

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA – DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAIO LUCA SILVA SCARPA

**UMA PROPOSTA DE EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO PARA O ENSINO
DIDÁTICO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

GOIÂNIA

2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Caio Luca Silva Scarpa

Matrícula: 20191011060408

Título do Trabalho: Uma Proposta De Experimento De Laboratório Para O Ensino Didático De Distorção Harmônica

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 21/02/2023.
Local Data

Caio Luca Silva Scarpa

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

CAIO LUCA SILVA SCARPA

**UMA PROPOSTA DE EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO PARA O ENSINO
DIDÁTICO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das
exigências para obtenção do Título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Ubaldo Eleutério da
Silva

GOIÂNIA

2023

S286p Scarpa, Caio Luca Silva.

Uma proposta de experimento de laboratório para o ensino didático de distorção harmônica / Caio Luca Silva Scarpa. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2023.

46f.

Orientação: Prof. Me. Ubaldo Eleutério da Silva.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento da Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui anexo.

1. Sistemas elétricos. 2. Distorção harmônica. I. Silva, Ubaldo Eleutério da (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 621.319 1

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

CAIO LUCA SILVA SCARPA

**UMA PROPOSTA DE EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO PARA O ENSINO DIDÁTICO
DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, como parte das exigências
para obtenção do Título de Engenheiro
Eletricista.

Goiânia, 14 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Ubaldo Eleutério da Silva
Orientador - IFG/Goiânia

Prof. Me. Luís Fernando Pagotti
Membro da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Prof. Dr. Renato Jayme Dias
Membro da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- **Luis Fernando Pagotti, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2023 07:20:59.
- **Renato Jayme Dias, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 14/12/2023 14:35:36.
- **Ubaldo Eleuterio da Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 14/12/2023 11:18:16.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/12/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse
<https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 490409
Código de Autenticação: 413166516a



RESUMO

As distorções harmônicas são anomalias na rede elétrica que consiste nas distorções do sinal senoidal, o sinal resultante da distorção pode ser decomposto em harmônicas, de sinais senoidais múltiplos da frequência fundamental. O estudo de distorções harmônicas é necessário para a compreensão dos aspectos envolvidos à qualidade de energia, que afetam todo o sistema elétrico e seus equipamentos. Este trabalho terá foco na teoria sobre as harmônicas e distorções harmônicas, com o intuito didático para discentes de cursos de bacharelado em engenharia elétrica. Será abordado os aspectos de cálculos, análise e limites das componentes harmônicas no sinal de tensão e corrente elétrica. Para realizar estudos práticos será analisado as distorções harmônicas em conversores, descrevendo a montagem, medição e análise dos dados, verificando as distorções harmônicas presentes no sinal.

Palavras-chave: Sistema elétrico de potência, distorção harmônica, Harmônicas, espectro harmônico conversores.

ABSTRACT

Harmonic distortions are anomalies in the electrical grid that consist of distortions of the sinusoidal signal, the resulting signal from the distortion can be decomposed into harmonics, of sinusoidal signals multiples of the fundamental frequency. The study of harmonic distortions is necessary for understanding the aspects involved in energy quality, which affect the entire electrical system and its equipment. This work will focus on the theory about harmonics and harmonic distortions, with a didactic purpose for students of bachelor's degree courses in electrical engineering. It will address the aspects of calculations, analysis, and limits of the harmonic components in the voltage and electric current signal. To conduct practical studies, the harmonic distortions in converters will be analyzed, describing the assembly, measurement, and analysis of the data, verifying the harmonic distortions present in the signal.

Keywords: Electrical Power System, Harmonic Distortion, Harmonics, Harmonic Spectrum Converters.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

QEE - Qualidade de Energia Elétrica

DHT - Distorções Harmônicas Total

DHTI - Distorções Harmônica Total de Corrente

DHII - Distorções Harmônicas Total de Corrente Individual

DHTV - Distorções Harmônicas Total de Tensão

DHVI - Distorções Harmônicas Total de Tensão Individual

Hz – Hertz

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

EM - European Normalization

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

GD – Geração Distribuída

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema elétrico de potência	4
Figura 2 - Tensões geradas se encontram afastadas a 120° entre si	5
Figura 3 - Sequência de fase positiva	6
Figura 4 - Sequência de fase negativa	6
Figura 5 - Sequência zero	6
Figura 6 - Distorção harmônica de 3ª e 5ª ordem	8
Figura 7 - Espectro harmônico gerado pelo MATLAB.....	11
Figura 8 - Retificador de onda completa em ponte	18
Figura 9 - Retificador trifásico em ponte.....	18
Figura 10 - Forma de onda retificador trifásico.....	19
Figura 11 - Circuito conversor	21
Figura 12 - Circuito chave S1 e S4 fechada	21
Figura 13 - Período de transição das chaves.....	22
Figura 14 - Circuito chave S2 e S3 fechadas.....	22
Figura 15 - Gráfico onda quadra.....	23
Figura 16 - Inversor de ponte completa.....	23
Figura 17 - Inversor de frequência trifásico	24
Figura 18 - Esquemático de geração distribuída fotovoltaica	25
Figura 19 - Circuito geração solar	29
Figura 20 - Bancada fotovoltaica medição no inversor	29
Figura 21 - Distorção de inversor de frequência monofásico.....	31
Figura 22 – Retificador de 6 pulsos.....	34
Figura 23 - Circuito montado do conversor CA/CC	35
Figura 24 - Interface do PowerPad	35
Figura 25 - Circuito motor universal em CC.....	36
Figura 26 - Sinal de tensão após conversor CA para CC	37
Figura 27 - Distorção harmônica gerada pelo conversor CA/CC.....	37
Figura 28 - Distorção harmônicas do acionamento de motor universal em CC.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de harmônicos	9
Tabela 2 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	15
Tabela 3 - Terminologia	15
Tabela 4 - Limite de distorção harmônica de corrente	26
Tabela 5 - Harmônicas do inversor de frequência da bancada De Lorenzo	31
Tabela 6 – Harmônicas gerada pelo conversor CA/CC.....	38
Tabela 7 – Harmônica do acionamento de motor universal em CC.....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS GERAIS	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	2
1.4. METODOLOGIA.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1.1. Sistema Elétrico de Potência	4
2.1.2. Qualidade de Energia	4
2.1.3. Sistema Trifásico.....	5
2.1.4. Série de Fourier.....	7
2.1.5. Harmônicas.....	8
2.1.6. Inter-harmônicas	10
2.1.7. Espectro Harmônico	10
2.2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	11
2.2.1. Limites de distorções harmônicas	15
2.3. CAUSAS E EFEITOS	16
2.3.1. Cargas Não Lineares	17
2.3.2. Efeitos Comuns	17
2.4. RETIFICADOR CA/CC.....	17
2.5. INVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	20
2.5.1. Inversores Monofásicos	20
2.5.2. Inversores Trifásicos.....	24
2.5.3. Utilização de Inversores em Sistemas Fotovoltaicos.....	24
2.6. NORMAS	25
3. LABORATÓRIOS	27
3.1. ROTEIRO DA BANCADA DIDÁTICA DE LORENZO	27
3.1.1. Introdução	27
3.1.2. Objetivos	27
3.1.3. Segurança	28
3.1.4. Equipamentos e Materiais.....	28
3.1.5. Montagem das Medições	28
3.1.6. Resultados.....	30

3.2.	ROTEIRO CONVERSOR CA/CC.....	32
3.2.1.	Introdução	32
3.2.2.	Objetivos	32
3.2.3.	Segurança	33
3.2.4.	Equipamentos e Materiais.....	33
3.2.5.	Montagem das Medições	34
3.2.6.	Resultados.....	36
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
4.1.	CONCLUSÃO.....	41
4.2.	TRABALHOS FUTUROS	42
5.	REFERÊNCIAS	43
	ANEXO A.....	45

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico e populacional da sociedade a demanda de energia elétrica aumentou, pois desde a execução de atividades simples do dia a dia até as atividades e processos mais complexos, a disponibilidade da energia elétrica é imprescindível para a execução de atividades. O fornecimento de energia é um fator essencial para o desenvolvimento de regiões e para o conforto das pessoas [1].

Pelo impacto da energia elétrica, causa na sociedade é necessário manter um padrão e qualidade em sua entrega, para obter eficiência e qualidade, obtendo um produto adequado aos consumidores.

Com o cenário atual, a qualidade de energia elétrica (QEE) é um tópico de preocupação, devido à necessidade de confiabilidade no sistema elétrico [1, 2]. Inicialmente a QEE era vista conforme a quantidade de desligamentos que o sistema elétrico era submetido, entretanto essa visão foi alterada conforme a evolução do sistema elétrico.

Atualmente o conceito de qualidade de energia envolve os seguintes aspectos, para regime permanente temos, tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência. Para regime transitório analisa a variações de tensão de curta duração – VTCD [2].

Com o conceito de QEE atual podemos observar alguns limites que devem ser verificados, para assim atender os requisitos da qualidade da energia. Com um olhar mais atento temos as distorções harmônicas nos sistemas elétricos. As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações na forma de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental [2].

As distorções harmônicas são causadas por cargas não lineares em sua maioria pelas cargas industriais e modernização de equipamentos. Entretanto com o avanço de tecnologias residenciais, as cargas não lineares estão cada vez mais significativas, devidos aos aparelhos eletrônicos presentes, como impressoras, televisão, computadores, micro-ondas inversores de frequência, fontes chaveadas etc. Esses aparelhos também são responsáveis por distorcer o sinal da rede elétrica, assim propagando por todo o circuito [3,4].

Com o cenário atual e os impactos que as distorções harmônicas gera no sistema elétrico, como aquecimento excessivos, disparo de dispositivo de proteção, ressonância, vibrações, desempenho e funcionamento de motores, capacitores e entre outros equipamentos. Tendo em vista dos possíveis impactos e efeitos, torna-se necessário conhecer sobre as distorções harmônicas [3].

1.1. OBJETIVOS GERAIS

Ao decorrer da pesquisa é visado a introdução de conceitos e definições a respeito de distorções harmônicas, com a finalidade de criação de um material amplo para o estudo e com a prática de laboratórios com objetivo de visualizar as distorções harmônicas em circuitos elétricos a partir de roteiros com medições e análises.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O levantamento bibliográfico sobre harmônicos em sistemas elétricos, tem como foco as distorções harmônicas totais, realizando o estudo das mesmas. Sendo divididas em:

- Distorção harmônica total (DHT)
- Distorções harmônica total de tensão (DHTV)
- Distorção harmônica total de corrente (DHTI)

Após a apresentação dos tópicos, ao final será proposto o desenvolvimento de experimentos, com distorções no sinal da tensão e corrente, com roteiros de montagem e execução para a demonstração prática da teoria estudada.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por quatro etapas visando construir uma linha de pensamento para a apresentação inicial sobre distorções harmônicas. A primeira etapa consiste na apresentação de conceitos e teorias sobre o tema. Na segunda etapa, apresenta equipamentos responsáveis por harmônicos que serão utilizados nos experimentos, realizando uma breve explicação teórica, sobre eles.

A terceira etapa objetiva apresentar o desenvolvimento de laboratórios de harmônicas com caráter didático para apresentar as distorções harmônicas, realizar cálculos e analisar como um equipamento pode alterar a forma de onda de um circuito. Ademais, essa etapa permitirá a visualização de harmônicas, permitindo avaliar e aplicar os conhecimentos apresentados.

Na quarta e última etapa, o objetivo é recapitular os tópicos abordados anteriormente e realizar a conclusão. Assim montando um material didático sobre distorções harmônicas com o desenvolvimento de roteiros para montagem de circuitos e análise, para posteriormente ser utilizado como uma fonte de estudo.

1.4. METODOLOGIA

A metodologia para a pesquisa é fundamental para o estudo. Com os objetivos teórico definidos em distorções harmônicas, foi possível entender o que é, qual são suas causas e seus efeitos, será focado em obter fontes confiáveis para o levantamento bibliográfico.

A pesquisa terá como foco os artigos científicos, livros, teses, dissertações e normas técnicas. Para a procura será utilizado bibliotecas e ou ferramentas de pesquisa online, como o Google acadêmico, site periódicos, site do IEEE, normas de órgãos reguladores como ANEEL e ABNT. O foco principal é encontrar fontes confiáveis de informações sobre harmônicos.

Durante a pesquisa, os materiais devem passar por análise crítica com as informações, destacando as principais contribuições, os pontos importantes de cada fonte. Ao identificar os aspectos de cada fonte de pesquisa, será filtrado as mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

Para a realização dos experimentos práticos, será analisado os equipamentos disponíveis na instituição de ensino, com os equipamentos disponíveis será proposto a viabilidade da realização dos experimentos, tendo como base os dados teóricos adquiridos durante o estudo e levantamento bibliográfico e teórico, para a criação do roteiro que pretende, exemplificar os conhecimentos discutidos.

Ao fim é importante realizar uma análise completa do estudo, para a verificação dos resultados e assim identificar pontos de melhorias e para desenvolvimento de pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

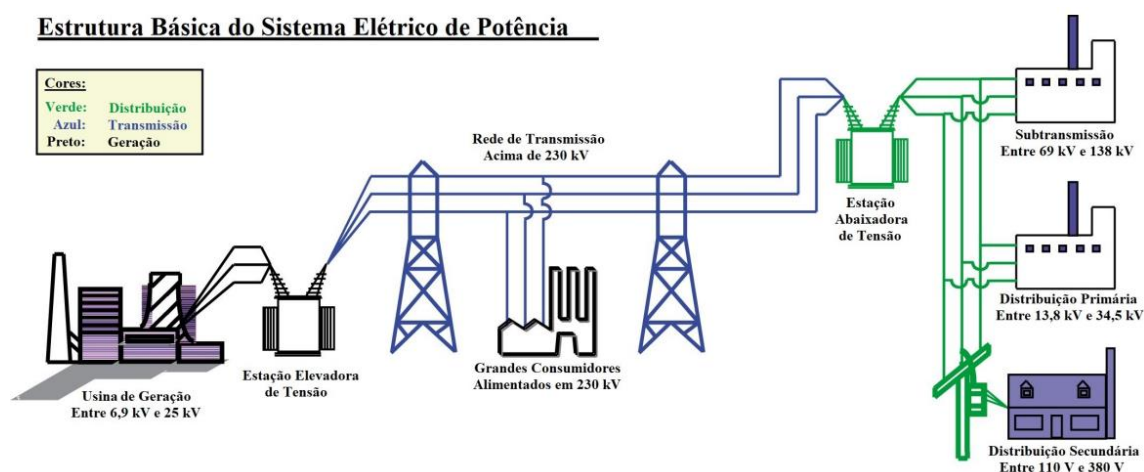
Neste tópico, serão abordados os conceitos e teorias iniciais para a compreensão do sistema elétrico, com foco nas distorções harmônicas. O objetivo é definir as áreas temáticas (ou áreas de conhecimento) para a compreensão do estudo das distorções harmônicas no sistema elétrico brasileiro.

2.1.1. Sistema Elétrico de Potência

O sistema de energia elétrica é composto por geradores, transformadores, linhas de transmissão e alimentadores de distribuição, formando o sistema elétrico. Os geradores convertem a energia em energia elétrica, os transformadores adequam a tensão para a transmissão da energia, transportada para os centros de carga e distribuída aos consumidores [5]. Este sistema possui padrões e normas de regulamentação para a entrega da energia, exigindo padrões tanto para as concessionárias, tanto para os consumidores.

Na Figura 1 é representada de forma simplificada o sistema elétrico, composto pelas partes de geração representada pela usina geradora e transformador, transmissão representado pelas linhas de alta tensão e grandes consumidores e distribuição representados pela subestação abaixadora, linhas de distribuição e consumidores. Durante todo o processo, o nível de tensão, corrente, frequência e padrão do produto da energia elétrica são controlados pelas geradoras, transmissoras e concessionárias, sendo este sistema regido e fiscalizado por órgãos e autarquias.

Figura 1 - Sistema elétrico de potência



Fonte: Caio Augusto Fonseca de Freitas [6]

2.1.2. Qualidade de Energia

A qualidade da energia elétrica, é um aspecto importante do fornecimento de energia, e pode ser definida como a ausência de transitórios, flutuações de tensão, harmônicas,

desligamentos e variações nos níveis de tensão. Essas características determinam o padrão ideal para o fornecimento de energia elétrica [2,7].

O conceito de QEE, definidos por normas e regulamentações, coloca padrões para a entrega do produto. Para tornar possível o controle, gestão e padronização do sistema, para assim garantir a qualidade da energia elétrica [2].

2.1.3. Sistema Trifásico

Circuitos CA que operam na mesma frequência, porém em fases diferentes são denominados de polifásicos. No caso de um sistema trifásico, há três fontes de tensão de mesma amplitude e frequência, porém com sinal defasados de 120° [8].

Um sistema trifásico é formado por três fontes de tensão conectadas geralmente com o tipo de ligação sendo triângulo ou estrela, esse sistema que equivale três circuitos monofásicos. Assim é descrito por meio matemático com as seguintes expressões identificadas nas Equação 1, Equação 2 e Equação 3, os quais são as representações matemáticas em sua forma polar na sequência positiva [8].

$$V_{an} = V_{rms} \angle 0^\circ$$

Equação 1 - Fasor A do sistema trifásico

$$V_{bn} = V_{rms} \angle -120^\circ$$

Equação 2 - Fasor B do sistema trifásico

$$V_{cn} = V_{rms} \angle -240^\circ = V_{rms} \angle +120^\circ$$

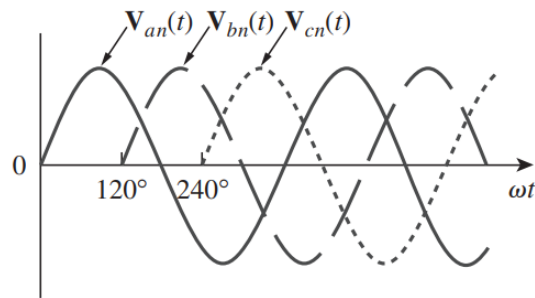
Equação 3 - Fasor C do sistema trifásico

V_{an} , V_{bn} , V_{cn} é a tensão da fase A, B e C.

V_{rms} é a magnitude da tensão eficaz da fonte.

A figura a seguir mostra o sistema trifásico em sua forma de onda, percebe-se que os sinais são defasados de 120° graus, entre eles. O sinal é uma forma de onda senoidal pura.

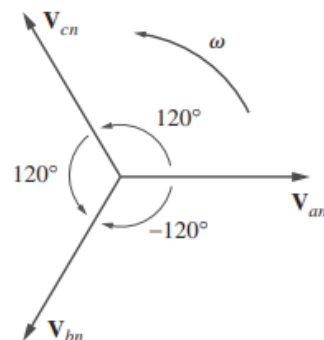
Figura 2 - Tensões geradas se encontram afastadas a 120° entre si



Fonte: Fundamentos de circuitos elétricos 5ª edição.

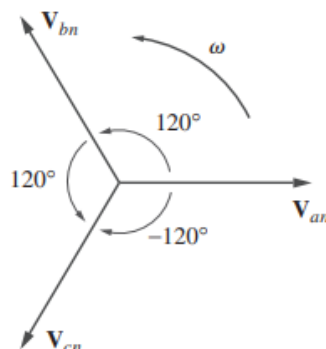
O sistema trifásico possui as três fases defasadas de 120° . Quando temos mesma amplitude, frequência e defasagem de 120° temos o sistema equilibrado. Isso implica que o módulo das tensões é igual. Devido à defasagem temos três configurações possíveis no sistema, sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, conforme e aprestado na Figura 3, Figura 4 e Figura 5 a seguir, que é a representação gráfica, é possível observar as sequências em fasores [8].

Figura 3 - Sequência de fase positiva



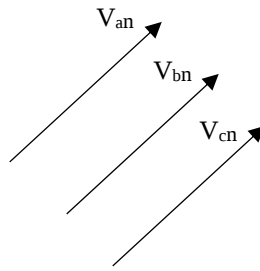
Fonte: Fundamentos de circuitos elétricos 5ª edição [8].

Figura 4 - Sequência de fase negativa



Fonte: Fundamentos de circuitos elétricos 5ª edição [8].

Figura 5 - Sequência zero



Fonte: Autoria própria.

A sequência de fase é definida conforme o livro “Fundamentos de Circuitos Elétricos” [8] dá seguinte maneira “a ordem na qual ocorrem as tensões de fase de um gerador trifásico em relação ao tempo”, ou seja, e a maneira como a energia é gerada conforme a rotação da máquina, que causa a defasagem entre as fases.

Quando analisamos as harmônicas, adota-se como base a sequência positiva, e quando o sistema tem fator de potência, a tensão e corrente estão defasadas, e essa defasagem replica quando é analisada as harmônicas, assim alterando a sequência de fase das harmônicas [9].

Portanto para as distorções harmônicas, a sequência de fase é importante, pois cada componente harmônico terá uma sequência (positiva, negativa ou zero) e uma sequência de fase (ABC, CBA ou sem sequência) que leva a efeitos diferentes [10].

2.1.4. Série de Fourier

Para a análise de sinais utilizasse geralmente a Transformada de Fourier, sendo uma ferramenta matemática capaz de analisar um sinal não senoidal e transformar o sinal não senoidal em uma soma de sinais múltiplas de uma fundamental. E quando falamos de distorções harmônicas é necessário realizar análise de um sinal não senoidal, sendo a soma de sinais senoidais múltiplos de uma fundamental.

Se tivermos um sinal definida pela função $f(t)$, podemos representá-la pela soma de uma série trigonométrica de Fourier, como definida pela Equação 4 abaixo.

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [Ah \cos h\omega_1 t + Bh \sin h\omega_1 t]$$

Equação 4 - Série de Fourier

Ao decompor a somatório dele obtém as componentes múltiplas de um sinal fundamental, que no caso de um sinal elétrico distorcido é as harmônicas presente no sinal.

Na série trigonométrica de Fourier ainda tem as variáveis A_0 , A_h e B_h que pode ser obtida através das Equação 5, Equação 6 e Equação 7 abaixo.

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Equação 5 - Variável A

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(htw_1) dt, \quad h = 1, 2, 3 \dots$$

Equação 6 - Variável A_h

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(htw_1) dt, \quad h = 1, 2, 3 \dots$$

Equação 7 - Variável B_h

Com essas equações é possível realizar a transformada de Fourier no sinal. Para o estudo de distorção harmônica é importante, pois torna possível realizar o estudo, decompondo o sinal em uma fundamental e soma de sinal de frequência múltiplas, facilitando a análise.

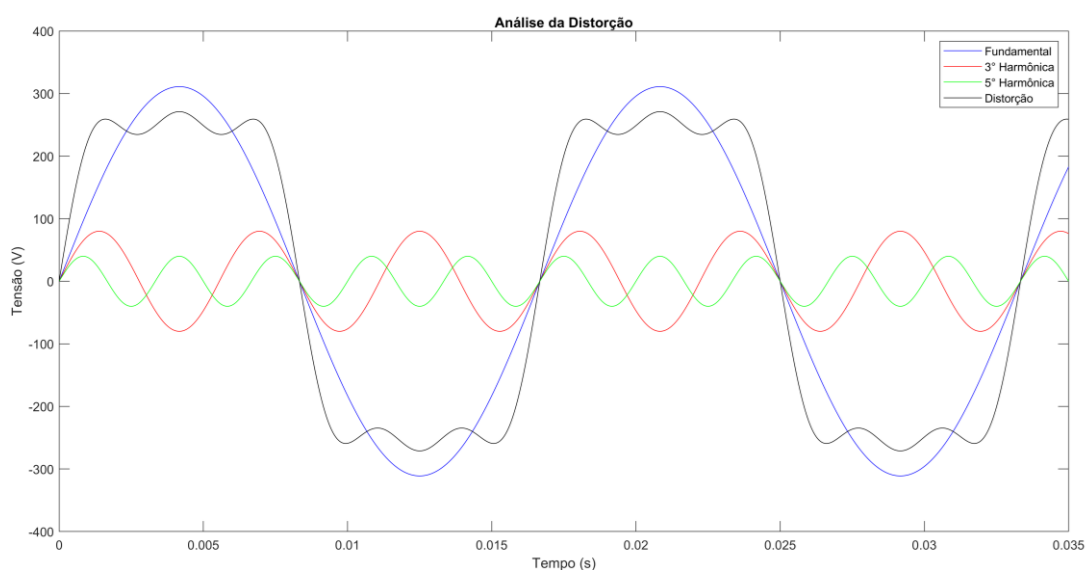
2.1.5. Harmônicas

O sinal elétrico ideal, apresenta uma forma de onda senoidal pura para a tensão e corrente no circuito, ocorrendo no sistema linear, porém quando conectado há uma carga não linear, por exemplo, e gerado no sistema perturbações que “polui” o sinal, resultando em sinal que não é mais uma forma senoidal pura. Essa alteração do sinal acontece devido as características da carga. Matematicamente podemos simplificar e dizer que são uma forma de onda senoidal pura de frequência de múltiplo inteiro diferente do sinal fundamental, na soma desse sinal gera uma forma de onda que contém distorções no sinal [3].

O livro Harmônicas nas instalações elétricas defini as harmônicas no sistema elétrico como “Uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é múltipla inteira da frequência fundamental do sinal de alimentação.” [3].

Na Figura 6 a seguir é demonstrada as formas de onda senoidal da fundamental e suas harmônicas de 3º e 5º ordens. Na forma de onda do último gráfico denominado de “Distorção” tem-se a soma da fundamental com os harmônicos de 3ª e 5ª ordem, o resultado gerado é um sinal deformado conforme é apresentado, a diferença da fundamental para a total será a distorção harmônica causada pelas harmônicas.

Figura 6 - Distorção harmônica de 3ª e 5ª ordem



Fonte: Autoria própria

Ao analisar o conceito em questão é possível afirmar que um sinal periódico apresenta harmônicos quando a sua forma de onda não é senoidal, isto é, quando há deformações em relação ao sinal senoidal fundamental.

É importante destacar que os valores de tensão para o sinal fundamental e as harmônicas foram escolhidos aleatoriamente para a criação do gráfico. Os parâmetros utilizados para gerar o gráfico em questão foram, uma tensão eficaz de 220V e harmônicas de 3ª e 5ª ordem com valores de 80V e 40V, respectivamente. O script utilizado para a simulação pode ser encontrado no anexo A.

As harmônicas são caracterizadas pela sua ordem, amplitude, frequência e sequência, características essa que determinam respostas diferentes no circuito. A seguir é apresentado uma tabela com as classificações dos harmônicos, a separação é por sua, amplitude ordem, frequência, e sequência que pode ser positiva, negativa ou nula.

Tabela 1 - Classificação de harmônicos

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

Fonte: Procobre, Harmônicas nas instalações elétricas, 2001.

A sequência é um fator importante para a análise do harmônico, pois ela pode causar diferentes comportamentos, nos equipamentos, interferindo no seu funcionamento. [3].

Os harmônicos podem ser descritos por meio da Equação 8 e Equação 9 que definem sua amplitude, frequência e ângulo de fase. Abaixo temos as equações que podem ser utilizadas para descrever o sinal fundamental e harmônicas de 3ª e de modo análogo para as outras.

$$Fundamental = V_{rms} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$$

Equação 8 - Sinal fundamental senoidal

$$3^{a}harm = V_{h3} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot 3 \cdot f_0 \cdot t)$$

Equação 9 - Sinal 3º harmônica senoidal

Com essas equações descritas utilizada para a realização do gráfico mostrado na Figura 6 simulando harmônicas.

2.1.6. Inter-harmônicas

Inter-harmônicas são tensões e correntes de frequência de múltiplos não inteiros, ou seja, harmônicas com frequência “quebradas” da frequência fundamental. O estudo associado a inter-harmônicas continua em desenvolvimento, porém está havendo o interesse por este assunto. As inter-harmônicas estão ganhando foco devido ao aumento de cargas que as produz, dessa forma houve maiores preocupações com esse fenômeno.

As inter-harmônicas podem ser geradas em qualquer nível de tensão, ou seja, acontece em qualquer parte do sistema elétrico, geralmente sua intensidade é baixa em relação a fundamental, porém pode aumentar se tiver condições de ressonâncias. O estudo de inter-harmônicas não será o foco desse trabalho, porém é necessário saber que podem ocorrer harmônicas de frequências não inteiras múltiplas da fundamental [11].

2.1.7. Espectro Harmônico

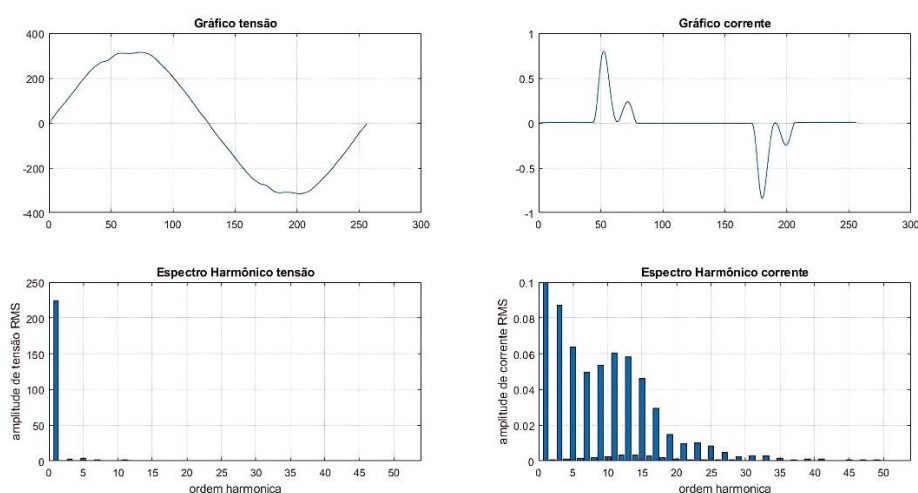
No entanto, ao nos deparamos com um sinal distorcido, não é possível determinar imediatamente quais harmônicas estão presentes nesse sinal apenas observando o sinal elétrico. Para realizar essa análise, recorre-se ao teorema de Fourier. Essa decomposição permite representando as componentes harmônicas presentes no sinal analisado.

Assim podemos recorrer ao espectro harmônico, sendo um método de apresentação das harmônicas no sistema, utilizando de gráficos de barras para representar as harmônicas, quanto a suas características como ordem, frequência, amplitude e ângulo de fase. O espectro harmônico mostra as componentes existentes no sinal distorcido [3].

Para a realização de espectros harmônicos pode ser utilizado o próprio equipamento de medição caso tenha visualização ou desenvolver em software matemáticos como scripts para realizar os cálculos da Transformada de Fourier para a decomposição do sinal e análise, visando a criação de um gráfico. Neste trabalho foi desenvolvido um script para o software MATLAB® para a análise de uma de um sinal elétrico de 60Hz que retorna um gráfico de espectro harmônico, código “Espectro Harmônico” presente no anexo A.

A seguir temos a demonstração dos gráficos gerados a partir do código ‘Espectro Harmônico’, temos gráfico do sinal de tensão, corrente e gráficos dos espectros harmônicos.

Figura 7 - Espectro harmônico gerado pelo MATLAB



Fonte: Autoria própria.

2.2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A presença de distorções harmônicas nos sistemas elétricos representa um problema que pode comprometer o desempenho dos equipamentos elétricos e da qualidade da energia fornecida. Portanto, é de suma importância possuir conhecimentos sobre os conceitos fundamentais e definições relacionadas às distorções harmônicas no sistema elétrico, bem como compreender como são calculadas e quantificadas para a análise e identificação dessas anomalias. No presente capítulo, serão abordados os principais conceitos relativos às distorções harmônicas [12].

Segundo o Prodist Módulo 8 “as distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”. Em outras palavras, ocorre uma distorção e deformação na forma de onda devido à presença de harmônicos no circuito. Essa deformação, provocada pelas

harmônicas, afeta negativamente o sistema de maneira geral, sendo um tópico amplamente discutido por regulamentações específicas [2].

As harmônicas são caracterizadas por tensões e correntes senoidais que possuem frequências múltiplas de inteiros em relação à frequência fundamental. A identificação das harmônicas é realizada com base na sua ordem, a qual é definida pela razão entre a frequência múltipla e a frequência fundamental. Para descrever a ordem de uma harmônica, utiliza-se a Equação 10, conforme estabelecido a seguir.

$$h = \frac{f_{multipla}}{f_{fundamental}}$$

Equação 10 - Ordem harmônica

Conforme descrito anteriormente, por meio da Equação 10, é possível determinar as ordens das harmônicas. Por exemplo, considerando um sistema elétrico alimentado com uma frequência fundamental de 60 Hz, como o Brasil, e apresentando ondas harmônicas nas frequências de 180 Hz, 240 Hz, 300 Hz e outras frequências, é possível determinar as ordens correspondentes a essas frequências ao substituí-las na Equação 10.

Por meio da substituição, é possível determinar que um sinal com frequência de 180 Hz corresponde à harmônica de 3ª ordem. Ao estender esse cálculo para as outras frequências, identifica-se à harmônica de 4ª ordem para 240 Hz, da 5ª ordem para 300 Hz.

Entretanto, ao nos depararmos com um sinal distorcido, como é o caso na prática, não é possível determinar de imediato quais são as harmônicas presentes nesse sinal. Nesse contexto, faz-se necessário recorrer ao espectro harmônico do sinal, como foi abordado no tópico 2.1.7, a fim de analisar cada harmônica que esteja ocasionando a distorção, bem como possibilitar a quantificação das referidas distorções. Para analisar a distorção harmônica total, realiza a raiz quadrada do somatório do quadrado das harmônicas de corrente ou tensão, da 2ª à 25ª (50ª em algumas normas), em relação à corrente ou tensão fundamental [12].

Ao conhecer as características das harmônicas, torna-se possível realizar os cálculos necessários para determinar a distorção harmônica individual de tensão de ordem h , conhecida como $DIT_h\%$. Essa grandeza é calculada por meio da Equação 11, na qual V_h representa a tensão RMS da harmônica em questão e V_1 é a tensão RMS da componente fundamental.

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100$$

Equação 11 - Distorção harmônica individual de tensão

A partir da Equação 11, é possível determinar o grau de distorção que uma harmônica gera no sinal fundamental. Observa-se que esse cálculo é realizado para cada harmônica

individualmente. Portanto, com o intuito de obter a distorção harmônica total de tensão ($DTT_V\%$), é necessário ampliar a Equação 11 para abranger todas as harmônicas. Para esse fim, dispomos da Equação 12.

$$DTT_V\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} * 100$$

Equação 12 - Distorção harmônica total de tensão

A Equação 12 apresenta a análise da Distorção Harmônica Total de Tensão, que se refere forma de onda presente na rede elétrica e sua distorção e serve como base para a avaliação das distorções harmônicas.

Além das equações previamente mencionadas, é importante considerar outros casos de análise de distorções harmônicas, conforme abordado no Módulo 8 do Prodist. Inicialmente, destaca-se a Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes pares não múltiplas de 3, ($DTT_p\%$). Essa medida é aplicada através do cálculo das harmônicas de ordem par, excluindo-se os múltiplos de 3, tais como 6, 9, 12, e assim por diante. A equação correspondente a essa medida é fornecida na Equação 13.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} * 100$$

Equação 13 - Distorção harmônica de tensão componentes pares

Além das equações mencionadas anteriormente, temos também a análise da Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 ($DTT_i\%$). Essa análise é realizada para avaliar a distorção causada pelas harmônicas de ordem ímpar que não seja múltipla de 3. A Equação 14 descreve o cálculo do $DTT_i\%$, fornecendo uma medida quantitativa dessa distorção.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} * 100$$

Equação 14 - Distorção harmônica de tensão componentes ímpares

Agora temos a análise da Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 $DTT_3\%$, devido às particularidades das harmônicas de 3ª ordem, dessa forma temos a análise separada. Podemos realizar o cálculo da $DTT_3\%$ a partir da Equação 15 a seguir.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h3} V_h^2}}{V_1} * 100$$

Equação 15 - Distorção harmônica de tensão componentes múltiplas de 3

Nota-se que todas as análises, a equação e similar, isso acontece, pois, a análise e a mesma e a relação de valores eficaz se mantem, porém inserindo na equação as harmônicas que esperamos analisar, assim filtrando a análise e obtendo as porcentagens de distorções causadas por cada tipo de harmônica.

Em complemento ao módulo 8, também é realizado cálculos considerando a corrente do sistema. Assim podemos obter as distorções harmônicas de corrente. Fazendo de maneira análoga à realizada para a distorção harmônicas de tensão, obtemos para a corrente, realizando em apenas a substituição da tensão pela corrente. Assim temos as Equação 16 a seguir.

$$DTT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_1} * 100$$

Equação 16 - Distorção harmônica de corrente

Podemos estender esse cálculo da distorção harmônica de corrente para todas as outras análises, necessitando apenas substituir a tensão por corrente.

A distorção harmônica total, que desenvolvemos nas Equação 12 e Equação 16 sendo o método mais utilizado para a medição de distorções, adotado em diversos países, porem devemos perceber que somente essa informação não é ideal, portanto utilizamos as demais equações desenvolvidas para realizar a análise das distorções para a verificar como é a distorção, quais são as harmônicas, qual harmônica é a mais influente na distorção, qual está impactando mais no sistema, ordem par, ímpar ou múltiplo de 3, e assim por meio desses dados podemos realizar análises mais completas [13].

Em adicional temos mais um indicador, sendo a distorção harmônica de demanda indicado na Equação 17, utilizado pela recomendação IEEE 519 para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente de carga. [13] Essa distorção total de demanda é utilizada para determinar a distorção da corrente, se tem um valor alto, indica alta distorção no sistema.

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_L} * 100$$

Equação 17 - Distorção harmônica de demanda

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

I_h é valor rms da componente corrente harmônica h.

2.2.1. Limites de distorções harmônicas

No módulo 8 da prodist, é descrito todas as análises de distorções comentadas anteriormente, porém é realizada a uma consideração a mais para o valor do indicador. Os valores indicadores de DTT%, DTT_p%, DTT_i%, DTT₃% que forem superados em apenas 95% das 1008 leituras válidas, serão utilizadas para a verificação dos indicadores, isso ocorre, pois entendesse que pode haver casos de aparecimento de harmônicas nas leituras que ocorrem momentaneamente, não sendo do sistema, casos atípicos, fora da curva normal de ocorrência, portanto para os indicadores temos DTT95%, DTT_p95%, DTT_i95%, DTT₃95%.

Dessa forma, o módulo 8 da Prodíst, com base nessas expressões, define os limites para as distorções harmônicas totais que estão descritas na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,00%	8,00%	5,00%
DTT _p 95%	2,50%	2,00%	1,00%
DTT _i 95%	7,50%	6,00%	4,00%
DTT ₃ 95%	6,50%	5,00%	3,00%

Fonte: Prodíst, módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica, revisão 8.

Para uma síntese das distorções mencionadas, até o momento podemos utilizar da tabela (3) disposta no módulo 8 do Prodíst, que contém o resumo das distorções harmônicas de tensão e indicação das variáveis utilizadas. Na tabela (3) a seguir retirada do módulo 8.

Tabela 3 - Terminologia

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DTT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h _{máx}
Ordem harmônica mínima	h _{min}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte: Prodist, módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica, revisão 8.

2.3. CAUSAS E EFEITOS

Qualquer sinal elétrico cuja forma de onda é responsável por alterar as formas de onda senoidal pura do sinal elétrico é uma distorção, cujo tem origem em diversos equipamentos elétricos, pois cada carga tem uma característica, com efeitos na rede elétrica. As cargas não lineares são as principais causa, pois, devido suas características, elas deformam a forma de onda do sinal elétrico. Os efeitos gerados por harmônicas podem ser notados no funcionamento equipamentos e circuito. Os principais efeitos de distorções harmônicas são aquecimentos, disparos indevidos de proteções, vibrações, alteração do fator de potência e outros [3].

As causas e efeitos das distorções harmônicas variam de acordo com cada caso, tornando inviável a proposição de uma solução geral que seja aplicável em todos os casos. Por essa razão, é necessário estudar e analisar cada caso para especificar e tratar as distorções de maneira adequada, buscando sempre obter o melhor aproveitamento possível conforme as necessidades técnicas e econômicas. Mesmo com medidas adequadas, não é possível a eliminação total das distorções, mas sim mitigá-las até valores aceitáveis [14].

2.3.1. Cargas Não Lineares

As cargas não lineares são aquelas no qual a tensão e corrente não obedecem à lei de Ohm, ou seja, não é descrita por uma equação linear, essa carga não apresenta proporcionalidade entre a tensão e corrente. A forma de onda não é puramente senoidal para esse tipo de carga [12].

Os tipos de cargas não lineares são resistores não lineares, indutores com núcleo ferromagnético saturados, e dispositivos semicondutores. Esses tipos de cargas também estão cada vez mais presentes no cotidiano, devido ao avanço das tecnologias e principalmente a eletrônica, alguns exemplos são os computadores, lâmpas LED, ar-condicionado com inversores, televisores, refrigeradores e outros. [10].

Nas indústrias essas cargas são utilizadas em grande escala para controle de velocidade, controle de equipamentos, automatização de plantas, fornos a arcos, motores. Como as indústrias lidam com cargas elevadas e equipamentos de uma complexidade elevada, a geração de harmônicos importantes, pois os efeitos gerados no sistema levam a prejuízos [3,14].

2.3.2. Efeitos Comuns

Os efeitos mais comuns dos harmônicos compreendem a diminuição da eficiência dos equipamentos, causando o mau funcionamento, consumo de energia maior, acionamento de proteção indevidamente, efeitos mecânicos, aumento da temperatura etc. Os efeitos podem alcançar a perda do equipamento elétrico, isso quando estamos falando de cenários locais. Quando a harmônicos no sistema elétrico em regiões causa a perda de padrão e qualidade do serviço de energia e sua qualidade [3].

2.4. RETIFICADOR CA/CC

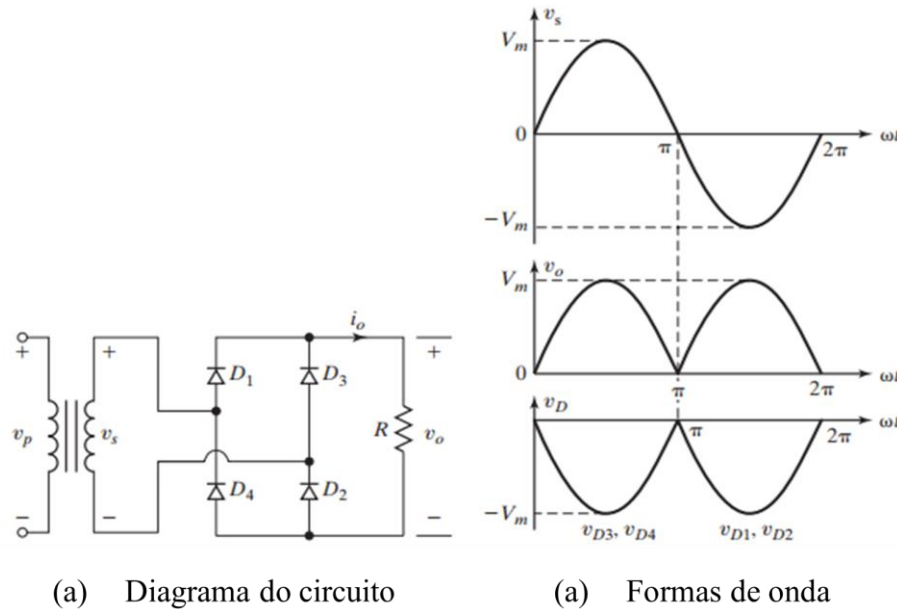
Os retificadores são circuitos que converte um sinal de corrente alternada em um sinal unidirecional, sinal de corrente contínua, ou seja, um conversor CA-CC. Os retificadores podem ser considerados conversores CA-CC de valor absoluto, pois não há um controle sobre uma variável [15].

Os retificadores são circuitos eletrônicos relativamente simples, construídos com diodos, que “controla” qual malha, estará com circuito fechado a partir do sentido de condução da corrente e tensão [15].

Esse circuito possibilita a conversão do sinal de corrente alternada para corrente contínua. Conforme a Figura 8 podemos visualizar um retificador de onda completa em ponte.

Temos um sinal de entrada senoidal e na saída dois pulsos de mesmo sentido em relação à carga [15].

Figura 8 - Retificador de onda completa em ponte

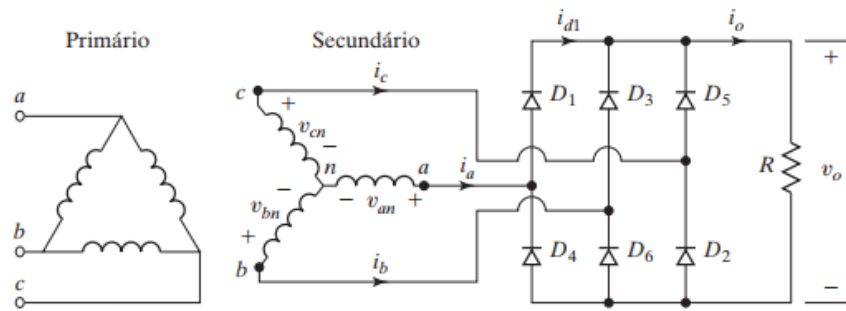


Fonte: Eletrônica de Potência [15].

O retificador apresentado tem sua configuração monofásica, podemos ampliar o circuito e elaborar um retificador trifásico, dessa forma aumentando a quantidade de pulsos, entretanto diminuindo a variação de valor de pico e valor mínimo [15].

Desenvolvendo o retificador trifásico temos o diagrama da Figura 9 abaixo. A sua construção é similar ao retificador monofásico, entretanto, ampliamos o circuito para as três fases.

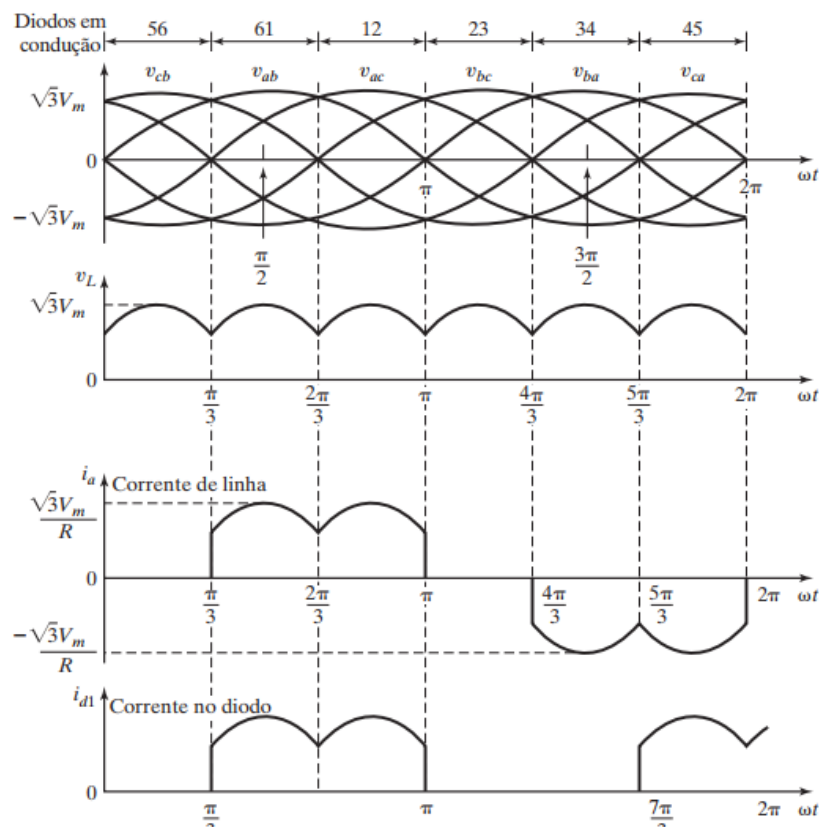
Figura 9 - Retificador trifásico em ponte



Fonte: Eletrônica de Potência [15].

Para as formas de onda resultante no circuito, demonstramos na Figura 10, de entrada, o sinal trifásico equilibrado, e na saída um sinal contínuo pulsante. O sinal de corrente temos dois pulsos, e por um momento a corrente é zerada, o sinal de corrente observado e em relação à corrente da fase “a”.

Figura 10 - Forma de onda retificador trifásico



Fonte: Eletrônica de Potência [15].

Durante a realização dos experimentos será utilizado um retificador de 6 pulsos, mesma configuração do diagrama da Figura 9, será possível observar as formas de onda resultantes e como o acionamento de um motor pode alterar as formas de onda.

2.5. INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Com o avanço da eletrônica de potência, os conversores CC-CA, também conhecidos por inversores de frequência, estão cada vez mais presentes nas instalações elétricas, devido a possibilitar diversas aplicações. Os conversores CC-CA têm como função, transformar a tensão de entrada de CC para uma tensão de saída CA simétrica, com amplitude e frequências desejadas [15].

O inversor ideal deve ter uma saída de tensão senoidal, porém, na prática, não é possível, pois a saída contém determinadas harmônicas devido à operação do inversor. Os conversores geram uma corrente não senoidal, que acaba gerando distorções no sistema de alimentação, causando maiores perdas, e interferências eletromagnéticas. A origem e a intensidade devem ser analisadas e compreendidas para tratá-las no sistema. As harmônicas podem ser minimizadas com a utilização de semicondutores de alta velocidades e técnicas de chaveamento, entretanto faz com que o equipamento seja mais complexo e tenha um custo mais elevado [15,16].

Os inversores são classificados de maneira geral em dois segmentos, os monofásicos e trifásicos. Suas diferenças, como o nome diz, os inversores monofásicos irão operar de forma que na saída terá uma onda de apenas uma fase. Já no trifásico terá um sinal trifásico na saída defasado em 120° conforme o sistema brasileiro. Cada tipo de inversor será que serão explicados nos tópicos a seguir [15].

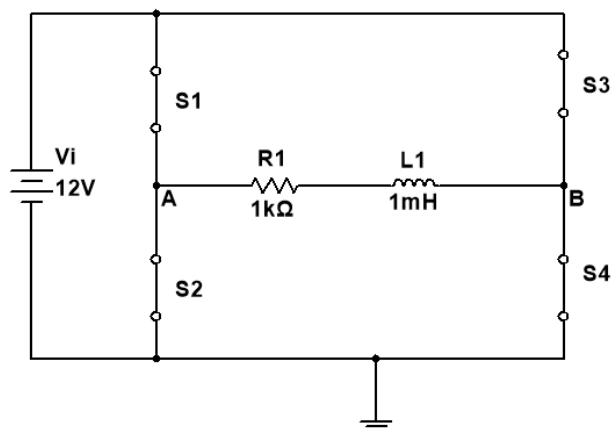
2.5.1. Inversores Monofásicos

A função principal de um inversor de frequência monofásico é a conversão de CC para CA em circuitos monofásicos. Entretanto, essa função principal tem inúmeras aplicações, dessa maneira existem modelos e tipos de inversores monofásicos, que priorizam características como nível de harmônicos, frequências de operação, nível de tensão entre outras características [15,16].

O inversor de frequência é um circuito capaz de realizar a transformação de um sinal CC em CA, seu funcionamento consiste em um circuito capaz de ter fluxo de corrente em dois sentidos conforme a abertura e fechamento de certos caminhos do circuito. Para explicar como funciona a conversão utilizaremos o circuito extremamente simplificado, com valores simbólicos, da Figura 11 para demonstrar o funcionamento de forma didática sobre o chaveamento do circuito. O circuito da Figura 11 temos 1 fonte de alimentação CC, 4 chaves,

1 resistor e 1 indutor. Inicialmente analisaremos o sentido da tensão e corrente na resistência e indutor do circuito como referência [15].

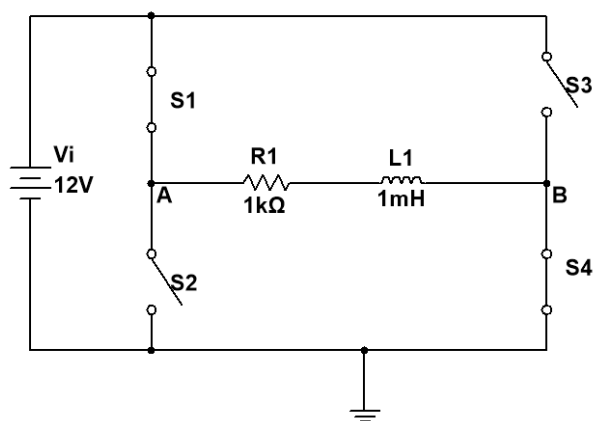
Figura 11 - Circuito conversor



Fonte: Autoria própria

A primeira etapa do sistema consiste na chave S1 e S4 fechada, e nas chaves S2 e S3 abertas, permitido o fluxo de corrente pela carga indutiva e resistiva no sentido da esquerda para a direita, a Figura 12 e a demonstração do circuito nessa primeira etapa.

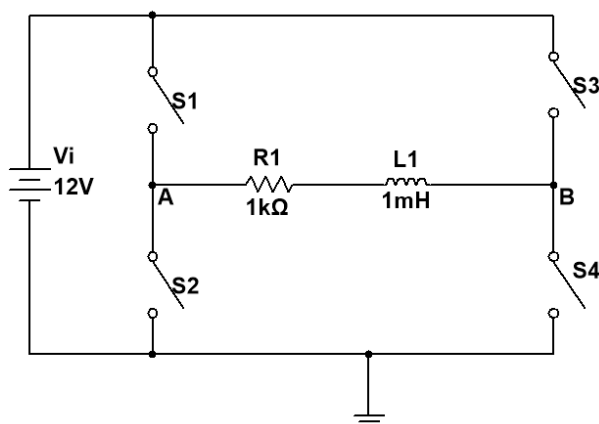
Figura 12 - Circuito chave S1 e S4 fechada



Fonte: Autoria própria

Temos uma etapa de transição das aberturas das chaves no circuito, esse período de transição todas as chaves ficam abertas conforme a Figura 13 a seguir.

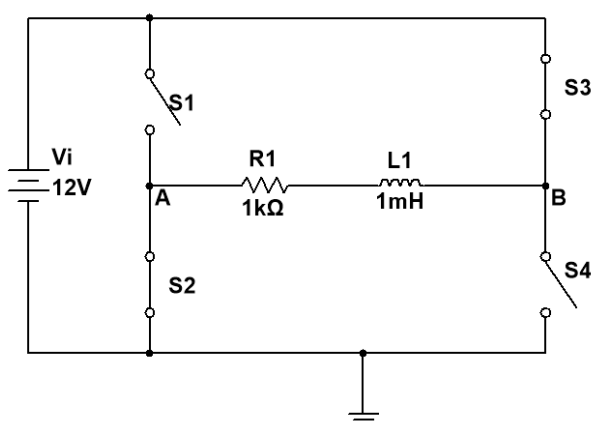
Figura 13 - Período de transição das chaves



Fonte: Autoria própria

Já a próxima etapa consiste na chave S2 e S3 fechadas e S1 e S4 abertas, permitindo o fluxo de corrente do sentido da direita para a esquerda no resistor e indutor, nota-se que o sentido da corrente nos elementos resistivo e indutivo alterna o sentido conforme a alteração da configuração do circuito.

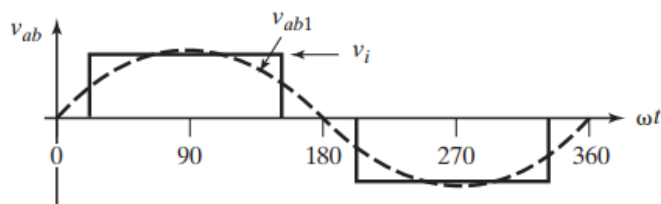
Figura 14 - Circuito chave S2 e S3 fechadas



Fonte: Autoria própria

Após a realização dessas etapas do circuito obtemos um gráfico da corrente, no caso do circuito da Figura 11 obtemos uma onda quadrada, realizando o chaveamento conforme as etapas indicadas. Como podemos observar, a onda é uma corrente CA, ou seja, por meio do chaveamento foi possível ter um sinal CC de entrada e obter um sinal CA na saída conforme a Figura 15.

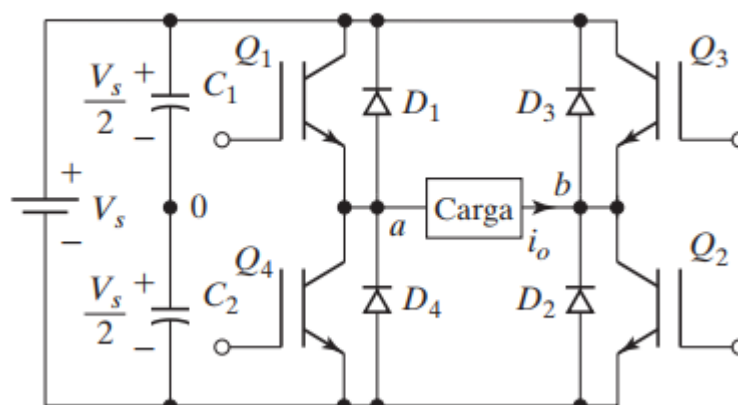
Figura 15 - Gráfico onda quadra



Fonte: Eletrônica de potência [15]

Entretanto, a onda de CA quadrada dependendo da sua utilização não é adequada, dessa forma utilizamos circuitos mais complexos e com técnicas de modulação, com objetivo de formar uma onda senoidal, assim podemos ter circuitos como a Figura 16, que possui diodos, transistor para realizar o chaveamento, e capacitores [15].

Figura 16 - Inversor de ponte completa



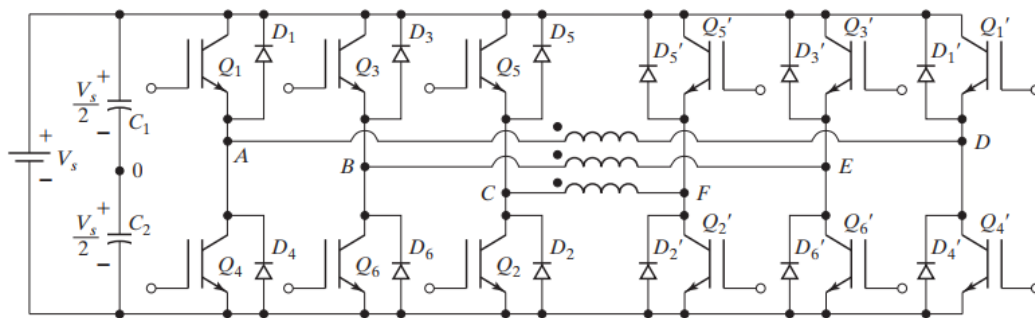
Fonte: Eletrônica de potência [15].

Mesmo com um rápido chaveamento, utilização de capacitores e indutores para melhorar a conversão, ainda há técnicas capaz de melhorar a eficiência, para isso utiliza controladores PWM, que consiste na modulação por largura de pulso, sofisticando mais o inversor. Além disso, pode implementar mais níveis de tensão para melhorar a resposta. Entretanto, a utilização dessas técnicas e sofisticação do inversor será decidido com a necessidade do uso, como em circuitos que necessita de alto controle e forma de onda senoidal mais precisa contara com circuitos e técnicas mais complexas, como controladores PWM com técnicas de modulação por largura de pulso, assim podemos sofisticar o inversor e obter uma onda mais próxima da senoidal [15].

2.5.2. Inversores Trifásicos

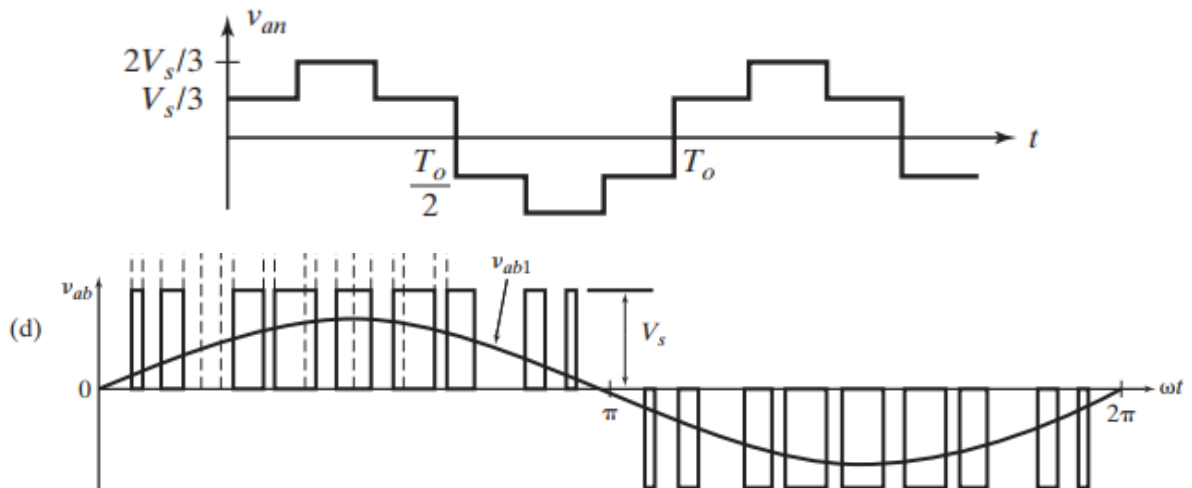
Os inversores trifásicos são mais utilizados em sistemas de alta potência, tem o mesmo princípio de funcionamento que o inversor monofásico, entretanto será composto por três inversores monofásico, formando um trifásico. O chaveamento ocorre sincronizadamente para obter a defasagem de 120° , para assim ter um sistema trifásico equilibrado. Conforme a Figura 17 a seguir observamos em seu circuito a presença de inversores monofásico, interligados [15].

Figura 17 - Inversor de frequência trifásico



Fonte: Eletrônica de potência [15].

Da mesma forma que n inversor de monofásico existiam técnicas como para melhorar a forma de onda senoidal, o inversor trifásico dispõe das mesmas técnicas, entretanto com o cuidado para manter a defasagem correta, mantendo o sistema equilibrado [15].



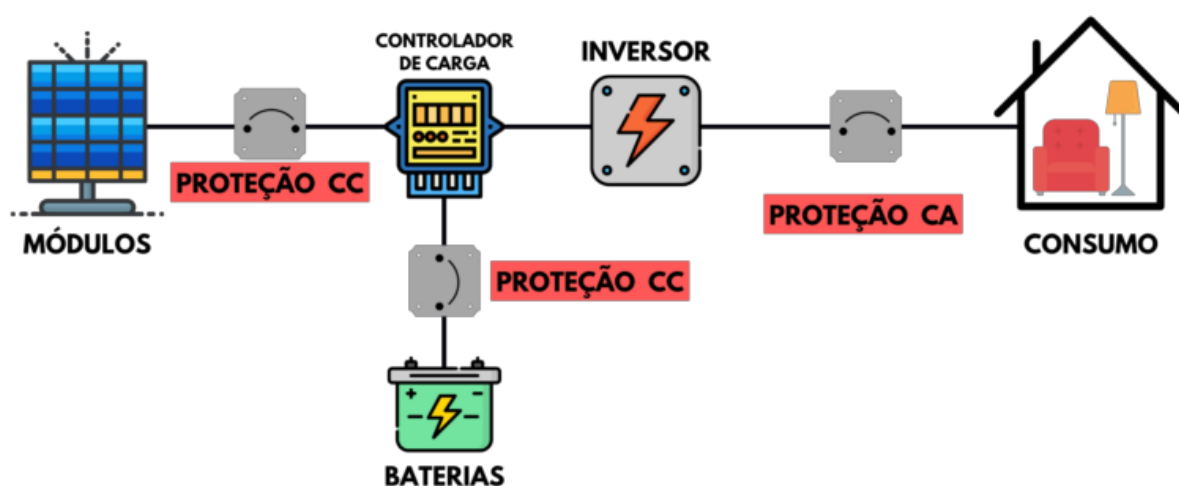
2.5.3. Utilização de Inversores em Sistemas Fotovoltaicos

A utilização de inversores em sistemas fotovoltaicos é fundamental, pois para efetuar um sistema *on-grid*, a conexão entre a GD (geração distribuída) com quadro de distribuição ou rede de distribuição e deve atender os padrões, e conectada em sinal CA, como a placa

fotovoltaica produz em CC, não é possível conectar diretamente, logo é necessário um inversor de frequência para a interligação, o mesmo é aplicado ao nível de tensão e manter as características do sinal e qualidade da energia.

A Figura 18 traz de forma simplificada como um sistema fotovoltaico off-grid funciona, aproximando do sistema da bancada didática presente no IFG - campus Goiânia. Composto por módulo solar, controlador de carga, inversor, baterias e carga.

Figura 18 - Esquemático de geração distribuída fotovoltaica



Fonte: [17]

Contudo, a utilização de um inversor de frequência resultara no aparecimento de harmônicos no sinal, logo os inversores devem ter especificações para atender, para dessa forma não propagar distorções na rede. Logo a escolha do inversor será impactante no sinal, dessa maneira o inversor é um equipamento importante na instalação da GD (Geração distribuída).

2.6. NORMAS

A principal norma de qualidade de energia que trata de harmônicos no Brasil é o módulo 8 da prodist elaborado pela ANEEL. Norma que define os limites de distorções harmônicas na transmissão e distribuição, entretanto esses limites são recomendados e valores para referência. Já no cenário mundial há outras normas que tratam deste assunto, sendo elas a IEEE 519 - *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, que define as regras para as distorções harmônicas, esta norma foi base para o desenvolvimento da norma brasileira. Há também a IEC 61000 com suas divisões que definem limites de

harmônicos em sistemas elétricos. Normas internacionais serviram de base para a norma brasileira.

Em outras normas, referentes a geração distribuída, de sistemas fotovoltaicos, são definidos limites mínimos para as distorções harmônicas no sistema gerado pelo inversor de frequência. Na norma ABNT 16149 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, é definido que em sistemas fotovoltaicos é conveniente ter baixos valores de distorções harmônicas, para não prejudicar os equipamentos conectados na instalação, entretanto os valores podem ser diferentes conforme o tipo de serviço, características da rede de distribuição, cargas conectadas. Então a norma recomenda que para os limites de distorções harmônicas de corrente seja inferior a 5% em relação a fundamental, e que cada harmônica individual seja limitada pelos valores da Tabela 4.

Tabela 4 - Limite de distorção harmônica de corrente

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0%
11° a 15°	< 2,0%
17° a 21°	< 1,5%
23° a 33°	< 0,6%
Harmônicas pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0%
10° a 32°	< 0,5%

Fonte: NBR 16149 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição [18]

Em adicional a norma, dispomos da PORTARIA Nº 140, DE 21 DE MARÇO DE 2022 do INMETRO, que defini os mesmos limites da norma 16149, para os inversores *on-grid* em relação ao Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Equipamentos de Geração, Condicionamento e Armazenamento de Energia Elétrica em Sistemas Fotovoltaicos. Assim como a PORTARIA Nº 515, DE 10 DE NOVEMBRO DE 2023, que defini para sistemas *off-grid*, a distorção harmônica total em relação à forma de onda senoidal deve ser menor que 10% em qualquer potência de operação.

Portanto, em sistemas fotovoltaicos, que estão em conformidade com a norma ABNT 16149 e utilizando de equipamentos em conformidade com o INMETRO, deverá ter valores de distorção harmônicas totais inferiores a 10% em sua capacidade de operação normal.

3. LABORATÓRIOS

3.1. ROTEIRO DA BANCADA DIDÁTICA DE LORENZO

3.1.1. Introdução

Visando analisar o sinal de onda distorcido de um inversor de frequência, utilizamos uma banca didática que simula a geração de energia elétrica a partir de placa solar, simulando um sistema híbrido de geração distribuída fotovoltaica. O sistema híbrido é composto pelas placas fotovoltaicas, baterias e cargas (resistivas ou indutivas).

A montagem da bancada de análise de harmônicos em um inversor de frequência é um passo fundamental no processo de compreensão. O inversor de frequência desempenha um papel crucial, convertendo sinal CC / CA permitindo a conexão da placa fotovoltaica com a instalação elétrica, sendo uma residência ou a rede de distribuição. No entanto, sua operação pode gerar harmônicos indesejados.

O principal propósito deste experimento é investigar e caracterizar esses harmônicos, compreendendo a distorção e ordem. A análise de harmônicos é vital devido aos potenciais efeitos adversos que podem causar.

A bancada utilizada foi adquirida pela instituição IFG – campus Goiânia, para a realização de ensino didático com tópicos de geração de energia elétrica. Foram adquiridos diversos módulos, permitindo grande diversidade de experimentos.

3.1.2. Objetivos

Ao realizar a montagem da banca buscamos não apenas a identificar a presença de harmônicos, mas compreender como realizar a montagem do circuito para realizar a análise da energia, como também visualizar a forma de onda e sinal distorcido de cargas não lineares, nesse caso, um inversor de frequência.

Em última análise, a montagem da bancada de análise de harmônicos em um inversor de frequência é uma etapa crucial na busca pela eficiência energética e pela minimização de impactos adversos nos sistemas. A compreensão aprofundada dos harmônicos gerados permitirá a análise de causa raiz e o desenvolvimento de soluções mais precisas e eficazes para solucionar problemas.

A realização da medição tem o intuito de formar um profissional mais capacitado e familiarizado com a prática de análise de energia, conhecendo o equipamento, cuidados de segurança e instinto investigativo para os problemas originados de distorções harmônicas.

3.1.3. Segurança

A segurança é fundamental para a realização de qualquer experimento, independente da natureza e dimensão. A prioridade é evitar acidentes tanto a pessoas e equipamentos.

Antes da realização da montagem é importantes revisar as práticas de laboratório e tópicos de segurança com todos que faram parte do experimento, como vestimenta, sapato, cabelo preso e comportamento adequando no laboratório. Inicialmente deve utilizar todos os EPI e EPC necessários e pertinentes para a realização das atividades. Antes de realizar a montagem verificar a integridade dos componentes a serem utilizados. Durante a realização da montagem, fazer com os equipamentos e circuito desenergizado. Antes da energização do circuito verificar todas a conexões se estão corretas. A energização deve ser feita com a autorização do responsável, manter uma distância segura da bancada, não estar em contato com os equipamentos e bancada. Durante a desmontagem verificar a tensão e corrente do circuito antes, desligar todos os componentes.

3.1.4. Equipamentos e Materiais

Para realizar o experimento foram utilizadas.

- Bancada de simulação de geração solar (modelo DLB GT4RS-01)
- Analisador de Energia (PowerPad ® Model 8335)
- Multímetro
- Cabos de conexão (tipo banana)

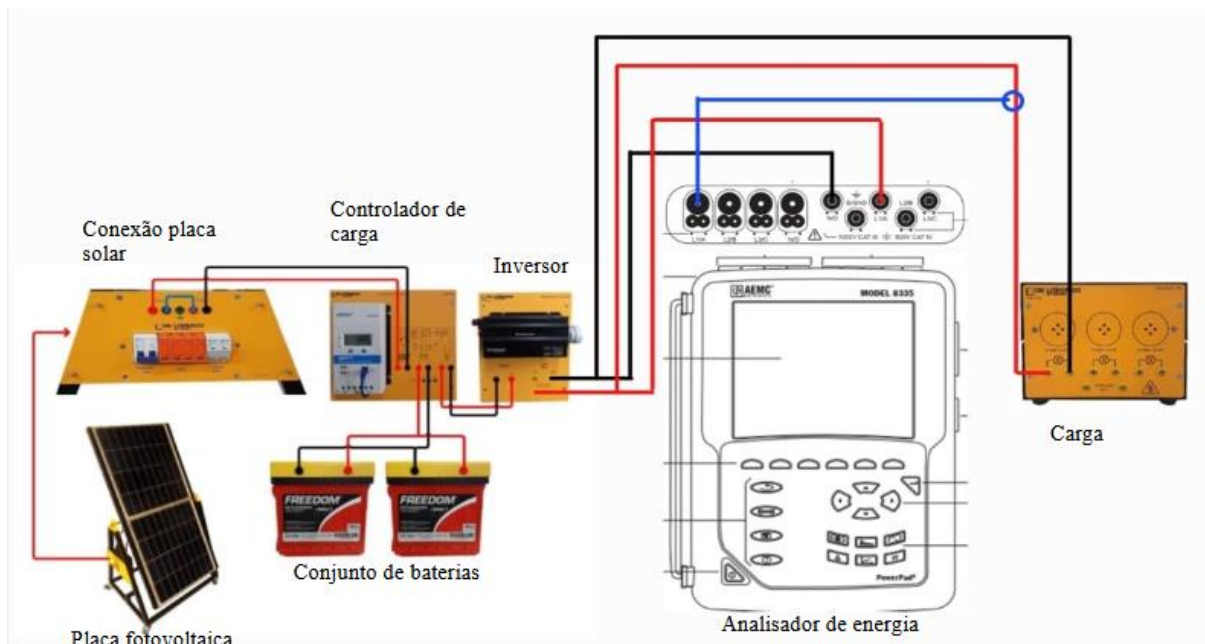
A banca de simulação solar, fabricada pela De Lorenzo, adquirida pelo IFG – campus Goiânia, contém módulos de que simula geração, transmissão e carga. Para este tralho foram utilizados o módulo de geração solar DLB GT4RS-01, que simula a geração por sistema fotovoltaico off-grid, sua conversão e realizada por inversor de frequência e a carga conectada no sistema e linear [19].

O analisador de energia, que foi escolhido é o PowerPad ® Model 8335. Capaz de analisar circuitos monofásicos, bifásico e trifásicos. Sua facilidade de operação foi um fator importante para sua escolha. Antes de sua utilização recomendasse realizar a leitura do manual do equipamento disponível no site do fabricante [20].

3.1.5. Montagem das Medições

Para realizar a montagem do circuito utilizamos como referência o manual de Lorenzo, montamos o seguinte arranjo conforme a Figura 19.

Figura 19 - Circuito geração solar



Fonte: Manual bancada De Lorenzo [19]ADAPTADO

Para a conexão do analisador de energia foi montado o seguinte circuito conforme a Figura 19, esse procedimento foi realizado com o equipamento circuito desligado para evitar danos ao equipamento, tomando todas as precauções de segurança. Em adicional podemos conectar o alicate amperímetro para realizar a análise das distorções harmônicas de corrente, no circuito acima, como a carga e uma lampada resistiva, espera-se que não haja deformação e nem defasagem em relação á tensão.

Na montagem na bancada o circuito ficou conforme a Figura 20 a seguir, a ligação está conforme o esquema da Figura 19.

Figura 20 - Bancada fotovoltaica medição no inversor



Fonte: Autoria própria.

Após realizada a montagem do circuito e realizada a conferência das conexões. Por fim energizar o circuito e analisa as harmônicas geradas pelo inversor de frequência. Os dados podem ser visualizados através da interface do equipamento ou pelo computador com conexão via cabo USB, essa conexão exige o software do analisador, e permite salvar os dados em pontos para análise por meio de outros métodos, como o MATLAB.

3.1.6. Resultados

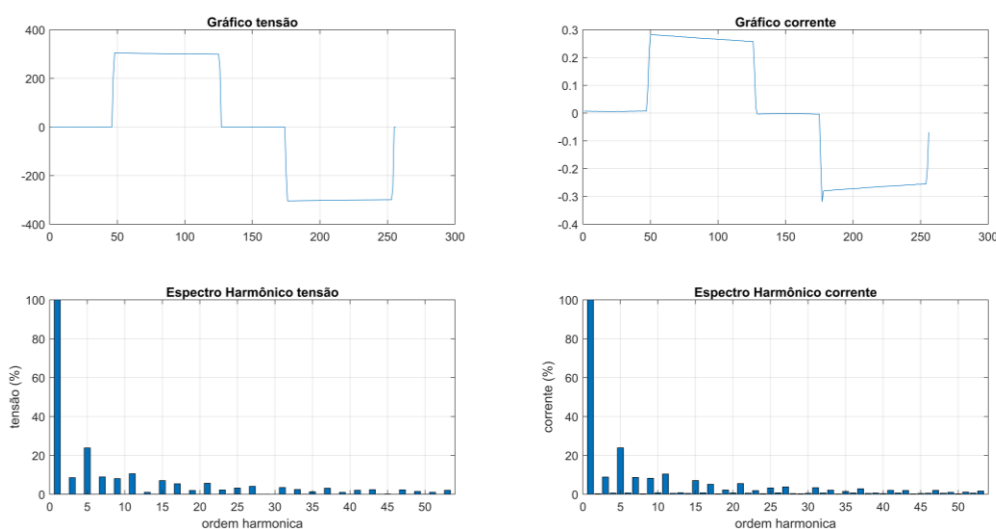
Após a realização do laboratório e medição dos dados, foi realizado a análise por meio da ferramenta computacional MATLAB. A análise constitui na construção de gráficos da forma de onda do sinal de entrada, do sinal distorcido, e a realização da transformada de Fourier para a decomposição do sinal em soma do sinal fundamental e suas harmônicas.

Com os dados coletados, por meio do MATLAB e com o código do anexo A, obtemos que o valor da tensão eficaz é de 237 V. Da mesma forma foi calculado o DTT conforme a Equação 12, temos uma distorção de 74,36 V que corresponde a 31,37% de distorção harmônica de tensão em relação ao sinal fundamental de 60 Hz.

Por meio da equação Equação 16 temos uma distorção que corresponde a 31,33% em relação ao sinal fundamental da corrente.

Com os dados coletados, foi realizado a análise e criação do gráfico da Figura 21. Observamos a forma de onda da tensão e corrente, e verificamos que ambas têm a mesma forma, não está defasada, conforme o esperado, pois a carga é resistiva e linear, as harmônicas analisadas são geradas pelo inversor.

Figura 21 - Distorção de inversor de frequência monofásico



Fonte: Autoria própria

Há apresentação das distorções harmônicas por meio de tabela com os valores correspondentes a sua harmônica. A apresentação da tabela mostra os valores em RMS de tensão em Volt (V) e corrente em Amperes (A), após a aplicação do Transformada Rápida de Fourier, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Harmônicas do inversor de frequência da bancada De Lorenzo

Harmônica	Modulo fft Tensão	Modulo fft Corrente
1	224,71384	0,19979
2	0,13660	0,00063
3	19,24612	0,01776
4	0,10591	0,00130
5	53,59421	0,04774
6	0,08403	0,00145
7	20,09413	0,01731
8	0,15181	0,00058
9	18,13963	0,01644
10	0,04885	0,00160
11	23,74668	0,02082
12	0,11592	0,00102

13	2,35457	0,00166
14	0,13203	0,00099
15	15,84110	0,01414
16	0,04454	0,00153
17	12,14042	0,01027
18	0,16230	0,00056
19	4,40461	0,00438
20	0,09143	0,00141

As distorções harmônicas geradas pelo inversor de frequência ficaram próximo a 30% do sinal fundamental para o sinal de tensão e corrente. Segundo a norma NBR 16149, o inversor de frequência deveria ter limite máximo de 5% de distorção. O inversor da banca, estaria em desacordo com a norma caso fosse instalado em um sistema fotovoltaico, dessa forma prejudicando os equipamentos e a rede de distribuição local. Entretanto, como a banca foi construída com propósito didático, a distorção harmônica é aceitável, mesmo que não esteja no padrão imposto pelas normas.

3.2. ROTEIRO CONVERSOR CA/CC

3.2.1. Introdução

No cenário atual, os conversores de corrente contínua para corrente alternada (CC-CA) desempenham um papel crucial na alimentação de dispositivos eletroeletrônicos. Um circuito simples, montado com diodos em série e em paralelo, consegue realizar a conversão. Entretanto, devido ao funcionamento do circuito, como consequência, são gerados harmônicos no sistema.

Durante a realização desse experimento, analisaremos as formas de onda dos sinais e verificar as distorções que um conversor CC/CA simples pode gerar, especialmente em relação aos harmônicos e como isso reflete no sistema. Será montado duas configurações, a primeira com uma carga resistiva e a segunda com o acionamento de um motor universal em CC.

3.2.2. Objetivos

Ao realizar a montagem da banca, buscamos não apenas identificar a presença de harmônicos, mas também compreender como realizar a montagem do circuito para analisar a energia, além de visualizar a forma de onda e sinal distorcido de cargas não lineares. Será realizada a comparação das harmônicas em ambas as configurações do circuito.

Em última análise, a montagem do circuito com o conversor é uma etapa importante para verificar como as fontes chaveadas que convertem o sinal CA para CC geram harmônicos.

Essas fontes são amplamente utilizadas em eletrônicos, como carregadores, fontes, máquinas de solda, entre outros equipamentos.

A realização do experimento tem o intuito de formar um profissional mais capacitado e familiarizado com a prática de análise de energia, conhecendo o equipamento, os cuidados de segurança e o instinto investigativo para os problemas originados de distorções harmônicas.

3.2.3. Segurança

A segurança é fundamental para a realização de qualquer experimento, independente da natureza e dimensão. A prioridade é evitar acidentes tanto a pessoas e equipamentos.

Antes da realização da montagem e importantes revisar as práticas de laboratório e tópicos de segurança com todos que faram parte do experimento, como vestimenta, sapato, cabelo preso e comportamento adequando no laboratório. Inicialmente deve utilizar todos os EPI e EPC necessários e pertinentes para a realização das atividades. Antes de realizar a montagem verificar a integridade dos componentes a serem utilizados. Durante a realização da montagem, fazer com os equipamentos e circuito desenergizado. Antes da energização do circuito verificar todas a conexões se estão corretas. A energização deve ser feita com a autorização do responsável, manter uma distância segura da bancada, não estar em contato com os equipamentos e bancada. Durante a desmontagem verificar a tensão e corrente do circuito antes, desligar todos os componentes.

3.2.4. Equipamentos e Materiais

Para realizar o laboratório foram utilizados os seguintes instrumentos, equipamentos e materiais.

- Transformador com saída trifásico
- Conversor de 6 pulso não controlado (retificador)
- Analisador de Energia (PowerPad ® Model 8335)
- Multímetro
- Osciloscópio (opcional)
- Resistor
- Cabos de conexão do tipo banana e jacaré (garra)

O transformador foi utilizado para a conectar na rede bifásica 380 V, para obtermos um sinal trifásico. O valor de transformação na saída foi ajustado para 20 V para fornecer segurança durante a realização.

O analisador de energia, que foi escolhido e utilizado é o PowerPad ® Model 8335. Capaz de analisar circuitos monofásicos, bifásico e trifásicos. Sua facilidade de operação também foi um fator para sua escolha.

O conversor de 6 pulso utilizados, foi construído na instituição de ensino com fins didáticos.

3.2.5. Montagem das Medições

Inicialmente foi realizada a separação dos equipamentos e materiais necessários e verificada se estavam operando normalmente.

Para a operação do conversor utilizamos um transformador para converter o sinal monofásico em trifásico. Em seguida e conectada a saída trifásica na entrada do conversor. O conversor converte o sinal CA em CC e com o auxílio de uma protoboard conectamos a uma carga resistiva.

O conversor utilizado na montagem do circuito é o mostrado na Figura 22, antes de utilizá-lo, verifique se está funcionando corretamente, e atenção ao manuseá-lo.

Figura 22 – Retificador de 6 pulsos

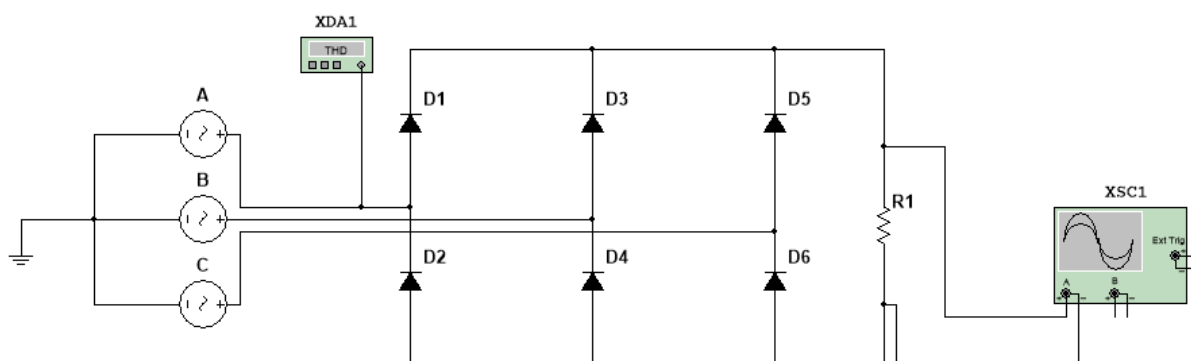


Fonte: Autoria própria

Após a conversão do sinal no conversor de 6 pulsos não controlado foi realizado a conexão em uma resistência, assim temos um circuito conversor, conectada em uma carga resistiva linear.

Após a montagem inserindo o analisador de energia no circuito para a coleta dos dados, o diagrama do circuito fica conforme a Figura 23 a seguir.

Figura 23 - Circuito montado do conversor CA/CC

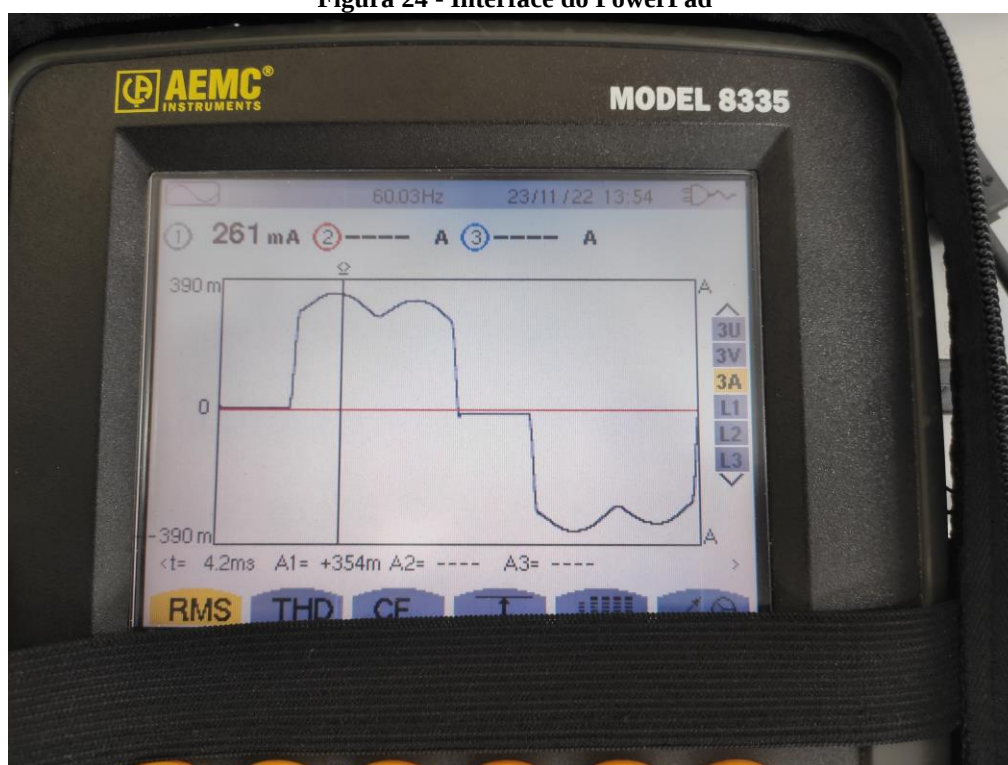


Fonte: Autoria própria

Este circuito corresponde a primeira etapa dos laboratórios, em que a análise das distorções harmônicas de um conversor conectado a uma carga linear.

Os dados podem ser visualizados através da interface do equipamento, conforme a Figura 24 ou pelo computador com conexão via cabo USB tipo A para tipo B, essa conexão exige o software do analisador e permite salvar os dados em pontos para análise por meio de outros métodos, como o MATLAB.

Figura 24 - Interface do PowerPad



Fonte: Autoria própria

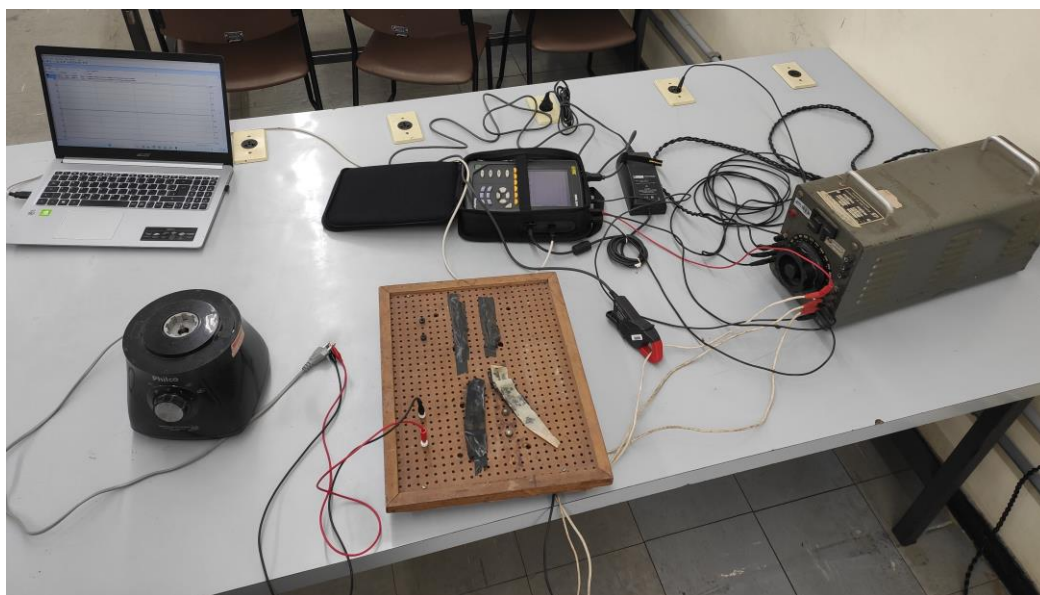
Após realizada a montagem do circuito e realizada a conferência das conexões. Por fim energizar o circuito e analisa as harmônicas geradas pelo conversor. Os dados podem ser visualizados através da interface do equipamento, ou pelo computador, essa conexão exige o

software do analisador, permitindo salvar os dados em pontos para análise por meio de outros métodos, como o MATLAB.

Agora é realizada a montagem do circuito da segunda etapa do laboratório, que consiste no acionamento de um motor universal CC, basta trocar a carga resistiva pelas conexões do motor. No caso do experimento utilizamos um motor de liquidificador, equipamento amplamente utilizado nas residências.

A seguir na Figura 25 é apresentado a montagem do circuito na bancada.

Figura 25 - Circuito motor universal em CC



Fonte: Autoria própria

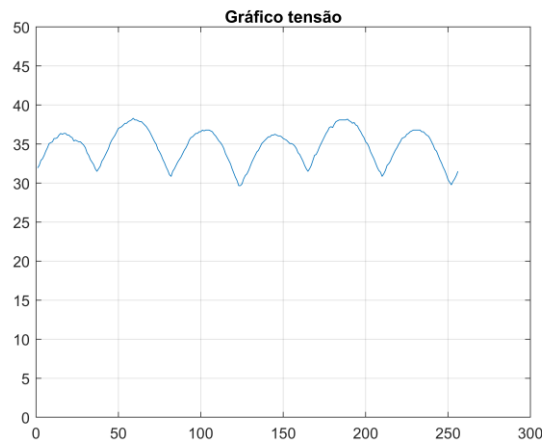
3.2.6. Resultados

Após a realização do laboratório e medição dos dados, foi realizado a análise por meio da ferramenta computacional MATLAB. A análise constitui na construção de gráficos da forma de onda do sinal de entrada, do sinal distorcido, e a realização da transformada de Fourier para a decomposição do sinal em soma do sinal fundamental e suas harmônicas.

Inicialmente verificamos sinal de saída do inversor, conforme o esperado temos pulsos de onda senoidal cortados, entre os valores de 30 V a 40 V, conforme a

Figura 26 do gráfico da tensão.

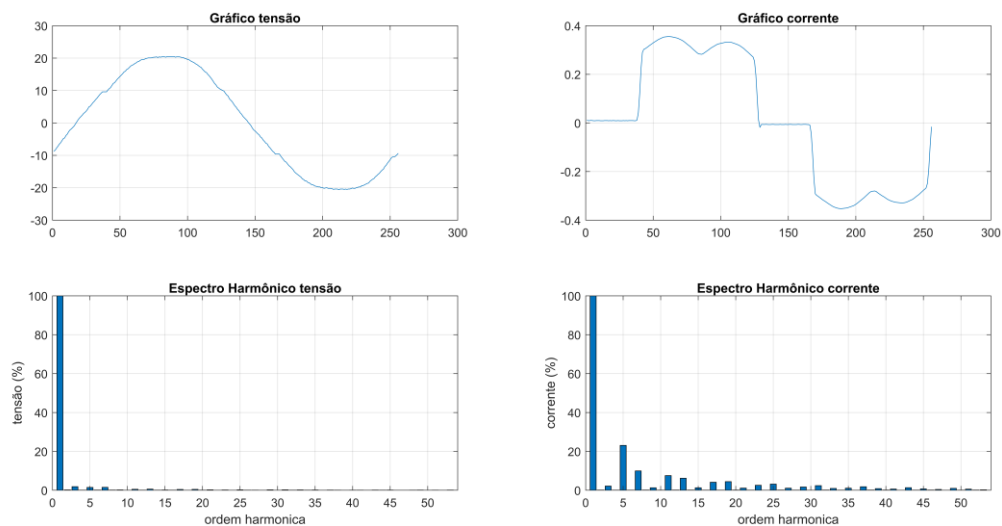
Figura 26 - Sinal de tensão após conversor CA para CC



Fonte: Autoria própria

Realizando as medições de tensão e corrente, na saída do transformador, conforme o diagrama apresentado anteriormente na Figura 23, obtemos os seguintes gráficos da Figura 27. Nos gráficos observamos, que o sinal de tensão, não possui uma grande presença de harmônicos. Entretanto, no sinal da corrente a presença de harmônicos é mais acentuada e visível. Realizando a Transformada de Fourier, foi desenvolvido o espectro harmônico.

Figura 27 - Distorção harmônica gerada pelo conversor CA/CC



Fonte: Autoria própria

Há apresentação das distorções harmônicas por meio de tabela com os valores correspondentes a sua harmônica. A apresentação da tabela mostra os valores em RMS de tensão em Volt (V) e corrente em Amperes (A), após a aplicação do Transformada Rápida de Fourier, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Harmônicas gerada pelo conversor CA/CC

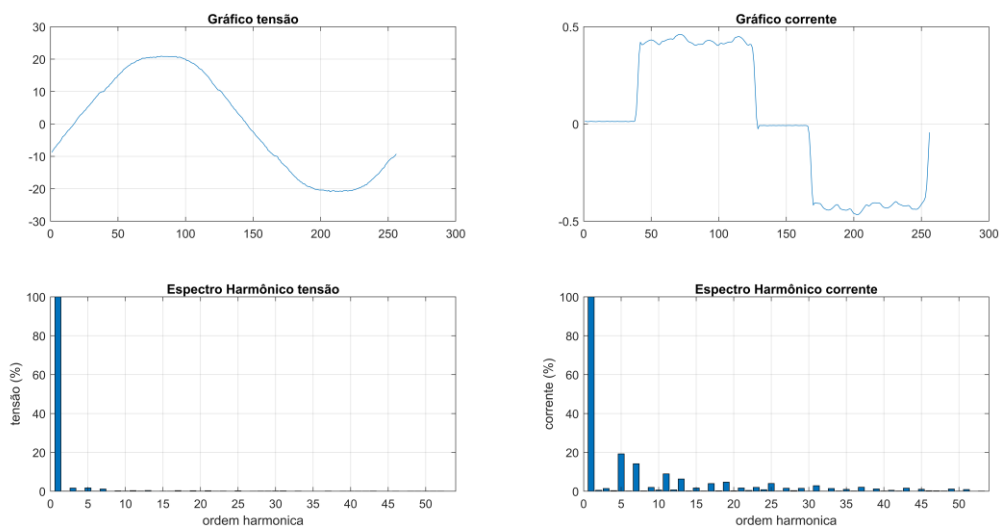
Harmônica	Modulo fftx	Modulo ffty
1	14,81032	0,25006
2	0,03113	0,00023
3	0,27328	0,00538
4	0,01276	0,00012
5	0,21582	0,05767
6	0,01907	0,00019
7	0,22055	0,02495
8	0,01749	0,00024
9	0,03220	0,00318
10	0,00114	0,00014
11	0,07296	0,01890
12	0,01250	0,00028
13	0,09025	0,01552
14	0,00948	0,00023
15	0,02027	0,00322
16	0,00756	0,00018
17	0,06084	0,01036
18	0,00388	0,00022
19	0,06733	0,01106
20	0,00726	0,00023

Por meio das equações Equação 12 Equação 16 podemos calcular a distorção harmônica total para tensão e corrente, obtendo os seguintes valores respectivamente, 3,0487% e 27,3634% valores, em relação ao sinal fundamental.

No gráfico do espectro harmônico da Figura 27 é possível visualizar os valores em porcentagem para cada ordem de harmônica. Nota-se que a presença de harmônicas da 5ª e 7ª ordem são as mais presentes nesse circuito.

No segundo circuito, em que um motor universal em corrente contínua foi acionado, no caso um liquidificador, foram obtidas as seguintes medições dos gráficos da Figura 28, que mostram o sinal de tensão e o sinal de corrente. O sinal de tensão apresentou poucas distorções, semelhante à Figura 27. Já o sinal de corrente sofreu alterações, conforme a esperada, ao haver mudança na carga do circuito.

Nos motores, a características da carga ser linear ou não linear, dependera do momento e situação que o motor se encontra, pois dependendo da carga no eixo, velocidade de rotação máxima ou mínima, corrente nominal e outras características, determinara se o motor pode ser considerado carga linear ou não.

Figura 28 - Distorção harmônicas do acionamento de motor universal em CC

Fonte: Autoria própria

Há apresentação das distorções harmônicas por meio de tabela com os valores correspondentes a sua harmônica. A apresentação da tabela mostra os valores em RMS de tensão em Volt (V) e corrente em Amperes (A), após a aplicação do Transformada Rápida de Fourier, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Harmônica do acionamento de motor universal em CC

Harmônica	Modulo fftx	Modulo ffty
1	15,10619	0,33518
2	0,01215	0,00169
3	0,24939	0,00471
4	0,01954	0,00111
5	0,26176	0,06441
6	0,00858	0,00053
7	0,17237	0,04748
8	0,00504	0,00065
9	0,03732	0,00672
10	0,01493	0,00220
11	0,04733	0,03004
12	0,01328	0,00248
13	0,05947	0,02124
14	0,00496	0,00068
15	0,00712	0,00563
16	0,00774	0,00053
17	0,05168	0,01328
18	0,01000	0,00086
19	0,04276	0,01579
20	0,00764	0,00078

Por meio das equações Equação 12 Equação 16 podemos calcular a distorção harmônica total para tensão e corrente, obtendo os seguintes valores respectivamente, 2,8117% e 27,0475% valores em relação ao sinal fundamental.

Comparando os dois circuitos tivemos uma discreta redução de harmônicos no acionamento do motor. O espectro harmônico não houve muitas alterações, manteve o padrão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. CONCLUSÃO

Durante o decorrer deste trabalho foi apresentado conceitos iniciais de qualidade de energia, com foco em distorções harmônicas no circuito. O primeiro capítulo aborda conceitos básicos do sistema elétrico brasileiro, ferramentas matemáticas e definições relacionadas às harmônicas. O segundo capítulo desenvolve o conceito das distorções harmônicas e como são quantificadas e separadas. Foram apresentados valores de referência para as distorções harmônicas no sistema elétrico brasileiro, bem como as causas mais comuns e efeitos das harmônicas no sistema e equipamentos.

Com esses conceitos e referências, desenvolvemos brevemente a respeito de conversores e inversores de frequência, que são os principais componentes dos laboratórios que geram harmônicos. Após o desenvolvimento teórico, foram realizados dois laboratórios com foco didático para serem replicados posteriormente por docentes e discentes do IFG.

O primeiro roteiro consistiu na medição de harmônicos gerados por um inversor de frequência instalado na bancada didática do IFG desenvolvido pela De Lorenzo. O segundo consistiu em um circuito conversor CA/CC montado com os componentes presentes na instituição. Com o estudo das distorções harmônicas, compreendendo o que são, como calculá-las e suas variações, ampliamos nossa interpretação das soluções encontradas.

O trabalho apresenta um material didático para docentes de engenharia com foco na introdução às distorções harmônicas. Foram propostos dois roteiros de laboratório para a realização de medições de harmônicos.

O primeiro roteiro está focado em realizar as medições de harmônicos em um sistema de geração distribuída fotovoltaica, focado no inversor de frequência. Concluiu-se que, para um sistema comercial, o sistema está fora das normas indicadas de distorções injetadas no sistema. Entretanto, como a bancada foi desenvolvida para fins acadêmicos e didáticos, consideramos as distorções aceitáveis.

O segundo roteiro traz um conversor CC para CA, um conversor amplamente utilizado em eletrônicos. O conversor utilizado é simples, facilitando a montagem do experimento e permitindo criar variações do mesmo. No roteiro proposto, há o acionamento de um motor universal em corrente contínua, e verificamos como essa carga distorce o sinal, assim como o conversor distorce o sinal.

Ambos os roteiros têm como objetivo colocar em prática os temas expostos neste trabalho e trazer de maneira lúdica os conteúdos abordados, resultando em um ensino mais eficiente.

4.2. TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como foco inicial a apresentação de distorções harmônicas, tendo como resultado conceitos teóricos e práticos desenvolvidos. Como proposta para continuação, e possível melhorar os roteiros, inserindo outros componentes e cargas, melhorando a montagem, tornando mais seguro e diversificado. Montando roteiros com propostas de atividades a serem desenvolvidas pelos discentes.

Outro foco é aprofundar na realização de medições de inversores de frequência de sistemas de geração distribuída fotovoltaica. Verificar se as GD estão conforme as normas técnicas que abrange o tema.

5. REFERÊNCIAS

1. LOURENÇO, T. G. M. **Avaliação da qualidade de energia elétrica no centro de tecnologia da universidade federal do Ceará.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 141. 2012.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema.** ANEEL. Brasil. 2022.
3. INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE - PROCOBRE. **Harmônicas nas instalações elétricas.** 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE, 2001.
4. JARDIM, A. R. **Desenvolvimento de um protótipo para análise de harmônicas em sistemas elétricos.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES. Lajeado. 2018.
5. BACH, J.; PINTO, L. S. **Avaliação da distorção harmônica em uma indústria alimentícia.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. PATO BRANCO, p. 145. 2014.
6. MONTICELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica.** 2ª. ed. Campinas: Editora Unicamp, v. I, 2011.
7. FREITAS, C. A. F. D. **Software Baseado em MATLAB® para Cálculo e Análise Tridimensional de Campos Elétricos e Magnéticos em Linhas de Transmissão.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 65. 2017.
8. ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos.** 5ª Edição. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, v. I, 2013.
9. RODRIGUES, Y. V. C. B.; FRIGO, M. M. **Harmônicos em Instalações Elétricas: Teoria, Indicadores e Normalização.** Simpósio de Estudos em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Tocantins. Palmas, p. 6. 2017. (ISBN: 978-85-5659-009-1).
10. HANZELKA, Z.; BIEN, A. **Harmônicas - Inter-harmônicas.** Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE. São Paulo, p. 24. 2004.
11. SILVA, M. P. C. D. **Proposta de Modelagem e Simulação para Análise de Distorção Harmônica.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, p. 145. 2014.
12. TEIXEIRA, D. Â. **Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de um Sistema Industrial.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais. [S.l.], p. 128. 2009.

13. CHAPMAN, D. **Harmônicas Causas e Efeitos**. 1ª. ed. São Paulo: Procobre, v. I, 2002.
14. RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**. Tradução de Leonardo Abramowicz. 4ª. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.
15. FRANCHI, C. M. **Inversor de Frequência Teoria e Aplicação**. 2ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, v. I, 2009.
16. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16149 Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**. [S.l.]: [s.n.], v. I, 2013.
17. DE LORENZO DO BRASIL LTDA. **Sistema Didático para Estudo e Treinamento em Gerenciamento da Geração de Energia Elétrica Solar ERSS-6. III**. ed. São Paulo: De Lorenzo do Brasil Ltda, v. I, 2021.
18. CHAUVIN ARNOUX®, INC. D.B.A. AEMC® INSTRUMENTS. **3-PHASE POWER QUALITY ANALYZER 8335 PowerPad**. AEMC Instruments, Dover USA, fev. 2018. Disponível em: <<https://www.aemc.com/products/power-analyzers/power-8335?showdiscontinued>>. Acesso em: dez. 2023.
19. PAULILO, G.; TEIXEIRA, M. D. **Qualidade de Energia**. MEGABARRE. [S.l.].
20. UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7ª. ed. [S.l.]: AMGH, v. 1, 2014.
21. FRONTIN, S. D. O. **Equipamentos de Alta Tensão - Prospeção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1. ed. Brasília: Tirgem, v. 1, 2013.
22. BRAZ, L. D. L. **Análise Harmônica de Rede Elétricas Utilizando o Software PCFLO**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 127. 2017.
23. DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Apostila elaborada pelos professoresq [21] Sigmar Maurer Deckmann e José Antenor Pomilio Campinas: UNICAMP/FEEC/DSE, v. I, 2018. 15 p. Disponível em: <www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012>.
24. ENERGÊS. energês. **Site da energês**, 2020. Disponível em: <<https://energes.com.br/do-inicio-ao-fim-sistema-solar-fotovoltaico-off-grid/>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

ANEXO A

Script para análise de sinal elétrico com retorno do espectro harmônico.

```
% Carregar os dados
dados = load("C:\Users\Caio Luca\Documents\01. TCC\04. Graficos\Graficos material
Pagotti\Reator Eletronico\Reator Eletronico.txt");
x = dados(:, 1);
y = dados(:, 2);

figure(1)
plot(x);
title('Gráfico tensão');
ylabel('Amplitude');
grid on;
print('grafico1', '-dpng', '-r500');

figure(2) % Configuração para o segundo gráfico
plot(y);
title('Gráfico corrente');
ylabel('Amplitude');
grid on;%%
print('grafico2', '-dpng', '-r500');

%calculo do rms da tensão
x_rms = x/sqrt(2);
y_rms = y/sqrt(2);

% Calcula a FFT
Nx = length(x);% Comprimento do sinal de entrada
Ny = length(y);% Comprimento do sinal de entrada
x_fft = fft(x_rms,Nx)/(Nx/2); % Compensação da constante de normalização
y_fft = fft(y_rms,Ny)/(Ny/2); % Compensação da constante de normalização

% Calcula o módulo da transformada
modulo_fftx = abs(x_fft);
modulo_ffty = abs(y_fft);
modulo_fftx(1) = [];
modulo_ffty(1) = [];

% Plotar o gráficos de barras (desconsiderando o primeiro valor)

figure(3);
dadosX = modulo_fftx;
% Calcular porcentagens em relação ao segundo valor
porcentagensX = (dadosX / dadosX(1)) * 100;
bar(porcentagensX);
% Personalizar o gráfico
xlabel('ordem harmonica');
```

```

ylabel('tensão (%');
title('Espectro Harmônico tensão');
% Ajustar os limites do eixo x
xlim([0, 54]);
grid on;
print('grafico3', '-dpng', '-r500');

figure(4)
dadosY = modulo_ffty;
% Calcular porcentagens em relação ao segundo valor
porcentagensY = (dadosY / dadosY(1)) * 100;
bar(porcentagensY);
% Personalizar o gráfico
xlabel('ordem harmonica');
ylabel('corrente (%');
title('Espectro Harmônico corrente');
% Ajustar os limites do eixo x
xlim([0, 54]);
grid on;
print('grafico4', '-dpng', '-r500');

Vrms = sqrt((1/Nx)*sum((x.^2)));
fprintf('O valor de tensão eficaz é %.4f kV\n', Vrms);
Irms = sqrt((1/Nx)*sum(y.^2));%rever esse calculo
fprintf('O valor de corrente eficaz é %.4f A\n', Irms);
DTT=sqrt(sum(modulo_fftx(3:50).^2))
fprintf('distorção harmonica total em relação ao sinal de tensão');
distorcaoTensao=(DTT/Vrms)*100
DTI=sqrt(sum(modulo_ffty(3:50).^2))
fprintf('distorção harmonica total em relação ao sinal de corrente');
distorcaoCorrente=(DTI/Irms)*100

% Salve o gráfico em alta resolução como uma imagem (por exemplo, PNG)
print('grafico1', '-dpng', '-r500'); % '-r300' define a resolução em DPI (ajuste conforme
necessário)

```