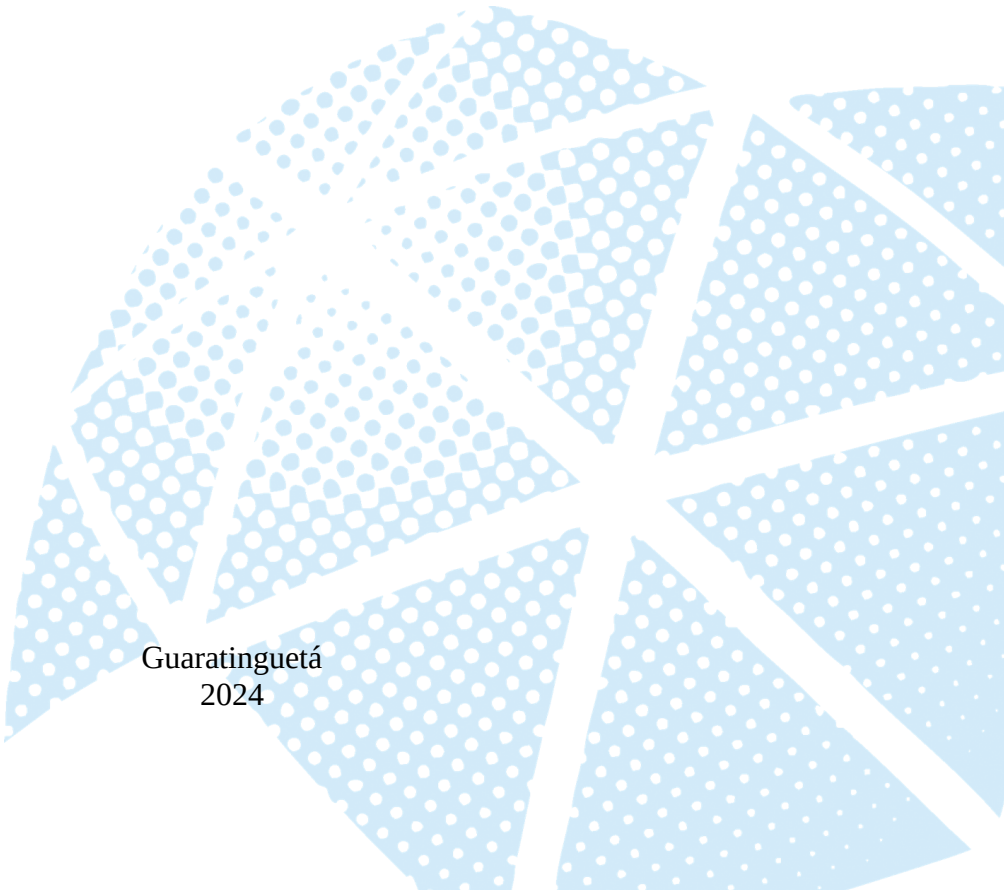
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá - FEG

FERNANDO VICTOR DA SILVA

ESTUDO DE CARGAS NÃO LINEARES NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA



Guaratinguetá
2024

FERNANDO VICTOR DA SILVA

ESTUDO DE CARGAS NÃO LINEARES NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza.

Guaratinguetá
2024

S586e

Silva, Fernando Victor

Estudo de cargas não lineares na qualidade de energia elétrica / Fernando Victor da Silva - Guaratinguetá, 2024.

74 f : il.

Bibliografia: f. 73-74

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Eficiência energética. 3. Distorção elétrica. I. Título.

CDU 621.311

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

FERNANDO VICTOR DA SILVA

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

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

Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Me. CARLOS AUGUSTO MARCONDES DOS SANTOS
UNESP-FEG

Prof.(ª) Dr. (ª) THAIS SANTOS CASTRO
UNESP-FEG

Janeiro de 2024

DADOS CURRICULARES

FERNANDO VICTOR DA SILVA

NASCIMENTO	08/04/1997 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Carlos Alberto da Silva Angelita Lauriano dos Santos Silva
2012/2014	2° Grau (Ensino Médio) ETEC – Professor Alfredo de Barros Santos
2013/2014	Técnico (Eletromecânica) ETEC – Professor Alfredo de Barros Santos
2017/2024	Bacharelado (Engenharia Elétrica) UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho

Com extremo respeito e gratidão que dedico este trabalho a todos que de alguma forma fizeram parte da minha formação pessoal e acadêmica, que me inspiraram ao longo desta jornada. Que este seja um reflexo do nosso esforço conjunto e da nossa busca incessante pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço a minha vida, minha sabedoria, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos meus pais *Angelita Lauriano dos Santos Silva e Carlos Alberto da Silva*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

Às funcionárias (os) da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

Às funcionárias (os) da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein.

RESUMO

Cargas não lineares são uma realidade crescente nas redes elétricas modernas, com a proliferação de dispositivos eletrônicos, inversores e retificadores. Essas cargas geram distorções na forma de onda da corrente e introduzem desafios significativos na qualidade da energia, bem como: distorção de harmônicas, na qual cargas não lineares produzem correntes não senoidais que resultam em harmônicos, prejudicando o funcionamento do equipamento sensíveis e afetando a eficiência do sistema elétrico. Além disso, podemos evidenciar a rápida variação de carga causada por cargas não lineares conhecidos como fenômeno de "*flicker*", que é percebido como variações visuais de luz e é indesejável em aplicações sensíveis. Para isso será realizada uma análise harmônica para quantificar e caracterizar as distorções introduzidas pelas cargas, bem como métodos para mitigar tal fenômeno e consequentemente reduzir os impactos, cumprindo as normas e regulamentações exigidas. Por isso o estudo de cargas não lineares portanto, desempenha um papel fundamental na garantia de qualidade da energia elétrica em sistemas modernos. Compreender os efeitos das cargas, adotar medidas de mitigação, implementando técnicas que diminuam tais efeitos e cumprir as regulamentações são passos críticos para manter a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Cargas Não Lineares; Qualidade da Energia; Distorção Harmônica; Dispositivos Eletrônicos; Impactos Elétricos; Eficiência Energética; "*Flickers*".

ABSTRACT

Non-linear loads are a growing reality in modern electrical networks, fueled by the proliferation of electronic devices, inverters, and rectifiers. These loads generate distortions in the current waveform and introduce significant challenges to power quality, such as Harmonic Distortion, where non-linear loads produce non-sinusoidal currents resulting in harmonics that impair the operation of sensitive equipment and affect the efficiency of the electrical system. Additionally, we can observe the rapid load variations caused by non-linear loads, known as the "flicker" phenomenon, which is perceived as visual light variations and is undesirable in sensitive applications. To address this issue, a harmonic analysis will be conducted to quantify and characterize the distortions introduced by the loads, along with methods to mitigate such phenomena and consequently reduce the impacts, in compliance with the required standards and regulations. That’s why the study of non-linear loads, therefore, plays a fundamental role in ensuring the quality of electrical energy in modern systems. Understanding the effects of loads, implementing mitigation measures through technical methods and complying with regulations are critical steps to maintaining the efficiency and reliability of electrical systems.

KEYWORDS: Nonlinear Loads; Power Quality; Harmonic Distortion; Electronic Devices; Electrical Impacts; Energy Efficiency; Flickers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito de Cargas Lineares: (a) Puramente resistiva, (b) Associação RLC.....23
Figura 2 - Circuito de Carga Não Linear.....24
Figura 3 - Conversão do sinal de Corrente CA para CC.....25
Figura 4 - Conversores C.A. - C.C.....26
Figura 5 - Curva do diodo retificador 26
Figura 6 - Gráfico da forma de onda resultante 27
Figura 7 - Circuito retificador em ponte. (a) e Gráfico da forma de onda de saída. (b).....28
Figura 8 - Funcionamento do circuito retificador de onda completa 29
Figura 9 - Funcionamento do circuito inversor trifásica.....30
Figura 10 - Diagrama de comando do inversor trifásico.....30
Figura 11 - Tensões em um inversor trifásico.....31
Figura 12 - Propagação de harmônicos (gerados por uma carga não linear) em sistemas de energia 32
Figura 13 - Ângulo de Defasagem entre a Tensão e a Corrente 33
Figura 14 - Composição Harmônica da corrente gerada por um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%.....36
Figura 15 - Distorções na forma de onda devido as componentes harmônicas 37
Figura 16 - Exemplo gráfico de distorção da tensão e corrente.....37
Figura 17 - Forma de onda da tensão com DHTv = 10% ± 0,1%.....39
Figura 18 Sistema simulado com transformador, condutores e carga. As impedâncias dos condutores são mostradas em (p.u.) relacionadas ao transformador.....40
Figura 19 - Forma de onda da corrente simulada do sistema. (a) Correntes retificadores. (b) Corrente total no secundário do transformador.....41
Figura 20 - Espectro harmônico da corrente dos retificadores e do transformador.....41
Figura 21 - Gráfico de sinal com flutuações de tensão.....42
Figura 22 - Flutuação de tensão causada pela operação de um forno elétrico a arco (Carga não linear.) 43
Figura 23 - Gráfico das tensões desequilibradas.....44
Figura 24 - Gráfico da tensão de "*notching"* 55
Figura 25 - Potência aparente no secundário do transformador.....67
Figura 26 - Terceiro harmônico da corrente da carga comercial 68

Figura 27 - Efeito da compensação de reativos em rede predominantemente residencial....69
Figura 28 - Aumento na tensão junto ao transformador com compensação capacitiva.....69
Figura 29 - DHT da tensão antes e após a instalação do banco capacitivo.....70
Figura 30 - Espectro da corrente no transformador antes e depois da instalação do banco de capacitores 71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais vantagens e desvantagens dos filtros Passivos 56
Quadro 2 - Principais vantagens e desvantagens dos reatores de linha 56
Quadro 3 - Principais vantagens e desvantagens dos transformadores especiais 57
Quadro 4 - Principais vantagens e desvantagens dos supressores de ressonância 57
Quadro 5 - Principais vantagens e desvantagens das baterias de Capacitores e Indutores ...57
Quadro 6 - Principais vantagens e desvantagens da sintonia de Fator de Potência 58
Quadro 7 - Principais vantagens e desvantagens dos filtros de Harmônicos Distribuídos ...58
Quadro 8 - Principais vantagens e desvantagens de como usar dispositivos com menor distorções harmônicas.....59
Quadro 9 - Principais vantagens e desvantagens dos filtros ativos.....59
Quadro 10 - Principais vantagens e desvantagens dos conversores estáticos ativos 60
Quadro 11 - Principais vantagens e desvantagens dos inversores PWM.....60
Quadro 12 - Principais vantagens e desvantagens do controle de fator de potência ativo....60
Quadro 13 - Principais vantagens e desvantagens dos sistemas híbridos ativos.....61
Quadro 14 - Principais vantagens e desvantagens dos sistemas de controle adaptativos 61
Quadro 15 - Principais vantagens e desvantagens da injeção de corrente hibrida.....61
Quadro 16 - Principais vantagens e desvantagens do uso de tecnologia de comutação suave.....62
Quadro 17 - Principais vantagens e desvantagens de algoritmos de controle avançado.....62
Quadro 18 - Principais vantagens e desvantagens de monitoramento e análise em tempo real.....63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias e características de fenômenos eletromagnéticos em sistemas de potencias como definido por IEEE-1159 21
Tabela 2 - Medições efetuadas em um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de uma distorção harmônica total de tensão de 5% 36
Tabela 3 - Distúrbios Elétricos mais comuns.....50
Tabela 4 - Limites de distorção da corrente para unidades consumidoras (Valores em % da corrente IL) 53
Tabela 5 - Limites de distorção de tensão para o sistema.....54
Tabela 6 - Limites para recortes de tensão.....54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LED	Diodo Emissor de Luz
DHT	Distorção Harmônica Total
RMS	Raiz do Quadrado Médio
ANSI	Instituto Nacional de Padrões Americano
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Prodist	Procedimentos de Distribuição
NEMA	Associação Nacional dos Fabricantes de Eletricidade
EMI	Interferência Eletromagnética
CLP	Controlador Lógico Programável
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
DFT	Transformada Discreta de Fourier

LISTA DE SÍMBOLOS

p.u.	por unidade
ms	milissegundos
Hz	frequência
V	tensão elétrica
A	corrente elétrica
W	potência ativa
VA	potência aparente
Var	potência reativa
Ω	resistência elétrica
CC	corrente contínua
CA	corrente alternada
cos	cosseno
ω	frequência angular
°	graus
h	ordem da harmônica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 OBJETIVOS 18
1.1.1 Objetivos específicos 18
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO 19
2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA 20
2.1 CONCEITO TEÓRICO 21
2.2 CARGAS ELÉTRICAS 22
2.2.1 Cargas elétricas lineares 23
2.2.2 Cargas elétricas não lineares 24
2.2.2.1 Retificadores 25
2.2.2.1.1 Retificadores de meia onda 27
2.2.2.1.2 Retificadores de onda completa 28
2.2.2.2 Inversores 29
2.2.2.2.1 Inversor trifásico 29
2.3 COMO AS CARGAS NÃO LINEARES INTRODUZEM DISTORÇÕES HARMÔNICAS 32
2.4 COMO O FATOR DE POTÊNCIA VARIA EM SISTEMAS COM CARGAS NÃO LINEARES 33
2.5 DISTURBIOS ELÉTRICOS 34
2.5.1 Problemas associados à distorção harmônica 34
2.5.2 Distorção harmônica de tensão e corrente 38
2.5.3 Cancelamento de harmônica 39
2.5.4 Flutuações de tensões e "*flickers*" 42
2.5.5 Desequilíbrio de tensão 44
2.6 IMPACTOS DE EQUIPAMENTOS SENSÍVEIS E EFICIÊNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO 46
2.6.1 Danos a equipamentos sensíveis. 46
2.6.2 Variações de tensão e corrente 47
2.6.3 Perda de eficiência energética no sistema elétrico 48
2.6.4 Impactos nos sistemas de controle. 49
2.7 LIMITES ACEITAVEIS PARA DISTUBRIOS ELÉTRICOS 49

2.8 NORMAS PARA DISTORÇÃO HARMONICAS 51
2.8.1 Recomendação IEEE std. 519 51
2.9 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO 55
2.9.1 Métodos passivos 56
2.9.2 Métodos ativos 59
2.10 EFICÁCIA E LIMITAÇÕES 63
3 ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO: REDE COMERCIAL E INDUSTRIAL SECUNDARIA 67
3.1 DISCUSSÃO DA ANÁLISE DA POTÊNCIA E CORRENTE 67
3.2 COMPENSAÇÃO CAPACITIVAS EM REDES COMERCIAIS 68
4 CONCLUSÕES FINAIS 72
REFERÊNCIAS 73

1 INTRODUÇÃO

As cargas não lineares, inerentes aos dispositivos eletrônicos contemporâneos, emergem como um desafio significativo na manutenção da qualidade da energia elétrica nos sistemas de potência. A complexidade dessa problemática supera a relação linear entre tensão e corrente, introduzindo uma série de distorções harmônicas que reverberam por todo o sistema.

A distorção harmônica, gerada pelos processos de comutação abrupta presentes em dispositivos eletrônicos não lineares, desencadeia efeitos prejudiciais em diversos níveis.

Em uma análise aprofundada, observa-se que essas distorções comprometem a eficiência energética ao contribuir para perdas adicionais nos condutores do sistema. As correntes harmônicas, ao circular pelos condutores, induzem resistências adicionais, gerando dissipação de energia na forma de calor e aumentando as perdas Joule. Este fenômeno não apenas reduz a eficiência global do sistema, mas também pode levar a sobreaquecimento dos condutores, questionando a integridade estrutural e térmica desses componentes importantes. Outra implicação crítica está na sobrecarga imposta aos equipamentos sensíveis.

Transformadores e capacitores, componentes essenciais dos sistemas elétricos, enfrentam um estresse adicional devido às correntes harmônicas. O aumento da corrente eficaz resultante dessas distorções pode acelerar o envelhecimento de isolamentos e enrolamentos, reduzindo a vida útil desses dispositivos e impondo custos em termos de manutenção preventiva.

No âmbito da qualidade da tensão, as correntes harmônicas introduzem flutuações indesejadas, impactando diretamente a estabilidade do sistema. Quedas momentâneas de tensão e oscilações podem prejudicar o desempenho de equipamentos sensíveis, como sistemas de controle e dispositivos eletrônicos avançados, comprometendo a confiabilidade operacional. Diante desses desafios, estratégias de mitigação tornam-se necessárias para manter a integridade operacional dos sistemas elétricos. Filtros de harmônicas, com a capacidade de seletivamente atenuar componentes indesejados, apresentam-se como uma abordagem eficaz. Além disso, a correção do fator de potência surge como uma ferramenta valiosa para reduzir a presença de correntes harmônicas, melhorando a eficiência energética global do sistema.

Segundo Weimin wu e Frede blaabjerg (2017), em um contexto mais amplo, a gestão proativa das cargas não lineares exige uma abordagem integral no projeto elétrico. A seleção

criteriosa de equipamentos, considerando as características de comutação dos dispositivos, e a implementação de práticas de projeto voltadas para a redução de distorções harmônicas emergem como aspectos fundamentais.

Em síntese, o estudo realizado contribuirá para compreender e abordar os impactos das cargas não lineares na qualidade da energia elétrica são imperativos para garantir a operação eficiente e duradoura dos sistemas elétricos modernos e dinâmico da engenharia elétrica.

1.1 OBJETIVOS

Compreender e explorar principais características e comportamentos das cargas não lineares na rede elétrica e como eles afetam a qualidade da energia elétrica, analisando os efeitos e o impacto das cargas não lineares na rede elétrica em termos de harmônicas, distorções de tensão, desequilíbrio de carga, "*flicker*", entre outros parâmetros, propondo soluções e medidas para minimizar os impactos das cargas não lineares, além de desenvolver estratégias e sugerir medidas para reduzir os efeitos negativos. E assim, ser capaz de fornecer recomendações para a gestão eficiente da qualidade de energia elétrica em presença de cargas não lineares com base nos resultados obtidos e apresentar recomendações práticas para aprimorar a gestão, seja por meio de políticas, práticas operacionais ou regulamentações.

1.1.1 Objetivos específicos

Analisar e compreender os conceitos fundamentais relacionados à qualidade de energia elétrica, incluindo parâmetros de qualidade, normas e regulamentações aplicáveis.

Identificar e caracterizar as principais cargas não lineares presentes nos sistemas elétricos.

Elaborar recomendações e diretrizes práticas para o setor elétrico e discutir as tendências futuras no campo da qualidade de energia e as perspectivas de desenvolvimento de tecnologias, visando a melhoria da qualidade de energia elétrica em sistemas com cargas não lineares.

1.2 ESTRUTURA E METODOLOGIA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Este trabalho de graduação é constituído de quatro capítulos, na qual: o primeiro capítulo apresenta a introdução os objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho de graduação.

Já o segundo capítulo descreve sobre a qualidade de energia elétrica para o sistema elétrico de potência abordando algumas principais cargas não lineares e os problemas associados a ela. Como elas introduzem harmônicos no sistema apresentando os principais distúrbios e como isso impacta os equipamentos.

No terceiro capítulo será analisado um estudo de caso de uma rede com consumidores comerciais e industriais secundaria curta com alto nível de presença de cargas não lineares instaladas, realizada pelo departamento de sistemas e energias da universidade de campinas (UNICAMP).

E por fim, no quarto capítulo será feito comentários e conclusões finais a respeito de todo o estudo e do trabalho de modo geral.

Para isso, foram utilizados como referência livros, divididos em análise de sistemas de potência, livros que abordam sobre o tema de qualidade de energia elétrica e outras normas técnicas que abordaram a temática. Além disso, artigos científicos sobre a temática foram utilizados como elemento base.

Etapa coleta de dados:

a) Leitura Exploratória dos pontos principais dos materiais selecionado de forma rápida e objetiva para verificar se a obra consultada é de interesse para o trabalho.

b) Leitura Seletiva mais aprofundada das partes que realmente interessam.

c) Registro das informações extraídas das fontes em instrumento específico (autores, ano, método, resultados e conclusões).

E por fim a etapa de discussão dos resultados da análise do estudo de caso obtidos por um experimento realizados pelos alunos do departamento de sistemas e energias da universidade de campinas

2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

No cenário atual do setor elétrico, destaca-se um aspecto relevante que demanda atenção especial por parte dos profissionais: a alteração no perfil de carga dos consumidores e as variações na forma de onda da corrente gerada. Cargas não lineares, devido à sua natureza e aos dispositivos utilizados, geram distorções nas tensões e correntes das barras de alimentação, causando perturbações significativas no sistema e podendo resultar em falhas e danos nos equipamentos elétricos, afetando a qualidade do produto fornecido aos consumidores finais.

A análise da qualidade da energia elétrica ganha destaque, com atenção especial à penetração harmônica, que examina as origens e consequências das tensões e correntes harmônicas no sistema de fornecimento e distribuição. Equipamentos eletrônicos, presentes em diversas faixas de tensão, desde linhas de transmissão até circuitos de baixa tensão nas instalações dos usuários finais, contribuem para a injeção harmônica no sistema, tornando-se um fator considerável.

A ausência ou a qualidade deficiente de energia, impacta indiscriminadamente empresas de energia, consumidores e fabricantes de dispositivos. Agências governamentais de regulação têm o papel de coordenar a relação entre todos os participantes no sistema elétrico.

Os fenômenos associados à qualidade da energia elétrica assumem relevância global para empresas concessionárias e consumidores. A preocupação crescente com a distorção de tensão causada por cargas não lineares conectadas ao sistema de fornecimento elétrico é evidente. Planejadores de sistemas de potência necessitam de métodos preditivos para antecipar e mitigar problemas decorrentes das harmônicas.

Com a proliferação do uso de computadores pessoais e o aumento de cargas elétricas controladas por dispositivos de eletrônica de potência, as correntes harmônicas injetadas e a tensão distorcida resultante são desafios significativos à qualidade de energia.

O foco na eficiência do sistema de potência impulsiona o uso crescente de capacitores shunt, que podem gerar ressonância e amplificar tensões harmônicas. Portanto, filtros harmônicos são necessários em pontos específicos do sistema de potência para minimizar as distorções harmônicas.

O conhecimento preciso das magnitudes das tensões e correntes harmônicas torna-se crucial devido aos efeitos adversos provocados por cargas não lineares em outros

equipamentos dos consumidores ou unidades consumidoras adicionais. Distúrbios nos níveis de tensão, na frequência característica, e formas de onda podem resultar em problemas no sistema elétrico de potência. Muitas questões relacionadas à qualidade da energia estão vinculadas aos dispositivos e estruturas que empregam eletrônica de potência.

A Tabela 1 apresenta tipos de distúrbios à forma de onda da tensão de alimentação, classificados com base em características de duração, tipo de ocorrência e áreas de manifestação.

Tabela 1 – Categorias e características de fenômenos eletromagnéticos em sistemas de potencias como definido por IEEE-1159.

Categorias		Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude de Tensão Típica
1. Transitório	1.1 Impulso			
	nanosegundo	aumento de 5 ns	< 50 ns	
	microssegundo	aumento de 1 us	50 ns – 1 ms	
	milissegundo	aumento de 0.1 ms	> 1 ms	
	1.2 Oscilação			
	baixa frequência	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
	média frequência	5 – 500 kHz	20 us	0 – 8 pu
	alta frequência	0.5 – 5 MHz	5 us	0 – 4 pu
2. Variação de Curta Duração	2.1 Instantâneo			
	interrupção		0.5 – 30 ciclos	< 0.1 pu
	sag		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
	swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
	2.2 Momentâneo			
	interrupção		0.5 – 3 s	< 0.1 pu
	sag		30 ms – 3 s	0.1 – 0.9 pu
	swell		30 ms – 3 s	1.1 – 1.4 pu
	2.3 Temporário			
	interrupção		3 s – 1 min	< 0.1 pu
	sag		3 s – 1 min	0.1 – 0.9 pu
	swell		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
3. Variação de Longa Duração	3.1 Interrupção Sustentada		>1 min	0.0 pu
	3.2 Sob Tensão		>1 min	0.8 – 0.9 pu
	3.3 Sobre Tensão		>1 min	1.1 – 1.2 pu
4. Desbalanceamento de Tensão			estável	0.5 – 2 %
5. Distorção da Forma de Onda	5.1 DC offset		estável	0 – 0.1 %
	5.2 Harmônicos	0 – 100 th	estável	0 – 0.2 %
	5.3 Inter harmônicos	0 – 6 Hz	estável	0 – 2 %
	5.4 Notching		estável	
	5.5 Ruídos	Banda Larga	estável	0 – 1 %
6. Flutuações de Tensão		< 25 Hz	estável	0.1 – 7 %
7. Variações de Frequência de Potência			10 s	

Fonte: Adaptado de Mohammad A. S. Masoum e Ewald F. Fuchs. (2015)

2.1 CONCEITO TEÓRICO

A definição de qualidade da energia elétrica tornou-se uma parte importante dos sistemas de energia e das máquinas elétricas. O tema tem atraído a atenção de muitas universidades e indústrias, e foram publicados vários livros neste domínio relativamente novo. Apesar de importantes trabalhos, artigos e livros publicados na área da qualidade da energia elétrica, a sua definição não foi universalmente aceita.

No entanto, muitos aceitam que é um aspeto muito importante, com impactos diretos na eficiência, segurança e confiabilidade. Várias fontes utilizam o termo "qualidade da energia" com significado diferente. Pode ser utilizado também como sinônimo de "confiabilidade de fornecimento" e "qualidade do serviço e consumo". A julgar pelas diferentes definições.

Segundo Mohammad e Ewald (2015) a qualidade da energia elétrica, geralmente pode ser definida como a qualidade da tensão e/ou da corrente medida no barramento necessárias para manter uma forma de onda senoidal da tensão e frequência nominais. Esta definição inclui todos os fenômenos momentâneos e em estado estacionário.

2.2 CARGAS ELÉTRICAS

No contexto do sistema elétrico atual, as cargas elétricas desempenham um papel importante, apresentando uma diversidade de tipos e características que influenciam diretamente o desempenho e a estabilidade do sistema. As cargas elétricas podem ser classificadas como lineares ou não lineares, dependendo de sua constituição, forma de onda de corrente gerada e impacto no sistema.

As cargas lineares, compostas principalmente por resistores, capacitores e indutores, apresentam um comportamento previsível, onde a corrente é proporcional à tensão. Por outro lado, as cargas não lineares, como dispositivos eletrônicos de potência, introduzem distorções harmônicas na forma de onda da corrente, podendo resultar em desafios significativos de qualidade de energia.

Entender a natureza das cargas elétricas é essencial operar sistemas elétricos eficientes e confiáveis. O conhecimento das características específicas de cada carga permite a implementação de estratégias adequadas de compensação de potência reativa e a adoção de medidas para diminuir as distorções harmônicas, garantindo assim a qualidade e estabilidade do fornecimento de energia elétrica. O gerenciamento eficaz das cargas elétricas contribui para a otimização do sistema, minimizando perdas, reduzindo custos operacionais e promovendo um funcionamento sustentável e eficiente do sistema elétrico.

2.2.1 Cargas elétricas lineares

A carga elétrica linear é caracterizada por manter uma impedância de carga praticamente constante durante o ciclo da tensão aplicada, quando em operação contínua.

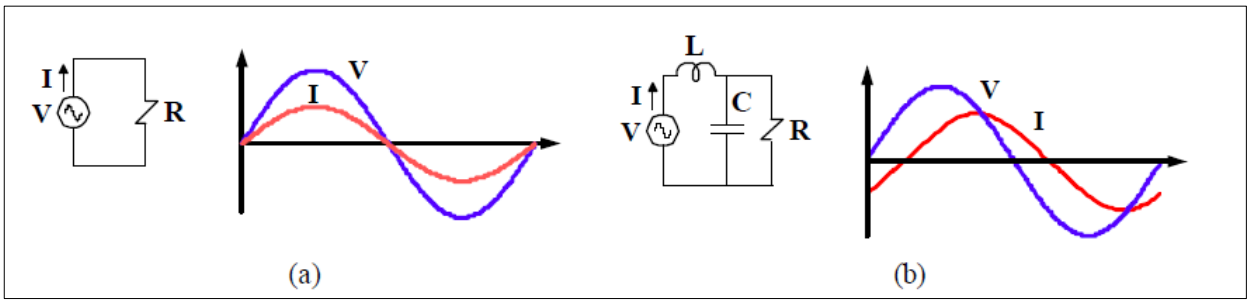
As cargas lineares são constituídas exclusivamente por componentes passivos, como resistores, capacitores e indutores, ou por uma combinação destes elementos, de acordo com a figura 1. Esses componentes não exercem uma influência direta na distorção da forma de onda da tensão, o que significa que a forma de onda da corrente refletirá a forma de onda da tensão, exibindo as mesmas distorções harmônicas presentes na tensão. Pode ocorrer uma defasagem angular na presença de elementos indutivos e/ou capacitivos, mas eles não alteram diretamente a forma da onda da tensão.

Assim ao analisarmos sistema elétrico de potência, é comum abordarmos os conceitos de potência aparente, ativa e reativa, expressos em [VA], [W] e [Var], respectivamente. O triângulo de potências, acompanhado desses conceitos, emerge como uma ferramenta que avalia e quantifica as diversas componentes da potência elétrica.

Em linhas gerais, essas ideias são facilmente compreensíveis no contexto de sistemas ou circuitos elétricos lineares.

Ao considerar que a potência aparente é o resultado do produto dos valores eficazes de tensão e corrente de um dipolo em um circuito linear, representando assim a composição das parcelas de potência ativa e reativa, é possível analisar as diferenças significativas, especialmente quando observados do ponto de vista da potência elétrica.

Figura 1 – Circuito de Cargas Lineares: (a) Puramente resistiva, (b) Associação RLC.



Fonte: Adaptado de Alfredo A. C. Figueiredo (2006).

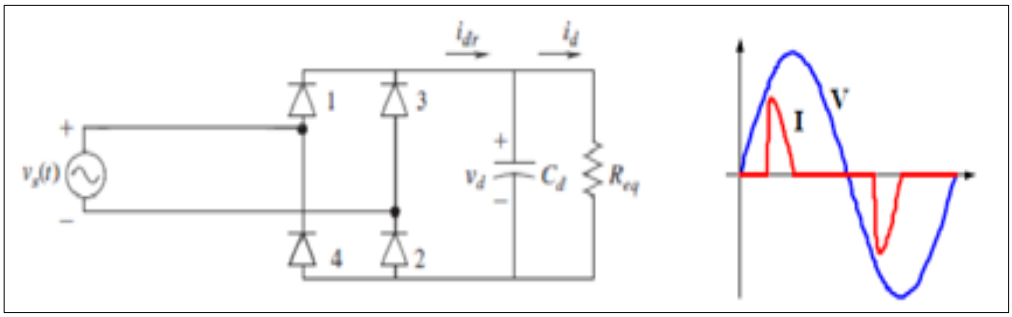
2.2.2 Cargas elétricas não lineares

São denominadas cargas elétricas não lineares aquelas que conduzem uma corrente com características não senoidais, podendo apresentar descontinuidades ou variações consideráveis na impedância equivalente ao longo do ciclo da forma de onda da tensão de entrada. Essas cargas podem ser compostas por dispositivos de eletrônica de potência, incluindo elementos ativos e passivos do tipo "semicondutores", e por elementos passivos RLC (resistivos, indutivos e capacitivos), que podem ou não desempenhar o papel de armazenadores de energia.

Por isso, quando nos deparamos com circuitos elétricos que incorporam dispositivos não-lineares algumas características específicas surgem em comparação com circuitos que contêm apenas dispositivos lineares. Como por exemplo uma resposta não linear entre a corrente e a tensão, já que dispositivos não-lineares não segue uma relação linear simples, como acontece em resistores. Isso significa que a resposta do dispositivo não-linear não é proporcional à magnitude da tensão ou corrente aplicada; geração de harmônicos, levando a componentes de frequência múltipla da frequência fundamental; possibilidades de descontinuidade, entre outros.

Um retificador monofásico de onda completa a diodos e filtro capacitivo pode ser apresentado como um modelo de circuito não linear, como mostra a figura 2. Assim como a corrente retirada do sistema de alimentação, observa-se o padrão de onda não senoidal (com descontinuidades) e a considerável distorção em relação à forma de onda senoidal da tensão de alimentação.

Figura 2 – Circuito de Carga Não Linear.



Fonte: Adaptado de Alfredo A. C. Figueiredo (2006).

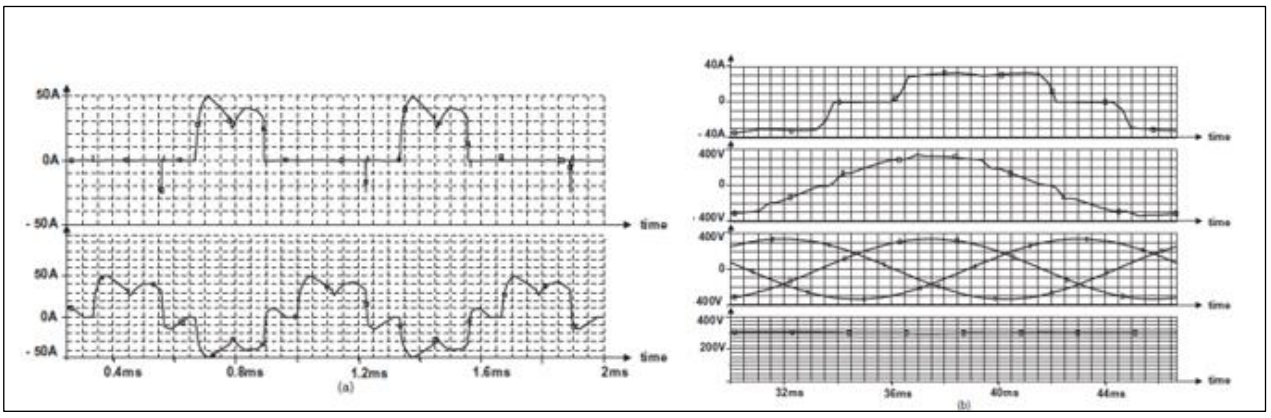
A influência da distorção harmônica na tensão de alimentação reflete-se nas características da corrente e nas harmônicas geradas por cargas elétricas não lineares. Estes efeitos são condicionados pela operação específica dessas cargas, bem como pelos componentes presentes no circuito de controle.

2.2.2.1 Retificadores

Os retificadores são dispositivos eletrônicos que convertem corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), desempenhando um papel crucial na alimentação de eletrônicos, motores e sistemas de energia em geral. Eles desempenham um papel muito importante em diversas aplicações, desde fontes de alimentação de dispositivos eletrônicos até sistemas de energia industriais. Porém os retificadores controlados por tiristores ou diodos, introduzem harmônicos na corrente e na tensão da linha, o que pode ter impactos adversos na eficiência do sistema e na qualidade da energia. Os retificadores de carga não linear geralmente são encontrados em dispositivos eletrônicos modernos, como computadores, televisores, eletrodomésticos com fontes de alimentação chaveadas, entre outros.

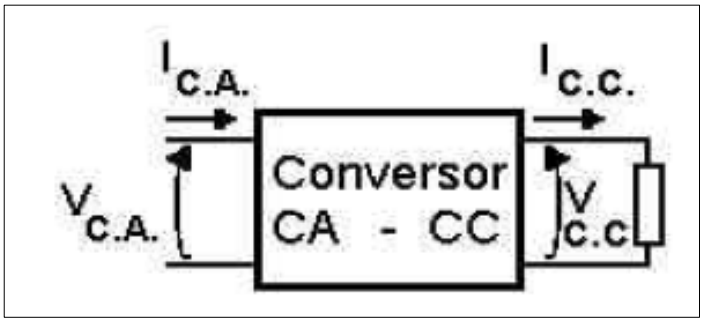
Para obtenção de corrente contínua conforme a figura 3 em pequena escala, como na alimentação de equipamentos eletrônicos a conversão se faz por meio dos circuitos retificadores, que em muitos casos começam a substituir os conversores eletromecânicos (motor-gerador) até para elevadas potências, devido ao alto rendimento que apresentam, como mostra a figura 4.

Figura 3 – Conversão do sinal de Corrente CA para CC.



Fonte: Adaptado de Rogério F. (2004)

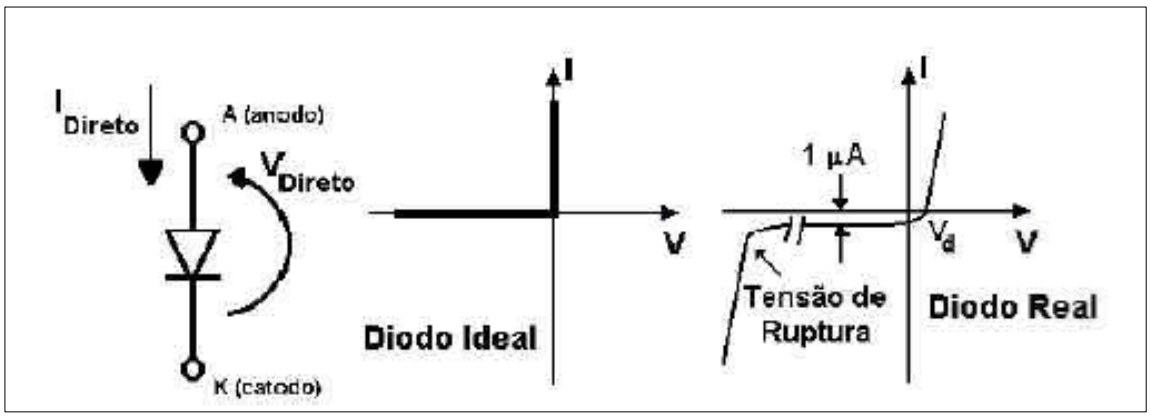
Figura 4 - Conversores C.A. - C.C.



Fonte: Adaptado de Rogério F. (2004)

Na figura 5 tem-se o símbolo de um diodo semicondutor bem como as curvas características de um diodo ideal e de um diodo real. É evidente que o fator de escala para as correntes no sentido negativo foi exagerado, e em uma análise inicial, a queda de tensão no sentido direto pode ser desprezada na maioria dos circuitos. A ruptura da junção do diodo, no entanto, ocorre em tensões reversas elevadas, tornando inapropriado o uso do diodo para fins de retificação nesses casos. Por exemplo, ao lidar com 200 V eficazes (pico de 280 V), é aconselhável empregar um diodo com uma tensão de ruptura mínima de 300 V para garantir a prevenção da ruptura.

Figura 5 – Curva do Diodo Retificador.



Fonte: Adaptado de Rogério F. (2004)

2.2.2.1.1 Retificadores de meia onda.

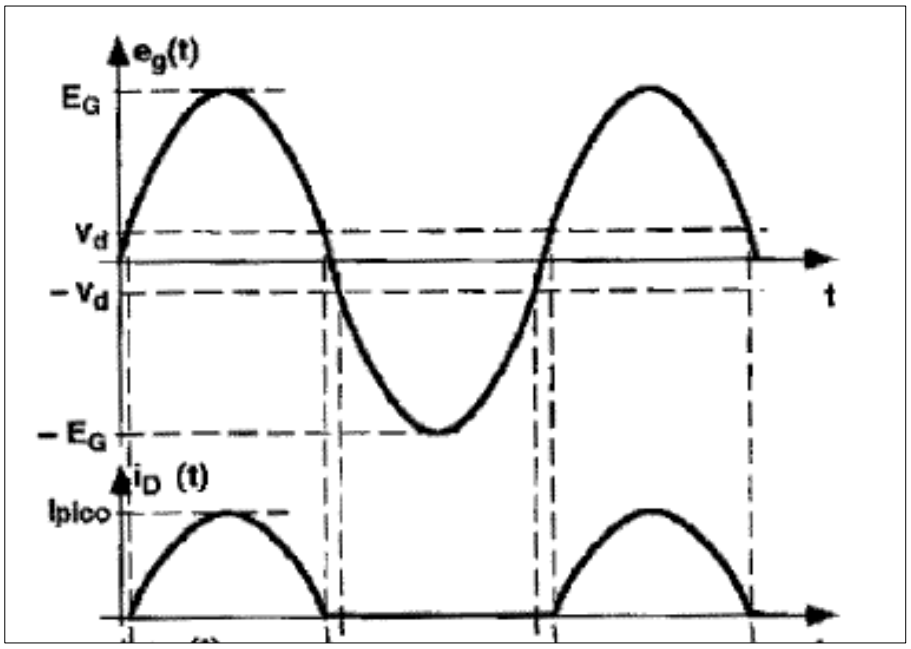
Durante a fase positiva da onda de entrada, o diodo conduz, permitindo que a corrente flua através dele no sentido direto. A corrente que passa pelo diodo durante essa meia onda é direcionada para o resistor de carga (ou carga conectada ao circuito).

Já durante a fase negativa da onda de entrada, o diodo bloqueia o fluxo da corrente no sentido reverso. Nesse período, não há corrente que flui através do circuito.

Ao final do processo, apenas uma metade da onda de entrada é aproveitada para produzir uma corrente contínua na carga. A outra metade da onda de entrada é bloqueada, resultando em uma utilização efetiva de apenas 50% da energia disponível na forma de onda CA.

Através dos gráficos da figura 6, pode-se perceber o processo de retificação da tensão senoidal de entrada, na qual o semiciclo negativo devido ao fluxo de corrente no sentido reverso, a tensão é nula.

Figura 6 - Gráfico da forma de onda resultante.

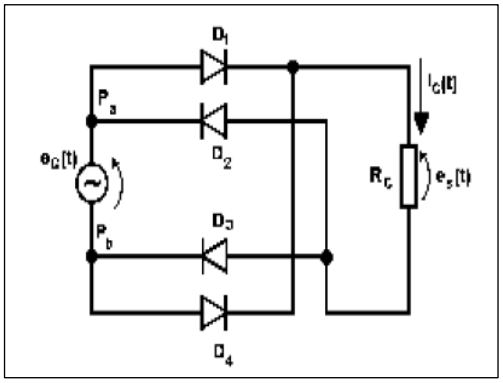


Fonte: Adaptado de Rogério F. (2004)

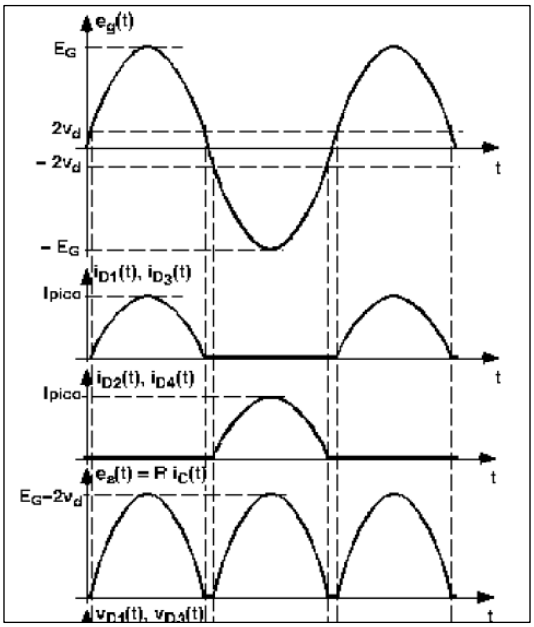
2.2.2.1.2 Retificadores de onda completa.

O circuito da figura 7 (a) permite condução em R_C nos dois semiciclos da senoide, o que significa que para uma mesma tensão de entrada $e_G(t)$ a corrente média é o dobro agora, como mostra o gráfico da figura 7 (b).

Figura 7 – Circuito retificador em ponte. (a) e Gráfico da forma de onda de saída. (b).



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Rogério F. (2004)

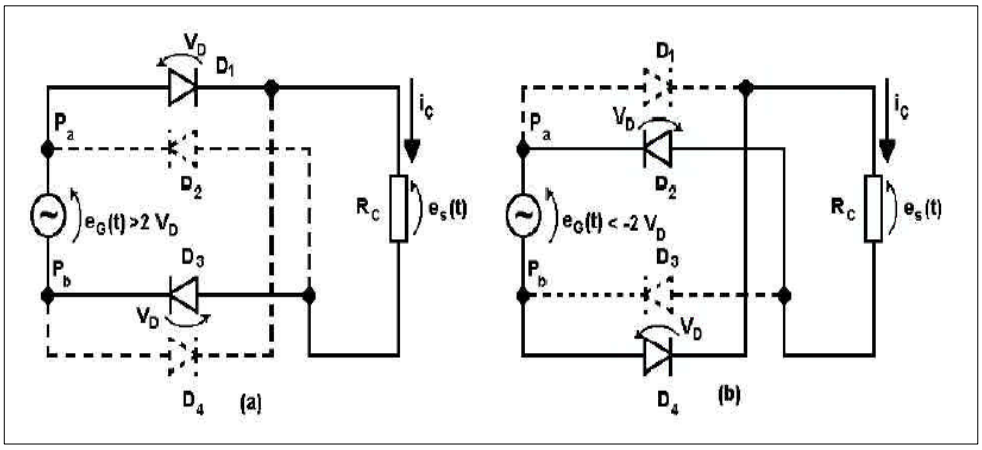
Quando $e_G(t)$ > 2Vd, os diodos D1 e D3 conduzem, o que automaticamente bloqueia D2 e D4. Ou seja, D1 cria um caminho de corrente entre o terminal superior de R_C e o potencial Pa e D3 cria um caminho de corrente entre R_C e o potencial Pb.

Portanto, na resistência R_C temos uma tensão es(t) = ($e_G(t)$ – 2Vd) e a corrente será dada por ($e_G(t)$ – 2Vd) / R_C. Quando –2vd < $e_G(t)$ < 2vd, nenhum diodo conduz, assim, I_C (t)=0.

Quando $e_G(t)$ < –2Vd, isto é, quando P_a < (P_b – 2Vd), o diodo D2 conduz bloqueando D1 e o diodo D4 conduz também, bloqueando D3. A corrente passa pelo caminho formado por D2, R_C e D4, passando pela resistência no mesmo sentido que o anterior. A

condução ilustrando o funcionamento do retificador de onda completa pode ser observado conforme mostra o esquema da figura 8.

Figura 8 – Funcionamento do circuito retificador de onda completa.



Fonte: Adaptado de Rogério F. (2004)

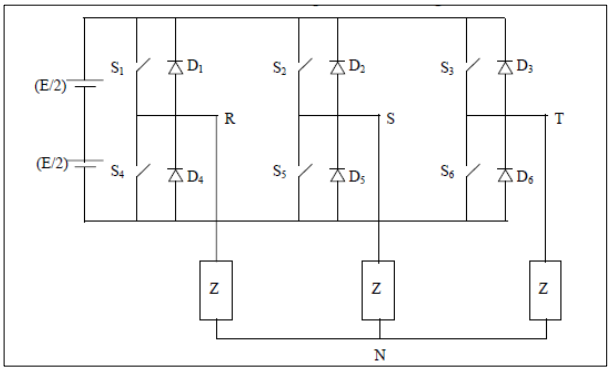
2.2.2.2 Inversores

Inversor é o termo abrangente utilizado para descrever conversores estáticos que são projetados para regular o fluxo de energia elétrica entre uma fonte de tensão contínua e uma carga em corrente alternada. Esses conversores têm uma ampla variedade de aplicações na indústria, incluindo acionamento de motores de corrente alternada e fornecimento ininterrupto de energia para cargas sensíveis, como computadores (sistemas "*nobreak*").

2.2.2.2.1 Inversor trifásico

O inversor trifásico, assim como o monofásico, opera convertendo a entrada de corrente contínua (DC) em uma saída de corrente alternada (CA)**.** No entanto, em vez de produzir uma única onda de corrente alternada, ele gera três ondas de corrente alternada que estão desfasadas em 120° uma da outra. Para fazer essa conversão, o inversor utiliza um conjunto de transistores ou IGBT’s (Transistores Bipolares de Porta Isolada) que atuam como interruptores. Estes são acionados em uma sequência específica para produzir a saída trifásica desejada. A figura 9 representa a estrutura e as etapas de funcionamento do inversor trifásico.

Figura 9 – Funcionamento do circuito inversor trifásico.



Fonte: Lourenço M. J. e Wilson K. (2011)

Sendo:

S^1 *a* S^6: Interruptores comandados

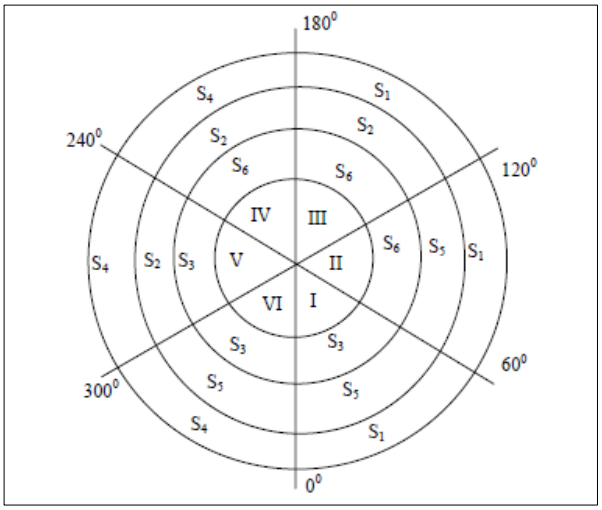
D^1 *a* D^6: Diodos de regeneração

E: Fonte de Alimentação

Z: Carga

Os interruptores são comandados segundo o diagrama representado na figura 10. Em cada instante existem 3 interruptores em condução, 2 no grupo positivo e 1 no negativo ou vice-versa. Cada interruptor é mantido habilitado durante 180°, ocorrendo uma comutação a cada 60°.

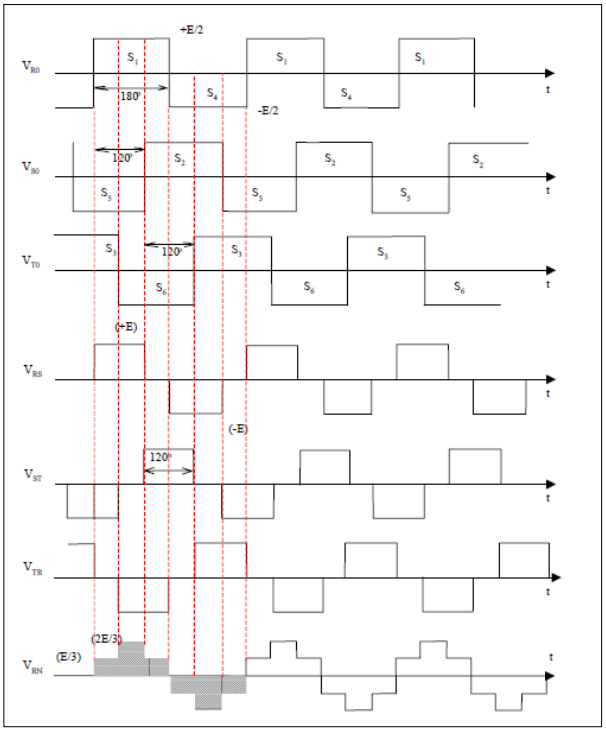
Figura 10 - Diagrama de comando do inversor trifásico.



Fonte: Lourenço M. J. e Wilson K. (2011)

Nota: As tensões V_{SN} e V_{TN} são iguais a V_{RN}, porém defasadas de 120° e 240° respectivamente de acordo com a figura 11.

Figura 11 - Tensões em um inversor trifásico.



Fonte: Lourenço M. J. e Wilson K. (2011)

Seja as tensões V_{RO}, V_{SO} e V_{TO} desenvolvidas em série Fourier. As tensões de fase desenvolvidas em série de Fourier podem ser descritas conforme mostra as equações 1, 2 e 3 respectivamente.

$$V_{RN} = \frac{4}{\pi}\frac{E}{2}\left[\cos \omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t + \cdots\right] \quad (1)$$

$$V_{SN} = \frac{4}{\pi}\frac{E}{2}\left[\cos(\omega t - 120°) - \frac{1}{5}\cos 5(\omega t - 120°) - \frac{1}{7}\cos 7(\omega t - 120\,°) + \cdots\right] \quad (2)$$

$$V_{TN} = \frac{4}{\pi}\frac{E}{2}\left[\cos(\omega t + 120°) - \frac{1}{5}\cos 5(\omega t + 120°) - \frac{1}{7}\cos 7(\omega t + 120\,°) + \cdots\right] \quad (3)$$

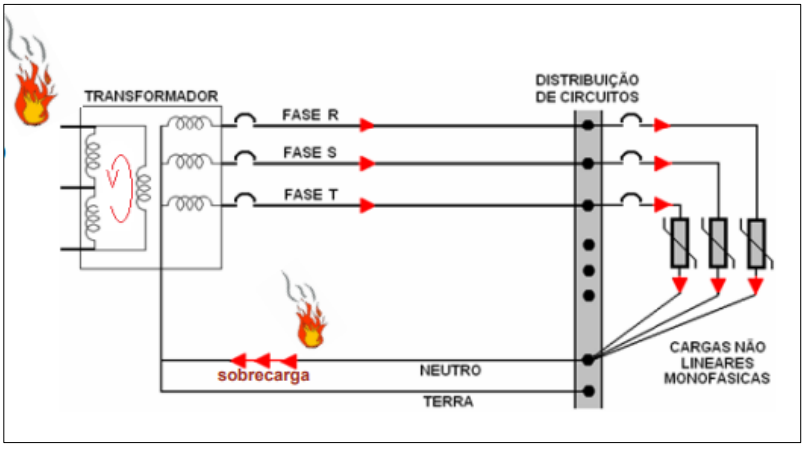
Assim, pode-se confirmar a presença das componentes harmônicas nas tensões e como isso afeta a forma de onda.

2.3 COMO AS CARGAS NÃO LINEARES INTRODUZEM DISTORÇÕES HARMONICAS.

As cargas não lineares introduzem distorções harmônicas nos sistemas elétricos devido à não linearidade de sua relação corrente-tensão. São dispositivos ou equipamentos que não apresentam uma relação linear entre a corrente que consomem e a tensão aplicada a eles. Quando conectada a um sistema elétrico, ela tende a distorcer a forma de onda da corrente que consome. Isso ocorre porque a corrente não segue mais uma relação linear com a tensão, resultando em múltiplos inteiros da frequência fundamental da rede elétrica conhecidos como componentes harmônicas.

Os dispositivos eletrônicos são frequentemente fontes de cargas não lineares. Como computadores, equipamentos de escritório, carregadores de dispositivos eletrônicos, iluminação com tecnologia de LED, inversores de frequência variável, fontes de alimentação comutadas, entre outros. Esses dispositivos eletrônicos geralmente incorporam retificadores, conversores, e outros circuitos não lineares que podem introduzir harmônicas no sistema elétrico. As distorções harmônicas podem causar uma série de problemas em sistemas elétricos, incluindo o superaquecimento de equipamentos, perda de eficiência energética, redução da vida útil de equipamentos, ressonância, e interferência eletromagnética. A figura 12, ilustra o impacto dos harmônicos de tensão gerados por uma carga não linear em um sistema de energia típico com cargas lineares.

Figura 12 - Propagação de harmônicos (gerados por uma carga não linear) em sistemas de energia.

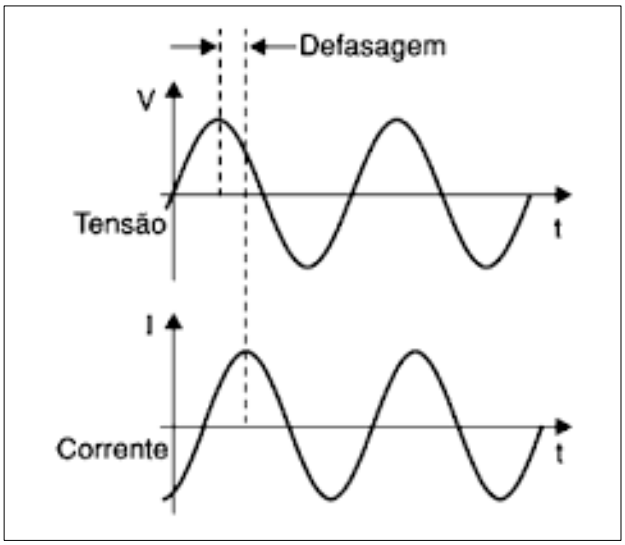


Fonte: Origa L. (2016)

2.4 COMO O FATOR DE POTÊNCIA VARIA EM SISTEMAS COM CARGAS NÃO LINEARES.

O fator de potência pode ser significativamente afetado devido à presença de distorções harmônicas na corrente. Sendo uma medida da eficiência com que a energia elétrica é convertida em trabalho útil, ele é calculado como o cosseno do ângulo de defasagem entre as formas de onda de corrente (I) e tensão (V), como mostra a figura 13.

Figura 13 – Ângulo de Defasagem entre a Tensão e a Corrente.



Fonte: Newton C. B. (2013)

Para cargas lineares, o fator de potência é geralmente próximo de 1, indicando uma relação quase perfeitamente linear entre corrente e tensão. No entanto, cargas não lineares introduzem distorções harmônicas nas formas de onda de corrente, o que pode resultar em um deslocamento do fator de potência e em uma redução na eficiência do sistema.

A presença de harmônicas na corrente pode aumentar o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão, levando a um fator de potência menor. Isso ocorre porque as harmônicas adicionam componentes de corrente que não estão em fase com a tensão, resultando em um aumento na potência reativa em relação à potência real.

Em sistemas com cargas não lineares, a distorção harmônica total (DHT) é frequentemente usada como uma métrica para avaliar o impacto das cargas na qualidade da

energia. Um alto valor de DHT indica uma quantidade significativa de harmônicas presentes, o que pode resultar em um fator de potência mais baixo.

Portanto, conclui-se que as componentes harmônicas presentes na corrente drenada por cargas não lineares não contribuem para a produção de potência ativa na carga, apenas para o aumento do valor RMS da corrente, aumentando o valor da potência aparente drenada da rede elétrica e, com isso, reduzindo o fator de potência visto pela concessionaria de energia elétrica.

2.5 DISTURBIOS ELÉTRICOS

Distúrbios elétricos são variações indesejadas nos parâmetros elétricos de um sistema, podendo afetar adversamente a operação de equipamentos e dispositivos elétricos. Estes distúrbios podem se manifestar de diversas formas, incluindo surtos de tensão, quedas de tensão, flutuações de tensão, interferências eletromagnéticas, ruído elétrico, faltas de energia e picos de corrente.

A gestão eficaz desses distúrbios elétricos é crucial para preservar a integridade dos sistemas elétricos e garantir o funcionamento adequado dos equipamentos. Diversos dispositivos de proteção, como estabilizadores de tensão, filtros de linha e nobreaks, são empregados para mitigar os efeitos desses distúrbios. Além disso, sistemas de monitoramento e análise de energia são utilizados para avaliar a qualidade da energia elétrica e tomar medidas preventivas quando necessário. Em ambientes críticos, como indústrias e centros de dados, a compreensão e o controle desses distúrbios desempenham um papel fundamental na manutenção da confiabilidade dos sistemas elétricos.

2.5.1 Problemas associados à distorção harmônica.

A presença de harmônicas no sistema de distribuição acarreta diversos problemas nos principais equipamentos elétricos, bem como: o aumento nos níveis de perdas elétricas dos transformadores, tanto no cobre quanto no ferro, tendo risco de saturação em presença de harmônicas pares, além da redução da vida útil devido ao aquecimento excessivo e/ou comprometimento da isolação.

Elevação do nível de aquecimento em máquinas assíncronas, especialmente em gaiolas duplas ou ranhuras profundas, podendo ocasionar a presença de torques pulsantes.

Aquecimento do condutor neutro acima do normal devido à presença de harmônicas de sequência zero. Equipamentos eletrônicos geram significativos níveis de harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens, incluindo as chamadas harmônicas "*triplens*" (triplas), ou seja, ordens harmônicas ímpares múltiplas de três. Em um sistema trifásico equilibrado, as "*triplens"* são de sequência zero e, portanto, somam-se no condutor neutro.

Em capacitores de potência pode ocorrer o aumento nos níveis de aquecimento, demandando um isolamento adicional. Além disso, pode aumentar as perdas ôhmicas e dielétricas dos condutores elétricos fazendo com que tenha uma redução da vida útil deles.

Juntamente a isso os altos níveis de distorção harmônica numa instalação elétrica podem causar problemas para as redes de distribuição das concessionárias e para a própria instalação, assim como para os equipamentos ali instalados.

O aumento de tensão na rede causado pela distorção harmônica acelera a fadiga dos motores, o que pode ocasionar queimas, falhas e desligamentos.

Adicionalmente, as harmônicas aumentam a corrente RMS (devido a ressonância série), causando elevação nas temperaturas de operação de diversos equipamentos e diminuição de sua vida útil.

Essas ondas de frequência superior a fundamental, causam vários danos ao sistema, entre os quais podemos destacar:

- Aumento das perdas nos estatores e rotores de máquinas rotativas, causando superaquecimento danoso às máquinas;
- O fluxo de harmônicas nos elementos de ligação de uma rede leva a perdas adicionais causadas pelo aumento do valor RMS da corrente, além do surgimento de quedas de tensão harmônicas nas várias impedâncias do circuito.
- Distorção das características de atuação de relés de proteção;
- Aumento do erro em instrumentos de medição de energia, que estão calibrados para medir ondas senoidais puras;
- Interferência em equipamentos de comunicação, aquecimento em reatores de lâmpadas fluorescentes, interferência na operação de computadores e em equipamentos para variação de velocidade de motores etc.
- Aparecimento de ressonâncias entre capacitores para correção de fator de potência e o restante do sistema, causando sobretensões e sobrecorrentes que podem causar sérios danos ao sistema.

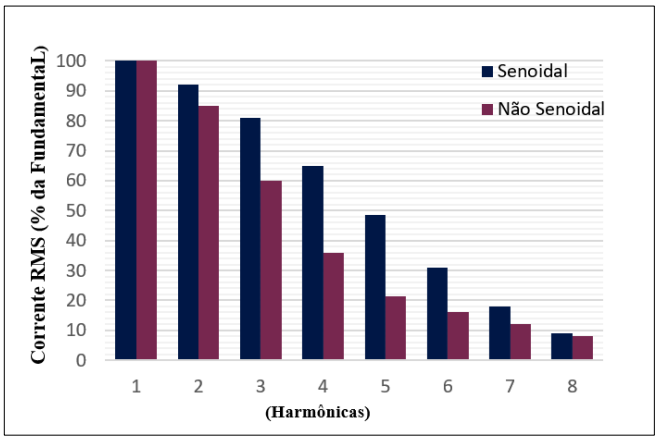
Em um estudo realizado por Alfredo Arcanjo Cruz Figueiredo (2016) em sua análise de modelos para cargas não lineares no estudo trifásico de penetração harmônica, pode-se perceber a grande presença de correntes harmônicas realizadas em um teste de medições para avaliar o efeito da tensão sobre a distorção harmônica de corrente de determinadas cargas não lineares, onde o foco principal foi a avaliação de cargas como computadores. A tabela 2 mostra os resultados obtidos após as medições das tensões. E o resultado das correntes harmônicas são apresentados conforme mostra a figura 14.

Tabela 2 – Medições efetuadas em um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de uma distorção harmônica total de tensão de 5%.

Corrente Harmônica	Tensão Senoidal		Tensão Não Senoidal $DHT_V = 5\%$	
	Magnitude (%)	Angulo (°)	Magnitude (%)	Angulo (°)
1	100,0	3	100,0	-7
3	92,7	178	84,9	148
5	80,4	-4	60,4	-57
7	64,4	173	36,2	87
9	47,1	-11	22,2	-146
11	30,8	162	17,4	-21
13	17,5	-31	12,9	114
15	8,8	120	7,8	-121

Fonte: Adaptado de Grady (2000)

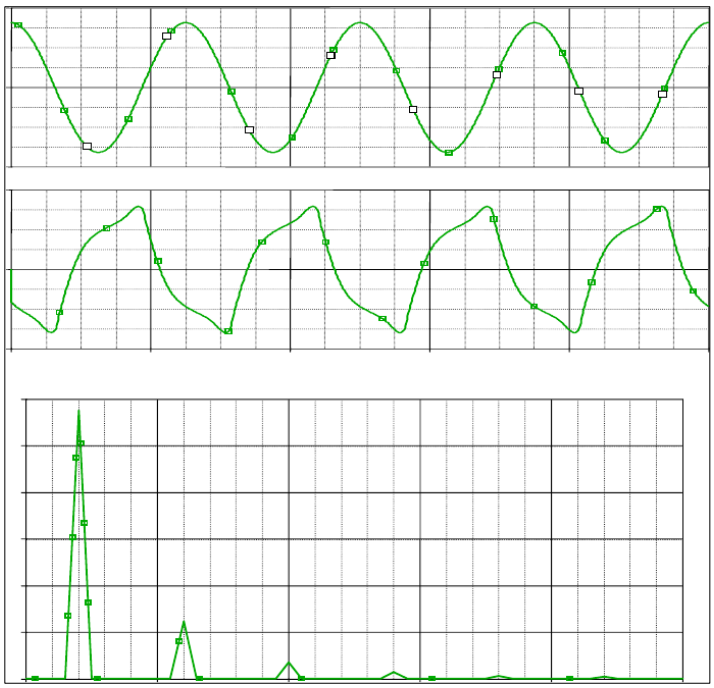
Figura 14 – Composição Harmônica da corrente gerada por um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%.



Fonte: Adaptado de Grady (2000)

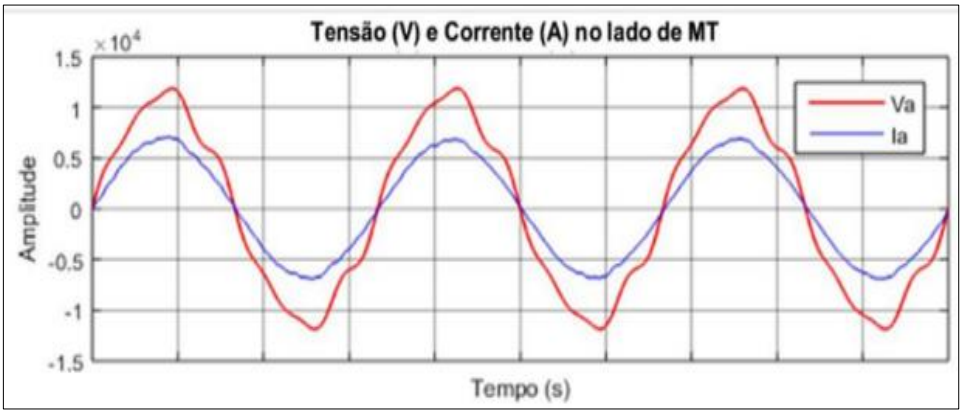
Observa-se que as correntes harmônicas produzidas por pontes retificadoras monofásicas com diodos têm uma considerável dependência da tensão aplicada. Essas correntes têm a propensão de interagir com a impedância do sistema, resultando em tensões distorcidas, como mostram as figuras 15 e 16.

Figura 15 – Distorções na forma de onda devido as componentes harmônicas.



Fonte: Deckmann S.M. e Pomilio J.A. (2003)

Figura 16 – Exemplo gráfico de distorção da tensão e corrente.



Fonte: Adaptado de Welbert R. (2016)

No entanto, as pontes têm a capacidade de compensar esse efeito por meio das correntes geradas.

A distorção e as componentes harmônicas de tensão, que incorporam a influência da impedância do sistema e das correntes harmônicas geradas pelas cargas, são parâmetros relevantes a serem especificados em um protocolo de testes para avaliar o impacto das harmônicas no sistema.

2.5.2 Distorção harmônica de tensão e corrente.

Distúrbios na tensão podem ser ocasionados pelas correntes harmônicas, contudo, nota-se que a carga não exerce uma influência completa na distorção da forma de onda da tensão.

Devido à presença da impedância intrínseca do sistema, uma carga idêntica em diferentes pontos de acoplamento resulta em valores distintos de distorção de tensão.

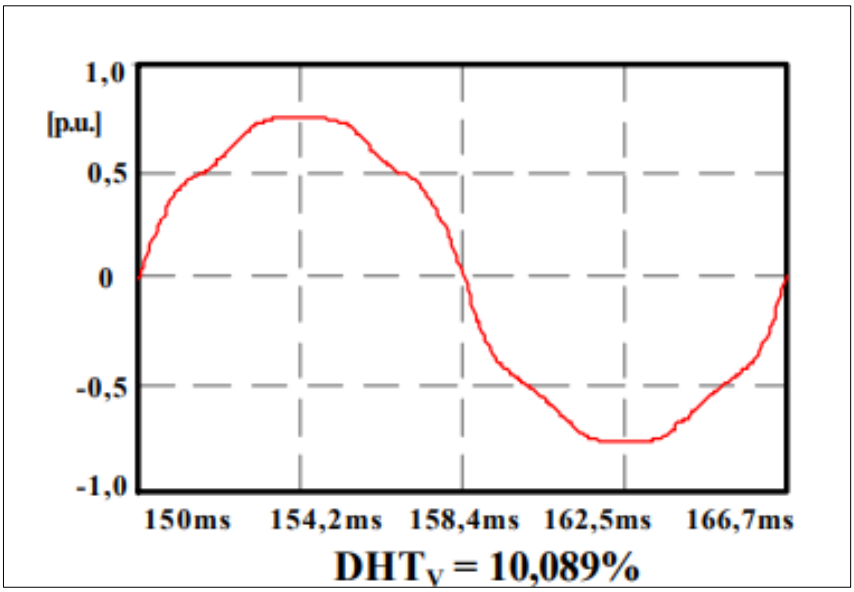
Para controlar a quantidade de corrente harmônica injetada no sistema, no ponto de acoplamento da carga, é possível instalar filtros harmônicos nas instalações dos consumidores ou minimizar as correntes distorcidas geradas por cargas não lineares, alterando o modo construtivo destas.

Se a injeção de corrente harmônica estiver dentro de limites aceitáveis, a responsabilidade pelo controle da distorção da tensão recai sobre a companhia elétrica responsável pelo sistema. Essa gestão é realizada através do controle da impedância do sistema, utilizando bancos de capacitores sincronizados de acordo com a ordem das harmônicas, desempenhando o papel de filtro harmônico.

Uma das abordagens amplamente reconhecidas e frequentemente empregadas na avaliação da qualidade da energia elétrica, particularmente em relação às harmônicas, consiste na quantificação do valor total de distorção harmônica presente em uma forma de onda, levando em consideração seu conteúdo harmônico.

A Distorção Harmônica Total (DHT) é uma medida quantitativa que possibilita calcular a distorção global, tanto para a tensão quanto para a corrente, portanto representa uma medida efetiva das componentes harmônicas presentes em uma forma de onda distorcida, em relação à fundamental. A figura 17, mostra uma forma de onda de tensão com DHT_V = 10,089%.

Figura 17 – Grau de distorção harmônica da tensão DHT_V = 10% ± 0,1%.



Fonte: Alfredo A. C. Figueiredo (2006)

O valor da distorção harmônicas pode ser calculado utilizando a equação (2.4) para a tensão e a equação (2.5) para a corrente.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (4)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_1} * 100 \quad (5)$$

Sendo:

$\boldsymbol{V_h}$: O valor eficaz da componente da tensão harmônica de ordem *h*;

$\boldsymbol{I_h}$: O valor eficaz da componente de corrente harmônica de ordem *h*;

$\boldsymbol{V_1}$: O valor eficaz da componente fundamental da tensão harmônica.

$\boldsymbol{I_1}$: O valor eficaz da componente fundamental de corrente harmônica.

2.5.3 Cancelamento de harmônica.

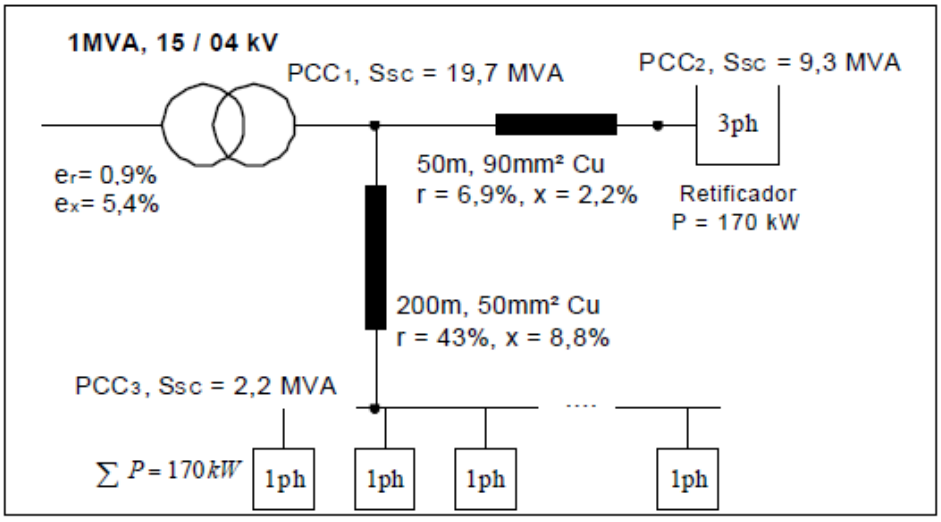
O fenômeno do cancelamento de harmônicas pode ocorrer caso haja tanto cargas trifásicas quanto monofásicas, isso porque nesses dois tipos de cargas não linear há uma

diferença angular entre as correntes geradas e por isso quando analisamos se há presença de harmônicos no sistema devemos sempre considerar os ângulos de fase entre as duas, pois nesse contexto, a soma de correntes e tensões harmônicas deve seguir uma abordagem geométrica.

Segundo os pesquisadores Hansen S., Nielsen P. e Blaabjerg, F. (2000) para validar o fenômeno do cancelamento de harmônica, pode-se utilizar como referência a análise na diminuição da distorção da tensão em relação à combinação de cargas não lineares trifásicas e monofásicas,

Para conduzir essas avaliações, foi empregado um pequeno sistema de distribuição, conforme ilustrado na figura 18. Vale ressaltar que o lado de média tensão foi considerado senoidal e equilibrado para os propósitos da análise.

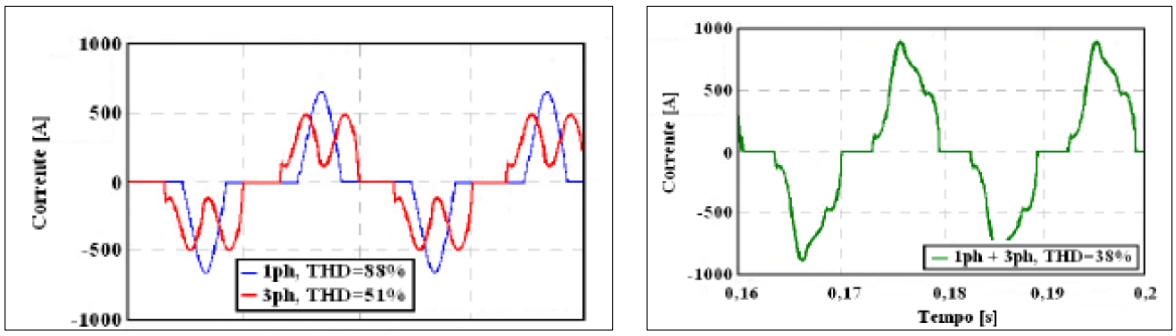
Figura 18 – Sistema simulado com transformador, condutores e carga. As impedâncias dos condutores são mostradas em (p.u.) relacionadas ao transformador.



Fonte: Hansen (2000)

Assim pode-se inferir na figura 19 (a) o resultado das formas de onda da corrente e na figura 19 (b) a soma das correntes no secundário do transformador, na qual podemos concluir que a forma de onda se aproxima mais da senoidal, quando comparadas as duas correntes separadamente.

Figura 19 – Forma de onda da corrente simulada do sistema. (a) Correntes retificadores. (b) Corrente total no secundário do transformador.



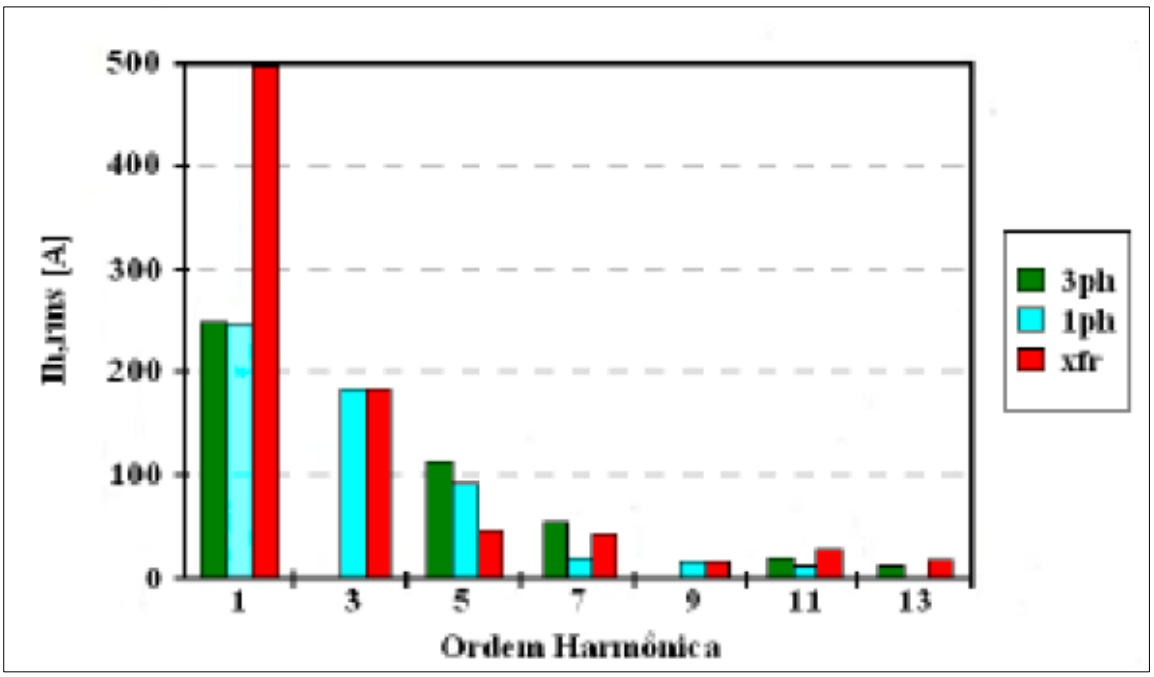
(a) (b)

Fonte: Hansen (2000)

De acordo com os gráficos a corrente total de distorção harmônica para o retificador trifásico foi de 51% e para o retificador monofásico 88%, e quando ocorre a soma das correntes a distorção resultante é de apenas 38%, isso ocorreu devido ao cancelamento de harmônico.

O gráfico da figura 20 a seguir mostra a redução do espectro de harmônicos da corrente dos retificadores e transformadores.

Figura 20 - Espectro harmônico da corrente dos retificadores e do transformador.



Fonte: Hansen (2000)

Além disso, existem algumas técnicas relativamente simples que utilizam conexões de transformadores para empregar deslocamento de fase com o propósito de cancelamento de harmônicas, bem como:

- Transformadores Δ-Δ e Δ–Y (ou múltiplos transformadores de deslocamento de fase) para fornecer cargas produtoras de harmônicas em paralelo (resultando em retificadores de doze pulsos) para eliminar os componentes harmônicos de 5ª e 7ª ordem.
- Transformadores com conexões delta para capturar e impedir harmônicas triplas (sequência zero) de entrar nos sistemas de energia,
- Transformadores com conexões "*zig-zag*" para cancelamento de certas harmônicas e para compensar desequilíbrios de carga.

2.5.4 Flutuações de tensões e "*flickers*"

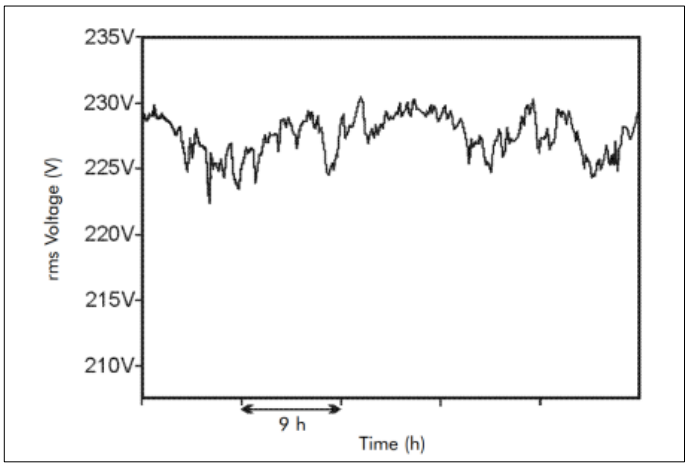
Flutuações de tensões são variações sistêmicas de tensões aleatórias, cuja magnitude normalmente não excede os intervalos especificados (por exemplo, de 0,9 a 1,1 [p.u], conforme definido pela ANSI C84.1-1982). Elas podem ser divididas em duas categorias:

• mudanças de tensão em degraus, regulares ou irregulares no tempo.

• mudanças de tensão cíclicas ou aleatórias produzidas por variações nas impedâncias de carga.

A figura 21 mostra o gráfico de um sinal que apresenta tais variações na tensão.

Figura 21 – Gráfico de sinal com flutuações de tensão.



Fonte: Zbigniew H. e Andrzej B. (2006)

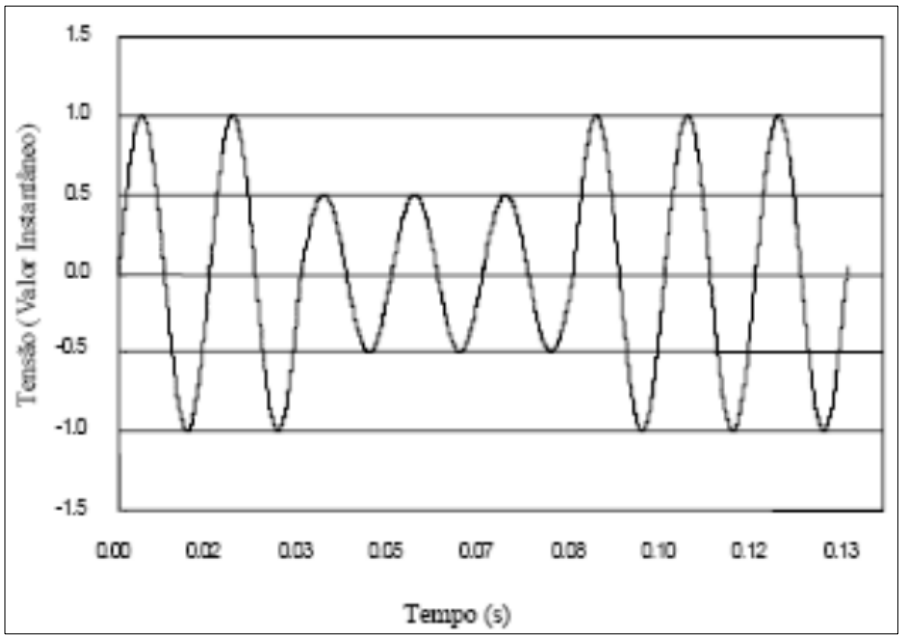
Elas contribuem para degradar o desempenho do equipamento e causar instabilidade nas tensões internas e correntes dos equipamentos eletrônicos. No entanto, flutuações de tensões inferiores a 10% não afetam equipamentos eletrônicos. As principais causas desse fenômeno são a saída de energia pulsada, soldadores de resistência, partida de acionamentos, fornos elétricos a arco, acionamentos com cargas de mudança rápida.

Segundo Mohammad A. S. Masoum e Ewald F. Fuchs (2015) os *"flickers"* são descritos como "variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente de carga que causam variações de voltagem".

O termo "*flicker*" é derivado do impacto da flutuação de tensões nas lâmpadas, de modo que elas são percebidas como piscando pelo olho humano. Isso pode ser causado por um forno elétrico a arco, por exemplo.

De maneira similar o *"flicker*" é um sintoma de flutuação de tensão que pode ser causada por distúrbios introduzidos durante a geração, transmissão ou distribuição de energia. A figura 22 ilustra a forma de onda da tensão exemplificando o fenômeno de "*flicker"*.

Figura 22 - Flutuação de tensão causada pela operação de um forno elétrico a arco (Carga não linear).



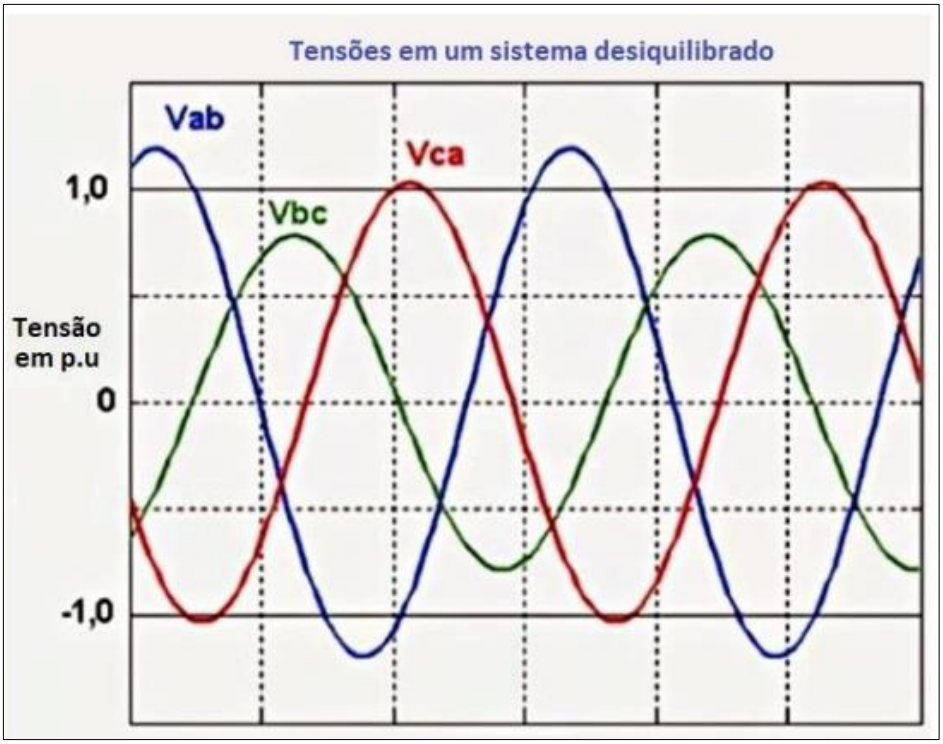
Fonte: Luiz C.B (2007)

2.5.5 Desequilíbrio de tensão.

Segundo Alexander K. (2007), quando as tensões de um sistema trifásico não são idênticas em magnitude e/ou as diferenças de fase entre elas não são exatamente 120 graus, ocorre desequilíbrio de tensão.

Já para Gilson P. (2013), o conceito de desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferente de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições. A figura 23 mostra um gráfico das tensões em estado de desequilíbrio.

Figura 23 - Gráfico das tensões desequilibradas.



Fonte: Origa (2016)

Por isso, em um sistema elétrico trifásico isso ocorre quando as três fases apresentam valores distintos de tensão em termos de módulo ou defasagem angular entre fases, sendo esta última de 120º elétricos. Também pode ocorrer simultaneamente ambas as condições. O desequilíbrio de tensão é frequentemente descrito como a diferença máxima entre os valores médios das tensões ou correntes trifásicas, dividida pela média desses valores, expressa em porcentagem.

Uma abordagem para definir o desequilíbrio é utilizar a teoria das componentes simétricas. A proporção entre os componentes de sequência negativa ou zero, em comparação com o componente de sequência positiva, pode ser empregada para quantificar a porcentagem de desequilíbrio.

Segundo os Procedimentos de Distribuição (Prodist), da ANEEL, o desequilíbrio de tensão é analisado com base no fator de desequilíbrio, que exprime a relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da tensão expressa em termos percentuais da componente de sequência positiva.

O grau de desequilíbrio é determinado pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva. Essa definição se baseia no princípio de que um conjunto trifásico de tensões equilibradas contém apenas componentes de sequência positiva. Se, por alguma razão, surgirem componentes de sequência zero, isso resultará apenas em assimetria nas tensões de fase. As tensões de linha, nas quais as componentes de sequência zero são sempre nulas, permanecerão equilibradas. No entanto, a presença de componentes de sequência negativa também introduzirá assimetria nas tensões de linha. Esse fator, expresso em porcentagem, é calculado de acordo com a equação 6.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} * 100 \tag{6}$$

Para de quantificar este efeito, a norma NEMA – MG1 – 14.34, define o fator de desequilíbrio de tensão como a proporção entre a máxima variação da tensão média e a própria tensão média, com as tensões de linha sendo tomadas como referência. Esse fator, expresso em porcentagem, é calculado como mostra a equação 7.

$$VUF\% = \frac{\Delta V}{U_{AV}} * 100 \tag{7}$$

Já para a norma do IEEE recomenda-se que o desequilíbrio trifásico possa ser obtido pela equação 8.

$$VUF\% = \frac{3*(V_{MÁX} - V_{MIN})}{V_A + V_B + V_C} * 100 \tag{8}$$

2.6 IMPACTOS EM EQUIPAMENTOS SENSIVEIS E EFICIENCIA GERAL DO SISTEMA ELÉTRICO.

2.6.1 Danos a equipamentos sensíveis.

A presença de correntes não senoidais (Distúrbios elétricos), apresenta grandes interferências, especialmente no que diz respeito aos danos a equipamentos sensíveis. No qual dentro os mais diversos impactos dessas correntes sobre dispositivos eletrônicos, podemos identificar os principais meios pelos quais correntes não senoidais têm o potencial de provocar danos devido às:

- Distorções Harmônicas, na qual a presença de extras pode causar aquecimento excessivo nos condutores e nos dispositivos conectados, resultando em perda de eficiência e, eventualmente, falha prematura.
- Interferência Eletromagnética (EMI), fenômeno onde ocorre a geração de campos magnéticos variáveis no tempo, que por sua vez podem induzir interferência eletromagnética em dispositivos próximos. Isso pode levar a falhas de comunicação, mau funcionamento de circuitos eletrônicos e perda de dados em sistemas sensíveis.
- Estresse em Componentes Eletrônicos, podendo submeter os componentes eletrônicos a estresses elétricos não previstos em seus projetos. Isso pode resultar em falhas prematuras de transistores, capacitores, diodos e outros dispositivos semicondutores.

Equipamentos sensíveis e sistemas de comunicação são particularmente vulneráveis a distorções harmônicas. Dos mais diversos equipamentos que podem ser afetados de forma significativa podemos destacar os:

- Computadores e Servidores

Fontes de alimentação de computadores e servidores são sensíveis a distorções harmônicas, pois esses dispositivos operam com eletrônica de precisão que pode ser afetada por variações na qualidade da energia.

- Sistemas de Comunicação

Equipamentos de transmissão e recepção de sinais em sistemas de comunicação, como rádio, televisão, e comunicações por satélite, podem ser impactados negativamente pela presença de distorções harmônicas, resultando em interferência e degradação do sinal.

- Equipamentos de Áudio e Vídeo Profissionais

Amplificadores, "*mixers",* sistemas de projeção de vídeo e outros equipamentos de áudio e vídeo utilizados em estúdios de gravação, produção audiovisual e salas de cinema podem ser suscetíveis a distorções harmônicas, afetando a qualidade do som e da imagem.

- Equipamentos Médicos

Equipamentos médicos sensíveis, como sistemas de ressonância magnética, tomógrafos computadorizados e monitores médicos, podem ser impactados por distorções harmônicas, afetando a precisão dos diagnósticos e procedimentos médicos.

- Equipamentos de Laboratório

Instrumentos de medição de alta precisão, como osciloscópios, espectrômetros e analisadores de sinais, podem ser influenciados por distorções harmônicas, prejudicando a precisão das medições.

- Sistemas de Controle Industrial

Sistemas de automação e controle industrial, incluindo controladores lógicos programáveis (CLP's) e sensores eletrônicos, podem ser sensíveis a distorções harmônicas, afetando a estabilidade e confiabilidade dos processos industriais.

- Dispositivos Eletrônicos de Consumo

Aparelhos eletrônicos domésticos, como TVs de alta definição, sistemas de som, reprodutores de DVD/Blu-ray e consoles de jogos, podem ser afetados por distorções harmônicas, resultando em degradação da qualidade de áudio e vídeo.

2.6.2 Variações de tensão e corrente.

Os distúrbios analisados podem causar variações indesejadas nas formas de onda de tensão e corrente ocasionando o desequilíbrio entre as fases em sistemas trifásicos, conhecido como deslocamento de fases, que é resultado de uma defasagem não ideal entra as tensões e correntes, levando a uma distribuição não uniforme das mesmas. Isso pode afetar negativamente o funcionamento de motores trifásicos, por exemplo.

Isso ocorre devido à presença de componentes de frequência não fundamentais, que são múltiplos inteiros da frequência fundamental. Podendo ocorrer, uma tensão distorcida, ou seja, em vez de uma forma de onda senoidal pura, as harmônicas adicionam picos e depressões à forma de onda, alterando sua característica fundamental. Isso pode levar a um valor eficaz de tensão diferente do valor nominal.

Aumento nas tensões de pico, na qual ocorre o aumento das amplitudes das componentes de alta frequência nas formas de onda. Isso pode resultar em tensões de pico mais altas do que as esperadas, o que pode causar problemas em equipamentos que não estão projetados para lidar com essas condições extremas. Segundo o autor Surasmi Nalinakshan (2008), as formas de onda não senoidais podem gerar picos de tensão inesperados, especialmente quando há transições rápidas nos sinais. Esses picos de tensão podem exceder os limites de tensão seguros para os dispositivos conectados, causando danos aos mesmos. Da mesma forma, as correntes podem ser afetadas, visto que equipamentos que consomem corrente distorcida podem experimentar variações nas formas de onda de corrente, com picos adicionais. Isso pode levar a uma distribuição desigual de corrente ao longo do tempo.

Além disso, em sistemas com carga não linear, as distorções harmônicas podem causar um aumento no "*ripple"* (variações rápidas e repetitivas) da tensão. Isso pode ser prejudicial para dispositivos eletrônicos sensíveis que requerem uma fonte de alimentação estável.

2.6.3 Perda de eficiência energética no sistema elétrico.

A perda de eficiência energética está totalmente relacionada aos impactos gerados pela introdução dessas cargas no sistema. Essas distorções introduzem variações indesejadas nas formas de onda de tensão e corrente, resultando em impactos negativos na eficiência global do sistema. A perda de eficiência pode ocorrer de diversas maneiras bem como, perdas de energia nos componentes do sistema, como transformadores e cabos. Esse aumento nas perdas resulta em um aquecimento adicional dos dispositivos, reduzindo a eficiência do sistema como um todo.

Aumento da magnitude das correntes totais no sistema. Essas correntes extras contribuem para as perdas ôhmicas nos condutores, diminuindo a eficiência da transmissão de energia.

Má utilização de energia onde, os equipamentos podem operar de maneira menos eficiente quando alimentados por formas de onda distorcidas. Dispositivos eletrônicos, motores e outros equipamentos podem não converter a energia de maneira tão eficaz quando expostos a distorções harmônicas, resultando em uma utilização menos eficiente da energia fornecida.

Além da perda de capacidade de transmissão, visto que em sistemas de transmissão de energia, as distorções harmônicas podem limitar a capacidade de transmissão efetiva. A presença de correntes harmônicas eleva as perdas no sistema de, reduzindo a eficiência global da distribuição de energia elétrica.

2.6.4 Impactos nos sistemas de controle.

Desempenho Instável de Equipamentos Eletrônicos de controle, no qual equipamento, como controladores lógicos programáveis (CLP's), microcontroladores e sistemas de automação, podem possuir um desempenho instável. Isso pode levar a falhas intermitentes, erros de processamento e comportamento imprevisível.

Erro em Sistemas de medição e instrumentos de medição, como sensores e medidores, podem ser afetados, levando a leituras imprecisas. Isso pode resultar em uma operação inadequada do sistema de controle, com decisões baseadas em informações incorretas.
Aquecimento Excessivo de Equipamentos Eletrônicos: Componentes eletrônicos, como circuitos integrados e placas de circuito impresso, podem sofrer aquecimento excessivo. Isso não apenas reduz a vida útil desses componentes, mas também pode levar a falhas prematuras, comprometendo todo o sistema controle.

Além disso, é muito comum ocorrer a instabilidade em sistemas de controle de processos industriais, como os utilizados em plantas de manufatura. Apresentando dificuldades para manter parâmetros controlados dentro de limites aceitáveis. Assim como na precisão de controles eletrônicos, como inversores de frequência e dispositivos de controle de motor, podem sofrer interferências, resultando nas variações indesejadas na velocidade, torque e posicionamento.

Por fim, e não mesmo importante, as falhas em sistemas de comunicação utilizados em redes de controle, como redes industriais, podem ser suscetíveis a interferências que causam a perda de comunicação, atrasos na transmissão de dados e principalmente o comprometimento da integridade da rede.

2.7 LIMITES ACEITAVEIS PARA DISTUBRIOS ELÉTRICOS

Os limites aceitáveis para distúrbios elétricos podem variar dependendo do contexto, da aplicação e das normas ou padrões específicos da indústria. A tabela 3, mostra de forma

simplificada alguns dos distúrbios elétricos comuns suas características. E os limites aceitáveis associados a eles.

Tabela 3 – Distúrbios Elétricos mais comuns.

Tipos de Distúrbios	Características	Áreas de Ocorrências
Afundamento de Tensão	Redução momentânea na tensão abaixo do normal.	Redes Elétricas urbanas, causadas por cargas pesadas.
Harmônicas	Distúrbios de frequência não integralmente múltiplos.	Equipamentos eletrônicos, inversores, cargas não lineares.
"Notching"	Distúrbios de frequência especificas, afetando uma estreita faixa.	Equipamentos sensíveis a frequências especificas.
"*Flickers*"	Variações rápidas na luminosidade de lâmpadas e dispositivos.	Sistemas de iluminação, cargas variáveis.
Sobretensão	Aumento momentânea na tensão acima do normal.	Transientes de cargas, manobras de disjuntores.
Desbalanceamento de tensão	Disparidades entre as magnitudes das tensões.	Retificadores, inversores.

Fonte: Elaborada pelo Autor

Flutuações de Tensão

- Variações de Tensão de Curta Duração: Geralmente, aceitável se a amplitude não exceder 90% ou caia abaixo de 10% da tensão nominal por menos de 1 segundo.
- Variações de Tensão de Longa Duração: Menos de 90% da tensão nominal por mais de 1 minuto.

Afundamentos de Tensão

- Geralmente aceitável se a tensão não cair abaixo de 90% da nominal por um curto período (por exemplo, alguns ciclos).

Sobretensões

- Aceitável se a tensão não exceder 110% da nominal por períodos curtos.

Harmônicas

- Para sistemas de potência, distorções harmônicas totais (DHT) abaixo de 5% são consideradas aceitáveis
- para equipamentos sensíveis, os limites podem ser mais baixos.

***"Flicker"* (Cintilação)**

- O Índice de Cintilação (Pst) e o Curto Prazo (Plt) são parâmetros usados para avaliar a cintilação perceptível. Geralmente, valores abaixo de 1,0 para Pst e Plt são considerados aceitáveis.

Desbalanceamento de Tensão

- Pode variar, mas um desequilíbrio de tensão abaixo de 2% é frequentemente considerado aceitável.

Os parâmetros dos limites aceitáveis para os distúrbios foram avaliados segundo as normas IEEE 519, IEC 61000 e ANSI C84.1.

2.8 NORMA PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS

É de conhecimento internacional que com o aumento da utilização do processamento eletrônico em equipamentos do sistema elétrico, as normas amplamente reconhecidas e adotadas como padrões, limitações para a magnitude das correntes harmônicas injetadas no sistema por uma carga não linear são as normas IEEE (Institutos de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), e a IEC ("*International Electrotechnica Commission")* que estabelece critérios para limitar as distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência.

Diante disso, uma análise dos aspectos vinculados aos limites estabelecidos por ela, para harmônicas de tensão e corrente será apresentada a seguir.

2.8.1 Recomendação IEEE std. 519

Segundo a norma IEEE Std. 519, ao que se aplica a este trabalho é possível eleger os pontos principais, como limites de correntes harmônicas para o consumidor, limites de tensões harmônicas globais para o sistema (concessionárias) e limites para "*notching"*

(utilizado em referência a filtros ou técnicas que visam atenuar ou remover uma faixa específica de frequências).

Considerando que a administração de harmônicas em um sistema de energia é uma responsabilidade compartilhada entre usuários e proprietários ou operadores do sistema, os limites para harmônicas são recomendados tanto para tensões quanto para correntes. A recomendação IEEE 519 estabelece limites de correntes harmônicas com base na demanda máxima da carga para unidades consumidoras (e não para equipamentos individuais). Esses limites variam de acordo com o nível de curto-circuito na instalação local.

A faixa de medição usada por instrumentos digitais que utilizam técnicas DFT (Transformada Discreta de Fourier) deve ser de 12 ciclos (200 ms) para sistemas de energia de 60 Hz (ou 10 ciclos para 50 Hz). Com esse intervalo, os componentes espectrais só podem ser identificados com precisão se forem múltiplos de 5 Hz. Para fins de quantificação, a magnitude da componente harmônica é considerada como o valor da frequência central, combinada com os dois valores de 5 Hz adjacentes.

Esses três valores são então combinados em um único valor eficaz, definindo a magnitude harmônica para a frequência central específica.

O documento define o "valor de harmônicas em tempo muito curto", que é avaliado em um intervalo de 3 segundos, com base na agregação de 15 janelas consecutivas, cada uma com 200 ms. As componentes de frequência individuais são agregadas usando o cálculo RMS, conforme mostrado na equação 9, onde F representa a tensão (V) ou corrente (I), “n” representa a ordem harmônica, e o índice "s" é usado para indicar a característica de "muito curta duração" (short). Em todos os casos, F representa um valor RMS.

$$F_{n,vs} = \sqrt[2]{\frac{1}{15}\sum_{1=1}^{15} F_{n,i}^2} \tag{9}$$

De acordo com a regulamentação o conceito de "valor de harmônicas em curto período de tempo", que é calculado ao agregar 200 valores consecutivos de medição ade acordo com a equação 10, em um intervalo de 10 minutos no período "muito curto".

$$F_{n,vs} = \sqrt[2]{\frac{1}{200}\sum_{1=1}^{200} F_{(n,vs),i}^2} \tag{10}$$

Os valores em "tempo muito curto" devem ser acumulados ao longo de um dia, enquanto os valores em "tempo curto" devem ser acumulados por uma semana. Para as

medições em "tempo muito curto", é necessário calcular o valor do percentual 99% a cada intervalo de 24 horas para comparação com os limites estabelecidos. No caso das medições harmônicas em "tempo curto", os percentuais 95% e 99% devem ser calculados a cada período de sete dias para comparação com os limites especificados.

É importante notar que, à medida que o nível de curto-circuito aumenta, é tolerado um maior conteúdo harmônico na corrente. Essa lógica baseia-se na premissa de que a grandeza crucial a ser preservada é a qualidade da tensão fornecida. Consequentemente, alimentadores com menor impedância podem exibir níveis mais elevados de harmônicas na corrente, sem causar uma distorção significativa na tensão.

Por essa mesma razão, à medida que a ordem harmônica cresce, o nível admissível diminui, pois a impedância do alimentador, predominantemente indutiva, aumenta com a frequência.

Os dados da tabela 4 e 5 mostram os níveis de limites para distorções de 120 V a 69 kV; de 69 kV a 161 kV e tensões acima de 161 kV com diferentes ordens harmônicas e para o sistema, respectivamente. Além disso, os limites para recortes de tensão são vistos conforme mostra a tabela 6.

Tabela 4 – Limites de distorção da corrente para unidades consumidoras (Valores em % da corrente IL).

120 V à 69 kV	Icc/IL	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h≤50	DDT
	<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
	20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
	50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
	100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
	>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
120 V à 69 kV	Icc/IL	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h≤50	DDT
	<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
	20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
	50-100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
	100-1000	6,0	2,75	2,25	1,0	0,5	7,5
	>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10
120 V à 69 kV	Icc/IL	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h≤50	DDT
	<20	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
	20-50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
	50-100	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2023)

Sendo:

h: Ordem da harmônica.

I_{cc}: Corrente de curto-circuito do alimentador.

DDT: Distorção de demanda total.

Nota: Para harmônicas pares os valores da tabela 2.4 são limitadas em ¼.

Tabela 5 - Limites de distorção de tensão para o sistema.

Nível de tensão no PAC	Máximo individual	Máximo DHT
$Vpac \leq$ 1kV	5%	8%
1 kV$< Vpac \leq$ 69kV	3%	5%
69kV$< Vpac \leq$ 161kV	1,5%	2,5%
$Vpac$ >161kV	1%	1,5%

Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2023)

Nota: Para os sistemas cuja tensão é superior a 161 kV, podem apresentar uma DHT de até 2,0%, caso a origem seja uma conexão terminal HVDC.

Tabela 6 – Limites para recortes de tensão.

"Notch"	Aplicações Especiais	Sistemas Gerais	Sistemas Dedicados
Profundidade (d/v)	10%	20%	50%
Area	16400 V. µs	22800 V. µs	36500 V. µs

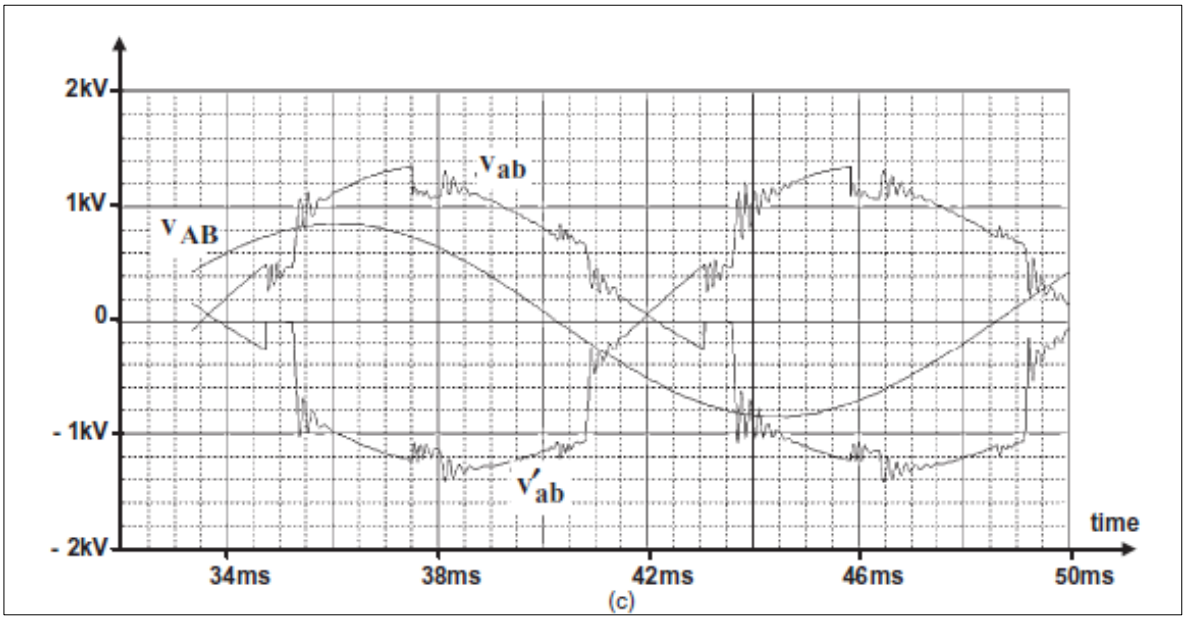
Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2006)

Nota: Em condições nominais de tensão e corrente

Além disso, a regulamentação destaca de maneira especial as descontinuidades originadas pela comutação de chaves eletrônicas, conhecidas como "*notching*".

Essa distorção é frequentemente provocada por retificadores eletrônicos quando interagem com indutâncias no acoplamento com a rede CA. A figura 24 mostra o gráfico da forma de onda da tensão com o fenômeno de *"notching"*.

Figura 24 – Gráfico da tensão de “*notching”*.



Fonte: Julian V. P (2008).

2.9 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

À medida que o uso de equipamentos não lineares se torna cada vez mais prevalente. Distúrbios elétricos, como harmônicos, flutuações de tensão, desequilíbrio e “*flicker”*, podem impactar adversamente a operação eficiente e confiável desses sistemas.

Diante desse cenário, a implementação de técnicas de mitigação torna-se crucial para manter a integridade dos sistemas elétricos e garantir o fornecimento estável de energia.

Estas por sua vez, visam minimizar ou eliminar os efeitos indesejados desses distúrbios, proporcionando um ambiente elétrico mais seguro e confiável. Tais técnicas podem ser classificadas em duas categorias principais: passivas e ativas. As abordagens passivas envolvem a utilização de dispositivos e componentes físicos, como filtros, reatores e transformadores, para controlar distúrbios elétricos.

Por outro lado, as técnicas ativas fazem uso de eletrônica de potência avançada para monitorar, compensar e corrigir distorções em tempo real.

2.9.1 Métodos passivos.

Atualmente existem diversos métodos para reduzir a presença de harmônicos no sistema elétrico, e os métodos passivos são uma abordagem comum.

Filtros Passivos

- Filtros de Sintonia, no quais são projetados para atenuar harmônicos específicos. Eles são ajustados para ressoar em frequências harmônicas, permitindo a eliminação seletiva dessas componentes.
- Filtros de banda larga: são projetados para atenuar um intervalo mais amplo de frequências. Eles são eficazes para reduzir vários harmônicos simultaneamente.

Quadro 1 – Principais vantagens e Desvantagens dos filtros Passivos.

Filtros Passivos	
Aplicações	Usados em sistemas industriais e comerciais para reduzir harmônicos e melhorar a qualidade da energia.
Vantagens	Eficazes na atenuação de harmônicos específicos; simples e de baixo custo.
Desvantagens	Pode ser menos eficaz em lidar com distorções harmônicas variáveis; pode exigir ajustes frequentes.

Fonte: Elaborada pelo Autor

Reatores de Linha

- Reatores de Linha Série: são dispositivos indutivos que podem ser colocados em série com a carga para reduzir correntes de harmônicos.
- Reatores de Linha Paralela: instalados em paralelo com a carga para reduzir a voltagem de harmônicos.

Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens dos reatores de linha.

Reatores de Linha	
Aplicações	Controlar correntes de carga em sistemas de distribuição.
Vantagens	Redução de correntes de harmônicos; custo relativamente baixo.
Desvantagens	Possível aumento nas perdas de potência; não é tão eficaz para correntes de baixa frequência.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Transformadores Especiais

- Transformadores com "*taps"* Especiais: transformadores com derivações especiais podem ser utilizados para compensar as distorções harmônicas.
- Transformadores de Deslocamento de Fase: introduzem um deslocamento de fase para alguns componentes harmônicos, reduzindo assim a distorção harmônica total.

Quadro 3 – Principais vantagens e desvantagens dos transformadores especiais.

Transformadores Especiais	
Aplicações	Aplicados em sistemas onde há distorções harmônicas significativas.
Vantagens	Redução de distorções harmônicas; melhoria do fator de potência.
Desvantagens	Custo mais elevado e limitações na flexibilidade.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Supressores de Ressonância

- Supressores de Ressonância Passivos: são dispositivos sintonizados para reduzir ressonâncias que podem amplificar harmônicos.

Quadro 4 – Principais vantagens e desvantagens dos supressores de ressonância.

Supressores de Ressonância	
Aplicações	Utilizados para controlar ressonâncias em sistemas de potência.
Vantagens	Redução de ressonâncias; melhoria na estabilidade do sistema.
Desvantagens	Complexidade de sintonia; custo potencialmente mais alto.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Baterias de Capacitores e Indutores

- Filtros LC Passivos: consistem em bancos de capacitores e indutores para filtrar harmônicos. Podem ser sintonizados ou de banda larga.

Quadro 5 – Principais vantagens e desvantagens das baterias de Capacitores e Indutores.

Baterias de Capacitores e Indutores	
Aplicações	Correção do fator de potência e atenuação de distorções harmônicas.
Vantagens	Melhoria do fator de potência; redução de perdas de energia.
Desvantagens	Possibilidade de ressonâncias; necessidade de monitoramento cuidadoso.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sintonia de Fator de Potência

- Melhorar o fator de potência pode reduzir as correntes de harmônicos, especialmente em sistemas com cargas não lineares.

Quadro 6 – Principais vantagens e desvantagens da sintonia de Fator de Potência.

Sintonia de Fator de Potência	
Aplicações	Instalações de grande porte, sistemas de distribuição de energia em redes elétricas.
Vantagens	Permite ajustes finos nos dispositivos de correção do fator de potência e garante que os dispositivos de correção estejam ajustados de maneira ideal.
Desvantagens	Alto grau de complexidade e necessidade de monitoramento contínuo da carga e condições de operação.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Filtros de Harmônicos Distribuídos

- Distribuir filtros de harmônicos em vários pontos do sistema pode ser eficaz para mitigar distorções harmônicas ao longo da rede.

Quadro 7 – Principais vantagens e desvantagens dos filtros de Harmônicos Distribuídos.

Filtros de Harmônicos Distribuídos	
Aplicações	Em edifícios comerciais, industriais e sistemas de distribuição.
Vantagens	Instalação em vários pontos e diminuição de harmônicos em áreas específicas com cargas não lineares.
Desvantagens	Pode ser apresentar custo elevado e necessita de uma análise detalhada do sistema elétrico.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Usar Dispositivos com Menor Distorção Harmônica

- Selecionar equipamentos e dispositivos eletrônicos de potência com baixa distorção harmônica intrínseca.

Quadro 8 – Principais vantagens e desvantagens de como usar dispositivos com menor distorções Harmônicas.

Usar Dispositivos com Menor Distorção Harmônica	
Aplicações	Em sistemas elétricos, especialmente onde a presença de dispositivos não lineares é uma preocupação.
Vantagens	Abordagem preventiva e simplicidade de instalação.
Desvantagens	Limitações retroativas, ou seja, dificuldade de aplicar essa técnica em sistemas já estabelecidos com dispositivos não lineares existentes.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.9.2 Métodos ativos.

Os métodos ativos para mitigação de distúrbios envolvem o uso de dispositivos eletrônicos para monitorar, detectar e compensar harmônicos em tempo real. Assim podemos destacar.

Filtros Ativos

- Filtros Ativos de Potência: utilizam eletrônica de potência para monitorar as correntes de carga e injetar correntes de igual magnitude, mas em fase oposta, para cancelar harmônicos.
- Filtros Ativos de Corrente: injetam uma corrente harmônica igual e oposta à corrente de carga para neutralizar os harmônicos.

Quadro 9 – Principais vantagens e desvantagens dos filtros ativos.

Filtros Ativos	
Aplicações	Eficientes na atenuação de harmônicos em tempo real em sistemas críticos.
Vantagens	Controle dinâmico e eficácia em ambientes dinâmicos.
Desvantagens	Custo mais elevado; requer monitoramento e manutenção contínuos.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conversores Estáticos Ativos

- Conversores Estáticos Ativos Paralelos: injetam uma corrente com componentes harmônicas em fase oposta às correntes harmônicas da carga.

- Conversores Estáticos Ativos em Série: injetam uma tensão em fase oposta às harmônicas presentes na rede.

Quadro 10 – Principais vantagens e desvantagens dos conversores estáticos ativos.

Conversores Estáticos Ativos	
Aplicações	Utilizados em sistemas de transmissão de energia para controle dinâmico de potência reativa.
Vantagens	Resposta rápida; capacidade de fornecer ou absorver potência reativa.
Desvantagens	Custo mais alto; complexidade de controle.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Inversores PWM (Modulação por Largura de Pulso)

- Inversores PWM Controlados Digitalmente: podem ser configurados para gerar formas de onda de tensão mais puras, reduzindo a presença de harmônicos.

Quadro 11 – Principais vantagens e desvantagens dos inversores PWM.

Inversores PWM	
Aplicações	Utilizados em sistemas de geração de energia renovável para gerar formas de onda mais puras.
Vantagens	Controle preciso e redução de harmônicos.
Desvantagens	Custo inicial mais alto e requer manutenção.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Controle de Fator de Potência Ativo

- Compensadores de Potência Reativa: dispositivos que monitoram continuamente o fator de potência e ajustam a potência reativa para melhorar o fator de potência e reduzir harmônicos.

Quadro 12 – Principais vantagens e desvantagens do controle de fator de potência ativo.

Controle de Fator de Potência Ativo	
Aplicações	Implementado em industriais para manter o fator de potência.
Vantagens	Controle contínuo e adaptação a mudanças na carga.
Desvantagens	Custo alto e pode requerer ajustes frequentes.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sistemas Híbridos Ativos e Passivos

- Combinação de Filtros Ativos e Passivos: a utilização de filtros ativos em conjunto com filtros passivos pode proporcionar uma abordagem mais abrangente para mitigação de harmônicos.

Quadro 13 – Principais vantagens e desvantagens dos sistemas híbridos ativos.

Sistemas Híbridos Ativos	
Aplicações	Utilizados quando uma abordagem combinada é necessária.
Vantagens	Abordagem abrangente; otimização da eficácia.
Desvantagens	Custo potencialmente mais alto; complexidade de projeto.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sistemas de Controle Adaptativo

- Controle Adaptativo de Filtros: os filtros ativos podem ser ajustados dinamicamente para lidar com mudanças nas condições da carga e na qualidade da energia.

Quadro 14 – Principais vantagens e desvantagens dos sistemas de controle adaptativos.

Sistemas de Controle Adaptativo	
Aplicações	Geralmente em sistemas elétricos, onde as condições de carga podem variar.
Vantagens	Capacidade de ajustar dinâmico e eficiência continua ao longo do tempo.
Desvantagens	Exige algoritmos avançados e monitoramento constante podendo envolver investimentos adicionais em tecnologia e manutenção.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Injeção de Corrente Híbrida

- Tecnologias Híbridas: combinação de técnicas passivas e ativas para otimizar a mitigação de harmônicos.

Quadro 15 – Principais vantagens e desvantagens da injeção de corrente hibrida.

Injeção de Corrente Híbrida	
Aplicações	Em sistemas elétricos.
Vantagens	Eficiência dinâmica e fácil adaptabilidade.
Desvantagens	Pode envolver custos mais elevados e complexidade de controle.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uso de Tecnologia de Comutação Suave

- Tecnologia de Comutação Suave em Conversores: reduz o estresse nas redes elétricas e minimiza a geração de harmônicos durante a comutação.

Quadro 16 – Principais vantagens e desvantagens do uso de tecnologia de comutação suave.

Uso de Tecnologia de Comutação Suave	
Aplicações	Em sistemas elétricos, particularmente em ambientes sensíveis a distúrbios causados pela comutação de dispositivos eletrônicos.
Vantagens	Redução de harmônicos de comutação e menor estresse no sistema.
Desvantagens	Pode envolver custos adicionais, além da necessidade de manutenção mais rigorosa.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Algoritmos de Controle Avançado

- Controle Preditivo: utiliza modelos preditivos para antecipar e corrigir distorções harmônicas.

Quadro 17 – Principais vantagens e desvantagens de algoritmos de controle avançado.

Algoritmos de Controle Avançado	
Aplicações	Em sistemas elétricos, fazendo uso de lógica de controle sofisticada.
Vantagens	Maior precisão no controle, adaptando-se às mudanças dinâmicas na carga. E capacidade antecipar e corrigir distorções harmônicas antes que impactem significativamente a qualidade da energia.
Desvantagens	Alto nível de complexidade de implementação e custo potencialmente elevados especialmente em termos de hardware e software.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Monitoramento e Análise em Tempo Real

- Sistemas de Monitoramento Contínuo: utilizam algoritmos avançados para detectar padrões harmônicos e aplicar correções em tempo real.

Quadro 18 – Principais vantagens e desvantagens de monitoramento e análise em tempo real.

Monitoramento e Análise em tempo real	
Aplicações	Em sistemas elétricos para identificação e resposta imediata.
Vantagens	Resposta imediata e otimização contínua.
Desvantagens	Alto custo de implementação na infraestrutura. Além necessidade de expertise, profissionais técnicos e capacitado para interpretar dados.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Vale ressaltar que a escolha entre métodos ativos e passivos dependerá das características específicas do sistema, dos requisitos de mitigação e das condições operacionais. Em muitos casos, uma combinação de abordagens ativas e passivas pode ser mais eficaz para atender às demandas de qualidade de energia elétrica.

2.10 EFICÁCIA E LIMITAÇÕES

O gerenciamento eficaz da qualidade da potência em sistemas elétricos é muito importante para garantir a operação confiável e eficiente de equipamentos elétricos. As distorções harmônicas podem resultar em perdas de eficiência, aumento de temperaturas, redução da vida útil de equipamentos e, consequentemente, custos operacionais mais elevados, como foi visto previamente.

Neste contexto, explorar a eficiência e as limitações de métodos analisados, torna extremamente necessária, ao compreender as características distintas de cada abordagem, os engenheiros e profissionais do setor elétrico podem tomar decisões informadas sobre a escolha e implementação de estratégias em sistemas elétricos complexos. Esta análise aprofundada fornecerá insights para otimizar o desempenho dos sistemas elétricos, promovendo a eficiência energética e a confiabilidade operacional, garantindo uma melhor qualidade no sistema elétrico brasileiro.

Métodos Passivos

- Filtros Passivos

Eficiência: Os filtros passivos são eficazes na atenuação de harmônicos específicos, geralmente de ordens ímpares. Eles são eficazes em sistemas nos quais os harmônicos são conhecidos e estáveis.

Limitações: A eficiência dos filtros passivos depende da carga e das condições operacionais, podendo não ser tão eficazes em sistemas dinâmicos ou com variações significativas na carga. Além disso, eles podem ser grandes e volumosos.

- Reatores de Linha

Eficiência: Reatores de linha são eficazes na redução de correntes harmônicas e melhoram a estabilidade do sistema. Eles são particularmente úteis para mitigar harmônicos de baixa frequência.

Limitações: Pode haver perdas de potência nos reatores, e eles podem aumentar as quedas de tensão. O tamanho físico dos reatores também pode ser significativo.

- Transformadores Especiais

Eficiência: Transformadores especiais, como transformadores com derivação central, podem ser eficazes na redução de harmônicos.

Limitações: São dispositivos mais caros e podem introduzir perdas adicionais. A eficiência depende da carga e da configuração específica do transformador.

- Supressores de Ressonância

Eficiência: Supressores de ressonância são eficazes na eliminação de ressonâncias no sistema, melhorando a qualidade da potência.

Limitações: A eficácia pode ser comprometida em sistemas dinâmicos com mudanças frequentes na carga. Além disso, a sintonia precisa ser desafiadora.

- Baterias de Capacitores e Indutores

Eficiência: Baterias de capacitores e indutores são eficazes na correção do fator de potência e podem ajudar a reduzir as penalidades associadas.

Limitações: Se não dimensionadas corretamente, podem ressoar com a impedância do sistema, introduzindo novos problemas harmônicos. A manutenção também é crucial para garantir o desempenho contínuo.

- Sintonia de Fator de Potência

Eficiência: A sintonia do fator de potência melhora a eficiência do sistema, reduzindo perdas de energia.

Limitações: Pode não ser tão eficaz na mitigação de harmônicos. Além disso, o ajuste preciso pode ser necessário para garantir benefícios significativos.

- Filtros de Harmônicos Distribuídos

Eficiência: Esses filtros são eficazes na mitigação de harmônicos em toda a instalação, proporcionando uma solução mais abrangente.

Limitações: A complexidade de projeto e implementação pode ser alta. O custo inicial e os requisitos de espaço também podem ser significativos.

- Dispositivos com Menor Distorção Harmônica

Eficiência: Escolher dispositivos com menor distorção harmônica intrínseca é uma abordagem proativa.

Limitações: Pode ser difícil encontrar dispositivos que atendam a requisitos específicos, e essa abordagem pode ser limitada para sistemas já em operação.

Métodos Ativos

- Filtros Ativos

Eficiência: Filtros ativos são altamente eficientes na eliminação de distorções harmônicas. Eles podem ser adaptados para tratar uma ampla gama de frequências e ordens harmônicas.

Limitações: O custo inicial e a complexidade do sistema são geralmente mais altos. Manutenção regular é necessária, e o desempenho pode depender da correta sintonia e configuração.

- Conversores Estáticos Ativos

Eficiência: Esses dispositivos podem compensar harmônicos e melhorar a qualidade da potência. São eficazes em sistemas de alimentação não linear.

Limitações: O custo inicial e as perdas de potência associadas ao conversor podem ser fator considerável. Por isso a configuração do sistema é crucial.

- Inversores PWM (Modulação por Largura de Pulso)

Eficiência: Inversores PWM são eficazes na geração de formas de onda de saída mais puras, reduzindo as distorções harmônicas.

Limitações: Podem introduzir harmônicos de alta frequência. Por isso para obter uma eficácia adequada dependo do design e da sintonia precisa.

- Controle de Fator de Potência Ativo

Eficiência: O controle ativo do fator de potência é eficaz na redução de penalidades associadas a baixos fatores de potência.

Limitações: Pode não ser tão eficaz na mitigação de harmônicos. Por isso, depende da correta sintonia e ajuste.

- Sistemas Híbridos Ativos e Passivos

Eficiência: A combinação de métodos ativos e passivos pode fornecer uma solução mais abrangente.

Limitações: A complexidade do sistema aumenta. A eficácia depende da integração adequada dos componentes.

- Sistemas de Controle Adaptativo

Eficiência: Sistemas adaptativos podem ajustar dinamicamente os parâmetros para otimizar o desempenho.

Limitações: Requer algoritmos sofisticados e um sistema de monitoramento robusto. A adaptação em tempo real pode ser desafiadora.

- Injeção de Corrente Híbrida

Eficiência: A injeção de corrente híbrida é eficaz na compensação de correntes harmônicas.

Limitações: Requer uma análise precisa do sistema para garantir a sintonia correta. O custo inicial pode tornar um agente limitante.

- Uso de Tecnologia de Comutação Suave

Eficiência: A comutação suave reduz as perdas associadas à comutação abrupta, melhorando a qualidade da potência.

Limitações: Pode aumentar a complexidade do sistema dependendo do tipo de carga e do projeto específico.

- Algoritmos de Controle Avançado

Eficiência: Algoritmos avançados podem otimizar o desempenho do sistema em tempo real.

Limitações: A implementação pode ser complexa, exigindo hardware e software sofisticados. A eficácia depende da correta adaptação aos requisitos específicos do sistema.

- Monitoramento e Análise em Tempo Real

Eficiência: O monitoramento em tempo real permite uma resposta rápida a mudanças nas condições do sistema.

Limitações: A implementação de sistemas de monitoramento pode aumentar os custos iniciais. A interpretação correta dos dados é crucial para a eficácia.

3 ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO: REDE COMERCIAL E INDUSTRIAL SECUNDARIA.

O capítulo três irá abordar um estudo de caso realizado para a análise de potência e corrente e da compensação capacitiva de uma rede com consumidores comerciais e industriais secundaria curta com alto nível de presença de cargas não lineares instaladas.

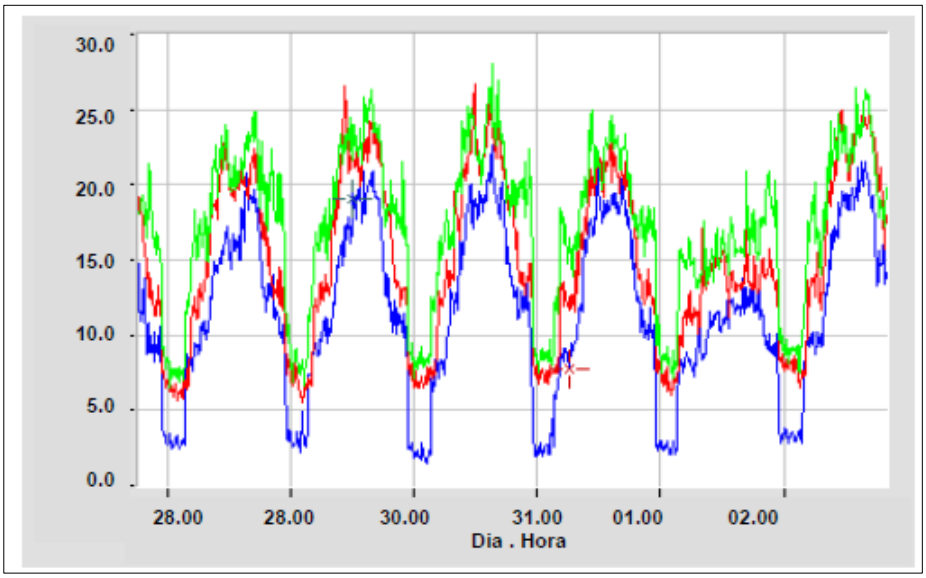
3.1 DISCUSSÃO DA ANÁLISE DA POTÊNCIA E CORRENTE.

Segundo o estudo realizado pelo Departamento de Sistemas e Energias (DSE) da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas (FEEC - UNICAMP), pode-se realizar uma análise dos resultados de uma medição de uma rede secundaria radial curta, porém com concentração de cargas comerciais e industriais.

Trata-se de um alimentador urbano, com alta presença de cargas não lineares como: iluminação com reatores eletromagnéticos e eletrônicos, computadores, impressoras, condicionadores de ar, entre outros.

De acordo com as medições pode-se inferir que a carga total está razoavelmente bem balanceada como mostra o gráfico da figura 25.

Figura 25 - Potência aparente no secundário do transformador.

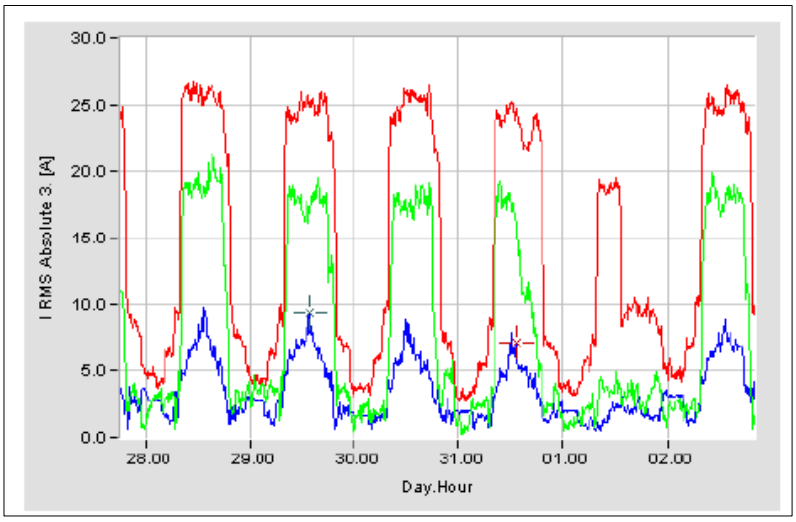


Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2006)

Porém, as cargas não lineares estão concentradas em duas fases, como se pode concluir da análise da figura 26.

No horário comercial, o 3º harmônico aumenta apenas em duas fases, sugerindo cargas bifásicas não lineares. Comportamento análogo se nota também nas demais componentes harmônicas da corrente. Tal desequilíbrio leva a uma propagação de componentes harmônicas da corrente para o lado de alta tensão do transformador, o que resultará na distorção da tensão no sistema de distribuição para outras cargas.

Figura 26. Terceiro harmônico da corrente da carga comercial.



Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2006)

3.2 COMPENSAÇÃO CAPACITIVA EM REDES COMERCIAIS.

As indústrias encarregadas pela distribuição de energia, bem como os consumidores, têm interesses em inserir filtros passivos ou compensação capacitiva nas redes elétricas para melhorar a qualidade da tensão.

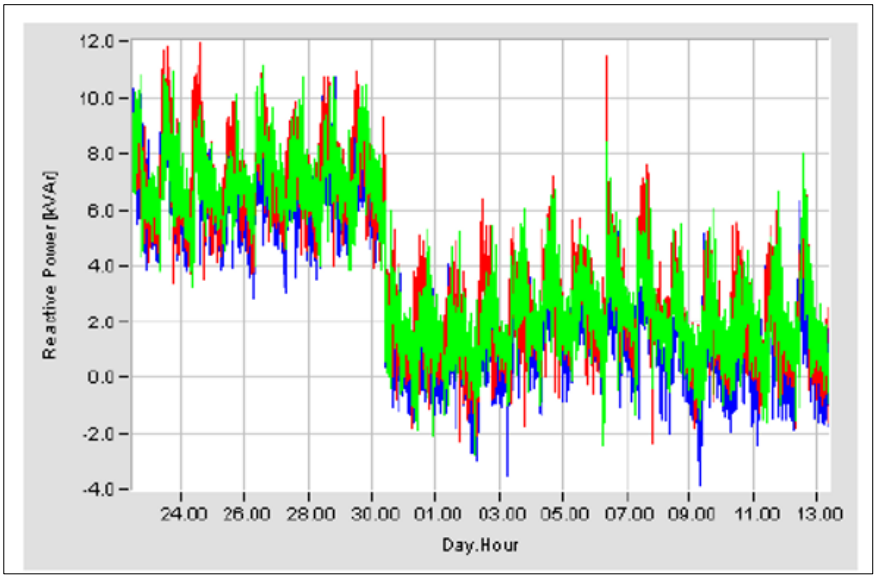
Levando-se em consideração o perigo associado aos filtros ajustados em sistemas com deformações, uma alternativa é a compensação singular da potência reativa por intermédio de capacitores. Em ambas as técnicas, a medida de reativos capacitivos pode ser calibrada para equilibrar a parcela "base" da potência reativa.

As vantagens econômicas englobam a diminuição de perdas nos transformadores e na malha, além aumento da procura devido ao acréscimo de tensão para os consumidores. A figura 27 exibe a flutuação na potência reativa medida no transformador de uma residência

com a compensação de um bloco capacitivo de 17,5 kVAr. A figura 28 ilustra o efeito resultante na voltagem na saída do transformador.

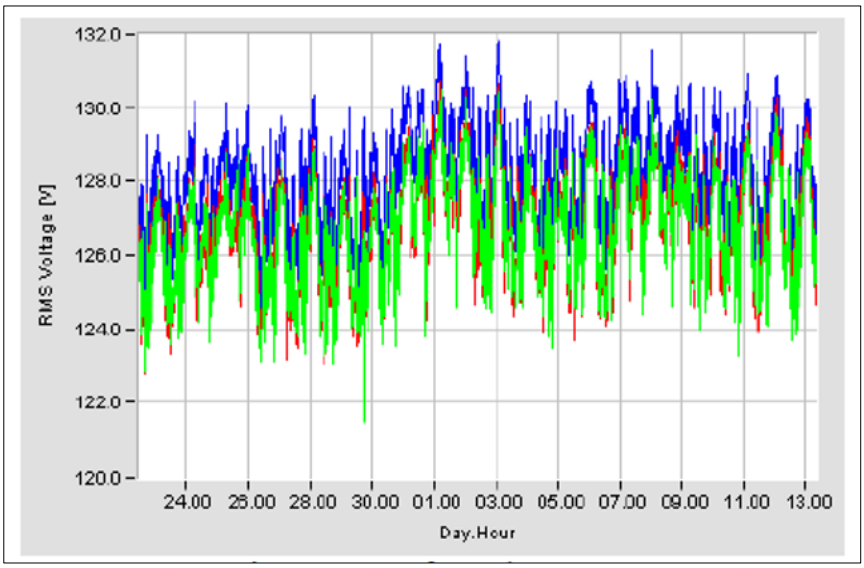
A instalação do banco capacitivo é evidenciada pela figura 29, que revela um aumento na DHT (Distorção Harmônica Total) da tensão. A DHT média da tensão passou de 2% para 2,5%, enquanto a de corrente aumentou de 8,5% para 10%, como demonstrado na figura 30.

Figura 27 - Efeito da compensação de reativos em rede predominantemente residencial.



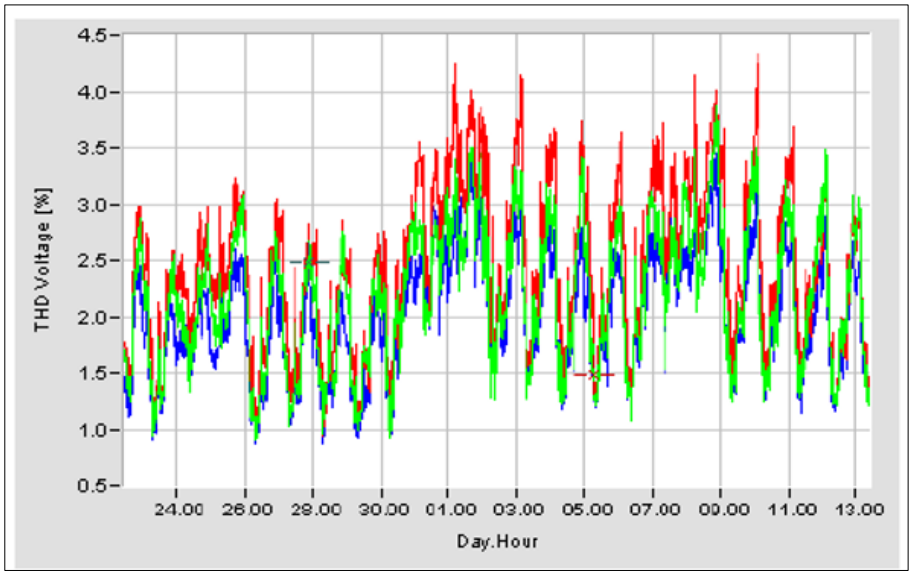
Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2006)

Figura 28 - Aumento na tensão junto ao transformador com compensação capacitiva.



Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2006)

Figura 29 – DHT da tensão antes e após a instalação do banco capacitivo.



Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2006)

Após analisar a rede e o alimentador, observa-se um aumento na distorção da corrente, especialmente na 7ª harmônica.

A medição é realizada próximo ao transformador, ou seja, a presença de distorções na tensão resulta em uma amplificação harmônica.

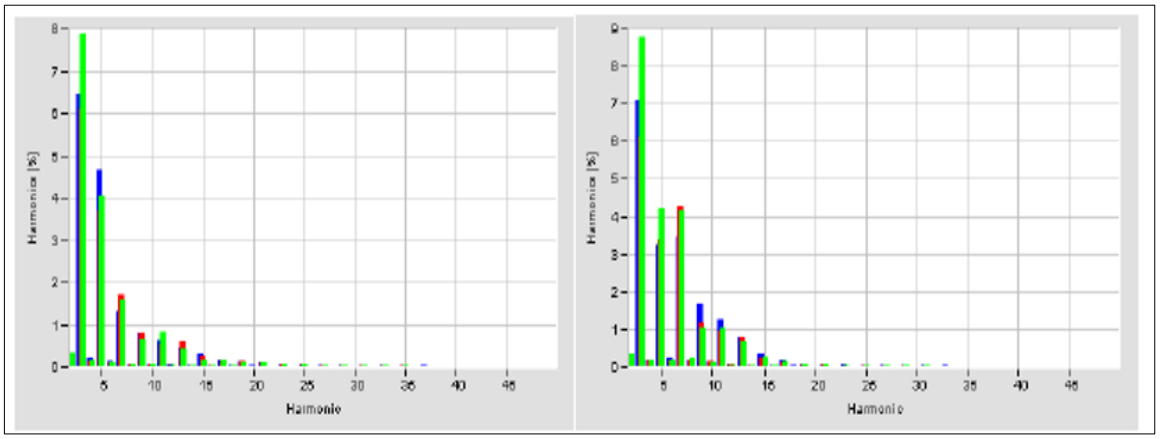
Essa amplificação pode se tornar excessiva se houver uma ressonância próxima à componente presente na tensão, causada pela interação entre o banco capacitivo e a impedância do alimentador.

Caso a harmônica seja originada pela carga, que se comporta como uma fonte de tensão, a explicação requer a consideração da ressonância paralela entre o banco capacitivo e a impedância da fonte.

O componente harmônico da tensão no ponto de acoplamento Comum (PAC), para um determinado valor presente na carga (V_{oh}), é dada pela equação 11.

$$\frac{V_{hPAC}}{V_{oh}} = \frac{Z_i // Z_f}{Z_0 + Z_i // Z_f} \tag{11}$$

Figura 30 – Espectro da corrente no transformador antes e depois da instalação do banco de capacitores.



Fonte: Adaptado de Deckmann S.M. e Pomilio J.A (2006)

4. CONCLUSÕES

A distorção de tensão geralmente resulta da interação entre a distorção proveniente da rede de média tensão, a impedância do sistema e a corrente harmônica gerada pela carga. Um problema destacado nacionalmente é a presença de correntes distorcidas geradas ou injetadas por cargas não lineares visto que realizar uma análise em um sistema elétrico de distribuição em relação à influência das distorções harmônicas, é essencial compreender as cargas presentes no sistema elétrico, suas características de operação e utilizar métodos eficientes de modelagem. A avaliação dos sistemas elétricos só pode ser realizada ao verificar seu desempenho diante de distúrbios causados pela presença de cargas não lineares

A análise abrangente das características e comportamentos das cargas não lineares na rede elétrica revela a complexidade de seus efeitos prejudiciais, que incluem harmônicas, distorções de tensão, desequilíbrio de carga e "*flicker*". Por isso, esses impactos representam desafios significativos para a qualidade da energia elétrica. A compreensão desses fenômenos é essencial para propor soluções e medidas capazes de minimizar tais impactos. As estratégias desenvolvidas e as medidas sugeridas não apenas visam mitigar os efeitos negativos, mas também contribuem para uma gestão mais eficiente da qualidade de energia elétrica em ambientes com presença de cargas não lineares.

A contextualização vista dos conceitos fundamentais relacionados à qualidade de energia elétrica, juntamente com a identificação e caracterização das principais cargas não lineares nos sistemas elétricos, cria uma base para o desenvolvimento de recomendações práticas. Além disso, a discussão das normas e regulamentações aplicáveis ressalta a necessidade de alinhamento com padrões de qualidade para assegurar um ambiente elétrico estável e eficiente.

As recomendações e diretrizes práticas vistas neste estudo contribuíram significativamente para o aprimoramento da gestão da qualidade de energia elétrica em sistemas. A inclusão de perspectivas de desenvolvimento tecnológico destaca a dinâmica evolutiva do campo da qualidade de energia. Isso não apenas fornece percepções valiosas atualmente, mas também antecipa as mudanças que podem impactar positivamente a eficiência dos sistemas elétricos no futuro.

REFERÊNCIAS

ALBERTO, S. C. **Qualidade de energia elétrica:** efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2017. 527 p.

ARRILAGA, J.; BRADLEY, D. A. **Power system harmonics**. 3rd ed. New York: Wiley-IEEE Press, 1985. 360 p.

BARBOSA, C. F. O.; ALBUQUERQUE, L. O.; SILVA, T. V. P.; MACEDO, W. N.; PINHO, J. T.; GALHARDO, M. A. B. Avaliação da qualidade de energia elétrica na interconexão de microrredes isoladas experimentais. **Revista brasileira de energia solar**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2021. Disponível em: https://rbens.org.br/rbens/article/view/336. Acesso em: 12 out. 2023.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems**: voltage sags and interruptions. 11th ed. New York: IEEE Press, 2000. 22 p.

CHATTOPADHYAY, S.; MITRA, M.; SENGUPTA, S. **Electric power quality**. Calcutta: Springer, 2011. 182 p.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996. 528 p.

GOSBELL, V.J.; PERERA, B.S.P.; HERATH, H.M.S.C. **New framework for utility power quality data analysis**, 3rd ed. Wollongong: Wiley-IEEE Press, 2001. 6 p.

HANSEN, S.; NIELSEN, P.; BLAABJERG, F. Harmonic cancellation by mixing nonlinear single-phase and three-phase loads. *In*: CONFERENCE RECORD OF IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 33., 1998, Salt Lake City. **Proceedings [...]**, Salt Lake City, 1998. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/Harmonic-cancellation-by-mixing-nonlinear-and-loads-Hansen-Nielsen/11ec04426275b1334804a38af10dbb4b7707232a. Acesso em: 17 out. 2023.

HOOMAN, E. M.; JOEY, G. **A probabilistic analysis on the harmonic cancellation characteristics of the Scott transformer**. Edmonton: SciRP, 2010. 7p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE STD 519**: standard for harmonics control in electric power systems: the need for probabilistic harmonic limits. New York: IEEE, 2022.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-2**: compatibilidade eletromagnético (EMC)**:** limites para emissões de corrente harmônica. Genebra: IEC, 2000.

LIU, Z.; XU, X.; ABDELSALAM, H. A.; MAKRAM, E. Power system harmonics study for unbalanced microgrid system with PV sources and nonlinear loads. **Journal of power and energy engineering**, Seattle, v. 3., p. 1-13, 2015. Disponível em: https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=56182. Acesso em: 25 ago. 2023.

MANJURE, D. P.; MAKRAM, E. B. Effect of nonlinearity and unbalance on power factor. *In:* POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 4., 2000, Clemson. **Proceedings […]**, Clemson, 2000. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/867501. Acesso em: 14 out. 2023.

MANSOOR, A.; GRADY, W.; THALLAM, R.; DOYLE, M.; KREIN, S. Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads. **IEEE transactions on power delivery,** Texas, v 10, 1638 p., 1995. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/400924/metrics#metrics. Acesso em: 22 dez. 2023.

MASOUM, A.S.M.; EWALD, F. F. **Power quality in power system and electrical machines**. 2nd ed. Cambridge: Academic Press, 2015. 664 p.

MORENO, M. A. **Power quality**: mitigation technologies in a distributed environment. Córdoba: Springer, 2007. 424 p.

RIBEIRO, P. F. Guidelines on distribution system and load representation for harmonic studie**s**. *In*: ICHPS INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS IN POWER SYSTEMS, 5.,1992, Atlanta. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/559090. Acesso em: 13 nov. 2023.

SANKARAM, N. C. **Power quality**. New York: CRC Press, 2019. 216 p.

SANTOS, A. H. M; SIMÕES, A. F; MARTINS, A. R. S; VIANA, A. N. C. **Conservação de energia**: eficiência energética de equipamentos e instalações. 3rd ed. São Paulo: Fupai, 2006. 621 p.

STEVEN, W. B. **Electric power system basics for the nonelectrical professional**. 2nd ed. New York: Wiley-IEEE Press, 2016. 256 p.

YONIS, E.; DIAA, S. Simulation model for passive harmonic filters using Matlab/Simulink: case study. **Journal of power and energy engineering**, Mersin, v. 11, p. 14-35, 2023. Disponível em: https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=123824. Acesso em: 22 set. 2023.