



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

**GABRIEL DA SILVA LEMOS**

**ANÁLISE DO IMPACTO DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO NA OPERAÇÃO DE  
UMA PLANTA INDUSTRIAL DE CONFORMAÇÃO DE AÇO**

**FORTALEZA**

**2025**

GABRIEL DA SILVA LEMOS

ANÁLISE DO IMPACTO DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO NA OPERAÇÃO DE UMA  
PLANTA INDUSTRIAL DE CONFORMAÇÃO DE AÇO

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.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Raquel Cristina  
Filiagi Gregory

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Bárbara Mo-  
rais Giancesini

FORTALEZA

2025

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)

---

L577a Lemos, Gabriel da Silva.  
ANÁLISE DO IMPACTO DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO NA OPERAÇÃO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE CONFORMAÇÃO DE AÇO / Gabriel da Silva Lemos. – 2025.  
62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2025.

Orientação: Profa. Dra. Raquel Cristina Filiagi Gregory .  
Coorientação: Profa. Dra. Bárbara Morais Giancesini .

1. Desequilíbrio de tensão. 2. Desequilíbrio de corrente . 3. Distorção harmônica. 4. Modelagem computacional. I. Título.

CDD 621.3

---

GABRIEL DA SILVA LEMOS

ANÁLISE DO IMPACTO DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO NA OPERAÇÃO DE UMA  
PLANTA INDUSTRIAL DE CONFORMAÇÃO DE AÇO

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:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Raquel Cristina Filiagi  
Gregory (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Bárbara Morais Giancesini  
(Coorientadora)  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

---

Prof<sup>a</sup>. PhD. Ruth Pastora Saraiva Leão  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Kaio Facó Studart

Aos meus pais, pelo exemplo de força e dedicação, pelo incentivo nos momentos mais difíceis e pelo amor que me fortalece diariamente. Vocês são minha inspiração e meu alicerce.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força e perseverança para enfrentar cada desafio ao longo desta trajetória acadêmica. A caminhada até aqui foi repleta de aprendizados, superações e momentos de crescimento pessoal e profissional.

Aos meus pais, Eunice Lemos e Sousa Lemos, pelo amor incondicional, pelo apoio incansável, suas orientações e incentivos foram essenciais para que eu seguisse firme em busca dos meus objetivos. À minha irmã, Lara, pelos momentos compartilhados e pela convivência familiar, que ajudaram a moldar meus valores e minha responsabilidade.

À minha tia, Joelma Lemos, por sempre me motivar e por acreditar no meu potencial. Seu incentivo constante e sua visão sobre a importância da educação foram fundamentais para que eu seguisse confiante na busca pelo conhecimento e crescimento profissional.

À minha namorada, Carol Garcia, companheira de graduação e de vida. Seu apoio incondicional, paciência e incentivo foram fundamentais para que eu superasse os momentos mais difíceis.

À professora Raquel Gregory, minha orientadora, pela dedicação, pelo conhecimento compartilhado. Seu compromisso e empenho foram fundamentais para a realização deste trabalho, e sou grato por todas as horas extras dedicadas à minha orientação. À professora Bárbara Giancesini, pelo suporte indispensável na etapa de modelagem e pelo apoio contínuo no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos de graduação, Daniel Garcia e Marcos Eduardo, pelo compartilhamento de conhecimento, pelas risadas e pelos momentos de frustração e superação. Aos amigos Anderson, Jackson e Robson, com quem dividi não apenas os desafios acadêmicos, mas também a convivência diária, agradeço por todas as experiências enriquecedoras que vivemos juntos.

Ao Grupo Aço Cearense, em especial ao time de Manutenção e Engenharia, pela oportunidade de crescimento profissional e pela disponibilidade em contribuir para a realização deste estudo.

“O trabalho perseverante vence todos os obstáculos.”

(Virgílio, Geórgicas)

## RESUMO

Os desequilíbrios são fenômenos comuns nos sistemas elétricos trifásicos. No cenário industrial, os desequilíbrios de tensão podem causar diversos prejuízos à operação do sistema, provocando o mal funcionamento e a perda de eficiência da planta. Nesse tocante, este trabalho tem como objetivo analisar o impacto dos desequilíbrios de tensão sobre a operação de uma planta industrial de conformação de aço, a qual é alimentada em 13,8kV pela concessionária de energia local. Para isso, foram realizados estudos de caráter prático e computacional. Os estudos de cunho prático foram conduzidos a partir de medições em campo utilizando um analisador de energia. Os estudos computacionais foram realizados por meio da modelagem computacional da planta industrial no software MATLAB/Simulink. A partir dos recursos supracitados, foram realizados dois estudos de caso, um primeiro com foco no impacto dos desequilíbrios de tensão sobre a origem dos desequilíbrios de corrente da indústria e um segundo direcionado à avaliação da influência dos desequilíbrios de tensão sobre a geração de harmônicos da planta. No primeiro estudo de caso, a partir das medições em campo, foram apurados desequilíbrios de tensão e corrente na ordem de 1,57% e 17,34%, respectivamente. Embora o desequilíbrio de tensão esteja abaixo do limite regulamentado, ele contribui para a alta incidência de interrupções não programadas de energia. Além disso, foi constatado que a origem dos desequilíbrios de corrente da indústria está majoritariamente associada ao desbalanceamento da tensão de suprimento. No segundo estudo de caso, foi apurado que as distorções harmônicas totais por fase estavam abaixo dos limites estabelecidos no PRODIST. Todavia, constatou-se que os desequilíbrios de tensão intensificam as distorções harmônicas totais de tensão e corrente, visto que provocam o surgimento de componentes harmônicas não características como as de 3ª, 9ª e 15ª ordens. Destaca-se que a modelagem computacional desenvolvida mostrou-se uma ferramenta robusta, podendo ser utilizada em estudos futuros da planta industrial.

**Palavras-chave:** Desequilíbrio de tensão. Desequilíbrio de corrente. Distorção harmônica. Modelagem computacional.

## ABSTRACT

Unbalances are a common phenomenon in three-phase electrical systems. In the industrial scenario, voltage imbalances can cause several damages to the system operation, causing malfunction and loss of efficiency of the plant. In this regard, this study aims to analyze the impact of voltage imbalances on the operation of an industrial steel forming plant, which is supplied at 13.8 kV by the local power utility. To this end, practical and computational studies were carried out. The practical studies were conducted based on field measurements using an energy analyzer. The computational studies were performed through computational modeling of the industrial plant in MATLAB/Simulink software. Using the aforementioned resources, two case studies were carried out, the first focusing on the impact of voltage imbalances on the origin of industrial current imbalances and the second aimed at evaluating the influence of voltage imbalances on the harmonic generation of the plant. In the first case study, based on field measurements, voltage and current imbalances of 1.57% and 17.34%, respectively, were found. Although the voltage imbalance is below the regulated limit, it contributes to the high incidence of unscheduled power outages. In addition, it was found that the origin of current imbalances in the industry is mainly associated with the unbalance of the supply voltage. In the second case study, it was found that the total harmonic distortions per phase were below the limits established in PRODIST. However, the voltage imbalances intensified the total harmonic distortions of voltage and current, since they cause the emergence of non-characteristic harmonic components such as 3rd, 9th and 15th order. It is worth noting that the computational modeling developed proved to be a robust tool and can be used in future studies of the industrial plant.

**Keywords:** Voltage unbalance. Current unbalance. Harmonic distortion. Computational modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação fasorial de tensões fase-neutro de um sistema equilibrado . . .	18
Figura 2 – Bobinas de fio-máquina . . . . .	27
Figura 3 – Tela soldada para construção civil . . . . .	29
Figura 4 – Treliça para construção civil . . . . .	29
Figura 5 – Processo de Laminação . . . . .	30
Figura 6 – Processo de Trefilação . . . . .	30
Figura 7 – Modelo de Compressor Industrial . . . . .	31
Figura 8 – Compressor Parafuso . . . . .	33
Figura 9 – Diagrama Unifilar Simplificado da Indústria . . . . .	35
Figura 10 – Duração das interrupções (em minutos) por processo devido falha nos com- pressores . . . . .	36
Figura 11 – Quantidade das interrupções por mês devido falha nos compressores . . . . .	36
Figura 12 – Medição realizada no barramento do QGBT 1.1 . . . . .	37
Figura 13 – Analisador Instalado no QGBT 1.1 . . . . .	37
Figura 14 – Levantamento de cargas - dados de placa do motor 8 . . . . .	39
Figura 15 – Inversores para acionamento das cargas . . . . .	39
Figura 16 – Parâmetros utilizados na simulação . . . . .	41
Figura 17 – Modelagem do equivalente de rede de média tensão e transformador de entrada	41
Figura 18 – Parâmetros inseridos no bloco de motor de indução no <i>Simulink</i> . . . . .	42
Figura 19 – Modelagem dos motores acionados por partida direta . . . . .	43
Figura 20 – Modelo para motores acionados por inversor de frequência . . . . .	43
Figura 21 – Sistema Completo modelado no <i>Simulink</i> . . . . .	44
Figura 22 – Medidor de potência no <i>Simulink</i> . . . . .	45
Figura 23 – Parâmetros da fonte de tensão desequilibrada no <i>Simulink</i> . . . . .	46
Figura 24 – Fator de desequilíbrio de corrente obtido no <i>Simulink</i> . . . . .	46
Figura 25 – FFT Analyzer . . . . .	47
Figura 26 – Forma de onda de corrente no barramento do <i>Quadro Geral de Baixa Tensão</i> (QGBT)1.1. . . . .	48
Figura 27 – Forma de onda de tensão no barramento do QGBT1.1. . . . .	48
Figura 28 – Corrente eficaz medida no barramento do QGBT-1.1 . . . . .	50
Figura 29 – Tensão eficaz medida no barramento do QGBT-1.1 . . . . .	50

Figura 30 – Impacto do aumento do $FDv\%$ no $FDi\%$ . . . . .	52
Figura 31 – Medição das distorções harmônicas de tensão por fase . . . . .	54
Figura 32 – Medição das distorções harmônicas de corrente por fase . . . . .	54
Figura 33 – Espectro harmônico de tensão no barramento do QGBT-1.1 - sem desequilíbrio	55
Figura 34 – Espectro harmônico de corrente no barramento do QGBT-1.1 - sem desequilíbrio	56
Figura 35 – Espectro harmônico de tensão no barramento do QGBT-1.1 - com desequilíbrio	56
Figura 36 – Espectro harmônico de corrente no barramento do QGBT-1.1 - com desequilíbrio . . . . .	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de Conformidade de Desequilíbrio de Tensão . . . . .	23
Tabela 2 – Agrupamento de Cargas do QGBT-1.1 . . . . .	40
Tabela 3 – Tensões de fase aplicadas para cada valor de fator de desequilíbrio (fase-neutro)	45
Tabela 4 – Valores Simulados e Nominais no Barramento do QGBT-1.1. . . . .	48
Tabela 5 – Valores máximos, médios e mínimos medidos. . . . .	51
Tabela 6 – Valores medidos dos fatores de desequilíbrio. . . . .	51
Tabela 7 – Fatores de Desequilíbrios Simulados. . . . .	52
Tabela 8 – Fatores de Desequilíbrio. . . . .	53
Tabela 9 – Valores de DTH por fase. . . . .	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
CA	<i>Concreto Armado</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
DTI	<i>Distorção Harmônica Total de Corrente</i>
DTT	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão</i>
FD	<i>Fator de Desequilíbrio</i>
FDi	<i>Fator de Desequilíbrio de Corrente</i>
FDv	<i>Fator de Desequilíbrio de Tensão</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GD	<i>Geração Distribuída</i>
PRODIST	<i>Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional</i>
PWM	<i>Modulação por Largura de Pulso</i>
QEE	<i>Qualidade da Energia Elétrica</i>
QGBT	<i>Quadro Geral de Baixa Tensão</i>
THD	<i>Taxa de Distorção Harmônica</i>
VTCD	<i>Variações de Tensão de Curta Duração</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca Registrada
%	Porcentagem
A	Ampère
I	Corrente elétrica
$I_{cc}$	Corrente de curto-circuito
$\mu$	Micro
W	Watt
VA	Volt-Ampère
k	Kilo
M	Mega
ms	Milissegundo
s	Segundo
$S_{cc}$	Potência de curto-circuito

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Desequilíbrio de tensão e corrente em sistemas elétricos</b>	<b>18</b>
<b>2.1.1</b>	<i>Origem dos desequilíbrios nos sistemas elétricos</i>	<b>19</b>
<b>2.1.2</b>	<i>Indicadores de desequilíbrio de tensão e corrente</i>	<b>21</b>
<b>2.1.3</b>	<i>Limites de conformidade</i>	<b>22</b>
<b>2.1.4</b>	<i>Impacto dos desequilíbrios em sistemas industriais</i>	<b>23</b>
<b>2.1.5</b>	<i>Estratégias para mitigação dos desequilíbrios</i>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Processos para conformação do aço em sistemas industriais</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Vergalhão CA-60</i>	<b>28</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Processo de Laminação</i>	<b>29</b>
<b>2.2.3</b>	<i>Processo de Trefilação</i>	<b>30</b>
<b>2.2.4</b>	<i>Compressores de ar</i>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Características do sistema industrial</b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Registros em campo</b>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem computacional</b>	<b>38</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Validação da modelagem computacional</i>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Caso 1 - Impacto do desequilíbrio de tensão no desbalanceamento de corrente</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Caso 2 - Impacto do desequilíbrio de tensão sobre as distorções harmônicas</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>58</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda por energia elétrica impulsionou a expansão dos sistemas elétricos de potência, resultando na operação mais próxima dos limites de carregamento. Esse cenário aumentou a complexidade operacional e a necessidade de prever o comportamento dos sistemas sob diferentes condições, desde a operação normal até situações de contingência. Além disso, intensificou-se a preocupação com a *Qualidade da Energia Elétrica* (QEE) fornecida, especialmente em função dos desequilíbrios nos sistemas e do aumento da presença de equipamentos sensíveis a distúrbios elétricos, tanto na indústria quanto nas redes de distribuição.

A qualidade de energia elétrica é fundamental para o funcionamento eficiente e confiável de sistemas elétricos, sobretudo no setor industrial, onde a continuidade e a estabilidade do fornecimento de energia são cruciais para a operação dos processos produtivos. Segundo Arrillaga et al. (2000), a QEE pode ser definida como a adequação da tensão, frequência e continuidade do fornecimento, de forma que atenda às exigências dos equipamentos conectados ao sistema. Problemas relacionados à QEE, como quedas de tensão, harmônicos, desequilíbrios de tensão e de corrente, podem acarretar perdas significativas de produtividade e custos operacionais elevados.

No Brasil, a qualidade do fornecimento de energia elétrica é regulamentada pela *Agência Nacional de Energia Elétrica* (ANEEL), de acordo com os *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional* (PRODIST). Em seu 8º módulo, o PRODIST apresenta a caracterização dos fenômenos de regime permanente e transitório, bem como os indicadores e respectivos limites de conformidade associados. As diretrizes estabelecidas são fundamentais para a garantia do suprimento de energia de acordo com padrões adequados, notadamente em sistemas industriais, nos quais a continuidade e a confiabilidade do serviço são requisitos obrigatórios para a manutenção dos processos de produção.

Dentre os fenômenos salientados no PRODIST, os desequilíbrios se destacam como uma das principais causas de degradação do desempenho de sistemas industriais, haja vista a característica predominante das cargas presentes nesses sistemas, como motores de indução e inversores de frequência, entre outros equipamentos/dispositivos de alta sensibilidade (ANEEL, 2017). Os desequilíbrios ocorrem quando, em um sistema trifásico, as diferentes fases do sistema apresentam valores de tensão ou de corrente distintos em módulo ou defasagem angular diferente de 120° elétricos entre si, podendo ocorrer de forma isolada ou simultânea (GOSBELL *et al.*,

2002).

Os desequilíbrios podem ter diversas origens, incluindo a distribuição assimétrica de cargas monofásicas em redes trifásicas, falhas ou desconexões em uma das fases do sistema, assimetrias nas impedâncias da rede elétrica, dentre outros (LIMA, 2016). Além disso, variações no consumo de grandes cargas industriais podem intensificar o desequilíbrio, resultando em impactos negativos como aumento das perdas elétricas, aquecimento excessivo dos equipamentos e redução da vida útil dos motores (JUNIOR, 2009).

Nesse sentido, a avaliação de desempenho de sistemas, frente aos desequilíbrios de tensão, é assunto de grande interesse no cenário industrial, haja vista os efeitos sobre os componentes do sistema, bem como os impactos sobre a perda de receita do empreendimento.

## **1.1 Justificativa**

Diante da crescente demanda por confiabilidade e eficiência energética no setor industrial, torna-se essencial monitorar e mitigar fatores que impactam diretamente no desempenho dos equipamentos elétricos e processos industriais. O desequilíbrio de tensão é um dos desafios enfrentados em sistemas industriais, podendo reduzir a vida útil de motores de indução, aumentar as perdas elétricas e comprometer a operação de processos produtivos críticos (ARRILLAGA *et al.*, 2000).

Além dos impactos nos equipamentos, a presença de tensões desequilibradas pode resultar em interrupções operacionais não planejadas, afetando diretamente a produtividade e elevando os custos de manutenção corretiva. Como destacado por Baggini (2008), níveis elevados de desequilíbrio podem gerar aquecimento excessivo nos enrolamentos dos motores, reduzindo sua eficiência e vida útil.

Paralelamente, tem-se efeitos sobre os dispositivos que empregam eletrônica de potência, os quais são popularmente utilizados para controle de velocidade de motores em sistemas industriais. O surgimento de distorções harmônicas não características, oriundas da tensão de suprimento desequilibrada, é uma situação que pode aumentar a complexidade do problema, além de demandar maiores investimentos para a mitigação harmônica, tal como relatado em (NASCIMENTO, 2017; GROTZBACH; XU, 1993).

## 1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo realizar uma análise sobre os impactos dos desequilíbrios de tensão na operação de um planta industrial de conformação de aço.

Os objetivos específicos do trabalho são descritos nos seguintes pontos:

1. Apresentar os fundamentos dos desequilíbrios de tensão no contexto dos Sistemas Elétricos Industriais;
2. Modelar, testar e validar o sistema industrial usando o software MATLAB/Simulink®;
3. Realizar medições em campo no sistema industrial para apuração de indicadores de qualidade de energia elétrica à luz do Módulo 8 do PRODIST;
4. Verificar os impactos gerados pelo desequilíbrio de tensão no desequilíbrio de corrente de um complexo industrial.
5. Avaliar o impacto do desequilíbrio de tensão sobre a geração de harmônicos da indústria.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho é dividido em cinco capítulos e referências bibliográficas, incluindo este de introdução, em que são apresentados os objetivos (geral e específicos) e as justificativas do trabalho.

No segundo capítulo são apresentados os fundamentos teóricos sobre os desequilíbrios de tensão e corrente em sistemas elétricos, abordando suas causas, efeitos e os requisitos normativos aplicáveis ao problema.

Na sequência, no terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada no trabalho. Nesse capítulo são detalhados os procedimentos experimentais, as características do sistema industrial, incluindo a obtenção de registros de campo e a implementação da modelagem computacional no software MATLAB/Simulink®.

No quarto capítulo são discutidos os resultados obtidos, comparando medições reais e simulações para avaliar a influência do desequilíbrio de tensão sobre o desempenho das cargas industriais.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, destacando as principais observações e contribuições do estudo, além de sugestões para trabalhos futuros.

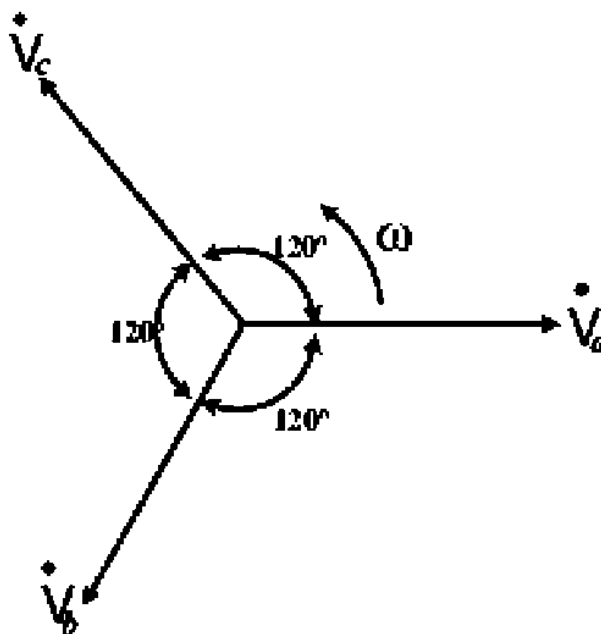
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais sobre o desequilíbrio de tensão e corrente em sistemas elétricos industriais, abordando suas origens, principais indicadores, limites de conformidade, impactos no desempenho dos equipamentos e estratégias de mitigação. Além disso, serão introduzidos os processos de conformação do aço empregados na indústria estudada, incluindo laminação, trefilação e produção do vergalhão CA-60. Por fim, será analisado o funcionamento dos compressores de ar da planta, destacando seu papel na operação do sistema e sua relação com a estabilidade elétrica.

### 2.1 Desequilíbrio de tensão e corrente em sistemas elétricos

Um sistema trifásico com tensões equilibradas é constituído pelas três fases com o mesmo módulo e defasadas entre si de  $120^\circ$ , de modo que a sequência de fases direta ABC indica que a tensão na fase B estará atrasada de  $120^\circ$  da tensão na fase A e a tensão na fase C estará atrasada de  $240^\circ$  em relação a tensão na fase A (ARÃO, 2014), como representado nas equações (2.1), (2.2), (2.3) e evidenciado na Figura 1.

Figura 1 – Representação fasorial de tensões fase-neutro de um sistema equilibrado



Fonte: Adaptado de Lima (2016)

$$\bar{V}_A = |V|\angle 0^\circ \quad (2.1)$$

$$\bar{V}_B = |V|\angle -120^\circ \quad (2.2)$$

$$\bar{V}_C = |V|\angle 120^\circ \quad (2.3)$$

Em que:

$\bar{V}_A$ ,  $\bar{V}_B$  e  $\bar{V}_C$  são os fasores de tensão das fases A, B e C, respectivamente; e  $|V|$  é o módulo da tensão eficaz fase-neutro.

No entanto, essa condição nem sempre é respeitada, uma vez que desequilíbrios são comuns em sistemas elétricos. De acordo com a definição elaborada pelo PRODIST, o desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de  $120^\circ$  entre as tensões de fase do mesmo sistema.

As correntes desequilibradas podem ser produzidas a partir de tensões desequilibradas. Similarmente, tensões desequilibradas podem ser originadas por correntes desequilibradas devido às quedas de tensão sobre impedâncias do sistema (BENETELI, 2015). Esse efeito recíproco entre tensão e corrente reforça a necessidade de compreender os mecanismos que originam esses fenômenos e sua propagação no sistema elétrico.

### ***2.1.1 Origem dos desequilíbrios nos sistemas elétricos***

O desequilíbrio de tensão pode ser originado por fatores estruturais ou funcionais. As causas estruturais estão relacionadas a assimetrias na rede elétrica, como transformadores, impedâncias de rede de distribuição e linhas de transmissão desbalanceadas. Esses fatores, via de regra, apresentam pouca variação ao longo do tempo, tornando o desequilíbrio praticamente constante. Já as causas funcionais decorrem majoritariamente da distribuição desigual de carga entre as fases, seja pela presença de cargas trifásicas desequilibradas, pela má alocação de cargas monofásicas ou pela variação da demanda ao longo dos ciclos operacionais. Exemplos comuns desse tipo de causa são os consumidores residenciais e industriais (REZENDE; SAMESIMA, 2013).

Em um sistema de distribuição, o equilíbrio perfeito de cargas entre as fases é uma condição dita ideal. Na prática, essas cargas estão em constante variação devido a fatores imprevisíveis, como o comportamento dos consumidores de energia. Conseqüentemente, mesmo que a distribuição inicial das cargas seja cuidadosamente planejada, o equilíbrio completo é dificilmente alcançado. Como resultado, cada fase apresentará correntes eficazes distintas, gerando um desequilíbrio no sistema (WANG; PIERRAT, 2001).

Segundo Gregory (2020), esses desequilíbrios podem ser causados por diversos fatores, incluindo a distribuição assimétrica de cargas monofásicas, falhas em condutores ou conexões, e diferenças nas impedâncias de linhas e transformadores. Além disso, múltiplas fontes de assimetrias e variações operacionais adicionam incerteza à real manifestação do problema, dificultando a identificação precisa das causas. Dentre os principais fatores que aumentam a complexidade do processo de determinação da origem do problema, destacam-se os seguintes:

- Características das cargas: Em um sistema elétrico podem conter cargas com uma variedade de características operacionais, o que dificulta a identificação da origem do problema, mesmo que internamente.
- Desequilíbrios pré-existentes: As redes elétricas geralmente apresentam níveis de desequilíbrio de tensão de *background*. Esses desequilíbrios resultam da interação entre assimetrias provenientes de sistema de transmissão, distribuição, consumidores e prossumidores, além de outros agentes conectados, dificultando a avaliação precisa da contribuição de cada agente para o desequilíbrio total do sistema.
- Nível de curto-circuito: Redes com baixo nível de curto-circuito são mais vulneráveis a distúrbios de qualidade da energia elétrica. Assim, uma carga desbalanceada que não provocaria grandes desequilíbrios em uma rede robusta pode, em redes com baixo nível de curto-circuito, levar à violação dos limites regulamentares.
- Dinamicidade do sistema: A operação do sistema elétrico é influenciada por variações de carga, mudanças na rede e geração intermitente. Esse comportamento dinâmico torna a avaliação da qualidade da energia elétrica ainda mais desafiadora, pois as condições do sistema podem se alterar rapidamente.
- Interações com outros distúrbios: Além do desequilíbrio de tensão, outros distúrbios podem coexistir no sistema, como distorções harmônicas, variações de tensão em regime permanente e flutuações de tensão. A combinação desses fenômenos aumenta a complexidade das análises.

Além desses fatores, o crescimento da *Geração Distribuída* (GD) tem contribuído para o aumento do desbalanço dos sistemas de distribuição, uma vez que grande parte destes empreendimentos são conectados ao sistema por módulos monofásicos. Esse fenômeno pode resultar em assimetrias, intensificando os efeitos do desequilíbrio nas redes elétricas.

O aumento da GD exige modelos de componentes mais precisos e de ferramentas eficientes para avaliação do sistema, garantindo uma operação segura e um planejamento adequado da rede elétrica. Nesse contexto, efeitos anteriormente negligenciados passaram a ser reconsiderados, especialmente devido ao crescimento do nível de desequilíbrio nas redes de distribuição. Um desses efeitos é o acoplamento mútuo das linhas de distribuição entre diferentes níveis de tensão, fenômeno que se torna relevante quando há cargas trifásicas e monofásicas distribuídas de maneira assimétrica. Esse efeito pode impactar significativamente o perfil de tensão da rede e comprometer a qualidade do fornecimento de energia, tornando essencial o desenvolvimento de modelos mais robustos para análise de fluxo de carga em redes desequilibradas (YAN; SAHA, 2013).

### 2.1.2 Indicadores de desequilíbrio de tensão e corrente

De acordo com módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), os níveis de desequilíbrio de tensão podem ser aferidos por meio do indicador definido como *Fator de Desequilíbrio* (FD), o qual pode ser obtido através do método das componentes simétricas.

O método das componentes simétricas é uma ferramenta matemática de grande importância para análise de circuitos elétricos não equilibrados, sendo baseado no teorema de Fortescue (FORTESCUE, 1918). O método determina que qualquer conjunto trifásico de vetores não equilibrados pode ser representado por três sistemas equilibrados de vetores, sendo estes denominados de sequência positiva, negativa e zero, para isso utiliza-se a matriz inversa de Fortescue, em consonância com a equação (2.4).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

De forma que  $V_0$  correspondente à tensão da componente de sequência zero,  $V_-$  a tensão da componente de sequência negativa,  $V_+$  a tensão da componente de sequência positiva,

$\alpha$  o operador rotacional que equivale a  $1\angle 120^\circ$ ,  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$  as tensões eficazes fase-neutro.

Utilizando o método das componentes simétricas, o fator de desequilíbrio de tensão é definido pela divisão entre o módulo da tensão de sequência negativa e o módulo de tensão de sequência positiva, conforme evidenciado na equação (2.5).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Esse indicador permite avaliar o impacto do desequilíbrio em qualquer barra de um sistema elétrico.

Ainda de acordo com o PRODIST, o FD pode ser calculado utilizando o método CIGRÉ, o qual se baseia no método das componentes simétricas. No entanto, esse método é mais prático e simplificado, uma vez que utiliza apenas as informações dos módulos das tensões de linha do ponto de monitoramento, sendo enunciado por (2.6) e (2.7).

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.7)$$

Tais considerações são de grande utilidade para a avaliação das anomalias em campo, visto que nem todos os medidores são capazes de fornecer os ângulos de fase das grandezas (Arão, 2014). Adicionalmente, salienta-se que esta metodologia, conhecida como método CIGRÉ, retorna o mesmo valor percentual do método das Componentes Simétricas (IEEE STD 1159, 2019).

### 2.1.3 Limites de conformidade

A propagação dos desequilíbrios no sistema elétrico pode comprometer significativamente a operação de equipamentos das redes elétricas. Para garantir a qualidade da energia fornecida, normas nacionais e internacionais estipulam indicadores e limites máximos de desequilíbrio de tensão, visando mitigar os efeitos adversos e assegurar a confiabilidade do sistema elétrico.

No Brasil, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico (PRODIST), estabelecidos pela ANEEL, determinam limites para o desequilíbrio de tensão, visando assegurar a qualidade do fornecimento elétrico. Segundo essas diretrizes, o percentual máximo permitido é de 3% para sistemas com tensão inferior a 2,3 kV e de 2% para redes entre 2,3 kV e 230 kV, conforme mostrado na Tabela 1. O cálculo do fator de desequilíbrio pode ser realizado pelo método das Componentes Simétricas ou pelo método CIGRÉ (ANEEL, 2021).

Tabela 1 – Limites de Conformidade de Desequilíbrio de Tensão

INDICADOR	TENSÃO NOMINAL	
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: Módulo 8 - PRODIST.

Nota-se, portanto, que os indicadores e limites estabelecidos referem-se meramente às tensões de suprimento. No tocante aos desequilíbrios de corrente, embora possam ser prontamente obtidos pelas expressões (2.6) e (2.7), não são estabelecidos valores de referência ou limites de conformidade.

Outro fato relevante se trata dos requisitos de medição para a apuração do indicador FD95%. De acordo com o PRODIST, para as medições podem ser utilizados analisadores Classe A ou Classe S de acordo com a IEC 61000-4-30. Para a avaliação de conformidade, devem ser realizadas medições durante o período de 7 dias consecutivos, a fim de compor um conjunto de 1008 leituras válidas, com agregação temporal de 10 minutos. Dessa forma, o indicador FD95% é apurado aplicando-se o percentil 95% ao conjunto de 1008 leituras válidas.

#### **2.1.4 Impacto dos desequilíbrios em sistemas industriais**

A ocorrência de tensões desequilibradas nos sistemas elétricos industriais é um dos fatores mais comuns que afetam a qualidade de energia do fornecimento elétrico. Os desequilíbrios provocam consequências prejudiciais no funcionamento de equipamentos e sistemas elétricos, comprometendo, na maioria dos casos, o seu desempenho e a sua vida útil, já que potencializam as perdas e o aquecimento dos equipamentos. Nos sistemas industriais, os desequilíbrios de tensão podem provocar impactos expressivos na operação de equipamentos típicos desses sistemas, como transformadores, motores elétricos e inversores de frequência (FILHO, 2008).

Os motores de indução são particularmente sensíveis a tensões desequilibradas. A

análise por meio das componentes simétricas demonstra que em sistemas equilibrados apenas a componente de sequência positiva está presente, a qual mantém o motor operando corretamente. No entanto, em condições de desequilíbrio, a presença da componente de sequência negativa gera um campo magnético no entreferro que gira em sentido contrário ao do rotor, induzindo torques oscilatórios e reduzindo a eficiência do equipamento (JOUANNE; BANERJEE, 2001).

Esse efeito se agrava devido à baixa impedância associada à sequência negativa. Desequilíbrios de tensão podem provocar correntes de sequência negativa elevadas que circulam no motor, aumentando perdas elétricas e aquecimento, o que leva a perda de vida útil e falhas prematuras. De acordo com a norma NEMA MG-1 (2014), para motores de indução, um pequeno percentual de desequilíbrio de tensão pode resultar em um aumento significativo no desequilíbrio de corrente, em uma proporção de aproximadamente 6 a 10 vezes superiores ao fator de desequilíbrio de tensão.

Os desequilíbrios de tensão afetam significativamente o desempenho dos motores de indução, influenciando sua eficiência e confiabilidade operacional. Em regime estacionário, onde se assume um nível constante de desequilíbrio, observa-se uma redução na capacidade de sobrecarga do motor, além do aumento das correntes no estator e rotor acima dos valores nominais. Como consequência, há elevação das perdas, aquecimento excessivo dos enrolamentos e diminuição da eficiência do motor, o que pode comprometer sua vida útil e aumentar os custos de operação (LIMA, 2016).

Outro efeito relevante do desequilíbrio de tensão em motores assíncronos é o surgimento de vibrações, que podem resultar na necessidade de substituições prematuras dos rolamentos. Esse fenômeno ocorre devido à excitação de frequências não desejadas na estrutura mecânica do motor, induzidas pelo desequilíbrio da rede elétrica. Essas vibrações podem comprometer o alinhamento do rotor e aumentar a severidade do desgaste mecânico, reduzindo a confiabilidade do sistema e exigindo manutenção corretiva frequente (WALLACE *et al.*, 1997).

Além destes efeitos, os desequilíbrios de tensão podem causar outros impactos negativos no desempenho dos motores elétricos, como variações na velocidade de rotação, pulsações de torque, aumento do nível de ruído, alterações na aceleração do motor e mudanças no escorregamento, resultando em instabilidade operacional (ALWASH; IKHWAN, 1995). Ademais, a exposição prolongada a essas condições pode acelerar a degradação dos materiais isolantes devido ao aquecimento excessivo, tornando os motores mais vulneráveis a falhas elétricas e mecânicas (DYMOND; STRANGES, 2007).

Outro efeito importante está relacionado à operação de conversores eletrônicos alimentados por tensões desequilibradas. De acordo com Gnacinski (2008), a interação entre o desequilíbrio de tensão e cargas não lineares pode resultar no surgimento de harmônicos de ordens não convencionais, denominados harmônicos não característicos. Esse fenômeno pode afetar o desempenho de dispositivos sensíveis e conectados à mesma rede, ampliando os impactos negativos na indústria (NASCIMENTO, 2017).

Os conversores de potência operam com padrões específicos de geração de harmônicos, os quais podem ser previstos por meio da relação  $n = pK \pm 1$  para harmônicos de corrente no lado CA e  $n = pK$  para harmônicos de tensão no lado CC, onde  $K$  é um número inteiro positivo e  $p$  representa o número de pulsos do conversor. Esses componentes espectrais, previstos para a operação normal do conversor, são denominados harmônicos característicos. No entanto, harmônicos ditos não característicos não seguem essa relação matemática (TEIXEIRA, 2009).

Nos sistemas industriais, predominam conversores de seis pulsos, amplamente utilizados para acionamento de motores e controle de processos. Para esse tipo de conversor, os harmônicos característicos ocorrem nas ordens 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>, sendo essas as componentes esperadas na análise espectral do sistema. No entanto, quando há desequilíbrio de tensão, a simetria do sistema é comprometida, alterando o espectro harmônico e possibilitando a presença de componentes não característicos. Esse fenômeno ocorre devido às componentes de sequência zero, positiva e negativa da tensão distorcida e desequilibrada, que atuam na carga não linear e podem modificar o espectro de harmônicas de corrente e, conseqüentemente, de tensão (JOUANNE; BANERJEE, 2001).

As distorções harmônicas afetam significativamente o desempenho dos motores de indução, contribuindo para o aumento das perdas elétricas, especialmente nos enrolamentos do rotor, onde o efeito pelicular intensifica a dissipação de energia devido ao aumento da frequência. Esse fenômeno pode comprometer motores com rotor enrolado, tornando-os mais suscetíveis a danos térmicos e mecânicos. Além disso, a distorção harmônica altera os parâmetros do circuito equivalente do motor, tornando necessário o ajuste desses parâmetros para diferentes frequências, a fim de garantir a precisão da modelagem e minimizar impactos operacionais (LIMA, 2016).

De acordo com Lo *et al.* (2000), outro efeito relevante da distorção harmônica está relacionado ao ruído eletromagnético, que se intensifica com o uso de inversores de frequência para controle de velocidade. Enquanto cargas não lineares, os inversores produzem correntes harmônicas, que ao interagir com a impedância da fonte podem levar à distorção na tensão,

resultando em tensões não senoidais que contêm componentes harmônicas de alta frequência, aumentando significativamente o ruído eletromagnético quando suas frequências se aproximam das frequências naturais do motor.

Além do aumento das perdas e da geração de ruído, a distorção harmônica impacta diretamente a resistência e a reatância dos circuitos equivalentes ao estator e ao rotor. O efeito pelicular intensifica a resistência aparente dos enrolamentos do rotor, uma vez que o aumento da frequência dos sinais distorcidos reduz a área útil de condução do condutor, resultando em um acréscimo na resistência aparente do condutor, levando a um maior aquecimento e redução da eficiência energética. Da mesma forma, as perdas no ferro do motor também aumentam proporcionalmente ao quadrado da tensão de alimentação, contribuindo para o envelhecimento térmico dos materiais isolantes e reduzindo a vida útil do equipamento.

Dessa forma, compreender a origem e os impactos do desequilíbrio de tensão em sistemas industriais é essencial para garantir a operação eficiente e confiável das instalações.

### ***2.1.5 Estratégias para mitigação dos desequilíbrios***

A mitigação do desequilíbrio de tensão em sistemas industriais é fundamental para garantir a confiabilidade do fornecimento de energia e a preservação dos equipamentos elétricos. Medidas como a compensação de carga, reconfiguração da distribuição de cargas monofásicas, uso de reguladores monofásicos e o uso de compensadores passivos ou ativos podem ser implementadas para mitigar os efeitos do desequilíbrio e melhorar a qualidade da energia da planta industrial (BENETELI, 2015).

Uma das estratégias amplamente utilizadas é o remanejamento de cargas, que pode ser realizado manual ou automaticamente, visando equilibrar as correntes entre as fases. Nesse contexto, técnicas de reconfiguração de carga são aplicadas para otimizar os chaveamentos nos alimentadores, utilizando algoritmos de estimação de carga para fornecer informações em tempo real. No entanto, por se tratarem de processos discretos, essas estratégias não garantem um balanceamento dinâmico e contínuo do sistema (BROADWATER *et al.*, 1993).

Conforme abordado, as impedâncias de linha desbalanceadas, incluindo transformadores com enrolamentos desequilibrados e suas conexões, são uma das causas do desequilíbrio de tensão nos sistemas elétricos. Em casos onde as impedâncias de linha desiguais são a causa do desequilíbrio, é possível utilizar técnicas de correção de impedância, como a instalação de reatores ou capacitores em série com as linhas, visando minimizar os efeitos do desbalancea-

mento e melhorar a estabilidade da tensão no sistema. Além disso, a escolha e o balanceamento adequado dos transformadores de distribuição, especialmente com o uso de bancos trifásicos completos, são estratégias essenciais para mitigar os impactos dos desequilíbrios e garantir maior estabilidade da tensão (SMITH *et al.*, 1988)

Dentre as estratégias de mitigação para consumidores com carregamentos assimétricos, destacam-se os compensadores de desequilíbrio passivos e ativos. Os compensadores passivos, compostos por indutores e capacitores, ajudam a equilibrar cargas e reduzir os efeitos do desequilíbrio de tensão no sistema de suprimento (GREGORY *et al.*, 2017). Quando combinados com chaves estáticas controladas, permitem ajustes dinâmicos conforme a variação da carga, embora possam introduzir distorções harmônicas, exigindo técnicas adicionais de mitigação (JOUANNE; BANERJEE, 2001).

## 2.2 Processos para conformação do aço em sistemas industriais

Os processos de conformação mecânica são processos de fabricação que empregam a deformação plástica de um corpo metálico, mantendo sua massa e integridade. Alguns desses processos são: forjamento, laminação, extrusão, trefilação e estiramento e podem ser realizados a quente ou a frio (BRITO, 2018).

A planta industrial, objeto de estudo deste trabalho, emprega o processo de conformação para a fabricação de fios de aço de *Concreto Armado* (CA) utilizando o fio-máquina (Figura 2) como matéria-prima. Nesse sentido, são destacados os principais aspectos relacionados a esse processo industrial em particular.

Figura 2 – Bobinas de fio-máquina



Fonte: Aço Verde do Brasil (2025)

### **2.2.1 Vergalhão CA-60**

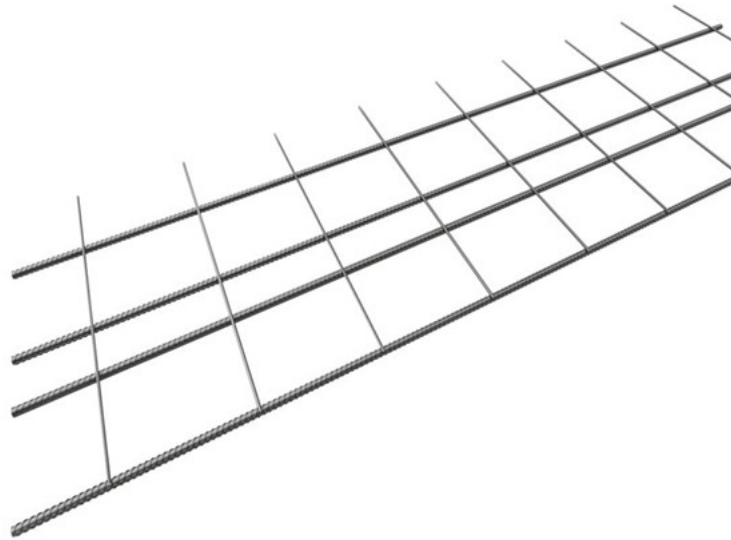
O vergalhão CA-60, amplamente utilizado na construção civil, é o produto final dos processos de conformação mecânica, como laminação e trefilação. Sua produção tem início com o fio máquina, obtido por laminação a quente em siderúrgicas, que posteriormente é submetido a processos de conformação a frio, incluindo trefilação e laminação, garantindo elevada precisão dimensional e controle rigoroso das variáveis do processo.

O uso de aços na construção civil apresenta diversas vantagens, destacando-se a combinação entre dimensões reduzidas e elevada resistência mecânica, além do fato de serem pré-fabricados. Cada componente é produzido de forma industrial, permitindo maior produtividade por meio da padronização dos processos, o que resulta em maior precisão dimensional e otimização da montagem na obra. Além disso, a utilização do aço facilita o transporte e a instalação dos elementos estruturais, contribuindo para a eficiência na execução das construções (TEOBALDO, 2004).

O vergalhão CA-60 é empregado, especialmente no reforço de estruturas de concreto armado, como pilares, vigas, lajes e fundações. Além disso, serve como matéria-prima para a fabricação de diversos produtos pré-fabricados, tais como telas soldadas nervuradas e treliças. As telas soldadas nervuradas são armaduras constituídas por fios de aço CA-60 dispostos ortogonalmente e soldados em seus pontos de interseção, formando malhas quadradas ou retangulares. Essas telas são utilizadas para reforçar pavimentos, pisos industriais e painéis de alvenaria estrutural, proporcionando uniformidade e agilidade na execução das obras. As treliças, por sua vez, são elementos estruturais compostos por barras de aço CA-60 dispostas em formatos triangulares, conferindo rigidez e resistência a lajes e coberturas.

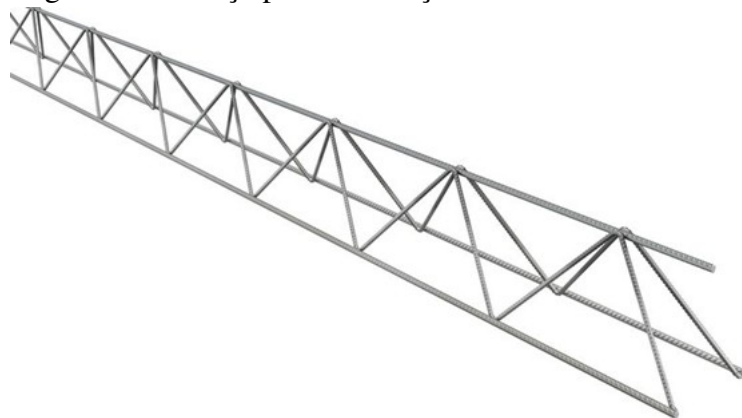
A conformação do aço, especialmente para a produção do vergalhão CA-60, desempenha um papel crucial na construção civil. Processos como laminação e trefilação a frio conferem ao aço propriedades mecânicas aprimoradas, como elevada resistência e ductilidade, essenciais para a segurança e durabilidade das estruturas. Além disso, a utilização de produtos derivados do CA-60, como telas e treliças, contribui para a padronização, eficiência e rapidez na execução das obras. As Figuras 3 e 4 ilustram, respectivamente, a aplicação do CA-60 para fabricação de telas soldadas e treliças.

Figura 3 – Tela soldada para construção civil



Fonte: Grupo Aço Cearense (2025a)

Figura 4 – Treliça para construção civil



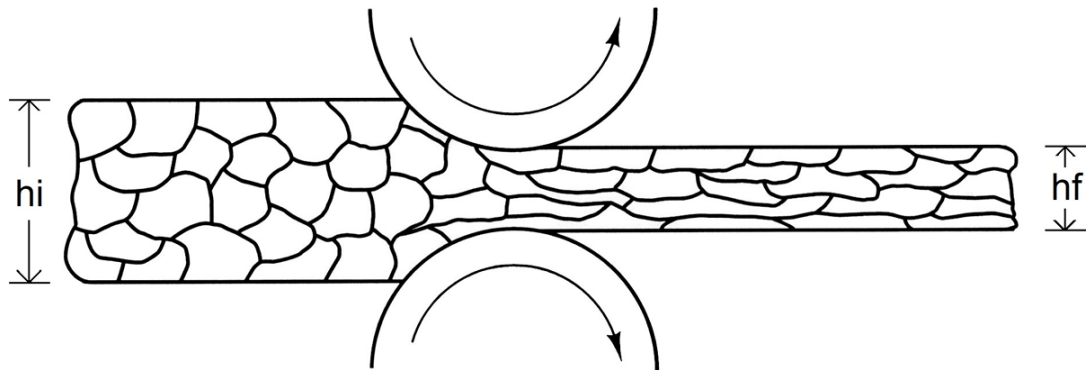
Fonte: Grupo Aço Cearense (2025b)

### **2.2.2 Processo de Laminação**

Entre os métodos de conformação de metais, o processo de laminação (Figura 5) destaca-se como o mais utilizado, em virtude de sua elevada produtividade e da precisão no controle das dimensões do material processado. Esse método tem como principal objetivo reduzir a espessura do material, tornando-o adequado para aplicações específicas (DIETER, 1988).

Conforme Helman e Cetlin (2010), a diminuição da seção transversal do material ocorre pela sua passagem entre dois cilindros que giram com a mesma velocidade em sentidos opostos. O processo, geralmente, é realizado em uma sequência de passes nos laminadores, garantindo a conformação desejada.

Figura 5 – Processo de Laminação

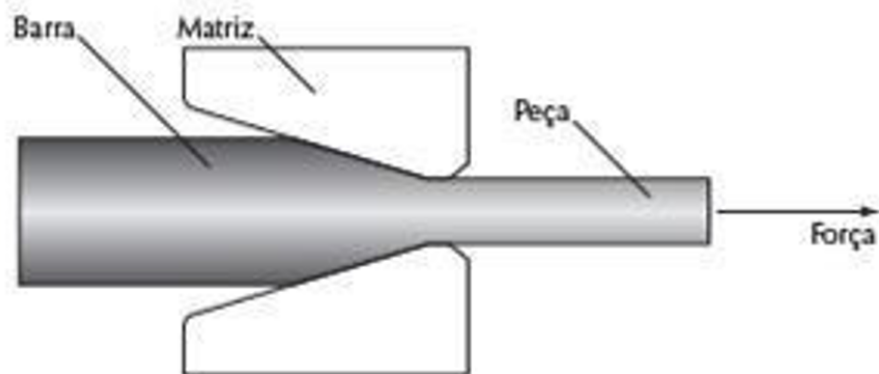


Fonte: Adaptado de (SHACKELFORD, 2021)

### 2.2.3 Processo de Trefilação

A trefilação é um processo de conformação plástica que consiste em puxar um fio, barra ou tubo através de uma ferramenta chamada fieira, a qual possui um furo central de diâmetro decrescente. Essa abertura apresenta um perfil em formato de funil, que pode ser curvo ou cônico, permitindo a redução do material ao longo do processo (BRESCIANI, 2011). A Figura 6 ilustra o processo de trefilação.

Figura 6 – Processo de Trefilação



Fonte: KIMINAMI et al. (2015).

Resumidamente, a trefilação e a laminação são processos de deformação plástica que envolvem forças distintas: a força de trefilação, de natureza trativa, e a força de laminação, de caráter compressivo. No processo de laminação, o fio-máquina é deformado ao ser forçado a passar por um conjunto de rolos que exercem tensões compressivas durante o contato, alterando plasticamente sua forma. Já na trefilação, utiliza-se um dispositivo chamado “bloco de tração”

ou “cabrestante” para aplicar forças trativas que puxam o material, forçando-o a passar entre os rolos e ajustando suas dimensões de acordo com a aplicação desejada.

#### 2.2.4 Compressores de ar

De acordo com Karmouche (2009), muitas indústrias utilizam o ar comprimido como suporte essencial para o funcionamento de ferramentas pneumáticas e outras aplicações. Esse recurso desempenha um papel fundamental em inúmeros processos industriais, representando uma etapa crucial na cadeia produtiva. Além disso, destaca-se que a geração de ar comprimido em uma central industrial envolve um consumo significativo de energia, resultando em custos consideráveis para a operação. A Figura 7 ilustra um modelo de compressor industrial, evidenciando sua estrutura e componentes principais.

Figura 7 – Modelo de Compressor Industrial



Fonte: Atlas Copco (2025)

Segundo Silva (2002), o compressor é o equipamento responsável por converter energia mecânica em energia pneumática. Isso ocorre ao reduzir o espaço físico ocupado pelo ar ou ao aumentar sua energia cinética, resultando no aumento da pressão requerida para os processos industriais. Normalmente, a taxa de compressão é de 1:7, ou seja, o ar atmosférico, com pressão de 1 bar, é comprimido até atingir 7 bar.

Em sistemas pneumáticos, o ar comprimido é produzido a partir de um compressor que capta e comprime o ar atmosférico. Após a compressão, o ar passa por um processo de filtragem para eliminar partículas indesejadas e por um secador que remove a umidade,

garantindo a qualidade do ar. A unidade de tratamento do ar é composta por elementos como: filtro, responsável por eliminar impurezas; válvula reguladora de pressão, que ajusta a pressão para níveis adequados ao sistema; e lubrificador, que adiciona uma quantidade controlada de lubrificante ao ar, reduzindo o atrito e prolongando a vida útil dos componentes móveis. Esses mecanismos asseguram que o ar comprimido esteja limpo, regulado e lubrificado, promovendo a eficiência e a durabilidade do sistema pneumático (SILVA, 2002).

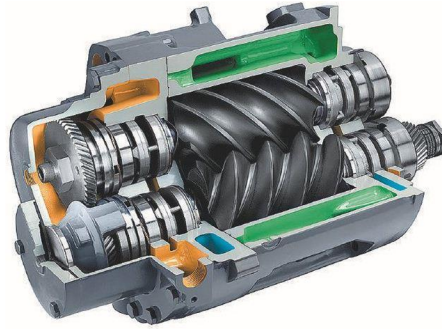
De acordo com Fialho (2011), os compressores podem ser classificados em dois grandes grupos, com base no princípio de funcionamento: compressores volumétricos, também chamados de compressores de deslocamento positivo, e compressores dinâmicos, conhecidos como compressores de deslocamento dinâmico.

Os compressores de deslocamento dinâmico, realizam a compressão de forma contínua, convertendo energia cinética em energia de pressão. Esse processo ocorre quando o gás é acelerado por impulsores em um componente rotativo chamado impelidor. Em seguida, o gás passa por um difusor, que reduz a velocidade do fluido, transformando a energia cinética em entalpia, o que eleva sua pressão antes de ser liberado para consumo (PARKER, 2006).

O grupo dos volumétricos trabalha convertendo a energia mecânica em energia de pressão, por meio da admissão de um volume fixo de gás que, ao ter seu espaço físico reduzido por movimentos, geralmente rotacionais, sofre um aumento de pressão. O gás comprimido é então liberado por uma válvula de descarga e enviado à linha de distribuição e consumo. Os volumétricos incluem compressores alternativos, como os de pistões, e os rotativos, que se subdividem em modelos de palhetas, parafusos e lóbulos. Por outro lado, os compressores dinâmicos são divididos em centrífugos e axiais.

Os compressores de parafuso utilizam dois rotores com formato helicoidal, que giram de maneira sincronizada e em direções opostas, conforme ilustrado na Figura 8. Esses rotores, conhecidos como rotor fêmea e rotor macho, apresentam formatos côncavo e convexo, respectivamente. O rotor fêmea, também chamado de rotor motriz, é o responsável por movimentar o rotor macho por meio do contato direto entre os lóbulos dos parafusos. Nesse tipo de compressor, a pressão do gás aumenta à medida que o volume ocupado pelo fluido diminui durante o deslocamento axial entre os lóbulos dos rotores. A entrada de gás ocorre devido à redução da pressão no bocal de sucção, gerada pelo movimento rotativo dos parafusos, que preenchem os espaços entre os lóbulos, comprimem o gás e o direcionam para o bocal de descarga. (MENDONÇA; MELO, 2021).

Figura 8 – Compressor Parafuso



Fonte: (PACCO, 2013)

Na indústria estudada, os compressores utilizados são do tipo parafuso, tecnologia amplamente empregada em sistemas de ar comprimido industriais devido à sua eficiência e confiabilidade. Nesses equipamentos, o inversor de frequência desempenha um papel fundamental no ajuste da velocidade do motor, regulando a rotação de acordo com a demanda de pressão do sistema. Essa estratégia permite otimizar o consumo de energia elétrica, reduzir o desgaste mecânico e minimizar oscilações de pressão, garantindo maior flexibilidade operacional.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo consta o detalhamento da metodologia utilizada nesse estudo. Esse processo foi organizado em diferentes etapas com o intuito de avaliar detalhadamente os impactos dos desequilíbrios de tensão para operação da planta industrial.

Primeiramente, foi realizado o levantamento das cargas da indústria, no qual foram coletados os dados de placa dos motores e transformadores, além das características de acionamento e operação das cargas que estão envolvidas no processo produtivo da indústria. Além disso, foram avaliados os registros de interrupção da indústria, e também foram realizadas medições em campo utilizando um analisador de energia elétrica. Esse levantamento inicial teve como propósito gerar insumos para a avaliação dos impactos dos desequilíbrios de tensão e corrente sobre a operação da planta industrial, bem como fornecer informações para a modelagem computacional do sistema.

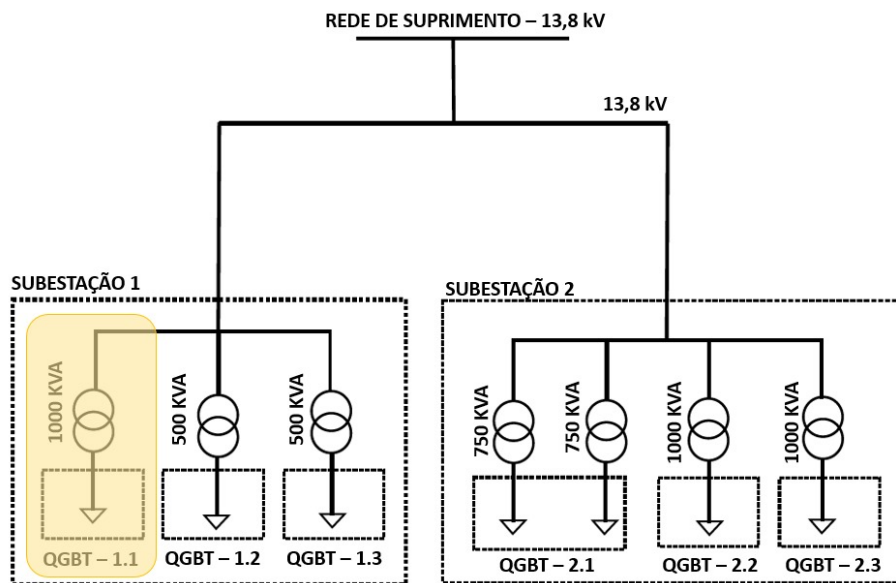
Com base nas informações coletadas, cada carga foi caracterizada individualmente e, em seguida, agregadas por similaridade e modeladas no software MATLAB/Simulink®, de forma a garantir que o modelo representasse o comportamento do sistema real. Para validar o modelo desenvolvido, os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os valores nominais das cargas mapeadas.

#### 3.1 Características do sistema industrial

Os estudos presentes neste trabalho foram realizados em uma indústria de grande porte do setor metal-mecânico, localizada no estado do Ceará, voltada para a conformação de aço. A planta industrial é alimentada em 13,8kV pela concessionária de energia local. A indústria conta com duas subestações, sendo uma composta por três transformadores e outra por 4 transformadores de 13,8kV/380V, totalizando uma potência de 5,5 MVA. O sistema é destinado a suprir a demanda por energia elétrica de diferentes setores da indústria.

O objeto de estudo deste trabalho se tratou do QGBT-1.1 desta indústria, o qual é responsável pela alimentação do setor de laminação e dos compressores industriais. Os compressores desempenham um papel essencial nesta planta, pois são responsáveis por fornecer ar comprimido para as máquinas e equipamentos utilizados nos processos produtivos, sendo imprescindíveis para o funcionamento contínuo da indústria. A Figura 9 apresenta o diagrama unifilar simplificado da planta industrial analisada.

Figura 9 – Diagrama Unifilar Simplificado da Indústria



Fonte: elaborado pelo autor

É válido mencionar que o motivo da escolha do QGBT-1.1 como foco para o estudo realizado, deve-se à sua importância estratégica para o processo produtivo da indústria. Como a maioria das máquinas utiliza acionamentos pneumáticos, ou seja, empregam ar comprimido para gerar movimento, qualquer desequilíbrio que afete a alimentação elétrica desse QGBT pode comprometer o funcionamento dos compressores e, conseqüentemente interromper o fornecimento de ar comprimido para fábrica. Essa interrupção é extremamente prejudicial e impacta diretamente no funcionamento da indústria, visto que sua operação depende essencialmente do fornecimento de ar comprimido.

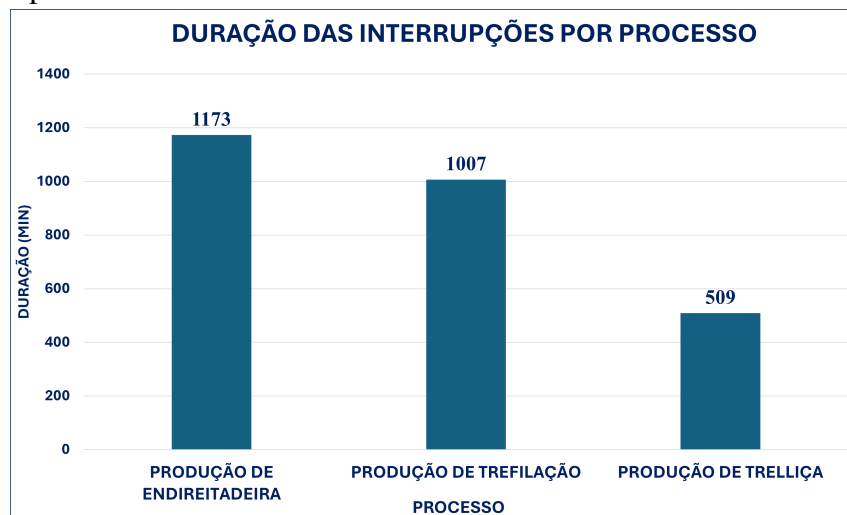
### 3.2 Registros em campo

O estudo realizado neste trabalho foi motivado pela identificação de recorrentes eventos de interrupção dos equipamentos industriais, principalmente dos compressores, como já mencionado, os quais são fundamentais para o processo produtivo, pois fornecem ar comprimido para todas as máquinas e equipamentos.

Na indústria analisada, foram detectados registros de interrupções não programadas pelos dispositivos de proteção. Cabe mencionar que esses dispositivos monitoram a assimetria de tensão entre as fases, os quais devem atuar e desenergizar o circuito caso o valor ultrapasse um limite pré-definido, prevenindo falhas mais graves.

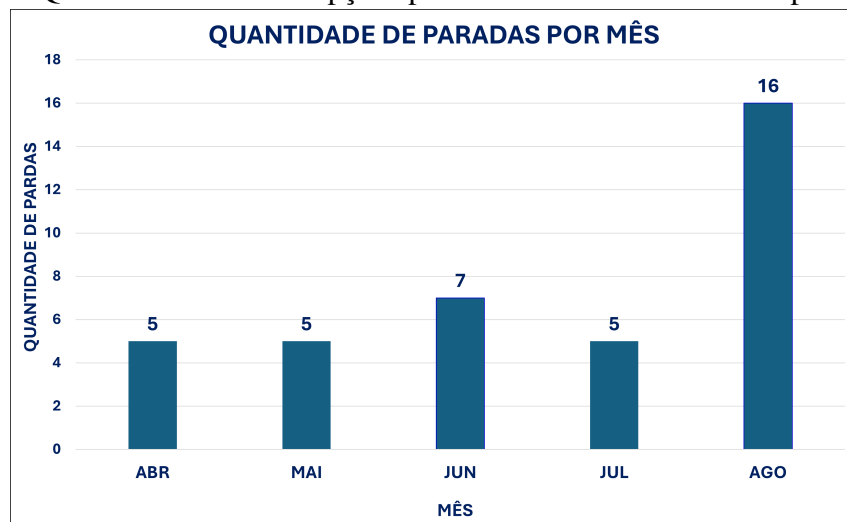
Diante desse cenário, realizou-se uma análise das paradas não programadas ocorridas ao longo de cinco meses de operação da planta, abrangendo o período de abril a agosto. A Figura 10 ilustra a duração total das paradas por tipo de processo, evidenciando que os setores de Endireitadeira e Trefilação foram os mais impactados, com tempos de inatividade de 1.173 e 1.007 minutos, respectivamente. Adicionalmente, a Figura 11 apresenta o quantitativo mensal das paradas devido a falhas nos compressores, totalizando 38 falhas para o período. Os dados coletados evidenciam que as falhas no fornecimento de ar comprimido, provocadas por anomalias no suprimento de energia, apresentam um aumento ao longo do tempo, com destaque para o mês de agosto, no qual registou-se 16 ocorrências.

Figura 10 – Duração das interrupções (em minutos) por processo devido falha nos compressores



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11 – Quantidade das interrupções por mês devido falha nos compressores



Fonte: elaborado pelo autor.

Devido a ocorrência desses eventos, foram realizadas medições em campo para verificar se os níveis de desequilíbrios na planta industrial estavam de acordo com os requisitos normativos. Os detalhes dessa avaliação são apresentados no Capítulo IV.

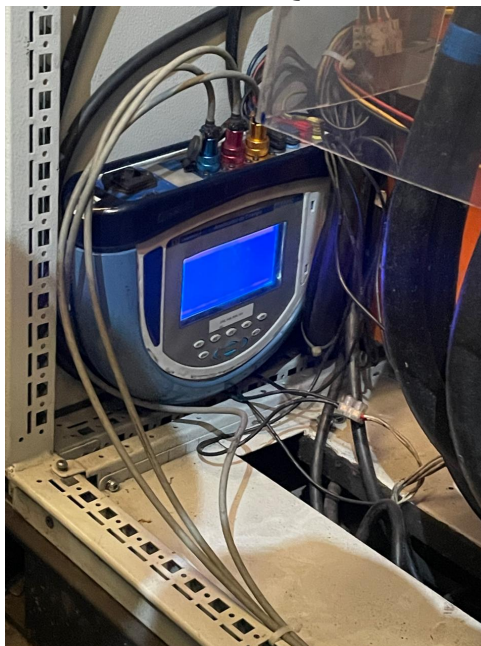
Para realização das medições em campo, foi utilizado um analisador de energia elétrica, modelo RE6000 da EMBRASUL, o qual foi instalado no barramento do QGBT-1.1, conforme indicado nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Medição realizada no barramento do QGBT 1.1



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 13 – Analisador Instalado no QGBT 1.1



Fonte: elaborado pelo autor

As medições foram realizadas ao longo de um período de 7 dias consecutivos, entre 03/09/2024 e 10/09/2024, com um tempo de integralização de 10 minutos, de forma a se obter os 1008 registros, conforme as diretrizes do PRODIST.

### 3.3 Modelagem computacional

A modelagem computacional é fundamental para representar e analisar sistemas elétricos, sendo amplamente utilizada para simular o comportamento de redes em diferentes condições operacionais. Por meio dessa abordagem, é possível analisar fenômenos como transitórios, desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas e outros fatores que afetam diretamente a QEE. Essa aplicação permite prever o impacto de variações nos parâmetros do sistema, com o intuito de auxiliar na mitigação de falhas. Neste trabalho, a ferramenta utilizada para desenvolver essa modelagem foi o software MATLAB/Simulink®, uma plataforma consolidada no campo acadêmico e industrial para estudos e simulações de sistemas elétricos de potência.

O MATLAB/Simulink® é uma ferramenta reconhecida por sua eficiência e flexibilidade na modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. Com uma interface gráfica baseada em blocos, o software possibilita realizar a criação e simulação de modelos matemáticos de maneira intuitiva, eliminando a necessidade de codificação extensa. No contexto dos sistemas elétricos, o *Simulink*® se destaca por sua capacidade de modelar componentes como transformadores, inversores, máquinas elétricas e redes de distribuição, possibilitando a análise de questões como estabilidade, qualidade da energia elétrica e transitórios eletromagnéticos. Outro diferencial do *Simulink* é a possibilidade de realizar análises paramétricas, permitindo o ajuste dinâmico de variáveis do sistema para diferentes cenários operacionais. Além disso, sua integração com bibliotecas específicas, como o *Simscape Electrical*, amplia ainda mais suas funcionalidades ao oferecer modelos pré-configurados e detalhados de componentes elétricos. A utilização do MATLAB/Simulink® neste trabalho foi essencial para avaliar os impactos dos desequilíbrios de tensão no sistema industrial em estudo, proporcionando uma base sólida e confiável para a validação dos resultados e a realização das análises propostas.

Para a realização da modelagem, inicialmente, foi conduzido um trabalho em campo para coletar as informações dos motores conectados ao QGBT-1.1. Durante essa etapa, foram registrados os dados de placa dos motores, permitindo a identificação de suas características elétricas e operacionais. A Figura 14 ilustra um exemplo de placa de um dos motores analisados, evidenciando as informações coletadas durante o levantamento. Já a Figura 15 apresenta alguns

dos inversores utilizados no sistema, responsáveis pelo acionamento de parte das cargas do QGBT-1.1.

Figura 14 – Levantamento de cargas - dados de placa do motor 8



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 15 – Inversores para acionamento das cargas



Fonte: elaborado pelo autor.

Primeiramente, pondera-se que a indústria é predominante formada por cargas motrizes, contendo um grupo ínfimo de cargas alimentadas por circuitos auxiliares, como iluminação geral, climatização, equipamentos de escritório, entre outros. Ressalta-se, portanto,

que esse grupo de cargas não foi representado na modelagem, uma vez que sua influência é desprezível.

Com o intuito de reduzir o esforço computacional ao realizar a modelagem do sistema na ferramenta de simulação, os elementos com características semelhantes foram agrupados. Esse agrupamento foi realizado com base principalmente nos parâmetros de eficiência, potência nominal, tipo de acionamento, escorregamento, rendimento e fator de potência, uma vez que a modelagem computacional de cada conjunto agrupado corresponde à representação de um motor de indução.

As principais cargas que compõem esse QGBT estão descritas na Tabela 2, na qual apresenta-se o agrupamento de cargas, contendo as informações de potência nominal equivalente e forma de acionamento (direta ou via inversores de frequência)

Tabela 2 – Agrupamento de Cargas do QGBT-1.1

QUADRO	GRUPO	CARGA	INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL (kW)
QGBT-01	1	ENDIREITADEIRA 3 e 4	NÃO	110
	2	TORRE DE OSMOSE - BOMBA 1	NÃO	7,5
	3	TORRE DE OSMOSE - BOMBA 2	NÃO	11
	4	TORRE DE OSMOSE - BOMBA 3	NÃO	3,7
	5	TREFILA 4 - MOTOR 1	SIM	36,8
	6	TREFILA 4 - MOTOR 2	SIM	44,13
	7	GERADOR DE ESPIRAS	SIM	180
	8	MONOBLOCO 3 - MOTOR 1	SIM	75
	9	MONOBLOCO 2, TREFILA 3, TREFILA 2 E MONOBLOCO 1	SIM	330
	10	COMPRESSOR 1 e 2	NÃO	74
	11	COMPRESSOR 3	SIM	75
			<b>TOTAL</b>	<b>947,13</b>

Fonte: elaborado pelo autor.

Para o desenvolvimento da modelagem computacional, utilizou-se o *Simulink*, na versão R2024b do MATLAB, em conjunto com a biblioteca *Simscape Electrical*. Nos parâmetros de configuração da simulação, utilizou-se o *solver discrete (no continuous states)* do tipo *Fixed-step*. As configurações adotadas foram definidas com o intuito de viabilizar a solução do modelo de maneira discretizada, possibilitando utilizar passos de integração fixos durante toda a simulação. Sabendo que a redução do tempo de amostragem contribui para aumentar a precisão dos resultados, utilizou-se um passo de integração de 50  $\mu$ s, com tempo de simulação total de 12 segundos, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Parâmetros utilizados na simulação

Simulation time  
Start time: 0.0 Stop time: 12

Solver selection  
Type: Fixed-step Solver: discrete (no continuous states)

▼ Solver details  
Fixed-step size (fundamental sample time): 5e-5

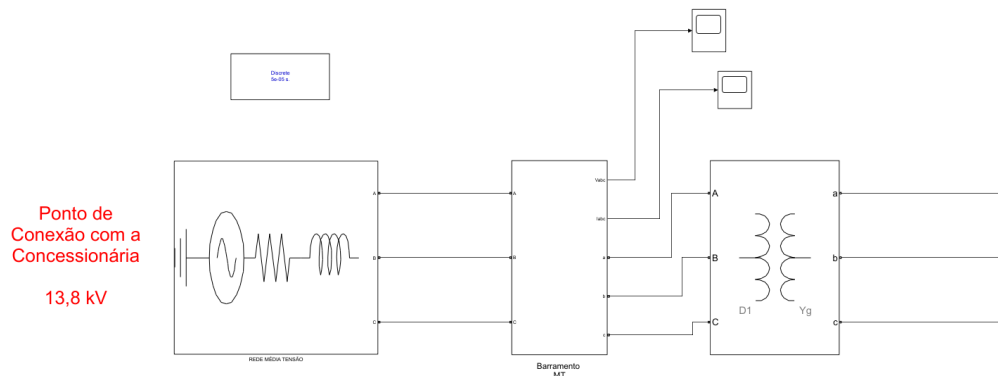
Fonte: elaborado pelo autor

Para modelar a rede de média tensão, foi implementado o circuito equivalente de Thévenin nos termos apresentados em (GIANESINI, 2020), ou seja, foi incluída uma fonte de tensão em série com uma impedância. Essa associação permite representar o nível de curto-circuito do sistema, tal como enunciado em (3.1):

$$S_{cc} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{cc} \quad (3.1)$$

Em que  $V$  representa a tensão nominal fase-fase do barramento de entrada da indústria (13,8 kV) e  $I_{cc}$  corresponde à corrente de curto-circuito trifásica informada pela concessionária (1,18 kA). A partir dessa equação, obteve-se o valor de 28,2 MVA para a potência de curto-circuito ( $S_{cc}$ ), a qual foi inserida no bloco equivalente da rede. Os dados dos transformadores foram inseridos de acordo com os dados de placa. Dessa forma, a modelagem do equivalente do sistema foi ajustada no *Simulink*, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Modelagem do equivalente de rede de média tensão e transformador de entrada



Fonte: elaborado pelo autor

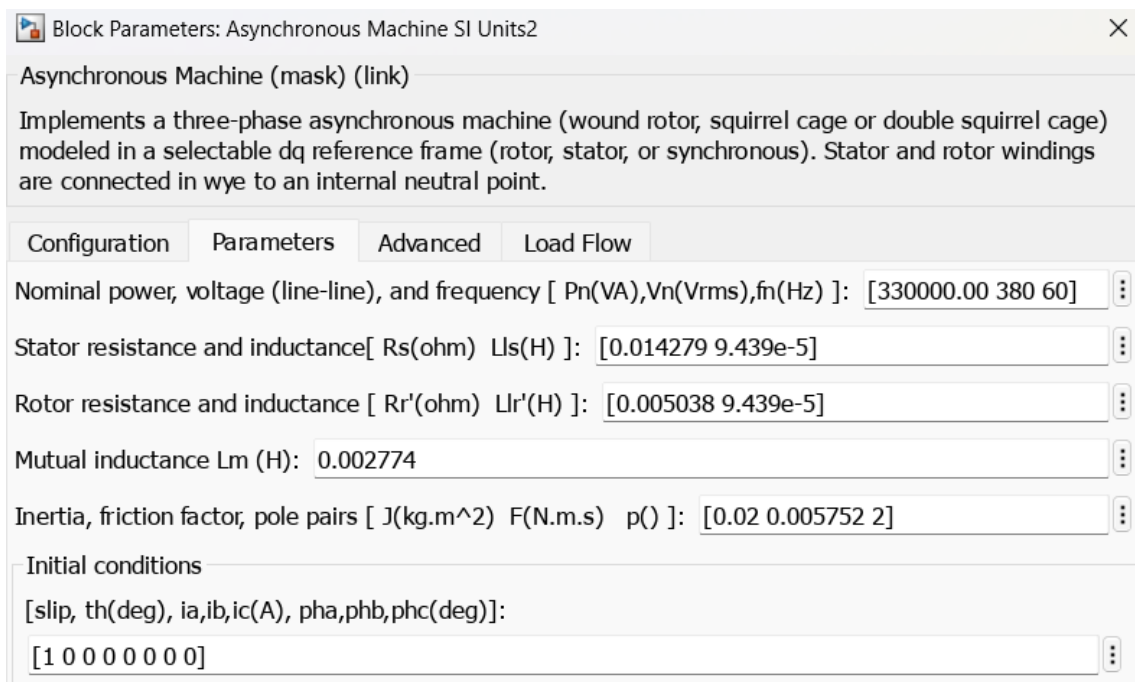
Para implementar a modelagem computacional das cargas conectadas ao QGBT-1.1, inicialmente, realizou-se a divisão conforme suas características de acionamento. Essa divisão é essencial para representar o comportamento elétrico das cargas em análise.

No grupo das cargas acionadas por partida direta estão os motores das duas máquinas endireitadeiras de vergalhão, as bombas da torre de osmose e os compressores 1 e 2 (Tabela 2). Esse método de acionamento é utilizado em cargas que atuam em velocidade fixa, ou seja, aquelas que não possuem ajuste na velocidade ou torque do motor.

Já nas cargas acionadas por inversor de frequência, que representam a maioria do QGBT-1.1, foi empregado um bloco adaptado incluindo um motor de indução trifásico e um inversor de frequência, o qual possibilita o ajuste de velocidade e torque dos motores. Nas cargas dos setores de laminação e trefilação, o controle de velocidade é fundamental, pois no processo produtivo as condições podem variar consideravelmente. Por exemplo, a utilização do inversor é essencial para ajustar a velocidade de tração de acordo com o tipo e as dimensões do material que está sendo produzido.

Para realizar a modelagem das cargas no *Simulink*®, utilizou-se o bloco de máquina assíncrona disponibilizado na biblioteca da ferramenta computacional. Os parâmetros configurados neste bloco estão apresentados na Figura 18.

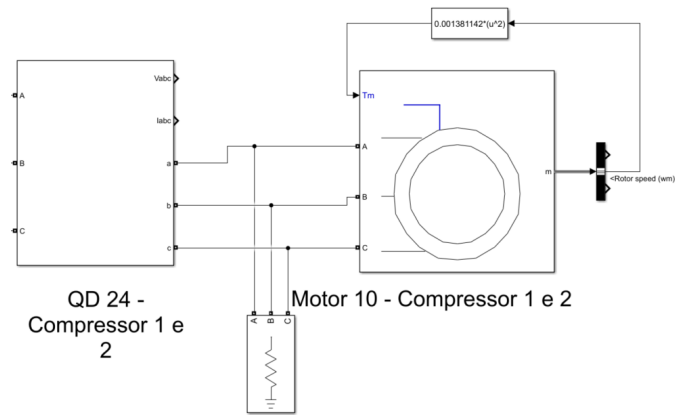
Figura 18 – Parâmetros inseridos no bloco de motor de indução no *Simulink*



Fonte: elaborado pelo autor

A modelagem computacional dos motores que operam em velocidade fixa, sem controle de velocidade, ou seja, acionados por partida direta, pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 – Modelagem dos motores acionados por partida direta

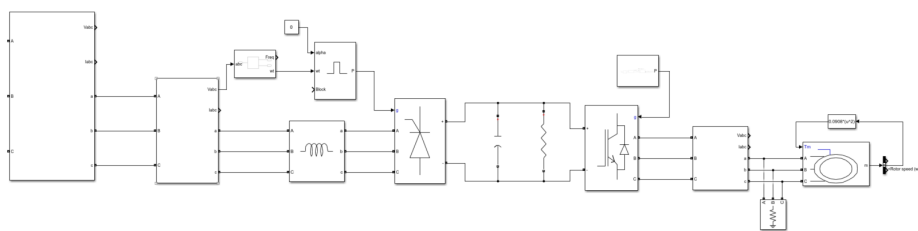


Fonte: elaborado pelo autor

Para os motores que possuem controle de velocidade, utilizou-se o modelo previsto em (GONÇALVES, 2024) que inclui a utilização de um inversor de frequência. A modelagem do inversor de frequência baseia-se em três etapas principais.

A primeira etapa realiza a retificação da tensão alternada, convertendo-a em tensão contínua através dos tiristores em ponte. Na segunda etapa, para estabilizar a tensão contínua é inserido um capacitor no link de *Corrente Contínua* (CC), o qual atua como um filtro para minimizar oscilações. Na terceira etapa é realizada a inversão da tensão contínua em tensão alternada modulada, utilizando a técnica de *Modulação por Largura de Pulso* (PWM). Desta forma, por meio do ajuste da frequência, pode-se realizar o controle de velocidade dos motores. A modelagem das cargas acionadas por inversor de frequência é ilustrada na Figura 20.

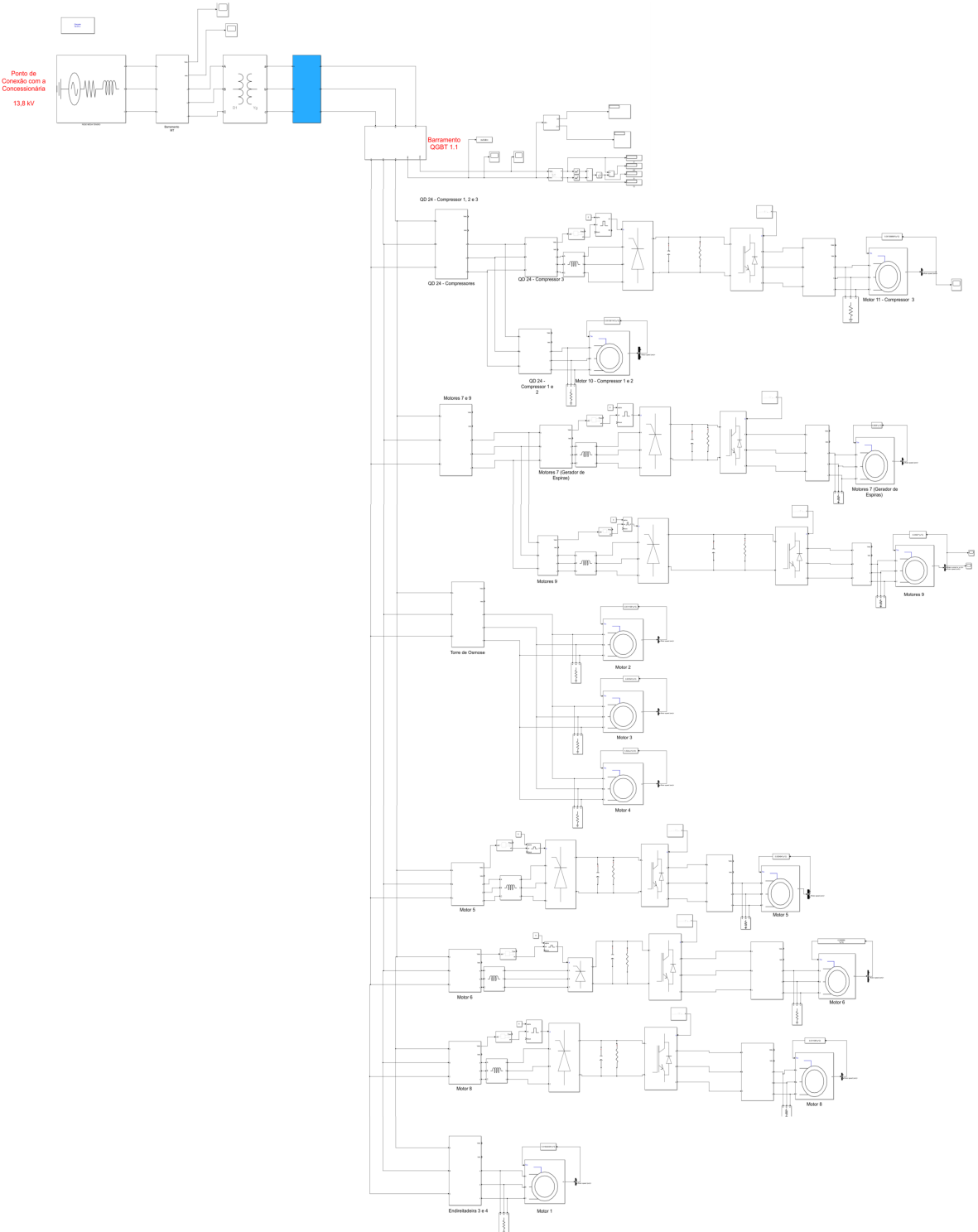
Figura 20 – Modelo para motores acionados por inversor de frequência



Fonte: elaborado pelo autor

A modelagem final do sistema foi desenvolvida utilizando o ambiente de simulação do *Simulink*, incorporando todos os elementos necessários para representar o comportamento do sistema em estudo. A modelagem do sistema completo pode ser observada na Figura 21.

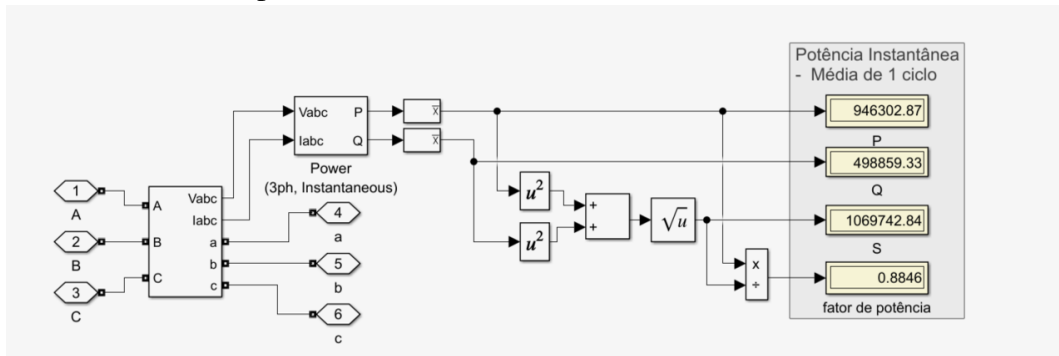
Figura 21 – Sistema Completo modelado no *Simulink*



Fonte: elaborado pelo autor.

Para avaliar os parâmetros elétricos, utilizou-se um bloco de medição de potência. Na Figura 22 pode-se verificar o modelo utilizado, no qual a média dos valores das potência instantâneas alimenta o bloco de cálculo da potência ativa, fator de potência, potência reativa e potência aparente, a cada ciclo de 16,67 ms da simulação (frequência fundamental de 60 Hz).

Figura 22 – Medidor de potência no *Simulink*.



Fonte: elaborado pelo autor

Para a realização do primeiro estudo de caso, no qual foi analisado o impacto do desequilíbrio de tensão sobre o desequilíbrio de corrente, inicialmente, realizou-se o cálculo dos valores de tensão de fase para cada nível de *Fator de Desequilíbrio de Tensão* (FDv) imposto na simulação utilizando o método das componentes simétricas, conforme a (2.4). A Tabela 3 sintetiza os valores de tensões de fase para cada valor de fator de desequilíbrio de tensão aplicado na fonte.

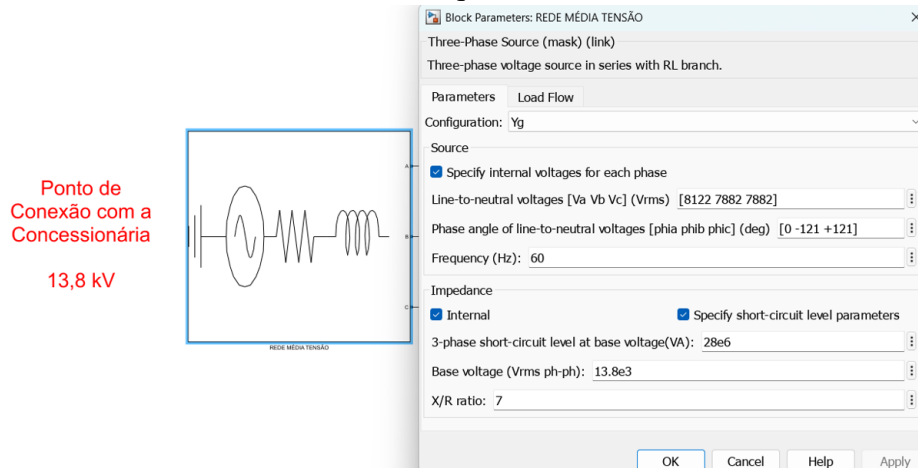
Tabela 3 – Tensões de fase aplicadas para cada valor de fator de desequilíbrio (fase-neutro)

FDv	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)
0,00%	7967 $\angle 0^\circ$	7967 $\angle -120^\circ$	7967 $\angle +120^\circ$
0,50%	8014 $\angle 0^\circ$	7945 $\angle -120,25^\circ$	7945 $\angle +120,25^\circ$
1,00%	8056 $\angle 0^\circ$	7923 $\angle -120,50^\circ$	7923 $\angle +120,50^\circ$
1,50%	8097 $\angle 0^\circ$	7902 $\angle -120,75^\circ$	7902 $\angle +120,75^\circ$
2,00%	8122 $\angle 0^\circ$	7882 $\angle -121,00^\circ$	7882 $\angle +121,00^\circ$
2,50%	8172 $\angle 0^\circ$	7870 $\angle -121,26^\circ$	7870 $\angle +121,26^\circ$
3,00%	8202 $\angle 0^\circ$	7853 $\angle -121,51^\circ$	7853 $\angle +121,51^\circ$
3,50%	8230 $\angle 0^\circ$	7831 $\angle -121,77^\circ$	7831 $\angle +121,77^\circ$
4,00%	8273 $\angle 0^\circ$	7813 $\angle -122,02^\circ$	7813 $\angle +122,02^\circ$
4,50%	8326 $\angle 0^\circ$	7795 $\angle -122,28^\circ$	7795 $\angle +122,28^\circ$
5,00%	8362 $\angle 0^\circ$	7775 $\angle -122,54^\circ$	7775 $\angle +122,54^\circ$

Fonte: elaborado pelo autor.

Após a obtenção dos valores, foi aplicado o desequilíbrio de tensão ao bloco que representa a rede de suprimento da indústria no *Simulink*. A Figura 23 apresenta os parâmetros do bloco que representa a fonte de tensão aplicando 2% de FDv.

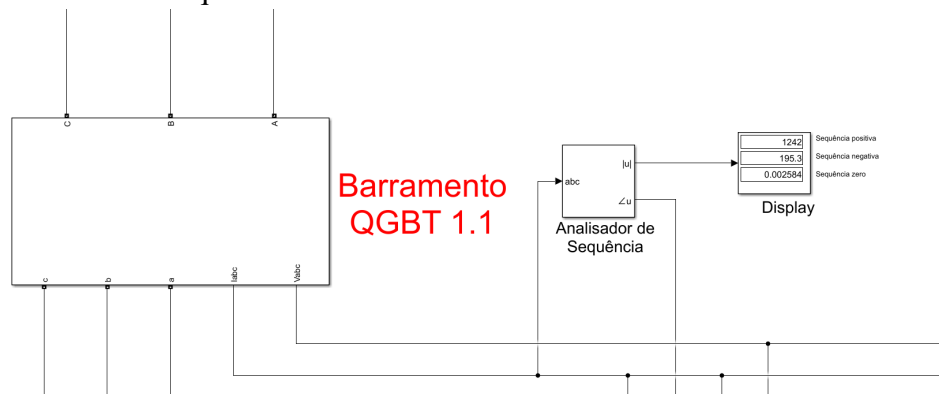
Figura 23 – Parâmetros da fonte de tensão desequilibrada no *Simulink*



Fonte: elaborado pelo autor

Além disso, para obtenção do *Fator de Desequilíbrio de Corrente (FDi)*, utilizou-se o bloco *Sequence Analyzer*, disponível na biblioteca do *Simulink*. Esse bloco permite a decomposição de um sistema trifásico em suas componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero. No sistema implementado, o bloco foi conectado na saída do barramento do QGBT-1.1, local de objeto deste estudo. A partir dos valores obtidos, pode-se extrair as correntes de sequência positiva e negativa, o que tornou possível realizar o cálculo do fator de desequilíbrio de corrente, conforme mostrado na equação (2.5). A Figura 24 apresenta uma das condições de desequilíbrio implementadas na simulação. Nesse exemplo, em que aplicou-se um FDv de 2%, os valores obtidos através do bloco *Sequence Analyzer* são descritos na figura abaixo.

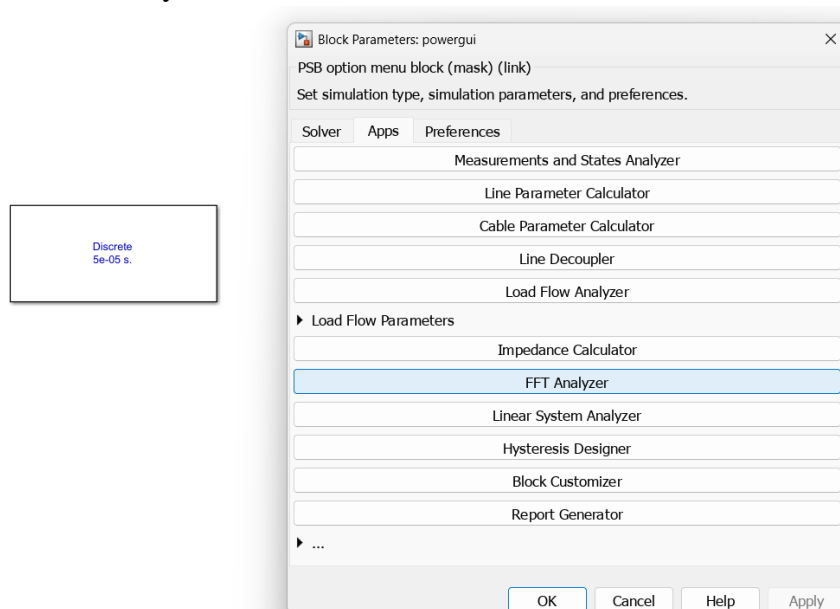
Figura 24 – Fator de desequilíbrio de corrente obtido no *Simulink*



Fonte: elaborado pelo autor

Para avaliar as distorções harmônicas de tensão e corrente, considerando o segundo estudo de caso, bem como identificar as ordens harmônicas predominantes, foi utilizado o bloco *PowerGui* do *Simulink*, com sua funcionalidade de *FFT Analyzer* para análise harmônica. Esse recurso permite a decomposição espectral dos sinais elétricos, possibilitando a identificação das harmônicas individuais e o cálculo da *Taxa de Distorção Harmônica* (THD). As medições foram realizadas diretamente no barramento do QGBT 1.1, assegurando a coerência dos resultados simulados com os dados coletados em campo. A Figura 25 apresenta a interface do bloco *PowerGui*, destacando a opção *Fast Fourier Transform* (FFT) *Analyzer*, utilizada para a extração dos espectros harmônicos.

Figura 25 – FFT Analyzer



Fonte: elaborado pelo autor

### 3.3.1 Validação da modelagem computacional

A modelagem desenvolvida em ambiente computacional foi validada com base nos valores nominais das cargas conectadas ao QGBT-1.1. Com o objetivo de verificar a precisão da modelagem, realizou-se uma análise quantitativa, comparando-se os valores de potência ativa, fator de potência, potência reativa e potência aparente obtidos na simulação com os valores nominais extraídos das placas de identificação das cargas. A Tabela 4 apresenta os valores nominais coletados e simulados, os quais mostram elevada similaridade. Essa constatação ratifica a aderência da modelagem às características do sistema implementado.

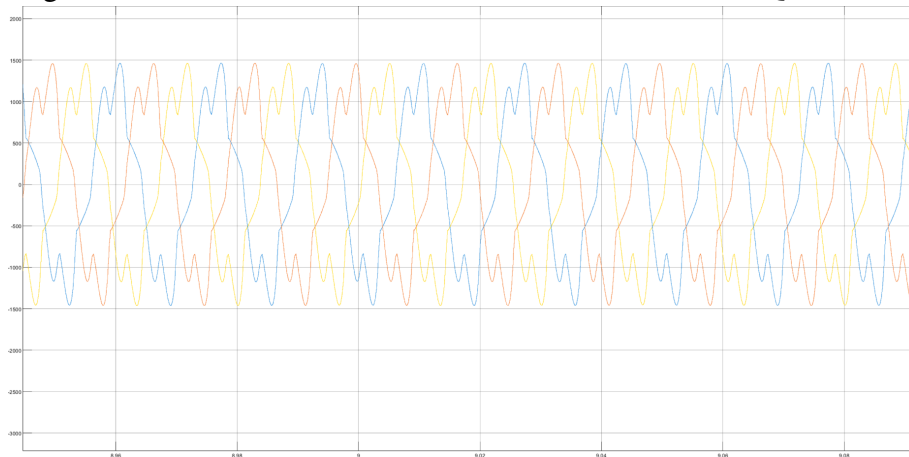
Tabela 4 – Valores Simulados e Nominais no Barramento do QGBT-1.1.

PARÂMETRO	NOMINAL	SIMULADO
Potência Ativa (kW)	947,13	946,3
Potência Aparente (kVA)	1091,37	1069,74
Potência Reativa (kVAr)	540,47	498,86
Fator de Potência	0,868	0,88

Fonte: elaborado pelo autor.

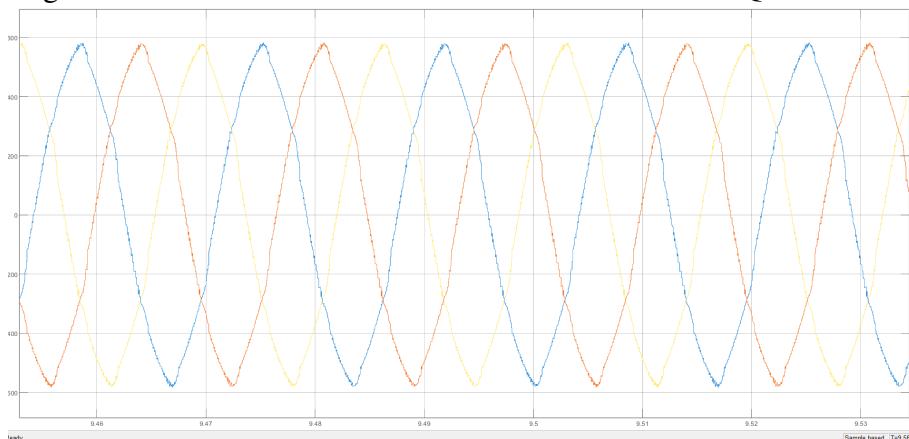
Por fim, a Figura 26 e a Figura 27 ilustram, respectivamente, as formas de onda de tensão e corrente no barramento do QGBT1.1, obtidas na simulação computacional, considerando um cenário com desequilíbrio de tensão nulo, ou seja, tensões de suprimento simétricas. De acordo com as figuras, nota-se a presença de distorções harmônicas de corrente e tensão, as quais se manifestam, respectivamente, devido à operação dos inversores de frequência que apresentam características não-lineares e a interação da corrente não senoidal com a impedância da fonte.

Figura 26 – Forma de onda de corrente no barramento do QGBT1.1.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 27 – Forma de onda de tensão no barramento do QGBT1.1.



Fonte: elaborado pelo autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados do trabalho, objetivando avaliar os impactos dos desequilíbrios de tensão sobre a operação da planta industrial de conformação de aço.

Nessa perspectiva, foram realizados dois estudos de caso que analisam diferentes aspectos desse fenômeno. O primeiro estudo investiga como os desequilíbrios de tensão influenciam o desequilíbrio de corrente, analisando suas consequências sobre o desempenho dos motores elétricos. O segundo estudo explora a relação entre os desequilíbrios de tensão e a geração de distorções harmônicas, avaliando os efeitos desse problema na qualidade da energia elétrica. Dessa forma, os estudos de caso foram estruturados da seguinte maneira:

- Caso 1 - Impacto dos desequilíbrios de tensão no desbalanceamento de corrente;
- Caso 2 - Impacto dos desequilíbrios de tensão sobre as distorções harmônicas.

### 4.1 Caso 1 - Impacto do desequilíbrio de tensão no desbalanceamento de corrente

No desenvolvimento do primeiro estudo de caso, buscou-se avaliar, primeiramente, o fenômeno do desequilíbrio de tensão a partir dos resultados das medições realizadas ao longo de sete dias, através da apuração do indicador FD95% e da comparação desse valor com os limites estabelecidos no PRODIST.

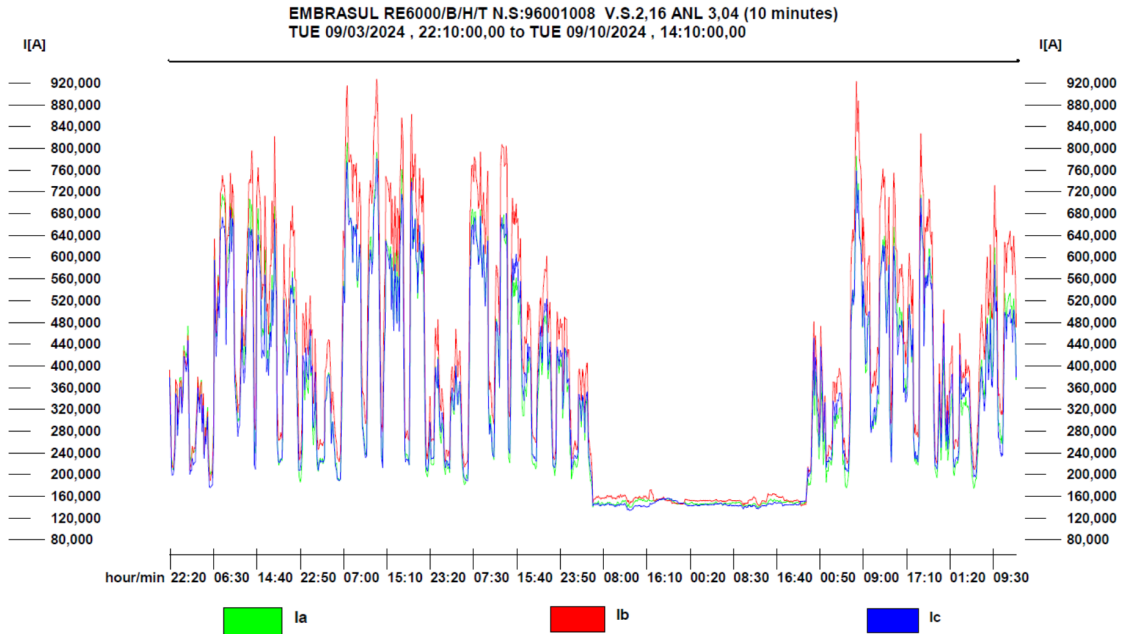
Posteriormente, foram realizadas simulações computacionais para verificar a origem dos desequilíbrios. Nesse aspecto, investigou-se as variações dos desequilíbrios de corrente a partir de diferentes valores de desequilíbrios de tensão impostos à fonte de suprimento. Os resultados foram, então, comparados aos resultados da medição em campo, de forma a ratificar as hipóteses de origem do problema.

No tocante às medições realizadas em campo através do analisador de qualidade de energia elétrica, foi possível traçar o comportamento de tensão e corrente eficazes no barramento do QGBT-1.1 ao longo dos sete dias de medição, conforme mostra a Figura 28 e a Figura 29.

É importante destacar que a planta industrial analisada opera em horário integral durante a semana, porém interrompe sua operação no sábado às 21:00h e retorna apenas no domingo às 22:40h. Ao observar os registros de corrente, é possível perceber que, neste período, o nível de corrente reduz significativamente, já que boa parte das cargas não está em funcionamento. Em contrapartida, ao analisar o comportamento da tensão neste mesmo período, percebe-se

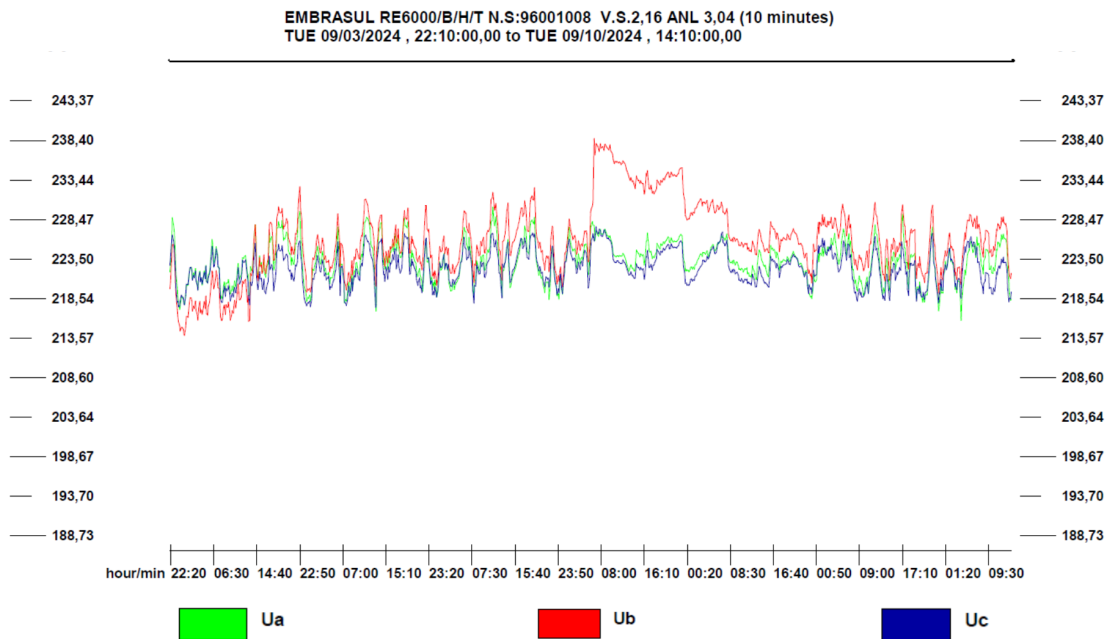
um desequilíbrio de tensão de *background* entre as fases, inclusive maior do que o verificado enquanto a indústria está em operação.

Figura 28 – Corrente eficaz medida no barramento do QGBT-1.1



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 29 – Tensão eficaz medida no barramento do QGBT-1.1



Fonte: elaborado pelo autor

Os valores mínimos, médios e máximos de tensão eficaz e corrente eficaz em cada fase, medidos ao longo dos sete dias, são sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores máximos, médios e mínimos medidos.

FASE	TENSÃO EFICAZ (V)			CORRENTE EFICAZ (A)		
	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
A	223,18	215,77	233,97	341,52	139,5	808,8
B	225,72	213,89	238,57	394,78	142,2	779,1
C	222,16	208,04	229,40	341,52	142,2	779,1

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 6 apresenta os resultados apurados através do indicador FD95% das medições dos fatores de desequilíbrio de tensão e corrente. O FD<sub>v</sub> apurado foi igual a 1,57%, estando dentro do limite permissível especificado no módulo 8 do PRODIST, que estabelece um valor máximo de 3% para esse indicador para o nível de tensão do QGBT-1.1.

Além disso, o fator de desequilíbrio de corrente, apurado nos mesmos termos que o de tensão, obteve um valor igual a 17,34%. Nesse sentido, nota-se que, embora o desequilíbrio de tensão corresponda a, aproximadamente, metade do limite estabelecido, esse valor não é desprezível, o que pode provocar efeitos indesejados à operação do sistema, a exemplo da atuação recorrente das proteções.

Tabela 6 – Valores medidos dos fatores de desequilíbrio.

FATORES DE DESEQUILÍBRIO	MEDIDO P95%
FD <sub>v</sub>	1,57%
FD <sub>i</sub>	17,34%

Fonte: elaborado pelo autor

Um fato interessante se trata do desequilíbrio de corrente identificado. O complexo industrial implementado apresenta cargas majoritariamente equilibradas, visto que se tratam de motores de indução trifásicos. Logo, a hipótese considerada é que os desequilíbrios de corrente sejam originados pelos desequilíbrios de tensão pré-existente na rede de suprimento (condição de *background*).

Para verificar a condição de *background*, recorreu-se aos estudos computacionais, nos quais foi possível manipular os desequilíbrios impostos à tensão de suprimento e verificar sua influência sobre a origem dos desequilíbrios de corrente. Nesse contexto, foram impostos desequilíbrios de tensão de 0% a 5%, com degraus de 0,5%, e verificados os desequilíbrios de corrente resultantes do processo. Os resultados desse estudo são sintetizados na Tabela 7.

Desta forma, verifica-se que, para a condição na qual o desequilíbrio de tensão é nulo,

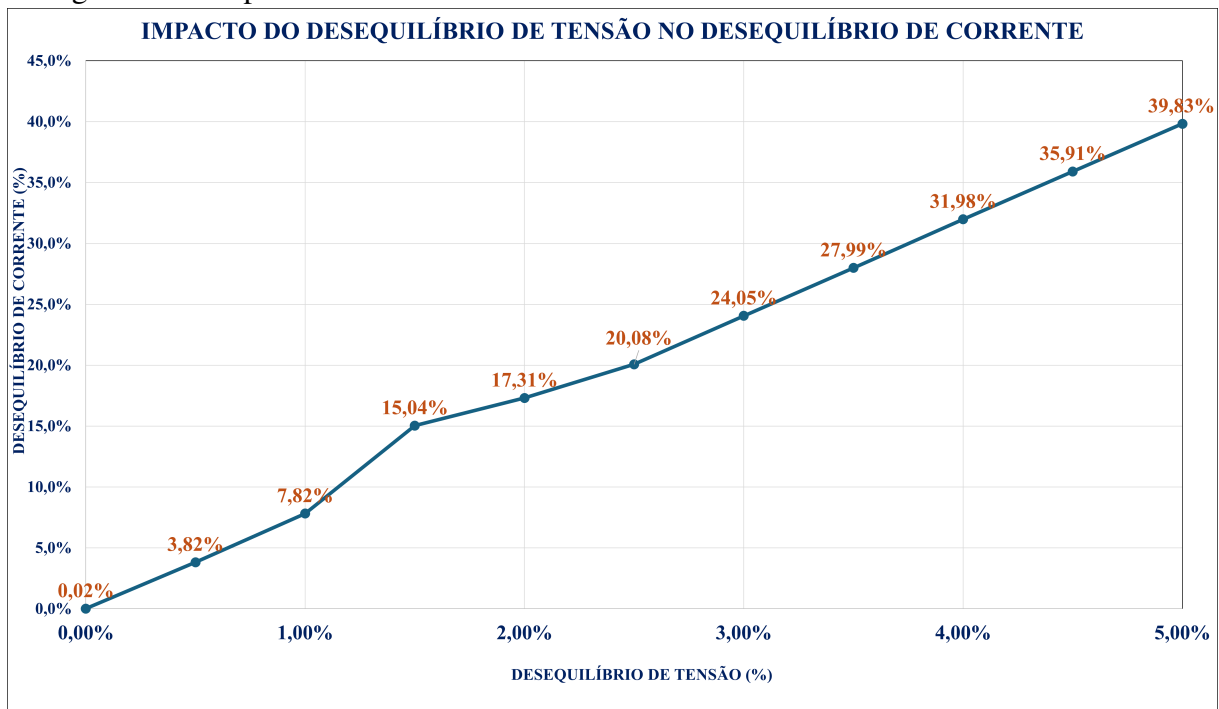
Tabela 7 – Fatores de Desequilíbrios Simulados.

<b>FATORES DE DESEQUILÍBRIO SIMULADOS</b>	
<b>FDv%</b>	<b>FDi%</b>
0%	0,02%
0,5%	3,82%
1,0%	7,82%
1,5%	15,54%
2,0%	17,31%
2,5%	20,08%
3,0%	24,05%
3,5%	27,99%
4,0%	31,98%
4,5%	35,91%
5,0%	39,83%

Fonte: elaborado pelo autor

o desequilíbrio de corrente também é nulo. Por outro lado, conforme aumenta-se o desequilíbrio de tensão, o desequilíbrio de corrente aumenta de forma praticamente linear. A Figura 30 apresenta a correlação entre o Fator de Desequilíbrio de Tensão e o Fator de Desequilíbrio de Corrente, revelando um crescimento acentuado e praticamente linear.

Figura 30 – Impacto do aumento do FDv% no FDi%



Fonte: elaborado pelo autor

Nota-se que mesmo pequenas variações no  $FD_v\%$  resultam em aumentos consideráveis no  $FD_i\%$ , evidenciando a alta sensibilidade das correntes às variações de tensão. Esse efeito é especialmente preocupante em ambientes industriais com predominância de motores de indução, devido aos impactos já mencionados. Além disso, a curva do gráfico sugere que, a partir de um  $FD_v$  superior a 2%, a influência sobre o  $FD_i$  se intensifica, destacando a importância de medidas preventivas.

Adicionalmente, a Tabela 8 apresenta o comparativo entre os valores medidos e simulados na condição exata em que a fonte de suprimento apresenta um desbalanceamento de 1,57%.

Tabela 8 – Fatores de Desequilíbrio.

<b>FATORES DE DESEQUILÍBRIO</b>	<b>MEDIDO P95%</b>	<b>SIMULADO</b>
FD <sub>v</sub>	1,57%	1,57%
FD <sub>i</sub>	17,34%	15,54%

Fonte: elaborado pelo autor.

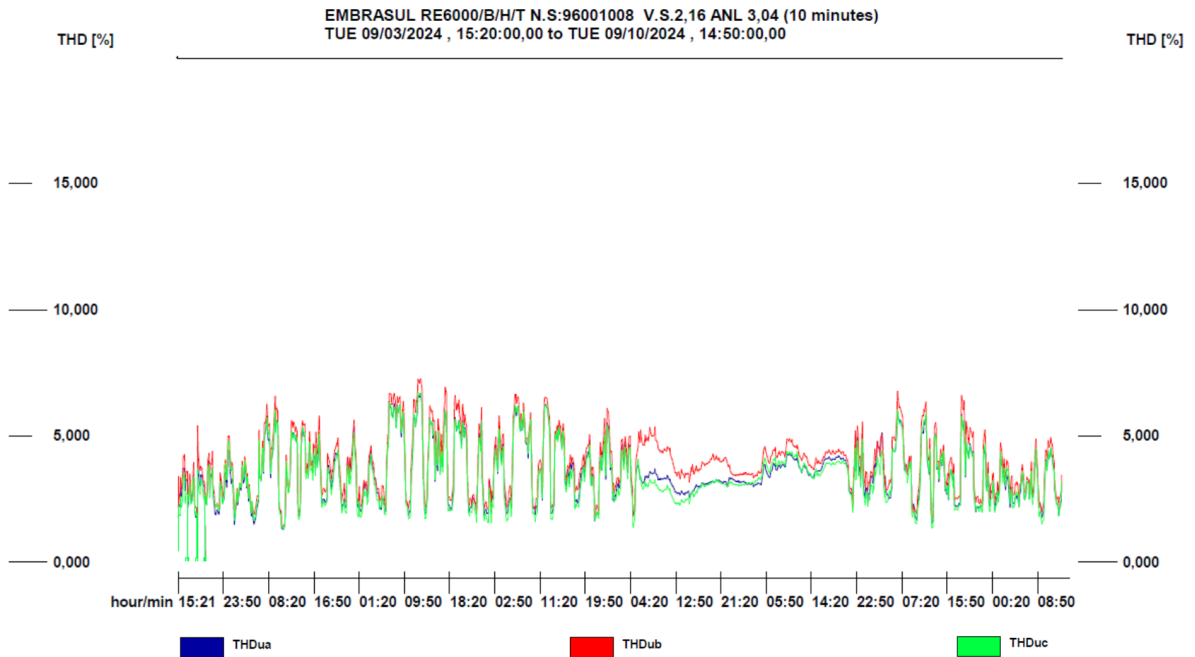
Portanto, comparando o valor medido (17,34%) ao simulado (15,54%) ratifica-se que o desequilíbrio de corrente identificado tem origem no desbalanceamento da tensão de suprimento, a qual é responsabilidade da concessionária de energia local. A proximidade entre esses valores comprova a confiabilidade da modelagem computacional, evidenciando que o sistema foi desenvolvido corretamente e representa de forma fidedigna o comportamento real da planta industrial.

## 4.2 Caso 2 - Impacto do desequilíbrio de tensão sobre as distorções harmônicas

Neste estudo de caso, analisou-se a influência do desequilíbrio de tensão sobre os níveis de distorção harmônica no sistema industrial. Inicialmente, a partir das medições realizadas em campo com o analisador de qualidade de energia, foi possível identificar os níveis de distorção harmônica ao longo do período monitorado.

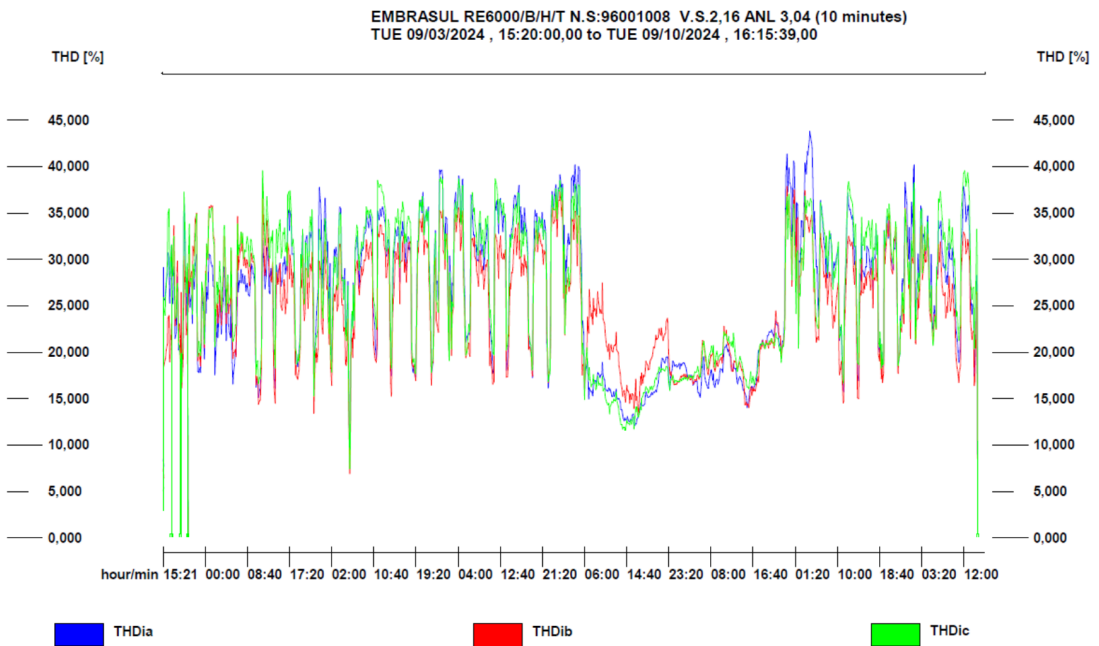
A Figura 31 e a Figura 32 apresentam, respectivamente, os níveis de distorção harmônica de tensão e corrente registrados ao longo do período de medição. De acordo com o exposto, nota-se a expressiva variação das distorções harmônicas ao longo do período avaliado. Novamente, entre às 21:00h do sábado e 22:40h do domingo, período no qual a indústria suspende sua operação, há um valor residual de *background distortion*.

Figura 31 – Medição das distorções harmônicas de tensão por fase



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 32 – Medição das distorções harmônicas de corrente por fase



Fonte: elaborado pelo autor

A partir dos registros obtidos, foi realizado o cálculo da *Distorção Harmônica Total de Corrente* (DTI) e *Distorção Harmônica Total de Tensão* (DTT) , aplicando o percentil 95% sobre os 1008 registros apurados na simulação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de DTH por fase.

FASE	DTT P95%	DTI P95%
A	5,60%	37,49%
B	6,13%	34,40%
C	5,60%	36,97%
MÉDIA	5,78%	36,29%

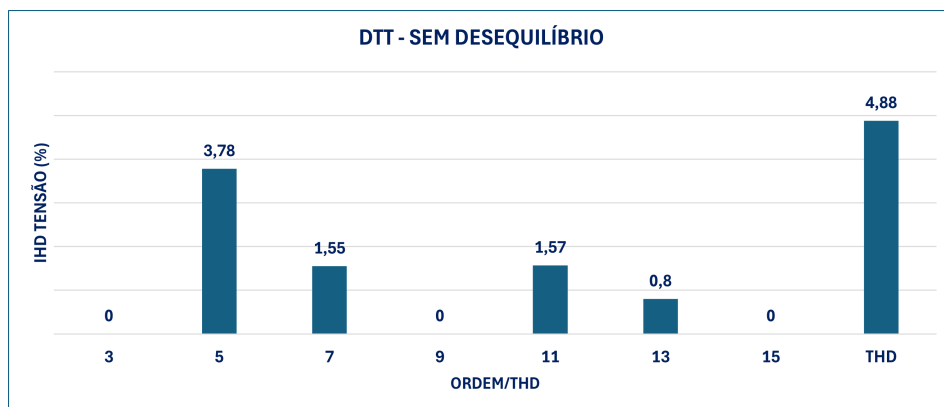
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o PRODIST, os valores apurados estão abaixo do limite de 10%, estabelecido para a DTT em sistemas com tensão nominal inferior a 2,3 kV. Salienta-se que as distorções harmônicas individuais não foram registradas devido às limitações do analisador utilizado no estudo, visto que o dispositivo não permite agregar as ordens individuais para a apuração do indicador estatístico.

Diante dessa limitação e tendo em vista os impactos que as distorções harmônicas podem trazer para o sistema elétrico, é fundamental compreender a influência do desequilíbrio de tensão nesse fenômeno. Para entender melhor essa relação e quantificar seus efeitos, realizou-se testes no ambiente computacional considerando diferentes cenários para verificar a influência do desequilíbrio de tensão sobre as distorções harmônicas na indústria.

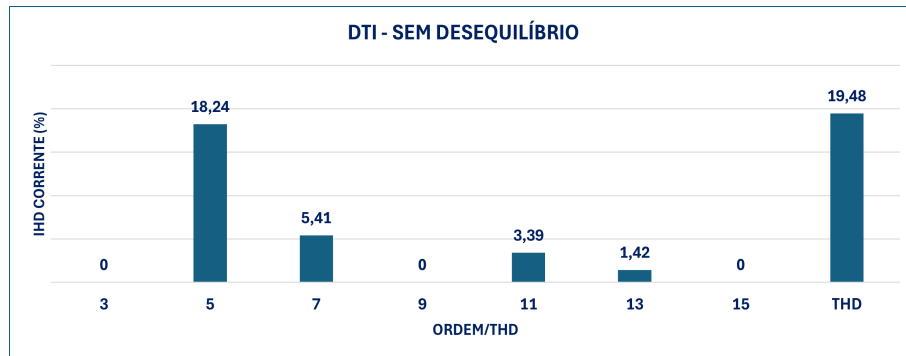
Inicialmente, realizou-se uma simulação do sistema considerando um cenário ideal, ou seja, quando as tensões de suprimento são completamente simétricas. Essa abordagem permite avaliar a contribuição das cargas não-lineares para a distorção harmônica sem a interferência do desequilíbrio de tensão na alimentação. A Figura 33 e a Figura 34 apresentam, respectivamente, os níveis de DTT e DTI obtidos através da simulação, bem como as ordens harmônicas predominantes.

Figura 33 – Espectro harmônico de tensão no barramento do QGBT-1.1 - sem desequilíbrio



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 34 – Espectro harmônico de corrente no barramento do QGBT-1.1 - sem desequilíbrio



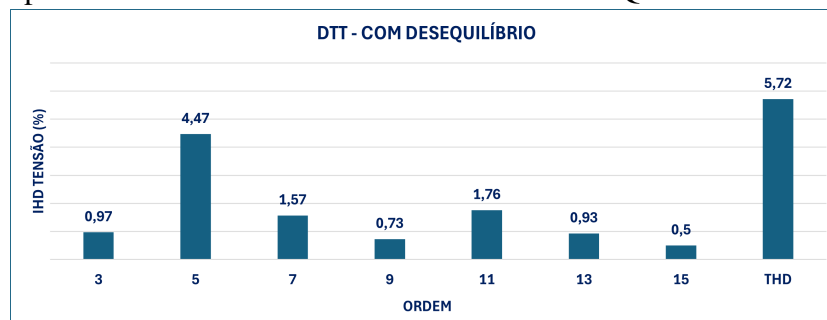
Fonte: elaborado pelo autor

Nota-se, portanto, que para a condição na qual a rede de suprimento é equilibrada, se fazem presentes as distorções harmônicas de tensão e corrente de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordens, com predominância da 5<sup>a</sup> ordem, a qual atinge valores de 3,78% de distorção de tensão e 18,24% de distorção de corrente. A média quadrática das ordens individuais resulta na distorção harmônica total, a qual atingiu valores de 4,88% para as distorções de tensão e 19,48% para as distorções de corrente. De fato, esse comportamento é esperado, uma vez que a indústria modelada apresenta diversos inversores de frequência de 6 pulsos (carga não linear), cuja operação leva ao surgimento de harmônicos característicos ( $6k \pm 1$ ).

Em seguida, a segunda simulação desse estudo de caso foi realizada por meio da imposição de um desequilíbrio de tensão de 1,57% à fonte de suprimento. Esse valor foi escolhido por se tratar do FD95% apurado a partir das medições em campo. Esse segundo cenário simulou as condições reais da indústria, permitindo avaliar o impacto do desequilíbrio de tensão na introdução de novas componentes harmônicas e na elevação da DTT e DTI.

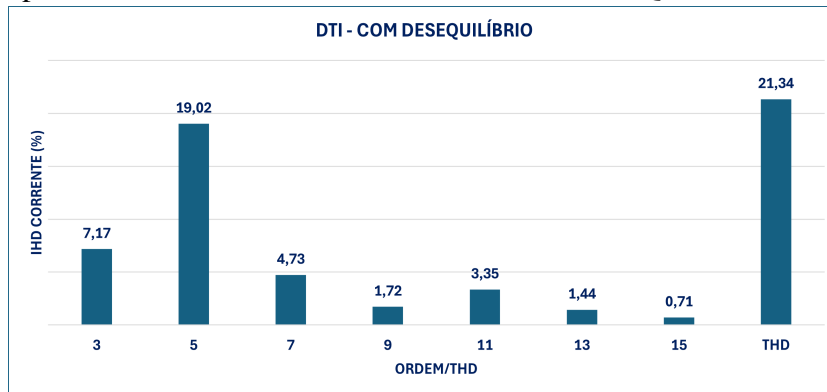
A Figura 35 e a Figura 36 apresentam, respectivamente, os espectros harmônicos de tensão e corrente obtidos na simulação, evidenciando as ordens harmônicas predominantes e os valores da Distorção Harmônica Total.

Figura 35 – Espectro harmônico de tensão no barramento do QGBT-1.1 - com desequilíbrio



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 36 – Espectro harmônico de corrente no barramento do QGBT-1.1 - com desequilíbrio



Fonte: elaborado pelo autor

As figuras supracitadas evidenciam o impacto do desequilíbrio de tensão nas distorções harmônicas do sistema. Ao comparar ambos cenários do caso 2 (fonte equilibrada versus desequilibrada), verifica-se o surgimento de outras ordens harmônicas além daquelas originalmente presentes. As ordens 3<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 15<sup>a</sup> são, portanto, “não características” por não estarem presentes na condição normal de operação dos conversores. Como resultado, a distorção harmônica total de corrente sofreu um aumento de 19,48% para 21,34%, o que também impacta na distorção de tensão, com acréscimo de 4,88% para 5,72%.

Por fim, comparando-se a DTT obtida via simulação (5,72%), com a DTT95% apurada pelos registros de medição, considerando a média entre as fases (5,78%), nota-se a elevada similaridade entre os valores medidos e simulados. As diferenças manifestadas, principalmente com relação às distorções totais de corrente (21,34% simulado e 36,29% medido), se justificam pela presença de distorções de *background*, as quais não foram consideradas na análise computacional.

Dessa forma, conclui-se que os resultados obtidos via simulação estão aderentes às condições evidenciadas na prática, cujos estudos computacionais permitiram identificar a origem dos desequilíbrios da indústria, seu impacto na geração de harmônicos não característicos e também no aumento das distorções harmônicas.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou o impacto dos desequilíbrios de tensão na operação de uma planta industrial de conformação de aço, destacando seus efeitos na qualidade da energia elétrica do complexo industrial.

Inicialmente, a partir das medições em campo, verificou-se um fator de desequilíbrio de tensão de 1,57%, abaixo do limite indicado no PRODIST. Todavia, a manifestação de expressivos desequilíbrios de corrente (17,34%) levantou um questionamento com relação à origem do distúrbio. Para aprofundar essa análise, foram realizadas simulações computacionais, variando-se os desequilíbrios de tensão da fonte de suprimento e verificando-se os desequilíbrios de corrente resultantes desse processo. Os resultados indicaram um crescimento praticamente linear do fator de desequilíbrio de corrente em função do aumento do desequilíbrio de tensão. Assim, foi constatado que o desequilíbrio de corrente da indústria é predominantemente provocado pelo desbalanceamento da tensão de suprimento.

No tocante ao impacto dos desequilíbrios de tensão sobre a geração de harmônicos da indústria, os registros de campo detectaram a presença de distorções harmônicas totais de tensão, com valor médio entre as fases na ordem de 5,78%. Embora esse valor esteja abaixo dos limites recomendados, os resultados computacionais indicaram que essa distorção sofre influência direta do suprimento desequilibrado, o qual provoca o surgimento de componentes harmônicas não características e o aumento da distorção harmônica total de corrente e tensão.

Por fim, ressalta-se que a modelagem computacional desenvolvida mostrou-se uma ferramenta robusta para a análise dos fenômenos aqui tratados, permitindo avaliar diferentes cenários operacionais e suas consequências.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Ao longo deste estudo, identificaram-se potenciais oportunidades para o desenvolvimento de novos trabalhos que visem mitigar os impactos do desequilíbrio de tensão na planta industrial estudada. Desta forma, sugerem-se as seguintes investigações futuras:

- Solicitação de um parecer técnico por parte da concessionária de energia com relação ao apontamento de soluções para os problemas enfrentados no tocante aos desequilíbrios de tensão;
- Estudo de estratégias de mitigação dos desequilíbrios de tensão utilizando a ferramenta

computacional, a fim de investigar o melhor local para instalação de reguladores de tensão monofásicos, objetivando reduzir o número de paradas não programadas;

- A implementação de estratégias de monitoramento contínuo do desequilíbrio de tensão na indústria, visando aprimorar a confiabilidade do sistema elétrico da planta industrial, e permitindo a identificação precoce de variações inesperadas nos parâmetros elétricos. A utilização de sistemas de medição inteligente em tempo real possibilitaria ações corretivas mais eficazes, reduzindo o impacto das oscilações no desempenho dos equipamentos e minimizando falhas operacionais;
- Análise do comportamento das *Variações de Tensão de Curta Duração* (VTCD) na indústria, considerando que a atuação recorrente das proteções pode estar diretamente relacionada às VTCDs, impulsionadas pelo fator de desequilíbrio de tensão. Esse estudo permitiria uma melhor compreensão dos impactos desse fenômeno nos sistemas elétricos industriais e contribuiria para a adoção de medidas preventivas.

## REFERÊNCIAS

- ALWASH, J. H. H.; IKHWAN, S. H. Generalised approach to the analysis of asymmetrical three-phase induction motors. **IEE Proceedings Electric Power Applications**, v. 142, n. 2, p. 87–96, mar 1995.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8**. [S. l.], 2021. Resolução 956/2021 da ANEEL.
- ANEEL, A. N. de E. E. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, 2017.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R.; CHEN, S. **Power System Quality Assessment**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000.
- ARÃO, L. F. L. **Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades devido ao Desequilíbrio de Tensão**. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- Atlas Copco. **GA 30-90 Compressors Leaflet**. 2025. Disponível em: <[https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/compressors/ga30-90/2935%209892%2040\\_LR.pdf](https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/compressors/ga30-90/2935%209892%2040_LR.pdf)>.
- Aço Verde do Brasil. **Fio Máquina**. 2025. Disponível em: <<https://avb.com.br/fio-maquina/>>.
- BAGGINI, A. B. **Handbook of Power Quality**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2008.
- BENETELI, T. A. P. **Métodos para limitação de índices de desequilíbrio de máquinas elétricas trifásicas em sistemas de distribuição**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- BRESCIANI, E. e. a. **Conformação Plástica dos Metais**. 6. ed. Campinas: Unicamp, 2011.
- BRITO, E. C. d. Trabalho de Conclusão de Curso, **Avaliação dos efeitos dos parâmetros de laminação a frio nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1013 para produção do vergalhão CA 60**. Fortaleza, 2018. Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
- BROADWATER, R. P.; KHAN, A. H.; SHAALAN, H. E.; LEE, R. E. Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 1, p. 294–300, jan 1993.
- DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3. ed. Singapore: McGraw-Hill Book, 1988.
- DYMOND, J. H.; STRANGES, N. Operation on unbalanced voltage: One motor's experience and more. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 43, n. 3, p. 829–837, 2007.
- FIALHO, A. B. **Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análises de Circuitos**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- FILHO, A. L. F. **Análise do comportamento do fator de desequilíbrio frente à variação da amplitude e do ângulo da tensão**. 112 p. Tese (Tese de doutorado em engenharia elétrica) — UnB, Brasília, 2008.

FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, XXXVII, n. 2, p. 1027–1140, 1918.

GIANESINI, B. M. **Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de benchmark do IEEE e aplicação de metodologias**. 172 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

GNACINSKI, P. Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 4, p. 761–770, apr 2008.

GONÇALVES, A. S. Trabalho de Conclusão de Curso, **Modelagem computacional e análise das distorções harmônicas em um complexo industrial**. Fortaleza, 2024.

GOSBELL, V.; PERERA, S.; SMITH, V. **Voltage Unbalance**. [S.l.], 2002.

GREGORY, R. C. F. **Propostas de Metodologias para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos Trifásicos**. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

GREGORY, R. C. F.; OLIVEIRA, L. T.; OLIVEIRA, J. C. A eficácia de compensadores de desequilíbrios a componentes passivos. **Revista O Setor Elétrico**, v. 138, p. 52–60, 2017.

GROTZBACH, M.; XU, J. Noncharacteristic line current harmonics in diode rectifier bridges produced by network asymmetries. In: **Fifth European Conference on Power Electronics and Applications**. Brighton, UK: [s.n.], 1993.

Grupo Aço Cearense. **Tela Coluna 7cm 17cm 1000mm 6m**. 2025. Disponível em: <<https://loja.grupoacocearense.com.br/tela-coluna-7cm-17cm-1000mm-6m/p>>.

Grupo Aço Cearense. **Treliça TR-SI 8L Pesada 8cm 6m**. 2025. Disponível em: <<https://loja.grupoacocearense.com.br/trelica-tr-si-8l-pesada-8cm-6m/p>>.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Artiber, 2010.

IEEE STD 1159. **IEEE STD 1159<sup>TM</sup>. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. New York, USA, 2019.

JOUANNE, A. V.; BANERJEE, B. B. Assessment of voltage unbalance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 4, p. 782–790, 2001.

JUNIOR, O. H. A. **Desenvolvimento de uma metodologia para identificar e quantificar distúrbios da qualidade de energia elétrica**. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KARMOUCHE, A. R. **Análise da eficiência energética em compressores a pistão em sistemas de ar comprimido**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

LIMA, E. C. **Diagnóstico de Motores de Indução Trifásicos Operando em Redes Desequilibradas e Distorcidas**. Tese (Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

- LO, W.; CHAN, C. C.; ZHU, Z.; HOWE, D.; CHAU, K. Acoustic noise radiated by pwm controlled induction machine drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 47, n. 4, p. 880–889, aug 2000.
- MENDONÇA, A. V. C.; MELO, R. L. R. D. **Estudo da substituição de compressores alternativos por compressores rotativos tipo parafuso**. 2021.
- NASCIMENTO, C. F. e. a. Analysis of noncharacteristic harmonics generated by voltage-source converters operating under unbalanced voltage. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 2, p. 951–961, 2017.
- NEMA MG-1. **NEMA MG-1, Motors and Generators**. [S.l.], 2014.
- PACCO, R. **Projeto de uma rede de ar comprimido industrial**. Guaratinguetá, 2013.
- PARKER, T. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Jacareí, 2006. Apostila M1004 BR.
- REZENDE, P. H. O.; SAMESIMA, M. I. **Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico**. 2013.
- SHACKELFORD, J. **Introduction to Material Science for Engineers**. 9. ed. [S.l.]: Pearson, 2021.
- SILVA, E. C. N. **PMR2481 – Sistemas Fluidomecânicos. Apostila Pneumática**. São Paulo, 2002.
- SMITH, D. R.; BRAUNSTEIN, H. R.; BORST, J. D. Voltage unbalance in 3- and 4-wire delta secondary systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 2, p. 733–741, apr 1988.
- TEIXEIRA, D. **ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL**. 128 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- TEOBALDO, I. N. C. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas**. 137 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- WALLACE, A. V.; JOUANNE, P.; ANDREWS, C.; WOHLGEMUTH, C.; WAINWRIGHT, G. The effects of voltage and winding abnormalities on the measured performance of induction motors. In: **IAS97 Conf. Proc.** [S.l.: s.n.], 1997. p. 478–452.
- WANG, Y. J.; PIERRAT, L. A method integrating deterministic and stochastic approaches for the simulation of voltage unbalance in electric power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 2, p. 241–246, 2001.
- YAN, R.; SAHA, T. K. Investigation of voltage imbalance due to distribution network unbalanced line configurations and load levels. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 2, p. 1829–1838, 2013.