



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AMANDA SOUSA GONÇALVES

**MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANÁLISE DAS DISTORÇÕES
HARMÔNICAS EM UM COMPLEXO INDUSTRIAL**

FORTALEZA

2024

AMANDA SOUSA GONÇALVES

MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS
EM UM COMPLEXO INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof^ª. Dra. Raquel Cristina Filiagi
Gregory.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G624m Gonçalves, Amanda Sousa.
Modelagem computacional e análise das distorções harmônicas em um complexo industrial / Amanda Sousa Gonçalves. – 2024.
65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Raquel Cristina Filiagi Gregory.

1. distorção harmônica na indústria. 2. modelagem computacional. 3. qualidade de energia elétrica. I.
Título.

CDD 621.3

AMANDA SOUSA GONÇALVES

MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS
EM UM COMPLEXO INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a . Dra. Raquel Cristina Filiagi
Gregory (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.Sc. Humberto Cunha de Oliveira
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial Rita, Liziane e Andreza, por serem as figuras femininas mais importantes da minha vida.

Ao Eduardo, que mesmo sem saber escrever, me ensinou a contar.

Aos meus colegas de curso, que me ensinaram o significado de companheirismo durante os anos dessa trajetória de formação, em especial Flávia, Letícia, Amanda e Emely.

Aos meus colegas da Seara da Ciência, Gabriel, Igor e Iago, por sempre acreditarem no meu potencial.

Às minhas amigas, Amanda Ellen e Ana Victoria, por toda a torcida.

À Prof^a. Raquel Cristina, por todo o conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof. Raimundo Furtado, por toda a assistência prestada durante a minha formação.

“Manufaturamos realidades.”

(Fernando Pessoa)

RESUMO

A avaliação da qualidade da energia elétrica, especialmente em relação às distorções harmônicas, é essencial para a segurança operacional dos sistemas elétricos. Componentes baseados em eletrônica de potência, comumente utilizados em instalações industriais, aumentam a quantidade de cargas não lineares e, conseqüentemente, as distorções harmônicas nas redes elétricas. Dentre os vários problemas provocados por estes fenômenos, destacam-se as sobrecorrentes em transformadores, sobrecargas em condutores e sobretensões em bancos de capacitores, reduzindo a vida útil dos equipamentos e provocando sobreaquecimento e operação indevida de dispositivos de proteção. Nesse contexto, com base em inspeções termográficas e medições preliminares realizadas em uma instalação industrial localizada no Ceará, foi levantada a hipótese de um problema de distorções harmônicas em um setor desta indústria. Desse modo, o trabalho tem o objetivo de avaliar a penetração harmônica em setor do complexo industrial, através da modelagem do sistema no software MATLAB/Simulink®. Os dados para modelagem foram obtidos a partir das informações dos fabricantes dos equipamentos e a validação do modelo foi realizada por meio da comparação entre as características medidas nas investigações prévias e as simuladas. Os resultados indicaram a presença de elevadas distorções harmônicas de 5ª, 11ª, 13ª e 17ª, com o maior percentual de 14,45% atribuído à 5ª ordem harmônica, cuja magnitude pode ser justificada pela presença de uma ressonância série na mesma ordem.

Palavras-chave: distorção harmônica na indústria, modelagem computacional, qualidade de energia elétrica.

ABSTRACT

The evaluation of power quality, especially regarding harmonic distortions, is essential for the operational safety of electrical systems. Power electronics-based components, commonly used in industrial installations, increase the amount of nonlinear loads and, consequently, harmonic distortions in electrical networks. Among the various problems caused by these phenomena are overcurrents in transformers, overloads in conductors, and overvoltages in capacitor banks, reducing the lifespan of equipment and causing overheating and improper operation of protection devices. In this context, based on thermographic inspections and preliminary measurements carried out in an industrial installation located in Ceará, a hypothesis of harmonic distortion problems in a sector of this industry was raised. Thus, the work aims to evaluate harmonic penetration in a sector of the industrial complex through system modeling in MATLAB/Simulink® software. The data for modeling were obtained from the manufacturers' information of the equipment, and the model validation was carried out by comparing the characteristics measured in previous investigations with the simulated ones. The results indicated the presence of high harmonic distortions of the 5th, 11th, 13th, and 17th orders, with the highest percentage of 14.45% attributed to the 5th harmonic order, whose magnitude can be justified by the presence of a serie resonance at the same order.

Keywords: harmonic distortion in industry, computational modeling, power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Soma de senoides.....	17
Figura 2	– Carga não linear alimentada por tensão puramente senoidal.....	18
Figura 3	– (a) Retificador trifásico de seis pulsos a diodo; (b) Formas de onda de tensão na entrada e na saída; (c) Formas de onda de corrente na saída, nos diodos e na entrada.....	19
Figura 4	– (a) Circuito básico de inversor de frequência (b) Espectro harmônico de corrente com base na velocidade do motor	20
Figura 5	– (a) Retificador trifásico a doze pulsos a SCR; (b) Saída do retificador trifásico	20
Figura 6	– Efeito da distorção harmônica de corrente na vida útil dos transformadores	23
Figura 7	– Filtro série (posicionamento e topologia usual)	31
Figura 8	– Filtro shunt (posicionamento e topologia usual)	31
Figura 9	– (a) Filtro amortecido de primeira ordem; (b) Filtro amortecido de segunda ordem; (c) Filtro amortecido de terceira ordem	32
Figura 10	– Topologias de filtros sintonizados	33
Figura 11	– Diagrama unifilar simplificado do setor de utilidades	36
Figura 12	– Dados de placa dos transformadores TR01 e TR02	36
Figura 13	– Ciclo de compressão de sistemas de ar condicionado	38
Figura 14	– Ar condicionado tipo split	39
Figura 15	– Sistema de refrigeração do tipo expansão indireta	39
Figura 16	– Diferença entre <i>chiller</i> a ar e a água	40
Figura 17	– Compressor parafuso	42
Figura 18	– Componentes de uma bomba centrífuga	43
Figura 19	– Termografia do núcleo do transformador TR02	44
Figura 20	– Tensão eficaz medida no secundário do transformador TR02	45
Figura 21	– Corrente eficaz medida no secundário do transformador TR02	45
Figura 22	– Forma de onda da tensão medida no secundário do transformador TR02 ...	47
Figura 23	– Forma de onda da corrente medida no secundário do transformador TR02	47
Figura 24	– (a) Implementação da rede e dos transformadores no Simulink® (b) Implementação do banco de capacitores no Simulink®	49

Figura 25 – Parâmetros para um motor de indução	50
Figura 26 – Modelo de motor de indução por fase	51
Figura 27 – Modelo para compressores de velocidade constante	51
Figura 28 – Modelo para bombas com inversores	52
Figura 29 – Sistema completo implementado no software MATLAB/Simulink®.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Taxas de distorção de tensão no secundário do TR02 e limites da IEEE.....	57
Gráfico 2 – Taxas de distorção de corrente no secundário do TR02 e limites da IEEE.....	57
Gráfico 3 – Taxas de distorção de tensão no primário do TR02 e limites da IEEE.....	58
Gráfico 4 – Taxas de distorção de C no primário do TR02 e limites da IEEE.	59
Gráfico 5 – Resposta em frequência no primário.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Indicadores de distorção harmônica de acordo com o PRODIST (módulo 8)	24
Tabela 2	– Distribuição harmônica de corrente (exemplo pelo guia ANSI/IEEE C57-110)	26
Tabela 3	– Determinação do fator K	27
Tabela 4	– Limites de distorções harmônicas totais de acordo com PRODIST (módulo 8)	27
Tabela 5	– Limites globais de distorção de tensão de acordo com os Procedimentos de Rede – ONS	28
Tabela 6	– Limites individuais de distorção de tensão de acordo com os Procedimentos de Rede – ONS	28
Tabela 7	– Limites de distorção de tensão para IEEE STD. 519	29
Tabela 8	– Limites de corrente para sistemas de 120V a 69kV para IEEE STD. 519	29
Tabela 9	– Limites de corrente para sistemas de 69kV a 161kV para IEEE STD. 519	29
Tabela 10	– Limites de corrente para sistemas acima de 161kV para IEEE STD. 519	29
Tabela 11	– Valores máximos, médios e mínimos medidos	46
Tabela 12	– Valores médios das parcelas de potência e fator de potência medidos	46
Tabela 13	– Principais cargas da subestação	48
Tabela 14	– Valores médios simulados e medidos no secundário do transformador TR02	54
Tabela 15	– Valor eficaz das distorções harmônicas de tensão e corrente obtidas no primário e secundário dos transformadores	56
Tabela 16	– Análise do fator k	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

QEE	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PRODIST	Qualidade da Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
CAG	Central de Água Gelada
CC	Corrente Contínua
PWM	<i>Pulse With Modulation</i>
IEEE STD	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
IH	<i>Individual Harmonic</i>
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema
CE	Ceará
BAC	Bomba de Água Condensada
BAGP	Bomba de Água Gelada Primária
BAGS	Bomba de Água Gelada Secundária
DTT	Distorção Harmônica Total de Tensão
DIT	Distorção Harmônica Individual de Tensão
DTHT	Distorção de Tensão Harmônica Total
DTHI	Distorção de Tensão Harmônica Individual
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
UL	<i>Underwriter's Laboratories</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca Registrada
%	Porcentagem
h	Ordem harmônica
K	Número inteiro
X_C	Reatância capacitiva
X_L	Reatância indutiva
C	Capacitância
L	Indutância
f	Frequência
h_{max}	Máxima ordem harmônica
V	Volt
A	Ampère
VA	Volt-Ampère
W	Watt
k	Kilo
V_h	Tensão harmônica na ordem h
V_1	Tensão fundamental
I_h	Corrente harmônica na ordem h
I_1	Corrente fundamental
I_L	Corrente máxima demandada
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
h_3	Ordem harmônica múltipla de 3
h_p	Ordem harmônica par
h_i	Ordem harmônica ímpar
Q	Fator de qualidade
f_0	Frequência fundamental
V_n	Tensão nominal
R	Resistência
μ	Micro
Ω	Ohm
pu	Por unidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Organização do trabalho	15
2	HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	17
2.1	Efeitos	22
2.2	Indicadores de conformidade	24
2.3	Limites de conformidade	27
2.4	Mitigação harmônica	30
2.4.1	<i>Filtro série</i>	30
2.4.2	<i>Filtro shunt</i>	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Metodologia	35
3.2	Características do sistema industrial	35
3.3	Registros de campo	44
3.3.1	<i>Registros Termográficos</i>	44
3.3.2	<i>Registros de Medição</i>	45
4	MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO SISTEMA INDUSTRIAL	48
4.1	Modelagem computacional	48
4.1.1	<i>Validação do modelo proposto</i>	53
4.2	Análise das distorções harmônicas no sistema industrial	55
5	CONCLUSÕES	61
5.1	Trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo Dugan et al. (2002), um problema de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é definido por “qualquer problema de energia manifestado em desvios de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou mau funcionamento do equipamento”. Nesse sentido, níveis inadequados das grandezas elétricas devem ser encarados como uma problemática a ser analisada e solucionada.

Um dos elementos fundamentais, no tocante a avaliação da qualidade da energia elétrica, consiste na análise das distorções harmônicas. De acordo com o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2021), “as distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”.

É frequente o uso de equipamentos que geram harmônicos em instalações industriais. O uso de componentes eletrônicos, como retificadores a diodo, a Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors (MOSFETs) e Silicon Controlled Rectifiers (SCRs) eleva a quantidade de cargas não-lineares nos sistemas e, em consequência, as distorções das grandezas elétricas. De acordo com Nascimento (2007), apesar de proporcionar um controle eficiente do fluxo de energia, o uso de equipamentos baseados na eletrônica de potência produz tensão e/ou correntes harmônicas que acarretam o aumento das perturbações nos sistemas elétricos. Outros componentes, que incorporam materiais ferromagnéticos, também geram componentes harmônicos.

A penetração harmônica nos sistemas elétricos de potência pode provocar diversos problemas, tais como sobrecorrentes em transformadores, sobrecargas em condutores de fase e neutro, além de sobretensões em bancos de capacitores. Como consequência, tem-se a redução da vida útil de equipamentos, sobreaquecimento, operação indevida de dispositivos de proteção, entre outros (SILVA, 2021). Diante disso, monitorar e mitigar esses efeitos é essencial para manter a confiabilidade dos sistemas, especialmente em ambientes industriais.

Conforme mencionado, sabe-se que diversas cargas industriais geram distorções harmônicas. Neste trabalho, será realizado um estudo de penetração harmônica em subestação industrial de média tensão, localizada nas proximidades do Complexo Portuário do Pecém, Caucaia-CE. Essa subestação é responsável por alimentar principalmente os componentes de uma Central de Água Gelada (CAG) de um empreendimento industrial, a qual contém cargas com características não-lineares.

1.1 Justificativa

Diante do contexto atual do setor energético, em que são considerados desafios ambientais e otimização dos custos de geração, torna-se crucial maximizar a eficiência e reduzir perdas no sistema, sem comprometer a qualidade da energia. Uma abordagem para alcançar esses resultados envolve o controle dos fluxos de potência ativa, reativa e mitigação harmônica (NASCIMENTO, 2004).

Outro ponto relevante a ser considerado é a necessidade de garantir a preservação da vida útil e o funcionamento dos equipamentos elétricos no contexto industrial, em que quaisquer paradas inesperadas de produção causam prejuízos ao negócio. Conforme afirma Lopez (2013), algumas das consequências de harmônicas são redução de vida útil de motores e de transformadores, danos a bancos de capacitores e sobreaquecimento de componentes do sistema. Nesse contexto, destaca-se ainda mais a necessidade de analisar os níveis de distorções harmônicas em indústrias.

Além disso, pra a indústria em questão, as limitações técnicas do empreendimento não permitem uma completa avaliação harmônica imediata, por meio de uma campanha de medição. Diante disso, optou-se por modelar e avaliar o sistema utilizando ferramentas computacionais, que também serão usadas para a futura prospecção de soluções.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral modelar e analisar as distorções harmônicas em um complexo industrial localizado no estado do Ceará.

Como objetivos específicos, são destacados os seguintes pontos:

- Apresentar os fundamentos das distorções harmônicas no contexto dos Sistemas Elétricos de Potência;
- Modelar computacionalmente o complexo industrial no software MATLAB/Simulink®;
- Validar o modelo utilizando registros de medição de campo;
- Avaliar o perfil das distorções harmônicas no complexo industrial.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos e referências bibliográficas. No capítulo inicial, são apresentados os objetivos, as justificativas e uma visão geral dos tópicos subsequentes.

No capítulo 2, é feita uma introdução às distorções harmônicas no sistema elétrico, abordando a definição dos componentes harmônicos, seus indicadores, causas e efeitos. Também são discutidos os limites estabelecidos pelos principais guias nacionais e internacionais, além de estratégias de mitigação.

No capítulo 3, são discutidos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. São apresentadas as características elétricas e a funcionalidade da planta em questão, detalhando os componentes da subestação de média tensão, suas principais cargas e os dados de campo previamente obtidos.

Logo em seguida, no capítulo 4, é explicado como a modelagem do sistema foi realizada no Simulink®, incluindo a escolha da representação dos componentes. Além disso, é feita a validação do modelo com o uso dos dados obtidos em campo com os dados simulados no ambiente computacional. Os resultados acerca da QEE do sistema também são explorados. Os níveis de distorção harmônica são traçados e comparados com os limites recomendados. Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho e as propostas para futuros estudos.

2 HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

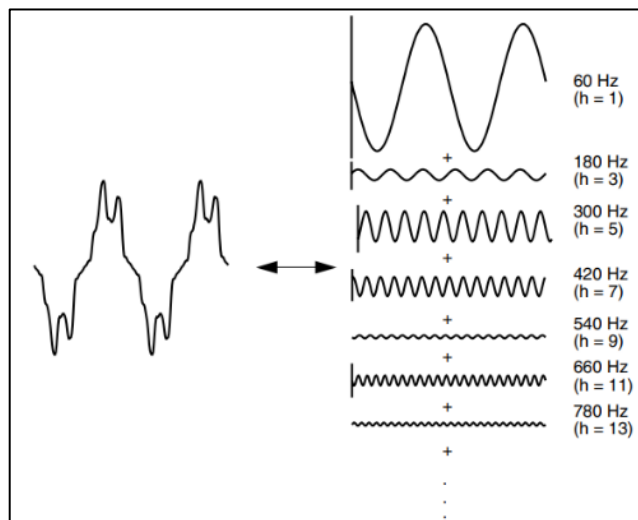
Idealmente, as tensões de suprimento da rede elétrica devem ser equilibradas e senoidais. Entretanto, além das assimetrias, é possível verificar distorções nos sinais de tensão e de corrente na prática. O fenômeno que caracteriza o desvio contínuo das formas de onda das grandezas elétricas é denominado por distorções harmônicas (PAULILO et al., 2013).

É importante diferenciar distorções harmônicas de transientes. Fenômenos transientes são relacionados a mudanças abruptas no sistema de potência, duram por poucos ciclos e suas frequências de oscilação não apresentam, necessariamente, relação com a frequência fundamental (DUGAN *et al.*, 2002). Distorções harmônicas estão associadas à operação de sistemas e cargas em regime permanente.

A forma de onda dos sinais elétricos pode ser representada por senoides. Como aponta Dugan *et al.* (2002), quando uma forma de onda distorcida não varia seu comportamento de um ciclo para o outro, ela pode ser representada como uma soma de senoides puras, em que a frequência de cada uma delas é um múltiplo inteiro (h) da frequência fundamental. A recíproca também se aplica, ou seja, um sinal distorcido pode ser decomposto em múltiplos sinais senoidais através da série trigonométrica de Fourier.

O conceito da soma de senoides pode ser observado na Figura 1. Considerando a frequência da rede elétrica igual a 60 Hz, tem-se, primeiramente, a frequência fundamental ($h = 1$). Na sequência, as demais formas de onda apresentam frequências múltiplas inteiras de 60 Hz e com diferentes amplitudes ($h = 5, 7, 9, 11$ e 13). Do lado esquerdo está o sinal original, resultado desse somatório.

Figura 1 – Soma de senoides.

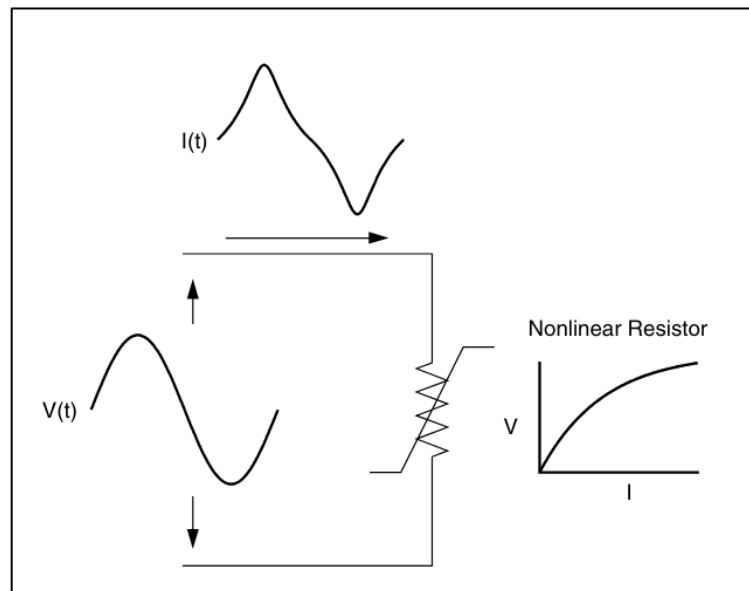


Fonte: Dugan *et al.* (2002)

As distorções harmônicas são causadas por componentes não lineares conectados à rede elétrica (DUGAN et al., 2002). Isso significa que, na maioria das vezes, os problemas das distorções harmônicas estão associados ao uso de equipamentos baseados em eletrônica de potência, como retificadores e inversores. Exemplos de cargas eletrônicas que geram harmônicos são lâmpadas fluorescentes, motores de corrente contínua controlados por retificadores, eletrodomésticos com fontes chaveadas, motores de indução controlados por inversores e cargas de aquecimento controladas por tiristores (LOPEZ, 2013).

Na figura 2, pode-se observar uma tensão senoidal aplicada a um resistor não linear. Nota-se que, na parte superior da ilustração, a forma de onda da corrente não apresenta o mesmo padrão da tensão de suprimento.

Figura 2 – Carga não linear alimentada por tensão puramente senoidal.



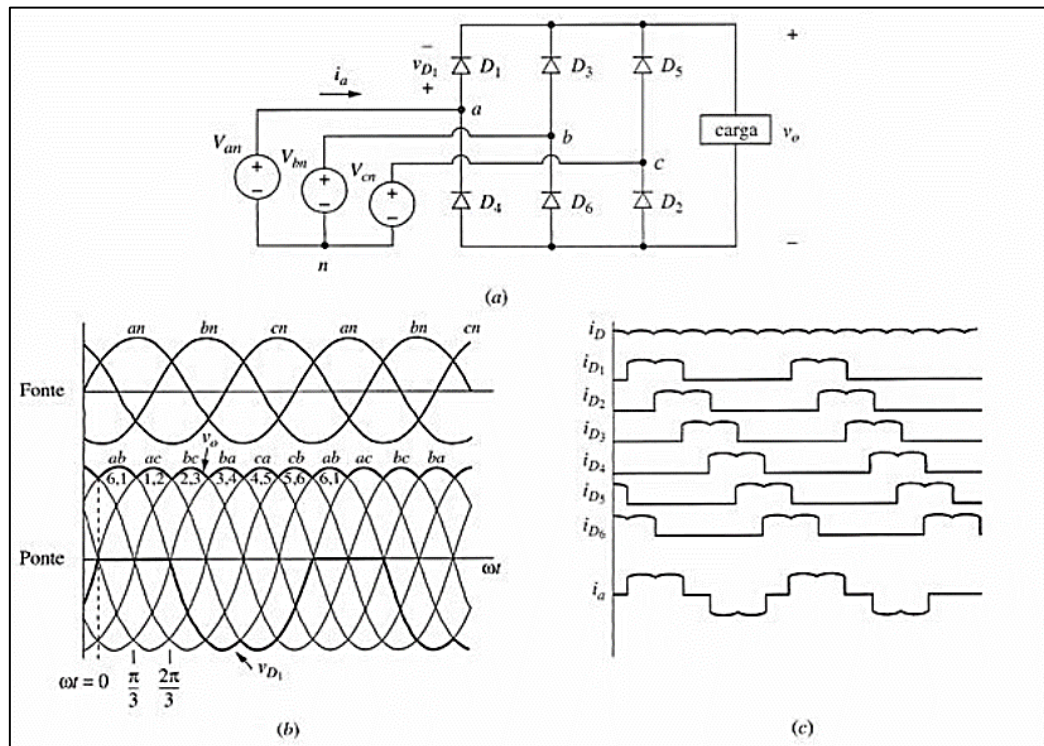
Fonte: Dugan *et al.* (2002)

De acordo com Dugan et al. (2002), há causas e efeitos específicos para distorções harmônicas de corrente e tensão, ao mesmo passo em que há relação entre elas. Por exemplo, enquanto a operação de cargas não lineares provoca o surgimento de distorções harmônicas de corrente, uma vez que sejam propagadas para a rede elétrica, geram quedas de tensão também distorcidas devido a passagem da corrente elétrica pelas impedâncias do sistema.

Entre os componentes que geram distorções harmônicas, destacam-se os conversores estáticos. Dentro dessa classe, podemos citar os retificadores trifásicos de seis pulsos e os de doze pulsos.

Os retificadores trifásicos geralmente são utilizados em complexos industriais para produzir corrente e tensão contínuas para cargas de elevada potência (HART, 2012). Na Figura 3 é apresentado um exemplo de retificador trifásico de seis pulsos a diodo e suas respectivas formas de onda. Retificadores trifásicos de 6 pulsos também podem ser controlados, bastando substituir os diodos por SCRs.

Figura 3 – (a) Retificador trifásico de seis pulsos a diodo; (b) Formas de onda de tensão na entrada e na saída; (c) Formas de onda de corrente na saída, nos diodos e na entrada.

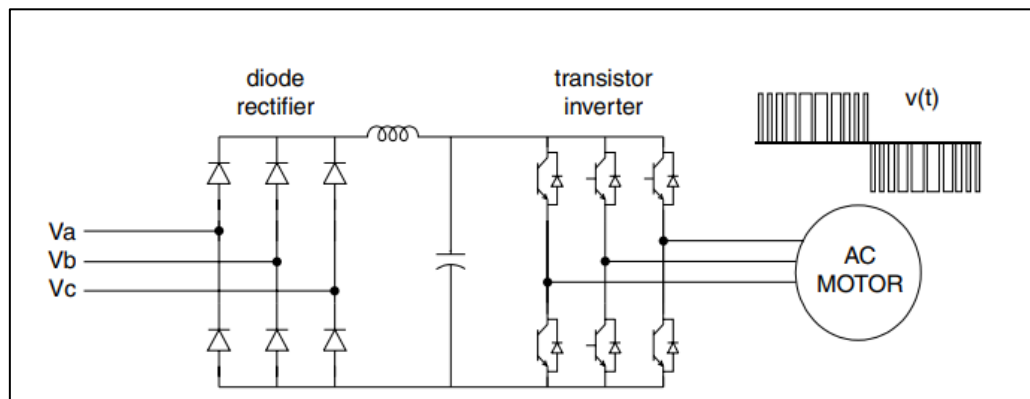


Fonte: Hart (2012).

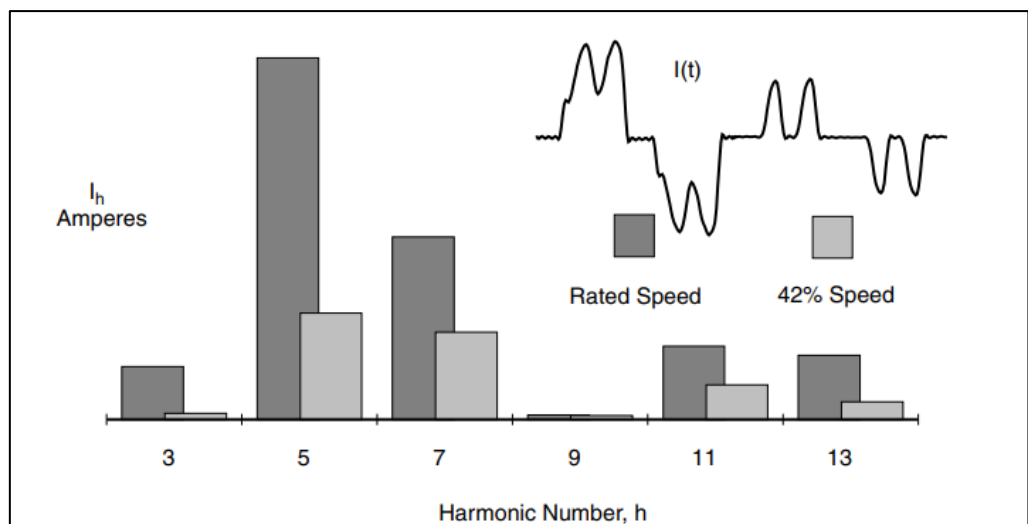
Para esse tipo de conversor, espera-se componentes harmônicos de ordem $6K \pm 1$ do lado alternado, sabendo que K equivale a um inteiro. Para fins de exemplo, supondo $K=1$, tem-se a presença de distorções harmônicas de 5ª e 7ª ordens do lado da rede (TEIXEIRA, 2009).

Uma aplicação de conversores trifásicos de seis pulsos corresponde a inversores de frequência que incorporam a técnica de PWM, do inglês Pulse Width Modulation. Industrialmente, estes inversores são os equipamentos mais utilizados para alimentação de motores que necessitam de controle de velocidade. Na figura 4, é possível observar o esquema básico de seu funcionamento.

Figura 4 – (a) Circuito básico de inversor de frequência (b) Espectro harmônico de corrente com base na velocidade do motor.



(a)

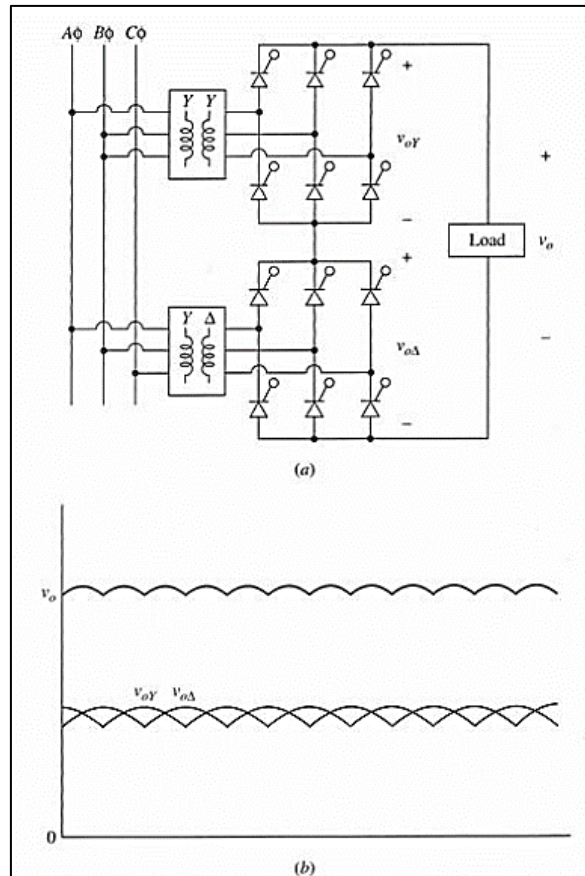


(b)

Fonte: Adaptado de Dugan *et al.* (2002)

Conforme citado anteriormente, outra topologia usual de conversor estático é o retificador trifásico de doze pulsos, indicado na figura 5. Esse arranjo apresenta melhoria considerável no tocante à qualidade da saída em corrente contínua (CC) e redução das distorções de baixa frequência do lado alternado (HART, 2012).

Figura 5 – (a) Retificador trifásico a doze pulsos a SCR; (b) Saída do retificador trifásico.



Fonte: Hart (2012)

Para essa topologia de conversor, espera-se componentes harmônicos de ordem $12K \pm 1$, resultando em distorções nas ordens 11^a, 13^a, 23^a e 25^a, entre outras (TEIXEIRA, 2009).

Vale ressaltar que, de acordo com o guia IEEE STD. 519 (1992), os harmônicos característicos de um conversor estático controlado dependem de impedâncias equilibradas e do disparo uniforme dos tiristores. Se os circuitos de disparo não operarem simetricamente, surgem harmônicos não característicos, a exemplo das distorções múltiplas de 3. Embora geralmente pequenos, esses harmônicos podem ser amplificados devido à ocorrência de ressonâncias entre a rede elétrica e o complexo industrial.

Os motores de indução também são cargas que produzem distorções harmônicas. Isso ocorre por conta do conteúdo harmônico de distribuição espacial da força magnetomotriz. Demais fatores não simétricos, como polos desbalanceados, podem gerar distorções harmônicas (TEIXEIRA, 2009).

Além disso, os transformadores também são cargas que geram distorções harmônicas devido à característica do núcleo ferromagnético. Outros componentes relevantes são os fornos a arco utilizados em indústrias siderúrgicas. Os arcos elétricos, que são descargas elétricas através de um gás ionizado, geram formas de onda não-lineares de corrente e tensão,

resultando em distorções harmônicas nos sistemas elétricos. Essas distorções introduzem componentes harmônicos que podem causar sobreaquecimento, ressonâncias, falhas prematuras de componentes e mau funcionamento de dispositivos sensíveis.

2.1 Efeitos

As cargas do sistema elétrico de potência são afetadas de modo específico, de acordo com suas características e com a intensidade dos efeitos do conteúdo harmônico. Alguns componentes relevantemente sensíveis a harmônicos são transformadores, motores de indução, equipamentos de proteção e capacitores.

Transformadores que são alimentados por fonte de tensão com elevada distorção ou que alimentam cargas que geram componentes harmônicos podem apresentar ruído incomum de funcionamento e/ou sobreaquecimento (BOLLEN, 1999). Os principais efeitos diretos a serem considerados são o aumento das perdas nos núcleos e no cobre.

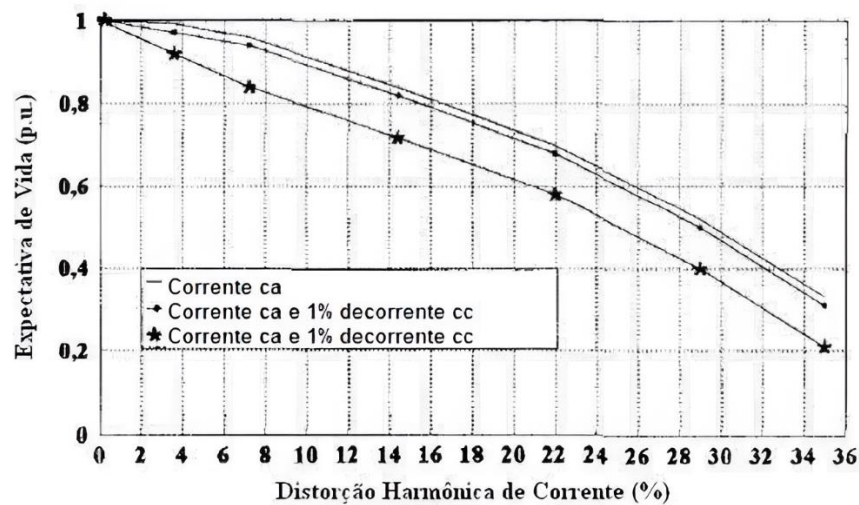
De acordo com as indicações da IEEE STD. 519 (1992), o efeito dos harmônicos nos transformadores é duplo: os harmônicos de corrente causam um aumento nas perdas no cobre enquanto os harmônicos de tensão causam um aumento nas perdas de ferro. O efeito geral é um aumento no aquecimento do transformador, em comparação com a operação puramente senoidal.

As perdas nos enrolamentos dos transformadores aumentam proporcionalmente à distorção harmônica de corrente e também à frequência, por conta do efeito pelicular (PINYOL, 2015), que se trata da tendência da corrente elétrica alternada de percorrer as regiões periféricas de um condutor, em detrimento de seu centro. Quanto maior a frequência, maior o efeito pelicular.

Em geral, o guia IEEE STD. 519 (1992) ressalta que as perdas aumentam com o a frequência e que, portanto, os componentes harmônicos de frequência mais alta são geralmente mais relevantes do que os de frequência mais baixa quanto se trata do aquecimento do transformador.

Ainda nesse contexto, correntes harmônicas no condutor neutro de um transformador na configuração delta-estrela também provocam taxas elevadas de aquecimento (BOLLEN, 1999). Além disso, deve-se atentar quanto à redução da vida útil desses equipamentos de acordo com as distorções da corrente elétrica, conforme se percebe na figura 6.

Figura 6 – Efeito da distorção harmônica de corrente na vida útil dos transformadores.



Fonte: Oraee (2000).

Os efeitos de perda causados nos motores de indução pelos harmônicos são semelhantes aos que ocorrem nos transformadores (BOLLEN, 1999). Nesse caso, a consequência dessas perdas é o aumento de temperatura de funcionamento, tanto no estator quanto no rotor. Além disso, os harmônicos também podem causar ou aumentar fenômenos o rastejamento (deslizamento muito alto) em motores de indução (IEEE STD. 519, 1992).

De acordo com Oraee (2000), a vida útil do isolamento de motores é afetada pelos componentes harmônicos das correntes. Nos resultados, indica-se que ao operar em carga nominal, uma máquina elétrica alimentada com fonte de tensão com distorção harmônica total de tensão de 7,4% apresenta redução de vida útil de isolamento de 24,3%.

O funcionamento de disjuntores e fusíveis também é afetado diante de distorções harmônicas muito elevadas. No caso dos disjuntores, seu disparo termomagnético é determinado pela corrente eficaz. Caso esse sinal esteja muito distorcido, é possível a ocorrência de disparos inadequados ou a necessidade de superestimar tais itens (PINYOL, 2015).

De forma semelhante, para os fusíveis, o efeito de aquecimento é devido à corrente eficaz. Nesse sentido, no caso de presença de muitas cargas não lineares, há necessidade de selecionar cuidadosamente tais componentes (PINYOL, 2015). De acordo com Teixeira (2009), entretanto, atuações inesperadas e inadequadas de dispositivos de proteção só ocorrem mediante taxas de distorção harmônica total de tensão superiores a 15%.

No tocante aos capacitores, a distorções de tensão e corrente também podem provocar diversos efeitos danosos. Sabe-se que a impedância de capacitores é dada a partir da equação (1):

$$|X_C| = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

A reatância dos capacitores diminui com o aumento da frequência, de modo que são componentes que naturalmente filtram harmônicos, absorvendo parte da corrente. Desse modo, os bancos de capacitores são sensíveis à presença de harmônicos.

As principais consequências do conteúdo harmônico de corrente para os capacitores são aquecimento e a perda de vida útil (TEIXEIRA, 2009). Outra preocupação relevante no caso dos bancos de capacitores é a possibilidade de ressonância do sistema. Esse efeito impõe tensões e correntes consideravelmente elevadas (IEEE STD. 519, 1992).

2.2 Indicadores de conformidade

Para a quantificação das distorções harmônicas, podem ser utilizados diversos indicadores, com destaque aos indicadores de Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) e Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIT).

Os indicadores de distorção harmônica de acordo com o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021) são listados na Tabela 1. Além do DIT e do DTT, outros indicadores são considerados, como DTT_p, DTT_i e DTT₃, que expressam a distorção harmônica total para ordens pares, ímpares e múltiplas de três, respectivamente. Os símbolos que apresentam o índice de 95% referem-se aos indicadores apurados aplicando-se o percentil de 95% às amostras coletadas em campanhas de medição.

Tabela 1 – Indicadores de distorção harmônica de acordo com o PRODIST (módulo 8)

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT _h %
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTT _p %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTT _i %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT ₃ %
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTT _p % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT _p 95%
Valor do indicador DTT _i % que foi superado em apenas 5% das	DTT _i 95%

1.008 leituras válidas	
Valor do indicador DTT ₃ % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT ₃ 95%

Fonte: ANEEL, 2021.

Para o cálculo desses indicadores são utilizadas as seguintes equações:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}=\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3)$$

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (4)$$

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (5)$$

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

No submódulo 9.7 dos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS) (2020), os indicadores para distorção harmônica são: Distorção de Tensão Harmônica Individual (DTHI) e Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT). Cabe ressaltar que o DTHI definido nos Procedimentos de Rede é equivalente ao indicador apresentado em (2), enquanto o DTHT é equivalente ao indicador enunciado em (3).

A IEEE STD. 519 (2014) também apresenta indicadores de conformidade. De acordo com a norma, um dos indicadores é a distorção harmônica individual de corrente, aqui definida como *Individual Harmonic* (IH). Esse indicador pode ser obtido a partir de (7), para correntes, e analogamente para tensão.

$$IH(\%) = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

h é a ordem harmônica individual;

I_h é a corrente harmônica de ordem h ;

I_1 é a corrente fundamental.

Além do indicador individual, tem-se o conceito de um indicador global, denominado Total Harmonic Distortion (THD). Este indicador é definido em (8).

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}=50} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (8)$$

Nesse trabalho, para análise dos indicadores de distorção de corrente, utilizaremos sobretudo o indicador IH, da equação (7).

Ainda, no tocante ao efeito de distorções harmônicas nos transformadores de instalações, o guia ANSI/IEEE C57-110 (IEEE, 1986), fornece orientação para o carregamento seguro de transformadores que lidam com correntes de cargas não lineares, prevenindo sobreaquecimentos que possam causar danos aos equipamentos. Por meio de suas diretrizes, é possível determinar a corrente máxima de carga que pode ser continuamente consumida de um transformador, sob condições padrões, a depender da distorção harmônica local.

De acordo com Basciano (2023), a maioria dos fabricantes de transformadores utiliza a Underwriter's Laboratories (UL) e/ou a Canadian Standards Association (CSA) para certificar seus produtos, avaliando os projetos de transformadores e os resultados de testes conforme os guias UL 1561.

Um indicador amplamente utilizado na classificação de transformadores se trata do fator k. De acordo com a UL 1561, ele pode ser determinado de acordo com a equação a seguir:

$$Fator K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(pu)^2 h^2 \quad (9)$$

Como forma de exemplificar essa equação, considere uma corrente de 1 pu RMS de magnitude, com a distribuição da tabela a seguir:

Tabela 2 – Distribuição harmônica de corrente (exemplo pelo ANSI/IEEE C57-110)

h	I_h (pu)
1	0.978
5	0.171
7	0.108
11	0.044
13	0.02
17	0.015
19	0.0098

Fonte: IEEE, 1986

Logo adiante, de acordo com o observado na tabela 3, pode-se observar que o fator k determinado é de 2.726.

Tabela 3 – Determinação do fator k.

h	I_h (pu)	I_h (pu)²	h²	I_h (pu)² h²
1	0.9780	0.95700	1	0.957
5	0.1710	0.02900	25	0.731

7	0.1080	0.01200	49	0.571
11	0.0440	0.00200	121	0.234
13	0.0280	0.00078	169	0.133
17	0.0150	0.00023	289	0.065
19	0.0098	0.00010	361	0.035
Σ		1.00		2.726

Fonte: Adaptado de IEEE (1986).

Portanto, um ponto crucial na instalação de transformadores para alimentar cargas com características não lineares é o uso do indicador fator k. Este fator determina a capacidade do transformador de suportar cargas que geram altas correntes harmônicas, prevenindo problemas de superaquecimento. Via de regra, o fator k de transformadores de potência é igual a 1,0.

2.3 Limites de conformidade

Os limites e recomendações para indicadores de distorção harmônica são estabelecidos por meio de normas e/ou padrões nacionais e internacionais. Aqui, serão observados os limites indicados pelo Módulo 8 do PRODIST de 2021, os Procedimentos de Rede do ONS de 2020 e o Guia IEEE STD 519 DE 2014.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST (2021), os limites para as distorções harmônicas totais estão indicados na Tabela 4, com base na tensão nominal V_n . Esses valores são referentes ao sistema de distribuição.

Tabela 4 – Limites de distorções harmônicas totais de acordo com PRODIST (módulo 8)

Indicador	Tensão nominal (V_n)		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,00%	8,00%	5,00%
DTT_p95%	2,50%	2,00%	1,00%
DTT_i95%	7,50%	6,00%	4,00%
DTT₃95%	6,50%	5,00%	3,00%

Fonte: ANEEL (2021)

De acordo com o submódulo 2.9 nos Procedimentos de Rede (ONS, 2022), são considerados os limites das tabelas 5 e 6. Esses indicadores são utilizados como requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à rede básica.

Tabela 5 – Limites globais de distorção de tensão de acordo com os Procedimentos de Rede – ONS

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Fonte: ONS (2022)

Tabela 6 – Limites individuais de distorção de tensão de acordo com os Procedimentos de Rede – ONS

13,8kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 Kv			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25	2%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

Fonte: ONS (2022)

Quanto ao Guia IEEE STD 519 (2014), destacam-se os limites de distorção de tensão, expostos na tabela 7, de acordo com o nível de tensão no ponto de acoplamento. Os limites de distorção de corrente para diferentes níveis de tensão são também apresentados nas tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 7 – Limites de distorção de tensão para IEEE STD. 519.

Tensão do barramento no PCC	Harmônica individual (%)	Distorção harmônica total THD (%)
$V \leq 1\text{kV}$	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

Fonte: Adaptado de IEEE (2014)

Tabela 8 – Limites de corrente para sistemas de 120V a 69kV para IEEE STD. 519.

Máxima distorção de corrente em percentual de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
ISC/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: IEEE (2014)

Tabela 9 – Limites de corrente para sistemas de 69kV a 161kV para IEEE STD. 519.

Máxima distorção de corrente em percentual de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
ISC/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.0	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Fonte: Adaptado de IEEE (2014).

Tabela 10 – Limites de corrente para sistemas acima de 161kV para IEEE STD. 519.

Máxima distorção de corrente em percentual de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
ISC/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 25	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25 < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5

≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
-----------	-----	-----	------	------	------	------

Fonte: Adaptado de IEEE (2014).

Nas tabelas 8, 9 e 10, I_{sc} e I_L indicam, respectivamente, máxima corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento e máxima corrente demandada (frequência fundamental).

2.4 Mitigação harmônica

Nos tópicos anteriores, foram explicados os efeitos, as causas e como caracterizar as distorções harmônicas. Nesse tópico, será abordada uma forma amplamente utilizada de mitigação desse efeito. Os filtros de harmônicos são aplicados para eliminar ou reduzir os níveis de distorções harmônicas nos sistemas elétricos.

Os filtros de harmônicos são instalados no sistema para absorver os harmônicos de corrente, oferecendo um caminho de baixa impedância e, assim, reduzindo a amplitude de determinadas frequências de correntes e tensões harmônicas. Esses filtros também podem compensar a energia reativa do sistema, melhorando o fator de potência da planta. Os filtros frequentemente utilizam bancos de capacitores, que também são usados para a correção do fator de potência, ajudando a minimizar os investimentos necessários (TEIXEIRA, 2009).

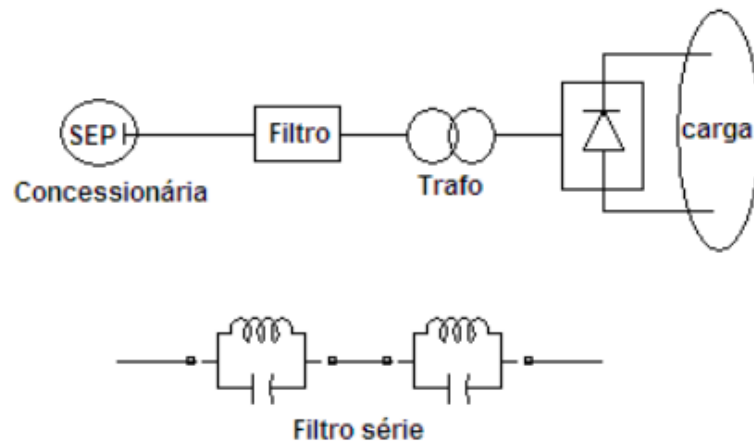
Nesse trabalho, são apresentadas as particularidades dos filtros passivos, ou seja, aqueles compostos apenas por resistores, capacitores e indutores.

2.4.1 Filtro série

O filtro série funciona como um circuito de bloqueio para uma frequência específica ou uma faixa de frequências. Ele é composto por uma indutância e uma capacitância em paralelo, atuando de maneira semelhante a uma bobina de bloqueio. Esta solução, no entanto, é cara e raramente utilizada, principalmente devido ao fato de ter que transportar toda a corrente do sistema (CUNHA, 2019)

O posicionamento de um filtro série pode ser visto na figura 7.

Figura 7 – Filtro série (posicionamento e topologia usual)



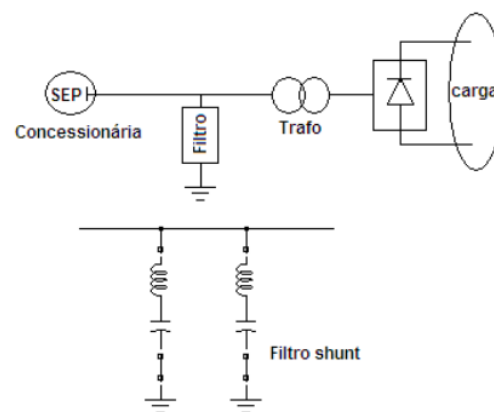
Fonte: Teixeira (2009)

2.4.2 Filtro shunt

O filtro paralelo, também conhecido como filtro shunt, é uma solução comum para impedir que as correntes harmônicas entrem em determinadas partes do sistema. Ele fornece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas específicas, evitando assim que elas se propaguem para outras áreas do sistema (CUNHA, 2019).

Em geral, o filtro shunt é projetado para lidar apenas com a corrente harmônica para a qual foi ajustado. Por isso, o filtro shunt é mais econômico em comparação com um filtro série de eficiência equivalente. Além disso, uma vantagem adicional dos filtros shunt de corrente alternada sobre os filtros série é que, na frequência fundamental, eles fornecem a potência reativa necessária para a correção do fator de potência. Na figura 8, pode-se observar o posicionamento e topologia usual desse tipo de filtro.

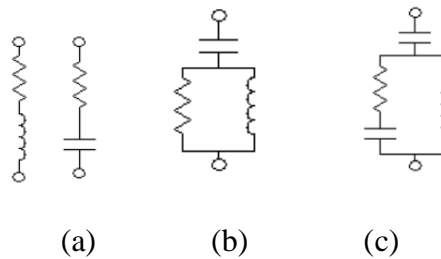
Figura 8 – Filtro *shunt* (posicionamento e topologia usual).



Fonte: Teixeira (2009).

De acordo com Teixeira (2009), os filtros *shunt* podem ser divididos em filtro sintonizado e filtro amortecido. O filtro amortecido, ou filtro de baixo fator de qualidade (Q), quando conectado em paralelo, oferece baixa impedância em uma ampla gama de frequências. Portanto, como aponta Oliveira (2015), os filtros amortecidos “caracterizam-se por possuírem baixa impedância para frequências maiores que a frequência de corte”. Suas topologias usuais podem ser observadas na figura 9.

Figura 9 – (a) Filtro amortecido de primeira ordem; (b) Filtro amortecido de segunda ordem; (c) Filtro amortecido de terceira ordem.


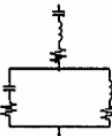
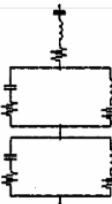



Fonte: Adaptado de Oliveira (2015)

Em contraste, o filtro sintonizado, ou filtro de alto fator de qualidade, é ajustado para uma dada frequência de sintonia, geralmente visando atuar sobre uma ou duas frequências harmônicas, como a 5ª e a 7ª.

Os filtros de sintonia simples são amplamente utilizados no mercado. Sua principal característica é funcionar como filtros passa-faixa, apresentando impedância mínima na frequência de ressonância. Isso permite uma filtragem eficiente em uma faixa estreita de frequências, tornando-os ideais para a eliminação de harmônicos de maiores amplitudes, que geralmente são de baixa ordem (CUNHA, 2019). Na figura 10, são apresentados alguns tipos de filtro passivos sintonizados.

Figura 10 – Topologias de filtros sintonizados.

		Tipos	Circuito por fase
S I N T O N I Z A D O S		Uma frequência	
		Duas frequências	
		Três frequências	
		Uma frequência (modificado)	

Fonte: Resende ([s.d])

O fator de qualidade de um filtro (Q) é a medida do seu grau de captura com precisão das frequências harmônicas. Pode-se considerar que o fator de qualidade, ou fator Q , de um filtro sintonizado é um parâmetro que determina a largura da faixa de sintonia do filtro. Ele é definido como a relação entre a reatância indutiva (ou capacitiva) na ressonância e a resistência. Ou seja, o fator Q mede o desempenho do filtro em termos de sua seletividade e capacidade de sintonizar uma faixa estreita de frequências. Filtros com alto fator Q têm uma faixa de sintonia estreita e são altamente seletivos, enquanto filtros com baixo fator Q têm uma faixa de sintonia mais abrangente e são menos seletivos.

Para exemplificação, se considerarmos o primeiro filtro da figura 10, o fator de qualidade pode ser expresso por:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (9)$$

Quanto ao fator de dessintonia, de acordo com Teixeira (2009), trata-se um parâmetro utilizado para avaliar o grau de desvio de um filtro em relação à frequência harmônica para a qual ele foi projetado para suprimir. Esse fator mede quanto o filtro pode operar fora da frequência nominal sintonizada. Na prática, várias influências podem causar dessintonia. Primeiramente, variações na frequência fundamental da fonte podem deslocar as frequências harmônicas na mesma proporção. Além disso, variações na capacitância do

capacitor e na indutância do reator do filtro, causadas pelo envelhecimento e pela temperatura, também contribuem para o desvio. Por fim, a dessintonia pode ocorrer devido a desvios na montagem, resultantes das tolerâncias de fabricação dos reatores e capacitores. Portanto, o fator de dessintonia incorpora todos esses efeitos para determinar a capacidade do filtro de manter sua eficácia mesmo quando operando fora da frequência sintonizada originalmente.

De modo geral, o fator de dessintonia utilizado ao projetar filtros visa a compensação de variações na frequência do circuito.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

A metodologia deste trabalho foi organizada em etapas que visam ao desenvolvimento de uma modelagem aderente e sua validação. Inicialmente, foram coletados e analisados os materiais disponíveis, isto é, os dados de placa dos componentes, suas características básicas e registros de campo. Esses dados fornecem informações detalhadas sobre o funcionamento do sistema. Com base nesses materiais, foi feita a caracterização individual de cada componente do sistema analisado. Em seguida, cada componente foi modelado utilizando o *Simulink*®, a fim de que o modelo computacional refletisse as características reais dos elementos analisados. Componentes com características semelhantes foram agrupados para facilitar a análise e reduzir o esforço computacional.

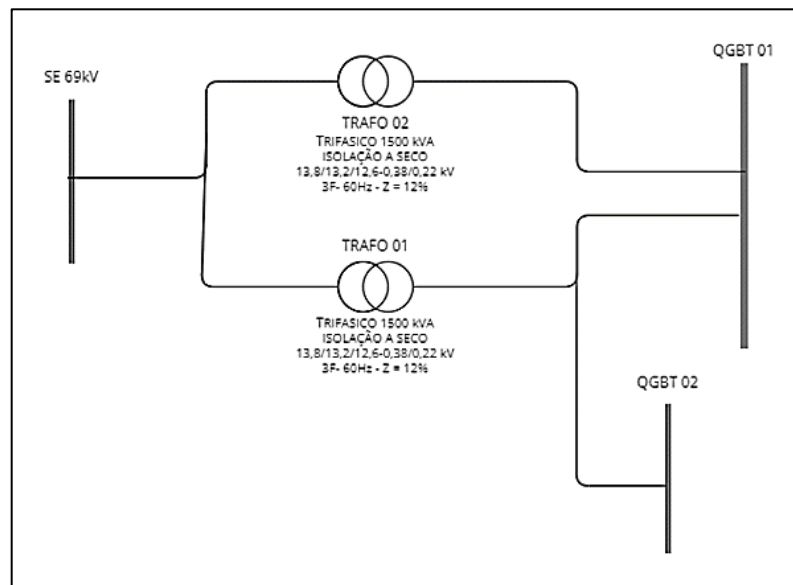
A validação do modelo foi realizada por meio da comparação entre os resultados das simulações e os registros de campo, que incluem medidas de potência ativa, reativa, aparente, fator de potência, tensão e corrente. Essa comparação é fundamental para verificar a aderência do modelo desenvolvido. Após a validação, foram extraídos resultados referentes à distorção harmônica presente no sistema, os quais são analisados com o objetivo de propor soluções adequadas para mitigar os efeitos dessas distorções. Essa abordagem metodológica garante que o modelo não apenas represente suficientemente o sistema real, mas também forneça uma ferramenta valiosa para análises.

3.2 Características do sistema industrial

Os estudos realizados neste trabalho são direcionados ao setor de utilidades de uma indústria de grande porte, localizada na região nordeste do Brasil, nas proximidades do Complexo Portuário do Pecém, no estado do Ceará. O complexo industrial é alimentado por uma rede de subtransmissão, em 69 kV, sob responsabilidade da concessionária de distribuição de energia local. A subestação de entrada da indústria é composta por transformadores de 69 kV/13,8 kV que totalizam uma potência de 18,75 MVA, a qual é destinada ao suprimento de diferentes setores desta indústria.

O setor de utilidades corresponde 16% da potência nominal da indústria, o qual consiste em uma subestação intermediária com dois transformadores a seco de 13,8 kV/0,38 kV, com potência de 1500 kVA cada, totalizando 3000 kVA de capacidade. A Figura 11 apresenta o diagrama unifilar simplificado da subestação em questão.

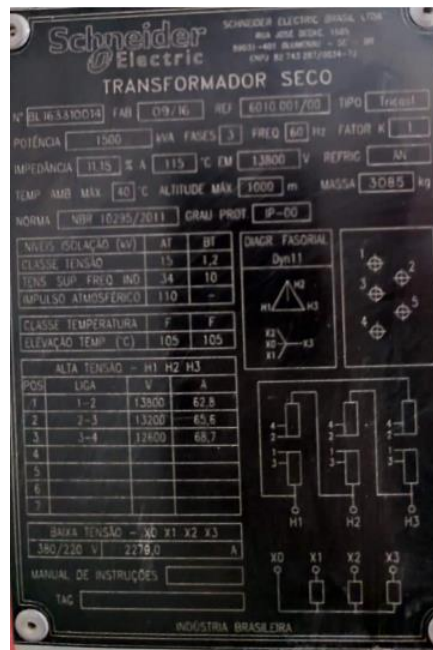
Figura 11 – Diagrama unifilar simplificado do setor de utilidades.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 12 apresenta os dados de placa dos transformadores a seco TR01 e TR02.

Figura 12 – Dados de placa dos transformadores TR01 e TR02.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É oportuno salientar que, para este estudo, o setor de utilidades foi escolhido devido ao aumento de temperatura e ruído nos transformadores da subestação, a qual supre cargas com características não-lineares através dos alimentadores QGBT 01 e QGBT 02. Este fato levantou a hipótese da presença de distorções harmônicas no local. Adicionalmente, existem previsões para a modificações nos equipamentos do setor, sendo fundamental a avaliação da penetração harmônica para fins de determinação da capacidade de hospedagem remanescente em termos das distorções.

Outro fato relevante se trata da característica dos transformadores do setor de utilidades, visto que se tratam de transformadores a seco. Transformadores a óleo e a seco apresentam diferenças significativas em termos de construção, eficiência e aplicações. Os transformadores a óleo, como o nome sugere, utilizam óleo isolante para resfriamento e isolamento. Este tipo de transformador é geralmente mais eficiente que os transformadores a seco, especialmente em potências mais elevadas, devido à melhor capacidade do óleo em dissipar calor e suportar sobrecargas. Nesse sentido, óleo também proporciona uma vida útil mais longa ao transformador, geralmente entre 25 e 35 anos, enquanto os transformadores a seco têm uma vida útil entre 15 e 25 anos (ZANINI, 2016).

Por outro lado, os transformadores a seco utilizam o ar como meio de isolamento e resfriamento, tornando-os mais adequados para ambientes onde a segurança contra incêndio é crucial, como em interiores de prédios. Eles são menores e mais leves em comparação com os transformadores a óleo, mas geralmente apresentam maiores perdas de energia e uma menor capacidade de suportar sobrecargas. Nesse sentido, as correntes harmônicas podem potencializar estes efeitos, contribuindo para o sobreaquecimento do equipamento.

A manutenção preventiva dos transformadores a seco é menos complexa, consistindo principalmente de inspeções visuais e limpeza das grelhas e bobinas para evitar acúmulo de poeira e outros materiais inflamáveis. No entanto, eles podem necessitar de desligamento para limpeza, o que pode afetar a operação contínua (ZANINI, 2016).

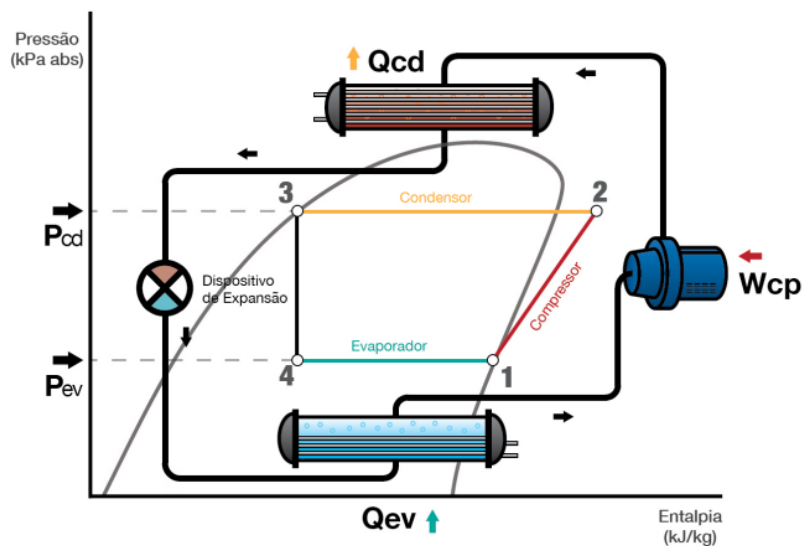
No tocante a característica das cargas alimentadas pelo setor de utilidades, estas se tratam majoritariamente de equipamentos da Central de Água Gelada (CAG) e compressores de ar. As cargas da CAG estão relacionadas à refrigeração dos ambientes industriais enquanto os compressores de ar são utilizados para acionar equipamentos de produção pneumática da indústria.

De acordo com a Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado, o condicionamento de ar consiste em “o processo de tratamento de ar para atender os requisitos de um espaço condicionado por meio do controle de umidade, temperatura,

limpeza e distribuição do ar” (Ministério do Meio Ambiente, 2017). Em diferentes processos industriais, desde a laminação de pás eólica até a produção de alimentos, as variáveis temperatura, umidade e qualidade do ar são relevantes para o bom funcionamento das atividades. Além disso, os sistemas de ar condicionados também são utilizados em grande escala com o objetivo principal de fornecer o conforto térmico dos usuários, como ocorre em shopping centers.

O funcionamento de sistemas de ar condicionado se baseia em um ciclo fechado de quatro etapas, em que há compressão de um fluido refrigerante, conforme a figura 13.

Figura 13 – Ciclo de compressão de sistemas de ar condicionado.



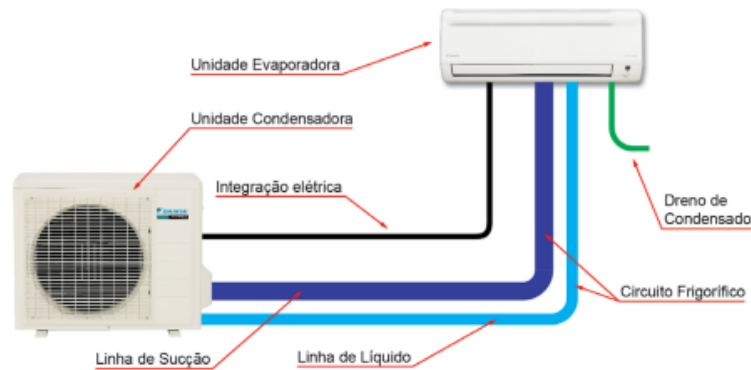
Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2017).

De acordo com o guia prática sobre sistemas de água gelada do Ministério do Meio ambiente (2017), o ciclo da figura 13 pode ser descrito de acordo com o seguinte:

- De 1 a 2: Compressão do fluido refrigerante, de baixa pressão até alta pressão, por meio de um compressor;
- De 2 a 3: Condensação do fluido frigorífico, a alta pressão, através da troca de calor com ar externo ou água;
- De 3 a 4: Expansão do fluido frigorífico, resultando em mistura de vapor e líquido em pressão baixa;
- De 4 a 1: Evaporação do fluido frigorífico por meio da troca de calor que irá resfriar **direta** ou **indiretamente** o ar.

Um sistema de expansão direta é aquele em que o evaporador está diretamente em contato com o ambiente a ser refrigerado (MATOS, [s.d]). É o caso dos condicionadores de ar do tipo split, comumente utilizado em residências ou salas comerciais, conforme identificado na figura 14.

Figura 14 – Ar condicionado tipo *split*.

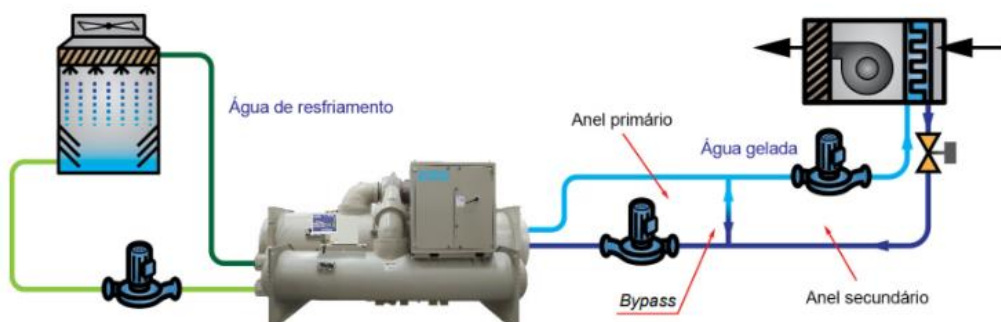


Fonte: Daikin Brasil (2017)

Pode ser inconveniente ou economicamente inviável circular o fluido refrigerante para todas as áreas em que há necessidade de refrigeração em espaços muito amplos. Nesse caso, utiliza-se um agente intermediário, como a água ou salmoura. Esse agente, resfriado, é bombeado por meio de tubulação adequada (com isolamento térmico) até os ambientes em que é necessária a refrigeração e depois retorna para reinício do ciclo (MATOS, [s.d]).

Na figura 15, observa-se que a água é resfriada no equipamento central, um *chiller*, e depois circula para uma serpentina no canto superior direito, onde ocorre troca com o ambiente que deve ser refrigerado. Nesse caso, a água é o agente intermediário.

Figura 15 – Sistema de refrigeração do tipo expansão indireta.

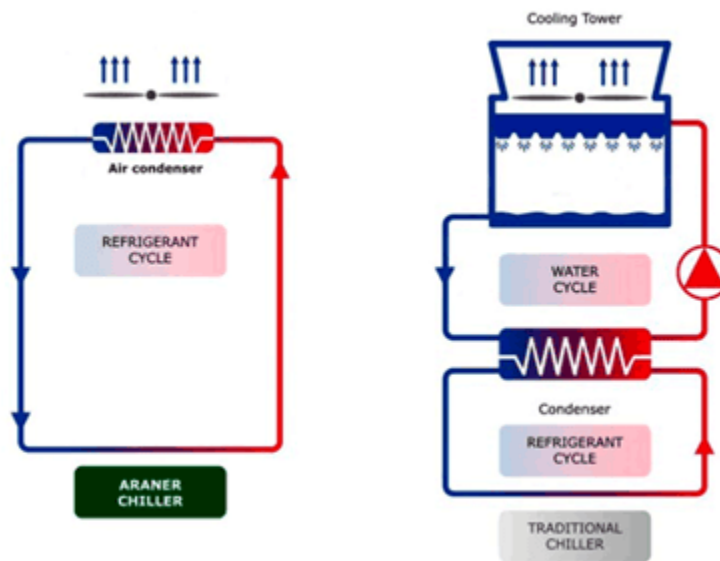


Fonte: Daikin Brasil (2017).

O CAG do setor de utilidades utiliza *chillers*, tanto a ar quanto a água, e bombas centrífugas para movimentação dos fluidos.

Os *chillers* têm o ciclo de refrigeração completo e necessitam apenas de conexões hidráulicas, como circuitos de bombeamento de água e interligação elétrica. Os *chillers* se diferenciam principalmente quanto à forma de rejeito de calor ao ambiente externo, podendo contar com um sistema de condensação a ar ou a água, conforme pode ser observado na figura 16.

Figura 16 – Diferença entre *chiller* a ar e a água.



Fonte: Araner ([s.d]).

Os *chillers* a ar possuem vida útil de 15 a 20 anos, enquanto a vida útil de *chillers* a água está entre 20 a 30 anos. Os *chillers* a água apresentam maior durabilidade em parte porque geralmente são instalados em ambientes internos e operam a pressões mais baixas. *Chillers* a ar são preferidos em locais com escassez de água ou onde este recurso tem custo elevado, pois não requerem uso de água. Em resumo, *chillers* a ar têm menores custos de manutenção, sua instalação é mais simples, além de ter melhor desempenho em temperaturas de congelamento. *Chillers* a água são mais eficientes energeticamente, têm maior capacidade e vida útil mais longa. A escolha ideal depende de uma avaliação abrangente dos objetivos e condições específicas do projeto (WIEMAN, 2019).

Em geral, uso dos *chillers* representam benefícios, entre eles a redução da carga de fluido frigorífico em comparação com o uso de sistemas de expansão direta e maior controle do processo de refrigeração (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017).

Os componentes do *chiller* são basicamente compressores, condensador, evaporador, válvula de expansão, painel de potência e unidade de controle. O principal item da estrutura é o compressor, que cria uma diferença de pressão para mover o refrigerante pelo sistema e demanda grande potência da rede elétrica. Existem vários tipos de compressores de refrigerante, sendo os mais comuns os centrífugos, de parafuso, scroll e alternativos (EVANS, 2017).

De acordo com Oliveira (2020), compressores podem ser classificados em três tipos, de acordo com o fechamento da estrutura: herméticos, semi-herméticos e abertos. Na configuração hermética, o motor elétrico é instalado junto ao compressor em uma câmara selada, tornando o interior inacessível e impossibilitando a manutenção do equipamento. A principal vantagem desta configuração é a baixa incidência de vazamentos do fluido refrigerante durante o funcionamento. No entanto, caso ocorra alguma falha, o compressor deve ser substituído por uma unidade completamente nova.

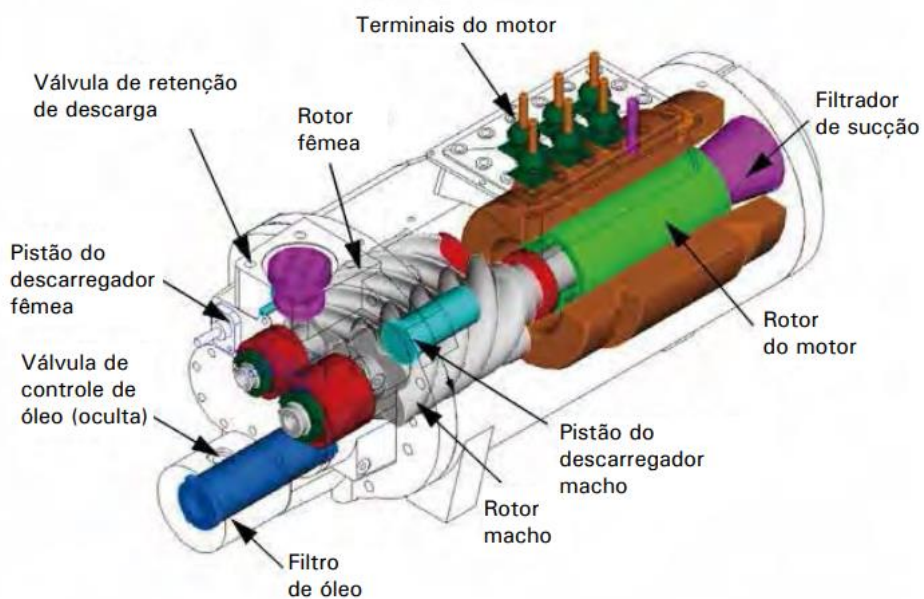
Os compressores também podem ser classificados como alternativos, scroll, rotativos e de parafuso. Os compressores alternativos, também conhecidos como recíprocos, utilizam um sistema de biela-manivela para acionar os pistões, realizando os processos de admissão e compressão do agente refrigerante. O gás refrigerante entra na máquina pela válvula à esquerda, sendo sugado para o cilindro e comprimido pelo movimento linear do pistão, acionado pelo virabrequim e pela cruzeta. Quando a pressão dentro do cilindro supera a resistência do sistema de descarga, o gás é direcionado pela válvula de saída para a unidade condensadora. Esses compressores são amplamente utilizados em sistemas de refrigeração split de até 30.000 BTUs.

A tecnologia scroll oferece uma operação silenciosa, contínua e eficiente. Os compressores scroll consistem em dois rotores espirais, onde um permanece fixo e o outro é móvel. Durante o funcionamento, a rotação do rotor móvel induz a movimentação do fluido refrigerante em direção ao centro da espiral, onde o volume do fluido é progressivamente reduzido. Posteriormente, o fluido comprimido entra na unidade condensadora através do tubo de descarga, sob alta pressão. Esses compressores geralmente possuem um acabamento hermético, mas também estão disponíveis em versões semi-herméticas (OLIVEIRA, 2020).

Os compressores rotativos utilizam palhetas deslizantes para sugar o fluido refrigerante, formando câmaras de compressão. Ao passar por essas câmaras, o agente é comprimido e liberado pelo tubo de descarga. Este tipo de compressor é amplamente utilizado em condicionadores de ar tipo janela e em bombas de vácuo.

Os compressores de parafuso possuem dois rotores em formato de parafuso, um macho e outro fêmea, que se encaixam perfeitamente, conforme pode ser observado na figura 17. Quando o fluido refrigerante entra na máquina, ele é conduzido ao longo das roscas dos rotores. Ao atingir o final do percurso, imediatamente antes de entrar na unidade condensadora, a pressão do fluido é aumentada. Estes compressores são de grande capacidade. Suas vantagens incluem baixo ruído, menor vibração e alta eficiência volumétrica (OLIVEIRA, 2020).

Figura 17 – Compressor parafuso.



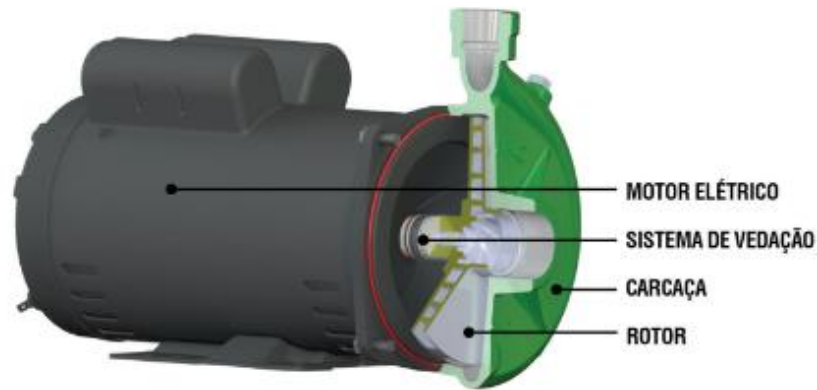
Fonte: Trane (2015)

Os *chillers* podem apresentar um ou mais compressores. Para atingir o set point de temperatura de água gelada ideal, os *chillers* apresentam diversas possibilidades de controle. Entre elas, o controle da quantidade de fluido refrigerante que entra o evaporador, por meio da válvula de expansão ou o uso de inversores para controlar a velocidade dos compressores.

A circulação de água no sistema de refrigeração pode ser feita por meio de bombas centrífugas. A quantidade de bombas depende da configuração do sistema e varia conforme os requisitos de instalação e com as medidas de eficiência energética.

As bombas centrífugas são formadas por um motor elétrico, uma carcaça, um rotor e um sistema de vedação, conforme indicado na figura 18.

Figura 18 – Componentes de uma bomba centrífuga.



Fonte: FAMAC (2023).

A carcaça desempenha um papel fundamental na bomba centrífuga, servindo como sua estrutura básica para conectar outros componentes. Ela coleta o líquido do bocal de entrada, direcionando-o até o bocal de saída e convertendo parte da energia cinética em energia de pressão durante esse processo. O rotor, também conhecido como propulsor ou impulsor, é o coração da bomba, responsável por fornecer energia ao líquido bombeado. Composto por palhetas ou lâminas, o fluido flui suavemente entre elas. Por fim, a transformação da energia elétrica em outras formas é realizada por um motor elétrico (SECCO & RAMOS, 2021).

Essas bombas podem ser classificadas como primárias, secundárias e de condensação. As bombas primárias têm a função bombear a água para resfriamento na evaporadora do *chiller*, por meio da troca de calor com o fluido refrigerante. Após sair do *chiller*, a água é distribuída para o restante do sistema pela bomba secundária.

Por outro lado, as bombas de condensação são empregadas exclusivamente em *chillers* de condensação a água, responsáveis por circular a água da condensadora para a torre de resfriamento e, em seguida, de volta para a condensadora.

Usualmente, tais bombas são conectadas a inversores de frequência para acionamento e mudança de frequência de atuação.

Finalmente, em termos gerais, há compressores de ar comprimido alimentados pela subestação estudada. O compressor é uma máquina pneumática que opera capturando o ar ambiente, armazenando-o em seu reservatório sob alta pressão e convertendo-o em ar comprimido. Esse processo é realizado por meio de movimentos mecânicos gerados por motores elétricos. Os compressores de ar utilizados no sistema analisado são do tipo parafuso.

Tais compressores usualmente apresentam inversores em sua constituição, para controle da frequência do motor. O ajuste é feito de acordo com a necessidade de pressão nas linhas do sistema.

3.3 Registros de Campo

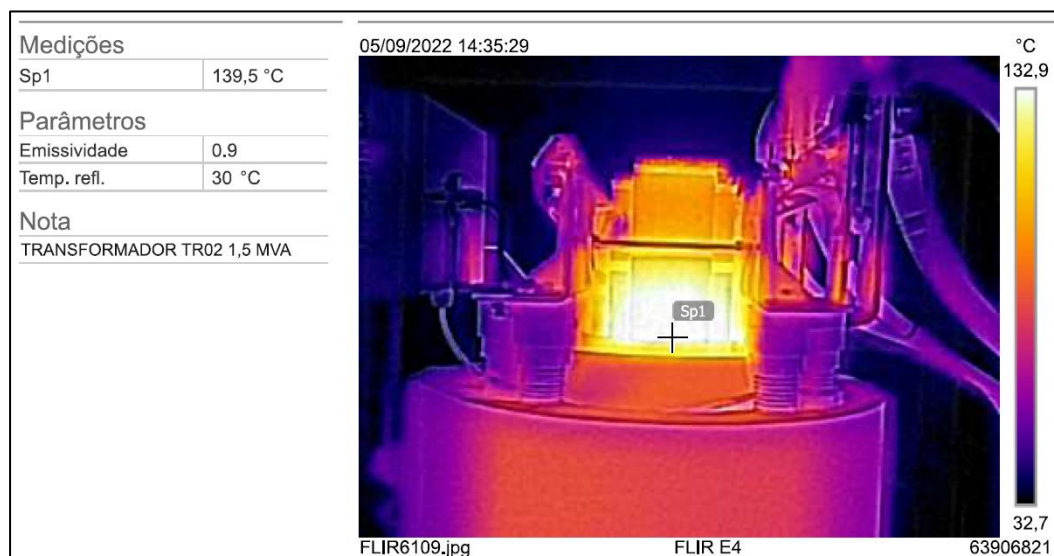
Devido ao aumento da temperatura de operação e ao ruído nos transformadores no setor de utilidades, foram realizados registros de campo preliminares, os quais consistiram na inspeção termográfica do transformador TR02, bem como em medições de tensões, correntes, potências e formas de onda no secundário deste transformador.

A fim de fornecer uma base para a avaliação qualitativa dos resultados do modelo desenvolvido, os registros de campo são apresentados na sequência.

3.3.1 Registros Termográficos

Através da contratação de consultoria especializada, no dia 05/09/2022, foi realizada a inspeção termográfica no transformador TR02, a fim de detectar pontos quentes que pudessem justificar o sobreaquecimento dos equipamentos. A figura 19 apresenta o registro termográfico do ponto mais quente do equipamento, o qual se trata do núcleo ferromagnético do TR02.

Figura 19 – Termografia do núcleo do transformador TR02.



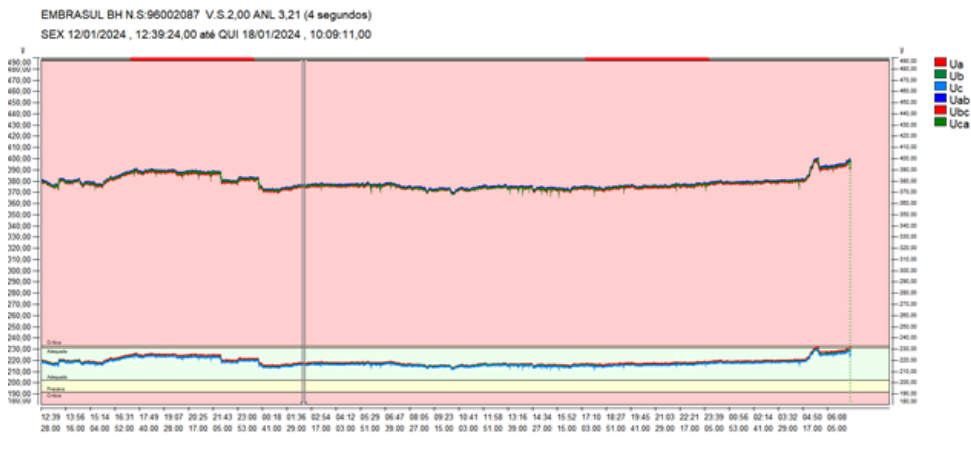
Fonte: Relatório de investigação em campo.

3.3.2 Registros de Medição

Os registros de tensão, corrente e potência foram obtidos através de medições no secundário do transformador TR02 (380 V), utilizando o analisador de energia RE6001 da EMBRASUL. As medições foram obtidas ao longo de um período de 6 dias contínuos, entre 12/01/24 e 18/01/24, com integralização de 4 segundos.

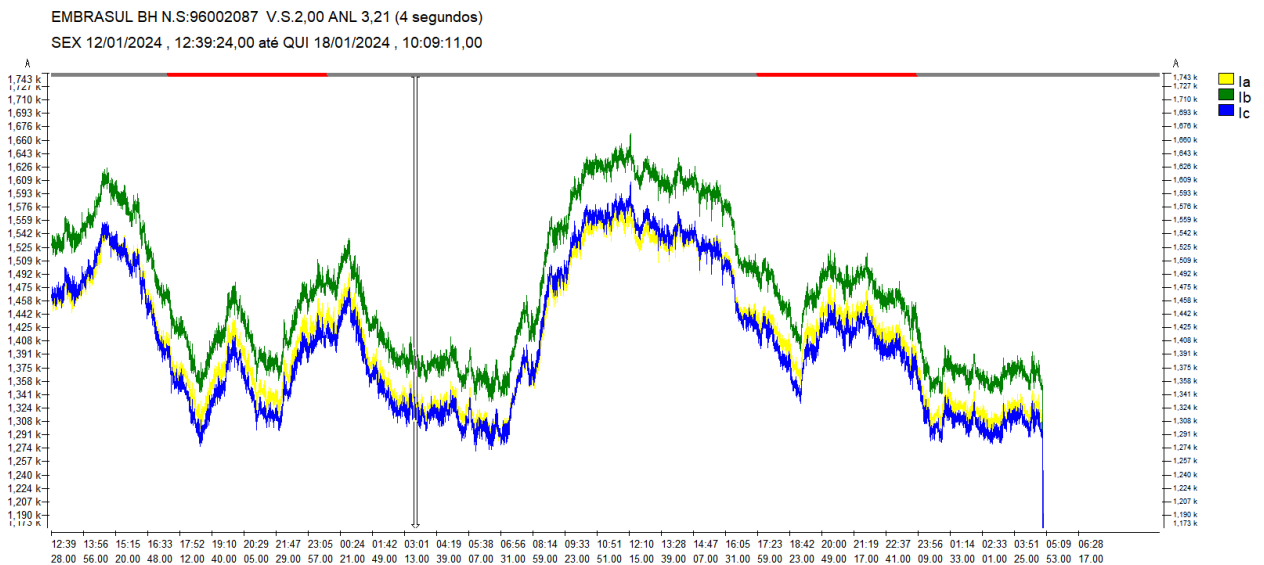
As Figura 20 e 21 apresentam, respectivamente, os registros de tensão e corrente eficazes obtidos ao longo do período.

Figura 20 – Tensão eficaz medida no secundário do transformador TR02.



Fonte: Relatório de investigação em campo.

Figura 21 – Corrente eficaz medida no secundário do transformador TR02.



Fonte: Relatório de investigação em campo.

Os respectivos valores de tensão e corrente médios e máximos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores máximos, médios e mínimos medidos.

FASE	TENSÃO EFICAZ (V)			CORRENTE EFICAZ (kA)		
	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
A	218,41	212,34	353,52	1,349	0,000	1,589
B	217,39	211,53	231,09	1,400	0,000	1,668
C	216,65	210,69	229,96	1,340	0,000	1,607

Fonte: Adaptado de relatório de investigação em campo.

A Tabela 12 apresenta os valores médios das parcelas de potência ativa, reativa e aparente medidos, por fase, bem como o fator de potência para o período.

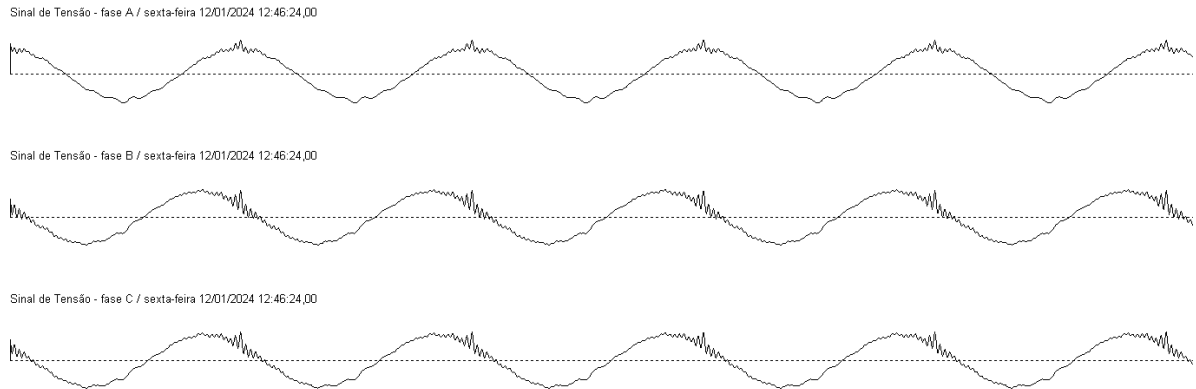
Tabela 12 – Valores médios das parcelas de potência e fator de potência medidos.

FASE	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kvar)	Potência aparente (kVA)	Fator de potência
A	268,861	121,506	295,042	0,911
B	280,586	119,462	304,958	0,92
C	274,501	96,187	290,866	0,944
Total	823,948	337,156	890,26	0,925

Fonte: Adaptado de relatório de investigação em campo.

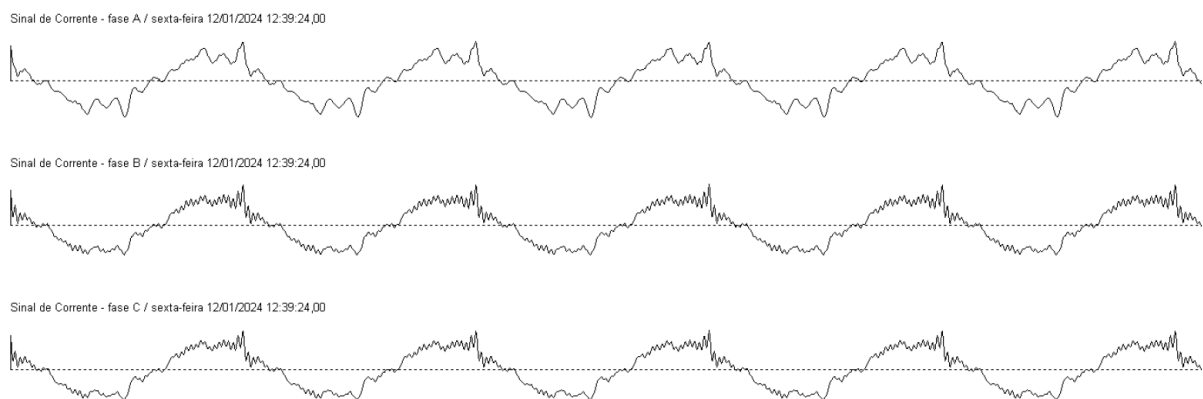
Além dos registros de tensão e corrente eficazes, foi possível registrar as formas de onda das tensões e correntes medidas em cada fase, as quais são apresentadas nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Forma de onda da tensão medida no secundário do transformador TR02.



Fonte: Relatório de investigação em campo.

Figura 23 – Forma de onda da corrente medida no secundário do transformador TR02.



Fonte: Relatório de investigação em campo.

Uma vez identificado o sobreaquecimento do núcleo do transformador TR02 e verificada a presença de distorções harmônicas nas formas de onda das tensões e correntes medidas, fica evidenciada a necessidade de maiores investigações sobre o perfil das distorções harmônicas manifestadas. Todavia, devido às limitações técnicas para uma completa avaliação harmônica através de uma campanha de medição apropriada, optou-se por modelar e avaliar o sistema utilizando ferramentas computacionais, que também serão usadas para a futura prospecção de soluções.

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO SISTEMA INDUSTRIAL

4.1 Modelagem computacional

A subestação em análise divide suas cargas em dois quadros principais de baixa tensão. A natureza das cargas e suas funções foram descritas anteriormente. Em geral, o sistema é composto por:

- 18 bombas centrífugas ativas, operando na maioria do tempo a uma frequência de 45 Hz, com controle realizado por inversores;
- Dois *chillers* a ar e três *chillers* a água, cada um equipado com dois compressores;
- Seis compressores de ar para fornecimento de ar comprimido para a fábrica.

Para reduzir o esforço computacional na ferramenta de simulação, elementos com características semelhantes de cada QGBT foram agrupados. Considerando que a representação de cada um desses itens envolve o modelo de um motor de indução em sua representação computacional, tal agrupamento se baseou sobretudo nos fatores rendimento, escorregamento e fator de potência.

A tabela 13 abaixo descreve as cargas principais que compõem os quadros e como essas cargas foram agrupadas, por blocos, no ambiente computacional. Na tabela, as bombas são denominadas por função, ou seja, por BAC (bomba de água condensada), BAGP (bomba de água gelada primária) e BAGS (bomba de água gelada secundária).

Tabela 13 – Principais cargas da subestação.

QUADRO	BLOCO	CARGA	INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL (kW)
QGBT 01	1	Compressores de ar 01 a 06	SIM	480
	2	BAGP 01 e 02	SIM	15
	3	BAGP 03 e 04 e BAC 07	SIM	45
	4	BAGS 01, 02 e 05, BAGP 06	SIM	100

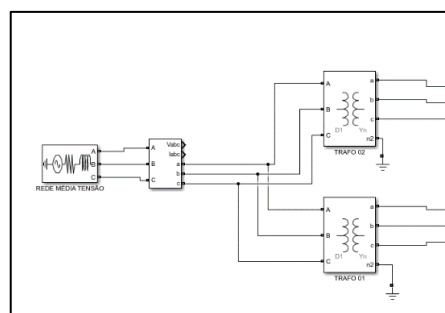
5	BAC 01, 02 e 05, BAGS 06	SIM	59
6	BAC 03	SIM	15
7	BAC 04 e 06	SIM	30
8	Chiller 03	NÃO	180
9	Chiller 04	NÃO	315
10	Chiller 05	NÃO	315
QGBT 02	11	BAGP 05, BAGS 03 e 04	67,5
	12	Chiller 01 e 02	370
TOTAL			1991,5

Fonte: elaborado pelo autor pelo autor.

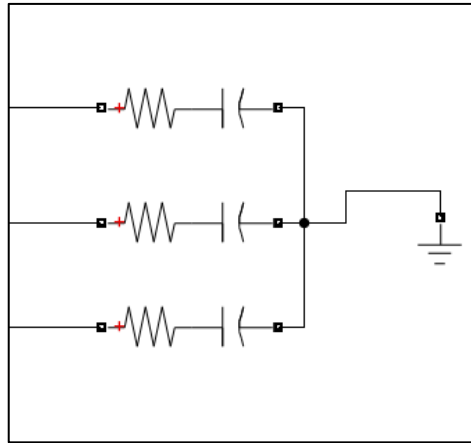
Ressalta-se que o sistema implementado computacionalmente busca representar os efeitos elétricos, sobretudo os efeitos de injeção harmônica, dos componentes na rede. Por conta disso, os modelos apresentados nos próximos tópicos priorizam esse aspecto.

No Simulink®, para a representação do sistema elétrico que alimenta as cargas do setor, a rede, os transformadores e o banco de capacitores em baixa tensão foram modelados de acordo com a figura 24. Para a representação da rede, utilizou-se o modelo previsto em Giancesini (2020) e foram utilizados o valor de curto-circuito típico de 100MVA. Os valores dos transformadores foram preenchidos de acordo com os dados de placa. Os valores dos capacitores foram preenchidos de forma a alcançar o valor de 120kvar.

Figura 24 – (a) Implementação da rede e dos transformadores no Simulink® (b) Implementação do banco de capacitores no Simulink®.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto às cargas, em todas as representações que serão apresentadas a seguir, o item de máquina assíncrona disponibilizado na biblioteca do Simulink® é utilizado. Os parâmetros necessários para a implementação desse modelo podem ser observados na figura 25.

Figura 25 – Parâmetros para um motor de indução.

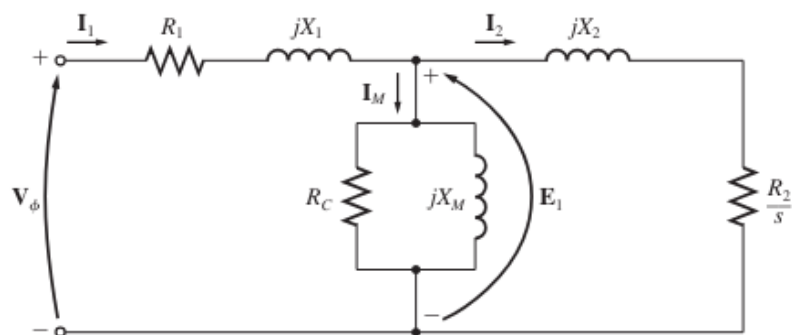
Configuration	Parameters	Advanced	Load Flow
Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:			
			[225.097e3 380 60]
Stator resistance and inductance[Rs(ohm) Lls(H)]:			
			[0.082635 0.000176]
Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:			
			[0.009217 0.000176]
Mutual inductance Lm (H):			
			0.011077
Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m ²) F(N.m.s) p()]:			
			[0.02 0.005752 2]
Initial conditions			
[slip, th(deg), ia,ib,ic(A), pha,phb,phc(deg)]:			
			[1 0 0 0 0 0 0]
<input type="checkbox"/> Simulate saturation		Plot	
[i(Arms) ; v(VLL rms)]:			
			[, 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo utilizado para determinar os parâmetros anteriores está na figura 26. Para funcionar, um motor de indução baseia-se na indução efetuada pelo circuito do estator, que gera tensões e correntes no circuito do rotor, atuando de forma semelhante a um transformador. Por isso, o circuito equivalente de um motor de indução é muito semelhante ao circuito equivalente de um transformador. Como um motor de indução não possui um circuito de campo independente, seu modelo não inclui uma fonte de tensão interna. Para desenvolver o circuito

equivalente de um motor de indução, é possível utilizar o conhecimento sobre transformadores e a variação de frequência no rotor dos motores de indução em função da velocidade. O circuito equivalente final por fase de um motor de indução requer que a parte do rotor no modelo seja referida ao lado do estator. O modelo do circuito do rotor, quando referido ao lado do estator, concentra todos os efeitos de variação de velocidade no termo de impedância. Este modelo permite uma análise mais precisa do comportamento do motor sob diferentes condições operacionais (CHAPMAN, 2013).

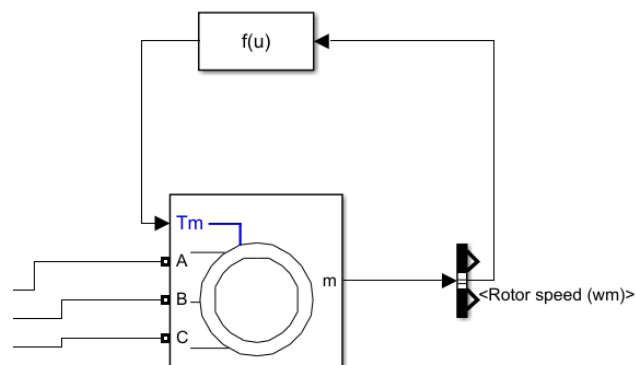
Figura 26 – Modelo de motor de indução por fase.



Fonte: Chapman (2013)

Para a representação dos *chillers*, considerando que seus compressores atuam em velocidade fixa e que, devido à baixa influência, os demais componentes do equipamento podem ser desconsiderados para a corrente de entrada, foi utilizado o modelo da figura 27 no Simulink®.

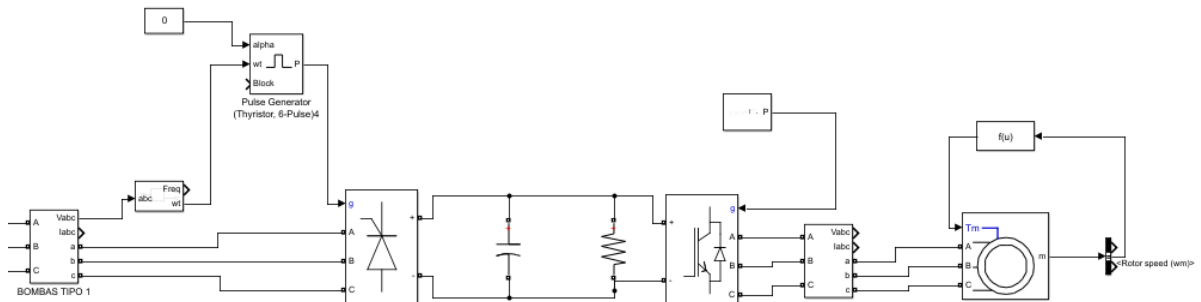
Figura 27 – Modelo para compressores de velocidade constante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso das bombas centrífugas, foi utilizado o modelo da figura 28, em que uma máquina assíncrona está conectada a um inversor de frequência. Nesse caso, observamos três principais fases anteriores ao motor: retificação por meio de tiristores, filtro por meio do capacitor e, por último, a inversão por sinal de PWM.

Figura 28 – Modelo para bombas com inversores.

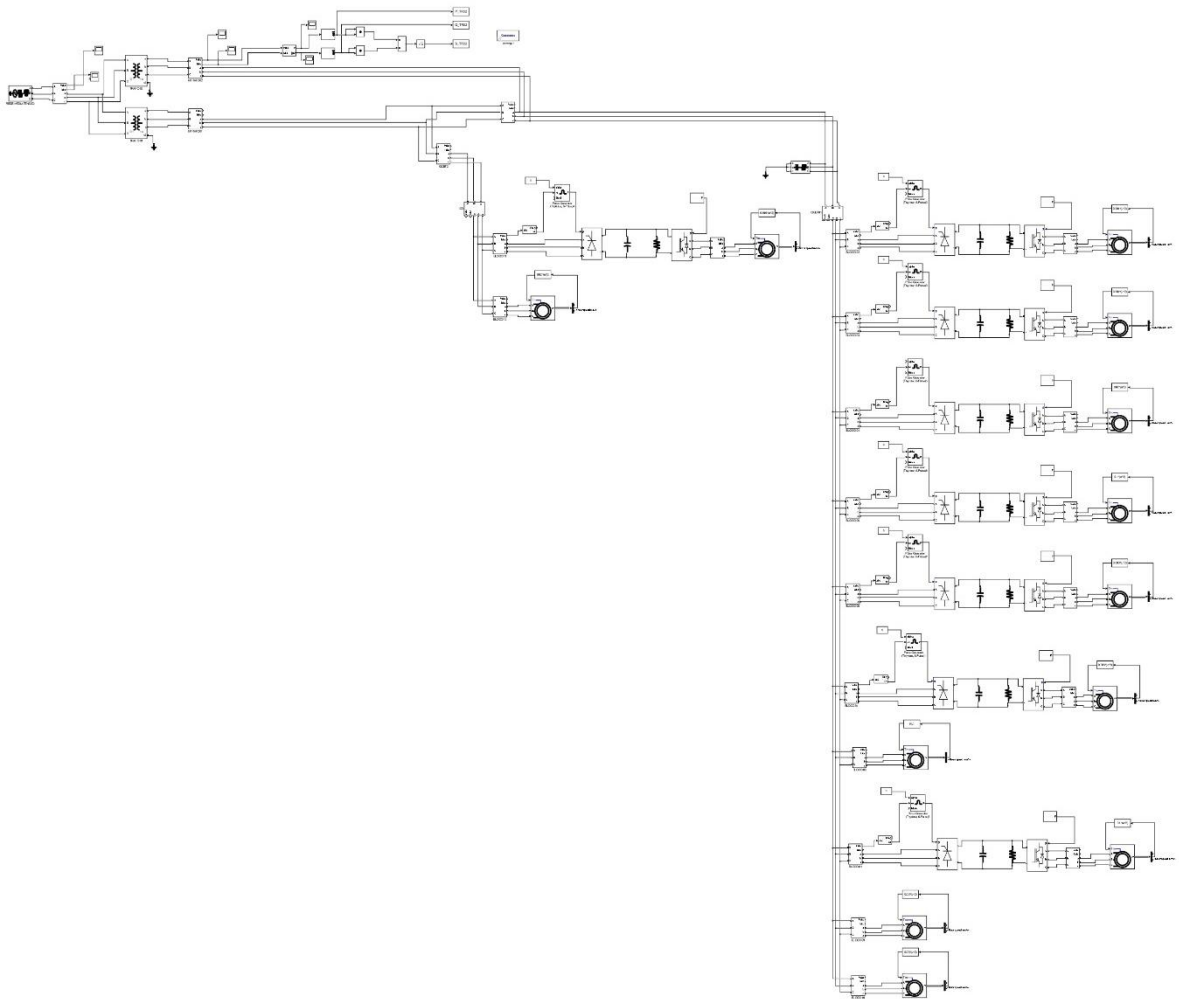


Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto aos compressores de ar, visto que nos equipamentos há o uso de inversores em sua configuração, para controle da velocidade do motor elétrico, utilizou-se no Simulink® o modelo conforme mostrado na figura 28 anterior.

O sistema final no ambiente computacional pode ser observado na figura 29 a seguir.

Figura 29 – Sistema completo implementado no software MATLAB/Simulink®.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.1 Validação do modelo proposto

A validação do modelo implementado foi feita através da análise de suas características nominais de operação. Para tanto, apresenta-se uma análise quantitativa na qual os resultados do modelo são comparados com os resultados de medição de tensão, corrente e potência obtidos por meio dos registros de campo.

Nesse sentido, para fins de comparação, a Tabela 14 apresenta os valores eficazes simulados e medidos referentes a fase A do secundário do transformador TR02.

De acordo com a Tabela 14, é possível observar que os valores simulados e medidos apresentam elevada similaridade, de forma que os resultados indicam a aderência do modelo às condições reais existentes em campo.

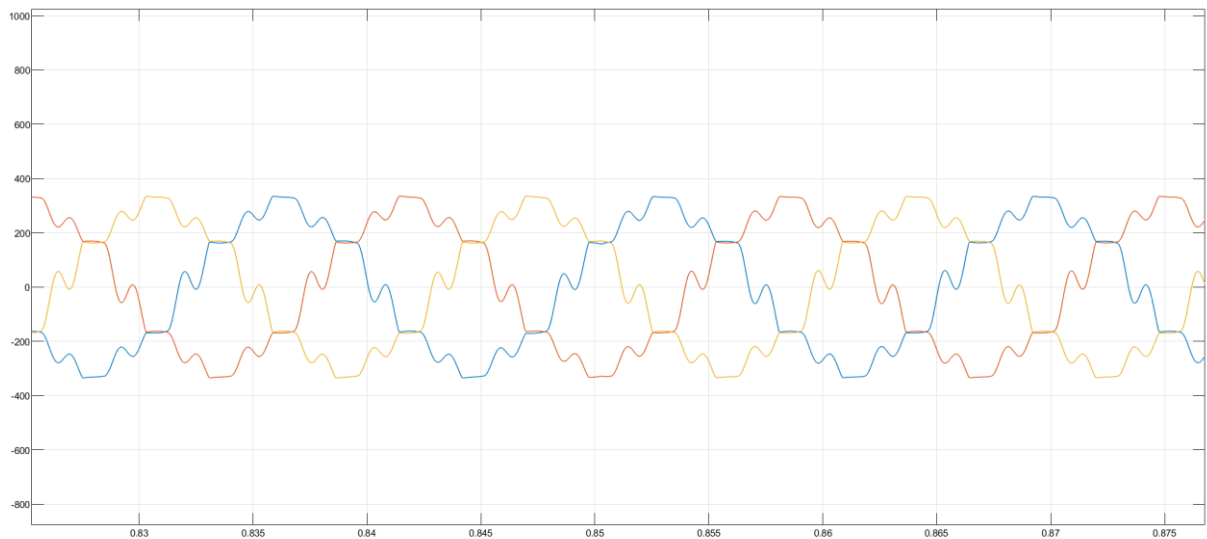
Tabela 14 – Valores médios simulados e medidos no secundário do transformador TR02.

Parâmetro	Simulado	Medido
Tensão (V)	217,13	218,41
Corrente (A)	1366	1349
Potência Aparente (kVA)	894,34	890,26
Potência Ativa (kW)	820,40	823,95
Potência Reativa (kvar)	356,08	337,156
Fator de Potência	0,917	0,925

Fonte: elaborado pelo autor.

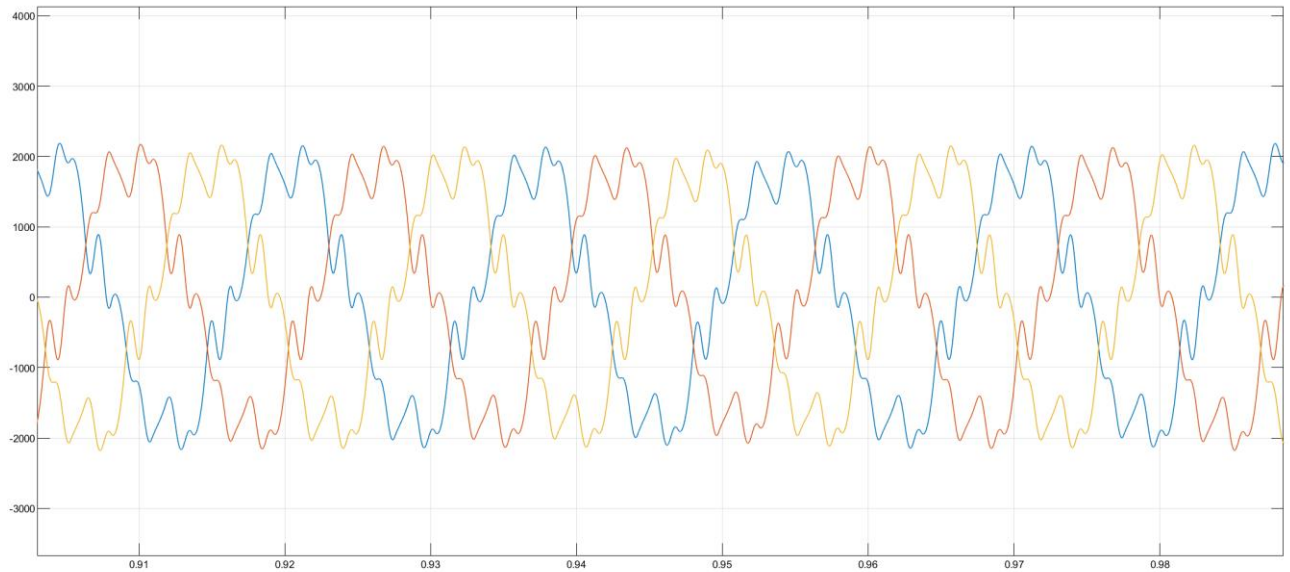
A fim de avaliar o perfil das tensões e correntes medidas, as figuras 30 e 31 apresenta a forma de onda das tensões e correntes obtidas no ambiente computacional. É possível notar também similaridades com as formas de onda anteriormente expostas nas figuras 22 e 23.

Figura 30 – Formas de onda de tensão no secundário do transformador TR02



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Formas de onda de corrente no secundário do transformador TR02



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nas figuras supracitadas, nota-se a presença de distorções harmônicas de corrente na forma de onda da corrente. Uma vez constatada a boa aderência do modelo, no capítulo subsequente apresenta-se a avaliação completa da característica das distorções harmônicas presentes no setor de utilidades.

4.2 Análise das distorções harmônicas no sistema industrial

Uma forma de avaliar o grau de penetração harmônica de uma determinada instalação é detectar os níveis de distorção harmônica de corrente manifestados e compará-los com os limites normativos. No Brasil, muito embora sejam estabelecidas diretrizes para análise da conformidade dos distúrbios de tensão em regime permanente, não são mencionados critérios para avaliação dos distúrbios de corrente, com exceção de alguns poucos estudos para a conexão de novos empreendimentos à Rede Básica.

Uma vez que as análises conduzidas neste trabalho são focadas em um complexo industrial conectado ao sistema de distribuição de energia elétrica a uma tensão de 69 kV, nesta seção, são apresentados os resultados de simulação e comparados com os limites de distorção harmônica de tensão e corrente conforme o padrão IEEE 519. Isso tem por foco estabelecer uma base de referência para as avaliações de conformidade empregando medições de corrente e tensão.

Na tabela 15, são apresentados os valores de distorção harmônica individual e total, para tensão e corrente, nos lados de alta e de baixa tensão da subestação.

Tabela 15 – Valor eficaz das distorções harmônicas de tensão e corrente obtidas no primário e secundário dos transformadores.

ORDEM	Primário		Secundário	
	IH Tensão (V)	IH Corrente (A)	IH Tensão (V)	IH Corrente (A)
1	13660,00	77,53	376,08	1366,00
3	0,00	0,01	0,00	0,14
5	184,41	11,20	22,64	198,34
7	124,31	5,37	15,16	94,94
9	0,00	0,01	0,00	0,00
11	278,66	7,68	34,07	135,78
13	254,08	5,92	31,10	104,91
15	0,00	0,00	0,00	0,00
17	120,21	2,16	14,78	38,11
19	56,01	0,89	6,84	15,85
21	0,00	0,00	0,00	0,00
23	19,12	0,26	2,41	4,64
25	24,59	0,30	3,08	5,46
26-50	< 1,366	< 0,008	< 0,038	<0,137
THD	460,34	15,99	56,26	283,04

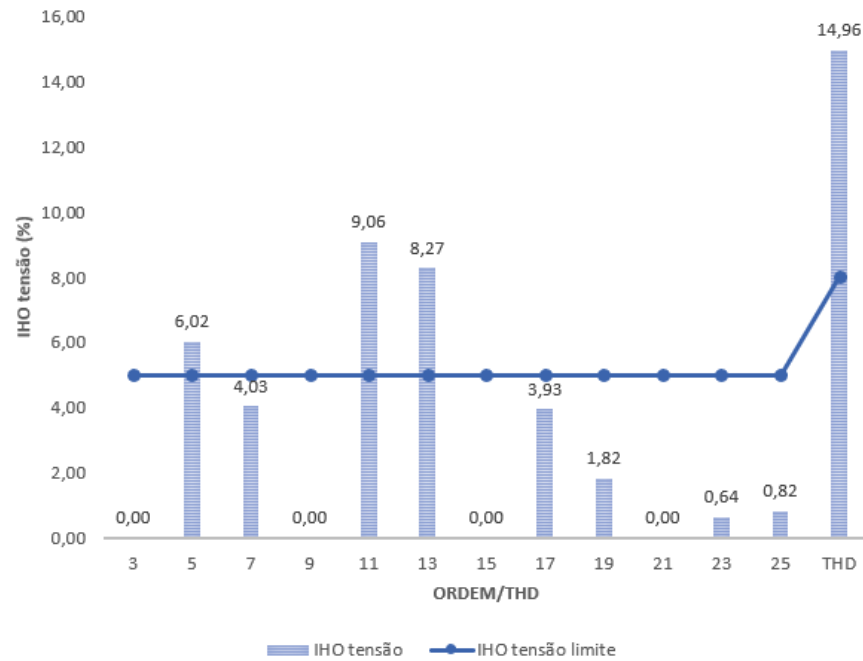
Fonte: elaborado pelo autor.

Para o sistema avaliado, considerando uma corrente de curto-circuito de 45kA, de acordo com os dados disponibilizados por estudos prévios, têm-se seguinte relação:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{45000}{1366} = 32,94$$

Os limites de distorção de corrente e de tensão serão considerados de acordo com as recomendações da IEEE 519, discutidas anteriormente no capítulo 2 deste trabalho. Esses limites, em comparação com o sistema analisado, podem ser visualizados nos gráficos 1, 2, 3 e 4 abaixo.

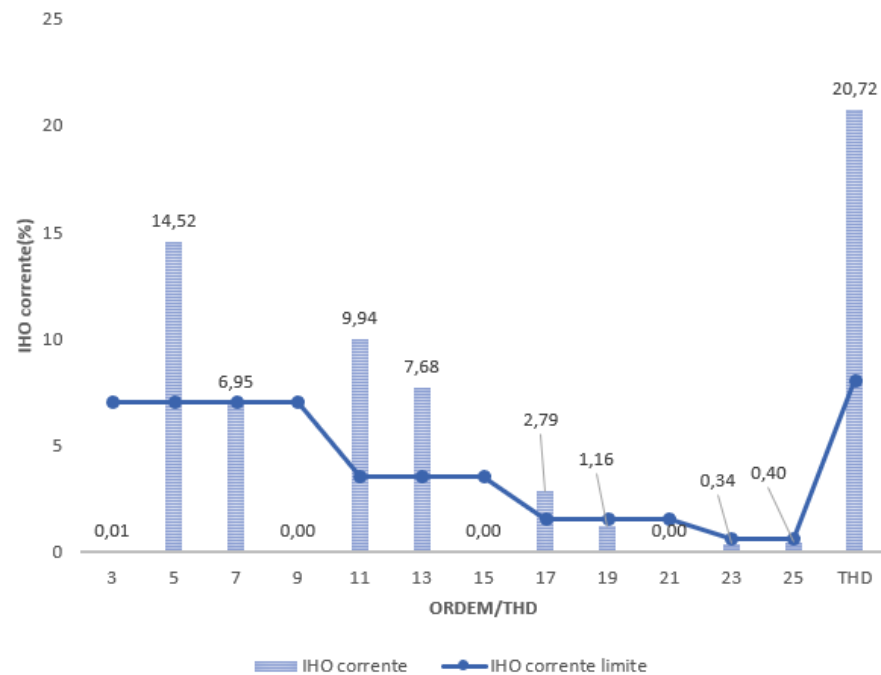
Gráfico 1 – Taxas de distorção de tensão no secundário do TR02 e limites da IEEE.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se no gráfico 1 que os limites individuais de tensão são ultrapassados pelas 5^ª, 11^ª e 13^ª harmônicas. Além disso, o THD também ultrapassa em 87% o valor recomendado pelo guia em questão.

Gráfico 2 – Taxas de distorção de corrente no secundário do TR02 e limites da IEEE.



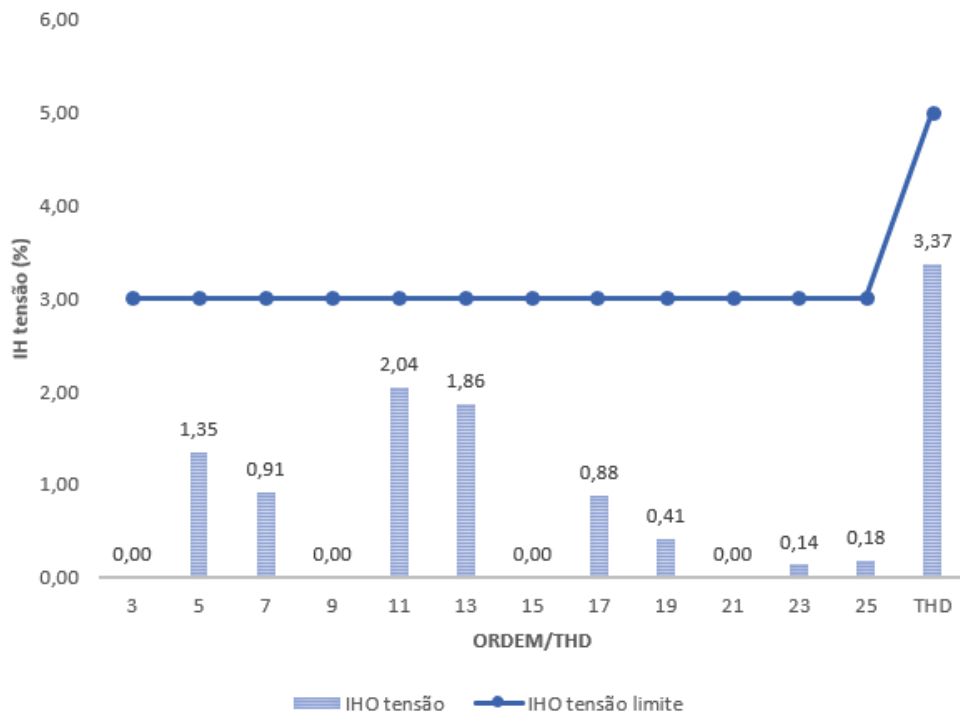
Fonte: elaborado pelo autor.

No gráfico 2, os limites individuais de corrente são ultrapassados pelas 5^ª, 11^ª, 13^ª e 17^ª harmônicas. Quanto ao THD, o valor é aproximadamente quatro vezes o indicado pelo guia da IEEE.

Quanto aos valores referentes ao primário do sistema, no gráfico 3 a seguir, é possível perceber que todos os indicadores de tensão estão dentro dos limites de recomendação.

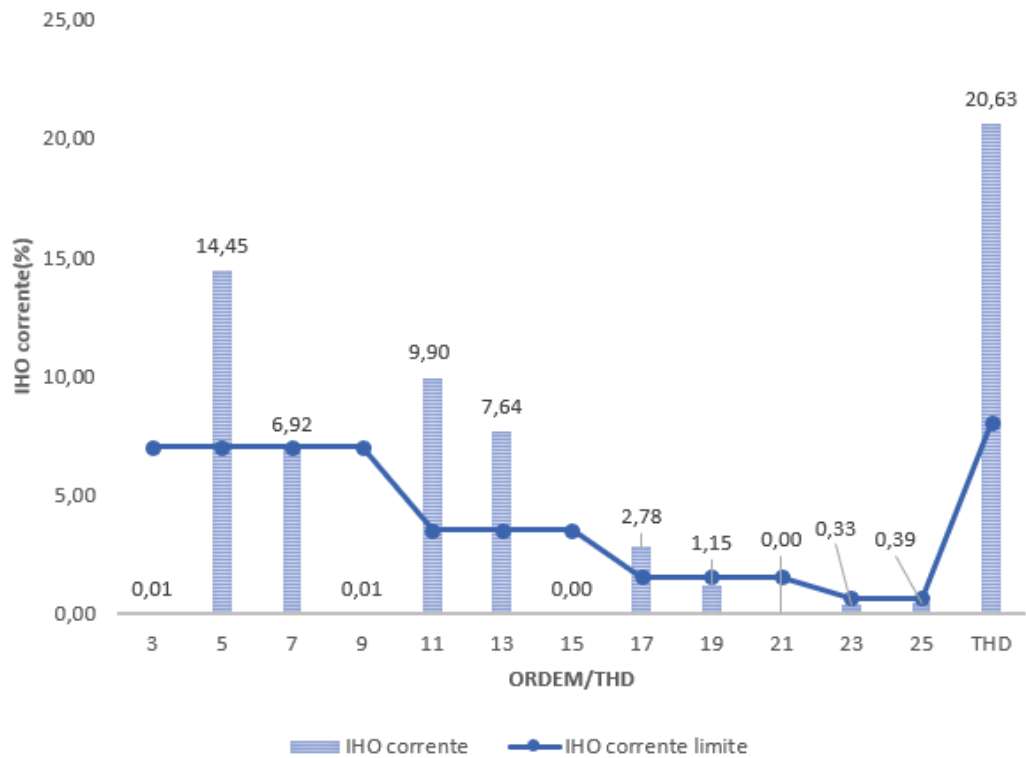
No gráfico 4, observa-se que os limites individuais de corrente são ultrapassados pelas 5^ª, 11^ª, 13^ª e 17^ª harmônicas, cujos valores são 14,45%, 9,90% e 7,64%. Destaca-se, portanto, o expressivo valor da 5^ª ordem harmônica, com 14,45% de distorção individual.

Gráfico 3 – Taxas de distorção de tensão no primário do TR02 e limites da IEEE.



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – Taxas de distorção de corrente no primário no TR02 e limites da IEEE.



Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto à capacidade térmica dos transformadores, as análises são feitas em termos da determinação do fator k , de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 16 – Análise do fator k

h	I_h (pu)	I_h (pu) ²	h^2	I_h (pu) ² h^2
1	0,59940	0,35928	1,00000	0,35928
3	0,00006	0,00000	9,00000	0,00000
5	0,08703	0,00757	25,00000	0,18936
7	0,04165	0,00173	49,00000	0,08500
9	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
11	0,05957	0,00355	121,00000	0,42938
13	0,04603	0,00212	169,00000	0,35807
15	0,00000	0,00000	225,00000	0,00000
17	0,01672	0,00028	289,00000	0,08079
19	0,00695	0,00005	361,00000	0,01744
21	0,00000	0,00000	441,00000	0,00000
23	0,00204	0,00000	529,00000	0,00220
25	0,00240	0,00001	625,00000	0,00359
Σ				1,52511

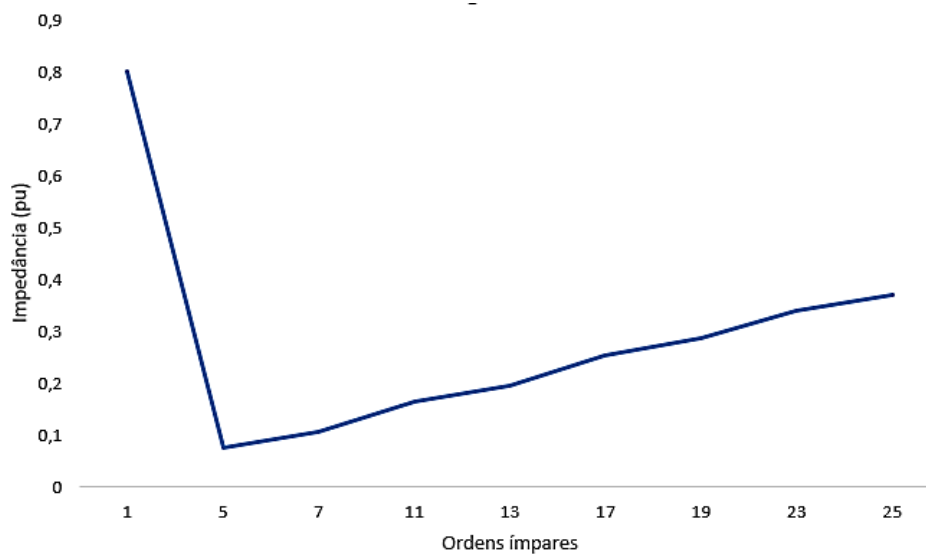
Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com os dados de placa do transformador, sabe-se que este foi projetado para atuar com fator k igual a 1. De acordo com essas análises, o fator k de 1,52 indica que o transformador opera com um fator k superior ao nominal do equipamento. Sendo assim, de forma a limitar o efeito térmico e respectivas perdas, uma solução seria limitar o carregamento do transformador.

Além disso, com o objetivo de gerar melhor visualização do comportamento do sistema, foi traçada também a curva de resposta em frequência no primário dos transformadores. O resultado está no gráfico 5;

Observa-se que o comportamento de resposta em frequência na barra primária do transformador é sugestivo de uma ressonância série nas imediações da 5ª ordem harmônica, o que justifica o elevado percentual de distorção de corrente de 5ª ordem manifestado. Essa ressonância é provocada pelo efeito dos componentes indutivos e capacitivos do sistema.

Gráfico 5 – Resposta em frequência no primário.



Fonte: elaborado pelo autor.

A fim de atenuar as elevadas correntes harmônicas de 5ª, 11ª, 13ª e 17ª ordens, uma solução consiste na filtragem harmônica através de componentes passivos, cuja estratégia escolhida poderá ser testada e avaliada utilizando o modelo computacional desenvolvido neste trabalho.

4 CONCLUSÕES

Conforme destacado no decorrer desse trabalho, é evidente a necessidade de analisar e mitigar as distorções harmônicas em sistemas elétricos industriais. Equipamentos baseados na eletrônica de potência comumente utilizados em instalações industriais geram tais distorções, que podem causar diversos problemas, como sobrecorrentes e redução da vida útil dos equipamentos.

Em geral, o efeito de elevadas de distorção harmônica variam de acordo com o componente. Transformadores expostos a elevados níveis de harmônicos podem sofrer aumento nas perdas e sobreaquecimento, com efeitos acentuados pela frequência dos harmônicos. Da mesma forma, motores de indução enfrentam aumento de temperatura e problemas de deslizamento devido aos harmônicos. Disjuntores e fusíveis podem falhar ou disparar inadequadamente, enquanto capacitores podem sofrer aquecimento excessivo e perda de vida útil, além de riscos de ressonância. Diante dessa problemática, são desenvolvidos guias e orientações nacionais e internacionais acerca das taxas aceitáveis para a QEE dos sistemas, como o módulo 8 do PRODIST, os procedimentos de rede do ONS e o guia IEEE 519 de 2014.

O estudo desenvolvido foca na análise de distorções harmônicas em uma subestação industrial de média tensão nas proximidades do Complexo Portuário do Pecém, no Ceará. Os objetivos incluem modelar e validar computacionalmente o sistema usando o MATLAB/Simulink®, avaliar o perfil das distorções e propor soluções, justificando-se pela importância de manter a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos industriais.

Inicialmente, as informações fornecidas por meio das investigações em campo foram acerca das potências (ativa, reativa e aparente), do fator de potência, da corrente e da tensão do sistema analisado. Para implementação desse modelo, a fim de que fosse possível obter dados relevantes acerca dos indicadores de distorção harmônica da subestação, utilizou-se os dados conhecidos dos equipamentos para modelagem das cargas em blocos. Tais cargas do setor de utilidades foram divididas de acordo com as características de seus motores elétricos e a partir do uso ou não de inversor.

Após verificação de similaridade dos dados do modelo com os dados previamente coletados em campo, foi possível obter os indicadores para comparação com os limites estabelecidos pelo guia IEEE 519. Observou-se, em geral, a ultrapassagem dos dados de distorção individual para as ordens 5, 11, 13 e 17. Além disso, por meio das respostas em frequências visualizadas por meio de gráficos, é possível observar alta ressonância no sistema quando se trata da 5ª ordem de harmônica.

Esses resultados estão alinhados com a quantidade de inversores de frequência, que são cargas não lineares, que alimentam diariamente os compressores de ar e as bombas do sistema de refrigeração. Esses valores de distorção de corrente e de tensão são prejudiciais para o sistema e geram efeitos de sobreaquecimento nos transformadores, aquecimento de cabos e diminuição da vida útil dos equipamentos.

Portanto, com o intuito de aumentar a QEE do sistema e impedir que tal setor interfira negativamente no sistema elétrico do restante da fábrica, recomenda-se o projeto de um filtro sintonizado para a harmônica de 5ª ordem. Além disso, conclui-se que a modelagem computacional validada pode ser utilizada para o desenvolvimento de futuras soluções para o sistema.

5.1 Trabalhos futuros

Ao longo do estudo, foram notados pontos em potencial para desenvolvimento de novos trabalhos. Sugerem-se os seguintes tópicos:

- Medição das distorções harmônicas em campo, a fim de comparação com os resultados do modelo e para identificação de possíveis melhorias na precisão das respostas em ambiente computacional;
- Dimensionamento, teste e aplicação computacional de filtro harmônico sintonizado na 5ª ordem, a fim de avaliar o impacto dessa solução no sistema em termos de efetividade e potenciais riscos de ressonância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, módulo 8, 07/12/2021 Resolução 956/2021 da ANEEL.

BASCIANO, Frank. **What is a transformer K-factor rating?** North Carolina: Asea Brown Boveri, 2023. 4 p.

BOLLEN, M. H. J., **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**, IEEE Press Series on Power Engineering, New York, 1999.

CAMARGO, Micelli. **Funcionamento do Compressor de Parafusos**. 28 de jul. de 2023. Disponível em: <<https://www.engenhariaecia.eng.br/post/funcionamento-do-compressor-de-parafusos>>. Acesso em: 22 maio 2024.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 698 p.

CUNHA, Ênio Vale de Oliveira. **Projeto e análise de filtros harmônicos em subestações da UFRN**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica, Natal, 2019.

DUGAN, Roger C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. [S.I]: McGraw-Hill, 2002. 525 p. Electrical Power Systems Quality, Second Edition.

EVANS, Paul. **Chillers – Main components**. May 15, 2017. Disponível em: <https://theengineeringmindset.com/chillers-main-components/#google_vignette>. Acesso em: 01 jun. 2024.

GIANESINI, Barbara Moraes. **Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias**. 2020. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: análise e projeto de circuitos**. Porto Alegre: Amgh, 2012. 494 p.

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

IEEE. IEEE Std. 519-2014, **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 2014.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Qualidade na energia elétrica: efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções**. 2. ed. São Paulo: ArtLiber, 2013. p. 75-441. Miolo 2ª edição.

MATOS, Rudmar Serafim. **Refrigeração**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, [s.d.]. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC153/Apostila/Apostila%20Refrigera%E7%E3o.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Ar condicionado: guia prático sobre sistemas de água gelada** / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudança do Clima e Florestas, Departamento de Monitoramento, Apoio e Fomento de Ações em Mudança do Clima. – Brasília, DF: MMA, 2017.

MORÁN, L. A.; DIXON, J. W.; ESPINOZA, J. R.; WALLACE, R. R. Using Active Power Filters to Improve Power Quality. In: **5th Brazilian Power Electronics Conference**, 1999, pp. 501-511.

NASCIMENTO, C. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. A. **Compensation of the Harmonic Current Generated by Light Dimmers**. VI Induscon, 2004.

NASCIMENTO, Claudionor Francisco do. **Determinação do Conteúdo Harmônico de Corrente Baseada em Redes Neurais Artificiais para Cargas Não-Lineares Monofásicas**. 2007. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OLIVEIRA, Humberto Cunha de. **CONDICIONADORES DE AR INVERTER: MODELAGEM COMPUTACIONAL E CURVAS DE SUPORTABILIDADE PARA ESTUDOS DE PEDIDOS DE RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS**. 2020. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

OLIVEIRA, Wagner José Nascimento de. **Projeto de filtros passivos para a redução de correntes harmônicas na subestação de 2x300kVA da estação elevatória de água do Jiqui**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica**, 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Submódulo 9.7 - Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica**, 2020.

ORAE, H., **A Quantitative Approach to Estimate the Life Expectancy of Motor Insulation Systems**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, nº 16, 2000.

PAULILO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus Duarte. Fascículo Qualidade de Energia Elétrica. **Capítulo II - Harmônicos**. Atitude Editorial, 2013. p. 1-7.

PINYOL, Ramon. **Harmonics: causes, effects and minimization**. Salicru White Papers. August, 2015. Disponível em: <[https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a01_whitepaper-armonics_\(2\).pdf](https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a01_whitepaper-armonics_(2).pdf)>. Acesso em: 20 maio 2024.

POMILIO, J. A. **Conversores CA-CC – Retificadores**. In: POMILIO, J. A. Eletrônica de Potência. São Paulo: UNICAMP, 2014.

SECCO, E.T.; RAMOS, K.S. **Bombas e Motobombas**, 2ª ed. EDUCA FAMAC, 2021.

SILVA, Juliano Costa Leal da. **Modelagem e Análise de Impacto Harmônico de um Gerador de Indução do tipo Gaiola de Esquilo Interconectado à Rede Elétrica e Acionado por um Regulador Eletromagnético de Frequência**. 2021. 84 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

WIEMAN, Justin. Air vs. **Water Cooled Chillers: Which is Best for Data Centers?** October 31, 2019. Disponível em: <<https://www.trane.com/commercial/latin-america/bz/en/about-us/newsroom/blogs/air-vs-water-cooled-chillers.html>>. Acesso em: 15 maio 2024.

ZANINI, Braian Kaiser. **Análise comparativa entre o uso de transformadores a seco e a óleo em subestações de média tensão**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, 2016. Projeto de Diplomação, Graduação em Engenharia Elétrica.