparação. A 7ª harmônica é de sequência positiva. O fluxo produzido por ela tem a mesma orientação que o fluxo produzido pela fundamental, isso traduz que, ela tende a fazer o motor girar, causando sobrecorrente nos enrolamentos e fazendo com que estes aqueçam e aumentem as perdas por efeito joule.

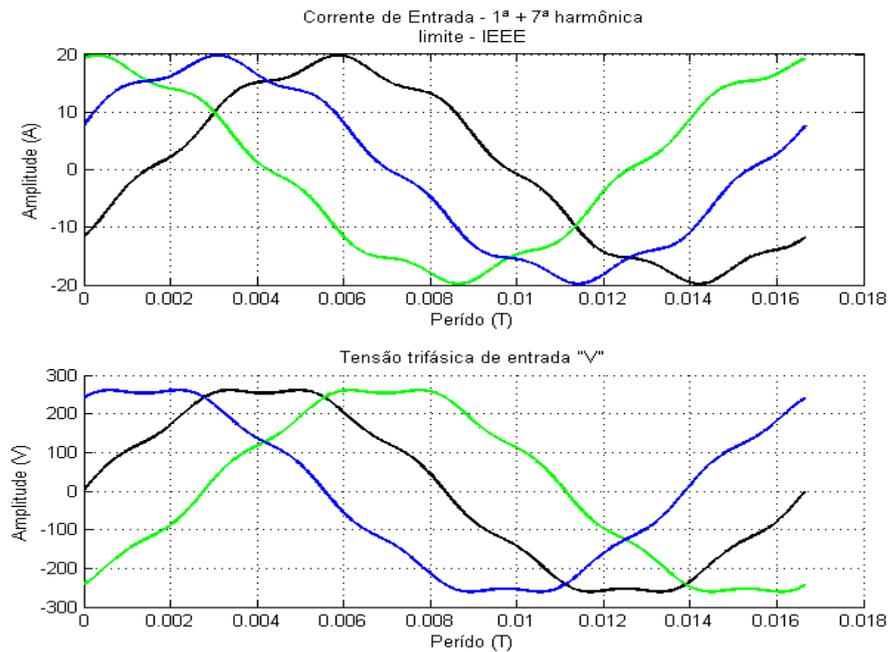
Os gráficos 7 e 8 ilustram como as curvas das correntes e tensões trifásicas comportam na incidência desta harmônica na rede.

Gráfico 7 - Correntes e Tensões Trifásicas na 7ª Harmônica - PRODIST



Fonte: O AUTOR

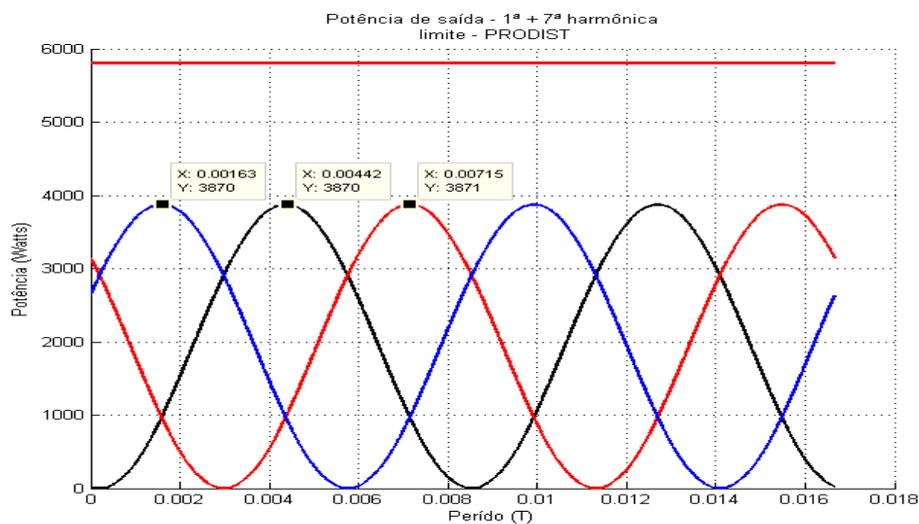
Gráfico 8- Correntes e Tensões Trifásicas na 7ª Harmônica - IEEE



Fonte: O AUTOR

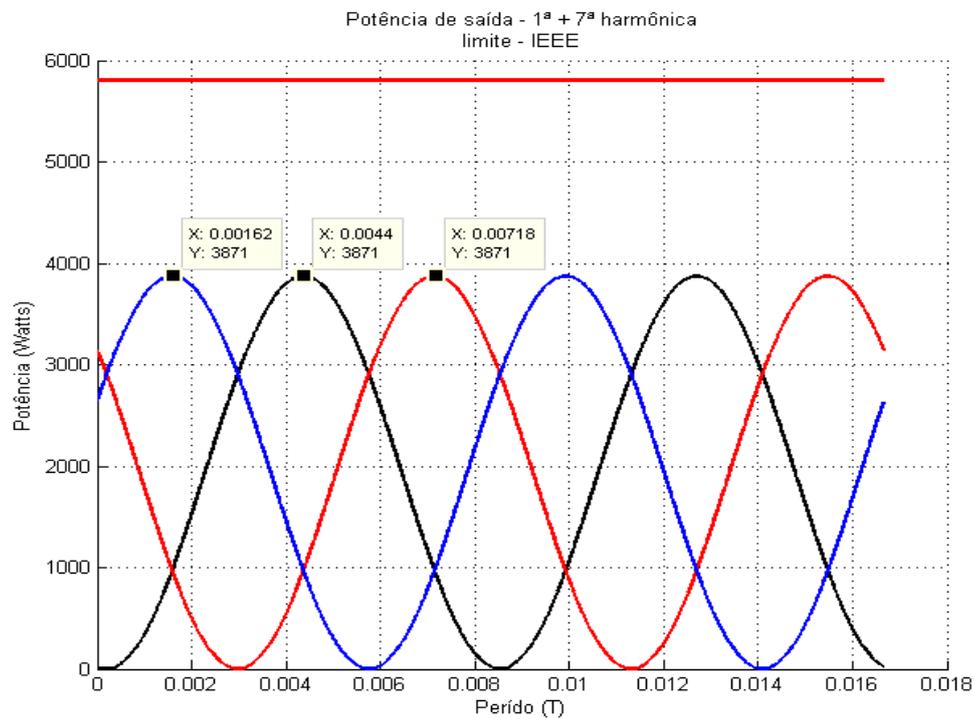
Pode-se observar que as correntes e tensões sofreram deformações menos acentuadas quando comparadas a 5ª harmônica. Porém, essas deformações contribuem para as perdas no motor. Os gráficos 9 e 10 ilustram o comportamento da potência trifásica sob influência da 7ª harmônica.

Gráfico 9 - Potência Trifásica na 7ª Harmônica - PRODIST



Fonte: O AUTOR

Gráfico 10 - Potência Trifásica na 7ª Harmônica - IEEE



Fonte: AUTOR

Houve uma pequena redução na potência de saída do motor quando injetado o sinal distorcido admissível pela PRODIST. Já para a *IEEE* não houve alteração. A diferença de 1,6% na permissividade dos valores contribuiu para a não oscilação na potência de saída. A tabela 15 indica os valores analisados e as perdas resultantes da simulação. Nota-se que a corrente de entrada do motor sofreu um incremento de 7,9% e 6,1% na injeção do sinal harmônico de 7ª ordem referenciando a PRODIST e *IEEE* respectivamente. Além disso, o fator de potência apresentou redução de 3,6% no padrão PRODIST e 2,4% pelo padrão *IEEE*.

A tabela 16 demonstra um comparativo entre os valores ideais projetados e os valores sob influência da 7ª harmônica.

Tabela 15 - Perdas Resistivas na 7ª Harmônica

Perdas resistivas - PRODIST		
Variável analisada	Para F = 60 Hz + 5ª harmônica	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	20,22	786,2
R1 (Ω)	0,641	
I2, saída (A)	17,76	314,2
R2 (Ω)	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2200,4
<b>Fator de Potência</b>		<b>0,79</b>
Perdas resistivas - IEEE		
Variável analisada	Para F = 60 Hz + 5ª harmônica	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	19,84	757,19
R1 (Ω)	0,641	
I2, saída (A)	17,38	301,06
R2 (Ω)	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2158,25
<b>Fator de Potência</b>		<b>0,80</b>

Fonte: O AUTOR

Tabela 16 - comparativo da condição ideal x distorcida – 7ª harmônica

Comparativo de simulações - 7ª harmônica			
Variáveis analisadas	Condição Ideal	PRODIST	IEEE
I1, entrada (A)	18,63	20,22	19,84
I2, saída (A)	16,19	17,76	17,38
Total (Perdas resistivas) Watts	2028	2200,4	2158
Fator de Potência	0,82	0,79	0,8

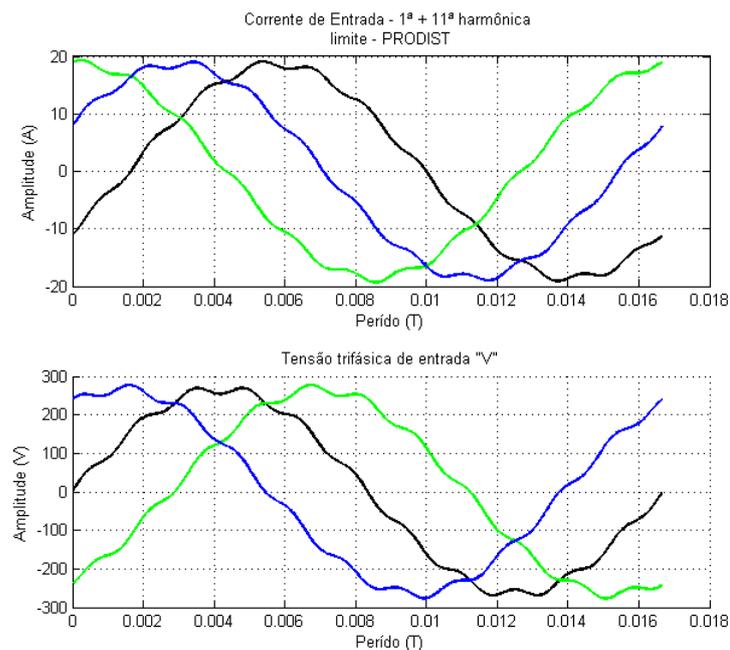
Fonte: O AUTOR

## 8.4 Avaliação na 11ª harmônica

Os valores referência para a taxa de distorção harmônica individual na harmônica de 11ª ordem são: 4,5% PRODIST e 5,0% *IEEE*. Nota-se que para esta ordem harmônica, as perdas elétricas no motor sob o padrão PRODIST serão menores que o padrão *IEEE*. Os gráficos 11 e 12 ilustram o comportamento das tensões e correntes trifásicas sob tais circunstâncias. Pode-se observar através dos gráficos 11 e 12 que as correntes e tensões sofreram pequenas deformações quando o motor foi submetido a 11ª harmônica. À medida que a ordem harmônica se eleva, a frequência também eleva. O motor por sua vez é uma carga majoritariamente indutiva, portanto, para frequências elevadas a reatância aumenta ao ponto que o motor se torna um filtro, ou seja, um caminho de alta impedância para frequências superiores. Esse é o motivo pelo qual as correntes e tensões apresentam deformações menos acentuadas em comparação com as frequências inferiores.

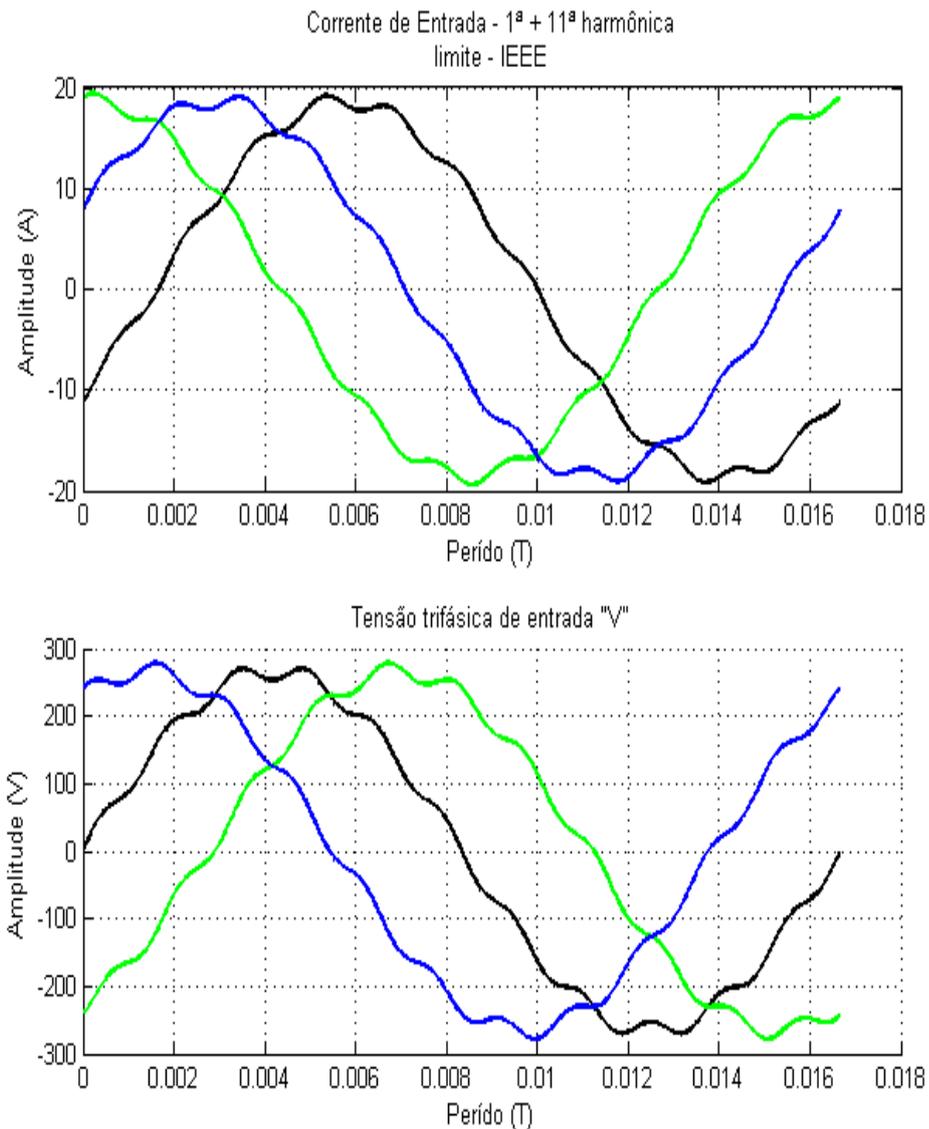
Por outro lado, nessa situação, ocorre o chamado efeito pelicular (desprezado na simulação), que ocorre em frequências elevadas. Esse efeito provocará aquecimento nos condutores e aumento de perdas por efeito joule.

Gráfico 11 - Correntes e Tensões Trifásicas na 11ª Harmônica - PRODIST



Fonte: O AUTOR

Gráfico 12 - Correntes e Tensões Trifásicas na 11ª Harmônica - IEEE

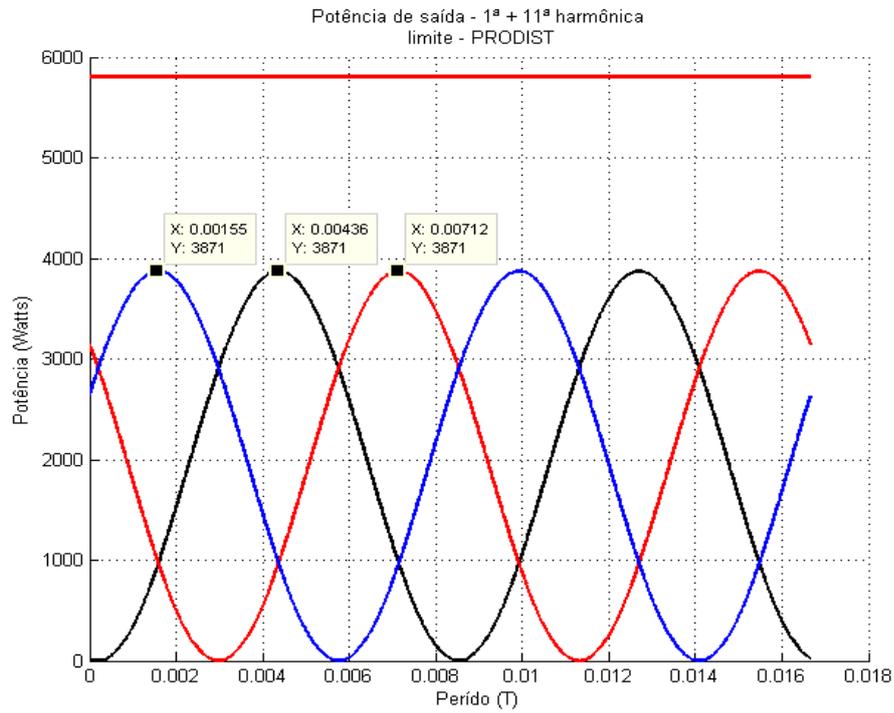


Fonte: O AUTOR

Conforme ilustram os gráficos 13 e 14, as potências trifásicas não serão afetadas pela 11ª harmônica. Porém, houve um incremento no valor da corrente em 3,6% no padrão PRODIST e 4,2% no padrão *IEEE* e uma pequena redução de 1,2% no fator de potência. Além disso, houve um aumento das perdas resistivas.

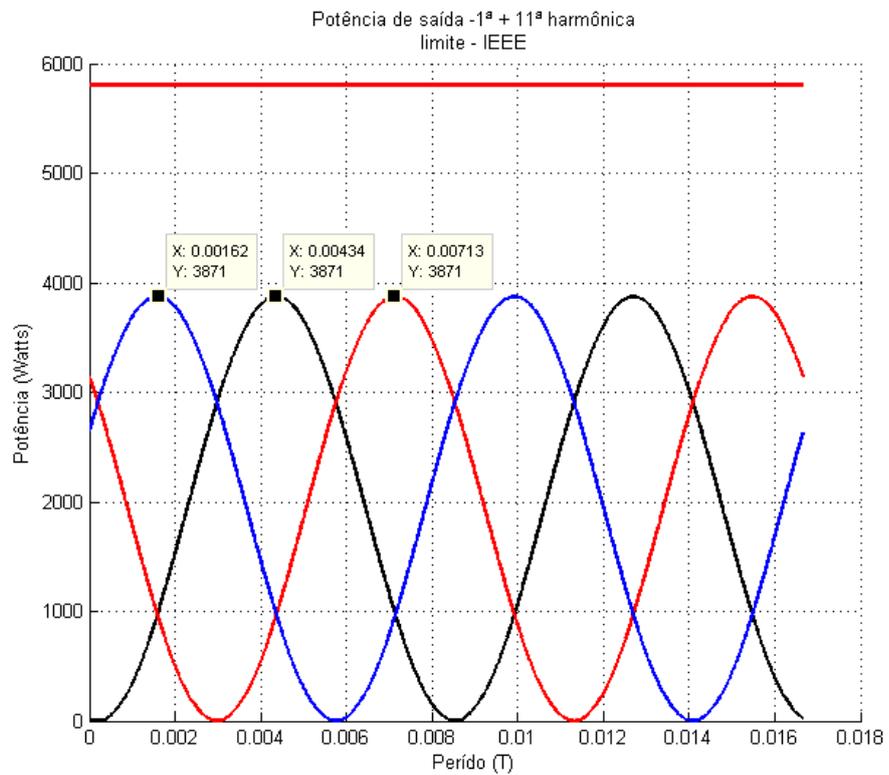
A tabela 18 demonstra um comparativo entre os valores ideais projetados e os valores sob influência da 11ª harmônica.

Gráfico 13 - Potência Trifásica na 11ª Harmônica - PRODIST



Fonte: O AUTOR

Gráfico 14 - Potência Trifásica na 11ª Harmônica - IEEE



Fonte: O AUTOR

Tabela 17 - Perdas resistivas na 11ª harmônica

Perdas resistivas - PRODIST		
Variável analisada	Para F = 60 Hz + 11ª harmônica	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	19,33	718,5
R1 (Ω)	0,641	
I2, saída (A)	16,87	283,5
R2 (Ω)	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2102
<b>Fator de Potência</b>		<b>0,81</b>
Perdas resistivas - IEEE		
Variável analisada	Para F = 60 Hz + 11ª harmônica	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	19,45	723,74
R1 (Ω)	0,641	
I2, saída (A)	16,95	286,15
R2 (Ω)	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2109,89
<b>Fator de Potência</b>		<b>0,81</b>

Fonte: O AUTOR

Tabela 18 - comparativo da condição ideal x distorcida – 11ª harmônica

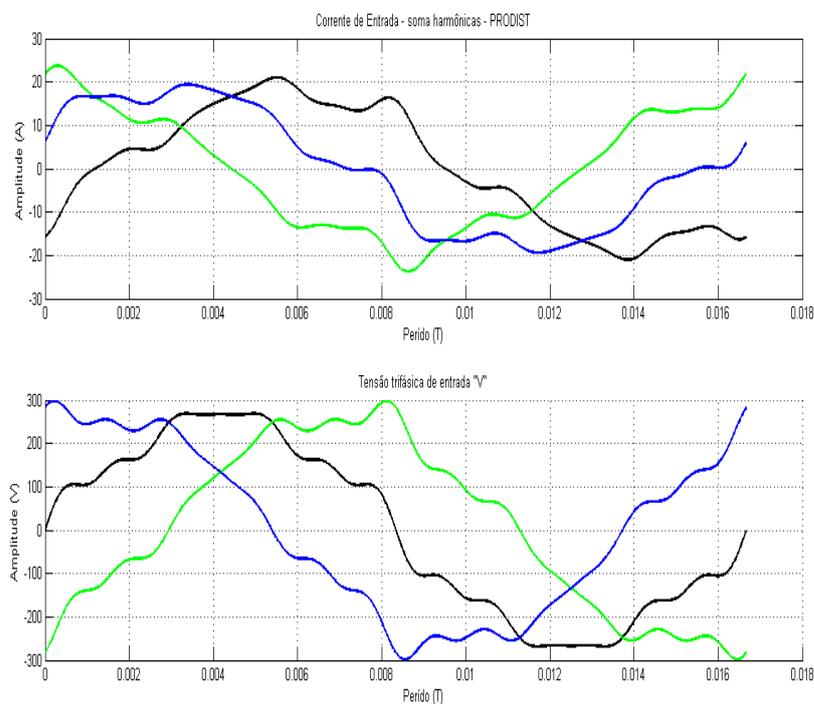
Comparativo de simulações - 11ª harmônica			
Variáveis analisadas	Condição Ideal	PRODIST	IEEE
I1, entrada (A)	18,63	19,33	19,45
I2, saída (A)	16,19	16,87	16,95
Total (Perdas resistivas)	2028	2102	2110
Fator de Potência	0,82	0,81	0,81

Fonte: O AUTOR

## 8.5 Avaliação no somatório de harmônicos

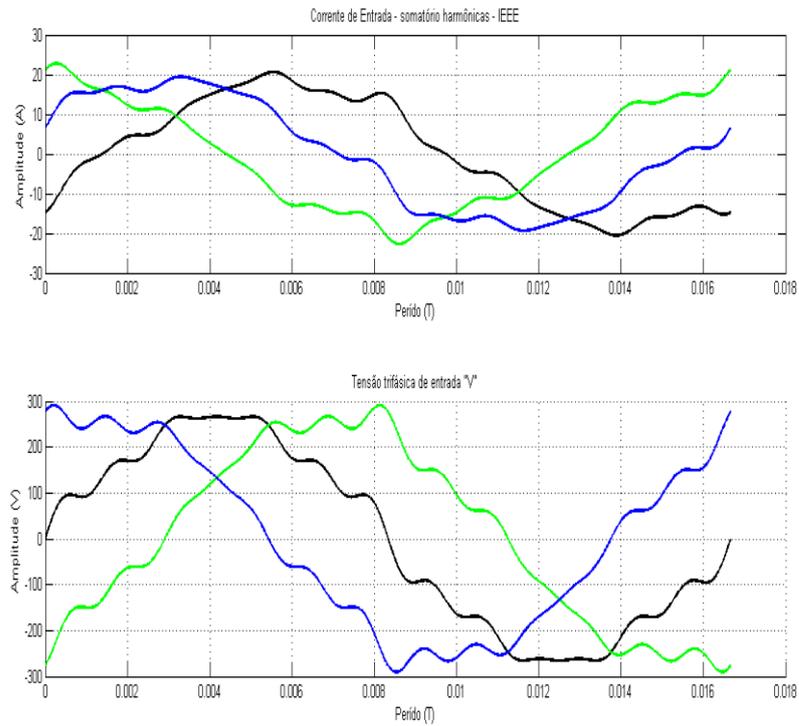
Esta simulação apresenta o comportamento do motor quando a rede elétrica apresenta diversas harmônicas. Neste caso, os sinais de cada harmônico se somarão a fundamental, gerando apenas um sinal distorcido. Pode-se observar os gráficos abaixo as deformações provenientes do somatório da 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem harmônica. Nestas circunstâncias, os sinais harmônicos provocaram deformações acentuadas nas formas de onda da tensão e corrente. Essas alterações contribuem para a não uniformidade do campo magnético girante responsável pela indução de tensão no rotor. Portanto, o motor passa a ter oscilações de potência de saída. Além disso, os sinais distorcidos promoveram aumento de corrente de entrada, conseqüentemente aumento das perdas resistivas.

Gráfico 15 - somatório de harmônicas - PRODIST



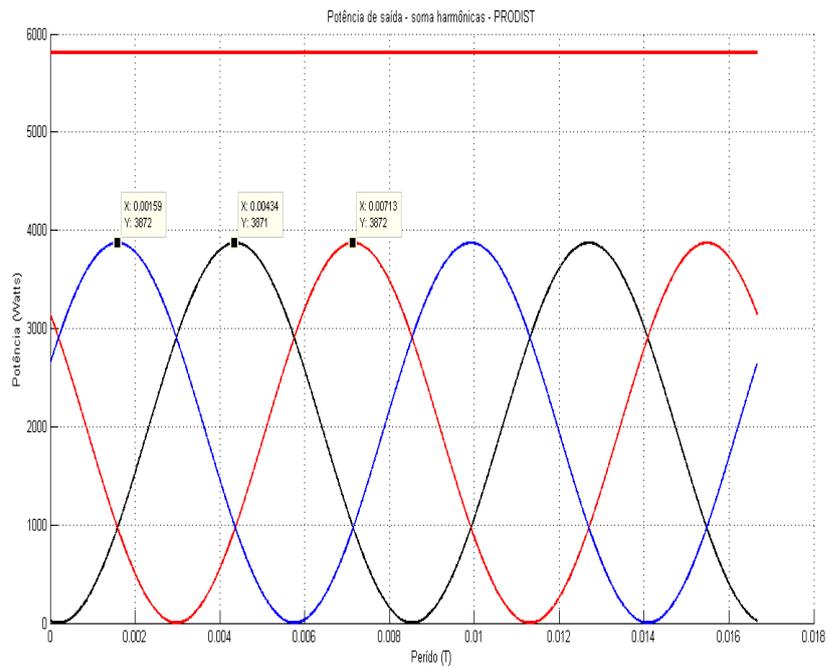
Fonte: O AUTOR

Gráfico 16 - somatório de harmônicas - IEEE



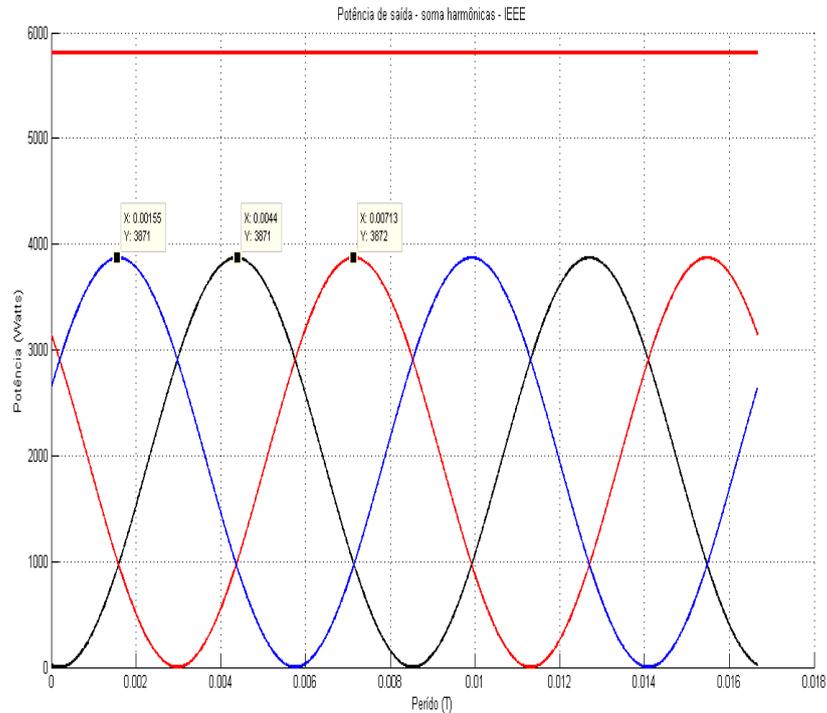
Fonte: O AUTOR

Gráfico 17 - Potência trifásica no somatório de harmônicas - PRODIST



Fonte: O AUTOR

Gráfico 18 - Potência trifásica no somatório de harmônicas - IEEE



Fonte: O AUTOR

A análise do comportamento do motor pode ser observada na tabela 19. A corrente de entrada aumentou em 22% em relação a fundamental no padrão PRODIST e 18,8% em relação a fundamental no padrão IEEE. As perdas resistivas tiveram um aumento em aproximadamente 21% em relação às perdas consideradas no projeto do motor. Esse aumento de perdas está diretamente ligado ao rendimento do motor elétrico.

O fator de potência decresceu em 13,5% no padrão PRODIST e 10,2% no padrão IEEE.

Tabela 19 - Perdas Resistivas no somatório de harmônicas

Perdas resistivas - PRODIST		
Variável analisada	Para DHT max 10%	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	23,9638	1104,3
R1 ( $\Omega$ )	0,641	
I2, saída (A)	21,4538	458,4
R2 ( $\Omega$ )	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2662,7
Fator de Potência		0,716
Perdas resistivas - IEEE		
Variável analisada	Para DHT max 8%	Potência dissipada (watts)
I1, entrada (A)	22,9459	1012,5
R1 ( $\Omega$ )	0,641	
I2, saída (A)	20,4472	2528,9
R2 ( $\Omega$ )	0,332	
Perdas rotacionais fixas		1100
Total (Perdas resistivas)		2528,9
Fator de Potência		0,735

Fonte: O AUTOR

A tabela 20 demonstra um comparativo entre os valores ideais projetados e os valores sob influência da 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> harmônica.

Tabela 20 - comparativo da condição ideal x distorcida – somatório de harmônicas

Comparativo de simulações - somatório de harmônicas			
Variáveis analisadas	Condição Ideal	PRODIST	IEEE
I1, entrada (A)	18,63	23,96	22,49
I2, saída (A)	16,19	21,45	20,44
Total (Perdas resistivas)	2028	2662,7	2529
Fator de Potência	0,82	0,71	0,73

Fonte: O AUTOR

A tabela 19 mostra, claramente, que uma rede elétrica com diversos sinais harmônicos distorcidos contribui para a degradação do motor elétrico. Verifica-se, que, mesmo se o motor tiver fator de serviço de 1.15 (admitindo uma sobrecorrente de 15%), o incremento da corrente devido às distorções harmônicas será maior que

o permitido no motor. Isso provoca um aquecimento nos enrolamentos internos, reduzindo sua vida útil.

É importante ressaltar que os valores de amplitude de todos os sinais utilizados nas simulações foram pautados nas normas PRODIST e IEEE os quais são valores de distorções permitidos nas redes elétricas. Entretanto, mesmo atendendo as especificações destas normas, o motor elétrico apresentou diversas perdas elétricas, muito acima da especificada no projeto. Esses dados revelam que o atendimento as normas não significam a imunidade de problemas decorrentes de distorções harmônicas. Neste sentido, torna-se essencial a utilização de técnicas para a mitigação ou redução destas componentes presentes nos sistemas elétricos.

## **8.6 Avaliação na ocorrência de um surto**

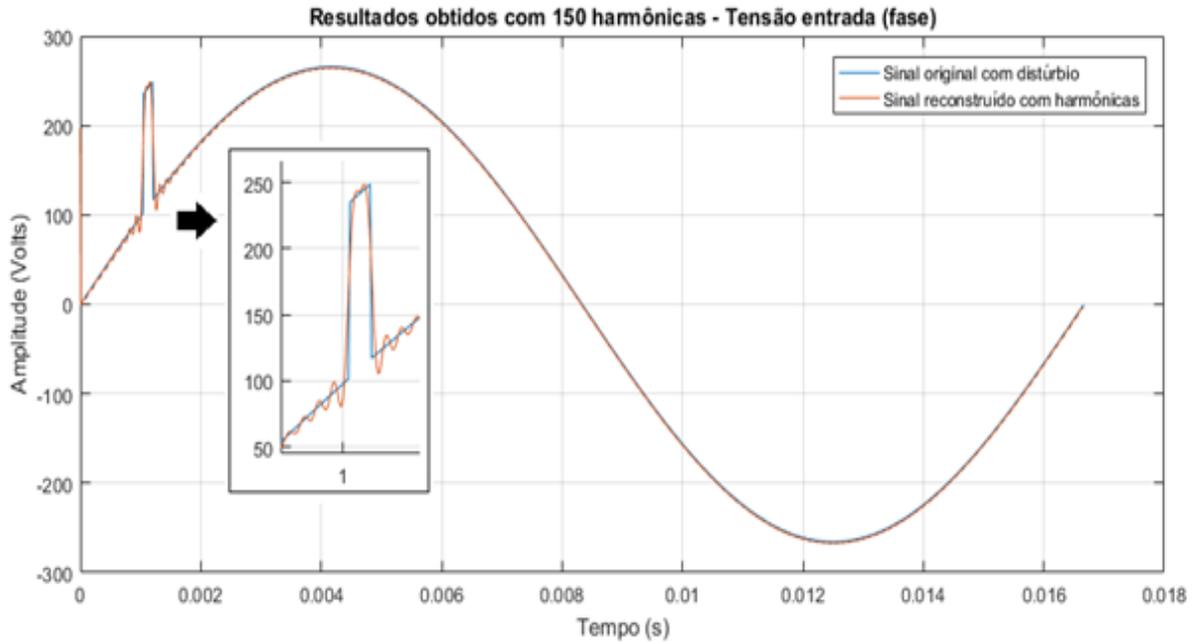
Quando ocorre um distúrbio na rede elétrica as ondas eletromagnéticas deste distúrbio irão se propagar ao longo da linha. A simulação seguinte demonstra o que ocorre em um motor elétrico quando o barramento que o alimenta é submetido a um surto de tensão. No caso simulado, uma elevação abrupta da tensão em um curto período.

O gráfico 19 representa o instante em que ocorre o surto na fase que alimenta o motor elétrico. Para facilitar a visualização no gráfico, este surto está representado por um pulso retangular com amplitude de 50% da tensão de fase do motor. É importante destacar que, mais importante que a amplitude deste surto, é a sua taxa de variação no tempo: quanto mais abrupto e/ou rápido for este surto, maiores as correntes induzidas no rotor devido à sua ocorrência. A representação deste distúrbio em sinais senoidais foi realizada através da decomposição em série de Fourier. Nesta simulação foram utilizadas 150 harmônicas para reconstrução do distúrbio.

Cada uma destas harmônicas (que na simulação substituem o sinal original), ao incidir na alimentação do motor, promove alterações nas correntes e, conseqüentemente, nos campos magnéticos e no conjugado de saída do motor. Como foram utilizadas na simulação, mostrada no gráfico 19, apenas 150 harmônicas, não se conseguiu uma representação perfeita do surto e, por isso, pequenas oscilações são observadas no sinal reconstruído a partir destas 150

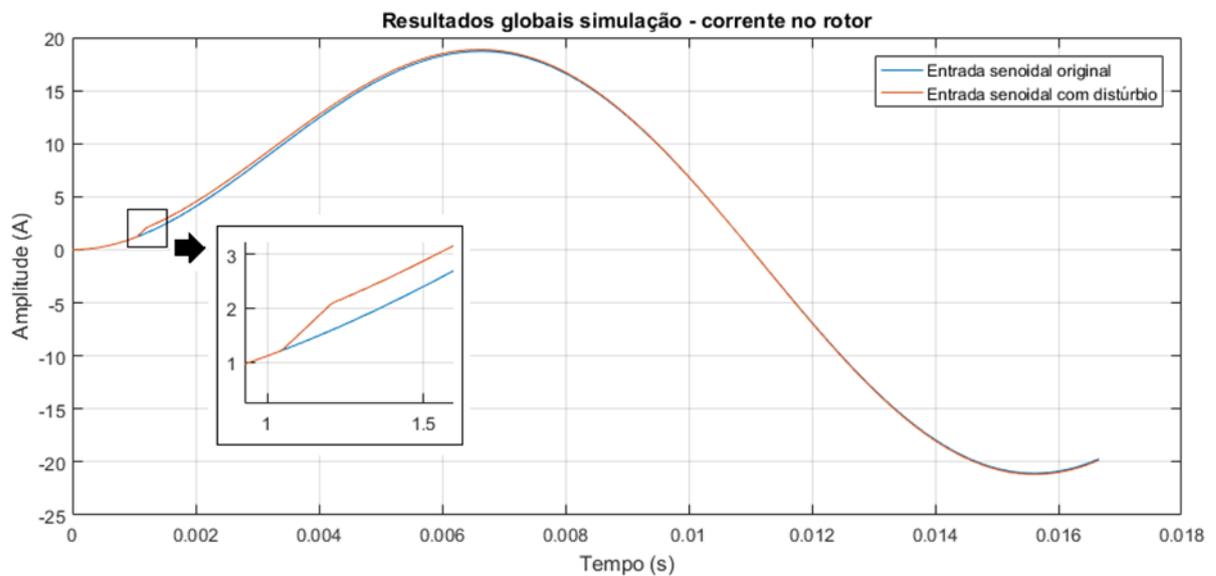
harmônicas. O gráfico 20 traduz o comportamento da corrente mediante estes sinais harmônicos provenientes do distúrbio.

Gráfico 19 - representação do surto de tensão - elevação



Fonte: O AUTOR

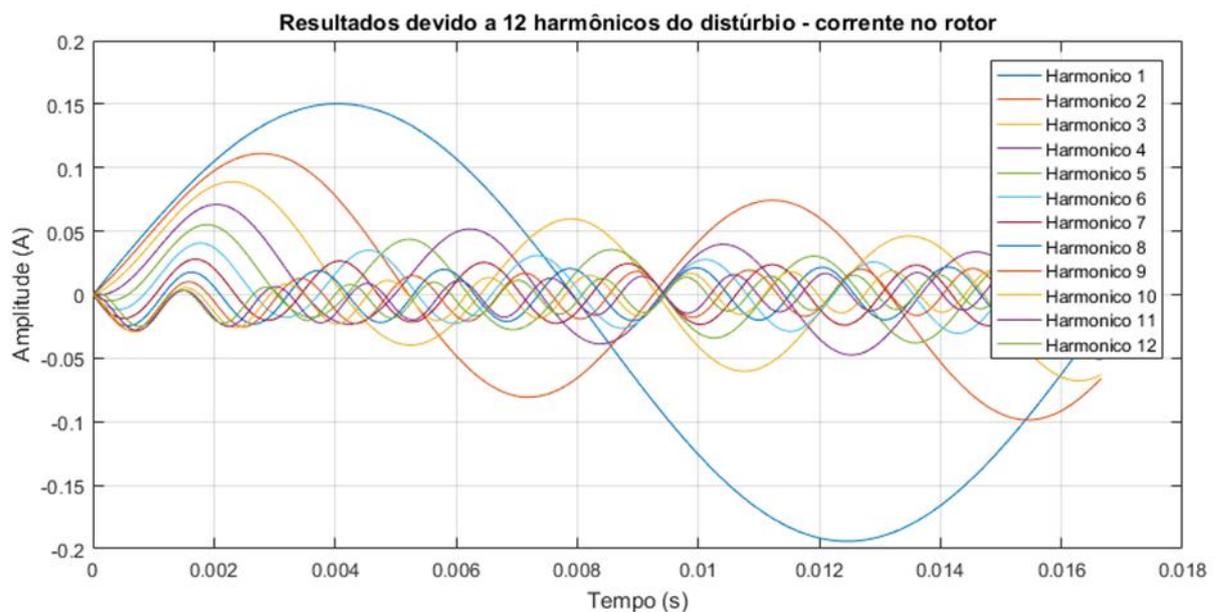
Gráfico 20 - curva da corrente original x corrente com distúrbio de elevação



Fonte: O AUTOR

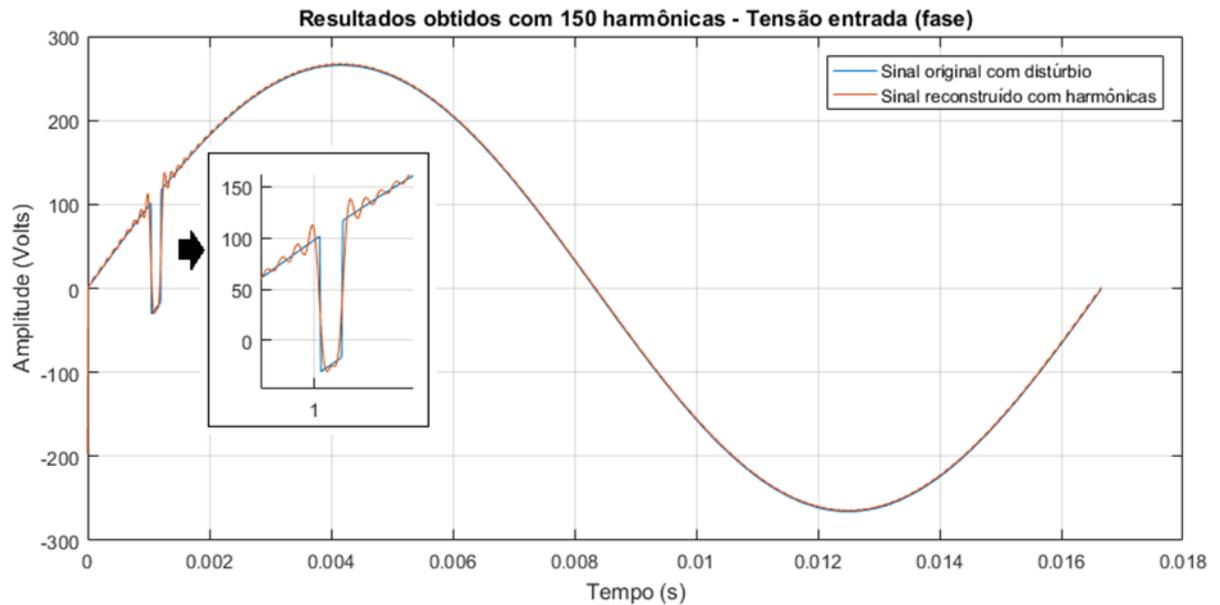
O gráfico 20 mostra a corrente original, sem distúrbio, na cor azul, e a corrente com o distúrbio na cor vermelha. Observe que, para o surto de tensão, mesmo que em um curto espaço de tempo, houve uma reação no motor. A corrente teve o seu valor incrementado por um período maior que o próprio surto. Para o cálculo da corrente, foram consideradas apenas 12 harmônicas das 150 utilizadas para a reconstituição do sinal. Devido às características indutivas do motor, operando como carga, alterações significativas mediante sinais de alta frequência, como são as harmônicas de ordem superior, não serão observadas e, por isso, não foram mostrados os efeitos destas componentes no gráfico 21.

Gráfico 21 - harmônicos provenientes do surto de tensão - elevação



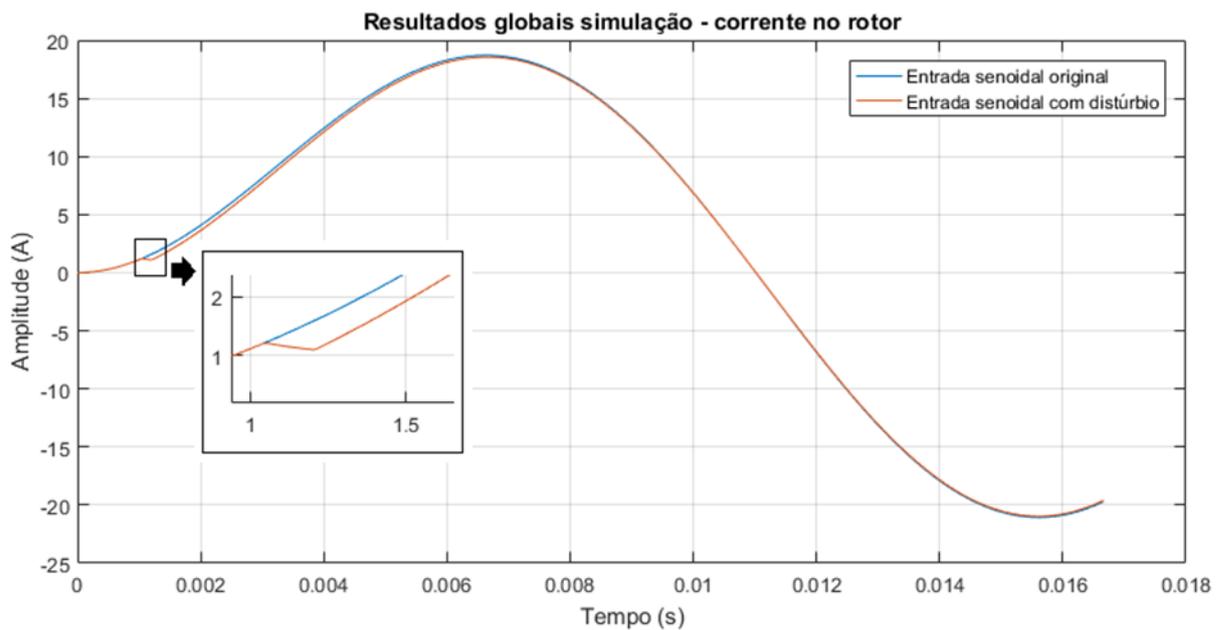
A simulação seguinte demonstra o que ocorre em um motor elétrico quando o barramento que o alimenta é submetido a um surto de tensão, neste caso, um afundamento abrupto da tensão em um curto intervalo de tempo. Neste caso, o distúrbio também pode ser reconstruído através de sinais harmônicos. Pode-se observar no gráfico 22 que existe uma oscilação na representação do distúrbio, assim como na simulação anterior. Estas oscilações acontecem porque o número de harmônicos utilizados para a representação do sinal do distúrbio é menor que o necessário para representar o sinal com precisão.

Gráfico 22 - representação do surto de tensão - afundamento



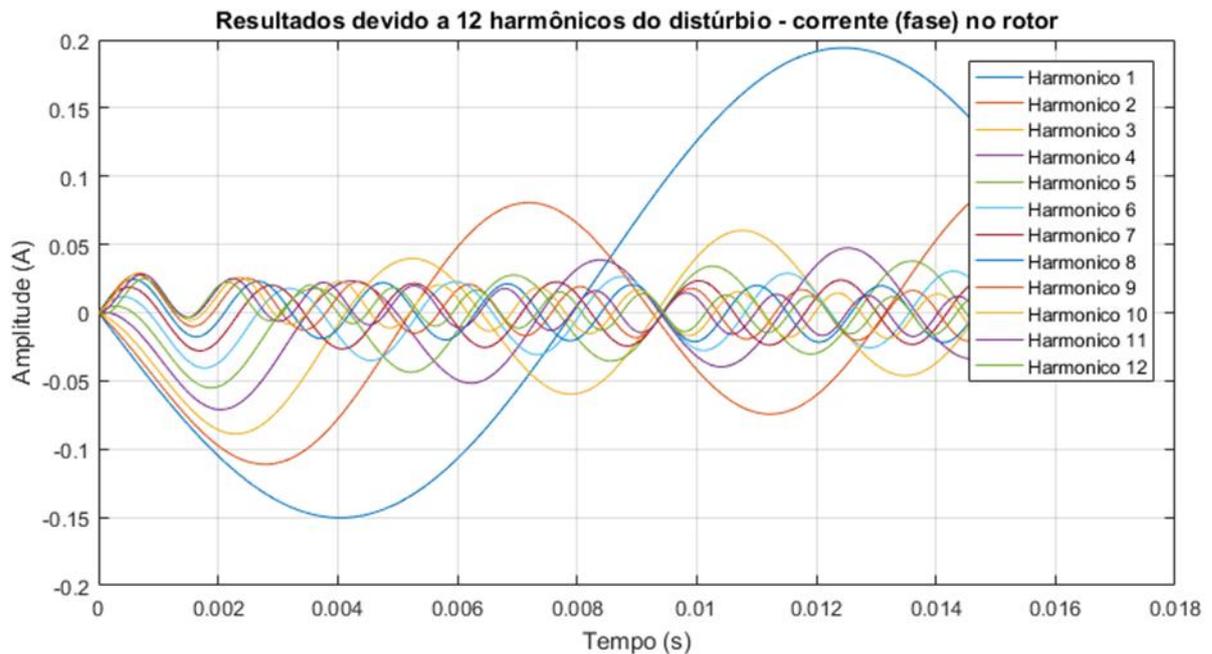
Observa-se que, conforme pode ser visualizado no gráfico 23, a corrente sofrerá uma redução temporária no seu valor nominal e, conforme já mencionado, isso implicará em variação temporária em seu conjugado.

Gráfico 23 - curva da corrente original x corrente com distúrbio de afundamento



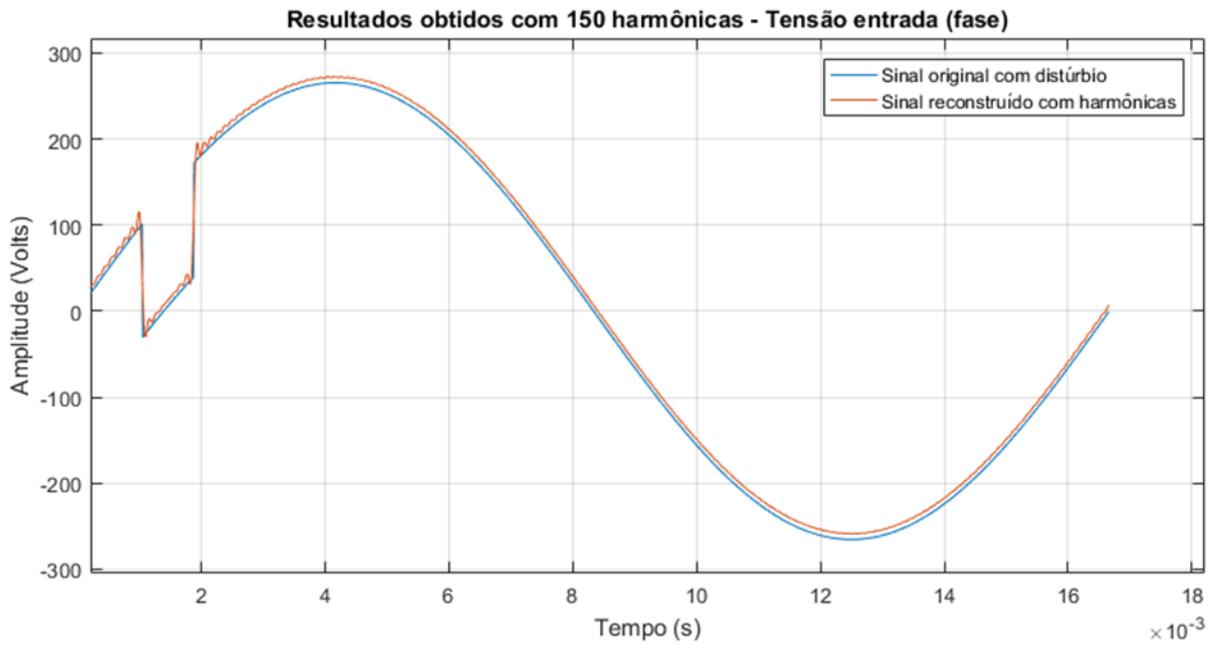
No gráfico 24 apresentam-se as correntes associadas às doze primeiras componentes harmônicas. Conforme já mencionado, devido às características indutivas do motor, pode-se observar que, quanto maior a frequência, menores os impactos sobre a corrente no rotor.

Gráfico 24 - harmônicos provenientes do surto de tensão - afundamento



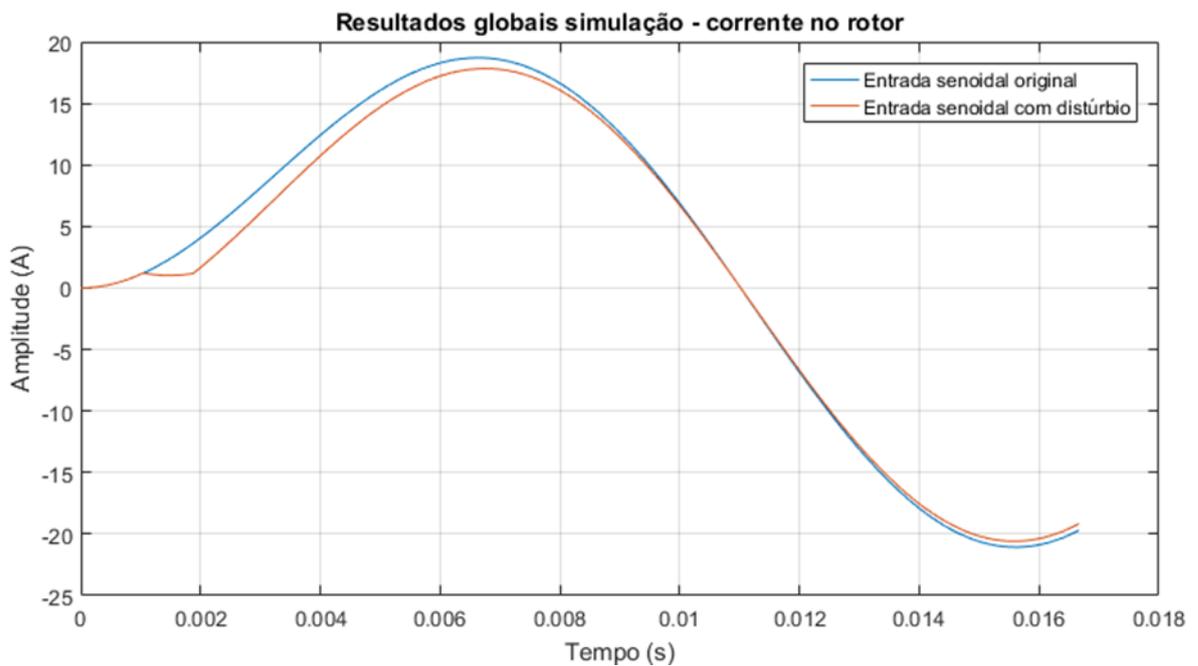
Para se verificar o comportamento da corrente no rotor do motor elétrico, utilizado como referência neste estudo, quando da ocorrência de distúrbios que podem ser decompostos em componentes harmônicas de mais baixa frequência, utilizou-se o sinal mostrado no gráfico 25. Tem-se um afundamento com duração cinco vezes maior que o utilizado anteriormente. Com essa duração maior do sinal, quando de sua decomposição em série de Fourier, por exemplo, podemos identificar componentes harmônicas de baixa frequência com amplitudes mais relevantes na reconstrução do sinal e, assim, maiores impactos na distorção no sinal de corrente foco de análise. No gráfico 26 tem-se a resposta a esse sinal de entrada e no gráfico 27 mostram-se as componentes da corrente resultante no rotor devido a cada uma das 12 componentes harmônicas de mais baixa frequência.

Gráfico 25 - representação do surto o de tensão - afundamento



Fonte: O AUTOR

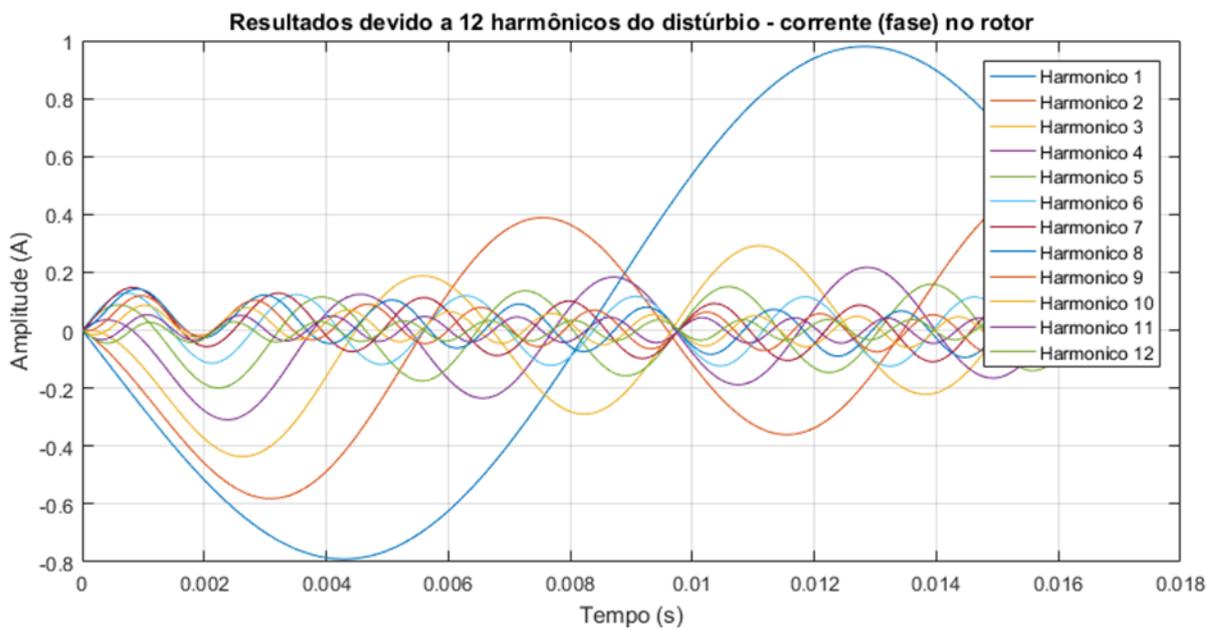
Gráfico 26 - curva da corrente original x corrente com distúrbio de afundamento



Fonte: O AUTOR

Assim, pode-se concluir que distúrbios de baixa frequência, como flutuações de tensão, têm impactos mais danosos às características de saída de motores elétricos de indução. Porém, deve-se lembrar que, mesmo distúrbios de alta frequência, gerados em fontes diversas em uma instalação, quando combinados, podem produzir sinais, com componentes de baixa frequência relevantes.

Gráfico 27 - harmônicos provenientes do surto de tensão - afundamento



## 9 FILTROS PARA HARMÔNICAS

Nas seções anteriores foram demonstrados os efeitos nocivos das componentes harmônicas incidentes nas instalações elétricas. Com o objetivo de minimizar os impactos na QEE, algumas técnicas de mitigação de harmônicos em determinados pontos do sistema elétrico serão apresentadas nesta seção.

Uma das principais técnicas adotadas para reduzir a amplitude de correntes e tensões de uma ou mais frequências harmônicas são a implementação de filtros harmônicos nos circuitos de potência. Filtros são circuitos capazes de separar sinais elétricos de correntes e tensões, modificando as características de amplitudes e fases destes sinais. As características das curvas de impedâncias dos filtros com relação ao espectro de frequência permitem separar os sinais elétricos ou simplesmente filtrá-los. Desta forma é possível rejeitar certos sinais de frequências indesejáveis ou contrariamente deixá-los passar (GARCIA, 2016).

Estes filtros têm como função garantir uma baixa distorção harmônica de corrente ( $DHT_i$ ) e obter valores de distorção harmônica de tensão ( $DHT_v$ ) aceitáveis, conforme definido nas normas técnicas, garantindo que todas as cargas recebam um sinal mais próximo possível do senoidal (BACH, 2014).

A utilização dos filtros no sistema elétrico dependerá do nível de distorção harmônica encontrado no processo e da viabilidade econômica da implementação destes. Os filtros podem ser conectados em série ou em derivação e são constituídos por indutores, capacitores e resistores compondo um circuito capaz de direcionar as correntes harmônicas para a terra e são classificados como filtros passivos, ativos ou híbridos.

### 9.1 Filtros Passivos

Os filtros passivos são constituídos de elementos R, L e C em série ou combinações série-paralela destes elementos. Segundo (SCOLARI et. al., 2013) estes filtros têm a função de estabelecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, fazendo com que estas correntes não circulem pela fonte de alimentação e sim pelo filtro.

Comumente, utiliza-se de filtros passivos sintonizados para a atenuação de harmônicas de baixas frequências, e para harmônicas de frequências superiores o

uso de filtros em derivação são mais aplicados. Estes filtros apresentam custos relativamente mais baixo devido as suas simplicidades de construção.

A aplicação de filtros tipo série permite atenuar as frequências indesejadas evitando sua propagação para o sistema elétrico e bloqueando a passagem dessa frequência a um determinado equipamento. Utilizam-se capacitores e indutores paralelos entre si e conectados em série com a carga, nesta configuração, toda a corrente do circuito flui através destes o que os tornam mais caros em relação aos filtros em derivação.

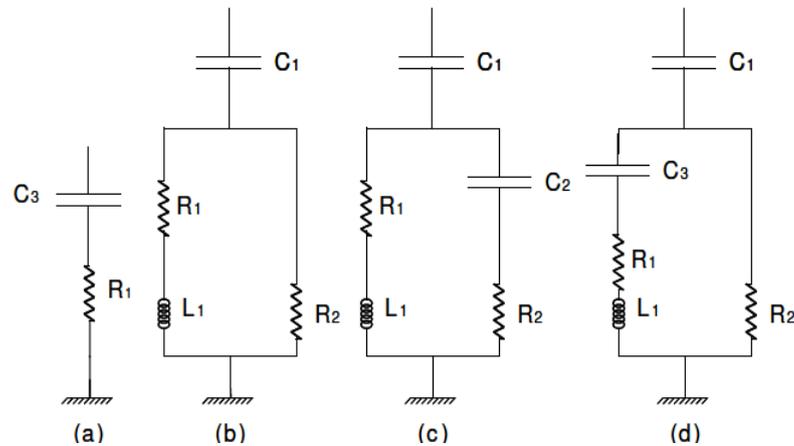
Na aplicação dos filtros em derivação, as correntes harmônicas são desviadas para o sistema de aterramento melhorando significativamente a qualidade da energia elétrica entregue às cargas, e em contrapartida beneficiando os equipamentos e as instalações elétricas do sistema. O seu uso se torna mais viável, pois somente as correntes harmônicas projetadas irão circular neles, o que os torna menos robustos se comparados aos filtros série. Estes são classificados em filtros amortecidos e sintonizados.

#### 9.1.1 Amortecido

Os filtros amortecidos constituem-se de elementos resistivos, indutivos e capacitivos em diferentes combinações, e são denominados filtros passa alta devido sua característica de oferecer baixa impedância para frequências elevadas, ou seja, harmônicas de ordens superiores. Segundo (GARCIA, 2016) os filtros amortecidos apresentam impedância capacitiva na frequência fundamental, e nas frequências mais altas, são resistivos.

A classificação para estes filtros podem ser expressas em quatro diferentes tipos: 1ª ordem, de 2ª ordem, de 3ª ordem e filtro tipo "C", conforme ilustrados na figura 20.

Figura 20 - Filtros Amortecidos 1ª ordem (a) – 2ª ordem (b) – 3ª ordem (c) – Tipo “C”



Fonte: GARCIA (2016)

Os filtros de 1ª ordem, normalmente, não são utilizados na prática, pois apresentam grandes perdas de energia na frequência fundamental e requerem a utilização de capacitores mais robustos em sua construção.

Os filtros de 2ª ordem são bastante comuns nas indústrias devido à sua boa performance na filtragem. São constituídos de um capacitor em série com reator e um resistor em paralelo, sendo possível ajustá-lo para atenuação de uma possível ressonância paralela.

Os filtros de 3ª ordem apresentam-se mais vantajosos em relação aos filtros de 2ª ordem quando o critério de comparação são as perdas de energia na frequência fundamental e, geralmente, estes são utilizados em circuitos de potências mais elevadas. Sua construção física é semelhante ao de 2ª ordem sendo acrescido de um banco de capacitores em série com o resistor. De acordo com (LEÃO, 2014) este modelo possui uma característica importante que é a redução da impedância na frequência de ressonância paralela, através de um possível ajuste no banco de capacitor que está no mesmo ramo de resistor.

Os filtros tipo “C” apresentam uma eficiência melhor na redução das perdas para uma frequência fundamental, porém, seu desempenho está entre o de 2ª e 3ª ordem. Tem como característica importante uma elevada suscetibilidade a desvios na frequência fundamental e as variações nos valores dos componentes, e por isso pode ser usado em diversas aplicações nas indústrias.

### 9.1.2 Sintonizado

Os filtros sintonizados são constituídos de elementos R, L e C em série, mas conectados em derivação com a carga, funcionando como um divisor de correntes. Apresenta baixa impedância resistiva para frequência de ressonância. Nas frequências inferiores à de ressonância, eles têm características capacitivas e, em frequências superiores à de ressonância, possuem características indutivas. Na frequência fundamental, funcionam como compensador de reativos (GARCIA, 2014).

Filtros sintonizados são classificados em simples e dupla sintonia. Os filtros simples, também denominados de *shunt* ressonantes, são normalmente os filtros passivos mais usados e, se tornam um caminho de baixa impedância para as harmônicas que se deseja filtrar, desviando-as para o terra.

Segundo Oliveira (2015), estes filtros abrangem, geralmente, as frequências mais baixas considerando as harmônicas ímpares da 3ª a 13ª ordem por apresentarem maiores amplitudes. Traz como vantagem a possibilidade de correção do fator de potência, pois em frequências abaixo da frequência de ressonância estes se comportam como compensadores de reativo, por apresentarem característica capacitiva. Veja exemplo na figura 21.

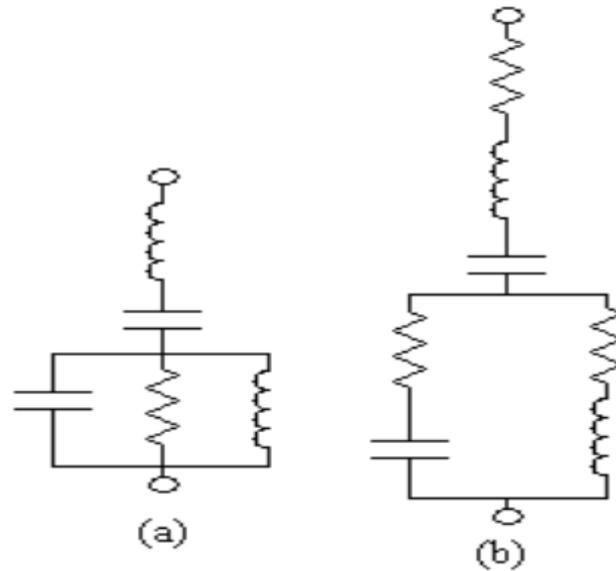
Figura 21 - Filtro Passivo de Sintonia Simples



Fonte: OLIVEIRA, 2015

Os filtros de dupla sintonia podem sintonizar duas frequências ao mesmo tempo, pois nestes casos, as impedâncias são normalmente baixas e isto os torna bastante atraentes considerando o custo benefício.

Figura 22 - Filtros Passivos de Dupla Sintonia



Fonte: OLIVEIRA, 2015

Para estes filtros, os elementos em série sintonizam uma frequência ressonante e, os elementos em paralelo com impedância igual aos elementos serie, sintonizam a segunda frequência.

## 9.2 Filtros Ativos

Conforme descrito no tópico anterior, os filtros passivos são projetados para filtrar uma harmônica ou um conjunto de ordem de harmônicas pré-determinadas. Porém, devido à variação das harmônicas em virtude da não linearidade das cargas conectadas ao barramento, torna-se necessária a utilização de filtros que interpretam estas variações e fazem as correções desejadas para o circuito em tempo real. Se comparados aos filtros passivos, os filtros ativos oferecem melhores características de compensação. Em virtude da severidade da poluição harmônica dos sistemas elétricos e o fato de ser uma solução dinâmica e ajustável, os filtros ativos têm sido foco de inúmeros trabalhos técnicos nos últimos anos (RIBEIRO, 2003).

Filtros ativos são baseados na utilização de conversores CC-CA operando com modulação por largura de pulso (*PWM*), aproveitando sua capacidade de

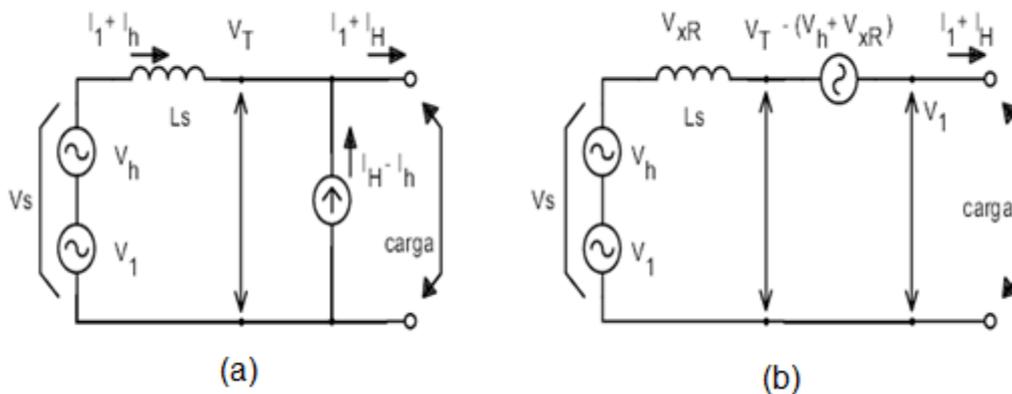
sintetizar tensões e correntes de formas quaisquer, seguindo uma referência específica.

Neste sentido, a utilização de filtros ativos torna-se ideal para estas correções, pois possuem dispositivos de controle digital e componentes passivos associados e podem ser classificados como filtros ativos série ou em derivação.

### 9.2.1 Princípios Básicos dos Filtros Ativos

A representação teórica de filtros ativos perfeitos constitui-se em geradores ideais de corrente e tensão. A figura 23 ilustra o comportamento da filtragem ativa em que uma fonte de alimentação alternada não senoidal, com uma impedância interna  $X_S = \omega L_S$ , alimenta uma carga.

Figura 23 - Filtragem ativa: Geradores ideais de corrente (a); de tensão (b)



Fonte: Ribeiro (2003)

Neste circuito tem-se:

$V_s$  é a tensão da fonte;

$V_1$  é a tensão na frequência fundamental;

$V_h$  é a soma das tensões harmônicas geradas internamente;

$V_T$  é a tensão distorcida, causada pelas tensões harmônicas internas e pela circulação das correntes através da impedância interna da fonte.

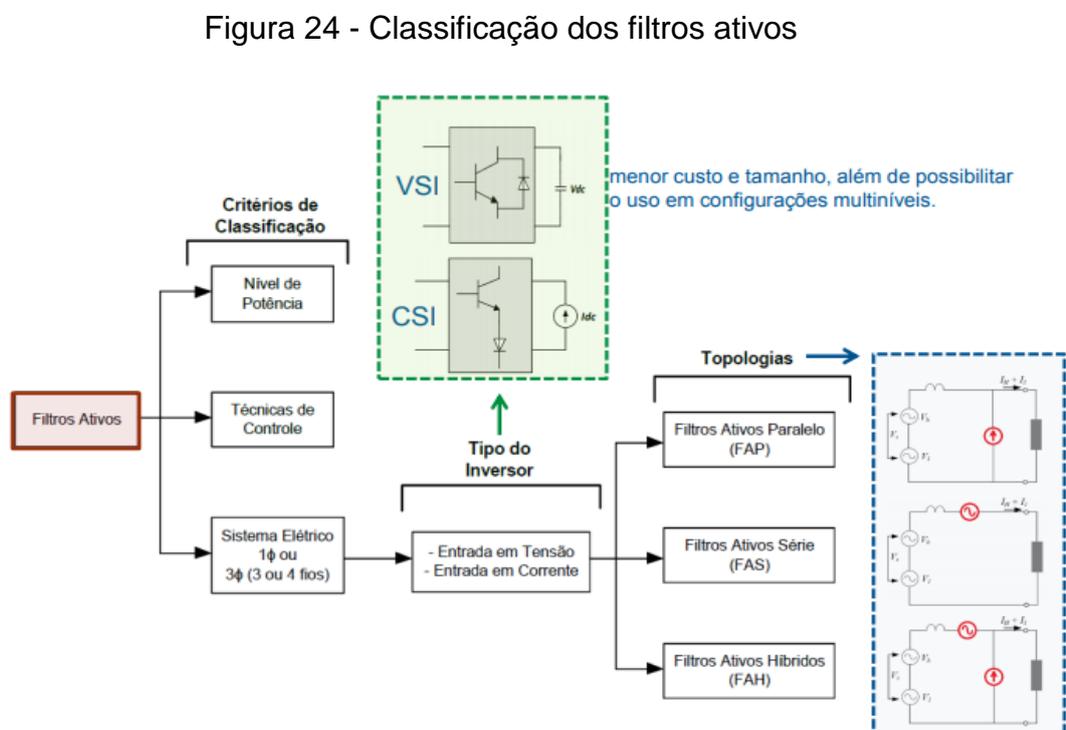
$V_{xR}$  é a tensão ondulatória;

$I_1$  é a corrente devido à frequência fundamental;  
 $I_h$  são todas as correntes harmônicas;

Nestas condições, um filtro ideal mitigará todas as harmônicas de corrente sem afetar o fluxo da corrente fundamental ( $I_1$ ) da carga. O filtro pode, em princípio, eliminar as correntes harmônicas através da injeção de correntes ( $I_H$ ) que irá subtrair com as correntes ( $I_h$ ) entregando a carga uma corrente senoidal perfeita, conforme ilustra a figura 23a. Já para a tensão distorcida ( $v_T$ ) um gerador perfeito pode ser conectado em série, gerando um sinal contrário à tensão harmônica de forma a cancelar estes sinais, entregando a carga uma tensão perfeita ( $V_1$ ), conforme ilustra a figura 23b.

### 9.2.2 Classificação dos Filtros Ativos

Os filtros ativos podem ser classificados sob vários critérios. A figura 24 traz um fluxograma exemplo dessa classificação.



Fonte: Ribeiro (2003)

O primeiro critério está relacionado ao nível de potência. Eles podem ser subdivididos em aplicações de baixa, média e alta potência, < 100 kVA, 100kVA a 10 MVA, > 10 MVA respectivamente.

O segundo critério está relacionado à técnica de controle implementada. São divididas em três estágios. O primeiro refere-se ao condicionamento de sinal, em que as correntes e tensões essenciais são amostradas, isoladas, amplificadas e entregues ao estágio seguinte. No segundo estágio, os sinais de compensação, em termos de níveis de tensões e correntes, são derivados com base nos métodos de controle e nas configurações do filtro ativo. No terceiro estágio, são gerados os sinais de disparo para os elementos do filtro ativo. Esses sinais são gerados por estratégia *PWM*.

O terceiro critério é a classificação dos filtros ativos baseando-se no tipo de alimentação da carga ou sistema, podendo ser monofásico ou trifásico de 3 ou a 4 fios.

Em seguida são utilizados dois tipos de conversores. Num primeiro tipo de conversor, tem-se o CSI (*current source inverter*), que são inversores de fonte de corrente, em que faz-se com que a corrente contínua no seu lado CC assuma um comportamento não senoidal para atender os requisitos de correntes harmônicas, ou seja, o inversor irá injetar um sinal de corrente oposto ao sinal harmônico da rede.

O segundo tipo de conversor, VSI (*voltage source inverter*), dispõe-se, em seu lado CC, de uma tensão contínua obtida através de capacitores. Essa configuração permite ajustar o valor da tensão eficaz de saída eliminando algumas harmônicas da rede.

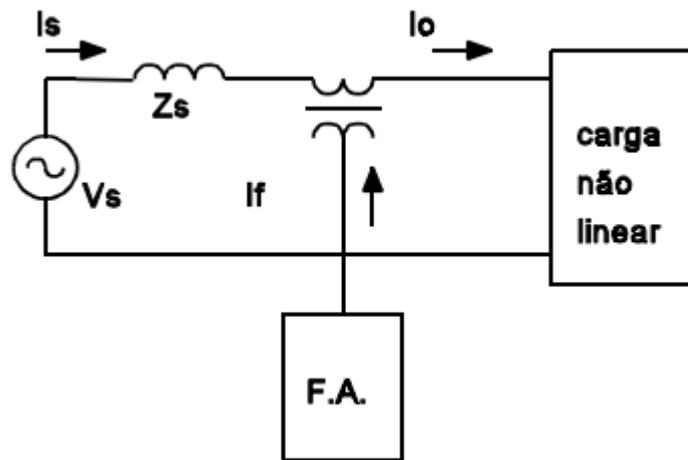
### 9.2.3 Filtro Ativo Série

A configuração para a utilização do filtro ativo série, consiste na conexão deste, entre a fonte e a carga (ligado em série), normalmente, através de um transformador de acoplamento, conforme ilustrado na figura 26. São utilizados para a eliminação de tensões harmônicas com objetivo de regular e balancear as tensões da fonte ou da carga.

A figura 25 representa a configuração de um filtro ativo série para um sistema monofásico. Podemos observar que a tensão distorcida é comparada com um valor de referência (valor que indica o percentual de distorção permitido) e essa diferença

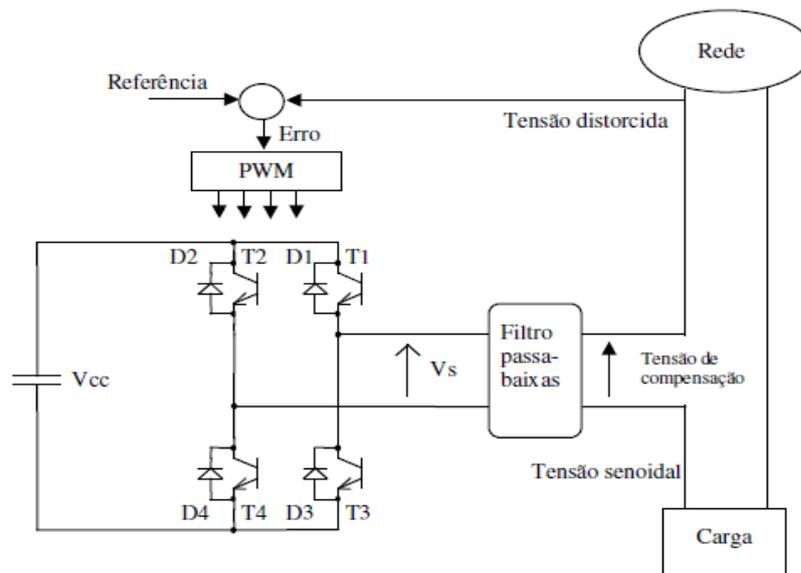
de valor é enviada para o circuito *PWM*, o qual é responsável pela geração do sinal da tensão de compensação que é injetada na rede a fim de atenuar as harmônicas de tensão.

Figura 25 - Filtro Ativo em Série



Fonte: RIBEIRO (2003)

Figura 26 - Filtro ativo série - monofásico



Fonte: Pomilio (2017)

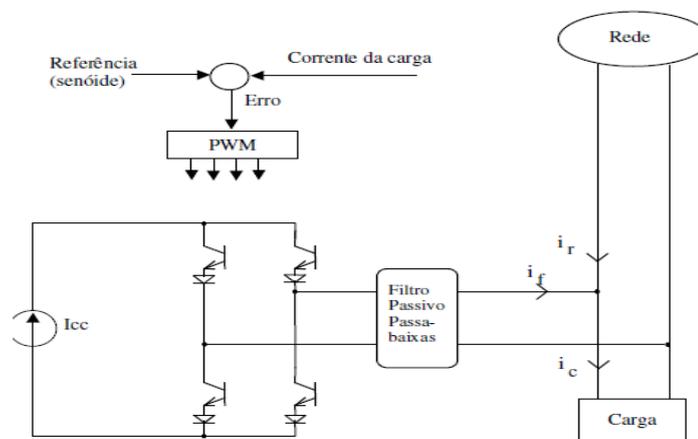
### 9.2.4 Filtro Ativo em Derivação

Na configuração em derivação, os filtros possuem características semelhantes a uma fonte de corrente controlada, com o objetivo de minimizar a distorção harmônica da corrente que circula pela rede elétrica. Além disso, deve-se promover a compensação de potência reativa e balancear as correntes desequilibradas.

Sua funcionalidade é injetar correntes harmônicas no sistema através de transformador de corrente que mede o conteúdo de harmônicos e controla um gerador de corrente que produz uma réplica exata da corrente harmônica, porém de sinal contrário, para que possam proporcionar a anulação das correntes harmônicas indesejadas no ponto de conexão, ou seja, as grandezas elétricas do sistema são analisadas ininterruptamente, fazendo com que os sinais gerados tenham os mesmos módulos e sejam defasados em  $180^\circ$  das harmônicas originais geradas nas cargas, promovendo assim a eliminação delas.

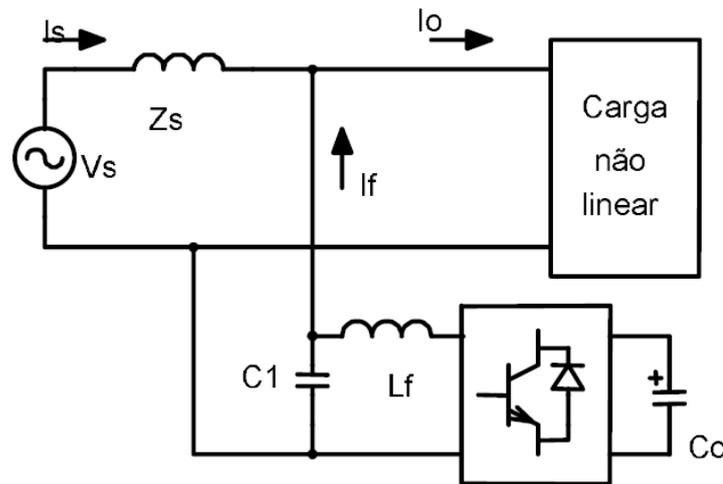
A figura 27 demonstra a configuração de um filtro ativo em derivação monofásico conectado entre a rede elétrica e a carga. Observa-se que a conexão do filtro é feita em derivação. A corrente harmônica é comparada ao valor de referência e enviada para o circuito *PWM* que fará o disparo da corrente desejada para a anulação da corrente harmônica da rede elétrica. Dessa forma, a corrente do filtro  $i_f$  se somará à corrente  $i_r$ , que é a corrente total distorcida, e resultará em uma corrente de carga  $i_c$  mais próxima da fundamental.

Figura 27 - filtro ativo em derivação - monofásico



A representação genérica de um filtro ativo em derivação é representado na figura 28.

Figura 28 - Filtro Ativo em Derivação



Fonte: RIBEIRO (2003)

### 9.3 Filtros Híbridos

Os filtros híbridos são formados pela combinação dos filtros ativos em série ou paralelo com os filtros passivos e tem como finalidade melhorar a capacidade de filtragem de ambos os filtros, explorando ao máximo o que cada um tem de melhor. Este tipo de filtro tem como característica a redução do custo do filtro ativo uma vez que seu dimensionamento é reduzido.

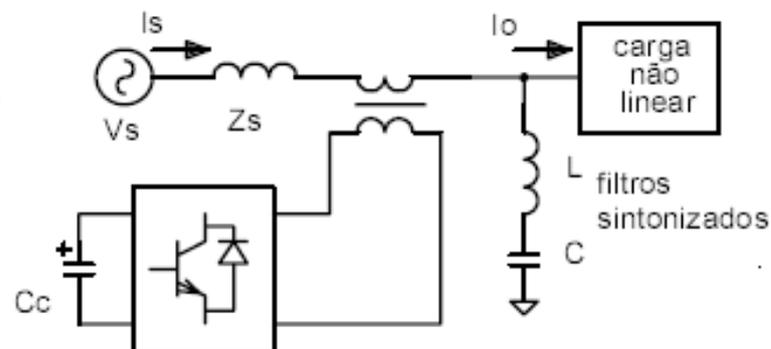
A configuração dos filtros híbridos permite utilizar os filtros passivos para atenuação das harmônicas de maiores amplitudes, enquanto que o ativo atua na eliminação das harmônicas de menores amplitudes. Segundo Ribeiro (2003) estes filtros, juntos, melhoram suas características e encontram aplicação na compensação de corrente harmônicas em sistemas de potência. Nesta configuração, a introdução de pequenas alterações como a adição de um condutor neutro, a divisão em vários níveis das tensões do barramento CC e variações no método de controle estendem a aplicação desses filtros à compensação de

componente fundamental de tensão de sequência negativa e zero, à correção do fator de potência e à regulação da tensão de carga.

Os filtros híbridos têm uma eficiência superior aos filtros passivos e não necessitam da complexidade que detém os filtros ativos, mesmo assim, levando em consideração sua complexidade e seus custos, são considerados mediano.

A figura 29 demonstra a configuração genérica de um filtro híbrido.

Figura 29 - Filtro Híbrido



Fonte: Ribeiro (2003)

## 10 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo fazer um estudo sobre a importância da qualidade de energia elétrica e, especificamente avaliar, através de simulações computacionais, os impactos que as distorções harmônicas podem causar nos motores elétricos de indução. Desta forma, procurou-se apresentar no capítulo inicial os conceitos relativos ao motor de indução como principal requisito para a avaliação do seu comportamento perante aos distúrbios harmônicos em sua alimentação. As simulações foram realizadas obedecendo aos padrões adotados pelas normas PRODIST e *IEEE*.

Foram desconsideradas as harmônicas múltiplas de três, devido estas se somarem no neutro e não interferirem no motor elétrico. As harmônicas pares também foram desconsideradas em virtude de serem raras nas redes elétricas industriais. E as harmônicas superiores a 15ª ordem não têm influência significativa no motor, pois este se torna um caminho de alta impedância para frequências elevadas.

Quando o motor foi avaliado apenas na frequência fundamental, em condições ideais de projeto, as formas de onda das correntes e tensões aparecem perfeitamente senoidais. Para o modelo estudado, a defasagem angular da tensão em relação à corrente indica o fator de potência de 0,82. O valor da corrente obtida na simulação é igual ao valor da corrente nominal do motor, 18,63 A. As perdas resistivas totais somaram 2028 Watts. Os valores encontrados nesta simulação convergem para os dados de placa do motor, ou seja, estão em conformidade com o esperado no projeto.

Nos padrões da PRODIST, quando o motor foi submetido à 5ª harmônica, houve deformações nas formas de onda da tensão e corrente. Um incremento na corrente nominal de 12% levou ao aumento das perdas resistivas para 2307,5 Watts nos enrolamentos do motor, além disso, o fator de potência foi reduzido em 6%. Pequenas oscilações na potência de saída foram observadas. Nos padrões *IEEE*, a corrente de entrada teve seu valor elevado em 8,2% e as perdas resistivas passaram a ser 2211 Watts. O fator de potência decresceu em 3,7% e pequenas oscilações na saída também foram observadas.

Na avaliação da 7ª harmônica, nos padrões PRODIST houve deformações nas formas de onda da tensão e corrente. Um incremento na corrente nominal de

7,8% levou ao aumento das perdas resistivas para 2200,4 Watts nos enrolamentos do motor, além disso, o fator de potência foi reduzido em 3,6%. Pequenas oscilações na potência de saída foram observadas. Nos padrões *IEEE*, a corrente de entrada teve seu valor elevado em 7% e as perdas resistivas passaram a ser 2158,25 Watts. O fator de potência decresceu em 2,4%. A potência de saída não sofreu alteração.

Na 11<sup>a</sup> harmônica, as deformações foram menos acentuadas em relação as inferiores. Nos padrões PRODIST a corrente elevou em 3,6% provocando perdas resistivas totais em 2102 Watts. O fator de potência decresceu em 1,2% e não houve oscilações na potência de saída. Nos padrões *IEEE* as perdas foram mais significativas em relação à PRODIST, uma vez que o valor permitido para a taxa de distorção harmônica é maior na 7<sup>a</sup> harmônica. A corrente elevou-se em 4,2% e as perdas resistivas em 2109,9 Watts. O fator de potência foi reduzido em 1,2% e não houve oscilações de potência na saída.

No somatório das harmônicas de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> incidentes na alimentação do motor as simulações demonstraram que, adotando os padrões PRODIST a corrente do motor elevou-se em 22% acima da nominal levando as perdas resistivas para 2662,7 Watts. O Fator de potência decresceu em 13,5% e oscilações de potência de saída foi observada. Nos padrões *IEEE* a corrente subiu em 21% e as perdas resistivas chegaram a 2528,9 Watts. O fator de potência apresentou redução de 10,2% e oscilações na saída também foram observadas.

Mediante análise das simulações, conclui-se que as distorções harmônicas contribuem para a redução da vida útil do motor elétrico, podendo levar a queima do mesmo devido aumento na corrente, diminui o fator de potência, promove alterações no conjugado de saída e diminui o rendimento do motor. Observa-se que as harmônicas mais próximas à fundamental, especificamente a 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> harmônica, são as que mais influenciam no rendimento do motor, responsáveis por aproximadamente 10% das perdas. Além disso, na hipótese de incidência de várias harmônicas, as perdas resistivas somaram 23,9% às perdas já esperadas e o fator de potência reduziu-se em aproximadamente 13%.

A *IEEE* adota padrões mais conservadores em relação a PRODIST. As simulações comprovaram que o motor apresentou melhor rendimento quando assumidas as restrições impostas pela *IEEE*. Porém, mesmo atendendo as exigências normativas, observa-se que as perdas são bastante significativas e isso

contribuirá para redução de vida útil do motor, baixo fator de potência, aumento no consumo energético e instabilidade operacional de equipamentos acionados por motores.

Diante disso, a utilização de filtros para atenuação das harmônicas irá contribuir para a melhora na qualidade de energia. Estes possuem diversas aplicações. Para sistemas elétricos em que são conhecidas as harmônicas incidentes a utilização de filtros passivos torna mais viável devido seu baixo custo em relação aos filtros ativos. Porém, em sistemas em que há variações de harmônicas a aplicação de filtros ativos se torna mais eficaz, uma vez que estes detectam tais harmônicas em tempo real e injetam sinais de mesma amplitude e fase contrária, de modo a anular os sinais distorcidos. Outra possibilidade é a utilização de filtros híbridos, que unem as características dos filtros passivos e ativos aproveitando a melhor configuração de cada. A utilização de cada filtro varia em função da necessidade de cada processo.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. PRODIST. MÓDULO 8. **Qualidade de Energia Elétrica**. 2016.

BACH, J.; PINTO, L. S. **Avaliação da distorção harmônica em uma indústria alimentícia**. Pato Branco. 2014. 145p.

CARVALHO, R. S. **Análise harmônica em redes de distribuição de energia elétrica**. 2013. 129p. Universidade de São Paulo. São Carlos. Novembro 2013.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5.ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.698p. Ebook.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Itajubá: Editora Prentice-Hall do Brasil. 2003. 284p.

FIGUEIREDO, P. A. **Análise da qualidade da energia em um sistema elétrico de distribuição**. 2004. 171p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos 2004.

FIGUEIREDO, A. A. C. **Análise de modelos para cargas não lineares no estudo trifásico de penetração harmônica**. 2006. 132p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. Fevereiro 2006.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C. **Máquinas elétricas**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.675p.

FREITAS, M. A. A.; ALVARENGA, W. G. S. B. **Modelagem do motor de indução trifásico com partida suave (Soft-Starters) no ambiente MATLAB/SIMULINK**. Ituiutaba. Setembro 2011.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4ª ed. São Paulo: Editora Érica Ltda. 2008. 240p.

FUCHS, E. F. ***Power quality in power systems and electrical machines***. San Diego, California, USA: Elsevier Academic Press, 2008.

GARCIA, F. R. ***Harmônicos em sistemas elétricos de potência***. IESA S/A. Belo Horizonte. 2016. 50p.

IEEE Std. 519-1992. ***Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems***. Abril. 1993.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-3-4. ***Limitation of emission of harmonic current in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A***. Edition 3.0, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-3-6. ***Assessment of emission for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems***. Edition 3.0, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-3-12. ***Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage system with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase***. Edition 3.0, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-3-14. ***Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems***. Edition 3.0, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-4-7. ***General guide on harmonic and interharmonic measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto***. Edition 3.0, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-4-30. ***Power quality measurement methods***. Edition 3.0, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-3-2. ***Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current < 16 A per phase)***. Edition 3.0, 2005.

ISONI, M. **A moderna eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas.** 2004.39p. Curitiba. Abril 2004.

MAMEDE, F.J. **Manual de equipamentos elétricos.** 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2005.

MELO, M.O.B.C. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia. **Produto & Produção**, vol 9, n.3, p.15-25. João Pessoa. Outubro 2008.

NERY, A.; HOPNER, F. S. **Análise de distorções harmônicas em planta industrial modelada por fontes de corrente.** 2016. 118p. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. Novembro 2016.

OLIVEIRA, W. J. N. **Projeto de filtros passivos para a redução de correntes harmônicas na subestação de 2x300kVA da estação elevatória de água do JIQUI.** 2015.143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. Maio 2015.

PADILLA, J. V. **Qualidade de energia elétrica.** 2008. 14p. Disponível em <<https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/qet02-qualidade-energia-eletrica-aula-pratica.pdf> > Acesso em 20 de março de 2019.

PIRES, W. L. **Estudo do comportamento das perdas no ferro em motores de indução alimentados por conversores de frequência.** 2008. 166p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2008.

PIRES, I. A. **Conceitos iniciais:** qualidade de energia e harmônicos. O Setor Elétrico, p. 6, 2010.

PIRES, I. A. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia.** 2006. 157p. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. **Avaliação da qualidade da energia elétrica.** Campinas. 2017. 25p.

PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Harmônicas nas instalações elétricas**. 2001. 65p. PROCOBRE, São Paulo, 2001.

RAMALHETE, Marina P.; SIMONETTI, Domingos S. L. **Aspectos de qualidade de energia elétrica e eficiência energética em motores de indução trifásicos**, Vitória, p. 5, 2009.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron, 1999. 828 p.

RIBEIRO, E. R. **Filtros ativos série para a compensação de harmônicas de tensão**. 2003. 224p. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Fevereiro 2003.

SCOLARI, Bruno S.; CERQUEIRA, Fernando B.; KRAVETZ, Peterson L. **Caracterização dos problemas relativos à qualidade de energia elétrica causados por um forno de aquecimento a indução**. 2013. 118p. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SIMONETTI, D. S. L. **Análise harmônica e inter-harmônica de um forno elétrico a arco**. 2010. 7p. Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo. Dezembro 2010.

SILVA, Marina M. D. **Análise de filtros passivos de harmônicos de conversores CA/CC de seis pulsos**. 2007. 131p. Dissertação de Mestrado - Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

TAVARES, A. **Harmônicos em instalações elétricas**. Engematec.2010.9p. Disponível em <[http://engematec.com.br/site/downloads/harmonicos\\_em\\_Instalacoes\\_eletricas.pdf](http://engematec.com.br/site/downloads/harmonicos_em_Instalacoes_eletricas.pdf)> Acesso em 04 de abril de 2019.

VASCONCELLOS, A. B. D. Eficiência energética e qualidade de energia com a automação de condicionadores de ar. **O Setor Elétrico**, São Paulo, n. 65, p. 6, 2011.