



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JONATTAN CAIO DE OLIVEIRA SANTOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ENROLAMENTOS  
TERCIÁRIOS DE TRANSFORMADORES POTÊNCIA NA  
PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS**

Recife

2025

JONATTAN CAIO DE OLIVEIRA SANTOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ENROLAMENTOS TERCIÁRIOS DE  
TRANSFORMADORES POTÊNCIA NA PROPAGAÇÃO DE  
HARMÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Departamento de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco, como  
requisito parcial para obtenção do grau de  
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador : Prof. Marcos André de Almeida da Silva

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira Santos, Jonattan Caio de.

Análise da influência de enrolamentos terciários de transformadores de potência na propagação de harmônicos / Jonattan Caio de Oliveira Santos. - Recife, 2025.

64 p. : il., tab.

Orientador(a): Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador(a): Marcos André Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Qualidade de energia. 2. Harmônicos. 3. Transformador Y-Delta-Y. 4. Enrolamento terciário em delta. 5. ATP. I. Simoni, Vicente Ribeiro. (Orientação). II. Silva, Marcos André. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

Jonattan Caio de Oliveira Santos

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ENROLAMENTOS TERCIÁRIOS DE  
TRANSFORMADORES POTÊNCIA NA PROPAGAÇÃO DE  
HARMÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Departamento de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco, como  
requisito parcial para obtenção do grau de  
Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 16/12/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Alex Ferreira Falcão Moreira (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Eng. M.Sc. William Chaves Lima (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus Todo-Poderoso, fonte de inspiração, sabedoria e força, por me conceder a vida, a saúde e a oportunidade de chegar até aqui. Rendo graças pela presença constante em todos os momentos desta caminhada, iluminando o meu intelecto, guardando o meu caminho e sustentando-me nos dias de maior cansaço e incerteza.

Minha gratidão à minha mãe, Kassia Virginia da Silva dos Santos registro minha mais profunda gratidão pelo amor incondicional, pelos sacrifícios diários e pela confiança depositada em mim. Obrigado por me apoiar minhas escolhas, por acreditar no meu potencial, por cada palavra de incentivo e por tornarem possível esta conquista, mesmo diante das dificuldades.

Agradeço ao meu pai, Clayton Claudio de Oliveira Gomes, um homem trabalhador, que sempre buscou fornecer qualquer apoio necessário para minha meu desenvolvimento, sempre estando disponível para me ajudar.

Agradeço meu irmão, Jonattas Rodrigo de Oliveira Gomes, que esteve presente desde o meu nascimento. Me ajudando em diversos momentos de dificuldades, sempre presente e solícito.

Agradeço também à minha vó Lourdes e à minha tia Goretti, que sempre estiveram presentes quando era necessitava, e buscavam me fornecer apoio. Estendo o agradecimento a toda a minha família, que compreendeu minhas ausências, respeitou meus momentos de dedicação aos estudos e comemorou comigo cada avanço nesta longa jornada acadêmica.

Um agradecimento sincero ao meu orientador, professor Dr. Vicente Ribeiro Simoni, pelo auxílio no desenvolvimento desse trabalho, sempre se fez presente e disponível para qualquer ajuda, tenho profunda gratidão pelas oportunidades de monitória e participação no laboratório, sua presença foi de grande valor. Seus conhecimentos e ensinamentos continuarão sendo de enorme impacto em meu aprendizado.

Agradeço ao meu coorientador, Marcos Andre de Almeida da Silva, a quem considero um verdadeiro professor, pelo apoio, disponibilidade e paciência em me ensinar o conhecimento prático de laboratório, um professor de habilidade inquestionável e sabedoria rara.

À Universidade Federal de Pernambuco e aos professores, que forneceram seus conhecimentos para minha formação. Um agradecimento especial ao professor Dr. Mauro Copelli Lopes da Silva, ao professor Dr. José Filho da Costa Castro, à professora Dra. Milde Maria e ao professor Douglas Contente Pimentel Barbosa.

Agradeço ao amigo de longa data, Rafael Ferreira, companhia constante durante esse processo, pelas horas de conversa, pelas partidas de jogos e pelas risadas que tornaram essa jornada muito mais leve e divertida. Sua presença foi essencial para manter o equilíbrio entre estudo e descanso.

Ao meu primo, Clayson Henrique, que esteve sempre ao meu lado, me apoiando e acreditando em mim. Sua presença e palavras de incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Deixo minha profunda gratidão aos meus amigos e colegas que tive o imenso prazer de conhecer na graduação. Agradeço a Rachel Bezerra, Engenheira Eletricista, que me ajudou muito ao longo do curso e com quem eu tive bastante conversas, a Abigail Lais de Souza Lima, com quem compartilhei diversas ideias e momentos, a Camila Gabriella e Rebeka Raquel, pelos momentos de estudo e ajuda mútua. Um agradecimento aos colegas Gabriel Moraes, Maria Eduarda e Paulo Neto, e os demais que participam dos estudos no Laboratório de Estruturas Magnéticas (LEM), também desejo que continuem a aprender e a se desenvolver, que a experiência seja enriquecedora, assim como foi para mim.

Por fim, gostaria de agradecer à SM Energy, pela oportunidade integrar à equipe como estagiário, pela confiança em meu trabalho e pelo aprendizado proporcionado. A experiência foi fundamental para meu crescimento profissional e pessoal, um agradecimento especial ao Engenheiro Eletricista Eduardo Magalhães.

## Resumo

Este trabalho investiga o comportamento de um transformador trifásico em topologia Y- $\Delta$ -Y, projetado em escala reduzida com cinco enrolamentos por fase, como recurso para avaliação e mitigação de distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência. Inicialmente são apresentados os principais conceitos de qualidade de energia, indicadores normativos de distorção e fundamentos de transformadores e componentes simétricas. Em seguida, descreve-se o projeto do protótipo em núcleo envolvente, com múltiplos enrolamentos acessíveis, permitindo a configuração Y- $\Delta$ -Y e a desconexão seletiva dos enrolamentos em  $\Delta$ . A metodologia experimental utiliza fonte trifásica programável com injeção controlada de harmônicos, medições com qualímetros e câmera térmica, com todos os neutros aterrados, quantificando THD de tensão e corrente nos lados denominados de média e alta. Em paralelo, desenvolve-se um modelo computacional no ATP que reproduz a topologia e condições de ensaio, permitindo comparação entre resultados simulados e experimentais. Os resultados mostram que a presença do enrolamento em  $\Delta$  contribui para o confinamento de componentes de sequência zero e para a limitação dos indicadores de distorção nos terminais em Y, confirmando o papel da topologia Y- $\Delta$ -Y como elemento passivo de apoio à qualidade de energia. O protótipo em escala reduzida demonstrou-se adequado para reproduzir os fenômenos de interesse e validar o modelo de simulação proposto.

**Palavras-chave:** Qualidade de energia; Harmônicos; Transformador Y- $\Delta$ -Y; Enrolamento terciário em  $\Delta$ ; ATP.

## Abstract

This work investigates the behavior of a three-phase transformer with Y- $\Delta$ -Y topology, designed at reduced scale with five windings per phase, as a means to evaluate and mitigate harmonic distortion in power systems. The study first reviews key concepts of power quality, harmonic limits, transformer modeling, and symmetrical components. Then, it presents the design of a shell-type prototype with multiple accessible windings, enabling Y- $\Delta$ -Y configurations and selective disconnection of the delta windings. The experimental methodology employs a programmable three-phase source with controlled harmonic injection, power quality analyzers, and thermal imaging, with all neutrals solidly grounded, to quantify voltage and current THD on the medium- and high-voltage sides. In parallel, a computational model is developed in ATP to reproduce the topology and test conditions, allowing direct comparison between simulated and measured results. The results show that the presence of the delta winding contributes to confining zero-sequence components and limiting distortion indices at the Y terminals, confirming the role of the Y- $\Delta$ -Y topology as a passive support for power quality. The reduced-scale prototype proved adequate to reproduce the relevant phenomena and to validate the proposed simulation model.

**Keywords:** power quality; harmonics; Y- $\Delta$ -Y transformer; delta tertiary winding; ATP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Formas de onda senoidais pura e distorcida pela presença de harmônicos.	24
Figura 2	Componentes simétricas.	27
Figura 3	Exemplo didático de um transformador.	28
Figura 4	Círculo equivalente de um transformador monofásico.	30
Figura 5	Ligaçāo $\Delta$ -Y de um transformador trifásico.	31
Figura 6	Ligaçāo Y- $\Delta$ -Y de um transformador trifásico.	32
Figura 7	Componente fundamental e componente harmônico.	34
Figura 8	Comportamento distorcido da tensão.	35
Figura 9	Diagrama trifilar do transformador.	38
Figura 10	Tensão trifásica de entrada com harmônicos.	41
Figura 11	Tensão trifásica de saída com harmônicos.	41
Figura 12	Tensão de entrada e saída com harmônicos.	42
Figura 13	Comparação da tensão de entrada com e sem harmônicos.	42
Figura 14	Comparação da tensão de saída com e sem harmônicos.	43
Figura 15	Histograma de componentes harmônicas da tensão de entrada.	43
Figura 16	Histograma de componentes harmônicas da tensão de Saída.	44
Figura 17	Fonte de tensão FCATHQ 3000-38-50.	45
Figura 18	Transformador trifásico.	45
Figura 19	Limpeza da fonte.	46
Figura 20	Arranjo experimental e pontos de medição.	47
Figura 21	Bancada completa.	48
Figura 22	Qualímetro.	49
Figura 23	Caméra térmica.	50
Figura 24	Verificação térmica do transformador em operação.	50
Figura 25	Medição de tensão na fonte.	51
Figura 26	Medição de tensão no lado de alta do transformador.	52
Figura 27	Medição de DTT na fonte em vázio.	53
Figura 28	Medição de DTT na fonte conectada ao transformador.	53
Figura 29	Histograma de hamônicos de tensão na fonte.	54

Figura 30 Histrograma de hamônicos de tensão no lado de Alta ..... 54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	limites de distorção pelo IEEE. ....	16
Tabela 2	limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)....	17
Tabela 3	indicadores de distorções harmônicas. ....	17
Tabela 4	Dados nominais dos enrolamentos.....	38
Tabela 5	perfil harmônico de estudo.....	40
Tabela 6	Resultados simulados e limites do PRODIST. ....	44
Tabela 7	DTT(%) simulado e prático na entrada e na saída. ....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHT	Distorção Harmônica Total
DTD	Distorção Total de Demanda
DTT	Distorção Total de Tensão
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimento de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>root mean square</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	12
1.1	Problema de pesquisa.....	12
1.2	Motivação pessoal .....	12
1.3	Objetivos .....	13
1.3.1	<i>Objetivo geral .....</i>	13
1.3.2	<i>Objetivos específicos .....</i>	13
1.4	Justificativa.....	14
1.5	Estrutura do trabalho .....	14
2	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	15
2.1	Propósito, escopo e alinhamento com os objetivos .....	15
2.2	Marco normativo e métricas empregadas.....	16
2.3	Fontes de distorção .....	18
2.4	Efeitos observados no sistema elétrico .....	19
2.5	Integração entre transformador e sistema .....	20
3	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	23
3.1	Qualidade de energia elétrica.....	23
3.2	Distorções harmônicas em sistemas de potência .....	25
3.3	Componente simétricas .....	26
3.4	Transformadores em sistemas de potência .....	28
3.4.1	Transformadores em ligação Estrela-Delta .....	31
3.5	Resumo sobre Série de Fourier .....	32
3.5.1	Terceira ordem harmônica .....	33
3.6	Considerações finais do capítulo .....	35
4	<b>ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ENROLAMENTOS TERCIÁRIOS NA PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS .....</b>	37
4.1	Especificação do transformador de ensaio .....	37
4.1.1	<i>Arquitetura e topologia.....</i>	37
4.1.2	<i>Disposição construtiva dos enrolamentos.....</i>	37

4.1.3	<i>Dados nominais por enrolamento</i> .....	38
4.1.4	Observações de projeto e integração com o estudo .....	39
4.2	Simulação computacional no ATP .....	39
4.2.1	Resultados .....	40
4.3	Metodologia experimental em laboratório.....	44
4.3.1	Procedimentos de medição .....	47
4.3.2	Resultados .....	51
4.4	Análise Comparativa dos Resultados .....	55
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	56
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	57
	<b>APÊNDICES</b> .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização crescente de conversores eletrônicos de potência, iniciada a partir da década de 1970 [1], trouxe grande preocupação para engenheiros das concessionárias em relação à capacidade dos sistemas elétricos de acomodar a distorção harmônica. Na época, muitas previsões pessimistas foram feitas sobre o impacto desses dispositivos na operação das redes. Apesar de algumas dessas preocupações terem sido mitigadas com o desenvolvimento de novas tecnologias e normas, esse cenário despertou o interesse em pesquisas que resultaram no desenvolvimento do campo de qualidade de energia elétrica e no aprofundamento do conhecimento sobre harmônicos. Até hoje, a distorção harmônica é considerada por muitos profissionais como um dos principais problemas de qualidade de energia, visto que sua presença contraria diversas regras convencionais de operação de sistemas elétricos [2].

Dentre as alternativas para mitigação desses fenômenos, destacam-se filtros ativos e passivos [2], técnicas de compensação e o aproveitamento de características intrínsecas de componentes já presentes no sistema. Nesse contexto, os transformadores de potência em diferentes ligações trifásicas exercem papel relevante, pois determinadas conexões apresentam efeito de atenuação natural de harmônicos, reduzindo sua propagação pela rede.

### 1.1 Problema de pesquisa

A literatura técnica indica que transformadores conectados em estrela-delta ( $Yd$ ) apresentam comportamento peculiar em relação à circulação de correntes harmônicas, principalmente de ordem tripla ( $3^a$ ,  $9^a$ ,  $15^a$ , etc). No entanto, ainda existem lacunas quanto à caracterização prática desse efeito em transformadores de cinco enrolamentos via simulações computacionais e ensaios experimentais. Dessa forma, surge o seguinte questionamento: *qual é a eficiência da ligação  $Yd$  na atenuação de harmônicos quando analisada sob condições reais de laboratório?*

### 1.2 Motivação pessoal

A escolha deste tema nasce de um interesse genuíno em compreender, com profundidade, o papel dos harmônicos na Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Ao longo

da graduação, percebi que fenômenos como distorção da forma de onda, circulação de componentes de sequência zero e interação com a impedância do sistema são decisivos para a confiabilidade de instalações modernas. Esse reconhecimento despertou a vontade de transformar a curiosidade inicial em conhecimento sólido, articulando fundamentos teóricos com a leitura crítica das normas técnicas.

Somou-se a esse interesse a oportunidade concreta de desenvolver um estudo prático em laboratório, em condições controladas e com medições repetíveis. Esse ambiente permite planejar ensaios, configurar topologias, registrar espectros e validar métricas, aproximando a pesquisa da realidade de uma realida prática. Em particular, a possibilidade de analisar o transformador de cinco enrolamentos em ligação Y-Δ-Y oferece um campo de observação privilegiado para investigar a circulação e o confinamento de harmônicos e seus efeitos sobre perdas, aquecimento e tensões. Assim, este trabalho representa não apenas um requisito acadêmico, mas um passo consistente rumo à atuação profissional em sistemas elétricos, alinhando motivação intelectual, oportunidade prática e relevância para o setor.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 *Objetivo geral***

Analizar o efeito de filtragem de harmônicos em um transformador trifásicos de cinco enrolamentos conectados em estrela-estrela-delta, por meio de simulações computacionais e experimentos práticos.

#### **1.3.2 *Objetivos específicos***

- Revisar os conceitos fundamentais de qualidade de energia e distorção harmônica em sistemas de potência;
- Estudar o princípio de funcionamento e a modelagem elétrica de transformadores trifásicos em ligação Yd;
- Realizar simulações computacionais para avaliar a atenuação de harmônicos no transformador;
- Conduzir ensaios práticos com transformador de cinco enrolamentos em laboratório;

- Comparar os resultados obtidos por simulação e por experimentação;
- Avaliar as implicações práticas desse efeito para sistemas elétricos de potência.

#### **1.4 Justificativa**

O estudo da mitigação de harmônicos em sistemas de potência apresenta elevada relevância prática, especialmente no cenário energético atual, marcado pela integração massiva de fontes renováveis, como a geração eólica e a solar fotovoltaica , que dependem de conversores de potência para a conexão à rede. A aplicação de transformadores projetados com configurações específicas, como o de cinco enrolamentos com enrolamento em delta, objeto deste estudo, como um recurso para a atenuação harmônica representa uma alternativa de aplicabilidade, sendo uma alternativa de baixo custo e de aplicabilidade para concessionárias e consumidores industriais.

Além disso, a realização de experimentos práticos em conjunto com simulações computacionais amplia a confiabilidade dos resultados e permite compreender as limitações do modelo teórico frente às condições reais de operação. Assim, este trabalho contribui tanto para a área acadêmica, ao sistematizar o conhecimento, quanto para a área prática, ao indicar soluções viáveis para melhoria da qualidade de energia.

#### **1.5 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O **Capítulo 2** apresenta a revisão da literatura, abordando pesquisas e trabalhos relacionados ao tema;
- O **Capítulo 3** descreve a fundamentação teórica, tratando dos conceitos de qualidade de energia, harmônicos e transformadores em ligação Yd;
- O **Capítulo 4** apresenta a metodologia utilizada e os resultados obtidos tanto em simulações quanto em experimentos práticos;
- O **Capítulo 5** expõe as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Propósito, escopo e alinhamento com os objetivos

O propósito desta revisão é consolidar o *conhecimento básico* de Qualidade de Energia Elétrica indispensável para a análise desenvolvida neste trabalho, com ênfase na caracterização e no controle de distorções harmônicas. Parte-se das noções fundamentais de QEE, integridade da forma de onda, estabilidade de magnitude e frequência, e continuidade do fornecimento, para então situar como a presença de cargas não lineares altera a forma de onda senoidal e exige o uso de métricas normatizadas para avaliação de conformidade. Nesse contexto, são recuperadas definições e limites de referência usuais na literatura e em documentos normativos de modo a estabelecer a linguagem comum que sustenta as análises subsequentes [3–5].

O escopo desta revisão concentra-se em redes de distribuição em baixa e média tensão, tomando o Ponto de Acolopamento Comum (PAC) como referência para medições e comparação com limites. São considerados estudos e guias publicados majoritariamente nos últimos 15 a 20 anos, que descrevem a geração, a propagação e a mitigação de harmônicos em ambientação elétrica. Sempre que pertinente, discutem-se também condições de sistema que modulam a gravidade dos efeitos, como desequilíbrios e presença de neutro, pois tais fatores influenciam diretamente a circulação de componentes de sequência zero e os níveis de aquecimento e perdas em equipamentos.

O alinhamento com os objetivos do trabalho se materializa ao direcionar a revisão para o estudo de um transformador de cinco enrolamentos com conexão Y-Δ-Y, que constitui o objetivo principal da pesquisa. A partir do corpo conceitual básico de QEE, busca-se compreender como essa topologia condiciona a circulação, o confinamento e a atenuação de harmônicos, em especial os de ordem tripla ( $3^{\text{a}}, 9^{\text{a}}, 15^{\text{a}}, \dots$ ) e outras componentes de sequência zero, dentro dos circuitos delta, bem como seus reflexos sobre o lado em estrela e sobre o ponto de conexão com a rede. Ao articular métricas normativas com a física dos enrolamentos e das ligações do transformador, esta revisão fundamenta os procedimentos de diagnóstico, os critérios de comparação com limites e a seleção de estratégias de mitigação coerentes com a topologia Y-Δ-Y. Em resumo, o capítulo oferece a base conceitual que permite conectar os indicadores de QEE ao comportamento electromagnético do transformador estudado, garantindo que as conclusões obtidas estejam

tecnicamente ancoradas e regulatoriamente consistentes.

## 2.2 Marco normativo e métricas empregadas

O marco normativo que orienta este trabalho combina diretrizes internacionais e regulações nacionais para a avaliação da QEE no PAC. No plano internacional, a IEEE Std 519 estabelece limites de distorção de tensão, conforme a Tabela 1 e recomenda a expressão da distorção de corrente em Distorção Harmônica Individual (DHI), além da Distorção Harmônica Total (DHT) [4]. Complementarmente, a série de normas IEC 61000 define métodos de medição e níveis de compatibilidade: a IEC 61000-4-7 padroniza a medição de harmônicos e inter-harmônicos por janelas de observação e agrupamentos espectrais; a IEC 61000-4-30 especifica classes de desempenho para instrumentos de QEE e intervalos de agregação; e os guias IEC 61000-2-2/2-4 apresentam níveis de compatibilidade de tensão para baixa e média tensão, respectivamente [6]. No Brasil, o PRODIST (Módulo 8) da ANEEL estabelece procedimentos de medição e limites de referência para indicadores de distorção de *tensão*, conforme a Tabela 2, adotando janelas de 10 min e estatísticas por percentis, com destaque para o percentil 95% calculado sobre 1.008 leituras válidas em sete dias [5].

Tabela 1 – limites de distorção pelo IEEE.

Tensão de barra $V$	Harmônico individual (%)	DHT (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Nota conforme a fonte: para níveis acima de 161 kV podem existir observações específicas.

Fonte: adaptado de [4]

As métricas empregadas neste estudo seguem as recomendações normativas e a literatura clássica [3]. Para tensão, utiliza-se a DHT e Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT).

Tabela 2 – limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT <sub>95</sub>	10,0%	8,0%	5,0%
DTT <sub>p,95</sub>	2,5%	2,0%	1,0%
DTT <sub>i,95</sub>	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>3,95</sub>	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: adaptado de [5].

A análise é enriquecida por indicadores de tensão definidos no PRODIST, como a distorção harmônica individual de tensão de ordem  $h$  (DIT <sub>$h$</sub> ), a DHT e suas segmentações por grupos espectrais (DTT <sub>$p$</sub> , DTT <sub>$i$</sub>  e DTT<sub>3</sub>), além do percentil DTT<sub>95</sub>, que expressa o valor superado em apenas 5% das leituras válidas. Esses desdobramentos permitem diferenciar a contribuição de pares, ímpares e múltiplos de 3, aproximando a métrica dos fenômenos físicos observados no sistema.

Tabela 3 – indicadores de distorções harmônicas.

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica individual de tensão de ordem $h$	DIT <sub><math>h</math></sub> %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTT <sub><math>p</math></sub> %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTT <sub><math>i</math></sub> %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT <sub>3</sub> %
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT <sub>95</sub> %
Valor do indicador DTT <sub><math>p</math></sub> % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT <sub><math>p,95</math></sub> %
Valor do indicador DTT <sub><math>i</math></sub> % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT <sub><math>i,95</math></sub> %
Valor do indicador DTT <sub>3</sub> % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT <sub>3,95</sub> %

Fonte: ANEEL (2021).

A coerência entre as normas é assegurada pela adoção de métodos de medição e agregação compatíveis. Em linhas gerais, seguem-se janelas de análise de curta duração para cálculo espectral [6] e intervalos de agregação de minutos a horas para estatísticas regulatórias [7] e [5].

Esse enquadramento normativo é particularmente relevante ao objetivo central desta pesquisa: o estudo de um transformador de cinco enrolamentos em conexão Y-Δ-Y. Em topologias com enrolamentos em  $\Delta$ , harmônicos de tripla ordem e componentes de sequência zero tendem a circular internamente no delta, reduzindo sua transferência para o lado em estrela. Ao mesmo tempo, essa circulação influencia nas perdas, aquecimento e eleva os esforços dielétricos do isolamento: as componentes de maior frequência associadas aos harmônicos reduzem, de forma não linear, a rigidez dielétrica dos materiais. Por isso, ao longo das análises, a interpretação conjunta de  $DHI_h/DTT$  do lado da tensão com DTD e limites de harmônicos individuais do lado da corrente fornece um quadro consistente para verificar conformidade com o PRODIST, avaliar a severidade da injeção harmônica segundo a IEEE 519 e relacionar o comportamento espectral observado à física de circulação/atenuação de harmônicos na topologia Y-Δ-Y.

Em síntese, as métricas e métodos adotados garantem comparabilidade com a literatura e rastreabilidade regulatória, ao mesmo tempo em que preservam a ligação com os princípios básicos de QEE que sustentam a interpretação dos resultados deste estudo.

### **2.3 Fontes de distorção**

Em um sistema ideal, tensão e corrente seriam senoidais puras; porém, quando a corrente que atravessa a carga não guarda uma relação linear com a tensão aplicada, a forma de onda de corrente se deforma e pode ser representada pela componente fundamental acrescida de componentes em frequências múltiplas. Todas as cargas não lineares geram correntes harmônicas, as quais percorrem a impedância da fonte e todos os caminhos em paralelo do circuito, produzindo quedas de tensão harmônicas no ponto de medição e elevando indicadores como DHT/DTT,  $DIT_h$  e DTT.

Historicamente, correntes harmônicas já eram observadas com retificadores a arco de mercúrio utilizados na conversão de corrente alternada (CA) para corrente contínua para eletrificação de ferrovias e com variadores de velocidade para motores de corrente contínua na indústria [2]. Com a difusão da eletrônica de potência, o número e a variedade de equipamentos que geram harmônicos cresceram rapidamente, tendência que permanece em expansão.

Entre as cargas monofásicas modernas, destacam-se as fontes chaveadas. A topologia de entrada mais comum combina retificador de onda completa e capacitor de

barramento: a corrente flui apenas quando a tensão instantânea da rede excede a tensão armazenada no capacitor, o que ocorre próximo ao pico da senóide. O resultado são pulsos de corrente estreitos e de alta crista, com componentes expressivas de ordem 3 e superiores e conteúdo de alta frequência; um computador pessoal típico apresenta espectro com ordens 3, 5, 7, entre outras. Reatores eletrônicos para iluminação fluorescente, inclusive lâmpadas compactas, e pequenas UPS monofásicas exibem comportamento semelhante. Em sistemas trifásicos com neutro, as componentes de sequência zero provenientes da agregação de várias cargas monofásicas somam-se no condutor neutro, podendo sobrecarregá-lo. [8]

#### **2.4 Efeitos observados no sistema elétrico**

A presença de harmônicos altera a relação entre tensão e corrente, eleva perdas e compromete o desempenho e a vida útil de equipamentos. Mesmo quando os níveis aparentes de distorção parecem modestos, as componentes de baixa ordem aumentam de forma sensível o valor eficaz da corrente e, por consequência, o aquecimento por efeito Joule. Além disso, a circulação de correntes em frequências mais altas intensifica os efeitos pelicular e de proximidade, elevando a resistência em corrente alternada de condutores e enrolamentos e agravando o regime térmico. [8]

Em transformadores, as correntes harmônicas ampliam as perdas no cobre e as perdas dispersas nos enrolamentos e em partes metálicas. O resultado prático pode incluir sobreaquecimento localizado, redução da capacidade de carregamento e necessidade de revisão dos limites térmicos de operação. Componentes de ordem três e múltiplas circulam internamente em malhas em  $\Delta$ , o que atenua a sua transferência para a tensão do lado em estrela, mas impõe esforço térmico adicional dentro do equipamento. No arranjo Y- $\Delta$ -Y com cinco enrolamentos, a existência de duas formações em  $\Delta$  cria caminhos adicionais para essa circulação, reduzindo a manifestação dessas ordens na medição de tensão e, ao mesmo tempo, exigindo atenção ao aquecimento interno.

Em máquinas rotativas, harmônicos de tensão e de corrente produzem pulsações de torque, esforços mecânicos adicionais e aquecimento suplementar no estator e no rotor. Certas ordens comportam- se de modo equivalente a uma sequência negativa, gerando torque contrário, redução de rendimento e possíveis vibrações e ruído. Esses efeitos aceleram o envelhecimento térmico e podem reduzir a confiabilidade do acionamento. [9]

Em sistemas trifásicos com neutro, a agregação de cargas monofásicas não lineares pode produzir correntes de terceira ordem e múltiplas que se somam no condutor de neutro. Nesses cenários, o valor eficaz no neutro pode superar o da corrente de fase, exigindo verificação da capacidade térmica do condutor e do ajuste de dispositivos de proteção sensíveis a correntes residuais.

Bancos de capacitores estão sujeitos a sobrecorrentes harmônicas porque a reatância capacitiva diminui com a frequência. Em determinadas condições do sistema, a combinação entre a indutância da rede e a capacitância instalada pode estabelecer ressonância próxima a uma ordem específica, amplificando tensões harmônicas em uma faixa estreita do espectro. Isso eleva indicadores de distorção, acelera o envelhecimento dielétrico de capacitores e impõe riscos a equipamentos sensíveis conectados ao mesmo barramento.

A medição e as proteções também são afetadas. Transformadores de corrente podem apresentar saturação diferenciada sob formas de onda distorcidas, alterando a exatidão de medidores e relés. Dispositivos térmicos respondem ao valor eficaz total da corrente e podem atuar antes do esperado, mesmo com correntes da componente fundamental abaixo do limite nominal. Correntes residuais associadas a ordens de sequência zero podem sensibilizar proteções diferenciais residuais. No isolamento elétrico, componentes de frequência mais alta aumentam os gradientes de tensão ao longo do tempo, elevando a probabilidade de descargas parciais e acelerando o envelhecimento elétrico. [8]

No balanço global, a distorção em corrente reduz o fator de potência total mesmo quando o fator de deslocamento da componente fundamental permanece elevado. Assim, a mitigação de harmônicos contribui não apenas para a redução de perdas e temperaturas, mas também para a melhoria do fator de potência, para a estabilidade de medição e para a atuação confiável das proteções. No contexto do transformador Y- $\Delta$ -Y estudado, a análise conjunta de tensão e corrente no PAC, com atenção especial às ordens de baixa frequência mais influentes, permite relacionar os efeitos observados à física de circulação interna nos triângulos e aos limites térmicos do equipamento.

## 2.5 Integração entre transformador e sistema

A integração entre as fontes de harmônicos e o transformador analisado neste trabalho tem papel central na interpretação dos resultados. Considera-se um arranjo com múltiplos enrolamentos em configuração Y- $\Delta$ -Y, no qual as configurações em estrela re-

alizam o acoplamento com a rede e com a carga, enquanto o enrolamento em  $\Delta$  provê um caminho interno de circulação para componentes específicas. Essa organização modifica a propagação espectral, redistribui perdas e influencia diretamente os indicadores de distorção observados no ponto de acoplamento. [10]

Do ponto de vista de circulação de correntes, componentes de sequência zero, como as ordens múltiplas de três, tendem a permanecer confinadas no circuito em  $\Delta$ . Com isso, a sua transferência para os terminais em estrela é reduzida, e a manifestação dessas ordens na tensão medida costuma ser menor. O efeito não é neutro: a circulação interna eleva perdas e aquecimento no circuito em  $\Delta$ , exigindo atenção ao regime térmico e à capacidade de dissipar calor. Em contrapartida, ordens ímpares não múltiplas de três, como quinta, sétima e demais ordens não encontram o mesmo caminho de confinamento e podem aparecer com maior evidência nos terminais em estrela, condicionadas pela impedância equivalente.

As ligações do transformador introduzem defasagens entre as tensões e correntes de cada lado, o que afeta a comparação direta de formas de onda e espectros entre os enrolamentos. Por essa razão, a avaliação de indicadores deve respeitar o lado de medição, evitando misturar grandezas recolhidas em pontos com defasagens distintas sem a devida normalização. Na prática, recomenda-se analisar separadamente os indicadores de tensão e de corrente no lado conectado à rede em estrela, no lado de carga em estrela e, quando aplicável, os registros de corrente associados ao circuito em  $\Delta$  (direta ou indiretamente por medições auxiliares), de modo a identificar o papel de cada caminho na composição do espetro.

A resposta em frequência do conjunto também influencia a propagação das componentes. A reatância de dispersão e as perdas internas aumentam com a frequência, o que tende a atenuar ordens mais elevadas. Ainda assim, interações com capacitâncias de cabos, bancos de capacitores e filtros podem criar condições de reforço para faixas específicas, alterando a participação relativa de determinadas ordens nos terminais em estrela. Essas condições devem ser verificadas durante a caracterização experimental e consideradas nos modelos de estudo.

No plano construtivo, a circulação de componentes de maior frequência impõe esforços adicionais ao isolamento e aos elementos metálicos. Gradientes de tensão mais rápidos, perdas dispersas elevadas e concentrações de fluxo em regiões específicas po-

dem acelerar o envelhecimento elétrico e térmico do equipamento. Por isso, além dos indicadores no ponto de acoplamento, é conveniente acompanhar temperaturas, correntes de excitação e sinais de degradação do isolamento quando o regime de operação incluir conteúdo harmônico relevante.

Nos modelos de simulação, a representação do transformador deve incluir as ligações em Y- $\Delta$ -Y com suas defasagens, a reatância de dispersão por enrolamento, resistências equivalentes, perdas no ferro e, quando pertinente, características esperadas como capacidade parasita. A validação cruzada entre resultados simulados e medições em cada lado em estrela ajuda a atribuir corretamente as contribuições de fonte, rede e transformador para o espectro final.

Por fim, a integração com o transformador orienta a escolha de estratégias de mitigação. Em muitos cenários, a atenção recai sobre as ordens de baixa frequência não múltiplas de três, que tendem a dominar os indicadores de tensão no lado em estrela.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente preocupação com a QEE está diretamente ligada à sensibilidade dos equipamentos modernos e à proliferação de cargas não lineares nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). A deformação da forma de onda senoidal, causada por estes equipamentos, introduz componentes de frequências múltiplas da fundamental, conhecidas como harmônicos [3]. A presença excessiva desses harmônicos eleva as perdas no sistema, causa sobreaquecimento em transformadores e motores, e pode levar à operação inadequada de dispositivos de proteção.

Para garantir a compatibilidade eletromagnética e a confiabilidade do sistema, normas técnicas estabelecem limites rigorosos para os níveis de distorção harmônica. A norma IEEE 519 [4], por exemplo, é uma referência internacional que especifica os níveis máximos de distorção de tensão e corrente na interface entre a concessionária e os consumidores. Para o enquadramento a estes limites, a engenharia recorre a soluções de mitigação, como a aplicação de filtros passivos, projetados para desviar harmônicos específicos, e filtros de potência, que compensam as correntes harmônicas de forma dinâmica e precisa.

#### 3.1 Qualidade de energia elétrica

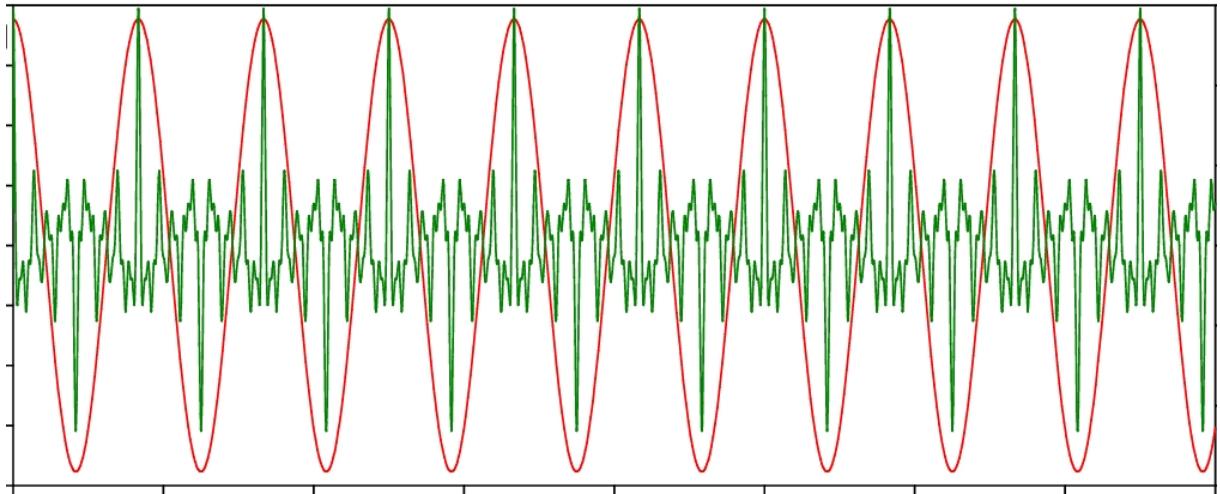
A QEE pode ser definida como o conjunto de características da energia elétrica em um determinado ponto do sistema, avaliadas em relação a um conjunto de parâmetros técnicos de referência. De forma mais ampla, a QEE se refere a qualquer problema de energia que se manifeste em desvios de tensão, corrente ou frequência e que resulte na falha ou operação inadequada de equipamentos [3]. Portanto, a análise não se restringe apenas à continuidade do fornecimento, mas engloba fundamentalmente a pureza da forma de onda senoidal da tensão e da corrente.

A importância deste tema tem crescido devido a duas tendências paralelas: por um lado, os equipamentos eletrônicos modernos, como computadores, controladores lógicos programáveis e dispositivos médicos, são cada vez mais sensíveis a distúrbios na rede elétrica. Por outro lado, a própria fonte de muitos desses distúrbios são as cargas não lineares, como inversores de frequência, fontes chaveadas e fornos a arco, que se tornaram onipresentes em ambientes industriais e comerciais.

Sob a ótica do consumidor, uma baixa QEE pode resultar em perdas de produção,

danos a equipamentos sensíveis e custos de manutenção elevados. Para as concessionárias de energia, a má qualidade da energia implica em perdas técnicas maiores no sistema de distribuição, sobreaquecimento de transformadores e cabos, e a necessidade de investimentos para garantir a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento. A Figura 1 ilustra a comparação entre uma forma de onda senoidal pura (em vermelho) e uma onda distorcida (em verde) pela presença de componentes harmônicas.

Figura 1 – Formas de onda senoidais pura e distorcida pela presença de harmônicos.



Fonte: próprio autor.

Observa-se que a adição de harmônicos altera significativamente o formato da onda, introduzindo oscilações de maior frequência sobrepostas à componente fundamental. Essa distorção é responsável por aumentar as perdas no sistema, reduzir a vida útil de equipamentos e comprometer o desempenho de dispositivos sensíveis. Em termos práticos, quanto maior a quantidade e a intensidade dos harmônicos presentes, mais a onda resultante se afasta do comportamento ideal, aumentando a DHT.

De forma geral, os principais aspectos relacionados à QEE podem ser classificados em três grandes categorias interdependentes. O primeiro deles está ligado à continuidade do fornecimento, que diz respeito à ocorrência de interrupções de curta ou longa duração, planejadas ou acidentais. Esse critério é mensurado por indicadores como o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), ambos definidos no Módulo 8 do PRODIST [5]. Outro aspecto relevante se refere aos parâmetros de tensão, que englobam desvios de magnitude (como subtensão e sobretensão), variações momentâneas (afunda-

mentos e elevações de tensão), desequilíbrios entre fases e flutuações que podem resultar em fenômenos como o *flicker* luminoso. Finalmente, a forma de onda constitui um terceiro aspecto fundamental, pois a presença de distorções harmônicas, interharmônicas e transitórias alteram o formato ideal senoidal da tensão e da corrente na frequência fundamental, comprometendo o desempenho do sistema.

Cada um desses elementos afeta de maneira distinta tanto os consumidores quanto as concessionárias. Um afundamento momentâneo de tensão, por exemplo, pode reiniciar processos industriais automatizados, ocasionando prejuízos financeiros elevados. O desequilíbrio de tensão, por sua vez, contribui para o aquecimento excessivo de máquinas rotativas, reduzindo sua eficiência e vida útil. A presença de harmônicos e transitórios, além disso, pode provocar a atuação indevida de dispositivos de proteção e acelerar o desgaste de transformadores, cabos e capacitores de correção de fator de potência.

Outro ponto importante está relacionado à crescente inserção de fontes renováveis distribuídas, como sistemas fotovoltaicos e parques eólicos. Embora contribuam para a diversificação da matriz energética e para a redução da dependência de combustíveis fósseis, esses geradores fazem uso de conversores eletrônicos de potência que, se não devidamente projetados e filtrados, podem introduzir harmônicos e interharmônicos na rede [11]. Esse cenário impõe novos desafios aos operadores do sistema, que precisam equilibrar a expansão das fontes renováveis com a manutenção de padrões adequados de qualidade de energia.

Por fim, é importante destacar que a qualidade de energia não se resume apenas a um requisito técnico, mas também a um fator econômico e regulatório. A ANEEL, por meio do PRODIST, estabelece padrões mínimos que devem ser cumpridos pelas distribuidoras, sob pena de aplicação de sanções. Paralelamente, o atendimento a esses padrões contribui para a satisfação do consumidor, para a redução de perdas técnicas e para a longevidade dos ativos elétricos. Dessa forma, investir em qualidade de energia significa não apenas atender à legislação vigente, mas também assegurar competitividade, sustentabilidade e confiabilidade no setor elétrico.

### **3.2 Distorções harmônicas em sistemas de potência**

A presença de harmônicos em sistemas elétricos pode ser caracterizada por meio de diferentes indicadores. O mais utilizado é a DHT, que corresponde à relação entre a raiz

quadrática média de todas as componentes harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental. Esse indicador é amplamente utilizado como um parâmetro de avaliação da qualidade de energia, conforme definido por normas internacionais, como a IEEE Std 519-2014 [4].

De acordo com [4], o valor percentual da DTT pode ser definida da seguinte forma:

$$\text{DTT\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\%, \quad (3.1)$$

em que  $V_h$  representa a tensão eficaz do harmônico de ordem  $h$ , e  $V_1$  corresponde à tensão eficaz da componente fundamental. Valores elevados de DTT indicam uma maior degradação da forma de onda senoidal de tensão, podendo afetar significativamente a operação de equipamentos sensíveis.

Além do DTT, as normas técnicas estabelecem outros indicadores que permitem avaliar não apenas a distorção total, mas também o comportamento de grupos específicos de harmônicos. A Tabela 3 apresenta os principais indicadores de distorções harmônicas empregados em avaliações de qualidade de energia. [5]

A utilização desses indicadores permite uma análise mais detalhada do impacto dos harmônicos sobre o sistema elétrico. Por exemplo, os indicadores  $\text{DTT}_p\%$  e  $\text{DTT}_i\%$  permitem diferenciar a contribuição de componentes pares e ímpares, enquanto o  $\text{DTT}_{95}\%$  estabelece um critério estatístico de conformidade em função das medições realizadas. Dessa forma, os resultados obtidos se tornam mais representativos da realidade operacional e podem ser comparados diretamente aos limites normativos estabelecidos pela ANEEL e pela IEEE.

### 3.3 Componente simétricas

Em um sistema trifásico, a sequência refere-se à ordem de fase em que os fasores atingem um valor de referência (por exemplo, o pico). A sequência natural de suprimento é ABC (também dita sequência positiva); a alternativa oposta é ACB (sequência negativa). Em um sistema perfeitamente balanceado de tensões ou correntes, está presente apenas a sequência positiva.

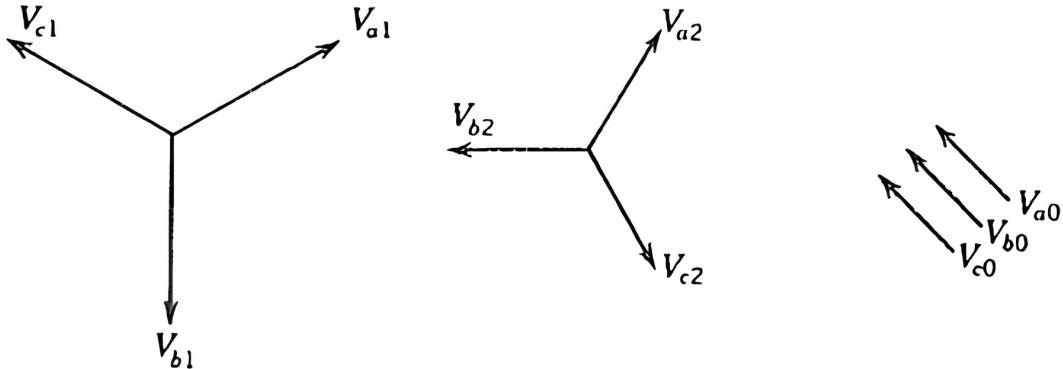
Fortescue demonstrou, em 1918, que qualquer sistema trifásico desbalanceado pode

ser decomposto em três sistemas balanceados [12]: (i) componente de sequência positiva, (ii) componente de sequência negativa e (iii) componente de sequência zero (três fasores em fase).

Seja  $a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ . Para fasores de fase  $\mathbf{V}_{abc} = \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \end{bmatrix}^\top$  e componentes  $\mathbf{V}_{012} = \begin{bmatrix} V_0 & V_1 & V_2 \end{bmatrix}^\top$ , tem-se a transformação de Fortescue:

$$\mathbf{V}_{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \mathbf{V}_{abc}, \quad \mathbf{V}_{abc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \mathbf{V}_{012}.$$

Figura 2 – Componentes simétricas.



Fonte: adaptado de [13].

A Figura 2 mostra as três sequências simétricas das tensões:

Na sequência positiva ( $V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}$ ), correspondente ao diagrama da esquerda, os três fasores têm a mesma magnitude, estão defasados de  $120^\circ$  e seguem a ordem ABC (isto é,  $V_{b1}$  atrasa  $120^\circ$  em relação a  $V_{a1}$  e  $V_{c1}$  atrasa  $120^\circ$  em relação a  $V_{b1}$ ), representando a operação normal e equilibrada do sistema;

Na sequência negativa ( $V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}$ ), ilustrada no diagrama central, os fasores também têm a mesma magnitude e defasagem de  $120^\circ$ , mas a ordem de fase é invertida (ACB), de modo que  $V_{b2}$  adianta  $120^\circ$  em relação a  $V_{a2}$  (ou, equivalentemente,  $V_{c2}$  atrasa  $120^\circ$ );

Na sequência zero ( $V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}$ ), mostrada à direita, os três fasores são idênticos, com a mesma magnitude e em fase ( $ângulo de 0^\circ$ ), implicando em uma soma fasorial que

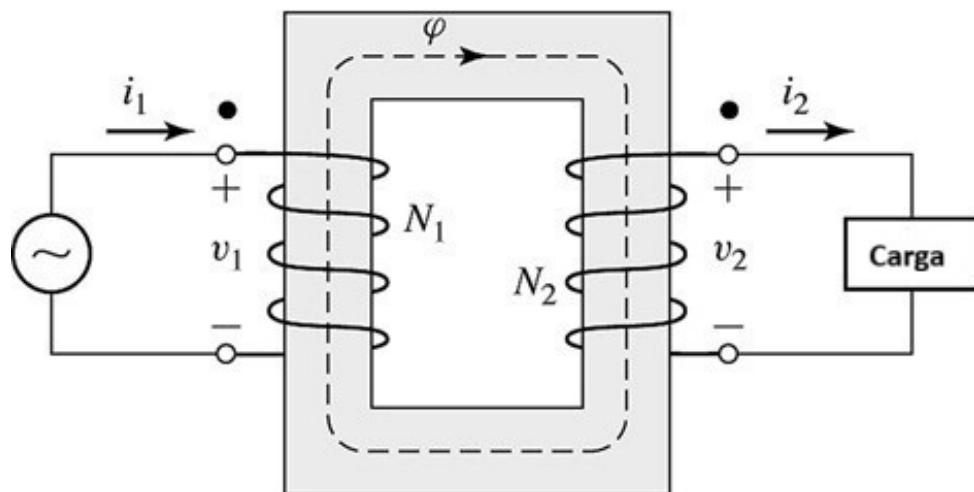
resulta num fasor tipicamente maior.

### 3.4 Transformadores em sistemas de potência

Os transformadores são componentes essenciais dos SEP, responsáveis por elevar ou reduzir níveis de tensão e por transferir potência via acoplamento eletromagnético. Nos transformadores de dois enrolamentos, há isolamento galvânico entre os circuitos; já os autotransformadores não oferecem isolamento elétrico, pois compartilham parte do enrolamento. Em qualquer caso, os circuitos permanecem magneticamente acoplados pelo fluxo no núcleo. Embora em condições ideais tudo seria senoidal, na prática, cargas não lineares deformam as correntes, geram harmônicos e aumentam perdas, afetando a qualidade de energia [2,3]. Este texto apresenta o básico de operação de transformadores trifásicos, a sua modelagem elétrica e como interagem com harmônicos, preparando a análise de arranjos com enrolamento em  $\Delta$ .

A Figura 3 representa o diagrama esquemático de um transformador monofásico ideal. À esquerda, tem-se a fonte de tensão alternada aplicada ao enrolamento primário, com  $N_1$  espiras, tensão  $v_1$  e corrente  $i_1$ . À direita, encontra-se o enrolamento secundário, com  $N_2$  espiras, tensão  $v_2$  e corrente  $i_2$ , alimentando uma carga.

Figura 3 – Exemplo didático de um transformador.



Fonte: adaptado de [14].

A ideia básica de modelagem é ver o transformador como enrolamentos acoplados magneticamente. A relação de transformação depende da razão de espiras entre primário

e secundário:

$$a = \frac{N_p}{N_s}. \quad (3.2)$$

Os símbolos em forma de ponto nos terminais dos enrolamentos indicam a polaridade: quando a tensão no terminal pontuado do primário é positiva, o terminal pontuado do secundário também assume polaridade positiva (enrolamentos em fase). O núcleo magnético, representado pela região sombreada, canaliza o fluxo magnético  $\varphi$  gerado pela corrente  $i_1$ ; esse fluxo varia no tempo e induz a tensão  $v_2$  no enrolamento secundário, caracterizando o princípio da indução eletromagnética. Em condições ideais (núcleo sem perdas e relutância nula), vale a relação

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (3.3)$$

evidenciando que o transformador permite elevar ou reduzir a tensão, conservando aproximadamente a potência ativa entre primário e secundário.

A tensão induzida segue a lei de Faraday-Lenz:

$$V_{\text{fem}} = -N \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.4)$$

em que  $N$  é o número de espiras,  $d\Psi/dt$  é a variação do fluxo por unidade de tempo. Na presença de harmônicos, costuma-se separar as grandezas em três partes: sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, como proposto por Fortescue [12]. Esse ponto de vista explica por que certas ligações reduzem algumas componentes e deixam passar outras.

Quanto às perdas, há perdas no ferro (histerese e correntes de Foucault) e perdas no cobre (efeito Joule). As perdas no cobre podem ser descritas por:

$$P = I^2 R. \quad (3.5)$$

O valor eficaz total de corrente leva em conta a fundamental e os harmônicos:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}. \quad (3.6)$$

Para reduzir a propagação de algumas componentes, usa-se um caminho interno

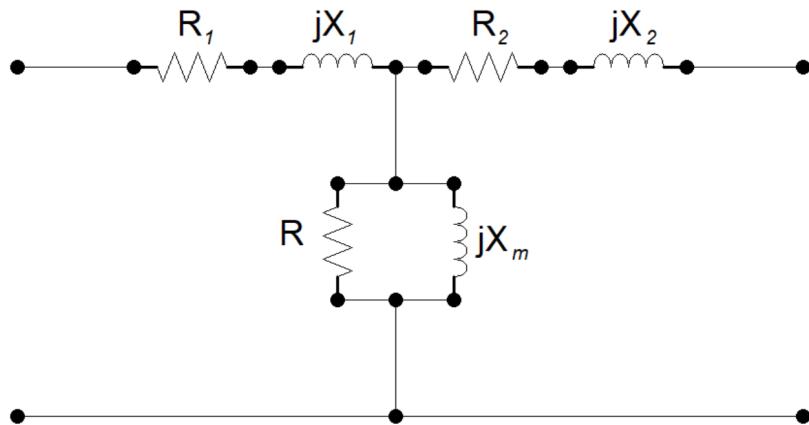
em  $\Delta$  onde certas correntes circulam sem ir para a rede. No arranjo Y- $\Delta$ -Y estudado, os dois lados em Y fazem a interface com rede e geração, e o  $\Delta$  funciona como caminho interno. Em geral, componentes ligadas ao neutro (múltiplas de três) ficam confinadas no  $\Delta$ , reduzindo sua aparição na tensão dos lados em Y [10].

Nos estudos teóricos, analisam-se equilíbrios de potência e de fluxo magnético. No transformador ideal, a potência aparente de entrada e de saída coincidem:

$$S_p = S_s. \quad (3.7)$$

O diagrama na Figura 4, demonstra o modelo elétrico mais usado para cálculo em regime senoidal de um transformador de dois enrolamentos, duas impedâncias em série (uma por lado) que reúnem as quedas internas devida à resistência dos enrolamentos e à dispersão do fluxo, e um ramo em paralelo que modela o núcleo. O resistor  $R$  concentra as perdas no ferro, enquanto  $jX_m$  representa a corrente necessária para magnetizar o núcleo. Em aplicações práticas, costuma-se referir o lado 2 ao lado 1 e somar as parcelas em série para obter a impedância equivalente. Os parâmetros do ramo em paralelo são obtidos no ensaio em vazio; os da parâmetros de ramo série, no ensaio de curto-circuito.

Figura 4 – Circuito equivalente de um transformador monofásico.



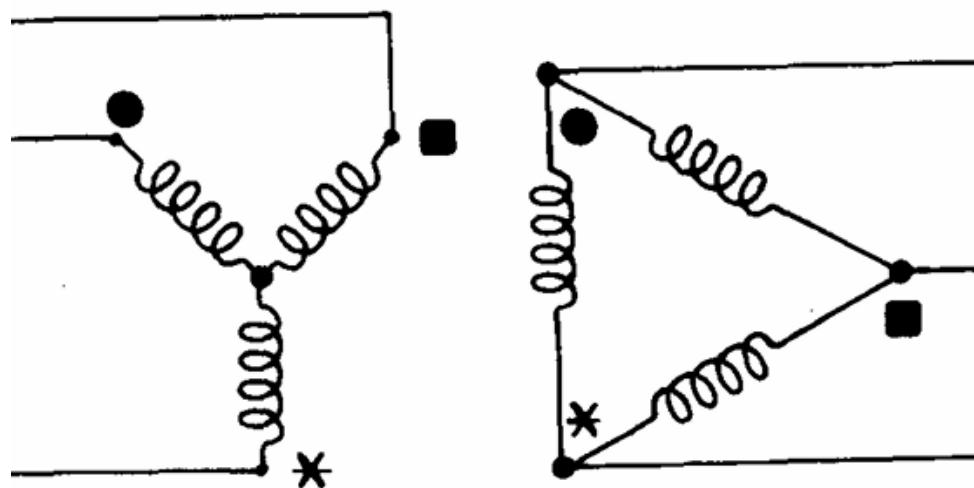
Fonte: próprio autor.

Na prática, resistência equivalente e reatância de dispersão introduzem perdas e quedas internas. Em simulações, modelos como o equivalente em T e o acoplamento mútuo são usados e podem incluir não linearidades para representar harmônicos [8]. No Brasil, o PRODIST da ANEEL exige que, no PAC, os indicadores de distorção de tensão fiquem abaixo dos limites [5], o que incentiva o uso de ligações que atenuem harmônicos.

### 3.4.1 Transformadores em ligação Estrela-Delta

Esta seção discute como a conexão e a relação de transformação influenciam a propagação de harmônicos. Transformadores não apenas ajustam níveis de tensão; o arranjo de enrolamentos molda o espectro de tensão e de corrente no ponto de conexão. Na Figura 5, o lado em estrela tem neutro acessível e o lado em  $\Delta$  forma um triângulo fechado. A ligação introduz defasagem de 30 graus entre tensão de linha e de fase e ajuda a confinar componentes de sequência zero, como as ordens tripas [3].

Figura 5 – Ligação  $\Delta$ -Y de um transformador trifásico.



Fonte: adaptado de [15].

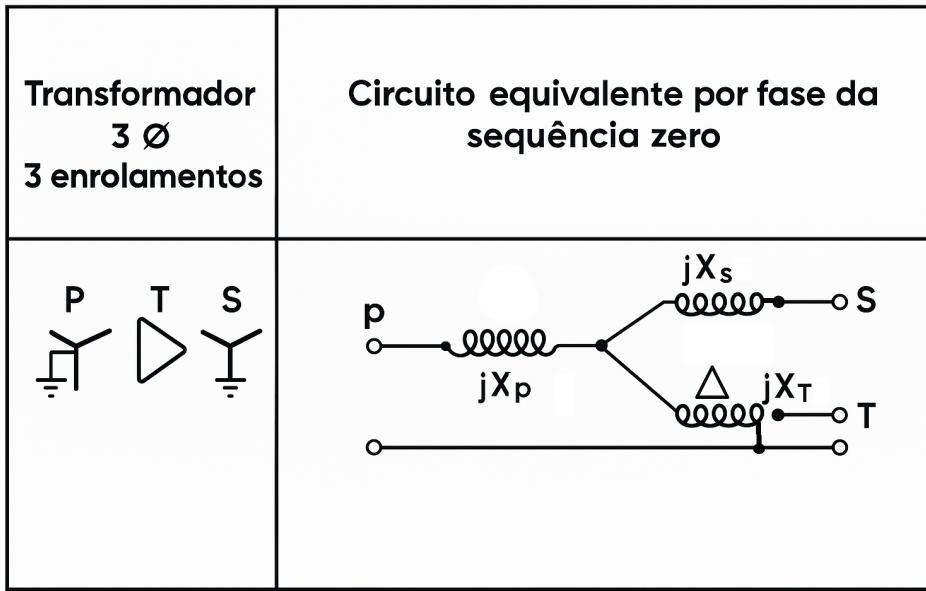
A Figura 6 ilustra os circuitos de sequência para um transformador trifásico com enrolamento primário em estrela aterrada, enrolamento secundário em estrela aterrada e enrolamento terciário em  $\Delta$  aterrado internamente.

O transformador possui três enrolamentos principais: o enrolamento P (Primário) e o enrolamento S (Secundário), ambos conectados em estrela, sendo o neutro de P aterrado e o neutro de S igualmente aterrado; e o enrolamento T (Terciário), conectado em  $\Delta$ .

Nos circuitos de sequência positiva e de sequência negativa, as correntes percorrem as impedâncias de cada enrolamento ( $Z_H$ ,  $Z_M$ ,  $Z_L$ ) de forma semelhante, compondo um caminho efetivo em série. Para transformadores, as impedâncias de sequência positiva e negativa são, em geral, iguais, e o estado de aterramento dos neutros não altera significativamente esses circuitos.

No circuito de sequência zero, o aterramento torna-se determinante. Como o

Figura 6 – Ligação Y-Δ-Y de um transformador trifásico.



Fonte: adaptado de [15].

primário em estrela possui neutro aterrado, correntes de sequência zero podem escoar pelo ponto neutro associado. O enrolamento em  $\Delta$  oferece um caminho fechado para circulação interna dessas correntes, permitindo que componentes de sequência zero sejam confinadas no  $\Delta$  reduzindo seu efeito para o sistema externo.

No arranjo Y- $\Delta$ -Y, o enrolamento em  $\Delta$  atua como um filtro natural para as componentes de sequência zero e ajuda a estabilizar o neutro em instalações com muitas cargas não lineares [3].

Na prática, os ganhos incluem menor DTT para ordens triplas e melhor compatibilidade com limites usuais [4]. Em contrapartida, cresce o aquecimento dentro do  $\Delta$  por causa da corrente circulante. Para ordens que não são múltiplas de três (como 5 e 7), a propagação depende da impedância equivalente; quando necessário, aplicam-se filtros adicionais [1, 3].

### 3.5 Resumo sobre Série de Fourier

De acordo com o teorema de Fourier, uma função periódica prática  $f(t)$ , de período  $T$  e frequência fundamental  $\omega_0 = 2\pi/T$ , pode ser representada como a soma de uma componente média (CC) e de uma série infinita de senoides harmônicas múltiplas da

frequência fundamental [16]. Assim,

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)], \quad (3.8)$$

em que  $a_0$  representa o valor médio de  $f(t)$  e  $a_h, b_h$  são os coeficientes de Fourier, associados às amplitudes das componentes cossenoidais e senoidais de ordem  $h$ .

Para que essa representação seja válida,  $f(t)$  deve satisfazer condições usuais (condições de Dirichlet), suficientemente garantidas em sinais de interesse em engenharia: ser de valor finito e univvalorada em qualquer ponto, possuir número finito de descontinuidades, de máximos/mínimos em cada período e apresentar módulo integrável ao longo de um período. Nessas condições, os coeficientes  $a_n$  e  $b_n$  podem ser obtidos por integrais sobre um período, procedimento conhecido como Análise de Fourier.

A partir da representação em série de Fourier, qualquer forma de onda periódica não senoidal pode ser vista como a soma da componente fundamental e de um conjunto de componentes senoidais de frequências múltiplas da fundamental. Em sistemas elétricos de potência, essas componentes são identificadas como harmônicos: o harmônico de ordem  $h$  possui frequência  $h$  vezes a frequência fundamental e amplitude determinada pelos coeficientes de Fourier associados. Assim, a análise harmônica nada mais é do que a interpretação física da decomposição matemática de Fourier aplicada a tensões e correntes da rede.

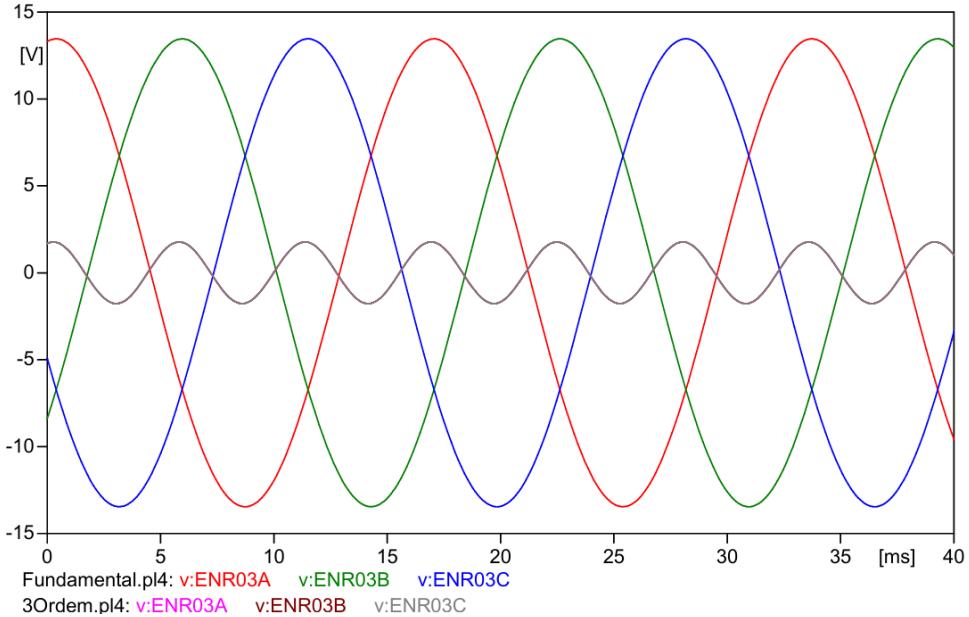
Quando a onda de tensão ou de corrente é puramente senoidal, apenas o termo de ordem  $h = 1$  está presente. A presença de cargas não lineares introduz correntes que não seguem proporcionalmente a tensão aplicada; essa não linearidade gera componentes adicionais de ordem  $h \geq 2$ , que se superpõem à fundamental e deformam a forma de onda. Em medições práticas, o espectro harmônico obtido pelos analisadores de qualidade de energia fornece diretamente as amplitudes desses termos de Fourier, permitindo quantificar a contribuição relativa de cada ordem.

### 3.5.1 Terceira ordem harmônica

Os harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos (3, 9, 15, ...) ocupam papel particular em sistemas trifásicos, pois pertencem à sequência zero e, diferentemente dos harmônicos de sequência positiva e negativa, apresentam componentes de tensão e

corrente alinhados nas três fases. Pela teoria das componentes simétricas [16], as ordens  $h = 1, 4, 7, 10, \dots$  formam a sequência positiva (mesmo sentido da fundamental), as ordens  $h = 2, 5, 8, 11, \dots$  formam a sequência negativa (sentido oposto) e as ordens  $h = 3, 6, 9, 12, \dots$  constituem a sequência zero, na qual os fasores são colineares. Em um sistema equilibrado, a fundamental apresenta fasores defasados de  $120^\circ$ , cuja soma vetorial se anula, levando a corrente de neutro desprezível. Para o  $3^{\text{o}}$  harmônico, a defasagem de cada fase é multiplicada por 3, de modo que  $V_{3A} = V_3 \angle 0^\circ$ ,  $V_{3B} = V_3 \angle -360^\circ$  e  $V_{3C} = V_3 \angle 360^\circ$  se tornam equivalentes a fasores perfeitamente alinhados; as três componentes atingem máximos e cruzamentos por zero simultaneamente.

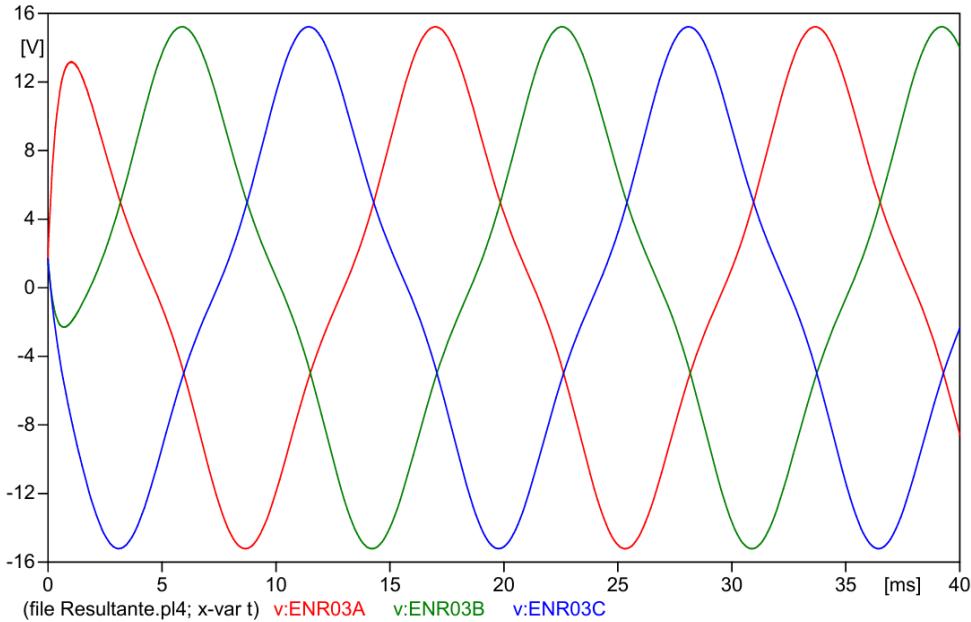
Figura 7 – Componente fundamental e componente hamônico.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 7 apresentam-se as tensões de fase obtidas em uma simulação representativa, evidenciando a defasagem natural de  $120^\circ$  entre as componentes fundamentais das três fases. Observa-se a presença das componentes de  $3^{\text{o}}$  harmônico, que, por pertencerem à sequência zero, aparecem alinhados em todas as fases. Como essas componentes não estão defasadas entre si, seus efeitos são somados e afetam tensões fundamentais de forma idêntica em cada fase, produzindo o mesmo tipo de distorção nas resultantes das fases, esse efeito pode ser observado na Figura 8 .

Figura 8 – Comportamento distorcido da tensão.



Fonte: próprio autor.

Esse comportamento reforça a análise teórica dos harmônicos triplos: enquanto as componentes de sequência positiva e negativa tendem a se cancelar no neutro em condições equilibradas, as componentes de 3º harmônico se somam, podendo resultar em correntes elevadas no condutor neutro quando presentes em grande intensidade.

$$I_N = I_A + I_B + I_C, \quad (3.9)$$

Como  $I_{3A}$ ,  $I_{3B}$  e  $I_{3C}$  estão em fase, sua soma é essencialmente aritmética:

$$I_{N(3h)} = I_{3A} + I_{3B} + I_{3C} = 3 I_{3,\text{fase}}, \quad (3.10)$$

podendo levar o condutor neutro a correntes superiores às de fase, com risco de sobrecarga térmica e comprometimento da segurança [5]. Essa particularidade dos harmônicos triplos fundamenta a necessidade de dimensionamento adequado do neutro e do uso de topologias como enrolamentos em  $\Delta$  para seu confinamento.

### 3.6 Considerações finais do capítulo

Este capítulo reuniu a base conceitual para a leitura dos resultados do trabalho. Partiu-se da definição de QEE e dos seus eixos continuidade do fornecimento, parâmetros

de tensão e preservação da forma de onda, destacando impactos técnicos e econômicos para consumidores e concessionárias.

Foram sistematizados os indicadores que serão utilizados nas análises: DTT,  $DIT_h$ ,  $DTT_p$ ,  $DTT_i$ ,  $DTT_3$  e percentis como  $DTT_{95}$ . Esses parâmetros permitem relacionar medições e simulações aos limites de referência definidos em normas aplicáveis [4, 5].

Na sequência, revisou-se a modelagem elétrica do transformador trifásico e a interpretação por componentes simétricas - sequências positiva, negativa e zero. Essa estrutura é essencial para explicar como diferentes ordens harmônicas se propagam entre enrolamentos e como afetam os indicadores de tensão e corrente.

Foi enfatizado que, no arranjo Y- $\Delta$ -Y estudado, o enrolamento em  $\Delta$  oferece um caminho interno para correntes de sequência zero, reduzindo a sua manifestação nos lados em Y e, consequentemente, os indicadores de tensão.

Com esse resumo teórico, os próximos capítulos definem a estratégia de medição e de simulação: especificações do transformador, metodologia utilizada para simulação e experimento prático para comfirmar as teorias discutidas neste capítulo.

## 4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ENROLAMENTOS TERCIÁRIOS NA PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS

### 4.1 Especificação do transformador de ensaio

Esta seção descreve o transformador utilizado nos ensaios do Capítulo 4, consolidando arquitetura, núcleo, enrolamentos, disposição construtiva e acessibilidade de terminais, conforme os requisitos de projeto.

#### 4.1.1 *Arquitetura e topologia*

O transformador trifásico é constituído por três unidades monofásicas idênticas. Cada unidade monofásica possui cinco enrolamentos por fase, dispostos em camadas concêntricas sobre o núcleo, com ligações trifásicas finais do conjunto configuradas de modo a viabilizar o arranjo Y- $\Delta$ -Y requerido neste trabalho (lados em estrela aterrados e malha em  $\Delta$  interna para circulação de componentes de sequência zero).

O núcleo magnético de cada unidade será do tipo núcleo envolvente e laminado.

#### 4.1.2 *Disposição construtiva dos enrolamentos*

Os cinco enrolamentos por fase são **dispostos em camadas concêntricas sobrepostas** ao redor da coluna do núcleo. A ordem de posicionamento das camadas deve, sempre que possível, **priorizar os menores níveis de tensão mais próximos ao núcleo** para facilitar o isolamento elétrico entre camadas. Uma ordem de referência compatível com os níveis fornecidos está indicada a seguir (do núcleo para o exterior):

1. Enrolamento 1 (Y aterrado, 380 V)
2. Enrolamento 2 (Y aterrado, 57 V);
3. Enrolamento 3 (Y aterrado, 57 V);
4. Enrolamento 4 ( $\Delta$ , 28,8 V);
5. Enrolamento 5 ( $\Delta$ , 28,8 V);

Considerando que todos os valores de tensão são eficazes e entre fases.

#### 4.1.3 Dados nominais por enrolamento

A Tabela 4 resume tensões, correntes e potências nominais fornecidas para cada conjunto trifásico.

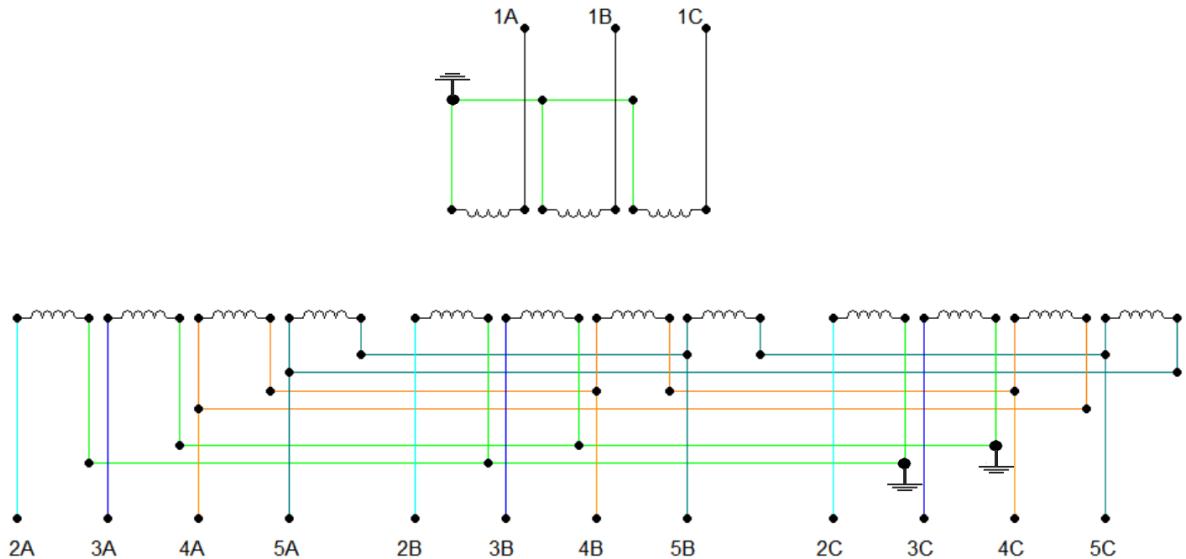
Tabela 4 – Dados nominais dos enrolamentos.

Enrolamento	Ligaçāo	Tensāo entre fases	Corrente	Potēcia
1	Y aterrado	380 V	1,00 A	658 VA
2	Y aterrado	57 V	3,33 A	329 VA
3	Y aterrado	57 V	3,33 A	329 VA
4	$\Delta$	28,8 V	0,50 A	20 VA
5	$\Delta$	28,8 V	0,50 A	20 VA

Considerando todos os valores de tensões e corrente eficazes.

A Figura 9 demonstra o diagrama trifilar do transformador, onde a fonte estará conectada aos enrolamentos 2 e 3, sendo assim os pontos 2A,3A,2B,3B,2C e 3C. E a medição de tensão é realizada no enrolamento 1, com o qualímetro conectado nos pontos 1A,1B e 1C.

Figura 9 – Diagrama trifilar do transformador.



Fonte : próprio autor.

#### 4.1.4 Observações de projeto e integração com o estudo

O transformador especificado para os ensaios é deliberadamente de menor porte do que unidades usuais de campo. Essa escolha privilegia segurança, custo e disponibilidade de medição em laboratório, sem comprometer a validade dos resultados dentro do escopo definido.

Do ponto de vista eletromagnético, os fenômenos associados à propagação e à mitigação de harmônicos dependem sobretudo da topologia de ligação e das relações de impedância relativas. Mantendo a mesma frequência, a topologia Y- $\Delta$ -Y e relações de espiras compatíveis, -se o comportamento espectral de interesse.

Quanto aos efeitos térmicos, a manutenção de densidades de corrente e de fluxo em faixas usuais assegura representatividade dos resultados; diferenças de perdas por dispersão inerentes a potências maiores são reconhecidas como limitações de escala e discutidas quando pertinente. Assim, o protótipo de menor porte é suficiente para evidenciar os fenômenos alvo, validar a metodologia e sustentar recomendações aplicáveis a unidades de campo.

## 4.2 Simulação computacional no ATP

Foi elaborado um cartão de entrada no *software Alternative Transients Program (ATP)* capaz de reproduzir, no domínio do tempo, o arranjo experimental do transformador com cinco enrolamentos por fase em topologia Y- $\Delta$ -Y. A partir desse código, obtém-se uma simulação equivalente à bancada, com as mesmas condições de fonte, ligações e pontos de medição.

A modelagem do transformador foi feita por fase, utilizando elemento de múltiplos enrolamentos com resistências e reatâncias de dispersão por enrolamento, além da implementação de capacitância parasita. Os dois lados em Y possuem neutros aterrados e os enrolamento em  $\Delta$  permanecem fechado.

A fonte trifásica de tensão foi representada como soma da componente fundamental com harmônicos programados por ordem e amplitude, respeitando a sequência e as magnitudes aplicadas na bancada. No lado de alta em Y foi conectada uma carga resistiva trifásica em Y com neutro aterrado, tal como no experimento. As medições de tensão e corrente foram tomadas nos mesmos pontos do ensaio.

#### 4.2.1 Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados da simulação computacional pelo ATP, que visam validar o desempenho da solução proposta frente ao cenário de teste estabelecido.

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento do sistema sob condições de elevada distorção harmônica. Para isso, foi montado um perfil de tensão (ou corrente) sintético, composto por duas componentes harmônicas de baixa ordem, além da componente fundamental de 60 Hz.

O perfil harmônico foi definido aplicando 10% do valor da componente fundamental como componente de terceiro harmônico e 5% do valor da componente fundamental como componente de quinto harmônico. A escolha destas ordens (3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup>) justifica-se por serem comuns em sistemas elétricos.

Tabela 5 – perfil harmônico de estudo.

Ordem $h$	Tensão por fase (V)
1	46,5
3	4,7
5	2,3

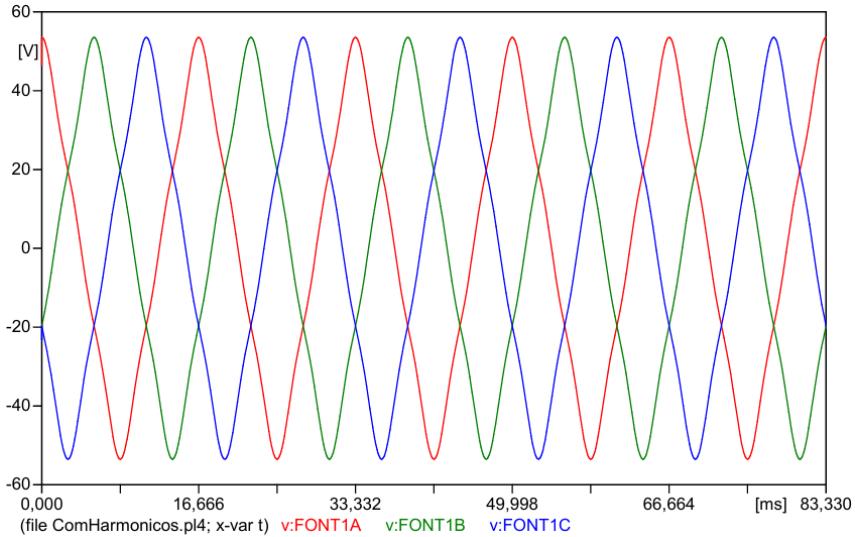
Calculando o DHT para esse perfil, tem-se:

$$\text{DHT}(\%) = \frac{\sqrt{4,7^2 + 2,3^2}}{46,5} \cdot 100\% = 11,25\%. \quad (4.1)$$

Este é um valor expressivo, pois ultrapassa significativamente os limites regulatórios estabelecidos pela ANEEL no Módulo 8 do PRODIST para sistemas de Baixa Tensão. Portanto, o cenário criado representa uma condição de qualidade de energia severa, porém plausível, ideal para testar a robustez e a eficácia da solução proposta.

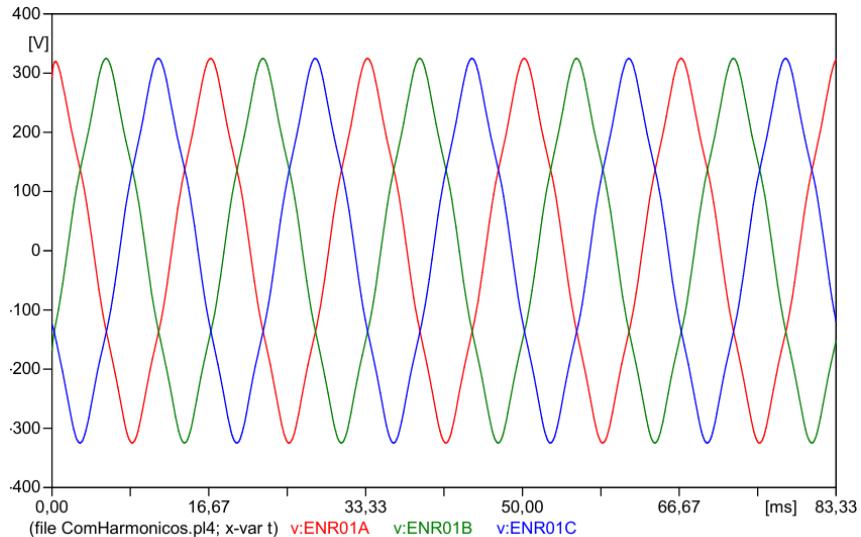
A análise inicia-se pela observação das formas de onda de tensão trifásicas. A Figura 10 apresenta a tensão de entrada (alimentação), onde é possível notar visualmente a deformação da senoide, resultado direto da poluição harmônica injetada. Em contrapartida, a Figura 11 exibe a tensão de saída, após o transformador.

Figura 10 – Tensão trifásica de entrada com harmônicos.



Fonte : próprio autor.

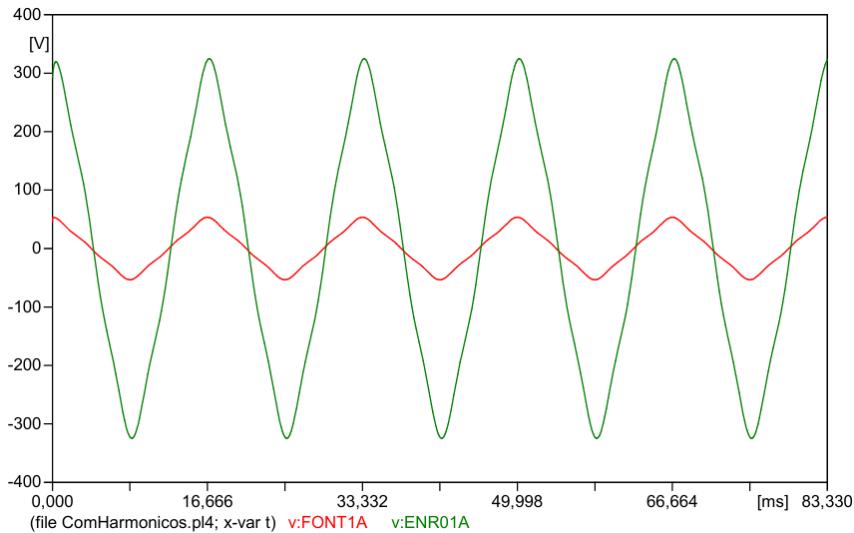
Figura 11 – Tensão trifásica de saída com harmônicos.



Fonte : próprio autor.

Para uma análise comparativa direta da eficácia da mitigação, a Figura 12 sobrepõe as formas de onda da Fase A de entrada (em vermelho) e saída (em verde), ambos os sinais sendo uma resultante da componente fundamental em 60 Hz e das componentes harmônicas. Esta comparação evidencia a diferença entre o sinal distorcido e o sinal corrigido gerado pela solução.

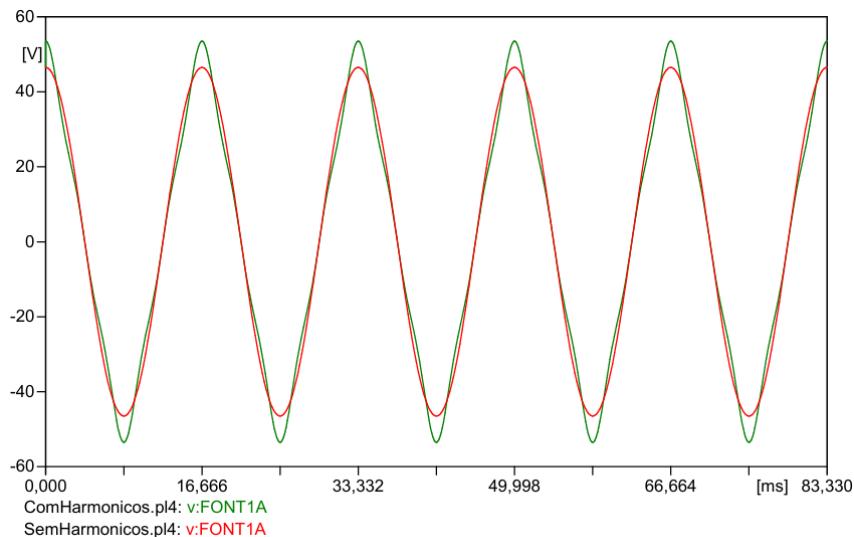
Figura 12 – Tensão de entrada e saída com harmônicos.



Formas de onda da tensão de entrada (linha vermelha) e da tensão de saída (linha verde), para a fase A. Fonte : próprio autor.

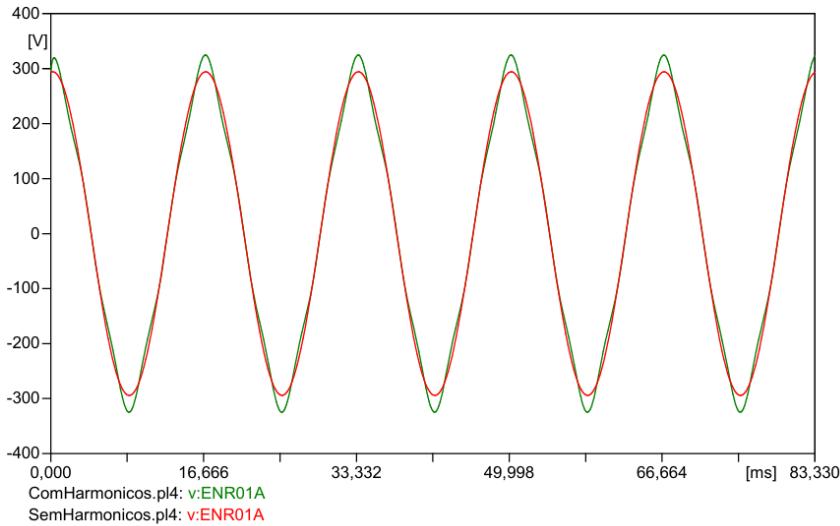
Finalmente, para estabelecer uma linha de base e avaliar a qualidade final da energia entregue, o desempenho é comparado com o cenário ideal. A Figura 13 compara a forma de onda de entrada distorcida com uma senoide pura de referência. Por último, a Figura 14 compara a tensão de saída corrigida com a mesma referência senoidal pura, demonstrando o quanto próxima do ideal a solução consegue operar, mesmo sob condições de entrada severas.

Figura 13 – Comparação da tensão de entrada com e sem harmônicos.



Formas de onda da tensão de entrada sem harmônicos (linha vermelha) e da tensão de entrada com harmônicos (linha verde), para a fase A. Fonte : próprio autor.

Figura 14 – Comparação da tensão de saída com e sem harmônicos.

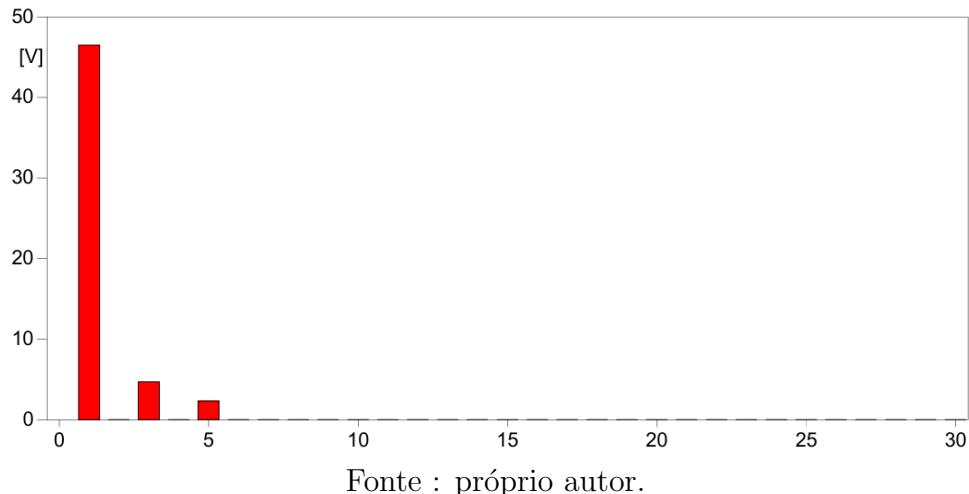


Formas de onda da tensão de saída sem harmônicos (linha vermelha) e da tensão de entrada com harmônicos (linha verde), para a fase A. Fonte : próprio autor.

Dando seguimento à análise dos resultados, é fundamental quantificar a distorção através da análise no domínio da frequência. Para isso, as Figura 15 e Figura 16 apresentam os espectros harmônicos das tensões de entrada e saída, respectivamente.

O histograma da Figura 15 detalha a composição do sinal de entrada. Nele, observa-se a componente fundamental (ordem 1) normalizada, e as duas componentes injetadas: a 3<sup>a</sup> ordem com 10% e a 5<sup>a</sup> ordem com 5% da magnitude fundamental. Este gráfico confirma o valor da DHT de entrada de 11,18%, validando o cenário de teste severo.

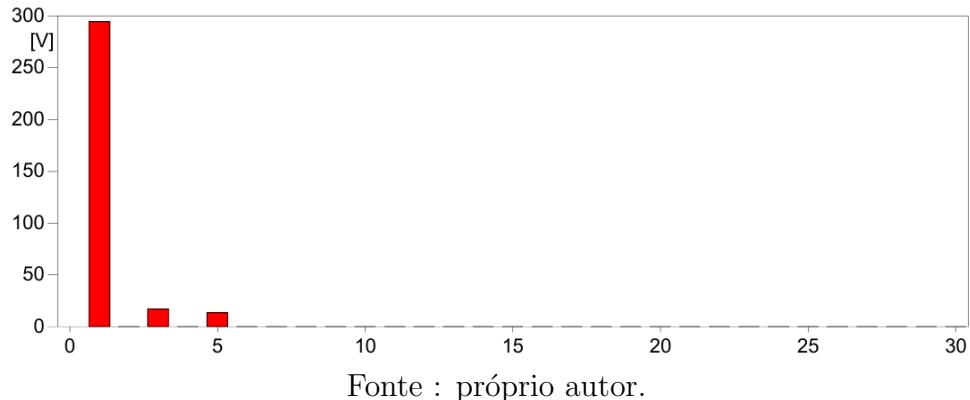
Figura 15 – Histograma de componentes harmônicas da tensão de entrada.



Fonte : próprio autor.

Em contraste, a Figura 16 demonstra a eficácia da solução proposta. O espectro de saída mostra uma redução drástica da componentes de 3<sup>a</sup> ordem, que agora se encontram em níveis residuais. Mais importante, as DTT de saída, calculadas a partir deste espectro, são apresentadas na Tabela 6, comprovando que a tensão corrigida retorna a níveis aceitáveis, abaixo dos limites estipulados pelo PRODIST Módulo 8.

Figura 16 – Histrograma de componentes harmônicas da tensão de Saída.



Fonte : próprio autor.

Tabela 6 – Resultados simulados e limites do PRODIST.

	Simulado (%)		Limites PRODIST
	Entrada	Saída	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$
DTT	11,25	7,40	10,0%
DTT <sub>3%</sub>	10,11	5,80	7,50%
DTT <sub>i</sub>	4,95	4,59	6,50%

### 4.3 Metodologia experimental em laboratório

Os ensaios foram realizados em ambiente de laboratório, utilizando uma fonte trifásica de tensão (Figura 17) com capacidade de injecção controlada de conteúdo harmônico, o banco de transformadores em arranjo Y-Δ-Y (Figura 18) anteriormente e qualímetros com garras de corrente para aquisição de sinais. Complementarmente, empregou-se uma câmera térmica para inspeção de pontos quentes durante os testes.

Figura 17 – Fonte de tensão FCATHQ 3000-38-50.



Fonte: catalógo do fabricante Supplier.

Figura 18 – Transformador trifásico.



Fonte : próprio autor.

Antes da primeira energização, a fonte foi completamente desativada e isolada. Procedeu-se à abertura do invólucro para limpeza interna, com remoção de poeira, pré aquecimento com ar quente para retirada de umidade dos capacitores, verificação visual de conexões, trilhas e dissipadores. Somente após a limpeza e a re-fechamento do equipamento, com integração mecânica conferida, a fonte foi reconectada para os ensaios.

Figura 19 – Limpeza da fonte.



Fonte : próprio autor.

A instrumentação consistiu em qualímetros digitais configurados para registro simultâneo de tensões e correntes por fase, com garras de corrente dimensionadas para as faixas nominais do experimento. As garras foram posicionadas nos condutores de fase com o sentido de medição indicado pelo fabricante, e as referências de tensão foram tomadas nos barramentos correspondentes. Priorizaram-se pontos de medição no lado Y de maior tensão, no lado Y conectado à fonte. Quando a arquitetura do protótipo permitiu, realizaram-se leituras auxiliares para inferir a circulação interna no  $\Delta$ .

O procedimento de ensaio seguiu duas etapas principais. Na etapa de referência, operou-se a fonte em modo senoidal, registrando as grandezas elétricas em regime estacionário para estabelecer as condições base. Na etapa de injeção harmônica, habilitou-se o perfil de harmônico na fonte, variando combinações para o perfil utilizado no estudo, enquanto se monitoravam os indicadores de distorção.

Em determinados momentos, a câmera térmica foi utilizada para varredura do conjunto, com foco em terminais, junções, regiões de maior densidade de corrente e nas proximidades do enrolamento em  $\Delta$ . Sempre que identificadas elevações anormais de temperatura, o ensaio foi interrompido para inspeção e análise de causa.

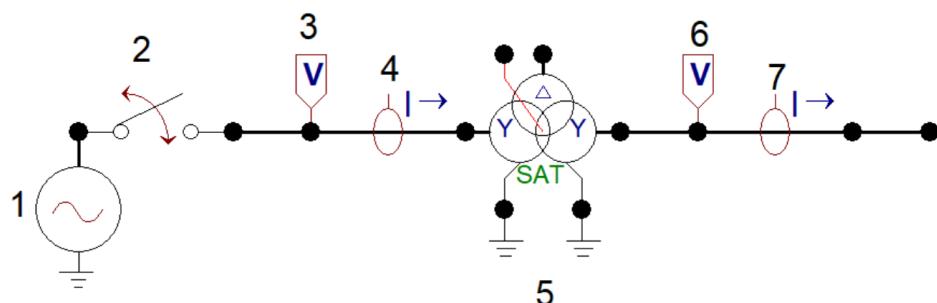
As medidas de segurança incluíram o uso de botas isolantes, organização do cabeamento para evitar laços e travessias, sinalização da área de trabalho e a presença contínua de supervisor. As reconexões do circuito e o reposicionamento de equipamentos foram realizados apenas com o conjunto desenergizado, respeitando intervalos de descarga e verificação de ausência de tensão.

Ao final, os dados registrados pelos qualímetros foram exportados para cálculo dos indicadores de distorção, organização por pontos de medição e comparação direta entre a condição senoidal de referência e as condições com injeção harmônica. Esse fluxo assegura rastreabilidade dos resultados e permite relacionar, de forma objetiva, as mudanças observadas na tensão e corrente com a topologia Y-Δ-Y e com o espectro aplicado na fonte.

#### 4.3.1 Procedimentos de medição

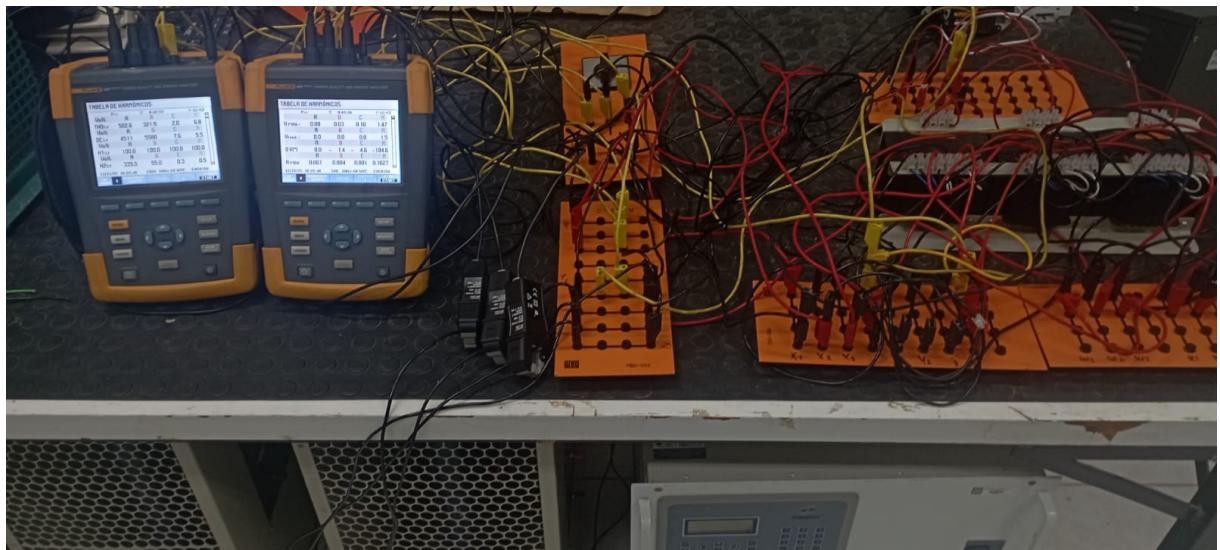
A Figura 20 demonstra uma representação unifilar do arranjo de montagem da bancada (Figura 21). Inicialmente parte-se da fonte trifásica de tensão com injeção harmônica, que alimenta o transformador por meio de um disjuntor geral. Por uma limitação do ATP-Draw a representação gráfica do transformador se limita apenas a 3 enrolamentos, sendo esta uma representação que de forma alguma influencia as simulações anteriores, em que foram modelados os 5 enrolamentos no cartão. A jusante do disjuntor, a fonte é conectada aos enrolamentos denominados de média tensão do transformador (lado Y, 57 V), onde são medidas tensões e correntes com qualímetro, item 3 da Figura 20. No lado de alta tensão (Y, 380 V), realiza-se medições de tensão e corrente nos seus terminais, item 6 da Figura 20. Em todas as leituras, registra-se o perfil harmônico. Todos os neutros permanecem solidamente aterrados durante os ensaios.

Figura 20 – Arranjo experimental e pontos de medição.



- (1) Fonte trifásica; (2) Disjuntor para proteção (3) Medição de tensão na fonte; (4) Garra para medição de corrente na fonte; (5) Transformador; (6) Medição de tensão na saída; (7) Garra para medição de corrente na saída. Fonte : próprio autor.

Figura 21 – Bancada completa.



Fonte : próprio autor.

- 1. Preparação e segurança.** Confirmar uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI) e a presença de supervisor. Verificar integração mecânica e elétrica da fonte após a limpeza prévia e o fechamento do invólucro.
- 2. Encadeamento elétrico.** Conectar a fonte → disjuntor geral → barramento dos enrolamentos de média tensão ( $Y$ , 57 V). Conectar o lado de alta tensão ( $Y$ , 380 V) a uma carga resistiva trifásica em  $Y$ . Aterrar os neutros dos lados em  $Y$  e o ponto de estrela da carga.
- 3. Configuração do qualímetro.** Selecionar modo 3 fases no qualímetro(), 4 fios ( $Y$ , neutro aterrado), frequência nominal do sistema. Ajustar fator das garras de corrente e verificar o sentido de medição (seta na garra em direção à carga).
- 4. Configuração da Fonte.** Selecionar a opção “Sinal Genérico” para iniciar a configuração, logo em seguida escolher o perfil harmônico de estudo.
- 5. Medições no lado de média tensão ( $Y$ , 57 V).** Medir  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  e correntes de fase com garras nos condutores correspondentes. Registrar DHT e histograma de harmônicos.
- 6. Medições no lado de alta tensão ( $Y$ , 380 V) com carga resistiva em  $Y$ .** Medir tensões e correntes de fase na entrada da carga. Registrar o perfil harmônico completo e os indicadores agregados nas mesmas condições de janela.

7. **Observação do perfil harmônico.** Em todas as aquisições, registrar o espectro por ordem identificando os de tripla ordem.
8. **Verificação térmica (quando aplicável).** Realizar varreduras com câmera térmica (Figura 23) em terminais, ligadores e regiões próximas ao enrolamento em  $\Delta$ . Caso se observem pontos quentes anormais, interromper o ensaio e inspecionar conexões.

Figura 22 – Qualímetro.



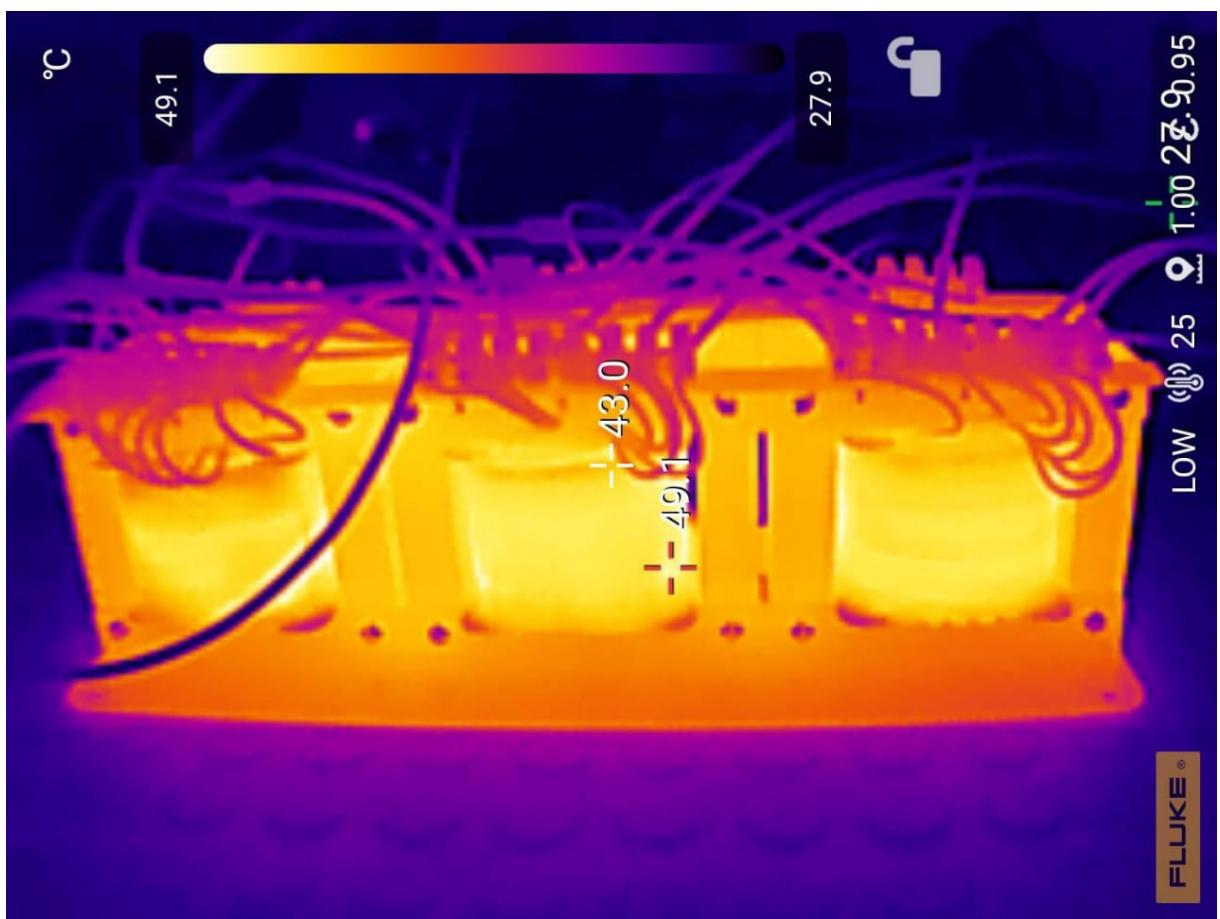
Fonte : próprio autor.

Figura 23 – Câmera térmica.



Fonte : próprio autor.

Figura 24 – Verificação térmica do transformador em operação.

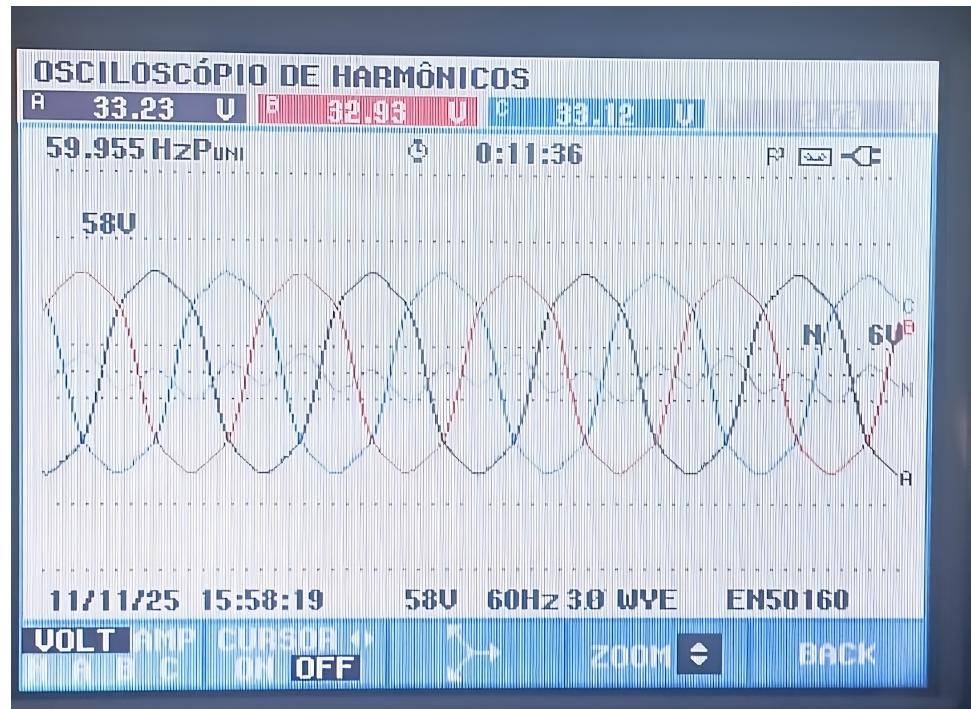


Próprio autor.

#### 4.3.2 Resultados

A análise experimental inicia-se pela avaliação das formas de onda de tensão da fonte (entrada) e da saída do transformador, apresentadas nas Figura 25 e Figura 26, respectivamente.

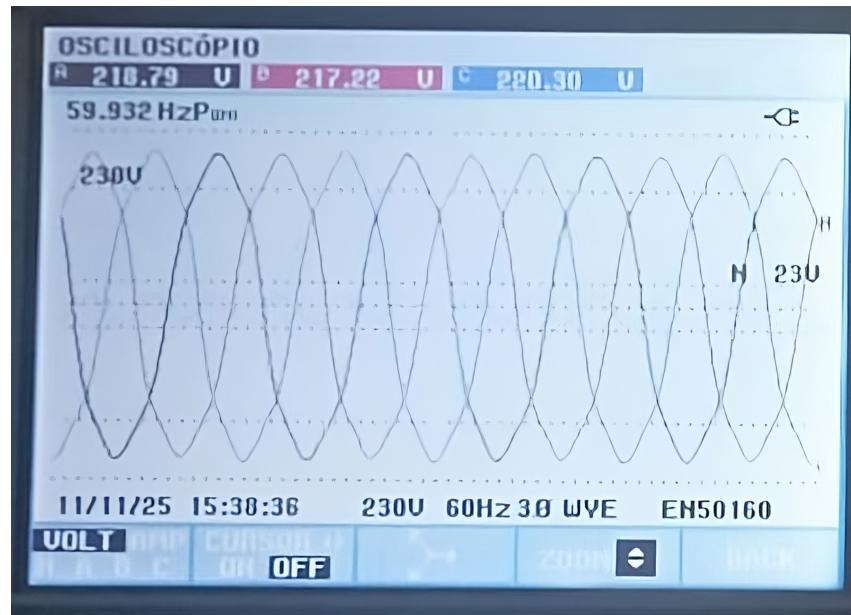
Figura 25 – Medição de tensão na fonte.



Fonte: próprio autor.

Conforme visto na Figura 25, a tensão da fonte apresenta uma distorção significativa. A onda exibe uma característica elevação do pico.

Figura 26 – Medição de tensão no lado de alta do transformador.



Fonte : próprio autor.

Ao observar a Figura 26, nota-se que, após a atuação da solução proposta, a forma de onda de saída ainda retém a mesma característica. Uma observação importante é a alteração do transformador no perfil de tensão, na Figura 27 oberserva-se os índices de THD% da fonte em vázio onde podemos observar que na fonte encontra-se um desequilíbrio e o maior índice encontrado foi na fase B, de 11,1%. Ao conectarmos o transformador à fonte (Figura 28), temos uma queda nos índices e o maior se encontra na fase A, 9,3%. Sendo assim, apesar da configuração correta da fonte, existem algumas pertubações típicas de ensaios práticos.

Figura 27 – Medição de DTT na fonte em vazio.

TABELA DE HARMÔNICOS				
PUNI	A	B	C	N
Volt	A	B	C	N
THD%f	10.8	11.1	10.9	154.8
Volt	A	B	C	N
DC%f	0.8	0.6	0.6	10.0
Volt	A	B	C	N
H1%f	100.0	100.0	100.0	100.0
Volt	A	B	C	N
H2%f	0.1	0.1	0.1	1.0

11/11/25 15:52:03 58U 60Hz 3Ø WYE EN50160

UP DOWN HARMONIC GRAPH TREND EVENTS STOP START

Fonte : próprio autor.

Figura 28 – Medição de DTT na fonte conectada ao transformador.

TABELA DE HARMÔNICOS				
PUNI	A	B	C	N
Volt	A	B	C	N
THD%f	9.3	9.1	8.7	124.3
Volt	A	B	C	N
DC%f	0.5	0.3	0.4	5.0
Volt	A	B	C	N
H1%f	100.0	100.0	100.0	100.0
Volt	A	B	C	N
H2%f	0.2	0.2	0.2	1.0

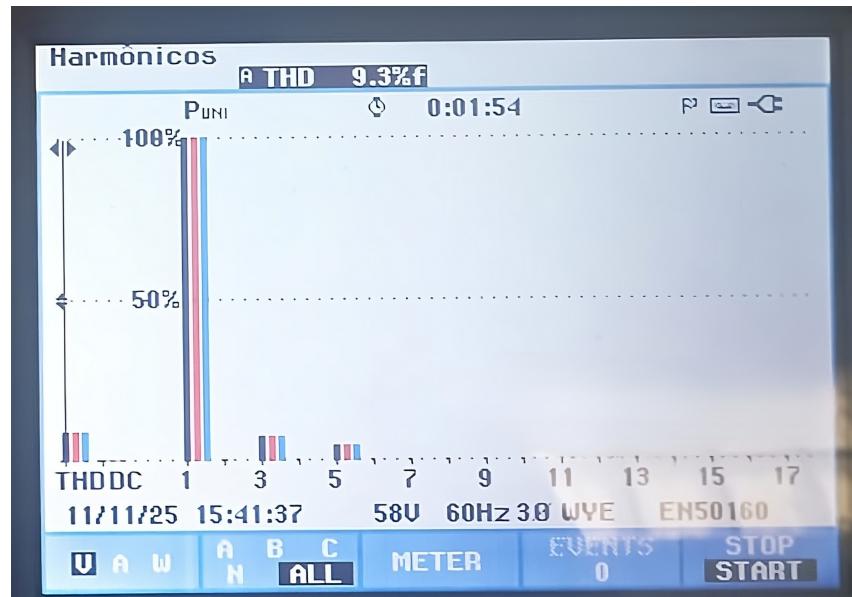
11/11/25 15:48:15 58U 60Hz 3Ø WYE EN50160

UP DOWN HARMONIC GRAPH TREND EVENTS STOP START

Fonte : próprio autor.

O efeito das ligações prevê uma diminuição no THD ao comparar a entrada e saída do transformador. Esta observação é quantificada pela análise no domínio da frequência, detalhada nos histogramas de entrada (Figura 29) e saída (Figura 30).

Figura 29 – Histrograma de hamônicos de tensão na fonte.



Fonte : próprio autor.

Figura 30 – Histrograma de hamônicos de tensão no lado de Alta.



Fonte : próprio autor.

O espectro de entrada (Figura 29) confirma a poluição do sinal, resultando em uma DHT de 9,3%. O espectro de saída (Figura 30) comprova a atuação do sistema, que reduziu a DHT para 7,7%.

Embora uma redução de 1,6 pontos percentuais tenha sido alcançada, a análise conjunta das formas de onda e dos espectros indica que o transformador possui um efeito eficaz em atenuar a 3<sup>a</sup> componente.

#### 4.4 Análise Comparativa dos Resultados

A Tabela 7 consolida os resultados obtidos tanto no ambiente de simulação quanto na bancada experimental. Esta comparação é fundamental para validar o modelo computacional e, principalmente, para avaliar a eficácia real da solução proposta sob condições de operação não ideais.

Tabela 7 – DTT(%) simulado e prático na entrada e na saída.

	Simulado		Prático				
			Em vázio				
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	
DTT(%)	11,25	7,40	11,10	X	9,30	7,70	

A análise dos dados da Tabela 7 permite extrair as seguintes conclusões:

Em simulação, o sistema demonstrou uma capacidade de atenuação significativa, reduzindo a DTT de 11,25% para 7,40%. Isso representa uma redução de 3,85 pontos percentuais, validando o método de controle em um ambiente ideal.

Na implementação física, a DTT foi reduzida de 11,10% para 7,70%, uma alteração de 3,4 pontos percentuais. Embora existam diferenças nos ambiente prático e simulado, é confirmada da eficiência do transformador para esse tipo de cenário.

Apesar da sutil diferença, elas podem ser explicadas, o modelo de simulação criado não considera algumas as características físicas das fonte, como uma resistência interna que altera o perfil de tensão junto as características do transformador, onde não foram realizados os ensaios de circuito aberto e curto-circuito para dimensionar seus parâmetros. Estes são alguns dos fatores que influenciam diretamente o resultado e explicam essa diferença.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo avaliar a capacidade de um transformador de atuar sobre distorções harmônicas. A realização do projeto, envolvendo tanto a modelagem e simulação computacional quanto a implementação de ensaios práticos, foi concluída com êxito.

Os resultados obtidos são considerados satisfatórios e atingem os objetivos propostos. A análise comparativa permitiu validar o modelo teórico e, principalmente, comprovar a funcionalidade da solução em um cenário real.

Destaca-se que, no ensaio prático, foi provada a eficácia do transformador na atenuação no terceiro harmônico. Esta eficácia é quantificada pela redução da DTT de 11,10% na entrada, com a fonte em vázio, para 7,70% na saída. Embora a forma de onda de saída ainda retenha alguma distorção, a redução numérica comprova a mitigação.

Por fim, a partir das análises realizadas e dos desafios encontrados na implementação prática, são propostas as seguintes diretrizes para trabalhos futuros: A realização de ensaios exaustivos para a parametrização do transformador. Um modelo mais acurado, que inclua efeitos de saturação e perdas no núcleo, poderá explicar o desempenho entre o simulado e o prático e permitir ajustes mais finos no projeto.

A aplicação de um perfil harmônico de maior magnitude e complexidade. Isso permitirá testar a robustez e o limite de operação da solução em condições ainda mais severas.

Conclui-se, portanto, que a solução proposta é viável e seus fundamentos teóricos foram compatíveis com a prática, servindo como base sólida para futuras otimizações.

## REFERÊNCIAS

- [1] BOSE, B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.
- [2] DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [3] ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R.; CHEN, S. *Power System Quality Assessment*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000.
- [4] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. [S.l.], 2014. 17 p. **IEEE Std 519-2014**.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília: [s.n.], 2021. Disponível em :<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 29 set. 2025.
- [6] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Standard, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto*. Geneva, Switzerland, 2017. Harmonics and interharmonics measurement guidance.
- [7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Standard, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. Geneva, Switzerland, 2021. Power quality measurement methods.
- [8] CHAPMAN, D. *Guia de Aplicação de Qualidade de Energia: Harmônicas – Causas e Efeitos*. São Paulo; Brussels; St Albans: Instituto Brasileiro do Cobre (PROCobre); European Copper Institute; Copper Development Association, 2002.

- [9] ELECTRONICS-TUTORIALS.WS. *Harmonics and Harmonic Frequency in AC Circuits*. 2025. Acesso em: 12 out. 2025. Disponível em : <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuitsharmonics.html>.
- [10] CLINKER, R. C. Harmonic voltages and currents in y- and delta-connected transformers. *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 33, n. 5, p. 785–789, 1914.
- [11] BOLLEN, M. H. J.; HASSAN, F. *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011. ISBN 9780470643372.
- [12] GLOVER, J. D. D.; SARMA, M. S. *Power System Analysis and Design*. 3rd. ed. USA: Brooks/Cole Publishing Co., 2001. ISBN 0534953670.
- [13] STEVENSON WILLIAM D., J. *Elements of Power System Analysis*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1981. 436 p.
- [14] FITZGERALD, K. *Máquinas Elétricas*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- [15] KINDERMANN, G. *Curto-circuito*. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.
- [16] SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2013.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A - MODELAGEM DO TRANSFORMADOR NO CARTÃO ATP

```

4ENR04CENR04A
5ENR05CENR05A
C
C -----
C Adicao de capacitancias parasitas dos enrolamentos delta 1.131 microMho:
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
    ENR04A           1.131
    ENR04B           1.131
    ENR04C           1.131
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
    ENR05A           1.131
    ENR05B           1.131
    ENR05C           1.131
C -----
/SWITCH
C (-BUS1(-BUS2(--TCLOSE(---TOPEN(-IEPSILON(---VFLASH(-----WORD
C Disjuntor da LT XXXX - XXXX (CX) em XXXX:
    ENR02AFONT1A   -1.      1000.          1
    ENR02BFONT1B   -1.      1000.          1
    ENR02CFONT1C   -1.      1000.          1
C (-BUS1(-BUS2(--TCLOSE(---TOPEN(-IEPSILON(---VFLASH(-----WORD
C Disjuntor da LT XXXX - XXXX (CX) em XXXX:
    ENR03AFONT2A   -1.      1000.          1
    ENR03BFONT2B   -1.      1000.          1
    ENR03CFONT2C   -1.      1000.          1
C
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
C -----Harmonicos no enrolamento (2) Y -----
C -----FASE A-----//
14FONT1A 46.5        60.      0.          -1.      1.E3
14FONT1A 4.7         180.     0.          -1.      1.E3
14FONT1A 2.3         300.     0.          -1.      1.E3
C -----FASE B-----//
14FONT1B 46.5        60.     -120.        -1.      1.E3
14FONT1B 4.7         180.     -360.        -1.      1.E3
14FONT1B 2.3         300.     -600.        -1.      1.E3
C -----FASE C-----//

```

14FONT1C	46.5	60.	120.	-1.	1.E3
14FONT1C	4.7	180.	360.	-1.	1.E3
14FONT1C	2.3	300.	600.	-1.	1.E3
C -----Harmonicos no enrolamento (3) Y -----					
C -----FASE A-----//					
14FONT2A	46.5	60.	0.	-1.	1.E3
14FONT2A	4.7	180.	0.	-1.	1.E3
14FONT2A	2.3	300.	0.	-1.	1.E3
C -----FASE B-----//					
14FONT2B	46.5	60.	-120.	-1.	1.E3
14FONT2B	4.7	180.	-360.	-1.	1.E3
14FONT2B	2.3	300.	-600.	-1.	1.E3
C -----FASE C-----//					
14FONT2C	46.5	60.	120.	-1.	1.E3
14FONT2C	4.7	180.	360.	-1.	1.E3
14FONT2C	2.3	300.	600.	-1.	1.E3
/OUTPUT					
ENR01AENR01BENR01C					
ENR02AENR02BENR02C					
ENR03AENR03BENR03C					
ENR04AENR04BENR04C					
ENR05AENR05BENR05C					
FONT1AFONT1BFONT1C					
FONT2AFONT2BFONT2C					
BLANK BRANCH					
BLANK SWITCH					
BLANK SOURCE					
BLANK OUTPUT					
BLANK PLOT					
BEGIN NEW DATA CASE					
BLANK					