

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL**

**INGRIDT CEZAR AYRES**

**Método para Simulação e Análise de VTCDs em Instalações Elétricas**  
**Industriais**

**São Leopoldo**  
**2025**

INGRIDT CEZAR AYRES

**Método para Simulação e Análise de VTCDs em Instalações Elétricas  
Industriais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira

Corientador(a): Prof. Dr. Jorge Luis Victória Barbosa

São Leopoldo

2025

A985m

Ayres, Ingridt Cezar.

Método para simulação e análise de VTCDs em instalações elétricas industriais / Ingridt Cezar Ayres. – 2025.  
63 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2025.

“Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira  
Corientador(a): Prof. Dr. Jorge Luis Victória Barbosa”.

1. Qualidade da energia elétrica. 2. VTCD. 3. PRODIST. 4. OpenDSS. 5. Grupo A. 6. Motores de indução. 7. Modelagem de carga. I. Título.

CDU 621.3

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Amanda Schuster Ditbenner – CRB 10/2517)

INGRIDT CEZAR AYRES

**Método para Simulação e Análise de VTCDs em Instalações Elétricas  
Industriais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Aprovada em 17 de junho de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dra. Mariana Resener - Simon Frases University

---

Prof. Dr. Lucio Renê Prade – UNISINOS

---

Prof. Dr. Ederson Paulo Vogel – UNISINOS

À Antônia com todo meu amor.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha filha que um dia entenderá a minha ausência para que juntas tenhamos oportunidades ilimitadas. Ao meu marido Adones do Nascimento, pelo apoio ilimitado, pela compreensão em momentos de ausência, o meu muito obrigada.

À minha avó Amelia Suriz pelo apoio incondicional e dedicação para que eu pudesse ter toda a base emocional para seguir em frente e nunca deixar de desistir da busca incansável por conhecimento e evolução.

Ao professor e orientador Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira, por todo o apoio técnico e todas as conversas que me tranquilizaram ao longo deste trabalho. Para o Dr. Jorge Luis Victoria Barbosa pela coorientação e paciência.

A todos os meus amigos e amigas que me apoiaram e incentivaram a vencer as barreiras e inseguranças,

Aos professores do PPG que transmitiram conhecimento e experiência para que todos possam aprender e progredir.

A vida é um equilíbrio notavelmente, absolutamente,  
absurdamente, infinitamente, moralmente,  
esteticamente desequilibrado.

Afonso Cruz.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia simplificada para análise de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) em unidades consumidoras do Grupo A, com ênfase em instalações industriais compostas por cargas motoras. A proposta baseia-se na modelagem de perfis de corrente de partida de motores de indução trifásicos, obtidos experimentalmente e incorporados ao ambiente de simulação do software OpenDSS por meio de curvas LoadShape. A abordagem considera os critérios técnicos estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, com a proposta de inclusão de uma nova região de severidade representando a faixa de operação ideal. Para avaliação da metodologia, foram elaborados cenários simulados com diferentes configurações elétricas, e os distúrbios de tensão foram quantificados por meio dos indicadores Fator de Impacto (FI) e Fator de Impacto Base (FIBASE). Os resultados obtidos demonstram a aplicabilidade da metodologia para análise preventiva de VTCDs, possibilitando diagnósticos técnicos em fase de projeto ou de operação da planta e contribuindo para o cumprimento dos limites normativos de qualidade da energia elétrica.

**Palavras-chave:** Qualidade da Energia Elétrica, VTCD, PRODIST, OpenDSS, Grupo A, motores de indução, modelagem de carga.



## **ABSTRACT**

This work presents a simplified methodology for the analysis of Short-Duration Voltage Variations (SDVV) in Group A consumer units, with an emphasis on industrial facilities composed of motor loads. The proposal is based on the modeling of inrush current profiles of three-phase induction motors, obtained experimentally and incorporated into the OpenDSS simulation environment through LoadShape curves. The approach considers the technical criteria established in Module 8 of PRODIST, with the proposal to include a new severity region representing the ideal operating range. To evaluate the methodology, simulated scenarios were developed with different electrical configurations, and the voltage disturbances were quantified using the Impact Factor (FI) and the Base Impact Factor (FIBASE) indicators. The results obtained demonstrate the applicability of the methodology for preventive analysis of SDVVs, enabling technical diagnostics in the design or operation phase of the plant and contributing to compliance with the regulatory limits for electric power quality.

**Keywords:** Power Quality, SDVV, PRODIST, OpenDSS, Group A, induction motors, load modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Avaliação de Problemas de Qualidade de Energia .....	20
Figura 2 – Representação gráfica das VTCD.....	23
Figura 3 – Imagem representando de forma compilado os níveis de tensão conforme Módulo 8 do PRODIST .....	26
Figura 5 – Fluxograma Metodologia de Trabalho.....	38
Figura 6 – Incerteza ao avaliar a sensibilidade de um determinado tipo de equipamento .....	39
Figura 7 – Imagem osciloscópio corrente partida direta sem carga .....	41
Figura 8 – Corrente transitória partida direta sem carga – Fase R.....	41
Figura 9 – Comparativo corrente transitória entre acionamento com nível de carga de 0 % .....	42
Figura 10 - Comparativo corrente transitória entre acionamento com nível de carga de 100% .....	42
Figura 11 – Zoom Discretização Efeito Transitório.....	43
Figura 12 – Trecho de Código para Cadastro de Loadshape no OpenDSS .....	44
Figura 13 – Reprodução da curva de carga no OpenDSS .....	45
Figura 14 – Diagrama Unifilar Estudo de Caso Cenário 1 .....	46
Figura 15 – Diagrama Unifilar Estudo de Caso Cenário 2.....	47
Figura 16 – Cálculos número ciclos de senoide .....	50
Figura 17 – Cálculos número ciclos de senoide otimizado.....	50
Figura 18 – Linha do Tempo para acionamentos e desligamentos .....	51
Figura 19 – Gráficos OpenDSS Cenário 1 .....	52
Figura 20 – Gráficos OpenDSS Cenário 2 .....	55

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD .....	27
Quadro 2 – Quadro de Cargas de Iluminação e Tomadas .....	47
Quadro 3 – Quadro de Cargas Simplificado de Motores .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação Distúrbios entre Sistema e Carga .....	20
Tabela 2 – Categorias e Características Típicas dos Fenômenos Eletromagnéticos IEEE 1159-2019 .....	21
Tabela 3 – Estratificação dos parâmetros amplitude e duração para contabilização de eventos de VTCD .....	29
Tabela 4 – Regiões de Severidade de VTCD.....	29
Tabela 5 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal ( $V_n$ ).....	30
Tabela 6 – Taxa de Amostragem versus Desenvolvimento de Modelo de Carga .....	33
Tabela 7 – Tabela de Estratificação com nova Região de Sensibilidade .....	48
Tabela 8 – Frequência de eventos carga e região Cenário 1 .....	53
Tabela 9 – Frequência de eventos carga e região Cenário 2.....	55
Tabela 10 – Fator de Impacto para todos os pontos de medição da fábrica .....	56

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
DMS	<i>Distribution Management System</i>
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ETT	Elevação Temporária de Tensão
GD	Geração Distribuída
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
ITT	Interrupção Temporária de Tensão
MIT	Motor de Indução Trifásico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PU	per unit (por unidade)
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
TR	Tensão de Referência
VRMS	Valor Eficaz de Tensão
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.2 OBJETIVOS .....	15
<b>1.2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 QUALIDADE DE ENERGIA.....	18
2.2 QUALIDADE DO PRODUTO .....	25
2.3 MEDIÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA .....	31
2.4 MODELAGEM DE CARGAS .....	32
2.5 TRABALHOS RELACIONADOS .....	33
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>37</b>
3.1 DEFINIÇÃO OBJETO DE ESTUDO.....	45
3.2 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE RESULTADOS.....	48
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
4.1 ANÁLISE DE RESULTADOS CENÁRIO 1 .....	51
<b>4.1.1 Análise por Região de Severidade.....</b>	<b>53</b>
4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS CENÁRIO 2.....	53
<b>4.2.1 Análise por Região de Severidade.....</b>	<b>55</b>
4.3 FATOR DE IMPACTO FINAL.....	56
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>57</b>
5.1 PUBLICAÇÕES.....	58
5.2 TRABALHOS FUTUROS. ....	58
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente automação industrial e a integração de tecnologias avançadas têm ampliado significativamente a demanda por sistemas elétricos confiáveis e eficientes. Nesse contexto, a qualidade da energia elétrica (QEE) desempenha um papel fundamental, pois garante a estabilidade e integridade das formas de onda de tensão e corrente, fatores essenciais para a operação segura de sistemas industriais e unidades consumidoras do Grupo A. No entanto, variações de tensão de curta duração (VTCD) podem comprometer o desempenho de equipamentos sensíveis e processos produtivos, gerando impactos técnicos e financeiros expressivos. Assim, torna-se essencial analisar como esses distúrbios afetam os consumidores e quais estratégias podem ser adotadas para mitigá-los.

O monitoramento da qualidade de energia é fundamental para reduzir os impactos negativos sobre equipamentos críticos e processos industriais. Além dos danos diretos aos equipamentos, VTCDs podem causar paralisações em linhas de produção e aumentos nos custos operacionais. Dois dos fatores mais relevantes para a ocorrência dessas perturbações são os métodos de acionamento de motores assíncronos e a inserção de geração distribuída (GD). Motores assíncronos, amplamente utilizados na indústria, podem causar afundamentos de tensão e distorções harmônicas durante a partida, especialmente quando acionados de forma direta ou compensada. Por outro lado, a geração distribuída, principalmente a fotovoltaica, pode afetar a estabilidade do sistema elétrico, pois introduz fluxos bidirecionais de potência que alteram os níveis de tensão. Esses fenômenos tornam essencial o desenvolvimento de estratégias para avaliar e mitigar seus impactos.

Embora a normativa do Módulo 8 do PRODIST descreva as diretrizes para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, ainda há poucos estudos que analisam simultaneamente os impactos dos acionamentos de motores assíncronos e da geração distribuída nas VTCDs em consumidores do Grupo A. Ferramentas como o OpenDSS possibilitam simulações detalhadas desses fenômenos, permitindo uma análise mais precisa de suas consequências. Cabral (2019) exemplifica essa abordagem ao investigar o impacto de fornos de indução trifásicos na qualidade da energia elétrica. Utilizando modelagem computacional, esse estudo identificou distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão e alterações na estabilidade do sistema, demonstrando que a conexão desses equipamentos pode afetar

significativamente a qualidade da energia. Esses achados reforçam a necessidade de estratégias de planejamento e mitigação para reduzir os impactos negativos, especialmente diante da crescente aplicação de ferramentas computacionais na análise integrada desses fatores.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo desenvolver um método simplificado para análise de VTCD, utilizando simulações computacionais para avaliar os impactos dos métodos de acionamento de motores assíncronos e da geração distribuída. A análise será aplicada a unidades consumidoras do Grupo A, permitindo uma caracterização detalhada dos distúrbios e seus efeitos sobre a qualidade da energia elétrica. Os resultados esperados incluem a criação de uma base de dados que possibilite a realização de análises mais ágeis e eficazes, auxiliando na tomada de decisões estratégicas para projetos e identificação de fontes de distúrbios em sistemas elétricos industriais. Dessa forma, busca-se fornecer subsídios técnicos para a implementação de medidas de mitigação mais eficientes.

Para demonstrar a aplicação do método proposto, este estudo utiliza, de forma adaptada, o exemplo apresentado por Mamede (2023). O caso avaliado envolve uma planta industrial do setor têxtil, composta por 105 motores de indução trifásicos (MIT) e seis quadros elétricos responsáveis pela distribuição de iluminação e tomadas. Esse estudo de caso permite validar a metodologia desenvolvida, demonstrando a aplicabilidade da abordagem para análise da qualidade da energia elétrica em diferentes cenários industriais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um método simplificado para simulação e análise de VTCD de acionamentos de MIT em unidades consumidoras do Grupo A em fase de projeto ou já em operação, utilizando modelagem e simulações no OpenDSS.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Com base no objetivo principal, incluem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar os conceitos de Qualidade de Energia, com ênfase nas VTCD.



- b) Desenvolver de metodologia simplificada para diagnóstico e avaliação dos impactos de partidas de motores e Geração Distribuída Fotovoltaica em instalações elétricas em termos de VTCD.
- c) Criar base de dados com a forma de onda e os efeitos transitórios do acionamento de partidas de motores.
- d) Validar metodologia através de um estudo de caso aplicado à uma planta industrial da literatura.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está organizado em capítulos que abordam, incluindo esse introdutório, seguindo para a fundamentação teórica sobre qualidade de energia e VTCD. Na sequência, apresenta-se a metodologia utilizada, incluindo o detalhamento e resultados das simulações no OpenDSS.

O capítulo 1 traz a introdução deste trabalho contextualizando o problema da qualidade de energia elétrica (QEE), com foco nos impactos de variações de tensão de curta duração (VTCD) em unidades consumidoras do Grupo A. Apresenta a relevância do estudo, seus objetivos gerais e específicos, além da estrutura do trabalho.

O capítulo 2 aborda os conceitos-chave relacionados à qualidade de energia, como VTCD, medições e geração distribuída. Apresenta normas internacionais, como IEEE 1159, IEEE 519, IEC 61004-4-30, e nacionais, como o PRODIST, que estabelecem parâmetros para análise e diagnóstico desses fenômenos.

O capítulo 3 detalha a abordagem metodológica, incluindo revisão bibliográfica, modelagem e simulação em OpenDSS. Explica o processo de definição das curvas de carga e geração distribuída, além da modelagem da planta industrial para análise de cenários transitórios e estáticos.

O Capítulo 4 desta dissertação apresenta a análise de resultados, explorando os impactos das simulações realizadas e a avaliação das variações de tensão de curta duração (VTCD). São discutidos os efeitos dos acionamentos de motores de indução trifásicos sobre a amplitude da tensão, considerando diferentes métodos de partida.

O Capítulo 5 traz as considerações finais, sintetizando as principais contribuições do estudo e os avanços proporcionados pela metodologia proposta.

Além disso, são discutidas limitações da pesquisa e sugestões para estudos futuros, incluindo aprimoramentos na análise e estratégias de mitigação de distúrbios.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica é uma etapa essencial, pois fornece a base conceitual e contextual necessária para o desenvolvimento da pesquisa. Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos, teorias e abordagens que sustentam a relevância do trabalho. A partir da revisão de literatura, definiu-se a metodologia adotada para a aplicação do estudo, bem como as contribuições esperadas com os resultados.

### 2.1 QUALIDADE DE ENERGIA

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é um fator essencial para garantir a estabilidade e integridade das formas de onda de tensão e corrente, bem como para assegurar o adequado funcionamento dos sistemas elétricos. Conforme definido pela IEEE (2019), a QEE está relacionada à manutenção do fluxo de potência e à minimização de distúrbios que possam comprometer equipamentos e processos industriais. A norma IEEE 1159™ *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* estabelece diretrizes para o monitoramento de fenômenos eletromagnéticos que afetam os sistemas elétricos, permitindo a identificação e mitigação de distúrbios que possam surgir tanto na alimentação da carga quanto na interação entre fonte e carga.

Para além da definição conceitual, o monitoramento da QEE é fundamental para localizar e interpretar corretamente os fenômenos eletromagnéticos. A IEEE 1159 fornece técnicas detalhadas de medição e análise, permitindo um acompanhamento sistemático dos eventos que afetam a qualidade da energia elétrica. O uso adequado dessas diretrizes possibilita um diagnóstico mais preciso e contribui para a implementação de medidas corretivas eficientes.

No contexto global, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) desempenha um papel fundamental na normatização da qualidade da energia elétrica, publicando padrões voltados para segurança, confiabilidade e eficiência dos sistemas elétricos. Da mesma forma, o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) atua no avanço da tecnologia e na criação de normas técnicas amplamente adotadas em redes elétricas ao redor do mundo. Esses órgãos estabelecem critérios normativos

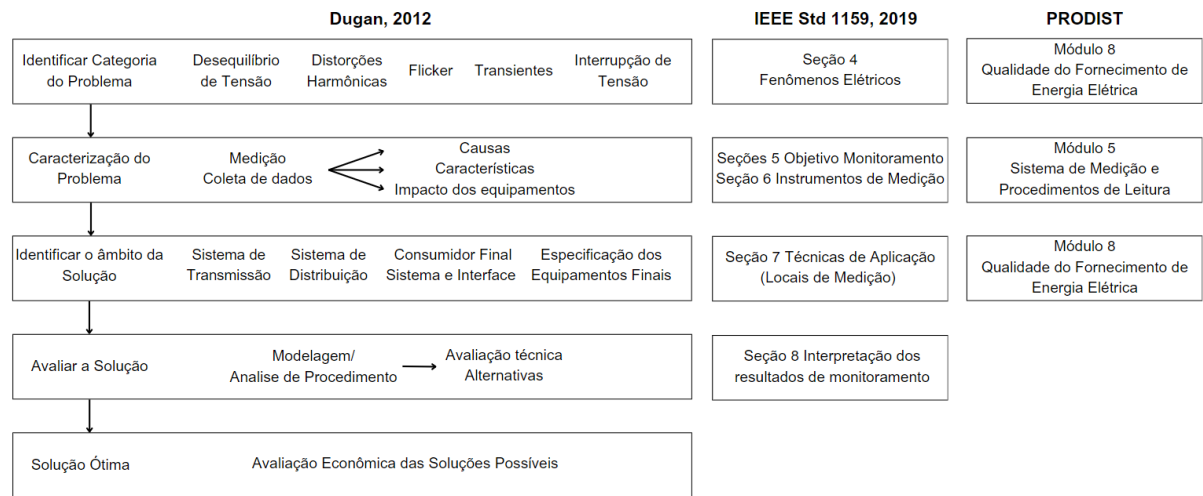
essenciais, garantindo que a operação dos sistemas elétricos ocorra dentro de padrões aceitáveis de estabilidade e desempenho.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regula a qualidade da energia elétrica por meio do Módulo 8 do PRODIST, que define indicadores e limites para assegurar a confiabilidade do fornecimento. Esse módulo estabelece padrões para variações de tensão, interrupções, flutuações (*flicker*) e distorções harmônicas, além de prever procedimentos para monitoramento contínuo e aplicação de penalidades em caso de não conformidade. O cumprimento dessas diretrizes é essencial para garantir a proteção de equipamentos industriais e a eficiência operacional dos sistemas elétricos.

O Módulo 8 do PRODIST também especifica metodologias para a instalação de medidores em pontos estratégicos da rede, permitindo a análise de dados históricos e a identificação de eventos que ultrapassem os limites normativos. Caso os padrões estabelecidos não sejam atendidos, as concessionárias de energia podem estar sujeitas a sanções regulatórias, incluindo multas e exigências de implementação de planos de ação corretiva. Essas medidas garantem que a qualidade do fornecimento elétrico seja mantida dentro dos limites estabelecidos, reduzindo os impactos negativos sobre consumidores industriais e comerciais.

Além dos aspectos normativos, os fenômenos eletromagnéticos que afetam a QEE abrangem uma ampla gama de variações e distúrbios, exigindo métodos eficazes de análise e monitoramento. Conforme discutido por Dugan (2012), a aplicação de um fluxograma estruturado, conforme apresentado na Figura 1, permite uma abordagem sistemática para identificar e resolver problemas de qualidade da energia, correlacionando os conceitos da norma IEEE 1159 com os procedimentos descritos no PRODIST. Dessa forma, o presente estudo analisará os principais fenômenos da QEE e seus limites normativos, discutindo a aplicação dessas diretrizes no diagnóstico e mitigação de distúrbios elétricos.

Figura 1 - Avaliação de Problemas de Qualidade de Energia



Fonte: Autora.

O método destaca a importância de entender o problema de forma completa antes de propor uma solução, incluindo a coleta de dados e a análise de impacto. O enfoque econômico ao final garante que a solução seja não só tecnicamente adequada, mas também sustentável financeiramente, promovendo uma abordagem balanceada entre custo e benefício.

Conforme exposto em Tabela 1, além da qualidade do produto fornecido pela concessionária de energia elétrica, é necessário considerar também as características da carga conectada no Ponto de Conexão.

Tabela 1 - Relação Distúrbios entre Sistema e Carga

<b>Sistema → Carga</b>	<b>Carga → Sistema</b>
Variações de tensão	Correntes harmônicas
Desequilíbrio de tensão	Corrente reativa
Harmônicos de tensão	Corrente Desbalanceada
Interrupção de tensão	<i>Notches</i> de tensão
Oscilações de tensão	Flutuação de tensão
Impulso de tensão	

Fonte: Leão (2014).

As transgressões no sistema alimentador estão diretamente associadas à forma de onda de tensão. Do ponto de vista da carga, no entanto, as distorções são

influenciadas tanto pela forma da onda de tensão quanto pela onda de corrente. Essa perspectiva dual é essencial para uma análise abrangente dos impactos e da qualidade de energia em sistemas elétricos. Ambos os elementos – a concessionária e as cargas conectadas – contribuem significativamente para o comportamento eletromagnético e a estabilidade das formas de onda no ponto de conexão.

De acordo com a IEEE (2019), a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) abrange uma ampla gama de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam as formas de onda de tensão e corrente em locais e momentos específicos do sistema elétrico. Esses fenômenos incluem variações e distúrbios que podem comprometer o desempenho e a estabilidade de sistemas elétricos, tanto no ponto de conexão quanto em outros pontos críticos da rede.

A análise de QEE requer a identificação e classificação dos fenômenos eletromagnéticos que afetam a tensão e a corrente. A Tabela 2 apresenta as principais categorias e características desses fenômenos, conforme as definições estabelecidas pela IEEE (2019). Entre os fatores analisados, destacam-se aspectos como oscilações de frequência, variações de amplitude e distorções harmônicas, que têm impactos distintos na operação dos sistemas.

Para simplificar os cálculos em circuitos complexos, o conceito de *per unit* (pu) é amplamente adotado em normas internacionais, como as da IEEE e da IEC. Esse conceito, que é adimensional, permite representar grandezas elétricas em relação a valores base, facilitando a análise de sistemas. Por exemplo, 1 pu corresponde a 100% da grandeza nominal, sendo os valores de base definidos conforme as características do sistema em estudo.

Tabela 2 – Categorias e Características Típicas dos Fenômenos Eletromagnéticos  
IEEE 1159-2019

Categoria	Duração Típica	Magnitude Típica	Categoria	Duração Típica	Magnitude Típica
<b>A. Transitório</b>			<b>C. Variações de Tensão de Longa Duração</b>		
Impulsivo			Interrupção	> 1 min	0.0 pu
Nanosegundos	< 50 ns		Subtensão		0.8 – 0.9 pu
Microsegundos	50 ns – 1 ms		Sobretensão		1.1 – 1.2 pu
Milisegundos	> 1 ms		Sobrecarga		
Oscilatório			<b>D. Desequilíbrio</b>		
Baixa frequência	0.3–50 ms	0–4 pu	Tensão	Estado	0.5-5%
Média frequência	0.3–50 ms	0–8 pu	Corrente	Permanente	1.0-3.0%
Alta frequência	5 $\mu$ s	0–4 pu	<b>E. Distorção forma de onda</b>		
<b>B. Variações de Tensão de Curta Duração</b>			DC offset	Estado	0-0.1%
Instantânea			Harmônicas	Permanente	0-20%
Sag	0.5 – 30 ciclos		Interharmônicas		0-2%

Swell	0.5 – 30 ciclos		Notching	
Momentânea			Noise	0-1%
Interrupção	0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu	<b>F. Flutuação de Tensão</b>	
Sag	30 ciclos – 3 s	0.1 – 0.9 pu		0.1-7%
Swell	30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 pu	<b>G. Variação de frequência de potência</b>	
Desequilíbrio de Tensão	30 ciclos – 3 s	2% – 15%	< 10 s	± 0.10 Hz
Temporária				
Interrupção	> 3 s – 1 min	< 0.1 pu		
Sag	> 3 s – 1 min	0.1 – 0.9 pu		
Swell	> 3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu		
Desequilíbrio de Tensão	> 3 s – 1 min	2% – 15%		

Fonte: Adaptado de IEEE, 2019.

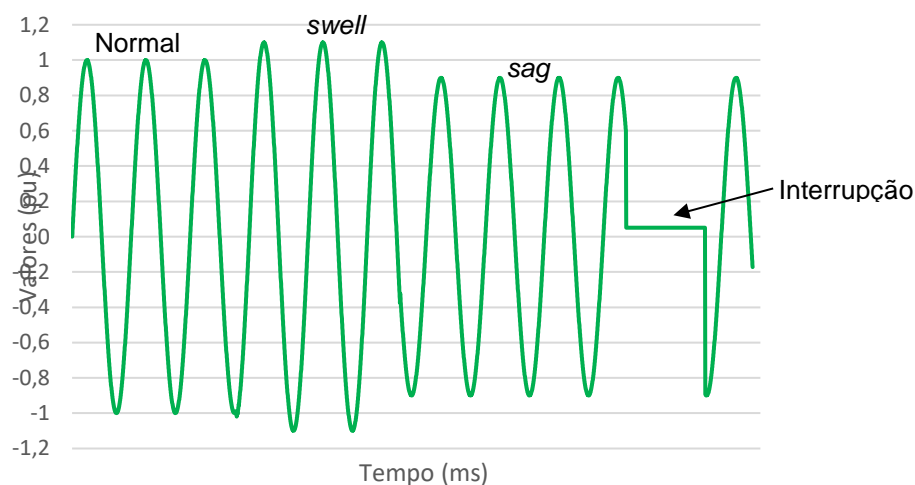
De acordo com a IEEE (2019), os transitórios são classificados em transitórios impulsivos e transitórios oscilatórios, sendo o termo "surto" frequentemente utilizado como sinônimo. A principal diferença entre esses dois tipos está na forma de onda resultante do fenômeno. Os transitórios impulsivos, geralmente causados por descargas atmosféricas, apresentam alterações rápidas e não periódicas na forma de onda. Além disso, esses eventos podem originar transitórios oscilatórios, caracterizados por variações periódicas que podem ocorrer em alta, média ou baixa frequência em relação à fundamental. Um exemplo típico de transitórios oscilatórios é o chaveamento de bancos de capacitores, que pode causar oscilações na tensão, na corrente ou em ambas as grandezas.

As VTCD, por sua vez, ocorrem frequentemente durante a ligação de grandes cargas que demandam correntes elevadas na partida, como motores industriais. Essas variações são classificadas de acordo com a duração e a magnitude da falha, sendo suas principais consequências as quedas momentâneas de tensão, capazes de causar falhas em equipamentos sensíveis. Conforme a IEEE (2019), uma interrupção é definida como uma redução da tensão para menos de 10% (0,1 pu) de seu valor de referência, com duração inferior a 1 minuto. Em contrapartida, os afundamentos de tensão (sags) correspondem a quedas na tensão RMS entre 0,1 e 0,9 pu, com durações que variam de 0,5 ciclos até 1 minuto.

A IEC 61000-4-30 e a IEEE 1159 subdividem os afundamentos de tensão em três categorias principais: instantâneo, momentâneo e temporário, que são associados às respostas operacionais dos dispositivos de proteção. Essas categorias ajudam a compreender as condições de operação e os limites de desempenho esperados para equipamentos de proteção em sistemas elétricos.

Por outro lado, os aumentos de tensão (*swells*) são caracterizados por elevações da tensão RMS entre 1,1 e 1,2 pu, classificados de acordo com a magnitude e a duração do evento. Esses aumentos geralmente estão associados a falhas, como curto-circuito, sendo influenciados pela localização do evento, pela impedância do sistema e pelo aterramento. Ambos os fenômenos – afundamentos e aumentos – representam desafios significativos para a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico, demandando atenção especial para a mitigação de seus impactos.

Figura 2 – Representação gráfica das VTCD



Fonte: Autora.

As Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD) são eventos com duração superior a 1 minuto e podem ser classificadas como sobretensões (1,1 – 1,2 pu) ou subtensões (0,8 – 0,9 pu). Esses desvios frequentemente resultam de falhas no sistema, ajustes inadequados de taps de transformadores ou acionamento de bancos de capacitores. Quando a tensão é reduzida para menos de 10% (0,1 pu) por mais de 1 minuto, caracteriza-se uma interrupção sustentada, associada a falhas sistêmicas e não a fenômenos eletromagnéticos (IEEE, 2019).

O desequilíbrio de tensão ou corrente em sistemas trifásicos é medido pela razão entre a magnitude da componente de sequência negativa e a de sequência positiva. Esse método, considerado mais preciso do que aproximações que desconsideram ângulos, permite avaliar desequilíbrios tanto em tensão quanto em corrente. Em condições normais, o desequilíbrio de tensão geralmente não ultrapassa 5%, mas, em sistemas com cargas monofásicas, o desequilíbrio de corrente pode exceder esse limite (IEEE, 2019).



As distorções na forma de onda incluem diversos fenômenos, como DC *offset*, harmônicas, inter-harmônicas, *notching* e *noise*. O DC *offset* ocorre quando uma componente de corrente contínua (CC) é superposta a uma tensão alternada (CA), podendo resultar de perturbações geomagnéticas ou retificação de meia onda. Já as harmônicas correspondem a múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema, enquanto as inter-harmônicas referem-se a frequências não inteiras e superiores a zero. No caso do Sistema Elétrico Brasileiro, cuja frequência fundamental é de 60 Hz, as harmônicas de ordem 2 e 3 equivalem a frequências de 120 Hz e 180 Hz, respectivamente, enquanto sub-harmônicas são frequências inferiores à fundamental (0 a 60 Hz) (Leão, 2014).

As distorções harmônicas têm como principais fontes cargas não lineares, como motores, capacitores, inversores de frequência, carregadores de bateria, equipamentos de processamento de dados e lâmpadas fluorescentes. A norma IEEE 519-2014 define as distorções harmônicas em termos de magnitude e ângulo de cada ordem, sendo o *Total Harmonic Distortion* (THD) o índice utilizado para expressar o nível global de distorção.

O *notching* refere-se a cortes na tensão causados pela comutação de corrente em retificadores, resultando em curtos-circuitos momentâneos. Esses distúrbios são frequentemente associados ao uso de inversores de frequência (IEEE, 2019). Por sua vez, o *noise* é caracterizado como um ruído de banda larga (inferior a 200 kHz), presente nos condutores de fase ou neutro, frequentemente agravado por falhas no aterramento do sistema.

As flutuações de tensão são variações na magnitude da tensão que devem permanecer entre 0,95 e 1,05 pu, conforme a norma ANSI C84.1 (IEEE, 2019). Quando essas flutuações afetam a luminância, ocorre o fenômeno de cintilação (*flicker*), que pode causar desconforto visual e afetar o desempenho em ambientes de trabalho. A norma IEEE *Standard* 1453™-2022, baseada na IEC 61000-4-15, apresenta métodos para monitorar e limitar os impactos do *flicker* em sistemas CA.

Por fim, as variações de frequência nos sistemas elétricos são padronizadas em 50 Hz ou 60 Hz, dependendo do país. Essas variações são influenciadas pela capacidade do gerador e pelas cargas conectadas, podendo indicar perda de equilíbrio quando ocorrem desvios significativos (IEEE, 2019).

## 2.2 QUALIDADE DO PRODUTO

No Brasil, a regulamentação da qualidade do fornecimento de energia elétrica passou por um processo evolutivo que pode ser entendido a partir de uma análise histórica das leis e órgãos responsáveis. A Lei nº 9.478/1997 criou o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), composto por Ministros e presidido pelo Ministério de Minas e Energia (MME). O CNPE tem como objetivo, entre outros, proteger os interesses dos consumidores em relação ao preço, qualidade e oferta de produtos energéticos (Lei nº 9.478/1997; Decreto nº 3.520/2000).

Em 1996, a Lei nº 9.427 instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), uma entidade autônoma vinculada ao MME, com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as diretrizes do governo federal (Lei nº 9.427/1996).

Mais recentemente, a Resolução Normativa ANEEL nº 1000, que entrou em vigor em janeiro de 2022, consolidou normas anteriores, como as resoluções 414, 470 e 901, estabelecendo regras para a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica. Essa resolução é integrada pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), detalhados na Resolução Normativa nº 956/2021, que substituiu resoluções anteriores, como as de números 395, 424 e 432.

O PRODIST é estruturado em onze módulos, com o Módulo 8 dedicado à Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Esse módulo abrange aspectos relacionados à qualidade do produto, serviços, segurança do trabalho e instalações. Ele se aplica não apenas às distribuidoras e consumidores, mas também a agentes geradores, importadores e exportadores de energia, além do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e transmissoras responsáveis pelas Demais Instalações de Transmissão (DIT).

Na qualidade do produto, o Módulo 8 considera fenômenos tanto em regime permanente quanto transitório. No regime permanente, incluem-se variações de tensão, fator de potência, harmônicos, desequilíbrios de tensão, flutuações e variações de frequência. Em regime transitório, destacam-se as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). Para assegurar a qualidade, o módulo define faixas de tolerância de tensão para cada Tensão de Referência (TR), que devem ser mantidas pelas distribuidoras para garantir a confiabilidade e a estabilidade do fornecimento. A

Figura 3 apresenta essas faixas, classificadas conforme os principais níveis de tensão praticados no Sistema Interligado Nacional (SIN), permitindo uma visualização clara das margens de variação aceitáveis.

Essas regulamentações são fundamentais para alinhar os padrões de qualidade aos requisitos técnicos e operacionais, protegendo consumidores de problemas como danos a equipamentos e interrupções de serviço, além de garantir o desempenho eficiente do sistema elétrico.

Figura 3 – Imagem representando de forma compilado os níveis de tensão conforme Módulo 8 do PRODIST

		ALTA TENSÃO			BAIXA TENSÃO	
		Tabela 1	Tabela 2	Tabela 3	Tabela 4	Tabela 11
CRÍTICA	$T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$	$TL > 1,07TR$	$TL > 1,07TR$	$TL > 1,05TR$	$TL > 403$ $TL > 233$	$TL > 233$ $TL > 117$
PRECÁRIA	$T_R + \Delta_{ADSUP}$	$1,05TR < TL \leq 1,07TR$	$1,05TR < TL \leq 1,07TR$	$1,05TR < TL$	$399 < TL \leq 403$ $231 < TL \leq 233$	$231 < TL \leq 233$ $116 < TL \leq 117$
ADEQUADA	$T_R$	$TL \leq 1,05TR$	$TL \leq 1,05TR$	$TL \leq 1,05TR$	$TL \leq 399$ $TL \leq 231$	$TL \leq 231$ $TL \leq 116$
ADEQUADA		$TR \geq 230 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq TR < 230 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq TR < 69 \text{ kV}$	<b>380/220</b>	<b>220/110</b>
ADEQUADA		$0,95TR \leq TL$	$0,95TR \leq TL$	$0,93TR \leq TL$	$350 \leq TL$ $202 \leq TL$	$202 \leq TL$ $101 \leq TL$
PRECÁRIA	$T_R - \Delta_{ADINF}$	$0,93TR \leq TL < 0,95TR$	$0,90TR \leq TL < 0,95TR$	$0,90TR \leq TL < 0,93$	$331 \leq TL < 350$ $191 \leq TL < 202$	$191 \leq TL < 202$ $96 \leq TL < 101$
CRÍTICA	$T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$	$TL < 0,93TR$	$TL < 0,90TR$	$TL < 0,90TR$	$TL < 331$ $TL < 191$	$TL < 191$ $TL < 96$

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2021.

A partir da Tensão de Referência ( $T_R$ ), a tensão em regime permanente pode ser classificada em três faixas, conforme definido pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021):

- Faixa Adequada de Tensão: Representada pela cor verde, essa faixa corresponde a uma variação média superior de até 5% ou inferior de 8-13% em relação à  $T_R$ . Dentro dessa faixa, a qualidade do fornecimento é considerada adequada para a maioria dos consumidores.
- Faixa Precária de Tensão: Indicada pela cor amarela, essa faixa é definida pelos intervalos  $T_R - \Delta_{ADINF}$  e  $T_R + \Delta_{ADSUP}$ . Apesar de ser tolerável em curto prazo, a tensão nessa faixa pode causar impactos moderados em equipamentos.

- **Faixa Crítica de Tensão:** Representada pela cor vermelha, essa faixa é definida pelos limites  $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$  e  $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ . Valores dentro dessa faixa indicam condições críticas, com riscos elevados de danos a equipamentos e interrupções no fornecimento.

Essas classificações ajudam a identificar visualmente os níveis de qualidade do fornecimento de energia, facilitando a análise de conformidade com os padrões estabelecidos.

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são definidas como alterações no valor eficaz de tensão que duram mais de um ciclo de senoide, mas menos de 3 minutos. Essas variações são classificadas em três tipos principais, conforme o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021):

- **Interrupções:** Queda de tensão para valores próximos de 0%.
- **Afundamentos:** Reduções momentâneas na tensão, geralmente causadas pela conexão de grandes cargas ou falhas no sistema.
- **Elevações:** Aumentos momentâneos de tensão, frequentemente associados a eventos de chaveamento.

O Quadro 1, extraído do PRODIST, detalha as classes e limites associados às VTCD, oferecendo um panorama completo para a análise desses fenômenos.

Quadro 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude <math>V_{RMS}</math> em relação à <math>V_{REF}</math></b>
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão – IMT	$t \leq 3 \text{ s}$	$V < 0,1 \text{ pu}$
	Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT	$3 \text{ s} \geq t \geq 1 \text{ ciclo}$	$0,9 \text{ pu} > V \geq 0,1 \text{ pu}$
	Elevação Momentânea de Tensão – EMT	$3 \text{ s} \geq t \geq 1 \text{ ciclo}$	$V > 1,1 \text{ pu}$
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão – ITT	$3 \text{ min} > t > 3 \text{ s}$	$V < 0,1 \text{ pu}$
	Afundamento Temporário de Tensão – ATT	$3 \text{ min} > t > 3 \text{ s}$	$0,9 \text{ pu} > V \geq 0,1 \text{ pu}$
	Elevação Temporária de Tensão – ETT	$3 \text{ min} > t > 3 \text{ s}$	$V > 1,1 \text{ pu}$

Fonte: ANEEL, 2021.

Os indicadores que compõem as VTCD são apresentados nas fórmulas (ANEEL, 2021).

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} * 100[\%]$$

Equação 1

$$\Delta t_e = t_f - t_i$$

Equação 2

$$f_e = n$$

Equação 3

$$FI = \frac{\sum_A^i (f_e * f_{pond_i})}{FI_{BASE}}$$

Equação 4

$V_e$	Amplitude do evento de VTCD (em %)
$V_{res}$	Tensão residual do evento de VTCD (em Volts)
$V_{ref}$	Tensão de referência (em Volts)
$\Delta t_e$	Duração do evento de VTCD (em milissegundos)
$t_f$	Instante final do evento de VTCD
$t_i$	Instante inicial do evento de VTCD
$n$	Quantidade de eventos de VTCD registrados no período de avaliação
$f_e$	frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apurada por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade $i$ , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e $I$ ;
$f_{pond_i}$	fator de ponderação para cada região de sensibilidade $i$ , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração;
$FI$	Fator de Impacto
$FI_{BASE}$	Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 dias de VTCD para cada região de sensibilidade.

O PRODIST estabelece que os registros dos eventos de VTCD devem ser apresentados em termos de amplitude e duração, conforme a estratificação da Tabela 3. Para cada combinação de amplitude e duração previstas na tabela, deve-se contabilizar a frequência de ocorrência do evento, representada pelo parâmetro  $f_e$ . Assim, para o correto preenchimento da tabela, é necessário que cada evento de VTCD tenha seus instantes de início e fim registrados, bem como sua amplitude. Por exemplo, se ocorrer uma variação de tensão para 0,75 pu durante 500 ms, esse será contabilizado como um evento na respectiva faixa de amplitude e duração.



(0,80 - 0,85)			REGIÃO G
(0,70 - 0,80)	REGIÃO B	REGIÃO D	
(0,60 - 0,70)			
(0,50 - 0,60)	REGIÃO C		
(0,40 - 0,50)		REGIÃO F	
(0,30 - 0,40)	REGIÃO E		
(0,20 - 0,30)			
(0,10 - 0,20)			
< 0,10			

Fonte: ANEEL, 2021.

O Fator de Impacto (FI) é o indicador utilizado para quantificar os efeitos das variações de tensão de curta duração (VTCD). Ele é obtido a partir da ponderação entre a frequência dos eventos registrados e os fatores de severidade associados às regiões de sensibilidade. Para fins de avaliação da qualidade do produto, considera-se como valor de referência do FI igual a 1,0 (adimensional), tanto para sistemas de média quanto de alta tensão (ANEEL, 2023).

O Fator de Ponderação ( $F_{pondi}$ ) para cada região de sensibilidade são determinados pela Tabela 8 do Módulo 8, e aqui apresentado na Tabela 5. Na mesma tabela tem-se  $F_{BASE}$  é um valor de referência utilizado para normalizar a severidade das VTCD que ocorrem em um sistema elétrico. Ele ajuda a comparar os eventos registrados com um limite esperado de desempenho do sistema, considerando como uma pontuação de referência que indica o nível máximo aceitável de variações de tensão em um período de 30 dias. Quando o Fator de Impacto (FI) ultrapassa esse valor de referência, pode indicar problemas de qualidade no fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2023).

Tabela 5 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal ( $V_n$ )

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação ( $f_{pond}$ )	Fator de Impacto Base ( $FI_{BASE}$ )	
		$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		

I	0,04		
---	------	--	--

Fonte: ANEEL, 2021.

## 2.3 MEDIÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA

Há uma ampla variedade de equipamentos de medição disponíveis, cada um com características específicas para a aquisição e processamento de dados relacionados às transgressões na qualidade de energia. Esses métodos de detecção podem ser divididos em duas categorias principais. Os métodos no domínio do tempo incluem técnicas como o Método RMS, o Método do Pico de Tensão e a Componente Fundamental, que analisam diretamente os valores das grandezas elétricas no tempo. Já os métodos de transformação de coordenadas englobam técnicas mais avançadas, como a Transformada de Fourier, a Transformada *Wavelet*, a Transformada S e o Método de Detecção de Kalman do Complexo Estendido, que utilizam transformações matemáticas para identificar padrões e eventos nos sinais (ANEEL, 2021). A norma NBR IEC 61000-4-30, baseada na norma internacional IEC 61000-4-30, estabelece diretrizes para a medição e interpretação de resultados dos fenômenos de tensão, classificando os equipamentos de medição em três categorias principais. A Classe A é destinada a aplicações contratuais que demandam alta precisão e conformidade com normas rigorosas, enquanto a Classe S é indicada para levantamentos preliminares de qualidade de energia, com menores exigências de processamento. A Classe B, por sua vez, está prevista para remoção em futuras revisões da norma, sendo substituída por equipamentos das Classes A ou S, que possuem padrões mais modernos e confiáveis (ABNT, 2023; ANEEL, 2021).

A medição da qualidade de energia deve seguir as diretrizes do Módulo 5 do PRODIST, que estabelece os requisitos mínimos para os sistemas de medição nos sistemas de distribuição. De acordo com o item 49 desse módulo, os sistemas destinados à apuração dos parâmetros de qualidade devem atender às normas vigentes da série IEC 61000 ou equivalentes brasileiras e utilizar equipamentos de medição Classe A ou S, conforme especificado na norma IEC 61000-4-30. No caso dos equipamentos de Classe A, as medições devem ser realizadas em intervalos de 12 ciclos para sistemas de 60 Hz e 10 ciclos para redes de 50 Hz, com atualizações a cada meio ciclo de senóide. Esses valores podem ser agregados em intervalos de 150 ciclos (para redes de 50 Hz), 180 ciclos (para redes de 60 Hz), 10 minutos e 2



horas, exceto em eventos gerados por disparos, quando não ocorre agregação. Essa abordagem garante que cada evento seja registrado de forma única e consistente, evitando duplicações nos parâmetros de qualidade de energia e assegurando maior confiabilidade nos dados coletados (ABNT, 2023).

## 2.4 MODELAGEM DE CARGAS

O IEEE Std 2781™-2022, intitulado "IEEE Guide for Load Modeling and Simulations for Power Systems", foi desenvolvido pela IEEE Power and Energy Society para fornecer diretrizes abrangentes sobre modelagem e simulações de cargas em sistemas de energia elétrica. Esse guia aborda métodos tradicionais e emergentes de modelagem, incluindo abordagens baseadas em medições e em componentes, além de incorporar orientações para o uso de tecnologias modernas, como dispositivos conectados por eletrônica de potência, veículos elétricos e infraestruturas de Internet das Coisas (IoT). Essas diretrizes visam melhorar a precisão das análises e atender às demandas de redes elétricas modernas e cada vez mais complexas (IEEE, 2022).

De acordo com o guia, os modelos de carga são classificados em estáticos e dinâmicos, cada um com características específicas e aplicações distintas. Os modelos estáticos, que representam relações diretas entre tensão e corrente, são indicados para análises de longo prazo e planejamento de sistemas. Por outro lado, os modelos dinâmicos são utilizados para simulações transitórias e avaliações de estabilidade, sendo essenciais para compreender o comportamento do sistema em eventos como falhas e chaveamentos. Uma abordagem híbrida, que combina modelos estáticos e dinâmicos, pode ser ideal para equilibrar precisão e eficiência em estudos mais complexos (IEEE, 2022).

O padrão também apresenta diretrizes detalhadas para a classificação de cargas, organizando-as com base em suas características elétricas, funcionais e operacionais. As cargas são agrupadas em categorias como residencial, comercial, industrial e agrícola, considerando fatores como resistividade, eficiência energética e tipos de motores utilizados. Exemplos incluem cargas resistivas, iluminação eficiente, fontes de alimentação de modo contínuo, motores diretos e motores controlados por acionamento. Essa estrutura de classificação facilita a seleção de modelos adequados

para diferentes aplicações, desde planejamento e operação de sistemas até análises de estabilidade em redes modernas, como microgrids e redes ativas.

Ao oferecer essas diretrizes, o IEEE Std 2781™-2022 contribui para melhorar a precisão na modelagem de cargas, permitindo enfrentar desafios técnicos relacionados à qualidade da energia, estabilidade do sistema e integração de fontes renováveis. Além disso, ele auxilia profissionais a desenvolverem representações mais precisas de redes elétricas, atendendo às demandas das infraestruturas elétricas do futuro (IEEE, 2022).

Tabela 6 – Taxa de Amostragem versus Desenvolvimento de Modelo de Carga

<b>Taxa de Amostragem até</b>	<b>Modelo de Carga Obtido</b>	<b>Nível de Confiança</b>
1 ms	Estático + Dinâmico/ZIP + MIT	Alta
	Modelo de carga harmônica (apenas harmônicos baixos)	Média/Baixa
10 ms	Dinâmico/ MIT	Média
	Estático/ZIP	Alta
100 ms	Dinâmico/ MIT	Baixa
	Estático/ZIP para estabilidade de frequência e tensão	Alta
	Estático/ZIP para estabilidade transitória	Baixa
1 s	Estático/ZIP para estabilidade de frequência	Média
	Estático/ZIP para estabilidade de tensão	Média/Alta
2 s	Estático/ZIP para estabilidade de frequência	Baixa
	Estático/ZIP para estabilidade de tensão	Média
1 min – 15 min	Carga estática P, Q	Baixa/Média

Fonte: IEEE Std 2781™-2022

## 2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Com o objetivo de validar a metodologia aplicada e reforçar a relevância do tema abordado, foi realizada uma pesquisa no repositório da IEEE, considerando artigos publicados entre 2020 e 2024. A busca foi conduzida utilizando palavras-chave como VTCD e qualidade de energia, permitindo a identificação de estudos relevantes sobre variações de tensão de curta duração e geração distribuída (GD). Para a seleção dos artigos, foram considerados aqueles mais alinhados com a temática deste estudo, priorizando publicações em periódicos e conferências de alto impacto na área

de sistemas elétricos e qualidade da energia, garantindo uma base teórica atualizada e consistente.

A QEE é um fator essencial para garantir a operação segura e eficiente de sistemas industriais e de distribuição. Dentro desse contexto, diversas pesquisas abordam a análise das VTCD e seus impactos nos processos produtivos e na rede elétrica. Essas variações podem comprometer a confiabilidade dos equipamentos, gerar perdas financeiras e afetar a estabilidade da rede elétrica. Diferentes abordagens têm sido utilizadas para investigar as causas e consequências desses distúrbios, variando desde estudos baseados em dados estatísticos até simulações computacionais mais avançadas. No entanto, a maioria dessas abordagens não considera diretamente os impactos específicos dos acionamentos industriais sobre a rede elétrica, o que reforça a importância da metodologia proposta neste estudo (SILVA et al., 2021).

Os impactos financeiros das VTCDs são um dos principais pontos de estudo na área de qualidade da energia. A análise dos custos operacionais gerados por esses eventos demonstrou que flutuações de tensão podem resultar em paradas não planejadas de processos produtivos, afetando diretamente a produtividade e o rendimento industrial. Apesar da relevância desse tema, alguns estudos focam apenas na quantificação econômica dos prejuízos, sem propor soluções técnicas para mitigação dos impactos, o que difere da abordagem adotada neste estudo, que busca quantificar e mitigar os efeitos das VTCDs causadas por acionamentos industriais. Em uma pesquisa envolvendo 33 empresas conectadas a sistemas de 11,9-13,8 kV, foi determinado um custo médio de US\$ 7.364,75 por evento, podendo ultrapassar US\$ 41.414,00 em setores como o petrolífero, onde o alto valor agregado do produto intensifica os prejuízos financeiros (MOTOKI, 2021).

A previsibilidade dos eventos de VTCD é um fator crítico para concessionárias de energia e consumidores industriais. Modelos probabilísticos têm sido amplamente utilizados para avaliar a frequência e severidade dessas perturbações, permitindo que sejam adotadas estratégias preventivas na operação da rede elétrica. Estudos mostram que a configuração da proteção da rede e o tipo de carga conectada são determinantes para a ocorrência desses eventos. Em um estudo que considerou 737 barras e 229 consumidores, foi demonstrado que interrupções de curta duração ocorrem com maior frequência, enquanto as interrupções mais longas resultam em maiores perdas financeiras individuais. Além disso, o estudo propõe que a

probabilidade desses eventos depende diretamente da localização das falhas e das configurações de proteção (CEBRIAN; KAGAN; MILANOVIC, 2018).

Além da previsibilidade, a avaliação experimental das VTCDs também é um ponto-chave para compreender a qualidade da energia. Medições realizadas em redes urbanas de baixa tensão (0,4 kV) demonstraram que a incidência de variações de tensão, flutuações e assimetrias de fase é um fator crítico não apenas para a indústria, mas também para estabelecimentos comerciais e residenciais. Apesar da relevância dos dados coletados, a ausência de simulações computacionais dificulta a previsão de cenários futuros e a identificação de soluções eficazes para mitigar esses impactos. Diferente dessas abordagens, este estudo integra simulações computacionais detalhadas para avaliar o impacto das VTCDs nas instalações industriais, permitindo maior precisão na identificação e mitigação dos distúrbios (BIRYULIN; KUDELINA; LARIN, 2020).

Outro aspecto relevante é a influência da geração distribuída na estabilidade da rede elétrica. A inserção de fontes como a geração fotovoltaica pode provocar oscilações de tensão e deterioração do fator de potência, principalmente devido à injeção bidirecional de energia no sistema elétrico. Estudos indicam que o fluxo reverso de potência pode impactar a saturação do núcleo dos transformadores, comprometendo sua eficiência e reduzindo sua vida útil. Para mitigar esses impactos, soluções como filtros ativos, filtros passivos e dispositivos FACTS foram analisadas, sendo que o Condicionador Unificado de Qualidade de Energia demonstrou maior eficiência na compensação simultânea de distúrbios de tensão e corrente (VEIGA, 2023; RAZMI, 2023).

Atribuir responsabilidades sobre os eventos de VTCD é um desafio dentro da regulamentação da qualidade da energia. Métodos que utilizam análise de correntes de desequilíbrio antes e depois de transformadores permitem identificar a origem do distúrbio, diferenciando se foi causado pela concessionária ou pelo consumidor. Simulações realizadas no MATLAB demonstraram que quando uma VTCD ocorre no primário do transformador, o desequilíbrio de sequência negativa se projeta no secundário, mas o inverso não ocorre, revelando diferenças no comportamento da propagação desses distúrbios em diferentes topologias de rede (FERREIRA, 2023).

A detecção de VTCDs é um campo em constante evolução, e diversas técnicas têm sido aplicadas para aprimorar sua identificação. Métodos baseados no domínio do tempo e da frequência, como Wavelet Transform e Kalman Filtering, são eficientes

na identificação de variações de tensão. Testes demonstraram que a Transformada Wavelet e o método dq são os mais precisos na detecção da amplitude e do início e fim das quedas de tensão, enquanto o filtro de Kalman se destaca por sua robustez em relação a ruídos e distúrbios não lineares (HU, 2022).

Os acionamentos industriais desempenham um papel importante na ocorrência e na sensibilidade às VTCDs. Equipamentos de frequência variável, muitas vezes utilizados para a partida de motores, podem tanto causar quanto sofrer com afundamentos de tensão. Testes realizados com oito tipos de equipamentos, com potências entre 7,5 kW e 18,5 kW, demonstraram que em afundamentos trifásicos, a duração crítica varia entre 10 ms e 62 ms, e a magnitude crítica de tensão entre 64% e 76%. Além disso, foi observado que, quando a carga exige um torque elevado, a tolerância ao afundamento de tensão diminui, destacando a necessidade de um planejamento adequado na escolha do método de acionamento (XU, 2019).

Diante desse cenário, estudos recentes têm buscado soluções mais acessíveis e aplicáveis para a análise das VTCDs. Neste estudo, propõe-se um método simplificado para análise de VTCD em unidades consumidoras do Grupo A, utilizando simulações computacionais no OpenDSS. Essa abordagem permite quantificar os impactos da corrente de partida dos motores de indução na amplitude da tensão, além de oferecer uma comparação entre diferentes métodos de acionamento de motores assíncronos. O alinhamento com as diretrizes do PRODIST - Módulo 8 garante que essa metodologia possa ser aplicada diretamente por concessionárias e consumidores industriais, oferecendo um recurso técnico confiável para avaliação e mitigação dos distúrbios (PRODIST, 2023).

A contribuição deste estudo se destaca pelo seu foco em analisar os impactos das cargas industriais na rede elétrica, enquanto outras pesquisas priorizam a identificação dos distúrbios ou a avaliação econômica dos eventos. A utilização de simulação computacional oferece uma ferramenta eficiente para a avaliação preditiva e a mitigação dos impactos das VTCDs, tornando-se uma solução prática para concessionárias e indústrias que buscam melhorar a qualidade da energia e reduzir os prejuízos causados por essas variações.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi desenvolvida a partir de uma abordagem integrada que combina pesquisa bibliográfica, simulações computacionais e análise de dados. Inicialmente, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica para fundamentar o tema. Em seguida, foram utilizadas curvas de carga elaboradas em AYRES (2020). Essas curvas foram incorporadas em simulações realizadas por meio do software OpenDSS, permitindo a modelagem detalhada do sistema e a avaliação dos impactos das variáveis estudadas. Essa abordagem visa garantir a robustez dos resultados, ao combinar fundamentos teóricos sólidos, dados reais e análises computacionais. Esse capítulo irá apresentar a metodologia proposta para atingir os objetivos propostos por este trabalho.

A Figura 4, apresenta a metodologia proposta para este trabalho. Após definido o objetivo final do estudo que é criar a metodologia de análise para diagnóstico de VTCD, durante a revisão bibliográfica foi possível determinar o método de análise e apresentação dos resultados que será utilizado a Tabela 4, porém com nova região de sensibilidade para que quantificar e visualizar quando a QEE está dentro dos parâmetros estabelecidos por normas e legislações.

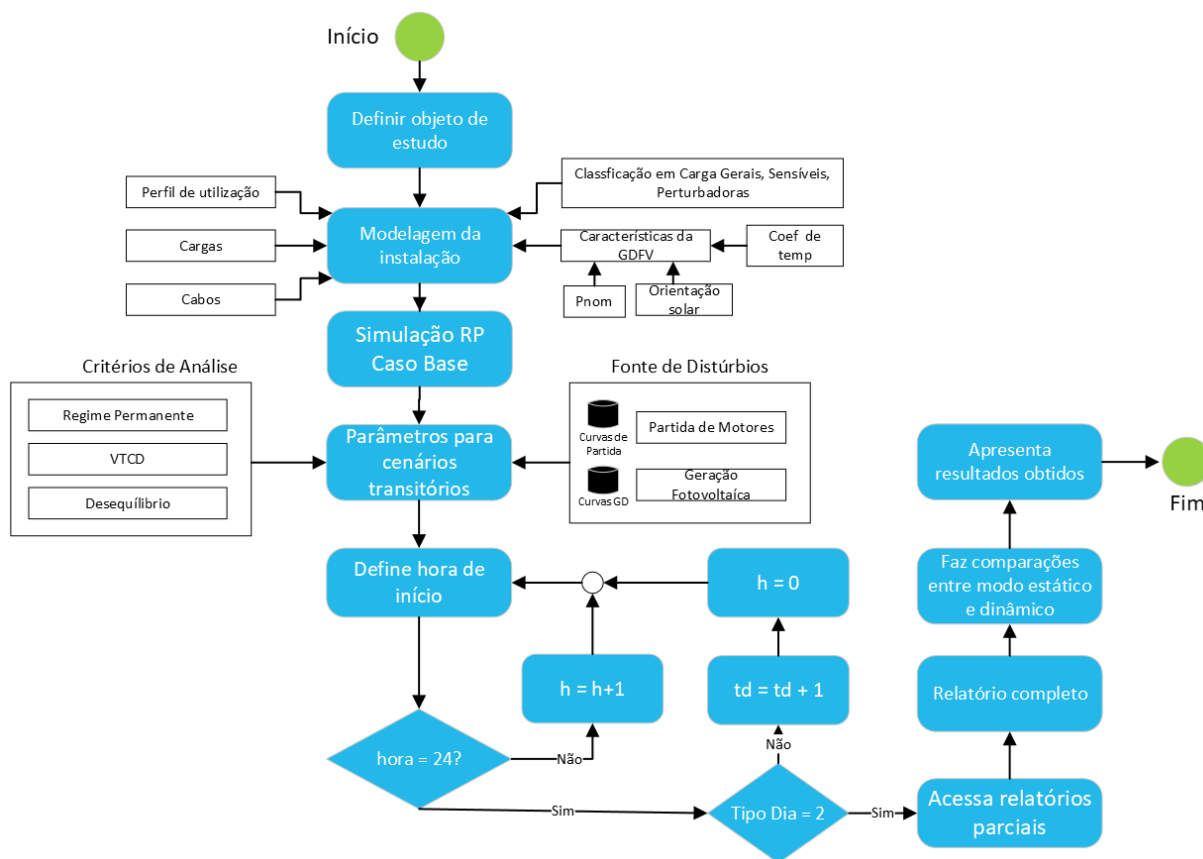
As instalações para análise têm como foco consumidores industriais de média tensão, no entanto, também pode ser aplicado a consumidores de baixa tensão.

Para a modelagem da instalação é necessário que informações sejam coletadas *in loco* ou por meio de análise de documentação da planta.

O perfil de utilização pode ser determinado de forma teórica por curvas disponibilizadas, por exemplo no software como a *do PSL DMS* ou de outras referências da literatura, ou em casos práticos é determinado pelo próprio estabelecimento, e perguntas como qual é o horário de funcionamento da planta e de equipamentos específicos? É um processo contínuo onde as máquinas são acionadas uma única vez? Ou há intermitências?

Essas bases oferecem curvas típicas de funcionamento, de acordo com os perfis operacionais específicos de cada classe de consumidor, por exemplo, curvas industriais ou atividades predominantemente comerciais. Mas podem ser adaptadas para diferentes perfis, como setores com funcionamento 24 horas, operação comercial ou intermitente. Inclusive podem ser utilizadas medições obtidas de registradores de grandezas elétricas ou memórias de massa de medidores.

Figura 4 – Fluxograma Metodologia de Trabalho



Fonte: Autora.

O software utilizado para simulação desse trabalho é o OpenDSS (*Open Distribution System Simulator*) é um software de código aberto desenvolvido pela *Electric Power Research Institute* (EPRI). Amplamente utilizado para simulação e análise de sistemas de distribuição de energia elétrica. Sua principal finalidade é oferecer suporte a estudos relacionados ao planejamento, operação e integração de tecnologias modernas nas redes elétricas.

O OpenDSS é uma ferramenta de simulação desenvolvida para análise de sistemas elétricos de distribuição, capaz de realizar estudos em regime permanente e dinâmico. O software permite simulações detalhadas de fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e análises de qualidade de energia, incluindo a avaliação de harmônicos e inter-harmônicas. Entre seus diferenciais, destaca-se a capacidade de modelar e analisar os efeitos da Geração Distribuída (GD), como fontes fotovoltaicas e eólicas, além de considerar a inserção de tecnologias emergentes, como inversores de potência e veículos elétricos.

O OpenDSS é altamente flexível e extensível, permitindo que os pesquisadores personalizem modelos por meio de bibliotecas externas (DLLs) e utilizem linguagens como Python,

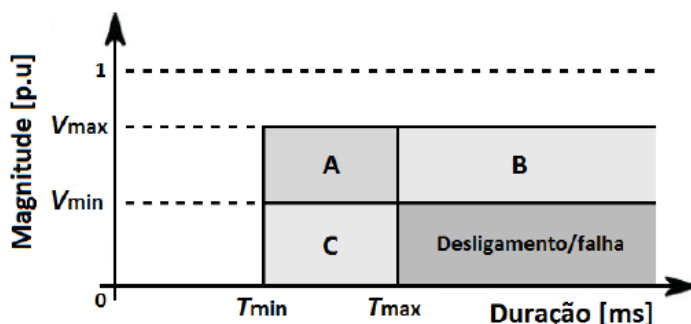
Matlab e C# para controlar e automatizar simulações. Além disso, o software oferece uma interface gráfica (OpenDSS-G) e suporte para uso baseado em scripts, o que facilita a configuração e análise de cenários complexos. Por esses motivos, o software OpenDSS foi utilizado para esse trabalho.

A adequada caracterização das cargas conectadas ao sistema elétrico é fundamental para a análise da qualidade da energia, especialmente em estudos relacionados a distúrbios como variações de tensão. Nesse contexto, as cargas são geralmente classificadas em três categorias: sensíveis, perturbadoras e gerais. As cargas sensíveis são aquelas que apresentam suscetibilidade a distúrbios mesmo de pequena magnitude, podendo sofrer interrupções ou mau funcionamento. As cargas perturbadoras, por sua vez, são responsáveis por introduzir distúrbios na rede, como harmônicos, oscilações de tensão e variações abruptas de demanda. Já as cargas gerais não possuem características específicas de sensibilidade ou de perturbação significativas. Essa classificação permite avaliar tanto os impactos que as cargas causam ao sistema quanto os efeitos que sofrem diante de perturbações, sendo essencial para a definição de estratégias de mitigação e de monitoramento da qualidade da energia elétrica.

De acordo com Costa (2020), a resposta de equipamentos frente às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) pode ser representada por curvas de sensibilidade, como as padronizadas ITIC, CBEMA e SEMI F47. No entanto, a adoção de curvas específicas para cada tipo de equipamento permite uma análise mais realista e aderente ao seu comportamento eletromagnético. Estudos experimentais demonstram que, em diversos casos, a sensibilidade dos equipamentos pode ser modelada por curvas retangulares, nas quais considera-se que o equipamento é suscetível a eventos cuja tensão residual esteja abaixo de um valor crítico de magnitude, denominado  $V_{crit}$ , e cuja duração seja superior a um tempo crítico, denominado  $T_{crit}$ . Essa abordagem simplificada mantém coerência com observações empíricas e facilita a análise probabilística da resposta de cargas a distúrbios, o conceito pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 – Incerteza ao avaliar a sensibilidade de um determinado tipo de equipamento





Fonte: COSTA, 2020.

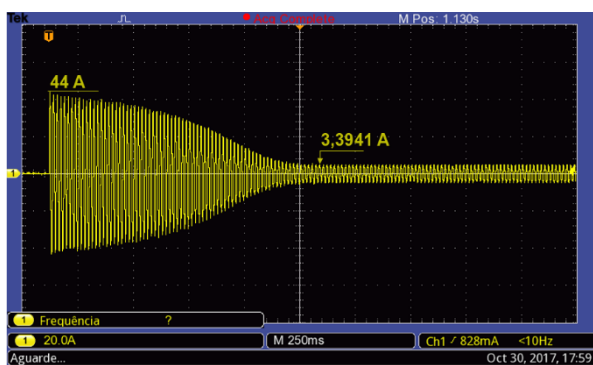
Além disso, variações entre fabricantes, modelos e configurações operacionais resultam em uma família de curvas de sensibilidade, em vez de uma única curva padrão para cada tipo de carga. Essa dispersão é representada por uma região de incerteza, limitada por duas curvas extremas: a curva de sensibilidade mínima, caracterizada pelos valores  $V_{min}$  e  $T_{max}$ , na qual todos os equipamentos testados apresentariam falha; e a curva de sensibilidade máxima, definida pelos valores  $V_{max}$  e  $T_{min}$ , onde nenhum equipamento sofre desligamento. Eventos situados entre essas curvas, nas chamadas regiões intermediárias (A, B e C), podem provocar falhas parciais, afetando apenas uma fração das amostras, de acordo com o nível de robustez eletromagnética de cada unidade (COSTA, 2020).

Nesse contexto, a obtenção de curvas reais em condições controladas de laboratório torna-se fundamental para validar os modelos teóricos de sensibilidade e caracterizar o comportamento de diferentes cargas frente a distúrbios de tensão. Ensaios experimentais permitem observar com maior precisão a resposta dinâmica dos equipamentos durante eventos críticos, como partidas de motores de indução, os quais estão entre as principais causas de VTCD em sistemas de baixa tensão.

Em (AYRES, 2020), é efetuado o levantamento em laboratório de curvas de cargas para acionamento de motores. Desenvolvida uma bancada didática com cinco diferentes tipos de acionamentos, sendo eles partida direta, estrela-triângulo, compensada, soft-starter e inversor de frequência. Considerando a potência nominal do motor, foi possível arbitrar-se por cinco níveis de carga, sendo 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da carga de placa do motor. As curvas foram levantadas em seu exato instante de partida com a função *single* do osciloscópio, e os valores em regime permanente foram coletados com o Analisador de Energia Classe A Fluke modelo 435-II. (AYRES, 2020). Considerando o levantamento de dados efetuado no osciloscópio, na Figura 6, tem-se a imagem da tela, onde é possível observar que a corrente de partida do motor

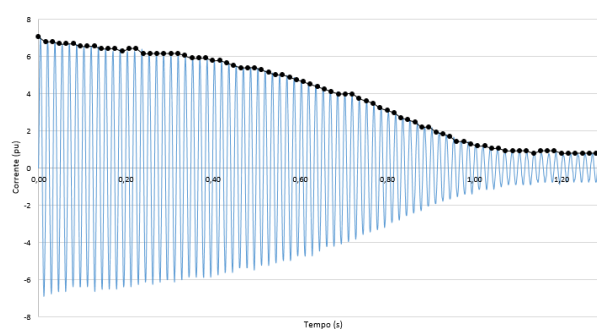
a vazio, ou seja, 0% de carga em seu eixo, pode-se chegar a 7,04 vezes seu valor nominal. A proposta do trabalho foi de normalizar as curvas obtidas nos levantamentos, assim obtendo curvas típicas assim caracterizando cada método de partida testado, isso pode ser observado na Figura 7, para obtenção da curva envoltória representativa, considerou-se o valor máximo de cada ciclo de senoide em um intervalo de 16,67 ms (AYRES, 2020).

Figura 6 – Imagem osciloscópio corrente partida direta sem carga



Fonte: AYRES, 2020

Figura 7 – Corrente transitória partida direta sem carga – Fase R



Fonte: AYRES, 2020

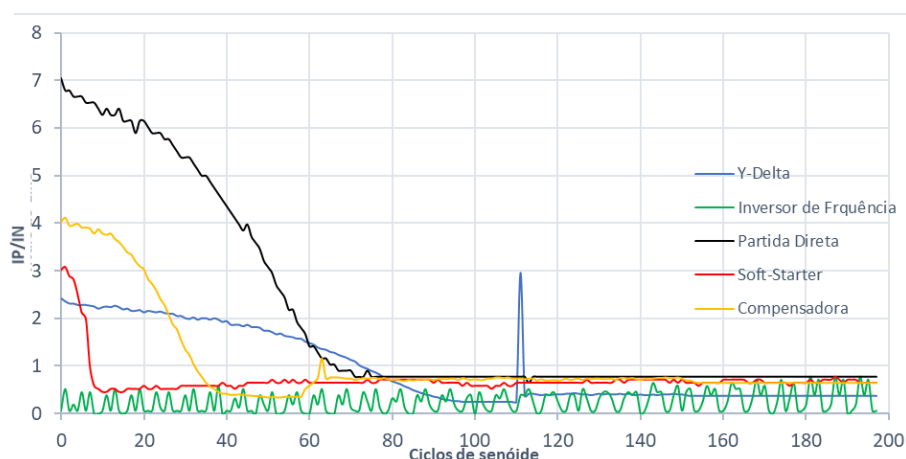
Por fim, é possível observar um comparativo entre a curva resultante para cada método de acionamento na Figura 8 e Figura 9 (AYRES, 2020).

Os gráficos apresentados nas Figuras 10 e 11 comparam diferentes métodos de partida de motores elétricos sob distintas condições de carga no eixo. Na Figura 10, onde a carga no eixo é de 0%, observa-se uma redução significativa nos picos iniciais quando métodos de partida alternativos são empregados, em comparação à partida direta. Esse comportamento evidencia a eficácia de estratégias como o inversor de frequência e o soft-starter na limitação da corrente de partida e na suavização da transição para o regime permanente.

Já na Figura 11, com a inserção de carga no eixo, verifica-se que os métodos tradicionais, como estrela-triângulo (Y- $\Delta$ ) e compensadora, não proporcionam um ganho expressivo na redução de picos, evidenciando limitações na suavização da partida sob carga. Em contrapartida, métodos mais sofisticados, como inversores de frequência e soft-starters, demonstram maior eficiência na contenção dos picos de corrente, contribuindo para uma transição mais estável e reduzindo impactos na qualidade da energia elétrica do sistema.

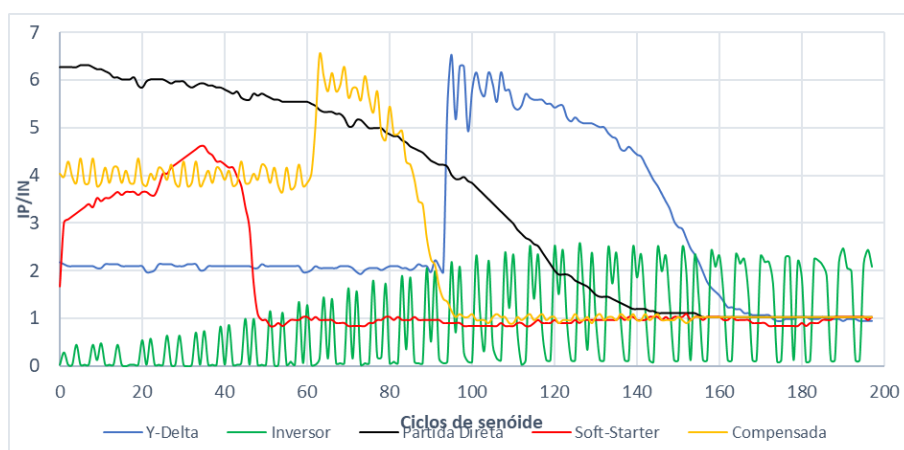
É válido avaliar que os dados coletados foram em bancada com um motor de pequeno porte 1,5 cv, motores de grande porte podem possuir um comportamento distinto do utilizado e podendo ter a necessidade de coleta de dados mais diferenciada.

Figura 8 – Comparativo corrente transitória entre acionamento com nível de carga de 0 %



Fonte: AYRES, 2020

Figura 9 - Comparativo corrente transitória entre acionamento com nível de carga de 100%



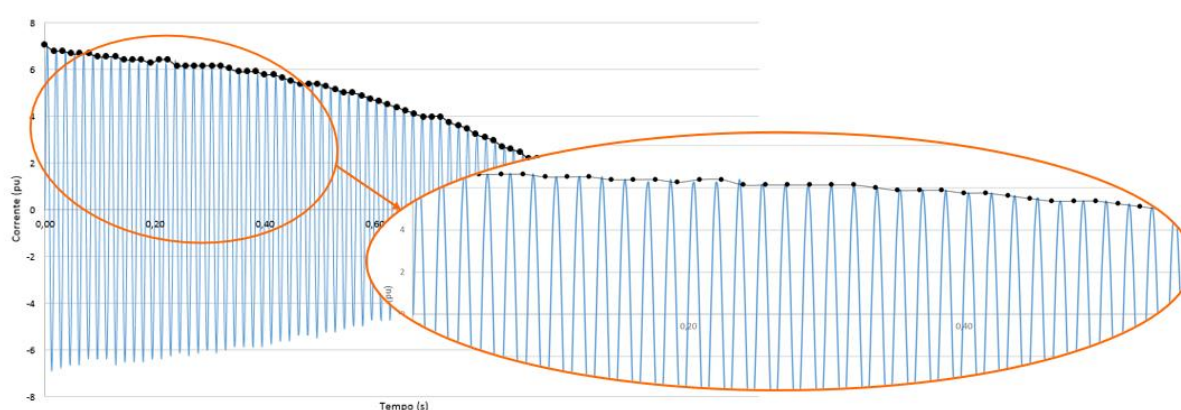
Fonte: AYRES, 2020

As curvas obtidas foram modeladas no software OpenDSS, sendo as simulações configuradas para respeitar o intervalo de amostragem utilizado nos testes laboratoriais. Isso possibilitou uma avaliação mais precisa dos afundamentos de tensão causados pelas partidas dos motores. Nos cenários transitórios, foi necessária a discretização das curvas, ou seja, a conversão de valores contínuos em pontos

específicos no tempo, com alta frequência de amostragem, para permitir uma análise mais detalhada do fenômeno.

As curvas típicas de partida de motores (AYRES, 2020) foram discretizadas em ciclos de senóide, com intervalo de 16,667 ms, registrando-se o valor de pico de cada período. Esse comportamento é ilustrado na Figura 12, onde se observa o detalhamento da curva durante a partida. Embora o OpenDSS opere com valores eficazes (RMS), a normalização das curvas em valores por unidade (pu) garante que o comportamento relativo dos distúrbios seja mantido, permitindo a análise comparativa entre diferentes métodos de partida.

Figura 10 – Zoom Discretização Efeito Transitório



Fonte: Adaptado de AYRES, 2020.

Para integrar as curvas experimentais ao ambiente de simulação, foi necessário convertê-las em um formato compatível com o OpenDSS. Isso envolveu a discretização dos dados e a configuração de perfis de carga que representassem com fidelidade as variações dinâmicas observadas nas partidas dos motores.

O trecho de código correspondente define os perfis de carga por meio do comando New LoadShape, o qual permite a atribuição de formas de onda ao longo do tempo, simulando o comportamento dinâmico de equipamentos com variação de consumo. Cada perfil LoadShape contém 25.920 pontos (parâmetro npts=25920), representando o número total de amostras coletadas para um intervalo de 6 minutos com resolução temporal de 0,016 segundos (sinterval=0.016). Esses dados são usados principalmente em simulações transitórias, em que a precisão temporal é fundamental para capturar o comportamento da carga durante eventos críticos como a partida de motores.

Os arquivos referenciados no código (por exemplo, File=LoadShapePD0.csv, LoadShapeET0.csv, etc.) contêm os multiplicadores de carga normalizados ao longo do tempo. Esses arquivos CSV representam diferentes condições de operação dos motores, variando de 0% a 100% de carga no eixo (PD0 a PD100 para partidas diretas, ET0 a ET100 para estrela-triângulo). Os perfis são, então, vinculados às cargas do sistema simulado, permitindo a análise do impacto de cada tipo de acionamento na qualidade da energia elétrica. Além do perfil de carga dado pelo LoadShape através do parâmetro daily, deve-se atentar para a modelagem representativa de cada tipo de carga através do parâmetro model. Nesse estudo as cargas gerais utilizaram o modelo 1 que corresponde ao modelo padrão do OpenDSS correspondente a potência constante para as parcelas de potência ativa e reativa. Já as cargas de motores foram parametrizadas com o modelo 3 que corresponde à 100% de potência constante para a parcela de potência ativa e 100% de impedância constante para a parcela de potência reativa conforme descrito em DUGAN (2020).

Embora a curva utilizada no modelo não leve em conta os aspectos eletromagnéticos internos da carga (como indutância, capacitância ou variações de torque), ela representa de forma prática o comportamento típico da corrente durante a partida. Com base nos dados coletados, foi possível montar um banco de dados estruturado com a caracterização de cada tipo de partida e respectivo nível de carga. Essas curvas foram exportadas em formato .csv e integradas ao código-fonte, permitindo sua reutilização em diferentes cenários e simulações.

Figura 11 – Trecho de Código para Cadastro de Loadshape no OpenDSS

```

/****----- Perfis de Carga - Partida de Motores - Ingridt Ayres -----****/
New LoadShape.PD0h5 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapePD0h5.csv)
New LoadShape.PD25h8 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapePD25h8.csv)
New LoadShape.PD50h7 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapePD50h7.csv)
New LoadShape.PD75h7 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapePD75h7.csv)

New LoadShape.SS0h8 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeSS0h8.csv)
New LoadShape.SS25h5 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeSS25h5.csv)
New LoadShape.SS50h4 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeSS50h4.csv)
New LoadShape.SS75h8 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeSS75h8.csv)
New LoadShape.SS100h9 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeSS100h9.csv)

New LoadShape.QDL145 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeQDL145.csv)
New LoadShape.QDL23 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeQDL23.csv)
New LoadShape.QDL6 npts=25920 sinterval=1 mult=(File=LoadShapeQDL6.csv)

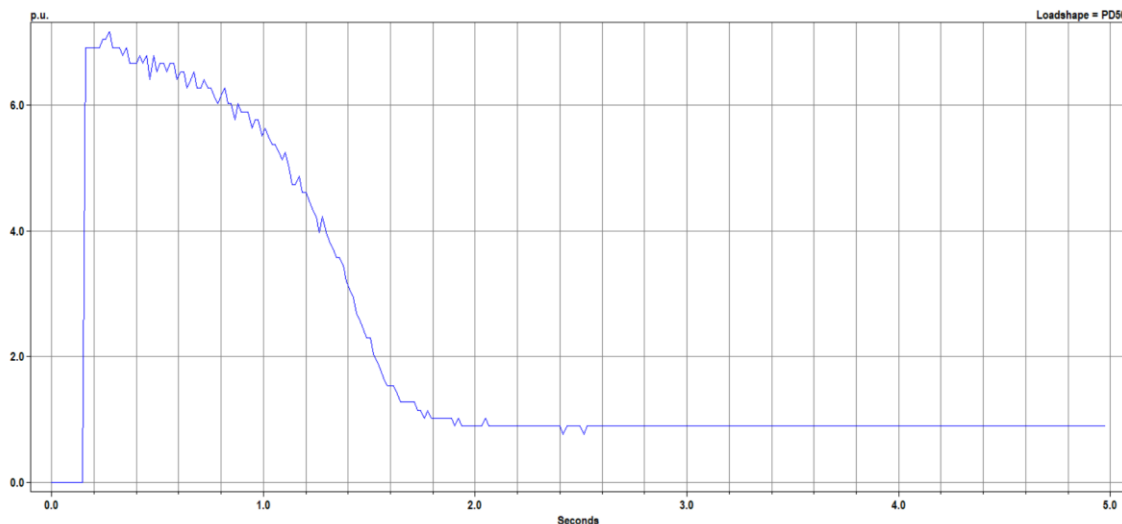
```

Fonte: Autora.

A Figura 12 apresenta o gráfico do perfil de carga (LoadShape) obtido a partir dos dados experimentais coletados durante a partida do motor. O gráfico mostra a

variação da corrente ao longo do tempo, permitindo visualizar o comportamento transitório típico associado ao tipo de acionamento e nível de carga analisado.

Figura 12 – Reprodução da curva de carga no OpenDSS



Fonte: Autora.

Dessa forma, a caracterização experimental das curvas de partida de motores permitiu a obtenção de perfis representativos para diferentes métodos de acionamento e níveis de carga no eixo. A discretização e normalização dessas curvas viabilizaram sua integração ao ambiente de simulação do OpenDSS, permitindo reproduzir, com maior realismo, o comportamento transitório das cargas industriais. A criação de perfis de carga em formato compatível com o software, por meio do comando LoadShape, possibilitou a avaliação dos impactos na qualidade da energia, especialmente no que se refere aos afundamentos de tensão provocados por partidas de motores. Com isso, estabelece-se uma base sólida para a análise dos distúrbios gerados por diferentes estratégias de acionamento, contribuindo para a construção de metodologias mais adequadas à modelagem de cargas e à identificação de cenários críticos em sistemas de distribuição.

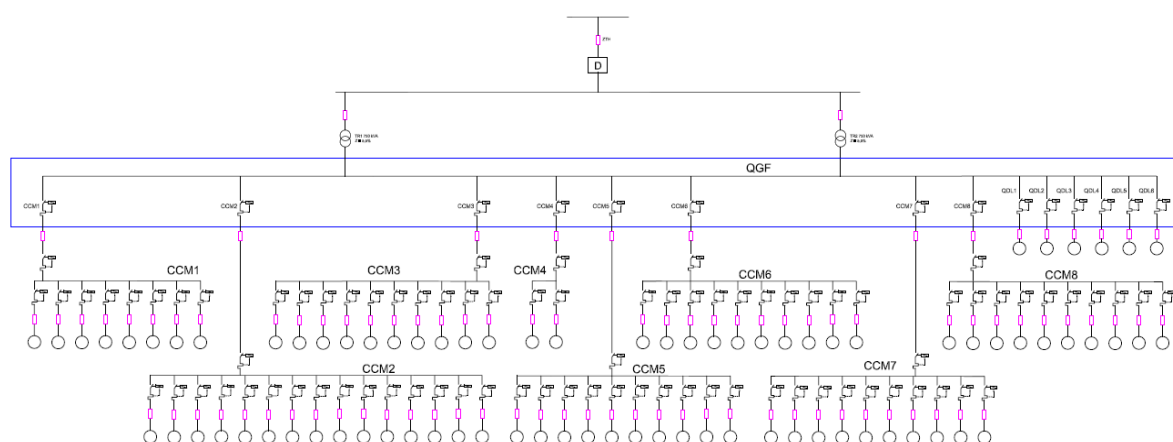
### 3.1 DEFINIÇÃO OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo deste trabalho é uma planta industrial modelo, descrita na literatura técnica por (MAMEDE, 2023), com ênfase nas instalações elétricas responsáveis por sua operação. A análise concentra-se nas VTCD, fenômenos que afetam diretamente a confiabilidade de processos e o desempenho de equipamentos

industriais. O principal objetivo é realizar uma análise detalhada de dados simulados no ambiente OpenDSS, avaliando a frequência, magnitude e duração dos eventos, bem como possíveis padrões associados às condições operacionais da planta. Essa investigação busca caracterizar o comportamento típico das VTCD em ambientes industriais, fornecendo subsídios técnicos para ações corretivas, estudos normativos e futuras estratégias de mitigação no contexto da qualidade da energia elétrica.

Na Figura 13, é apresentado o diagrama unifilar da planta industrial com alguns agrupamentos de cargas, porém a topologia de alta tensão é mantida.

Figura 13 – Diagrama Unifilar Estudo de Caso Cenário 1

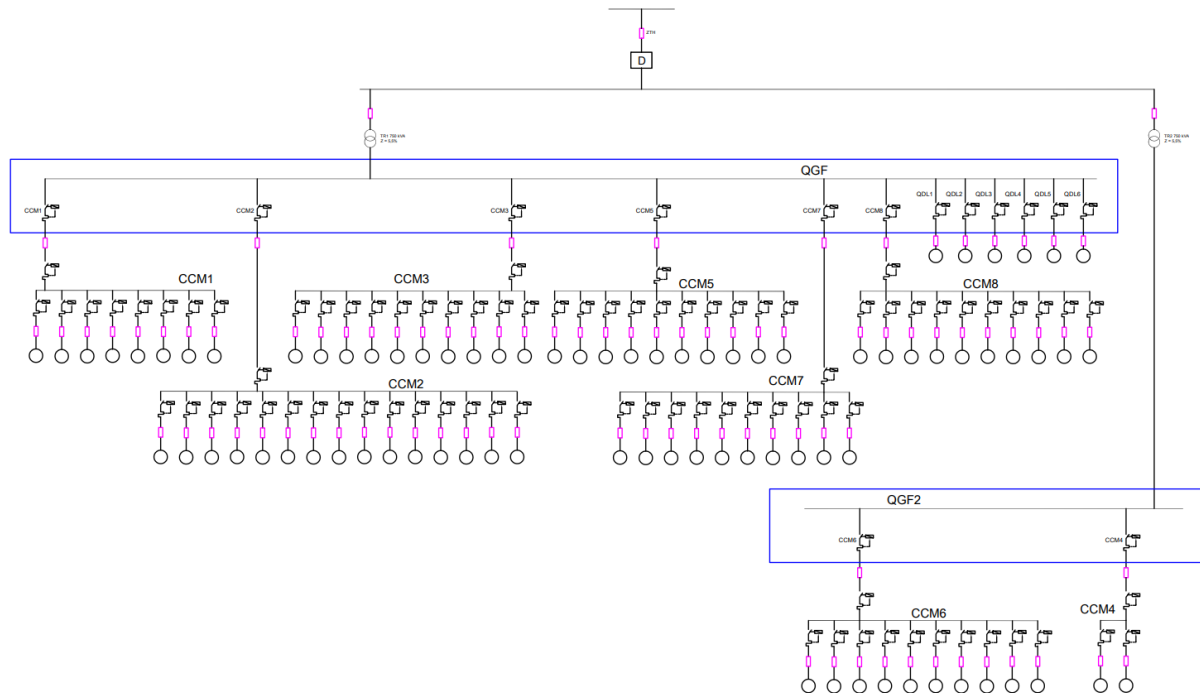


Fonte: Adaptado (Mamede, 2023)

Considerando que um dos objetivos deste trabalho é viabilizar, ainda na fase de projeto, a análise da topologia da rede elétrica em diferentes níveis de tensão (alta e baixa), a Figura 14 apresenta uma proposta alternativa de configuração. Nessa nova topologia, o paralelismo entre transformadores é eliminado, preservando-se as características das cargas previamente estabelecidas. Para esse segundo cenário, propõe-se que os Centros de Controle de Motores (CCM) com maior potência (CCM4) e aquele que utiliza inversor de frequência (CCM6) sejam alimentados por redes de baixa tensão distintas daquelas que suprem as cargas sensíveis, conforme ilustrado na Figura 3. Considerando os limites operacionais estabelecidos pela concessionária para o nível de tensão de 13,8 kV, e visando simular o pior caso dentro das condições admissíveis, adotou-se o valor de 0,93 pu como tensão de fornecimento na barra principal.



Figura 14 – Diagrama Unifilar Estudo de Caso Cenário 2



Fonte: Adaptado (Mamede, 2023)

Nos Quadro 2 e Quadro 3, são apresentados os dados utilizados para modelagem da planta no OpenDSS. No Quadro 3 é informado o tipo de acionamento para cada CCM, onde Partida Direta (PD), Soft Starter (SS), Inversor de Frequência (INV).

Quadro 2 – Quadro de Cargas de Iluminação e Tomadas

Descrição	Potência Monofásica (W)			Potência Trifásica (W)	Distância Média (m)
	A	B	C		
Total QDL1	10200	9800	9800	30000	46
Total QDL2	9800	10600	9800	42000	46
Total QDL3	1200	2720	4060	0	11
Total QDL4	1440	1440	1900	0	9
Total QDL5	4600	5280	4000	0	26
Total QDL6	800	2600	1120	12000	12
Total Cargas de Iluminação e Tomadas	28040	32440	30680	84000	

Fonte: Autora.

Quadro 3 – Quadro de Cargas Simplificado de Motores

Setor	Quadro Elétricos	n.º MIT	Partida	Pot (cv) unitária	Potência Total (cv)	Distância Média do CCM-Motor (m)
A	CCM1	2	SS	30	60	25
B		6	PD	7,5	45	30
C	CCM2	6	PD	5	30	25
D		9	PD	3	27	26
E	CCM3	7	PD	10	70	20
F		3	PD	5	15	17
G	CCM5	36	PD	7,5	270	20
H		6	SS	15	90	18



I	CCM6	8	INV	20	160	24
J	CCM8	10	SS	25	250	23
K	CCM7	10	SS	30	300	22
M	CCM4	2	SS	250	500	10

Fonte: Autora.

### 3.2 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Para uma avaliação mais precisa do Fator de Impacto (FI), foi incluída uma nova região, denominada Região J, que representa eventos sem impacto significativo sobre as cargas, isto é, condições consideradas adequadas sob a ótica da qualidade da energia elétrica. Essa é a região adequada para a operação dos equipamentos dentro dos intervalos definidos para as VTCD, considerando valores de 0,9 p.u. até 1,1 p.u. e com base na Tabela 4Tabela 4 – , obtém-se a Tabela 7.

Tabela 7 – Tabela de Estratificação com nova Região de Sensibilidade

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms- 100 ms]	[100 ms - 300 ms]	[300 ms - 600 ms]	[600 ms - 1 s]	[1 s - 3 s]	[3 s - 1 min]	[1 min - 3 min]
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I			
(1,10 - 1,15)							
(1,05 - 1,1)	REGIÃO J						
(1 - 1,05)							
(0,95 - 1)							
(0,85 - 0,90)	REGIÃO A						
(0,80 - 0,85)							
(0,70 - 0,80)	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO G			
(0,60 - 0,70)							
(0,50 - 0,60)	REGIÃO C			REGIÃO F			
(0,40 - 0,50)							
(0,30 - 0,40)	REGIÃO E						
(0,20 - 0,30)							
(0,10 - 0,20)							
< 0,10							

Fonte: Autora.

O cálculo para caracterizar a severidade da incidência de eventos de VTCD é realizado usando as Equações 1, 2, 3 e 4, onde  $f_{ei}$  é a frequência de ocorrência das VTCD para cada região de sensibilidade  $i$ , sendo  $i=A,B,C,D,E,F,G,H$ , e, neste caso, J. O fator de ponderação para cada região de sensibilidade,  $F_{pondi}$ , é estabelecido de acordo com a severidade do evento, relacionando amplitude e duração. O fator de

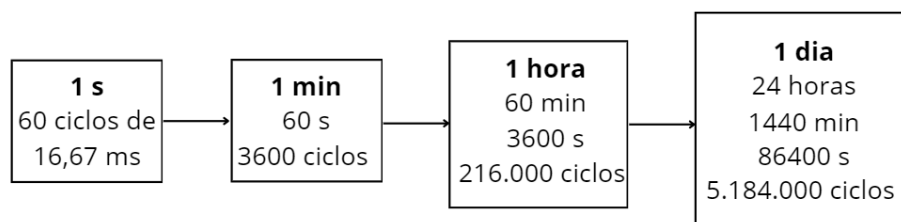
impacto base,  $FI_{BASE}$ , é calculado pela soma dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de VTCD para cada região de sensibilidade.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Considerando que as curvas foram modeladas com uma frequência de amostragem de 60 Hz (um valor registrado a cada 1/60 segundos), o total de ciclos gerados ao longo de um período de 24 horas seria de 5.184.000 ciclos. No entanto, para otimizar a simulação e viabilizar a validação do método, o número de ciclos foi reduzido para 25.920, assumindo uma simplificação onde cada hora contém 1080 ciclos, conforme representado na Figura 16 e Figura 17.

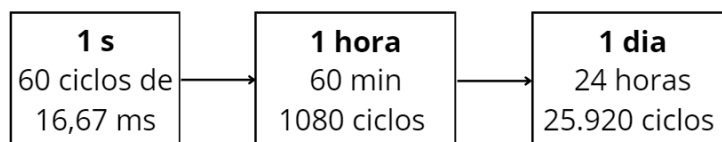
Nas curvas utilizadas, os efeitos transitórios associados à partida dos motores se estabilizam após aproximadamente 190 ciclos da senóide, dependendo do nível de carga no eixo. Além disso, como os arquivos .csv possuem uma limitação de 1.048.576 linhas no Excel, não seria viável armazenar todos os ciclos de senóide correspondentes a um período de 24 horas. Assim, a otimização do número de ciclos foi essencial para compatibilizar a análise dentro dos limites computacionais, garantindo que os dados representativos fossem mantidos sem comprometer a precisão da modelagem.

Figura 15 – Cálculos número ciclos de senoide



Fonte: Autora.

Figura 16 – Cálculos número ciclos de senoide otimizado

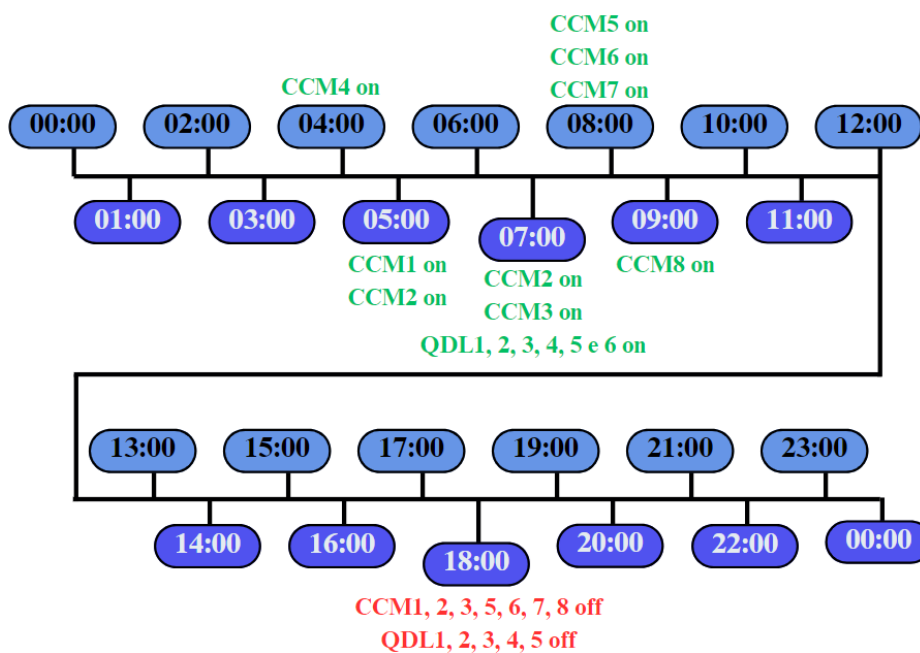


Fonte: Autora.

A Figura 18 apresenta a linha do tempo proposta para o acionamento das cargas ao longo do dia, destacando os horários de ativação e desligamento de diferentes componentes do sistema. No período da manhã, observa-se a ativação sequencial dos Centros de Controle de Motores (CCMs) e dos Quadros de

Distribuição de Carga (QDLs), garantindo o funcionamento progressivo das cargas. Durante o período da tarde e noite, algumas cargas são desligadas para otimizar o consumo energético e evitar picos desnecessários de demanda, mantendo apenas cargas residuais operando ao longo do restante do dia.

Figura 17 – Linha do Tempo para acionamentos e desligamentos



Fonte: Autora.

Essa organização tem como objetivo otimizar o uso da energia elétrica, reduzindo impactos na rede e garantindo que as cargas operem dentro de um planejamento eficiente. A distribuição dos acionamentos pode ser ajustada conforme as necessidades operacionais, visando sempre o equilíbrio entre demanda e consumo.

#### 4.1 ANÁLISE DE RESULTADOS CENÁRIO 1

A análise do cenário 1 evidencia o impacto da qualidade da energia elétrica em diferentes quadros e equipamentos da instalação. Observa-se que as cargas críticas estão alocadas nos quadros QDL4, QDL5 e QDL6, uma vez que esses setores abrigam escritórios e equipamentos eletrônicos sensíveis, como bancos de dados. A estabilidade dessas cargas é um ponto fundamental, e conforme os resultados

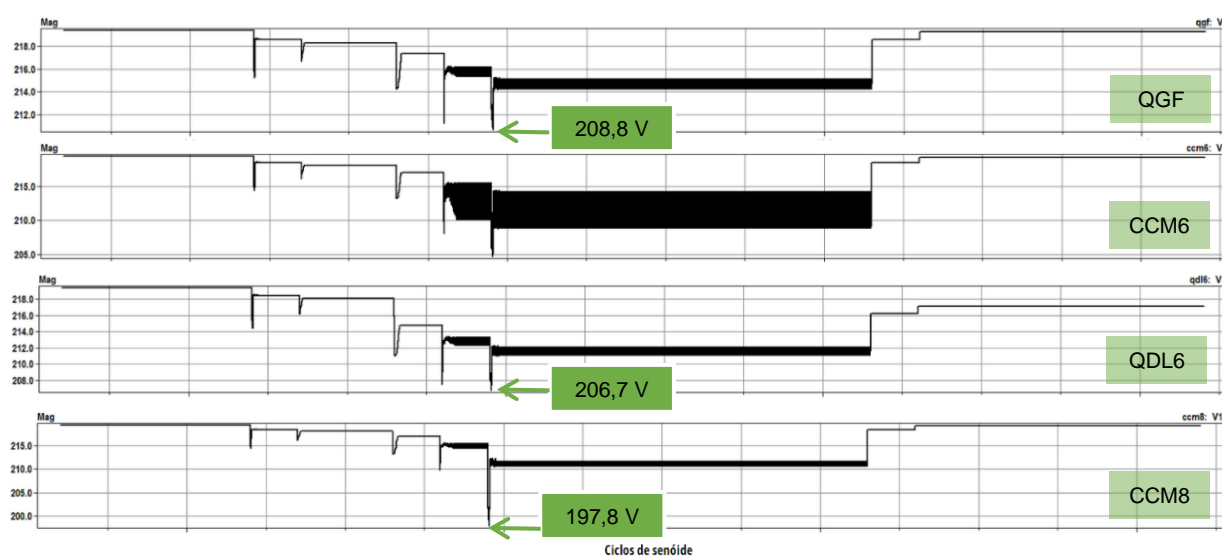
apresentados, não houve um afundamento de tensão superior a 0,05 pu, o que indica que a alimentação elétrica nessas áreas se manteve dentro de níveis aceitáveis, sem impactos significativos para os equipamentos conectados.

No entanto, a análise evidencia dois pontos críticos que requerem atenção. O primeiro está relacionado ao painel CCM6, que contém um inversor de frequência. Esse tipo de equipamento, embora essencial para controle de motores e eficiência energética, apesar de não estar em análise a Distorção Harmônica Total (THD) é possível concluir de forma visual o que há essa distorção introduzida na rede.

O segundo ponto de atenção refere-se ao painel CCM8, onde foi identificado o maior afundamento de tensão, atingindo um afundamento de 0,1007 pu. Esse nível de queda pode indicar a ocorrência de uma alta demanda instantânea. Afundamentos de tensão dessa magnitude podem levar a desligamentos inesperados de equipamentos e falhas em sistemas mais sensíveis. Embora as cargas críticas podem não ter sido diretamente afetadas, a magnitude desse afundamento se destaca dentro da análise.

A imagem corrobora essas observações ao apresentar a evolução dos valores de tensão ao longo dos ciclos de senóide. Nota-se que os quadros QGF, CCM6, QDL6 e CCM8 apresentam quedas abruptas, com diferentes durações e magnitudes.

Figura 18 – Gráficos OpenDSS Cenário 1



Fonte: Autora.

#### 4.1.1 Análise por Região de Severidade

Considerando a Tabela 7 apresentada com a inclusão da região J para representar eventos com níveis adequados de funcionamento, ou seja, sem impacto relevante sobre os equipamentos. A Tabela 8, apresenta os eventos registrados na simulação, a análise das frequências mostra que, com exceção do CCM8, que registrou dois eventos na região A, todos os demais equipamentos apresentaram apenas ocorrências na região J. Isso indica que a maior parte das variações de tensão ocorreu dentro de limites aceitáveis, sem comprometer a operação da planta industrial.

Tabela 8 – Frequência de eventos carga e região Cenário 1

Frequência dos eventos em cada região										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
AT Trafo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
QGF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CCM8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
QDL1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
QDL2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
QDL3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
QDL4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
QDL5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
QDL6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: Autora.

#### 4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS CENÁRIO 2

Conforme a proposta do método apresentado por esse trabalho, é que em tempo de projeto possam ser realizadas simulações para determinação da melhor topologia das instalações elétricas, para o cenário 2, arbitrou-se a alimentação da concessionária em 0,93 conforme indicado na Figura 3, ser uma faixa adequada para o PRODIST, além do paralelismo dos transformadores retirados.

No cenário analisado, a avaliação dos gráficos de tensão evidencia variações significativas nos diferentes pontos da instalação elétrica, com destaque para o painel CCM4, que apresentou o maior afundamento de tensão, atingindo um valor de afundamento de 0,21398 pu. Esse nível de variação representa uma queda expressiva na tensão fornecida aos equipamentos conectados a esse painel. Na análise visual da forma de onda, observa-se que, diferentemente do cenário anterior, indica uma possível redução na distorção harmônica da rede.

Outro ponto relevante identificado no estudo foi o afundamento de tensão registrado no quadro QDL6, que atingiu um afundamento de 0,1397 pu. Esse nível de afundamento, embora menor do que o registrado no CCM4, ainda representa uma perturbação significativa na rede elétrica.

Além dos afundamentos observados nos pontos específicos da instalação, destaca-se que a concessionária de energia estava fornecendo a rede em 0,93 pu, o que resultou na estabilização da tensão nominal da rede de baixa tensão em 204,036 V (0,927 pu). Esse valor evidencia que a tensão da rede de baixa tensão acaba fora da conformidade estabelecida pelas normativas vigentes, o que pode impactar diretamente o desempenho dos equipamentos conectados. O não cumprimento dos limites normativos indica uma possível degradação na qualidade da energia elétrica fornecida, que pode ser influenciada tanto por fatores internos da instalação quanto por problemas na distribuição da concessionária.

Os gráficos apresentados reforçam essas observações, mostrando quedas abruptas de tensão seguidas por períodos prolongados de recuperação. No CCM4, o afundamento se estende por um tempo significativo, o que pode indicar a atuação de cargas de grande impacto ou instabilidades na alimentação elétrica. No QDL6, a queda de tensão também é perceptível, embora com menor duração e magnitude. Os demais quadros analisados exibem padrões semelhantes, com oscilações pontuais que refletem as condições da rede elétrica no momento da medição.

A análise dos dados indica que a estabilidade da rede e a conformidade dos níveis de tensão devem ser monitoradas continuamente, principalmente em relação aos impactos da alimentação da concessionária sobre a instalação interna.





QGF	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
CCM1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
CCM2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
CCM3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
CCM4	5	0	0	0	0	0	1	0	0	7
CCM5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
CCM6	2946	0	0	0	0	0	0	0	0	2947
CCM7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
CCM8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
QDL1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
QDL2	739	0	0	0	0	0	0	0	0	740
QDL3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
QDL4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	10
QDL5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
QDL6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
QGF2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2

#### 4.3 FATOR DE IMPACTO FINAL

Por fim, o fator de impacto para cada ponto de medição da planta é apresentado na Tabela 10, no período mencionado, para o cenário 2, é possível observar um fator de impacto 1 para o CCM4, isso evidencia que a qualidade de energia está no limite aceitável.

Tabela 10 – Fator de Impacto para todos os pontos de medição da fábrica

ITEM	Fator de Impacto Cenário 1	Fator de Impacto Cenário 2
AT Trafo	0,0000	0,0000
QGF	0,0000	0,0000
CCM1	0,0000	0,0000
CCM2	0,0000	0,0000
CCM3	0,0000	0,0000
CCM4	0,0000	1,0000
CCM5	0,0000	0,0000
CCM6	0,0000	0,0000
CCM7	0,0000	0,0000
CCM8	0,0000	0,0000
QDL1	0,0000	0,0000
QDL2	0,0000	0,0000
QDL3	0,0000	0,0000
QDL4	0,0000	0,0000
QDL5	0,0000	0,0000
QDL6	0,0000	0,0000
QGF2	-	0,0000

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia simplificada para análise de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) em unidades consumidoras do Grupo A, considerando os impactos gerados por acionamentos de Motores de Indução Trifásicos (MIT) e a inserção de Geração Distribuída (GD). Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que os objetivos propostos foram plenamente alcançados.

Inicialmente, foi realizada uma análise aprofundada dos conceitos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), com ênfase nas VTCD, conforme diretrizes técnicas nacionais e internacionais, especialmente o Módulo 8 do PRODIST. Essa etapa permitiu estabelecer as bases conceituais e regulatórias necessárias para fundamentar a metodologia proposta.

Em seguida, foi desenvolvida uma metodologia simplificada capaz de diagnosticar e avaliar os impactos das partidas de motores assíncronos. A metodologia inclui a modelagem de curvas de carga obtidas experimentalmente, a aplicação de simulações dinâmicas no software OpenDSS e o uso de indicadores técnicos como o Fator de Impacto (FI). A inclusão da Região J como condição de operação adequada se mostrou eficaz para distinguir eventos sem impacto relevante, contribuindo para uma análise mais precisa.

A validação da metodologia foi realizada por meio de um estudo de caso com base em uma planta industrial da literatura. Foram simulados dois cenários distintos de topologia de rede, permitindo analisar os efeitos da reorganização das cargas e do paralelismo de transformadores sobre os níveis de tensão. Os resultados demonstraram que a metodologia é capaz de identificar pontos críticos da instalação, quantificar os eventos de VTCD por região de severidade e sugerir ações corretivas e preventivas baseadas em critérios técnicos e regulatórios.

Adicionalmente, a abordagem proposta mostrou-se flexível e aplicável tanto a sistemas em operação quanto a projetos em fase de concepção, permitindo a simulação de diferentes estratégias de acionamento, análise de conformidade regulatória e avaliação técnica-econômica de alternativas. A ferramenta OpenDSS revelou-se apropriada para a análise integrada de perdas, fluxo de potência e comportamento transitório de carga, garantindo robustez na simulação dos distúrbios.

Por fim, a metodologia apresentou potencial de aplicação prática significativa, especialmente em ambientes industriais que utilizam grandes quantidades de motores. O estudo evidenciou que, embora os afundamentos de tensão decorrentes da partida dos MIT sejam transitórios, seus efeitos podem ser relevantes e recorrentes, exigindo atenção no planejamento e na operação das instalações elétricas. A proposta deste trabalho oferece, portanto, uma ferramenta estratégica para elevar o nível de confiabilidade e eficiência energética, contribuindo para o cumprimento dos requisitos estabelecidos pelo PRODIST e para a melhoria contínua da qualidade do fornecimento de energia.

## 5.1 PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento desta dissertação foram produzidos artigos de autoria da própria autora.

Aceito para publicação XVI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE), contando com a participação do professor Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira e do Dr. Jorge Luis Victória Barbosa, a ocorrer no mês de junho de 2025.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de simulações e análises contemplando a inserção de Geração Distribuída (GD) em seus diversos cenários de funcionamento, permitindo avaliar os impactos dinâmicos da variabilidade da geração sobre a rede elétrica. Além disso, recomenda-se a ampliação do banco de dados com curvas experimentais obtidas a partir de motores de grande porte, uma vez que esses equipamentos podem apresentar características elétricas distintas das observadas em motores de pequeno porte, como o de 5 cv utilizado neste estudo. A coleta e análise desses dados possibilitarão uma modelagem mais precisa e representativa. Outra vertente relevante consiste na avaliação das distorções harmônicas associadas aos diferentes métodos de acionamento, o que contribuirá para uma análise mais completa da Qualidade de Energia Elétrica. Sugere-se, também, a exploração de diferentes linguagens e plataformas computacionais, como Python, Matlab ou C++, para a automação das simulações e o tratamento avançado dos dados. Por fim,

recomenda-se a realização de análises técnico-econômicas mais aprofundadas para avaliação comparativa das topologias de rede, visando identificar a configuração mais eficiente e viável para cada tipo de instalação.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: junho de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: junho de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: junho de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. **Módulo 5: Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura**. Anexo V da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021. Brasília: ANEEL, 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 61000-4-30: Compatibilidade eletromagnética (EMC) – Parte 4-30: Técnicas de ensaio e medição – Métodos de medição de qualidade de energia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AYRES, Ingridt; PEREIRA, Paulo, **Modelagem de Motores Assíncronos Via Bancada Didática com Diferentes Métodos de Acionamentos e Simulação De Impactos na Rede Elétrica de Uma Planta Industrial Real**, anais do Congresso

Brasileiro de Autômática, ISSN: 2525-8311, doi:

<https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.976>

BIRYULIN, V. I.; KUDELINA, D. V.; LARIN, O. M. ***Electricity Quality Problems in the 0.4 kV City Electric Networks***. In: 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2020.9078759>.

BRASIL. **Lei n.º 9.478**, de 6 de agosto de 1997. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9478.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9478.htm). Acesso em: 1 dez 2024.

CABRAL, Matheus Monteiro; OLIVEIRA, Marcelo Escobar de. **Análise do impacto da conexão de máquinas assíncronas trifásicas no sistema elétrico de distribuição**. In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2019. Acesso em: 5 jan. 2025.

COSTA, Marcos V.; FILHO, José M. C. **Avaliação dos indicadores de VTCD com base no nível de sensibilidade dos equipamentos**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 25, n. 2, p. 37–55, 2020.

DUGAN, R. C. ***Electrical Power Systems Quality***. New York: McGraw-Hill. 2012.

DUGAN, R. C.; MONTENEGRO, D. **Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)**. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). 2020

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **OpenDSS**. Disponível em: <https://www.epri.com/pages/sa/opendss>. Acesso em: 18 nov. 2024.

FERREIRA, Adrian Ribeiro; GIANESINI, Bárbara Moraes; OLIVEIRA, José Carlos de; REZENDE, Paulo Henrique Oliveira. ***An approach for assigning responsibilities of short-term voltage variations in electrical power systems***. IEEE Access, v. 11, p. 7751-7758, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237921>.

HU, Xinyu; LIN, Yayang; SUN, Chuan; LIN, Lin; YU, Haipeng; XUE, Fei; SU, Weiwei; LUO, Yong; HAN, Yaodong; ZHOU, Jinfei; CAO, Xinnan. **An Overview of Voltage Sag Detection Methods**. IEEE Access, v. 11, p. 7751-7758, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.1234567>.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1159: recommended practice for monitoring electric power quality**. New York: IEEE, 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 519-2014: IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems**. New York: IEEE, 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 2781™-2022: IEEE Guide for Load Modeling and Simulations for Power Systems**. New York: IEEE, 2022.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods**. 3. ed. Genebra: IEC, 2015.

Leão, R. P. (2014). **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023. 944 p. ISBN 978-85-216-3829-2.

MISHRA, Mahendra; SINGH, Bhim; CHANDER, Subhash. **Distribution Network Performance With Respect to Voltage Sag and Short Interruption Considering Protection Setting—Part I: The Methodology**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 27, n. 3, p. 1450-1460, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.1234567>.

MISHRA, Mahendra; SINGH, Bhim; CHANDER, Subhash. **Distribution Network Performance With Respect to Voltage Sag and Short Interruption Considering**

**Protection Setting—Part II: Economic Assessment.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 27, n. 4, p. 1461-1471, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.1234567>.

PEREIRA, Claiton; FREITAS, Welber; FERNANDES, Daniel; COSTA, Paulo. **Cost of Industrial Process Shutdowns Due to Voltage Sag and Short Interruption.** Energies, v. 14, n. 2874, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14102874>.

Presidência da República. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022.** Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída e o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm). Acesso em: outubro de 2024.

RAZMI, Darioush; T. Lu, B. Papari, E. Akbari, G. Fathi and M. Ghadamyari, "**An Overview on Power Quality Issues and Control Strategies for Distribution Networks With the Presence of Distributed Generation Resources**," in IEEE Access, vol. 11, pp. 10308-10325, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238685.

ROCHA, Celso Henrique Santos. **Análise e Mitigação de Impactos da Conexão de Geração Distribuída, Microgeração Distribuída e Armazenadores em Alimentadores de Distribuição Utilizando o Software OpenDSS.** 2016. 170 p. Trabalho de Formatura (Bacharelado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Orientador: Nelson Kagan. Área de Concentração: Energia e Automação Elétricas.

SUSLOV, Konstantin; SOLONINA, Nafisa; GERASIMOV, Dmitry. **Assessment of an impact of power supply participants on power quality.** IEEE, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.1234567>.

XU, Yonghai; W. Lu, k. wang, C. Li and W. Aslam, "**Sensitivity of Low-Voltage Variable-Frequency Devices to Voltage Sags**," in IEEE Access, vol. 7, pp. 2068-2079, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885402.