



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

GUILHERME RODRIGO VILA NOVA

**ANÁLISE DE FATORES DE IMPACTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA
DURAÇÃO NA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA – PE**

Recife
2025

GUILHERME RODRIGO VILA NOVA

**ANÁLISE DE FATORES DE IMPACTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA
DURAÇÃO NA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA – PE**

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

Orientador(a): Profa. Dra. Milde Maria da Silva Lira

Recife
2025

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

Vila Nova, Guilherme Rodrigo.

Análise de Fatores de Impactos de Variação de Tensão de Curta Duração na
Ilha de Fernando de Noronha - PE / Guilherme Rodrigo Vila Nova. - Recife,
2025.

Ex.:74 : il., tab.

Orientador(a): Milde Maria da Silva Lira

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

9,1.

Inclui referências.

1. Qualidade de Energia Elétrica. 2. Variações de Tensão de Curta Duração. 3.
Regulamentos de VTCDs. 4. Fator de Impacto e Curva de Suportabilidade. 5.
Análise de dados dos RDPs. 6. Conclusões e Propostas de continuidade. I.
Lira , Milde Maria da Silva. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Guilherme Rodrigo Vila Nova

**ANÁLISE DE FATORES DE IMPACTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA
DURAÇÃO NA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA – PE**

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

Aprovado em: 09/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof Dra. Milde Maria da Silva Lira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alex Ferreira Falcão Moreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Ercles Mauricio Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Com grande respeito e apreço, venho por meio deste expressar meus mais sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Inicialmente, agradeço a Deus, por me conceder saúde e sabedoria, condições fundamentais para a conclusão desta etapa decisiva da minha jornada acadêmica. Reconheço que, sem sua presença em minha vida, esta conquista não teria sido possível.

Expresso minha mais profunda gratidão à minha família, em especial à minha querida avó Ivani, pelo apoio incondicional durante toda essa jornada. Seu incentivo constante, suas palavras de encorajamento e sua presença afetuosa foram fundamentais para que eu continuasse firme até a realização deste trabalho. A base sólida que vocês sempre representaram foi, sem dúvida, essencial para minha perseverança e conquista.

Agradeço também à minha namorada, por todo o apoio emocional, carinho e compreensão ao longo dessa trajetória, sempre sendo uma fonte de força e incentivo.

De maneira especial, dirijo meus sinceros agradecimentos à minha orientadora, Prof^a Dra. Milde Maria da Silva Lira, pela competência, dedicação, paciência e disponibilidade para me orientar em todas as fases do desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação técnica e seu direcionamento foram fundamentais para a concretização da pesquisa, e sou profundamente grato pela sua valiosa contribuição.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos colegas e amigos, pela amizade, companheirismo e colaboração durante todo o curso. As trocas de experiências e os desafios enfrentados em conjunto foram determinantes para o meu crescimento acadêmico e pessoal, e tenho a certeza de que nossa amizade continuará sólida e duradoura.

A todos, minha eterna gratidão.

"Esperei confiantemente no Senhor, Ele se inclinou
para mim e ouviu o meu clamor."
(Salmos, 40:1)

RESUMO

Este trabalho analisa a severidade do Fator de Impacto das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) no sistema distribuição, com foco na rede da Ilha de Fernando de Noronha-PE, entre os anos de 2012 e 2015. A pesquisa aborda as implicações dessas variações na faixa de tensão de 13,8 kV, que afeta aos consumidores que possuem acesso à energia com esses afundamentos de tensão. Através da aplicação do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que estabelece normas técnicas para a qualidade da energia elétrica, o estudo classifica as VTCDs com base em sua amplitude, duração e frequência, e avalia os impactos desses fenômenos na durabilidade e performance dos equipamentos conectados à rede. Os resultados obtidos são confrontados com os padrões normativos do PRODIST, com o objetivo de identificar possíveis melhorias na operação do sistema elétrico, propondo soluções operacionais para reduzir os efeitos das VTCDs e melhorar a qualidade do fornecimento de energia. O estudo destaca a importância da análise das VTCDs como uma estratégia para a consolidação da infraestrutura elétrica nacional, visando maior eficiência, qualidade e adequação aos padrões internacionais de qualidade.

Palavras-chave: Variações de Tensão de Curta Duração, Qualidade da Energia Elétrica, Rede de Distribuição, PRODIST, Impactos nos Equipamentos.

ABSTRACT

This study analyzes the severity of the Impact Factor of Short-Duration Voltage Variations (VTCD in portuguese language) in the distribution system, focusing on the network of Fernando de Noronha Island-PE, between the years 2012 and 2015. The research addresses the implications of these variations in the 13.8 kV voltage range, affecting consumers who experience voltage sags. Through the application of Module 8 of the Procedures for the Distribution of Electric Energy in the National Electric System (PRODIST in portuguese language), which establishes technical standards for power quality, the study classifies VTCDs based on their amplitude, duration, and frequency and assesses the impact of these phenomena on the durability and performance of equipment connected to the grid. The obtained results are compared with PRODIST regulatory standards to identify potential improvements in the operation of the electrical system, proposing operational solutions to mitigate the effects of VTCDs and enhance the quality of power supply. The study highlights the importance of VTCD analysis as a strategy for consolidating the national electrical infrastructure, aiming for greater efficiency, quality, and compliance with international power quality standards.

Keywords: Short Duration Voltage Variations, Power Quality, Distribution Network, PRODIST, Equipment Impacts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação das principais perturbações em forma de onda de tensão	21
Figura 2 – Princípio adotado para variações valores de tensão eficaz	22
Figura 3 - Representação da forma de onda de interrupção momentânea de tensão em um sistema trifásico.....	23
Figura 4 - Representação da forma de onda de afundamento momentâneo de tensão	24
Figura 5 - Representação da forma de onda de elevação momentânea de tensão ..	24
Figura 6 – Representação de eventos de VTCD com e sem a consideração de histerese em:(a) afundamento momentâneo de tensão e (b) elevação momentânea de tensão.....	27
Figura 7 - Representação da agregação de fases com base na fase crítica.....	30
Figura 8 – Representação da agregação de fases com base na união de fases	30
Figura 9 - Representação da agregação de fases com base nos parâmetros críticos.	31
Figura 10 - Representação de agregação de temporal para eventos consecutivos..	32
Figura 11 – Representação da agregação temporal quando um dos eventos subsequentes ocorre exatamente no final da janela de 3 minutos.....	32
Figura 12 – Representação da agregação temporal quando a sequência de eventos ultrapassa o intervalo de 3 minutos para a agregação	33
Figura 13 - Classificação dos graus de severidade de VTCD adotada pela CHESF	46
Figura 14 - Curva de suportabilidade CBEMA.....	47
Figura 15 - Curva de suportabilidade ITIC	48
Figura 16 - Curva SEMI 47.....	49
Figura 17- Curva VDN.....	50
Figura 18 - Distribuição geográfica dos alimentadores da IFN	52
Figura 19 - Porcentagem de consumidores por categoria de classe.....	52
Figura 20 – Localização de Instalação do RDP itinerante no Ponto P1 e P2	53
Figura 21 - Localização de Instalação do RDP itinerante no Ponto P3	54
Figura 22 - Instalação do RDP itinerante no Ponto P4.....	55
Figura 23 - Representação unifilar da Usina Tubarão no ano de 2012	56

Figura 24 – Gráfico de Fatores de Impacto correspondente a RDP Itinerante.....	67
Figura 25 - Gráfico de Fatores de Impacto correspondente a Subestação Tubarão. 68	
Figura 26 - Graus de Severidade correspondente ao RDP da Itinerante	69
Figura 27 – Graus de Severidade correspondente ao RDP da Usina Tubarão.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das VTCDs de acordo com o PRODIST	21
Tabela 2 - Contabilização da elevação de tensão no barramento em função da amplitude e duração do evento	28
Tabela 3 - Contabilização de afundamentos de tensão no barramento em função da amplitude e duração do evento	28
Tabela 4 - Critérios de estratificação para a contabilização de eventos de VTCD.	41
Tabela 5 - Estratificação das VTCD com relação à variação de sensibilidade das cargas.	41
Tabela 6 - Contabilização e duração dos afundamentos de tensão segundo a NRS 048-2	43
Tabela 7 – Fator de ponderação correlacionado a Região de Sensibilidade e Fator de Impacto base	45
Tabela 8 - Rede elétrica de distribuição na IFN	53
Tabela 9 – Cronograma de medições do RDP Itinerante, abrangendo a coleta de todos os relatórios	58
Tabela 10 - Registro do RDP Itinerante relativo ao mês de dezembro de 2012.....	59
Tabela 11 - – Estratificação de afundamentos do RDP da Usina Tubarão relativo ao mês de novembro de 2012.....	60
Tabela 12 - Estratificação de afundamentos do RDP da Usina Tubarão relativo ao mês de novembro de 2012.....	61
Tabela 13 - Análise estratificada dos dados do RDP Itinerante de 2012 para contabilização dos eventos de VTCD.....	61
Tabela 14 - Análise estratificada dos dados do RDP Itinerante de 2013 para contabilização dos eventos de VTCD.....	62
Tabela 15 - Análise estratificada dos dados do RDP Itinerante de 2014 para contabilização dos eventos de VTCD.....	62
Tabela 16 - Análise estratificada dos dados do RDP Itinerante de 2015 para contabilização dos eventos de VTCD.....	63
Tabela 17 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2012 para contabilização dos eventos de VTCD.....	63

Tabela 18 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2013 para contabilização dos eventos de VTCD.....	64
Tabela 19 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2014 para contabilização dos eventos de VTCD.....	64
Tabela 20 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2015 para contabilização dos eventos de VTCD.....	65
Tabela 21 – Registro de VTCD por região de sensibilidade e Fator de Impacto com base no RDP Itinerante.	66
Tabela 22 - Registro de VTCD por região de sensibilidade e Fator de Impacto com base no RDP da Usina Tubarão.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMT	Afundamento Momentâneo de tensão
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
AT	Alta tensão
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
BT	Baixa Tensão
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i>
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
EUIG	<i>Energy Intensive User Group</i>
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
ETT	Elevação Temporária de Tensão
FI	Fator de Impacto
GD	Geração Distribuída
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFN	Ilha de Fernando de Noronha
IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
ITT	Interrupção Temporária de Tensão
NERSA	<i>National Energy Regulator of South Africa</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema elétrico
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
REI	Redes Elétrica Inteligentes
RDP	Registrador Digital de Perturbação
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SEMI	<i>Semiconductor Equipment and Materials Institute</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
VDN	<i>Verband der Netzbetreiber</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2	VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD).....	19
2.1	FUNDAMENTO CONCEITUAL SOBRE A VTCD.....	19
2.1.1	Interrupção, afundamento e elevação momentânea.....	23
2.1.2	Interrupção, afundamento e elevação temporária	25
2.2	PROPAGAÇÃO DE UMA VTCD.....	25
2.3	RESISTÊNCIA E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	25
2.4	MAGNITUDE E DURAÇÃO E DE UMA VTCD	26
2.5	MÉTODOS PARA MEDIÇÃO	27
2.6	AGREGAÇÃO DOS EVENTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	29
2.6.1	Agregação de fases.....	29
2.6.2	Agregação temporal	31
2.7	IMPACTOS PROPORCIONADOS PELA VTCD	33
3	GESTÃO NORMATIVA DE ENERGIA.....	36
3.1	PRODIST.....	38
3.1.1	Objetivos e abrangência do módulo 8 do PRODIST.....	39
3.1.2	Parâmetros das VTCDs para Cálculo do FI.....	40
3.2	NRS 048-2: ÁFRICA DO SUL	42
4	PRINCIPAIS INDICADORES DAS VTCDs	44
4.1	FATOR DE IMPACTO	44
4.2	ANÁLISE DA SEVERIDADE DE UMA VTCD	45
4.3	CURVA DE SUPORTABILIDADE.....	46
4.3.1	Curva CBEMA	47
4.3.2	Curva ITIC	48
4.3.3	Curva SEMI 47	49
4.3.4	Curva VDN	50
5	ESTUDO DO CASO	51
5.1	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DOS CONSUMIDORES DA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA.....	51
5.2	PARAMETRIZAÇÃO E PONTOS DE INSTALAÇÃO DO REGISTRADOR DIGITAL DE PERTURBAÇÃO	56
5.3	AValiação DOS DADOS DE VTCD	59
5.4	RESULTADOS	60

5.5	GRAUS DE SEVERIDADE DAS VTCDS	69
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	71
6.1	CONCLUSÃO	71
6.2	PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, discute-se bastante sobre a geração e o fornecimento de energia elétrica devido ao crescente interesse por soluções renováveis. Com isso, cria-se também a preocupação com a qualidade da energia fornecida e quando nos referimos ao termo "Qualidade da Energia Elétrica" (QEE) temos que construir um entendimento que sua concepção é constituída por várias interpretações, sendo uma delas podendo ser relacionada à desvio ou variação da energia em relação aos padrões de referência estabelecidos para o seu fornecimento (DUGAN et al., 2004). E também pode ser caracterizada por qualquer modificação na frequência, amplitude ou forma de onda das grandezas elétricas, que resultam em falhas ou mau funcionamento dos equipamentos conectados à rede elétrica (MARTINS, 2013). De uma maneira mais abrangente, a QEE pode ser compreendida como uma medida da capacidade da energia elétrica de ser aproveitada de maneira eficiente pelos seus usuários, ou seja, de modo que não leva prejuízos aos equipamentos conectados à rede. Essa abordagem não se limita à continuidade do fornecimento de energia, mas também envolve a observação dos parâmetros técnicos definidos, os quais são fundamentais para a operação segura tanto do sistema de distribuição quanto dos equipamentos que são dependentes.

Dentre os vários desafios relacionados que podemos obter quando nos referimos à QEE na rede de distribuição decorrem de diversos fatores, sendo os que mais prevalecem:

- Degradação e insuficiência de manutenção da infraestrutura elétrica existente, que compromete a confiabilidade e a estabilidade do sistema;
- Deficiências nos sistemas de proteção e falhas nos equipamentos, que impactam diretamente na capacidade de resposta e prevenção a distúrbios;
- Sobrecarga do sistema elétrico, resultante do crescimento contínuo da demanda de energia, o que agrava as condições operacionais e pode levar a falhas na distribuição.

Os parâmetros considerados ideais para o fornecimento de energia possuem sua relação com variações de frequência, harmônicos, desequilíbrios de tensão, bem

como as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), este último sendo o principal foco deste trabalho. No contexto atual, possuímos uma demanda crescente por inovações e automação se tornou bastante requisitada, pois foi impulsionada para a otimização de processos. Esse impulso está diretamente relacionado ao aumento da eficiência operacional e à redução de custos.

De maneira paralela, o conceito de sustentabilidade ganhou destaque, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais associados às atividades produtivas, porque se obtiveram grandes impactos na fauna e flora devido a este crescimento pela busca de eficiência operacional e à redução de custos. Entretanto, embora os investimentos em modernização e desenvolvimento sustentável tragam benefícios econômicos de maneira que prorroga uma qualidade de vida para as próximas gerações, a evolução do perfil das cargas elétricas introduziu novas preocupações no que se refere à QEE. Especificamente, o aumento da sensibilidade dos equipamentos instalados, aliado à crescente incidência de variações de tensão e outros distúrbios elétricos, impõe desafios adicionais à estabilidade e severidade do sistema elétrico.

Na Ilha de Fernando de Noronha (IFN), determinou-se, por meio Lei nº 17.624/2021, que até o ano 2030 se pretende adotar a medida de substituição de frotas de veículos a combustão por veículos elétricos, visando garantir uma redução nos impactos que a emissão de CO₂ proporcionam para o meio ambiente, visto que em alguns países já está ocorrendo esse tipo de transição para minimizar os impactos e exigindo um aumento para comportar toda a infraestrutura para o carregamento. Tem-se que os veículos usam baterias recarregáveis a partir de diferentes fontes de eletricidade, sendo a energia solar uma das alternativas mais sustentáveis até o presente momento, porém é observado que para a rede de distribuição é gerado grandes prejuízos devido a distorção que os equipamentos que compõe o sistema elétrico podem proporcionar. Nota-se que temos uma grande oportunidade em usar sistemas fotovoltaicos para abastecimento, mas sua viabilidade depende de alguns de fatores que dentre eles são: condições meteorológicas, custos e impactos ambientais. Logo vem sendo adotado algumas análises técnicas e econômicas para otimizar sua implementação e garantir qualidade de maneira eficiente no abastecimento de veículos elétricos (LIMA JÚNIOR, 2023).

Visto isso, consegue ser observado os distúrbios que anteriormente eram considerados de menor relevância, passaram a ter um impacto econômico

significativo e isso se deve ao aumento da sensibilidade dos equipamentos eletrônicos a variações abruptas de corrente e tensão, bem como à presença de distorções harmônicas que os mesmos fornecem para a rede. Partindo-se com foco na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) no Brasil, os sistemas elétricos estão vulneráveis a possibilidade de falhas, pois para isso necessita-se uma estrutura robusta e completamente imune a possíveis falhas no qual resulta em um alto custo. Sendo as origens dessas falhas desde os defeitos que os equipamentos podem apresentar até as intempéries, falhas em sistemas de proteção e erro humano. Sabe-se que Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) realiza monitoramento contínuo e análise pós-operação para reduzir a ocorrência de grandes perturbações para garantir uma melhoria para as medidas preventivas.

Diante deste cenário, é necessário adotar urgentemente uma abordagem técnica para análise da severidade das VTCDs. Pois isso não só garante objetivo a eficiência operacional, mas também a segurança e a qualidade do fornecimento de energia, atendendo a uma demanda crescente em função de uma complexidade operacional ampliada.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo é empregar o indicador de Fator de Impacto para examinar as VTCDs no sistema de distribuição de energia elétrica da IFN, visando realizar uma análise minuciosa da qualidade do fornecimento de eletricidade na região no que corresponde a usina e a cargas conectadas a rede. O propósito da análise é oferecer uma avaliação quantitativa e qualitativa das variações de tensão, visando identificar impactos no desempenho e na qualidade do sistema de distribuição.

1.2 Objetivo específico

O Fator de Impacto (FI), através de uma atualização em 2017, foi inserido ao Módulo 8 do PRODIST, regulamento esse que trata sobre as normas de QEE.

Portanto, a partir dessa adição, os objetivos específicos deste trabalho serão discutidos conforme as próximas a seguir, sendo esses:

- Exame das normas vigentes e estudo de casos visando fornecer embasamento teórico sobre os problemas de QEE associados às VTCDs;
- Apresentação do regulamento brasileiro referente às VTCDs aplicáveis à distribuição de energia elétrica;
- Apresentação e comparação dos regulamentos internacionais que tange às VTCDs;
- Discutir os principais indicadores de severidade e sensibilidade à VTCDs utilizados para avaliar o impacto dessas variações nos sistemas elétricos;
- Aplicação da metodologia do PRODIST às medições de VTCD IFN, com o intuito de analisar a qualidade da distribuição de energia elétrica nessa região.

1.3 Organização do Trabalho

Para garantir um trabalho conciso em informações foi elaborado uma pesquisa bibliográfica detalhada para embasar teoricamente os temas discutidos sobre este tipo de estudo, incluindo normas técnicas, artigos científicos, monografias, regulamentos e publicações especializadas. A meta deste estudo foi expandir o entendimento sobre a severidade das Variações de Tensão de Curta Duração na rede elétrica da Ilha de Fernando de Noronha, construindo uma base sólida para continuidade na pesquisa. A estruturação do trabalho foi em conformidade com a seguinte descrição a seguir:

O Capítulo 1 são abordados os aspectos gerais do Sistema Elétrico de Potência (SEP), enfatizando a relevância das pesquisas sobre as VTCDs e expondo os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2, abordam-se os princípios básicos, os conceitos fundamentais e os principais obstáculos ligados às VTCD, além das metodologias utilizadas para identificar e entender seus impactos na rede.

O Capítulo 3, é discutido as normas técnicas necessárias para a caracterização e parametrização das VTCD, incluindo a legislação brasileira vigente e normas

adotada em outros países para oferecer uma compreensão mais completa sobre as regulamentações relacionadas à análise de VTCD.

No capítulo 4, terá a finalidade de esclarecer os conceitos de Fator de Impacto e os indicadores principais utilizados para avaliar a QEE. Este capítulo igualmente aborda sobre as curvas de suportabilidade dos dispositivos elétricos em relação às VTCDs.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados da análise dos dados coletados sobre as VTCD, fazendo uma comparação entre os índices calculados e os critérios estabelecidos pela legislação vigente, conforme o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

Por último, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo e propõe recomendações para continuidade na pesquisa junto com implementação de algumas melhorias no campo da QEE.

2 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)

Neste capítulo, abordaremos os princípios ligados às VTCDs, de acordo com as normas definidas para a rede elétrica, bem como também estabelecer uma avaliação dos principais desafios ligados à QEE. A estratégia também englobará um debate acerca de sua classificação, métodos de medição e os impactos no sistema de distribuição.

2.1 Fundamento Conceitual sobre a VTCD

No âmbito da QEE, o principal desafio está intrinsecamente ligado aos impactos financeiros decorrentes das não conformidades nos parâmetros elétricos, os quais comprometem a eficiência operacional e podem resultar em custos significativos relacionados a perdas produtivas, danos a equipamentos e penalidades contratuais. Para os usuários residenciais, os efeitos financeiros dessas variações não são perceptíveis em grande parte. Já para os usuários industriais, a qualidade da energia impacta diretamente e de maneira significativa, especialmente com o crescimento do uso de equipamentos eletrônicos sofisticados e sistemas de controle automatizados nas operações industriais fazendo que tenhamos um grande prejuízo em processos e perdas de matéria-prima.

Nesse contexto, as perturbações eletromagnéticas desempenham um papel crucial, uma vez que afetam os sistemas elétricos de potência e geram fenômenos notáveis, como as VTCDs, que estão intimamente relacionadas à QEE. A literatura técnica sobre este assunto é amplamente unificada, portanto, este capítulo oferece uma visão concisa sobre as VTCD, focando nas variações de tensão, como os afundamentos (dips ou sag), elevações (swell) e interrupções temporárias de fornecimento, incluindo distorções harmônicas e surtos transitórios.

O termo VTCD é definida como um evento aleatório de tensão que se caracterizado por desvio significativo, durante um curto intervalo de tempo, em relação tensão eficaz (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2020).

Ao abordar sobre os tipos de eventos, as VTCD incluem três categorias que são:

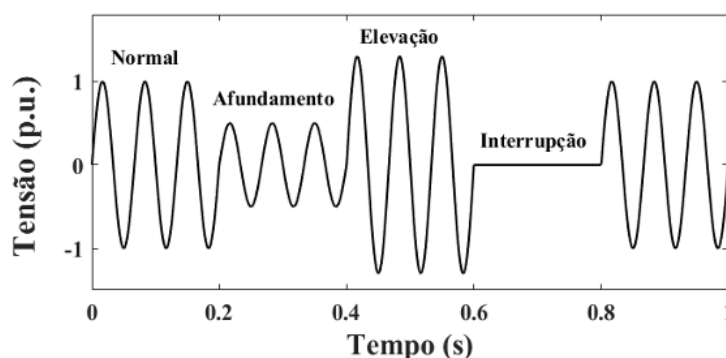
- Interrupções de tensão: são definidas como o afundamento da tensão eficaz de modo que seja menor que 0,1 pu para um tempo de duração inferior a 1 minuto, variando o período conforme o regulamento aplicado. As interrupções frequentemente seguem um afundamento na tensão causado quando uma falha no SEP ocorre. Após a mitigação de defeitos por parte da proteção e subsequente operação dos religadores, o consumidor tem de restituir a eletricidade.
- Afundamento de tensão: Também conhecidos como o termo “sags” ou “dips” sendo o primeiro termo usado na comunidade de qualidade de energia dos Estados Unidos e o segundo definido conforme a IEC. Ambos termos se referem a um afundamento de tensão, na qual o valor eficaz da tensão sofre uma diminuição significativa por um intervalo ou também pode ser compreendida como uma queda no valor eficaz da tensão entre 0,1 pu e 0,9 pu em relação ao valor nominal que dura de 0,5 ciclos a um 1 minuto, com período a depender do regulamento aplicado.
- Elevação de tensão: Também conhecidos como o termo “swells”, trata-se de um aumento temporário da tensão, onde o valor eficaz ultrapassa o limite superior durante um curto período ou pode também ser compreendidos como eventos onde o valor eficaz da tensão ultrapassa 1,1 pu de seu valor nominal, com duração que vá de 0.5 ciclos até 1 minuto, assim como as demais classificações o período irá variar conforme o regulamento aplicado. Esses eventos de elevação de tensão ocorrem frequentemente devido á condições de curto-circuito no sistema elétrico, causando falhas que resultam em um pico de tensão.

A análise e a classificação minuciosa das VTCD possibilitam sejam adotadas algumas medidas corretivas e de melhoria contínua da qualidade energética, prevenindo potenciais danos aos equipamentos e minimizando os impactos financeiros decorrentes de falhas no fornecimento de energia.

Na Figura 1 e na Tabela 1 - Classificação das VTCDs de acordo com o PRODIST, apresentadas a seguir, são detalhados os diversos tipos de VTCDs, juntamente com suas respectivas categorias. A ilustração exemplifica os fenômenos típicos associados às VTCDs, como interrupções, afundamentos e elevações de

tensão. Por outro lado, a tabela especifica os parâmetros utilizados para a classificação dessas perturbações, levando em consideração a duração e a amplitude, conforme os critérios estabelecidos pelo PRODIST. É importante destacar que esses critérios divergem daqueles estabelecidos no Procedimento de Rede, conforme descrito no Submódulo 9.7 do ONS, especialmente no que se refere à duração das Variações Temporárias de Tensão. Enquanto o PRODIST considera variações com duração de até 3 minutos, o Procedimento de Rede do ONS estabelece o limite máximo de 1 minuto.

Figura 1 – Representação das principais perturbações em forma de onda de tensão



Fonte: ASSIS, 2021

Tabela 1 - Classificação das VTCDs de acordo com o PRODIST

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da Tensão (valor eficaz) em relação à tensão da referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão - IMT	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão - AMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão - EMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão – ITT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporária de Tensão – ATT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão - ETT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 pu

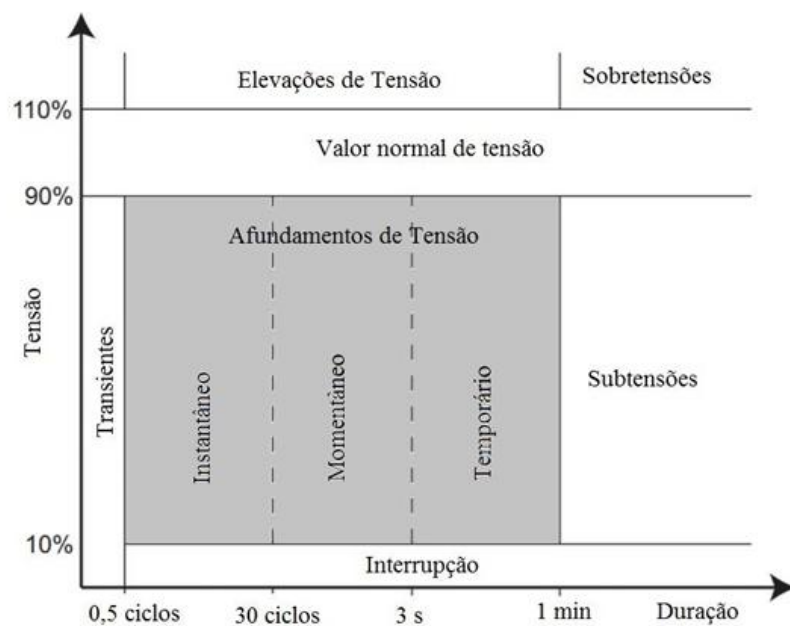
Fonte: PRODIST, 2020

Sabe-se que as VTCDs são categorizadas de acordo com sua amplitude, frequência e duração, pois a natureza do evento estabelece as estratégias

apropriadas para sua atenuação e avaliação (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1995a). As mesmas podem ser categorizadas em variações instantâneas, momentâneas e temporárias de tensão, dependendo do período de ocorrência e da magnitude da alteração notada, conforme apresentado na Figura 2. De maneira mais frequente, os eventos de afundamento e elevação de tensão tem uma duração que pode variar de meio ciclo a alguns minutos são classificados como VTCD, de acordo IEEE, temos:

- Instantâneos: variando entre 0,5 ciclos a 30 ciclos;
- Momentâneos: variando entre 30 ciclos a 3 segundos;
- Temporários: variando entre 3 segundos e 1 minuto.

Figura 2 – Princípio adotado para variações valores de tensão eficaz



Fonte: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1995a. adaptado

Para os eventos que tem uma duração menor que meio ciclo é chamado como transitórios, a identificação e a mensuração se tornam mais complicadas devido à sua complexidade e rapidez de ocorrência e para os eventos que possuem duração superior a um minuto, valor de período que vai variar de acordo com o regulamento adotado, são chamados de Variações de Tensão de Longa Duração, mas esses dois

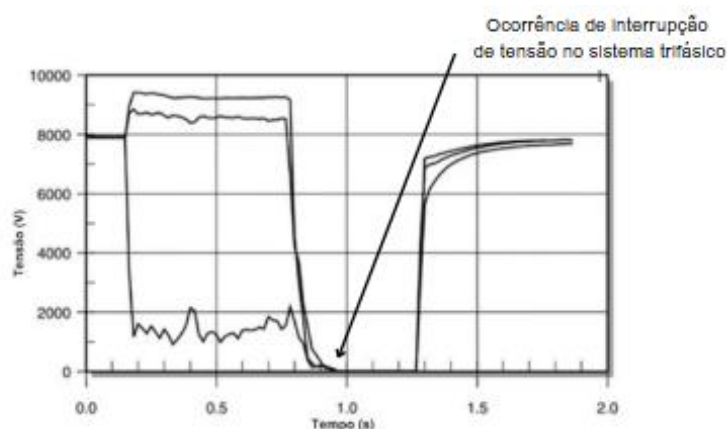
pontos não serão o foco de nosso estudo (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1995a).

É válido ressaltar a existência desses eventos pode ter uma relação com bastante afinidade com os fatores como as intempéries, curtos-circuitos, energização de motores que demandam elevadas correntes durante a partida e operações de chaveamento em sistemas com grandes cargas (DUGAN et al. ,2004). Esses eventos impactam diretamente a QEE e demandam sistemas de supervisão adequados para o fornecimento de energia.

2.1.1 Interrupção, afundamento e elevação momentânea

No que diz a respeito da interrupção momentânea de tensão temos a definição de que é marcada por uma queda no valor da tensão para níveis abaixo de 0,1 p.u em relação à tensão normal. Este evento acontece com um tempo máximo de 3 segundos e geralmente são originadas a partir de defeitos no sistema de distribuição de energia, falhas nos equipamentos ou até mesmo falhas nos sistemas de controle. A imagem que mostra a forma onda ligada a esse fenômeno está presente conforme a seguir na Figura 3.

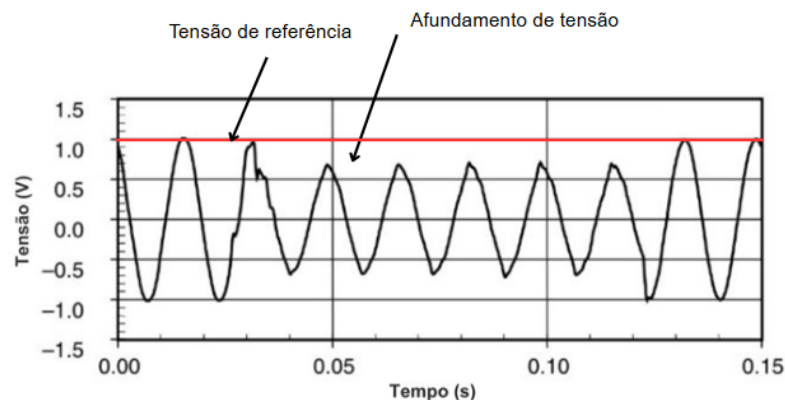
Figura 3 - Representação da forma de onda de interrupção momentânea de tensão em um sistema trifásico



Fonte: DUGAN et al. ,2004. Adaptado.

O fenômeno de afundamento momentâneo de tensão acontece quando a tensão real fica entre 0,1 e 0,9 p.u. sua duração deve ser maior ou igual a um ciclo, mas menor ou igual a três segundos e existe a possibilidade de ocorrer devido à desconexão de uma carga significativa ou à alimentação de um banco de capacitores de grande porte. o formato da onda ligada a este evento está abordado na Figura 4, que detalha os valores de afundamento de tensão inferiores à tensão de referência.

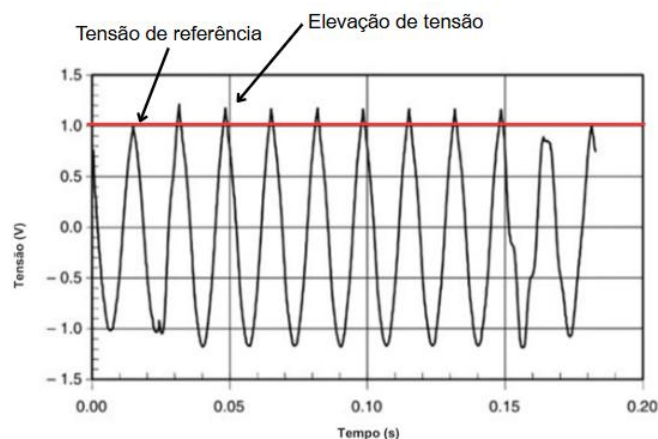
Figura 4 - Representação da forma de onda de afundamento momentâneo de tensão



Fonte: DUGAN et al. ,2004. Adaptado.

Por fim, a elevação momentânea de tensão é marcada por um valor que esteja ultrapassando 1,1 p.u. Sua duração vai de um ciclo todo, no menor caso, até três segundos, para o maior. A forma de onda está de acordo com a Figura 5, que detalha os valores de elevação de tensão superiores à tensão de referência.

Figura 5 - Representação da forma de onda de elevação momentânea de tensão



Fonte: DUGAN et al. ,2004. Adaptado.

2.1.2 Interrupção, afundamento e elevação temporária

Adotando o regulamento do PRODIST, que é a principal referência de nosso estudo, a definição de Interrupção temporária de tensão é dada como a ocorrência de quando o valor eficaz da tensão se encontra abaixo de 0,1 p.u, com um tempo de ocorrência superior a três segundos, mas não excedendo três minutos.

Já o fenômeno de afundamento temporário da tensão acontece quando o valor efetivo da tensão varia entre 0,1 p.u e 0,9 p.u, com uma duração que ultrapassa três segundos e é igual ou menor que três minutos.

Por último, a elevação temporária de tensão é caracterizada por um cenário em que o valor eficaz da tensão ultrapassa 1,1 p.u, permanecendo entre três segundos e três minutos.

2.2 Propagação de uma VTCD

Pode-se afirmar que uma propagação de uma VTCD é definida como o acontecimento de uma perturbação eletromagnética que se espalha no sistema de distribuição, afetando os consumidores e equipamentos conectados à rede de elétrica. Geralmente a sua causa inicial é gerada por curtos-circuitos até ativação de cargas que requerem uma potência elevada. Isso provoca uma perturbação que se dissemina para diferentes pontos do sistema elétrico, mas isso irá depender da resistência e localização da falta e até mesmo da configuração em que a rede se encontra.

É válido destacar que devido a essas propagações das VTCDs temos impactos bastante significativos para dispositivos como máquinas elétricas, inversores de frequência, sistemas automatizados e eletrônicos sensíveis.

2.3 Resistência e Localização de Falhas

A resistência de falta em si é um termo associado a resistência obtida em curto-circuito, defeito ou falha encontrados em um sistema elétrico e que ao ignorá-la temos o resultante de afundamentos de tensão mais severos, principalmente no tocante ao sistema de distribuição.

Em relação à localização das faltas, temos um impacto bastante significativo na análise dos afundamentos de tensão, uma vez que as falhas no sistema de transmissão prejudicam um número muito maior de consumidores do que as falhas no sistema de distribuição, devido ao fato de as redes de transmissão abastecerem as redes de distribuição (BLACKBURN, 1987).

O sistema de distribuição, que é o foco de nosso estudo, possui um formato radial, o que resulta em impactos menos expressivos no sistema. Ou seja, os impactos mais significativos ocorrem apenas para os consumidores diretamente alimentados por essa rede.

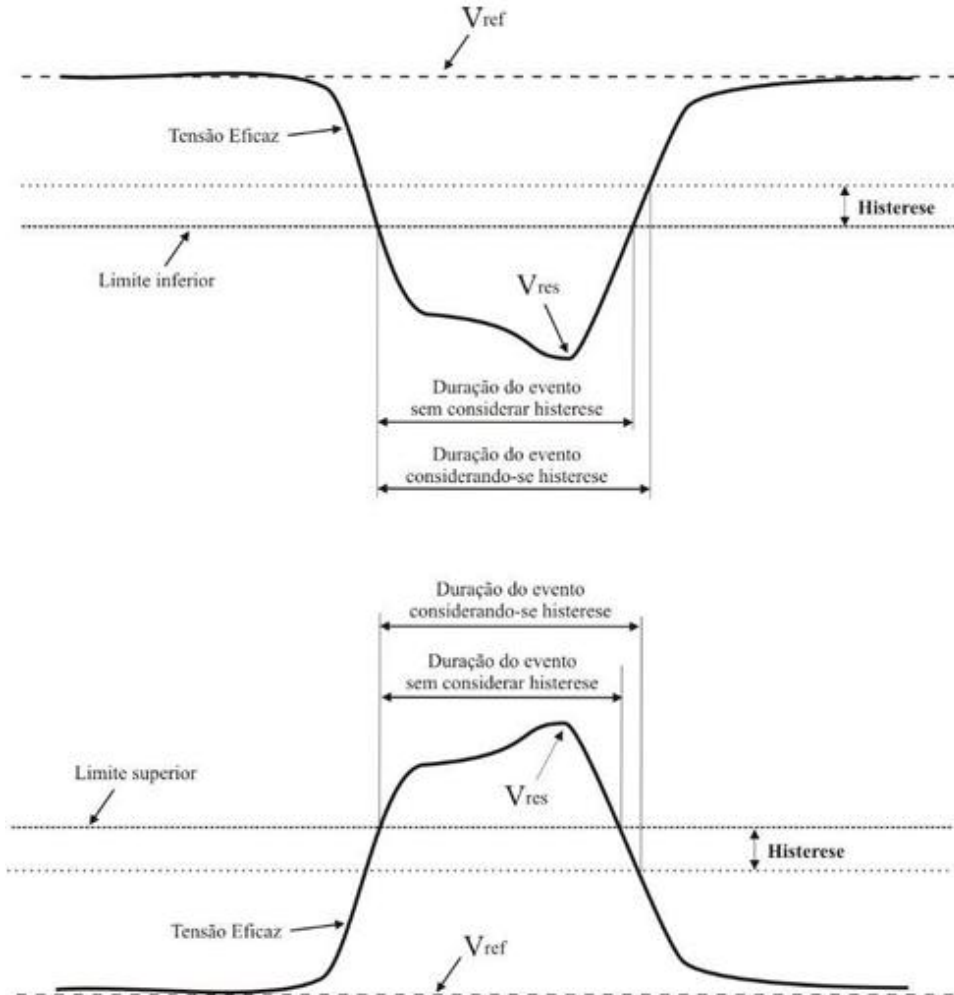
2.4 Magnitude e Duração e de uma VTCD

A definição de magnitude de um evento de VTCD é dado como o nível extremo do valor tensão residual em relação à tensão nominal expresso em porcentagem. (DECKMANN; POMILIO, 2010). E o cálculo para sua obtenção é conforme a Eq. (3.1) que será vista mais adiante.

A duração de uma variação de tensão de curta duração é entendida como o intervalo de tempo entre o momento em que a tensão eficaz ultrapassa o valor de referência e o momento em que ela retorna a esse mesmo valor voltando ao estado normal de operação podendo ser acrescido de qualquer margem de histerese que possa ser aplicada. A histerese é entendida como uma margem aplicada aos limites do que está sendo medido (DECKMANN; POMILIO, 2010). E o cálculo para sua obtenção é conforme a Eq. (3.2) que também será abordada mais adiante.

Na Figura 6 adiante, teremos o entendimento construtivo desses parâmetros abordados.

Figura 6 – Representação de eventos de VTCD com e sem a consideração de histerese em: (a) afundamento momentâneo de tensão e (b) elevação momentânea de tensão.



Fonte: MACEDO JR. ,2020

2.5 Métodos para medição

Quando abordamos sobre severidade de uma VTCD, além de ser determinada pela magnitude e a duração do evento, deve ser também considerada a frequência com que cada combinação de duração e amplitude ocorre ao longo de um determinado período. A frequência em que ocorre os eventos de VTCD resulta na quantidade de vezes em que uma dada combinação de parâmetros de magnitude e duração se apresenta em um período específico de monitoramento. Na existência de

eventos simultâneos temos o agrupamento em um único evento no ponto de medição, seguindo o conceito de agregação de eventos no qual será discutido mais adiante.

Visto isso, conforme estabelecido no Procedimento de Rede descrito no Submódulo 9.7 da ONS, a contabilização dos eventos de elevação de tensão segue os intervalos definidos na Tabela 2. De forma similar, a contabilização dos eventos de afundamento de tensão deve ser realizada conforme os parâmetros descritos na Tabela 3, destacando que as amplitudes estão expressas em unidades de tensão por unidade p.u. em relação à tensão nominal do barramento. No entanto, essa abordagem difere daquela adotada pelo PRODIST, sendo a explicação dessa divergência apresentada no Tópico 3.1.

Tabela 2 - Contabilização da elevação de tensão no barramento em função da amplitude e duração do evento

Amplitude [pu]	Duração				
	[16,67 ms - 100 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 s]	(1 s-3 s]	(3 s-1 min]
[1,10 - 1,40]					
> 1,40					

Fonte: OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2020

Tabela 3 - Contabilização de afundamentos de tensão no barramento em função da amplitude e duração do evento

Amplitude [pu]	Duração				
	[16,67 ms - 100 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 s]	(1 s-3 s]	(3 s-1 min]
(0,85 - 0,90]					
(0,80 - 0,85]					
(0,70 - 0,80]					
(0,60 - 0,70]					
(0,50 - 0,60]					
(0,40 - 0,50]					
(0,30 - 0,40]					
(0,20 - 0,30]					
(0,10 - 0,20]					
< 0,10					

Fonte: OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2020

2.6 Agregação dos eventos de Variação de Tensão de Curta Duração

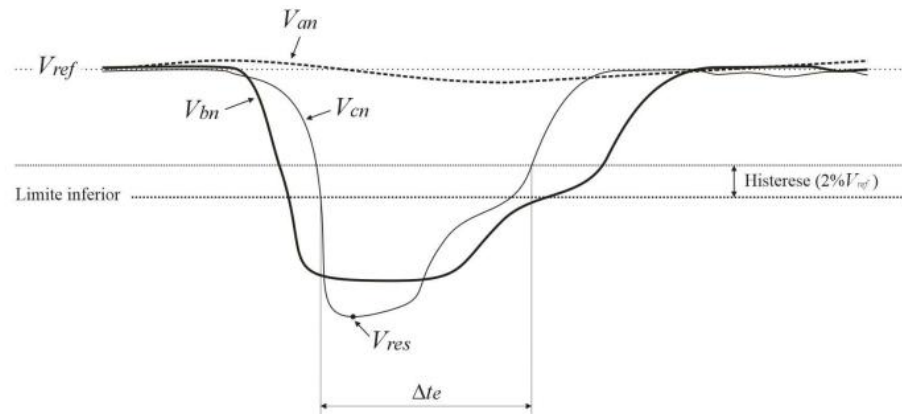
Ao se referir sobre os índices de severidade nos pontos de monitoração, como o FI que é o indicador principal de nosso estudo, não pode ser realizada de maneira trivial e isolada com base em eventos individuais. Através do PRODIST temos o estabelecimento dos critérios que apontam para os eventos consecutivos ou simultâneos registrados em um mesmo ponto de monitoração para representar um único evento de VTCD. Com base nisso, o cálculo do FI é realizado após a conclusão de todas as agregações necessárias. Nesse contexto, o PRODIST define duas formas específicas para a agregação de eventos nas quais são a agregação de fases e a agregação temporal (MACEDO JR. ,2020).

2.6.1 Agregação de fases

A respeito da agregação de fases temos a construção sobre a maneira como uma VTCD deve ser caracterizada num ponto de monitoração, levando em conta a combinação com seus parâmetros os eventos individuais que são registrados em cada fase medida. Partindo-se disso, sob a óptica de que o sistema que será trabalhado é trifásico, os eventos que ocorrem simultaneamente são primeiramente agrupados e tratados como um único evento naquele ponto de monitoração (MACEDO JR.,2020). Para realizar essa agregação, existem três critérios principais válidos para a rede distribuição nos quais são:

- Critério da fase crítica: Neste caso, a amplitude do evento agregado corresponderá à fase que mais se afastou da tensão de referência, e sua duração será idêntica à do evento dessa fase, conforme a Figura 7 (MACEDO JR.,2020).

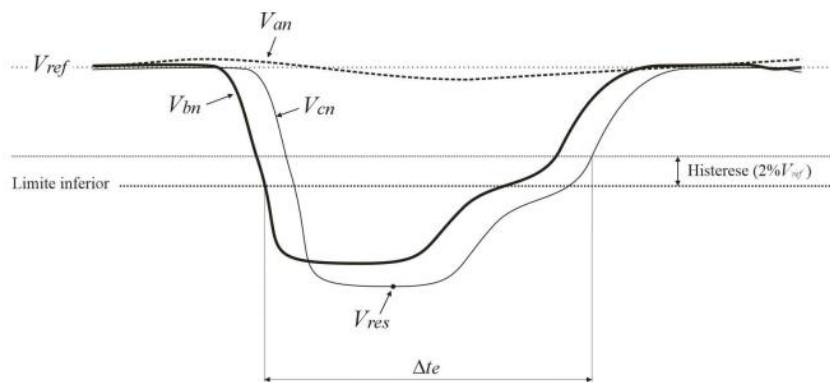
Figura 7 - Representação da agregação de fases com base na fase crítica



Fonte: MACEDO JR., 2020

- Critério de união de fases: A amplitude do evento agregado será determinada pela tensão residual da fase que apresentar o maior desvio em comparação com a tensão de referência. O início do evento agregado é marcado quando a primeira fase excede o valor de referência previamente estabelecido, enquanto o seu término é registrado apenas quando a última fase volta a cruzar esse mesmo limite. A duração do evento agregado corresponde à diferença entre esses dois momentos, como demonstrado na Figura 8 (MACEDO JR., 2020).

Figura 8 – Representação da agregação de fases com base na união de fases

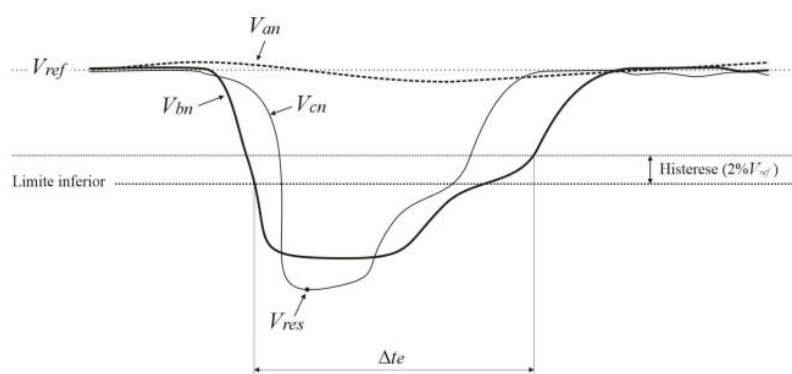


Fonte: MACEDO JR., 2020

- Critério dos parâmetros críticos: A duração do evento agregado é definida como a maior duração entre os eventos registrados nas diferentes fases.

Quanto à amplitude, será considerada a maior variação em relação à tensão de referência entre os eventos. A Figura 9 exemplifica a aplicação deste critério (MACEDO JR.,2020).

Figura 9 - Representação da agregação de fases com base nos parâmetros críticos.



Fonte: MACEDO JR. ,2020

Esses três critérios tem a finalidade de garantir panorama sobre as variações de tensão em sistemas trifásicos sejam corretamente representadas em termos de magnitude e duração, levando em consideração as condições específicas de cada fase. Além disso, o PRODIST direciona para que caso uma medição exista a ocorrência de uma elevação e um afundamento deve ser adotado como eventos separados.

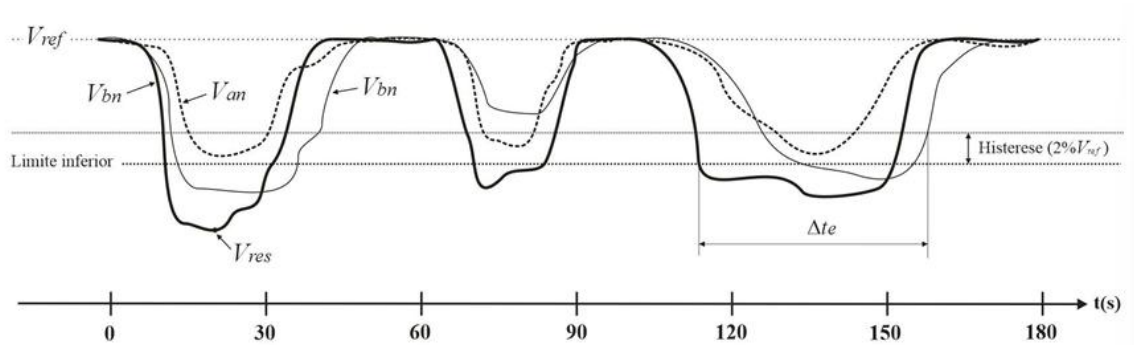
2.6.2 Agregação temporal

Este tipo de agregação só pode ser realizado após a agregação de fases e na prática implementa a consolidação de eventos sucessivos que ocorrem dentro de um intervalo de 3 minutos, desde que registrados no mesmo ponto de monitoração, em um único evento de VTCD.

É importante saber que a agregação temporal deve considerar os parâmetros críticos dos eventos consecutivos, conforme Figura 10. Com isso temos que a duração total do evento combinado será a maior duração registrada entre os eventos individuais. Já para a amplitude do evento agregado será definida pelo desvio máximo

da tensão em relação à sua referência, ou seja, será atribuída a amplitude correspondente ao evento que apresentou o maior desvio da tensão nominal (MACEDO JR.,2020).

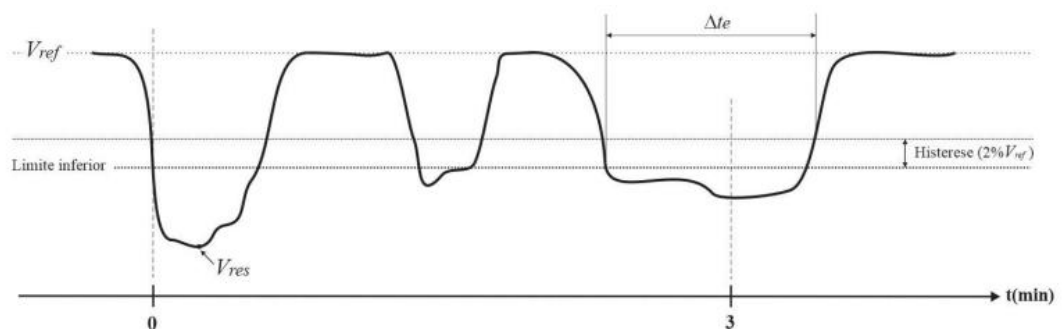
Figura 10 - Representação de agregação de temporal para eventos consecutivos



Fonte: MACEDO JR. ,2020

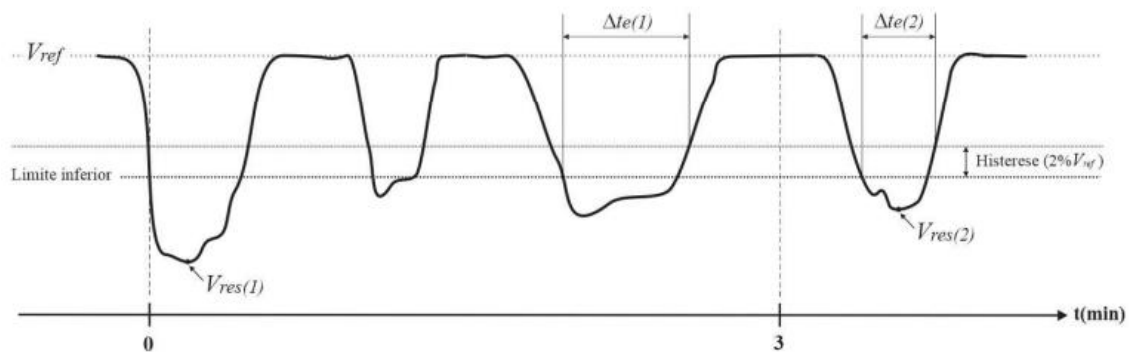
Portanto, para prevenir qualquer tipo de discrepância na consolidação de uma série de eventos sucessivos, sugere-se que, se um dos eventos estiver próximo ou coincidir com o término da janela de agregação de 3 minutos, o critério apresentado nas Figura 11 e Figura 12 será aplicado (MACEDO JR.,2020).

Figura 11 – Representação da agregação temporal quando um dos eventos subsequentes ocorre exatamente no final da janela de 3 minutos.



Fonte: MACEDO JR. ,2020

Figura 12 – Representação da agregação temporal quando a sequência de eventos ultrapassa o intervalo de 3 minutos para a agregação



Fonte: MACEDO JR., 2020

Ao verificar a Figura 11, observa-se que se a duração de um evento coincide com o término da faixa de 3 minutos, esse evento será incluído na agregação temporal contabilizado como um único acontecimento, mesmo que a distância total entre o primeiro e o último evento exceda os 3 minutos. Em contrapartida, como mostrado na Figura 12, se um evento sucessivo começar após o término da faixa de agregação de 3 minutos, serão contabilizados dois eventos diferentes no processo de agregação (MACEDO JR., 2020).

2.7 Impactos proporcionados pela VTCD

A VTCD pode ter um impacto significativo em grandes consumidores com equipamentos com um elevado grau de sensibilidade, como computadores, máquinas industriais e outros equipamentos elétricos podem apresentar mau funcionamento ou desligar. Quando a tensão apresenta um valor muito abaixo de seu referencial, pode causar danos permanentes, como superaquecimento de componentes internos devido à redução de ventilação interna. Esses impactos são particularmente significativos sob a óptica industrial devido a sua dependência de equipamentos muito sensíveis para suas operações.

Analisando o FI que será tratado na Ilha de Fernando de Noronha, observou-se que devido ao pequeno número de clientes industriais ativos, um estudo regional conduzido irá demonstrar melhor o padrão de consumo de eletricidade e determinar o

impacto na qualidade da eletricidade. Durante a vistoria do IFN, foi constatado que havia diversos motores para bombeamento na carga da COMPESA. A operação inicial desses motores proporciona afundamentos de tensão na rede, apesar de estarem localizados próximos à Usina de Tubarão. Por estas razões, observa-se que os custos associados a falhas de equipamentos podem ser significativos, desde perda de dados e falhas de produção até interrupções de serviço, interrompendo a continuidade dos negócios e até mesmo a reputação da empresa (LIRA et al. ,2012a).

As VTCDs podem ter um impacto significativo no desempenho do sistema e seus principais efeitos são:

- Falha de equipamento elétrico: elevações de tensão podem alterar a configuração de microprocessadores e controladores lógicos programáveis (CLPs), causando desligamentos automáticos e perda de dados.
- Desconexão de dispositivos elétricos: A oscilação de tensão pode proporcionar uma vibração mecânica resultando no desencaixe das conexões fazendo com que os acessórios e a fiação fiquem soltos ou com que os dispositivos elétricos desliguem inesperadamente e causem problemas.
- Mudança de velocidade do motor: O conversor de frequência pode ter um pico de energia que faz com que o motor mude a velocidade incorretamente, afetando seu desempenho e operação contínua.
- Atuação da proteção do equipamento: Equipamentos como fusíveis e disjuntores podem abrir devido a picos de energia, interrompendo as operações diárias e protegendo o sistema contra danos.
- Falha na comutação: As interrupções momentâneas de tensão podem levar a falhas no interruptor que afetam os sistemas de controle e distribuição de energia.
- Iluminação: Lâmpadas de descarga, como sódio ou mercúrio, podem apagar ou ser danificadas por mudanças repentinas de energia.

Esses resultados destacam a importância de manter equipamentos elétricos robustos. Esses desafios reforçam a necessidade de implementar tecnologias de proteção e controle em sistemas de energia, como Redes Elétricas Inteligentes (REI),

para garantir a segurança contínua na operação de equipamentos e processos críticos (LIRA et al. ,2012a).

3 GESTÃO NORMATIVA DE ENERGIA

Este capítulo apresentará resoluções normativas referentes às VTCD que estabelecem padrões e procedimentos para sua operação e monitoramento. A finalidade destas resoluções é assegurar a estabilidade e continuidade do suprimento de energia elétrica e ao mesmo tempo minimizar os impactos dos eventos nos equipamentos, valorizando a melhoria da qualidade de serviço prestada ao consumidor.

Para que se possa examinar as informações apresentadas, é fundamental entender sobre a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que opera como uma entidade reguladora em âmbito federal, com objetivo oferecer fiscalização e regular a produção, transmissão, comercialização e distribuição de energia elétrica em todo território brasileiro. Considerando que as diretrizes relativas à QEE no sistema de distribuição são estabelecidas diretamente pela ANEEL, a regulamentação correspondente está disposta nos Módulos 3 e 8 do PRODIST. O Módulo 3 trata dos requisitos para Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, enquanto o Módulo 8 estabelece os parâmetros e limites associados à Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, sendo este último o principal objeto de análise do Fator de Impacto abordados neste estudo.

Embora nosso estudo aborde de forma aprofundada os regulamentos PRODIST e NRS 048-2, desde sua criação até seus objetivos, é importante considerar também a existência de outras normas relevantes para o estudo da qualidade de energia. Pois isso traz consigo uma abordagem mais abrangente e fundamentada sobre o tema, proporcionando uma visão completa e detalhada dos aspectos normativos que regem a qualidade de energia:

- IEC 6100-2-1 (1990): Possui o objetivo de descrição a respeito do afundamento de tensão que é crucial para a análise de causas e efeitos. Este regulamento tem sua relevância para equipamentos e cargas que demandam muita sensibilidade a variações de tensão (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC, 1990).
- IEEE Standard 1159 – 1995: Nessa norma temos a definição de funções e características como magnitude, duração e frequência. nela obtemos

um mapeamento para gerar auxílio do monitoramento e na interpretação de valores mensurados das perturbações que prejudicam a qualidade de energia (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1995a).

- IEEE Standard 446 – 1995: tem o objetivo de apresentar o afundamento de tensão com o foco totalmente nos impactos gerados durante as partidas de motores elétricos e equipamentos muito sensíveis. A norma oferece um melhor auxílio para criação de projeto que sejam mais robustos e confiáveis, fazendo com isso uma redução nos riscos de possíveis falhas que podem ocorrer (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1995b).
- IEEE Standard 1250 – 1995: Seu objetivo é identificar e oferecer as melhores práticas para a mitigação de afundamentos de tensão. essa busca identificar os principais motivos para a ocorrência desses fenômenos e os métodos que possibilitam uma maior eficiência para minimizar ou atenuar seus efeitos, garantindo com isso uma continuidade e a estabilidade do fornecimento de energia elétrica (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1995c).
- IEEE Standard 493 – 1997: o foco nesse regulamento estabelecer métodos para dimensionar os afundamentos de tensão e proporciona identificar, quantificar e avaliar os impactos dos afundamentos de tensão. A norma também oferece alguns métodos para calcular a magnitude e a duração desses afundamentos (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1997).
- IEEE Standard 1346 – 1998: Seu principal objetivo é fornece um método que permita a realização de análise técnica e financeira referente a afundamentos de tensão, isto é, garantir uma visualização no tocante de aspectos financeiros e técnicos (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE, 1998).
- Resolução ANEEL 456/2000: mesmo sabendo da ausência de modelos de desempenho do sistema voltados para afundamentos, esta resolução atenua para garantia de condições de fornecimento de energia de

maneira geral tanto para os consumidores como para os responsáveis pelo fornecimento (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2000).

3.1 PRODIST

O Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) abrange diretrizes criadas pela ANEEL com objetivo central é estabelecer normas e padrões para as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia no Brasil. O regulamento tem como propósito definir um padrão para as atividades técnicas que se relacionam à performance operacional e ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo organizado em 11 módulos, que são:

- Módulo 1 - Glossário de Termos Técnicos do PRODIST
- Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
- Módulo 3 - Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
- Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- Módulo 5 - Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura
- Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações
- Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição
- Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica
- Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos
- Módulo 10 - Sistema de Informação Geográfica Regulatório
- Módulo 11 - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

O foco de nosso estudo é referente ao módulo 8 do PRODIST que estabelece os termos, características, parâmetros e descrições para garantir que a qualidade de energia de maneira que entregue e atenda aos requisitos para auxiliar a ANEEL na interpretação. No que se diz em relação à qualidade do serviço, esse regulamento prevê procedimentos para cálculo de indicadores de continuidade e tempos de

resposta em momentos que se exija emergência, além de estabelecer normas e responsabilidades para os colaboradores do setor.

3.1.1 Objetivos e abrangência do módulo 8 do PRODIST

O principal objetivo de estabelecer os procedimentos para garantir a QEE, adotando medidas que envolvem a qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição, abrangendo aspectos do produto, do serviço e do atendimento ao consumidor. O módulo define os aspectos da qualidade do produto, estabelecendo critérios para a conformidade da forma de onda de tensão, indicadores, valores de referência, métodos de medição e gestão de reclamações. Também define os métodos para medir os indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica, estabelecendo valores de referência a serem seguidos pelos responsáveis.

A seguir será listado a abrangência dos procedimentos definida nesse módulo aos quais englobam os mais diversos agentes que atuam no setor elétrico, incluindo assim:

- Produtores de energia: Trata-se de ser os responsáveis pela geração de eletricidade, sejam eles de fontes renováveis ou tradicionais;
- Distribuidoras de energia: São as realizam a entrega da eletricidade gerada aos consumidores, cumprindo as normas e regulamentos estabelecidos para a qualidade da energia;
- Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica: São os responsáveis pela compra ou venda de energia entre diferentes regiões ou países;
- Transmissoras de energia: São responsáveis pela operação das instalações de transmissão de eletricidade em grandes distâncias, mantendo a qualidade e a estabilidade da energia durante o transporte;
- Operador Nacional do Sistema: órgão que coordena a operação do SIN, garantindo que a energia seja distribuída de forma eficiente e segura, respeitando os parâmetros de qualidade e confiabilidade.

Em suma, esse módulo garante uma gestão eficiente e transparente da QEE, assegurando que todos os envolvidos cumpram os padrões regulatórios e forneçam um serviço seguro aos consumidores.

3.1.2 Parâmetros das VTCDs para Cálculo do FI

As fórmulas para o cálculo dos indicadores que caracterizam as VTCDs estão descritas a seguir:

$$Ve = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100[\%] \quad (3.1)$$

Em que:

- V_e = magnitude percentual do evento de VTCD;
- V_{res} = tensão residual do evento de VTCD (em Volts);
- V_{ref} = tensão de referência (em Volts).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (3.2)$$

Em que:

- Δt_e = tempo de duração do evento de VTCD (em milissegundos);
- t_f = tempo do instante final do evento de VTCD;
- t_i = tempo do instante inicial do evento de VTCD.

$$fe = n \quad (3.3)$$

Em que:

- f_e = frequência em que ocorre os eventos de VTCD;
- n = o quantitativo de eventos de VTCD registrados.

De acordo com o PRODIST as VTCD, são conceituadas como desvios significativos na amplitude da tensão eficaz com duração inferior a 180 segundos. Logo, a sua contabilização dos eventos irá considerar os parâmetros de duração e amplitude e sua classificação deve ser realizada de acordo com a sua caracterização apresentada na Tabela 4.

Na Tabela 5 temos o surgimento de nove faixas de sensibilidade relacionando a severidade de cada evento de VTCD com os níveis de sensibilidade das cargas conectadas aos sistemas de distribuição sendo divididas em A, B, C, D, E, F, G, H ou I.

Tabela 4 - Critérios de estratificação para a contabilização de eventos de VTCD.

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min)
> 1,15							
(1,10 - 1,15]							
(0,85 - 0,90]							
(0,80 - 0,85]							
(0,70 - 0,80]							
(0,60 - 0,70]							
(0,50 - 0,60]							
(0,40 - 0,50]							
(0,30 - 0,40]							
(0,20 - 0,30]							
(0,10 - 0,20]							
< 0,10							

Fonte: PRODIST, 2020

Tabela 5 - Estratificação das VTCD com relação à variação de sensibilidade das cargas.

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

Fonte: PRODIST, 2020

É fundamental ressaltar que a diferença entre o módulo 8 do PRODIST e os Procedimentos de Rede, conforme especificado no Submódulo 9.7 da ONS, vai além da categorização dos tempos de duração de afundamento e elevação de tensão apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3. Isso ocorre porque, enquanto os indicadores de VTCD são avaliados mensalmente no PRODIST, no Procedimento de Rede da ONS essa avaliação é realizada anualmente.

Além disso, toda a metodologia de cálculo do FI que só foi implementada no PRODIST a partir da oitava revisão do módulo 8, bem como os demais detalhes, será abordada com mais profundidade no Tópico 4.1- Fator de Impacto.

3.2 NRS 048-2: África do Sul

Desenvolvida pela Autoridade *National Energy Regulator of South Africa* (NERSA), a NRS 048, foi compilada por um grupo de trabalho que incluiu representantes da indústria de fornecimento de eletricidade e clientes, como o *Energy Intensive User Group* (EIUG). Esta norma estabelece os níveis de compatibilidade, limites, características de tensão e métodos de avaliação para gerenciar a qualidade da energia fornecida no ponto de fornecimento para clientes individuais. Ela está alinhada com a diretiva da NERSA sobre qualidade de energia, que define os requisitos mínimos para licenciamento, incluindo limites para certos critérios e características de tensão (NRS 048-2:2003, 2003).

O PRODIST adota abordagem de maneira bastante similar a esse padrão ao classificar os afundamentos em diferentes categorias, porém a principal diferença entre essas normas é a respeito da orientação dos afundamentos, pois a NRS 048-2 adota um referencial onde a linha de base está no topo, e os afundamentos são representados como quedas em relação a esse topo enquanto, todavia no PRODIST temos uma narrativa diferente, visto que a sua tensão nominal está na parte superior, e conforme ocorre o afundamento, os valores vão diminuindo para a parte de baixo, ou seja, partindo de um exemplo prático o que seria um afundamento de 0,2 p.u conforme o PRODIST seria equivalente a 0,8 p.u referente a norma sul africana. Outro diferencial entre essas normas diz respeito ao período de análise, pois enquanto o

PRODIST estabelece uma análise mensal, a NRS 048-2 determina um ciclo anual para a avaliação.

Dessa forma, a finalidade da NRS 048 é definir um método padronizado para avaliar o desempenho dos afundamentos de tensão e criar um registro histórico que represente esse desempenho. Com base nessa abordagem é evidente que a criação dessas categorias foi elaborada para espelhar as percepções dos consumidores, tendo em vista aspectos como as características do tipo de carga e os níveis de proteção, conforme apresentado na Tabela 6 (NRS 048-2:2003, 2003).

Tabela 6 - Contabilização e duração dos afundamentos de tensão segundo a NRS 048-2

1	2	3	4	5
Faixa de profundidade da queda de tensão ΔU (expresso como % de U_d)	Faixa de tensão residual U_r (expresso como % de U_d)	Duração t		
		$20 < t \leq 150$ ms	$150 < t \leq 600$ ms	$0,6 < t \leq 3$ s
$10 < \Delta U \leq 15$	$90 > U_r \geq 85$	Y		
$15 < \Delta U \leq 20$	$85 > U_r \geq 80$			
$20 < \Delta U \leq 30$	$80 > U_r \geq 70$			
$30 < \Delta U \leq 40$	$70 > U_r \geq 60$	X1	S	Z1
$40 < \Delta U \leq 60$	$60 > U_r \geq 40$	X2		Z2
$60 < \Delta U \leq 100$	$40 > U_r \geq 0$	T		
Observe que no caso de medições em sistemas de baixa tensão é aceitável definir o limite de queda em 0,85 pu.				
Um número relativamente grande de eventos se enquadra na categoria X1. No entanto, é reconhecido que quedas com características complexas (como salto de fase, UB e múltiplas fases) podem ter um efeito significativo na planta dos clientes, mesmo que sejam pequenas em magnitude. Os clientes podem não ter os meios para mitigar os efeitos de tais quedas em suas plantas.				

Fonte: NRS 048-2:2003, 2003. Adaptado

4 PRINCIPAIS INDICADORES DAS VTCDs

Nesse capítulo será realizada uma abordagem sobre os principais indicadores que são fundamentais para o entendimento de parâmetros técnicos, como magnitude, duração e frequência dos eventos para a classificação das VTCD e também irá abordar sobre a curva de suportabilidade que é extremamente usada para indicar capacidade de que dispositivos eletrônicos suportam certas perturbações.

4.1 Fator de Impacto

Este é o indicador de suma importância para o desenvolvimento desse trabalho, pois partindo da classificação dos eventos estabelecida nas Tabelas 4 e 5, é viável calcular o Fator de Impacto das VTCD, que serve para avaliar a severidade dos distúrbios em um ponto de medição específico, com a ressalva que suas medições só são válidas para um período de 30 dias consecutivos, ou seja, não se deve ter a avaliação para o FI em períodos menores do que se é estabelecido. O valor desse fator é determinado utilizando a Eq. (4.1).

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (fe_i \times fpond_i)}{FI_{BASE}} \quad (4.1)$$

Em que:

- fe_i = Refere-se à frequência em que ocorre eventos de VTCD, determinada por medições apropriadas ao longo de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , onde i pode ser A, B, C, D, E, F, G, H ou I.
- $fpond_i$ = Trata-se de ser o Fator de Ponderação atribuído a cada região de sensibilidade i , definido com base na importância do evento, considerando sua amplitude e duração.
- FI_{BASE} = Fator de Impacto base, calculado pela soma dos produtos entre os fatores de ponderação e as frequências máximas de ocorrência de eventos de VTCD em um período de 30 dias, para cada região de sensibilidade.

A Tabela 7 aborda sobre os valores para o Fator Ponderação ($fpond$) para cada área sensível, incluindo o Fator de Impacto de Base (FI_{BASE}). Nessa mesma tabela,

verificamos os valores de que devem correspondentes a cada área conforme sua característica, bem como as informações de frequência utilizadas no cálculo FIBASE.

Tabela 7 – Fator de ponderação correlacionado a Região de Sensibilidade e Fator de Impacto base

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (fpond)	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: PRODIST, 2020

4.2 Análise da Severidade de uma VTCD

Desenvolvido pela Divisão de Gestão de Qualidade da Operação da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), este indicador conceitua que a severidade de uma VTCD é determinada em função da magnitude da variação de tensão e pela duração da ocorrência do evento, todavia se difere do PRODIST por apenas em avaliar os afundamentos de tensão.

Portanto, essa análise enfatiza que é imprescindível examinar o comportamento dos valores nas três fases de um sistema trifásico, além de ter estabelecido uma escala de severidade para avaliar uma VTCD, variando de 0 a 6, como abordado na Figura 13. Para essa avaliação, são levados em conta tanto a magnitude quanto a duração do afundamento de tensão, assim como a sensibilidade das instalações ligadas à barra correspondente. Nisso, foi implementada uma técnica de agregação temporal com uma faixa de um minuto para compilar os resultados dos eventos. Nos casos em que a redução da tensão foi inferior a 10%, foram utilizadas as siglas Interrupção Momentânea de Tensão (IMT) e Interrupção Temporária de Tensão (ITT) (LOPES, 2023).

Figura 13 - Classificação dos graus de severidade de VTCD adotada pela CHESF

0,9			Severidade 0	Severidade 0	Severidade 1	Severidade 2
0,8		Severidade 0		Severidade 1	Severidade 2	
0,7			Severidade 1		Severidade 2	Severidade 3
0,6		Severidade 1		Severidade 2		
0,5		Severidade 2		Severidade 3	Severidade 4	
0,4			Severidade 3			
0,3		Severidade 3		Severidade 4		
0,2			Severidade 4			
0,1		Severidade 5	IMT			Severidade 6 ITT
0	1 ciclo	300ms	500ms	3s	1min	

Fonte: LOPES, 2023.

4.3 Curva de suportabilidade

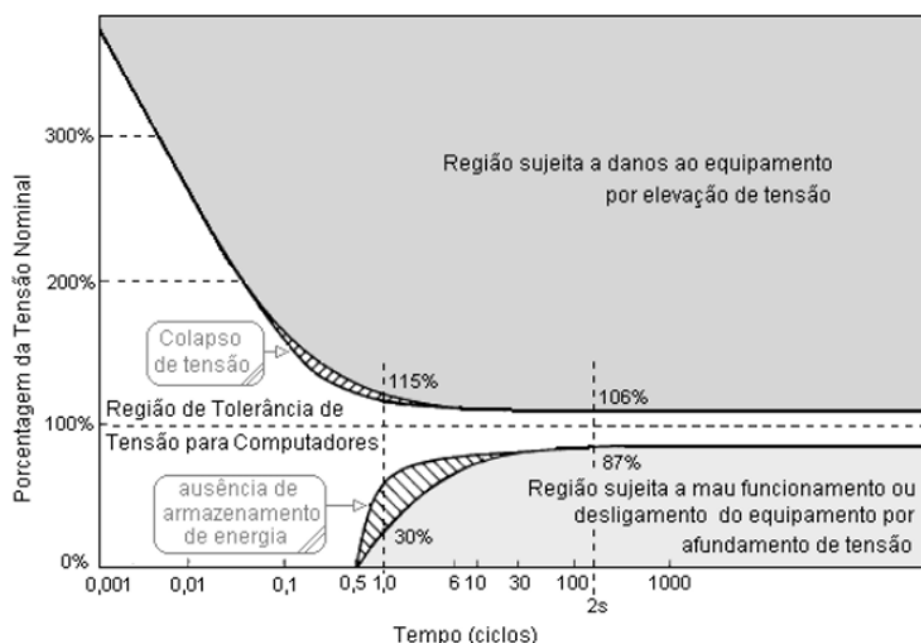
Essa curva é usada para indicar a capacidade de que dispositivos eletrônicos podem suportar perturbações elétricas, desde que sua operação não venha a ser comprometida, isto é, as curvas ajudam a identificar as condições em que os equipamentos podem operar sem sofrer danos ou falhas. A importância para o surgimento dessa curva se baseia na tese de garantir que os equipamentos sejam projetados para resistir a diversas condições de operação. Portanto, para análise das curvas de suportabilidade, é possível determinar quais faixas de intensidade e duração que podem ser toleradas sem que possa existir a degradação no desempenho do dispositivo ou mesmo a sua falha de modo geral.

No tocante a sistemas que requerem um grau maior de complexidade, a compreensão e a aplicação correta das curvas de suportabilidade são fundamentais para o planejamento de medidas que gerem uma melhor qualidade de energia, evitando danos aos equipamentos e garantindo a continuidade operacional. Nos tópicos a seguir serão exploradas algumas curvas que são comumente utilizadas pelas distribuidoras de energia e os fabricantes, nos quais visam aprimorar de sistemas e equipamentos.

4.3.1 Curva CBEMA

A Criação da curva CBEMA foi através da *Computer Business Equipment Manufacturers Association*. Essa curva criada foi desenvolvida com base em dados experimentais sobre a tolerância de computadores de grandes portes de processamento centralizado a eventos de VTCD. Na Figura 14 a seguir será descrito os limites de variação de tensão que os equipamentos devem suportar sem comprometer o seu funcionamento.

Figura 14 - Curva de suportabilidade CBEMA



Fonte: DECKMANN; POMILIO, 2010

A curva é dividida em três regiões:

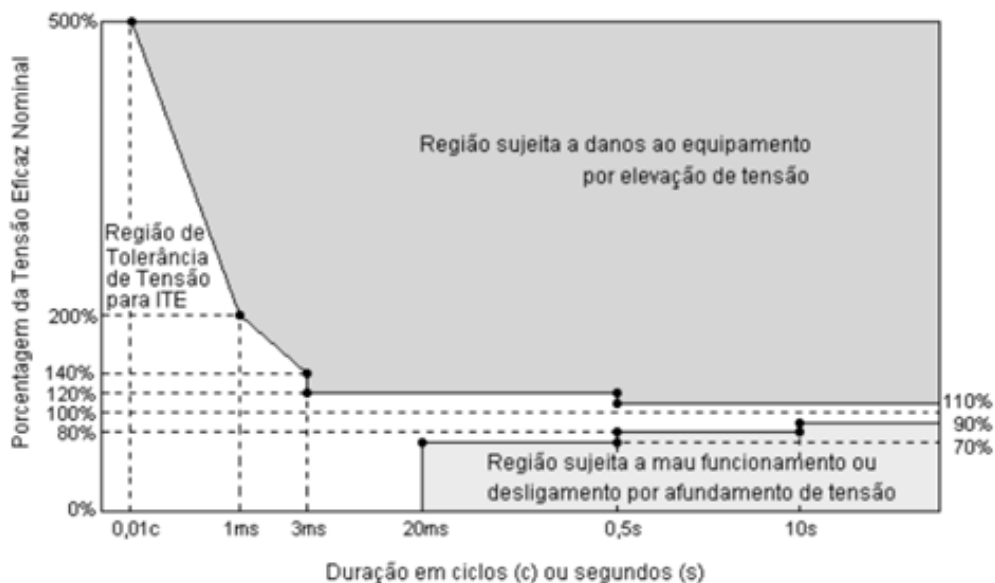
- Região de Tolerância: Representa a faixa normal de operação, onde os equipamentos funcionam sem problemas.
- Região sujeita a danos: Refere-se a uma área de operação inadequada, onde podem ocorrer danos ao hardware devido a sobretensões transitórias ou picos de tensão.
- Região sujeita a mal funcionamento: Refere-se a uma faixa também inadequada, onde os equipamentos podem sofrer disfunções ou parar de operar devido a afundamentos de tensão ou interrupções transitórias.

A curva estabelece que os equipamentos devem suportar interrupções de tensão por até meio ciclo e podendo tolerar quedas de tensão de até 13% e aumentos de até 6% por períodos contínuos de 2 segundos. Elevações de tensão acima desses limites podem causar verdadeiros prejuízos aos componentes, enquanto quedas abaixo do nível mínimo podem resultar no desligamento dos equipamentos por falta de energia (PAULILLO et al., s.d.).

4.3.2 Curva ITIC

A curva de tolerância ITIC (*Information Technology Industry Council*) representa uma modificação da curva CBEMA, sendo só aprovada no ano 2000 para avaliar o desempenho de equipamentos eletrônicos e computadores. Sabendo-se que é uma curva vista como a modernização da curva CBEMA e que é aplicada principalmente a equipamentos conectados a redes monofásicas. Enfatiza-se que o limite de tolerância para sobretensão e subtensão em regime permanente compreende o valor de 10% da tensão nominal conforme podemos observar na Figura 15 adiante (PAULILLO et al., s.d.).

Figura 15 - Curva de suportabilidade ITIC



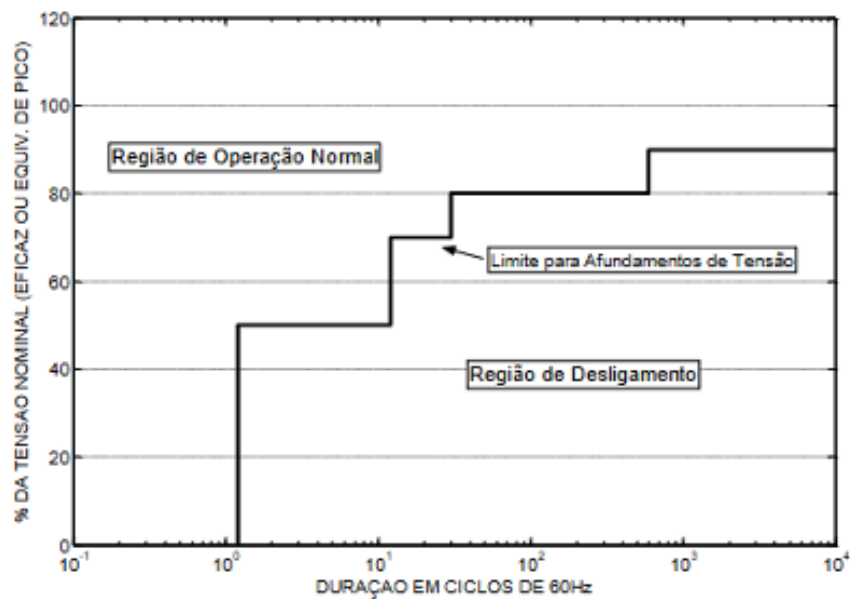
Fonte: DECKMANN; POMILIO, 2010

4.3.3 Curva SEMI 47

Criada no ano de 1998 pela *Semiconductor Equipment Materials International* (SEMI), a curva SEMI 47 tem o propósito de especificar a tolerância de equipamentos semicondutores a afundamentos de tensão. Seu desenvolvimento se deu exclusivamente para avaliar como esses dispositivos lidam com esse fenômeno. Um fato interessante quando comparada com as demais curvas já citadas é que se observa que na medida em que o tempo de afundamento da tensão aumenta, temos o resultante de que menor será a amplitude para não provocar desligamentos de equipamentos (DECKMANN; POMILIO, 2010).

Essa curva possui um grau elevado de percepção de sensibilidade referente aos afundamentos de tensão e isso resulta em uma serventia bastante útil para processos no setor industrial como motores de indução, conforme Figura 16.

Figura 16 - Curva SEMI 47

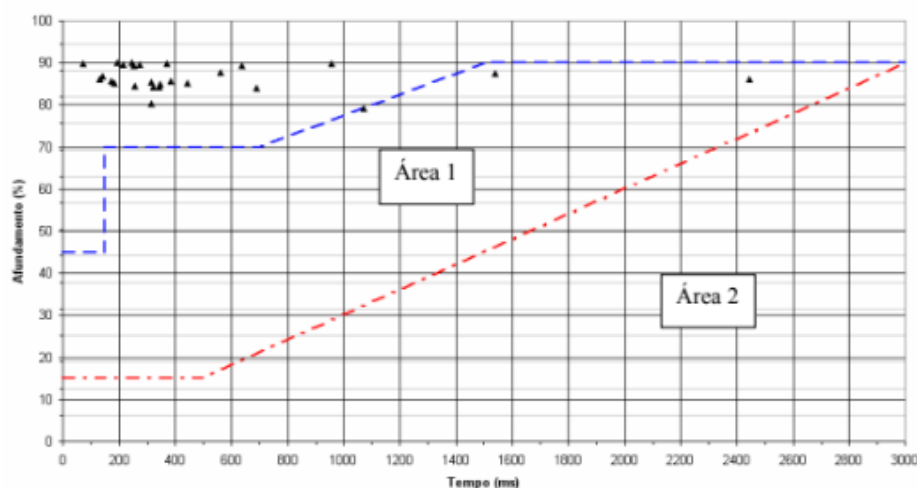


Fonte: DECKMANN; POMILIO, 2010

4.3.4 Curva VDN

A construção dessa curva foi através da Associação dos Operadores de Rede na Alemanha, *Verband der Netzbetreiber* (VDN), que estabeleceu os limites em relação entre a amplitude e a duração dos afundamentos de tensão, sendo classificados em diferentes regiões de aceitabilidade para equipamentos sensíveis, como inversores de centrais solares fotovoltaicas. Por sua vez, temos a divisão de três regiões conforme a Figura 17:

Figura 17- Curva VDN



Fonte: LIRA et al. ,2012b

- Área 1: Estabelece a representação de uma zona de operação limitada.
- Área 2: Região que represente uma localização inaceitável, pois a partir desses eventos podemos ter o desligamento das unidades geradoras.
- Área de aceitabilidade: corresponde a região acima da curva azul, em que é assegurado que não ocorrerão desligamentos dos equipamentos.

Destaca-se que os eventos registrados em média tensão estão próximos ao limite superior da área de aceitabilidade definida pela Curva VDN, o que pode resultar em efeitos mais significativos caso sejam observados na baixa tensão (LIRA et al. ,2012b).

5 ESTUDO DO CASO

Neste capítulo, examinaremos os resultados de um levantamento parcial das principais cargas, levando em consideração o conceito de Redes Elétricas Inteligentes sob a ótica da QEE. Essa análise só foi possível devido ao fornecimento de dados pelas concessionárias responsáveis pela distribuição, transmissão e geração de energia elétrica para a contribuição de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D). Portanto, neste contexto, o presente estudo utilizou dados coletados durante o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado entre Distribuidora Celpe e a UFPE com objetivo de realizar uma investigação sobre a QEE da Ilha de Fernando de Noronha, por meio de medições realizadas antes e depois da implementação da Usina Solares USFN I de 400kWp e USFN II de 550 kW (LIRA et al. ,2012a) (LIRA et al. ,2012b).

Dessa forma, foi realizada uma avaliação das cargas dos consumidores, com base em planilhas geradas por meio de um monitoramento que continha, entre outras informações, os dados de consumo dos usuários durante o período de 2012 a 2015. É válido salientar que as medições nesses períodos não seguiram todo ciclo anual, mas alguns meses selecionados conforme a Tabela 9 que será apresentada mais adiante.

5.1 Análise das Características dos Consumidores da Ilha de Fernando de Noronha

Quando discutimos a Ilha de Fernando de Noronha, é importante entender que se trata de um arquipélago brasileiro situado no Estado de Pernambuco composto por 21 ilhas e ilhotas. No ano de 2012, foi realizado um levantamento que identificou um total de 838 unidades consumidoras, das quais cinco são atendidas em alta tensão. A infraestrutura de distribuição de energia é composta por três alimentadores. Com cerca de 2,6 mil moradores, a ilha obtém sua eletricidade a partir de quatro unidades geradoras e uma unidade reserva, todas operando com diesel, conforme apresentado na Figura 18 (LIRA et al. ,2012a).

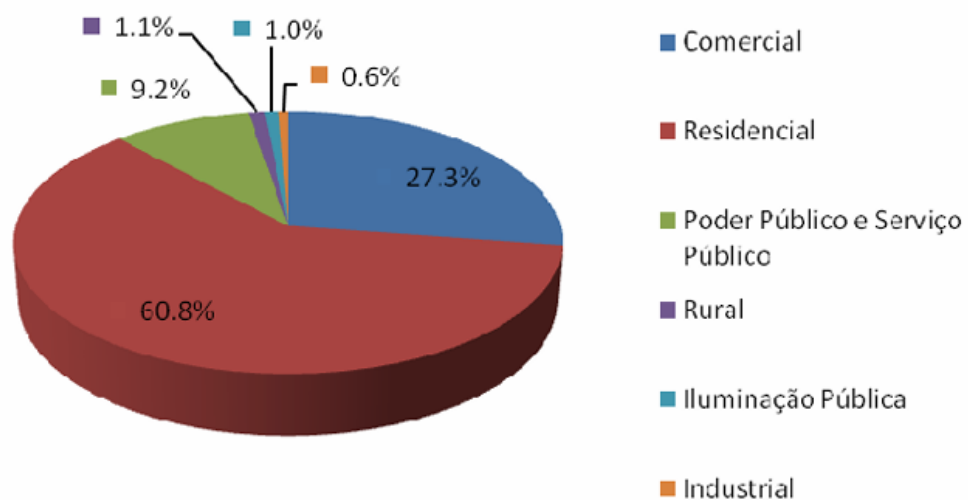
Figura 18 - Distribuição geográfica dos alimentadores da IFN



Fonte: LIRA et al. ,2012a

Em termos gerais, a IFN é predominantemente composta por dois principais grupos de consumidores: residenciais e comerciais, conforme ilustrado na Figura 19. Adicionalmente, é relevante destacar as particularidades da rede de distribuição no ano em que os dados do P&D foram coletados, conforme detalhado na Tabela 8:

Figura 19 - Porcentagem de consumidores por categoria de classe



Fonte: LIRA et al. ,2012a

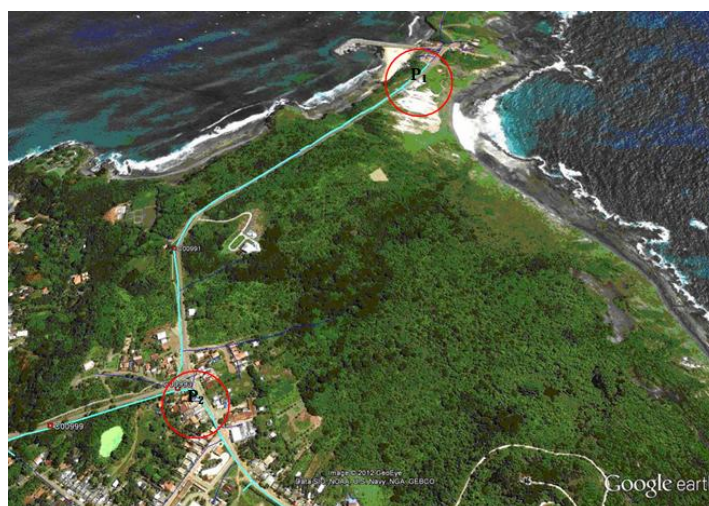
Tabela 8 - Rede elétrica de distribuição na IFN

Descrição		Quantidade
Extensão de Rede	Alimentador FEN 21F1	5,29 km (rede protegida)
	Alimentador FEN 21F2	4,95 km (rede convencional)
	Alimentador FEN 21F3	4,08 km (rede protegida)
	Rede BT	20,45 km (com 30% de rede social)
Qtd. De Transformadores	Celpe	30
	Particular	9
Unidades consumidoras	BT	833
	AT	5

Fonte: LIRA et al. ,2012a

Deve-se destacar que, no princípio, as medições para o RDP Itinerante foram divididas em 7 pontos (P0, P1, P2, P3, P4, P5 e P6). O ponto P0 teve objetivo de analisar qualidade de energia referente as cargas próximas ao Laboratório Farmacêutico do Estado de Pernambuco (LAFEPE). O ponto de monitoramento P1, que tem finalidade de avaliar a qualidade do fornecimento de energia para as cargas do Porto da IFN. A instalação do sistema de medição nesse local é tida como prioritária, considerando que P1 é uma área estratégica para a implementação de microgeração distribuída. Foi também necessário avaliar os pontos fora da linha principal do alimentador. Nesse sentido, o ponto P2, localizado conforme mostrado na Figura 20, foi escolhido para esse monitoramento (LIRA et al. ,2012b).

Figura 20 – Localização de Instalação do RDP itinerante no Ponto P1 e P2



Fonte: LIRA et al. ,2012b

Além disso, o ponto P3, abordado na Figura 21, foi utilizado para completar a análise do comportamento do alimentador, isto é, medições realizadas nos pontos P2 e P3, que correspondem à maior parte da carga do alimentador, essas que são essenciais para uma avaliação aprofundada da qualidade do fornecimento de energia e poderão ajudar a identificar possíveis danos que têm sido relatadas na região (LIRA et al. ,2012b).

Figura 21 - Localização de Instalação do RDP itinerante no Ponto P3



Fonte: LIRA et al. ,2012b

Já para o alimentador que atende áreas importantes como o Sítio Histórico da IFN, órgãos públicos e comerciais foi adotado o ponto P4, conforme Figura 22. Esse alimentador cobre uma região de mata preservada, e a manutenção do sistema, especialmente devido aos desafios de poda, é fundamental para garantir a qualidade do fornecimento de energia (LIRA et al. ,2012b).

Figura 22 - Instalação do RDP itinerante no Ponto P4

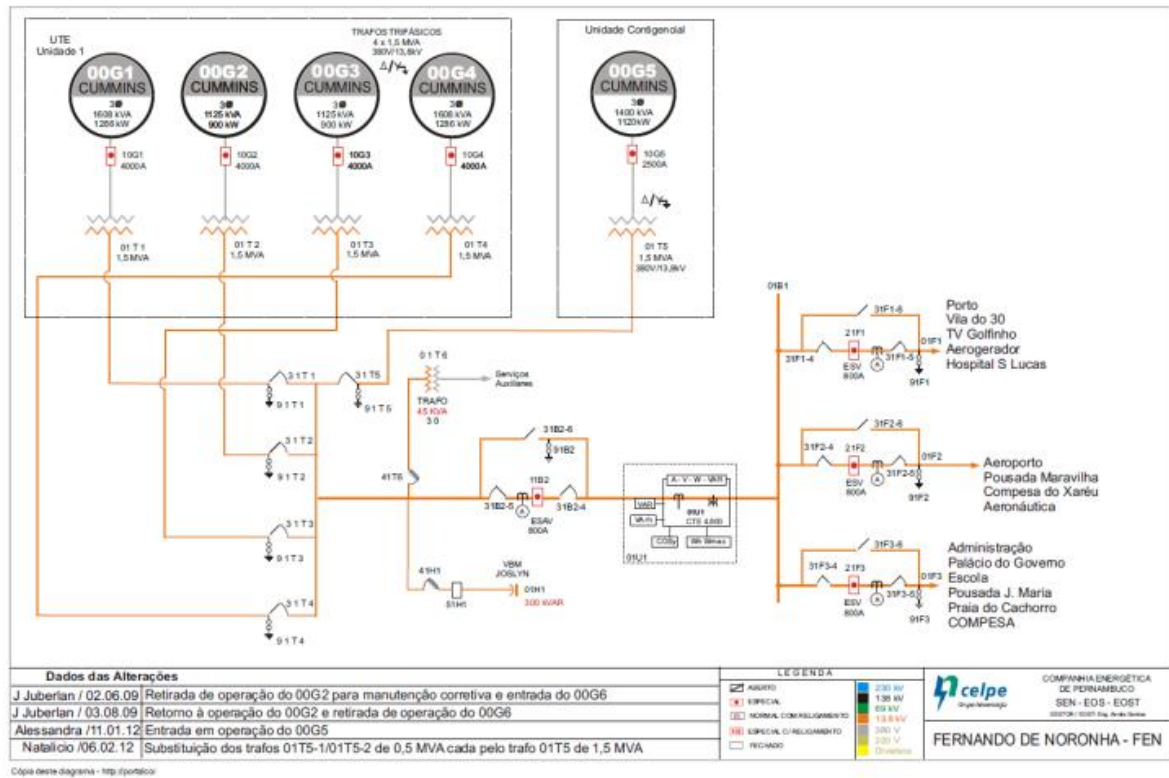


Fonte: LIRA et al. ,2012b

Por fim, os pontos correspondentes a P5 e P6 foram instalados um próximo ao LAFEPE e outro ao lado da Praça Flamboyant, respectivamente. Sendo o P5 com a finalidade de avaliar a qualidade do fornecimento de energia para início da operação da Usina USFN II de 550kWp e o P6 em fazer a análise após a introdução de Medidores Inteligentes que foram instalados na rede (LIRA et al. ,2012b).

As medições também foram realizadas na Usina Tubarão, que atende às configurações conforme ilustrado na Figura 23:

Figura 23 - Representação unifilar da Usina Tubarão no ano de 2012



Fonte: LIRA et al. ,2012a

5.2 Parametrização e pontos de instalação do Registrador digital de perturbação

O Registrador Digital de Perturbação (RDP), trata-se um dispositivo eletrônico portátil que foi instalado em diversos períodos. No início do estudo o sistema de monitoramento foi instalado no Alimentador FEN 01F1, nas proximidades do LAFEPE e depois foi instalado em outros pontos com o foco de avaliar cargas essenciais.

O RDP foi alimentado através dos transformadores de medição com o intuito de assegurar o registro das medições de perturbação. A principal finalidade dessas medições foi conduzir um estudo sobre a QEE, levando em conta o impacto das cargas mais elevadas da IFN, como a estação de bombeamento e tratamento da COMPESA que é responsável por cerca de 19% do consumo médio mensal total da IFN (LIRA et al. ,2012a) (LIRA et al. ,2012b).

O RDP foi parametrizado para medir variáveis elétricas de acordo com as informações abaixo:

- Magnitudes e fases das correntes harmônicas individuais a cada 10 minutos, para as ordens 2 a 14, 46 a 50;
- *Total Harmonic Distortion* (THD), tanto para os componentes ímpares como para pares, além do THD da corrente, todos medidos a cada 10 minutos;
- Magnitudes e fases das tensões harmônicas individuais, com a mesma periodicidade, para as ordens 2 a 14, 46 a 50;
- THD para as tensões, tanto ímpares quanto pares, e THD total da tensão;
- Medições de tensão e corrente a cada 10 minutos;
- Potência ativa, reativa e aparente, juntamente com o fator de potência, também a cada 10 minutos;
- Frequência do sistema a cada 10 minutos;
- Desequilíbrio de tensão e componentes de sequência a cada 10 minutos;
- *Waveform* de tensão;
- Variação de tensão de Curta Duração (VTCD);
- Transitórios;
- Medições de *Flicker* (Plt e Pst) a cada 10 minutos.

Dado os parâmetros acima, destaca-se que foi trabalhado o estudo apenas para a análise das VTCDs e que cronograma da coleta dos dados do RDP Itinerante seguiu o estabelecido na Tabela 9. No entanto, algumas interrupções ocorreram devido à retirada do equipamento e manutenções, o que resultou na não obtenção de todos os dados programados (LIRA et al. ,2012b)

Tabela 9 – Cronograma de medições do RDP Itinerante, abrangendo a coleta de todos os relatórios

RDP ITINERANTE				
Relatórios	Período de Coleta	Ponto de Monitoramento	Nº do Poste	Ponto de Referência
RT 7.3	07/11/2012 a 02/12/2012	Ponto Inicial Alimentador FEN01F1 (P0)	B098059	Próximo ao LAFEPE, antes das cargas dos setores de Floresta Nova, Hospital, Don Juquinha, Vila do Trinta e Porto.
RT 7.4	01/12/2012 a 31/12/2012	Ponto Inicial Alimentador FEN01F1 (P0)	B098059	Próximo ao LAFEPE, antes das cargas dos setores de Floresta Nova, Hospital, Don Juquinha, Vila do Trinta e Porto.
RT 7.5	01/03/2013 a 09/04/2013	Ponto 1 Alimentador FEN01F1 (P1)	B098185	Próximo ao Porto.
RT 7.6	11/04/2013 a 30/04/2013	Ponto 2 Alimentador FEN01F1 (P2)	B098651	Monitoramento na Vila do Trinta.
RT 7.7	01/05/2013 a 11/06/2013	Ponto 2 Alimentador FEN01F1 (P2)	B098651	Monitoramento da Vila do Trinta.
RT 7.8	14/08/2013 a 17/09/2013	Ponto 3 Alimentador FEN01F3 (P3)	B098472	Monitoramento na Praça Flamboyant.
RT 7.9	18/09/2013 a 19/11/2013	Ponto 4 Alimentador FEN01F2 (P4)	B098299	Monitoramento no Aeroporto.
RT 7.10 ANTES DA USFN I	07/01/2014 a 28/01/2014	Ponto 4 Alimentador FEN01F2 (P4)	B098299	Monitoramento no Aeroporto.
Início da Operação da Usina USFN I de 400kWp, instalada no Alimentador FEN01F2, desde dia 04/06/2014				
RT 7.10 DEPOIS da USFN I	26/07/2014 a 26/08/2014	Ponto 4 Alimentador FEN01F2 (P4)	B098299	Monitoramento no Aeroporto.
RT 7.11	03/01/2015 a 03/03/2015	Ponto 4 Alimentador FEN01F2 (P4)	B098299	Monitoramento no Aeroporto.
Início da Operação da Usina USFN II de 550kWp, instalada no Alimentador FEN01F3, desde dia 10/07/2015				
RT 7.12	20/11/2015 a 21/12/2015	Ponto 5 Alimentador FEN01F1 (P5)	B098159	Próximo ao LAFEPE.
Em março de 2016 todos os Medidores Inteligentes haviam sido instalados na rede elétrica.				
RT 7.13	01/08/2016 a 31/08/2016	Ponto 6 Alimentador FEN01F3 (P6)	B098487	Monitoramento ao lado da Praça Flamboyant.

Fonte: LIRA et al. ,2012b

5.3 Avaliação dos Dados de VTCD

Para a realização deste estudo, foram utilizadas as medições obtidas pelo RDP Itinerante e RDP instalado na Usina Tubarão. Sendo o primeiro instalado nos diversos pontos essenciais do sistema de distribuição para a realização da análise dos dados registrados.

É importante ressaltar que os registros mensais não são contínuos devido a interrupções causadas pela remoção do RDP Itinerante para conexão ao servidor, a fim de realizar a transferência dos dados. De semelhante modo, no que se refere a ausência de coletas de registros contínuos, o RDP da Usina Tubarão passou por algumas manutenções durante o período de coleta.

Para a análise deste trabalho, foram selecionados os dados relativos aos eventos de VTCD ocorridos durante o final de 2012 até o ano de 2015 para verificar se obtivemos mudanças significativas antes e após a operação das Usinas USFN I de 400kWp e USFN II de 550kWp com o decorrer do tempo. Os dados estavam organizados em arquivos do tipo *Excel*, conforme Tabela 10, contendo as seguintes informações:

- Registro da data e hora do evento;
- Tensão eficaz percentual das fases R, S e T
- Tempo de duração em que ocorreu o evento, medida em segundos

Tabela 10 - Registro do RDP Itinerante relativo ao mês de dezembro de 2012

Local Time	Duração	V1Max	V1Min	V2Max	V2Min	V3Max	V3Min
2012-dez-01 04:21:48,561	6,796999931	91,92799377	56,21029663	95,78525543	59,11339569	94,05404663	57,59043503
2012-dez-01 04:21:49,351	0,444999993	91,80799866	85,19790649	94,90483856	88,75905609	93,89201355	87,37680054
2012-dez-04 12:50:10,986	78917	97,80724335	0	99,06344604	0	74,53681946	0
2012-dez-06 09:34:18,975	0,141000003	91,932724	83,18031311	93,39527893	89,36443329	94,11322784	88,72857666
2012-dez-08 06:39:45,259	0,016000001	95,99662781	95,90352631	88,79147339	86,51094055	95,02776337	93,47409821
2012-dez-08 18:52:12,887	0,101999998	94,84038544	91,28860474	89,9677124	81,31128693	93,73442841	89,50842285
2012-dez-08 21:35:55,172	0,034000002	94,79225922	93,92948914	87,10303497	84,31952667	93,74460602	92,09123993
2012-dez-21 08:47:01,644	0,134000003	93,43738556	89,89748383	92,79237366	81,14840698	94,74057007	91,0087738
2012-dez-21 10:36:39,512	0,115999997	96,06920624	87,47715759	91,60647583	84,35055542	97,7551651	92,0373764
2012-dez-21 11:39:07,662	0,224000007	92,70077515	87,46662903	91,67350769	86,80111694	95,92166901	92,70036316
2012-dez-21 12:06:45,407	0,381999999	92,24591064	87,44551086	91,93437195	86,92800903	98,10682678	93,12021637
2012-dez-21 18:17:02,060	0,182999998	91,78406525	88,82350159	95,41506195	93,30038452	96,04751587	94,14781189
2012-dez-28 08:14:12,615	0,142000005	91,71006775	83,93016052	94,29941559	89,16186523	93,01802826	83,71443176
2012-dez-29 08:16:26,523	8,071000099	91,99181366	67,76700592	95,4308548	71,67286682	95,18396759	71,19415283

Fonte: Autoria própria (2025).

5.4 Resultados

Após a junção de todos os arquivos mensais, inicialmente foi estabelecido o tratamento das informações foi a caracterização dos eventos de VTCDs. Conforme o Módulo 8 do PRODIST, foram preenchidas as Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 com o objetivo de quantificar a frequência das VTCDs referentes ao RDP Itinerante, de acordo com o ano e mês de registro, levando em consideração suas respectivas faixas de amplitude e duração. De maneira semelhante, para o RDP instalado na Usina Tubarão foram elaborada as Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20.

A seguir, apresenta-se a análise dos dados referentes ao mês de novembro de 2012, na qual foram elaboradas colunas específicas para a identificação da amplitude e duração de eventos de afundamento de tensão (Tabela 11) e de elevação de tensão (Tabela 12). Ressalta-se que, conforme as Tabela 11 e Tabela 12, foram desconsiderados da análise os registros classificados como espúrios, inconsistentes ou com duração superior a 3 minutos, em conformidade com os critérios técnicos adotados.

Tabela 11 - – Estratificação de afundamentos do RDP da Usina Tubarão relativo ao mês de novembro de 2012

Amplitude	Afundamentos						
	0,01667 - 0,1	(100 ms - 300 ms)	(300 ms - 600 ms)	(600 ms - 1 seg)	(1 seg - 3 seg)	3 seg - 1 min	(1 min - 3min)
0,7650354	0	0	0	0	0	1	0
0,655190506	0	0	0	0	0	1	0
0,896013107	0	0	0	0	0	1	0
0,853866272	0	1	0	0	0	0	0
0,899035339	1	0	0	0	0	0	0
0,846820145	0	1	0	0	0	0	0
0,855473022	0	1	0	0	0	0	0
0,844541626	0	0	1	0	0	0	0
0,805090179	0	0	1	0	0	0	0
0,857710724	0	1	0	0	0	0	0
0,893867645	0	0	1	0	0	0	0
0,883839874	0	0	0	0	1	0	0
0,792591553	0	0	0	0	1	0	0
0,863910065	0	0	1	0	0	0	0
0,880713654	0	0	1	0	0	0	0
0,848228683	0	0	0	0	0	1	0
0,851018219	0	0	1	0	0	0	0
0,844354782	0	0	1	0	0	0	0
0,898137131	0	1	0	0	0	0	0
0,866176605	0	0	0	0	1	0	0
0,750982437	0	0	0	0	0	1	0
0,896602936	0	1	0	0	0	0	0
0,870750809	0	1	0	0	0	0	0
0,844544296	0	0	0	1	0	0	0
0,861139069	0	1	0	0	0	0	0
0,566137199	0	0	0	0	0	1	0
0,791608963	0	0	0	1	0	0	0
0,853304214	0	0	1	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 14, observa-se que, em 2013, o RDP itinerante registrou ocorrências de 61 (sessenta e um) afundamentos de tensão, apenas 01 (um) registro de elevação e 07 (sete) registros de interrupções.

Tabela 14 - Análise estratificada dos dados do RDP Itinerante de 2013 para contabilização dos eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min]
> 1,15	1	0	0	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	0	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	7	12	4	1	4	2	0
(0,80 - 0,85]	0	3	6	1	0	0	0
(0,70 - 0,80]	2	1	2	3	0	1	0
(0,60 - 0,70]	2	0	0	1	1	0	0
(0,50 - 0,60]	1	1	0	0	0	3	0
(0,40 - 0,50]	0	0	0	0	0	2	1
(0,30 - 0,40]	0	0	0	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	0	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	1	1	2	1	0	2	0

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 15, observa-se que, em 2014, o RDP itinerante registrou 09 (nove) ocorrências de afundamentos de tensão, apenas 03 (três) registros de elevações e nenhum registro de interrupções.

Tabela 15 - Análise estratificada dos dados do RDP Itinerante de 2014 para contabilização dos eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min]
> 1,15	0	0	0	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	3	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	0	1	0	0	0	0	0
(0,80 - 0,85]	0	1	0	0	0	0	0
(0,70 - 0,80]	0	0	0	0	0	0	0
(0,60 - 0,70]	1	0	1	0	0	0	0
(0,50 - 0,60]	0	0	0	0	0	0	0
(0,40 - 0,50]	0	0	1	0	0	0	0
(0,30 - 0,40]	0	2	2	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	0	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 16, observa-se que, em 2015, o RDP itinerante registrou ocorrências de 16 (dezesseis) afundamentos de tensão, apenas 01 (um) registro de elevação e nenhum registro de interrupções.

Tabela 16 - Análise estratificada dos dados do RDP Itinerante de 2015 para contabilização dos eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min)
> 1,15	0	0	1	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	0	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	2	5	1	0	0	1	0
(0,80 - 0,85]	0	1	0	0	0	0	0
(0,70 - 0,80]	0	0	0	1	0	2	1
(0,60 - 0,70]	0	0	0	0	0	0	0
(0,50 - 0,60]	0	0	0	1	0	1	0
(0,40 - 0,50]	0	0	0	0	0	0	0
(0,30 - 0,40]	0	0	0	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	0	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme a Tabela 17, em 2012, o RDP da Usina Tubarão registrou 42 (quarenta e dois) afundamentos de tensão, sem ocorrências de elevações e interrupções. O comportamento observado é similar ao do RDP itinerante, refletindo o aumento da demanda, período de maior fluxo de consumidores na IFN.

Tabela 17 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2012 para contabilização dos eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min)
> 1,15	0	0	0	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	0	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	2	9	7	0	2	1	0
(0,80 - 0,85]	1	6	3	1	0	1	0
(0,70 - 0,80]	0	0	0	2	1	2	0
(0,60 - 0,70]	0	0	0	0	0	2	0
(0,50 - 0,60]	0	0	0	0	0	2	0
(0,40 - 0,50]	0	0	0	0	0	0	0
(0,30 - 0,40]	0	0	0	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	0	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 18, observa-se que, em 2013, o RDP da Usina Tubarão registrou 108 (cento e oito) ocorrências de afundamentos de tensão, nenhum registro de elevação e apenas 05 (cinco) registros de interrupções.

Tabela 18 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2013 para contabilização dos eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min)
> 1,15	0	0	0	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	0	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	11	22	12	0	6	6	0
(0,80 - 0,85]	0	4	5	2	0	3	0
(0,70 - 0,80]	3	7	6	4	2	1	0
(0,60 - 0,70]	0	0	0	3	1	0	0
(0,50 - 0,60]	3	3	0	0	0	2	0
(0,40 - 0,50]	0	0	0	0	0	0	0
(0,30 - 0,40]	0	0	0	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	2	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0	3	2

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 19, observa-se que, em 2014, o RDP da Usina Tubarão registrou 09 (nove) ocorrências de afundamentos de tensão, apenas 02 (dois) registros de elevação e nenhum registro de interrupções.

Tabela 19 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2014 para contabilização dos eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min)
> 1,15	0	0	0	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	2	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	0	1	0	0	0	0	0
(0,80 - 0,85]	0	1	0	0	0	0	0
(0,70 - 0,80]	0	0	0	0	0	0	0
(0,60 - 0,70]	1	0	1	0	0	0	0
(0,50 - 0,60]	0	0	0	0	0	0	0
(0,40 - 0,50]	0	0	2	0	0	0	0
(0,30 - 0,40]	0	2	1	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	0	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 20, observa-se que, em 2015, o RDP da Usina Tubarão registrou 36 (trinta e seis) ocorrências de afundamentos de tensão e nenhum registro de elevações e interrupções de tensão.

Tabela 20 - Análise estratificada dos dados do RDP da Usina Tubarão de 2015 para contabilização dos eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	3 seg - 1 min]	(1 min - 3min)
> 1,15	0	0	0	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	0	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	7	9	2	2	0	0	0
(0,80 - 0,85]	1	2	2	1	1	0	0
(0,70 - 0,80]	2	0	2	1	1	0	0
(0,60 - 0,70]	0	0	0	0	0	0	0
(0,50 - 0,60]	0	1	0	0	0	0	0
(0,40 - 0,50]	0	0	1	0	0	0	0
(0,30 - 0,40]	0	1	0	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	0	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2025).

Considerando que cada evento registrado possui três medições de tensão correspondente a tensão das fases R, S e T. O PRODIST define o parâmetro de amplitude do evento de VTCD escolhendo a menor leitura para afundamentos e a maior para elevações de tensão, ou seja, foi estabelecido o critério dos parâmetros críticos. A contabilização do número de ocorrências do par (amplitude, duração) dentro das regiões de sensibilidade (A, B, C, D, E, F, G, H, I) definidas para o cálculo do índice de impacto foi realizada através de um filtro de dados do *Excel*.

Após a aplicação dos filtros no período de 2012 a 2015, resultaram 138 registros de eventos VTCD para o RDP Itinerante e 202 para o RDP da Usina Tubarão. As Tabela 21 e Tabela 22 mostram a distribuição mensal dos eventos, o número de eventos de VTCDs em cada uma das regiões de sensibilidade, o período de início das operações das usinas USFN I e USFN II e em especial o cálculo do FI, conforme a Eq. (4.1).

Tabela 21 – Registro de VTCD por região de sensibilidade e Fator de Impacto com base no RDP Itinerante.

MESES/ANO	FATOR DE IMPACTO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	TOTAL DE EVENTOS/MÊS
NOV/12	0,3333333333	24	0	0	0	0	1	5	0	0	30
DEZ/12	0,507042254	11	0	0	0	0	3	0	0	0	14
TOTAL EM 2012		35	0	0	0	0	4	5	0	0	44
JAN/13	0,018779343	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
FEV/13	0,03286385	5	0	0	0	0	0	1	0	0	6
MAR/13	0,187793427	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
ABR/13	0,568075117	8	1	0	0	0	3	1	1	0	14
MAI/13	0,305164319	6	0	0	1	0	1	2	0	0	10
AGO/13	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	9
OUT/13	1,042253521	7	0	1	0	4	3	1	0	0	16
NOV/13	0,408450704	3	0	0	1	0	2	0	0	0	6
TOTAL EM 2013		39	4	1	4	4	11	5	1	0	69
JAN/14	0,018779343	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Início da Operação da USFN I de 400kWp											
AGO/14	0,638497653	1	0	0	2	4	0	0	3	0	10
TOTAL EM 2014		2	1	0	2	4	0	0	3	0	12
Início da Operação da USFN II de 550kWp											
NOV/15	0,370892019	7	0	0	0	0	2	1	0	0	10
DEZ/15	0,107981221	3	0	0	0	0	0	3	1	0	7
TOTAL EM 2015		10	0	0	0	0	2	4	1	0	17

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 22 - Registro de VTCD por região de sensibilidade e Fator de Impacto com base no RDP da Usina Tubarão.

MESES/ANO	FATOR DE IMPACTO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	TOTAL DE EVENTOS/MÊS
NOV/12	0,3333333333	19	0	0	0	0	1	5	0	0	25
DEZ/12	0,572769953	12	0	0	0	0	3	2	0	0	17
TOTAL EM 2012		31	0	0	0	0	4	7	0	0	42
JAN/13	0,122065728	3	1	0	1	0	0	1	0	0	6
FEV/13	0,150234742	3	0	0	0	1	0	1	0	0	5
MAR/13	0,276995305	2	2	0	1	0	1	0	0	0	6
MAI/13	0,305164319	5	0	0	1	0	1	2	0	0	9
JUN/13	1,126760563	20	0	2	6	0	3	4	0	0	35
JUL/13	0,070422535	5	0	0	1	0	0	0	0	0	6
AGO/13	0,276995305	11	0	0	3	0	0	2	0	0	16
OUT/13	0,0657277	8	0	1	0	0	0	1	0	0	10
NOV/13	0,596244131	5	0	0	2	1	2	0	0	0	10
DEZ/13	0,779342723	4	0	0	1	0	4	1	0	0	10
TOTAL EM 2013		66	3	3	16	2	11	12	0	0	113
JAN/14	0,018779343	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Início da Operação da USFN I de 400kWp											
AGO/14	0,582159624	1	0	0	3	3	0	0	2	0	9
TOTAL EM 2014		2	1	0	3	3	0	0	2	0	11
JAN/15	0,309859155	3	0	0	3	0	0	3	0	0	9
FEV/15	0,150234742	16	0	0	0	1	0	1	0	0	18
Início da Operação da USFN II de 550kWp											
OUT/15	0,070422535	5	0	0	1	0	0	0	0	0	6
NOV/15	0,037558685	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3
TOTAL EM 2015		25	2	0	4	1	0	4	0	0	36

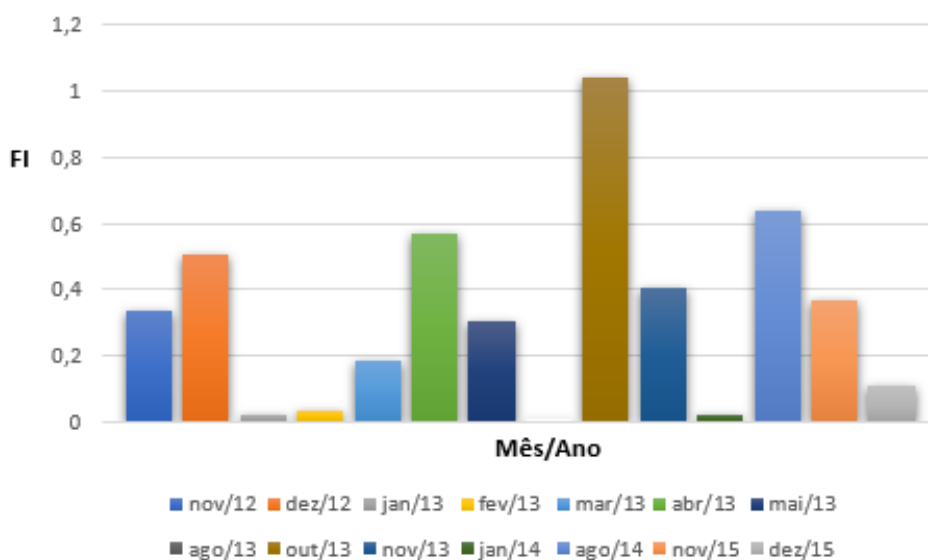
Fonte: Autoria própria (2025).

O cálculo do FI foi realizado de acordo com a Eq. (4.1), em que a quantidade do número de eventos contabilizado foi multiplicada pelo seu respectivo Fator de Ponderação. Em seguida, os resultados obtidos foram somados, e o total foi dividido pelo FI_{BASE} , que corresponde ao valor de 2,13, conforme estabelecido na Tabela 7, que trata do Fator de Ponderação relacionado à Região de Sensibilidade e Fator de Impacto Base.

Ao analisar a Tabela 21 e Tabela 22, constatou-se que o maior FI ocorreu no ano de 2013, correspondendo aos registros de outubro (RDP Itinerante) e junho (RDP da Usina Tubarão). Isso ocorre devido ao número expressivo de afundamentos nas regiões D, F e G que possuem os maiores Fatores de Ponderação 0,15; 0,36 e 0,07, respectivamente.

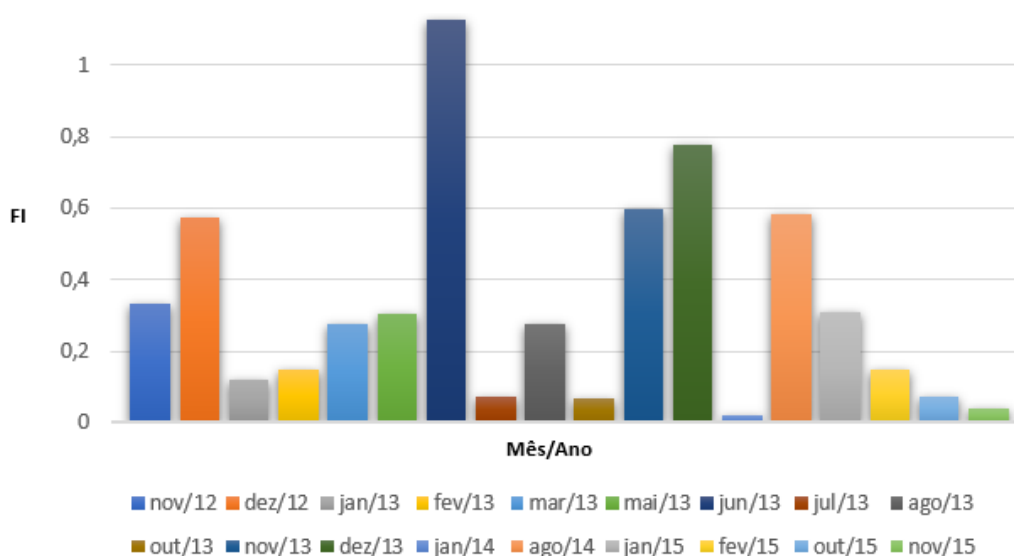
A severidade desses eventos no ano de 2013 nos meses de outubro (RDP Itinerante) e junho (RDP da Usina Tubarão) resultaram no pior Fator de Impacto do ano, conforme ilustrada na Figura 24 e na Figura 25.

Figura 24 – Gráfico de Fatores de Impacto correspondente a RDP Itinerante.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 25 - Gráfico de Fatores de Impacto correspondente a Subestação Tubarão.



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao examinar os gráficos das Figura 24 e Figura 25 apresentados, verifica-se que durante determinados meses o indicador FI é zero ou próximo de zero. Isso indica apesar da existência de uma elevada concentração de eventos, muitos ocorrem na zona de menor sensibilidade, cujo o seu Fator de Ponderação é igual a zero. No entanto, isso não implica afirmar que os consumidores não tenham percebido alguns desses eventos, uma vez que a percepção de afundamentos depende muito do quão sensível é a carga.

Ao se comparar os meses correspondentes dos dois RDPs, o maior FI ocorreu no mês de outubro de 2013 no RDP Itinerante quando o mesmo se encontrava no Alimentador FEN01F2 (P4) próximo ao aeroporto. Por outro lado, observou-se que, na maioria dos casos, o FI do RDP da Usina Tubarão apresentou valores mais elevados do que do RDP Itinerante. Isso pode ser explicado porque o RDP pode estar localizado em um alimentador onde não se deu a ocorrência da falta.

Também, pode-se inferir que ao analisar o ano de 2013, constatou-se que em dois meses (junho e outubro) foi obtido o FI superior ao limite estabelecidos na norma para esse nível de tensão. Pois de acordo com o PRODIST o valor de referência para o Fator de Impacto em relação ao Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT)

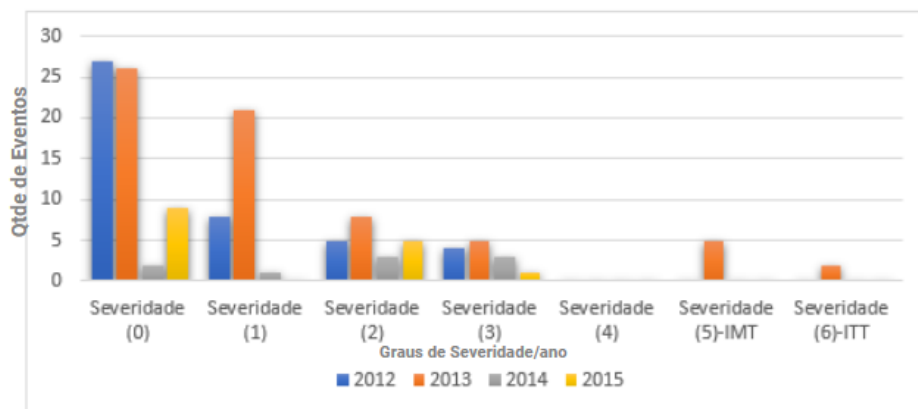
e o Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT), durante uma medição no período de 30 dias consecutivos deve ser de 1,0 p.u.

Observa-se que mesmo após o início da operação da Usina USFN I de 400kWp e Usina USFN II de 550kWp, o Fator de Impacto praticamente não se alterou, quando são comparados os mesmos meses no período antes da implementação dessas usinas. O que significa que as usinas em operação não impactaram nesse índice de QEE

5.5 Graus de Severidade das VTCDs

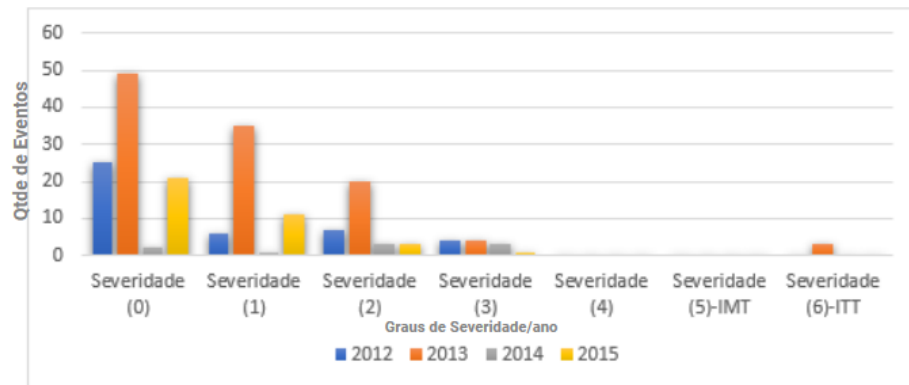
Outra análise realizada foi através do indicador de graus de severidade de VTCD (Figura 13), desenvolvido pela Divisão de Gestão de Qualidade da Operação da CHESF. Essa métrica foi aplicada nos RDPs Itinerante e da Usina segundo os limites de amplitude e duração das VTCDs estabelecidos pela CHESF. Assim, foram desenvolvidos os gráficos conforme as Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 - Graus de Severidade correspondente ao RDP da Itinerante



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 27 – Graus de Severidade correspondente ao RDP da Usina Tubarão



Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme evidenciado nas Figura 26 e Figura 27, observa-se que a maior frequência de ocorrência corresponde ao grau de severidade zero, tanto para o RDP Itinerante quanto para o RDP da Usina Tubarão, indicando predominância de eventos classificados como não severos. Adicionalmente, ao comparar os dois pontos de monitoramento, verifica-se que os níveis mais elevados de severidade ocorreram no RDP Itinerante, com destaque para registros no grau de severidade 5, valores esses que são inexistentes no RDP da Usina, o que evidencia uma maior exposição a distúrbios significativos neste ponto de medição.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

6.1 Conclusão

O fenômeno de VTCD vem se mostrando como um dos principais desafios nos sistemas de distribuição de energia. Isso se deve por causa da busca pela aplicação de sistema sustentável e de energia renováveis que oferece impacto de modo direto para a QEE devido a inversores que geram perturbações eletromagnéticas para rede de distribuição. Na IFN, local esse que é caracterizado por uma matriz de consumo elétrico peculiar, com consumo de 19% médio mensal total uma estação de bombeamento e tratamento da COMPESA. Foi elaborado uma análise minuciosa a respeito do impacto das VTCDs perante a diversidade dos tipos de carga. A qual combinada com as características das cargas da região fazem com que as ocorrências de VTCD se manifestem de maneira diferenciada e com efeitos variados.

O estudo em questão apresenta métricas fundamentais para a avaliação da gestão da qualidade da energia elétrica, em que foram utilizados indicadores de qualidade da energia consolidados, como o Fator de impacto, introduzido após a atualização do PRODIST em 2017, uma vez que, na época da realização do estudo, esse indicador ainda não havia sido incorporado à regulamentação vigente.

Além disso, a análise de eventos abordou a abrangência dos diversos agentes atuantes no setor elétrico e as metodologias adotadas por essas autoridades reguladoras e concessionárias para seu acompanhamento. Assim, será viável garantir uma operação mais consistente do sistema elétrico da IFN, proporcionando um serviço de energia de qualidade para os consumidores, além de reduzir os riscos de falhas e danos aos equipamentos na região.

Com apenas os registros apresentados pelo RDP Itinerante e o RDP da Usina Tubarão ano de 2013, constatou-se que houveram 2 meses em que o Fator de Impacto ultrapassou os limites regulamentares definidos no PRODIST. Também foi observado que o FI, no que compete ao período antes e após o início de operações das USFN I e USFN II, não sofreu alterações.

Também foram analisados os graus de severidade das VTCDs estabelecidos pela CHESF, o que, embora tenha muitos alicerces pertencentes ao grau de

severidade zero, revelou a presença de níveis de severidade preocupantes em algumas ocorrências, pois podem gerar grandes impactos nas cargas presentes na rede de distribuição. Além disso, permitiu a visualização de graus de severidade mais preocupantes no RDP Itinerante que no da Usina Tubarão.

Por fim, apesar da IFN ser majoritariamente composta de cargas residenciais e comerciais, fator esse que reduz bastante o impacto aparente desses distúrbios, as implicações podem ser graves para sistemas mais delicados, como os equipamentos eletrônicos presentes nas GDs. Logo, avaliar os intensidade e a severidade dessas VTCDs é fundamental para compreender o quão bem a rede de distribuição está funcionando e propor medidas corretivas e preventivas para evitar essas ocorrências.

6.2 Proposta de continuidade

Com base nas análises de dados de VTCDs medidos entre os anos de 2012 até 2015 é recomendado a continuação dessas medições:

- **Avaliação dos eventos de VTCD próxima à carga:** É importante conduzir um novo estudo para identificar as cargas específicas que mais impactadas pelas variações de tensão, visando realizar ajustes e evitar futuros problemas na rede de distribuição, principalmente devido à crescente demanda por instalação de usinas fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 456/2000: **Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Revisão 11, Resolução Normativa nº 888/2020. A partir de 03/08/2020.

ASSIS, Jefferson Rafael Pereira de. **Sistemas para inserção de potência ativa e compensação de tensão integrados via inversor de nove chaves**. 2021. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)** — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

BLACKBURN, J. Lewis. **Protective relaying: principles and applications**. 1. ed. New York: Wiley, 1987.

DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. **Electrical power systems quality**. 2. ed. Copyrighted Material, 2004.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. IEEE Standard 446 – 1995: **Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications**. 1995b.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. IEEE Standard 493 – 1997: **IEEE Gold Book – Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems**. 1997.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. IEEE Standard 1159 – 1995: **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. 1995a.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. IEEE Standard 1250 – 1995: **Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances**. 1995c.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. IEEE Standard 1346 – 1998: **IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment**. 1998.

LIMA JÚNIOR, José Carlos. **Estudo de viabilidade da geração fotovoltaica como fonte energética principal para a frota de veículos elétricos em Fernando de Noronha, Brasil**. Revista Principia, v. 60, n. 4, 10 out. 2023.

LIRA, Milde Maria da Silva; CARVALHO JUNIOR, Manoel Afonso; SOUZA, Ândria Gabriel de; MATIAS, Isadora Rocha; LIMA NETA, Regina Maria de; LOPES, José Aderaldo; COSTA, Samuel Marinho; SILVA, Sandro Felinto da; FERREIRA, Sandro Machado; SANTOS, Wider Basílio. **Desenvolvimento e implementações de provas de conceito de Redes Inteligentes (RI) em localidade piloto com elevadas restrições ambientais - Caso Ilha de Fernando de Noronha - REI**. Relatório 2.1 – Relatório parcial de levantamento das principais cargas por segmento de cliente considerando o conceito de RI do ponto de vista da QEE. 2012a. LDSP.

LIRA, Milde Maria da Silva; CARVALHO JUNIOR, Manoel Afonso; SOUZA, Ândria Gabriel de; MATIAS, Isadora Rocha; LIMA NETA, Regina Maria de; LOPES, José Aderaldo; COSTA, Samuel Marinho; SILVA, Sandro Felinto da; FERREIRA, Sandro Machado; SANTOS, Wider Basílio. **Desenvolvimento e implementações de provas de conceito de Redes Inteligentes (RI) em localidade piloto com elevadas restrições ambientais - Caso Ilha de Fernando de Noronha** - REI. Relatório 7.3 – Terceiro relatório parcial de implantação e avaliação do sistema de suporte à operação da rede de distribuição do ponto de vista da QEE. 2012b. LDSP

LOPES, Dyego Henrique Nicácio. **Análise da propagação de VTCD na rede de transmissão**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Elétrica, Recife, 2023.

MACEDO JR., José Rubens. **Tutorial Agregação de eventos de variação de tensão de curta duração**. Revisão 5, abril 2020. Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). Disponível em: <<http://www.jrubens.eng.br/tutorialvtcd.pdf>>. Acesso em: 5 jan. 2025.

MARTINS, R. L. **Capítulo I: Conceitos gerais sobre qualidade da energia elétrica**. Os Setores Elétricos. 2013. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf. Acesso em: 12 dez. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Submódulo 9.7 - Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica**. PRODIST. Revisão: 2020.12, Resolução Normativa nº 903/2020, 08 dez. 2020.

PAULILLO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus; BACCA, Ivandro; CARVALHO FILHO, José Maria de. **Variações de tensão de curta duração - Parte II**. In: Fascículo_Cap-VI-Qualidade-de-energia. Capítulo V. [s.l.], [s.n.], [s.d.].

SOUTH AFRICAN ELECTRICITY SUPPLY INDUSTRY. **NRS 048-2:2003: Electricity supply — Quality of supply: Second edition, Part 2: Voltage characteristics, compatibility levels, limits and assessment methods**. Johannesburg, 2003.