



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JEFFERSON DA SILVA PAIVA

Análise de índices de qualidade da energia elétrica considerando uma planta de geração eólica  
localizada no norte da Bahia

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

JEFFERSON DA SILVA PAIVA

Análise de índices de qualidade da energia elétrica considerando uma planta de geração eólica localizada no norte da Bahia

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrônica de potência aplicada a sistemas de energia elétrica.

Orientador (a): Prof. Dr. Denis Keuton Alves.

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- P149a Paiva, Jefferson da Silva  
Análise de índices de qualidade da energia elétrica considerando uma planta de geração eólica localizada no norte da Bahia / Jefferson da Silva Paiva. - 2022.  
65 f. : il.
- Orientador: Denis Keuton Alves.  
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2022.
1. qualidade da energia elétrica. 2. indicadores de qualidade. 3. planta eólica. 4. analisador de energia. 5. grandezas elétricas. I. Alves, Denis Keuton, orient. II. Título

CDD 621.3

---


JEFFERSON DA SILVA PAIVA

Análise de índices de qualidade da energia elétrica considerando uma planta de geração eólica localizada no norte da Bahia

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 27/05/2022


#### Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
 DENIS KEUTON ALVES  
Data: 09/06/2022 14:55:19-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Denis Keuton Alves


Orientador

Documento assinado digitalmente  
 MARCEL AYRES DE ARAUJO  
Data: 09/06/2022 17:32:39-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo

Examinador interno

Documento assinado digitalmente  
 FERNANDO GONCALVES DE ALMEIDA NETO  
Data: 09/06/2022 20:20:18-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Fernando Gonçalves de Almeida Neto

Examinador interno

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser meu refúgio e fortaleza em cada momento da minha vida, por tudo que tenho alcançado até aqui e por sua graça e misericórdia diária.

Aos meus pais, Gilberto de Sousa Paiva e Vasti da Silva que, apesar das muitas dificuldades, estiveram sempre ao meu lado me apoiando e incentivando nesta minha trajetória de vida, e por me ensinarem a ser forte frente às adversidades.

A Marluce e Jurandir Dantas, e seus filhos, Bruno e André Dantas por terem me orientado e mostrado um caminho de oportunidades, no que diz respeito a minha educação, o qual me trouxe até aqui. Tal realidade não seria alcançada sem a beneficência desta família em me conduzir e auxiliar financeiramente nesta caminhada.

A Universidade Federal Rural De Pernambuco, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, por me proporcionar uma graduação de forma gratuita e de altíssima qualidade. Aos meus professores de graduação por destinarem uma parte das suas vidas, nesta exímia profissão, para ensinar e formar grandes profissionais. Aos servidores da instituição, de maneira geral, que são fundamentais nessa etapa da vida de milhares de alunos.

Aos meus amigos e colegas de curso, em especial minha noiva Letícia Vitória da Silva Barboza, por estarem ao meu lado em todos os momentos passados e pelas trocas de experiências.

A Luis Fernando Negrão pela disponibilidade e troca de informação, e ao Prof. Dr. Dênis Keuton Alves (orientador) pelo empenho em orientar-me durante todo o período de pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para a execução deste trabalho minha eterna gratidão!

## RESUMO

Propõe-se neste trabalho uma avaliação, de caráter comparativo, dos principais indicadores de qualidade da energia elétrica medidos em uma planta eólica localizada no norte do estado da Bahia. A integração de plantas eólicas no sistema elétrico de potência apresenta desafios relacionados com a qualidade da energia cujos indicadores devem estar de acordo com os padrões definidos como desejáveis. Esse fato evidencia a importância da monitoração da qualidade da energia elétrica com destaque aos fenômenos, parâmetros e valores de referência quanto à tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência. Os indicadores de qualidade serão avaliados em função dos limites definidos em normas brasileiras: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, estabelecidos pela agência nacional de energia elétrica, por meio da resolução normativa nº 956/2021; Procedimentos de rede, elaborados pelo operador nacional do sistema elétrico, por meio da resolução normativa nº 903/2020. As medições das grandezas elétricas foram realizadas por meio de um analisador de energia *PowerLogic*®, modelo ION7650, fabricado pela empresa *Schneider Electric*, o qual também é responsável pela medição de faturamento da produção de energia elétrica da planta. A análise da qualidade da energia elétrica é realizada no barramento de geração da subestação do empreendimento. Os valores de registro das grandezas elétricas aferidos são satisfatórios para a apresentação de um diagnóstico capaz de evidenciar problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

Palavras-chave: qualidade da energia elétrica; indicadores de qualidade; planta eólica; analisador de energia; grandezas elétricas.

## ABSTRACT

This study proposes a comparative assessment of the leading indicators of power quality measured in a wind farm located in the north of the state of Bahia. The integration of wind farms in the electric power system presents challenges related to the power quality, whose indicators must follow the standards defined as desirable. This fact highlights the importance of monitoring electrical power quality indicators, emphasizing phenomena, parameters, and reference values regarding steady-state voltage, power factor, harmonic distortion, voltage imbalance, voltage fluctuation, short duration, and frequency variation. The power quality indicators were evaluated according to the limits defined in Brazilian standards: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, established by the Agência Nacional de Energia Elétrica, through normative resolution No. 956/2021; Procedimentos de Rede, prepared by the Operador Nacional do Sistema Elétrico, through normative resolution No. 903/2020. The measurement of electrical quantities was performed using a PowerLogic® energy analyzer, model ION7650, manufactured by Schneider Electric, which is also responsible for measuring the plant's electricity production billing. The analysis of the quality of electric energy is carried out in the generation bus of the enterprise's substat. The recorded values of the measured electrical quantities were satisfactory for presenting a diagnosis capable of evidencing problems related to the power quality.

Keywords: power quality; quality indicators; wind farm; energy analyzer; electrical quantities.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distúrbios relacionados à QEE na forma de onda de um sinal elétrico.....	18
Figura 2 - Triângulo de potências.....	29
Figura 3 - Composição da matriz elétrica brasileira 2021.....	32
Figura 4 - Diagrama unifilar da subestação.....	44
Figura 5 - <i>PowerLogic</i> ® ION7650.....	45
Figura 6 - Visão geral do <i>PowerLogic</i> ® ION7650. ....	46
Figura 7 - Diagrama unificar PAC. ....	47
Figura 8 - Conexão do medidor ao painel de medição.....	48
Figura 9 - Conexões reais do medidor / painel de medição. ....	49
Figura 10 - Ambiente virtual do medidor no <i>ION Setup</i> . ....	50
Figura 11 - Registro em tempo real. ....	50
Figura 12 - <i>Data Recorders ION Setup</i> ....	51
Figura 13 - Tensão em regime permanente (fases A, B e C).....	52
Figura 14 - Histograma fase A. ....	53
Figura 15 - Histograma fase B.....	53
Figura 16 - Histograma fase C.....	54
Figura 17 - Fator de potência trifásico.....	55
Figura 18 - Comportamento das potências ativa, reativa e aparente.....	56
Figura 19 - <i>DHTT</i> % das fases A, B e C. ....	57
Figura 20 - Desequilíbrio de tensão entre as fases A, B e C. ....	58
Figura 21 - Variação de frequência. ....	60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos fenômenos eletromagnéticos em sistemas elétricos de energia..	19
Tabela 2 - Classificação da tensão de leitura em função da tensão nominal.....	35
Tabela 3 - Limites para a avaliação dos indicadores <i>DHTT</i> em função da tensão nominal.....	38
Tabela 4 - Limites para a avaliação do indicador <i>FD</i> em função da tensão nominal.....	39
Tabela 5 - Limites para a avaliação do indicador <i>Pst</i> em função da tensão nominal.....	40
Tabela 6 - Limites para a avaliação do indicador <i>PstD95%</i> e <i>PltS95%</i> em função de <i>FT</i> ....	40
Tabela 7 - Valores de <i>FT</i> em função da tensão nominal. ....	40
Tabela 8 - Classificação da VTCD.....	41
Tabela 9 - Limites para a avaliação do indicador DFD.....	42
Tabela 10 - Potência instalada das eólicas.....	43
Tabela 11 - Registro do indicador <i>DHTT%</i> das fases A, B e C. ....	57
Tabela 12 - Registro do indicador <i>FD95%</i> .....	58
Tabela 13 - Registros do indicador <i>PltS95%</i> .....	59
Tabela 14 - Registro dos valores máximo e mínimo do indicador DFP.....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica.
BEN	Balanço energético nacional.
CA	Corrente alternada.
CC	Corrente contínua.
CCEE	Câmara de comercialização de energia elétrica.
CMSE	Comitê de monitoramento do setor elétrico.
CNPE	Conselho nacional de política energética.
DDT	Distorção de demanda total.
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora.
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora.
DFP	Desempenho da frequência em regime permanente.
DFD	Desempenho da frequência em distúrbios.
DHT	Distorção harmônica de tensão.
DHTT	Distorção harmônica total de tensão.
DRC	Duração relativa de transgressão para tensão crítica.
DRP	Duração relativa de transgressão para tensão precária.
EPE	Empresa de pesquisa energética.
EA	Energia ativa.
ER	Energia reativa.
FP	Fator de potência.
FD	Fator de desequilíbrio.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
MME	Ministério de minas e energia.
NLP	Número de leituras precárias
NLC	Número de leituras críticas.
NL	Número de leitura total.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro.
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica.
PROREDE	Procedimentos de rede.

QEE	Qualidade de energia elétrica.
RMS	<i>Root mean square.</i>
SEP	Sistema elétrico de potência.
SE	Subestação.
SIN	Sistema interligado nacional.
TP	Transformador de potencial
TC	Transformador de corrente.
TL	Tensão de leitura
TN	Tensão nominal.
VTCD	Varição de tensão de curta duração.

## LISTA DE SIMBOLOS

$f$	Frequência.
$h$	Ordem harmônica.
$P$	Potência ativa.
$P_{lt}$	Severidade de cintilação luminoso de longa duração.
$P_{st}$	Severidade de cintilação luminoso de curta duração.
$Q$	Potência reativa.
$S$	Potência aparente.
$V_{ac}$	Tensão de linha entre as fases A e C.
$V_{bc}$	Tensão de linha entre as fases B e C.
$V_{ca}$	Tensão de linha entre as fases C e A.
$V_n$	Tensão nominal.
$V_h$	Tensão de ordem harmônica $h$ .
$V_1$	Tensão fundamental.
$V_-$	Tensão de sequência negativa.
$V_+$	Tensão de sequência positiva.
$\Phi$	Ângulo do fator de potência.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA.....	14
1.2	MOTIVAÇÃO.....	15
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Transitórios.....</b>	<b>20</b>
2.1.1.1	Transitório impulsivo.....	20
2.1.1.2	Transitório oscilatório.....	21
<b>2.1.2</b>	<b>Variação de tensão de longa duração.....</b>	<b>21</b>
2.1.2.1	Sobretensão.....	22
2.1.2.2	Subtensão.....	22
2.1.2.3	Interrupção sustentada.....	22
<b>2.1.3</b>	<b>Variação de tensão de curta duração.....</b>	<b>23</b>
2.1.3.1	Elevação de tensão ( <i>swell</i> ).....	23
2.1.3.2	Afundamento de tensão ( <i>sag</i> ).....	24
2.1.3.3	Interrupção.....	24
<b>2.1.4</b>	<b>Desequilíbrio de tensão.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Distorção na forma de onda.....</b>	<b>25</b>
2.1.5.1	Deslocamento CC ( <i>offset DC</i> ).....	25
2.1.5.2	Harmônicos.....	26
2.1.5.3	Inter-harmônicos.....	26
2.1.5.4	Recorte ( <i>notching</i> ).....	27
2.1.5.5	Ruído ( <i>noise</i> ).....	27
<b>2.1.6</b>	<b>Flutuação de tensão.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.7</b>	<b>Variação de frequência.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.8</b>	<b>Fator de potência.....</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>NORMATIZAÇÃO, PADRONIZAÇÃO E INDICADORES DE QUALIDADE</b>	<b>31</b>
3.1	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN).....	31
3.2	O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	32

3.3	PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL (PRODIST) .....	34
3.4	PROCEDIMENTOS DE REDE (PROREDE) .....	34
<b>3.4.1</b>	<b>Indicadores de qualidade de energia elétrica .....</b>	<b>35</b>
3.4.1.1	Tensão em regime permanente .....	35
3.4.1.2	Fator de potência.....	36
3.4.1.3	Distorção harmônica de tensão .....	37
3.4.1.4	Desequilíbrio de tensão.....	38
3.4.1.5	Flutuação de tensão.....	39
3.4.1.6	Variação de tensão de curta duração .....	41
3.4.1.7	Variação de frequência .....	41
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
4.1	O EMPREENDIMENTO .....	43
4.2	ESPECIFICAÇÃO DO MEDIDOR .....	45
4.3	INSTALAÇÃO DO MEDIDOR .....	47
4.4	REGISTRO E COLETA DE DADOS DE MEDIÇÃO.....	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>52</b>
5.1	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE .....	52
5.2	FATOR DE POTÊNCIA .....	54
5.3	DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	56
5.4	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO .....	58
5.5	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO .....	59
5.6	VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA.....	59
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>61</b>
6.1	CONCLUSÃO .....	61
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	62
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

O conceito de qualidade da energia elétrica (QEE) pode ser interpretado de diversas maneiras. Sua definição pode estar relacionada com a continuidade do serviço de fornecimento, assim como associado às características da fonte de alimentação que permitem o funcionamento correto de equipamentos. O estudo associado à QEE abrange um grande número de fenômenos que ocorre em diferentes áreas de interesse do sistema elétrico de potência (SEP), como o consumo, transmissão e geração de energia elétrica (DUGAN, 2012).

Nos últimos anos, a inserção de novos equipamentos interligados ao sistema elétrico, tais como cargas não-lineares, conversores de potência e fontes alternativas de energia, como solar e eólica, tem contribuído para os problemas relacionados à QEE (ALVES, 2019). A integração desses dispositivos no sistema pode causar problemas de QEE, como valores de tensão, corrente e frequência fora dos limites estabelecidos por padrões e recomendações de agentes reguladores. Nesse sentido, a QEE fornecida tem gerado grandes preocupações, as quais se estendem desde as concessionárias até os consumidores finais. Essa preocupação é motivada devido aos vários tipos de distúrbios presentes no SEP que afetam, por exemplo, equipamentos eletrônicos mais sensíveis (computadores, televisões, etc). Além disso, em um sistema interligado, em que todos os processos são automatizados, uma falha em qualquer componente pode causar consequências graves, tais como uma má operação de máquinas e/ou erros em seu sistema de controle.

Em 2008, a agência nacional de energia elétrica (ANEEL), criou um conjunto de documentos denominado de procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) com o intuito de normatizar e padronizar o funcionamento, assim como o desempenho dos serviços prestados pelas concessionárias, desde a geração até a comercialização da energia elétrica. O Módulo 8 do PRODIST criado pela ANEEL é a principal norma responsável por estabelecer os procedimentos relativos à QEE, tendo como objetivo a qualidade do produto entregue ao consumidor final (ANEEL, 2022).

O presente trabalho apresenta uma análise da QEE de uma planta eólica localizada no norte do estado da Bahia. A finalidade do estudo é avaliar índices de QEE (tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas total de tensão, desequilíbrio de tensão e variação de frequência) entregue pelo parque eólico, assim como investigar as possíveis

causas de problemas relacionados a uma má QEE. A análise foi realizada por meio de um medidor de energia elétrica, instalado no painel de medição de faturamento, responsável pela contabilização e liquidação de energia encaminhada à câmara de comercialização de energia elétrica (CCEE), no barramento de geração de 34,5 kV da subestação (SE) do empreendimento. A SE é composta por dois bancos de transformadores monofásicos que somam 310 MVA de potência, ambos de 34,5 kV no lado de baixa tensão e 230 kV no lado de alta tensão.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

É notório que as fontes alternativas de energia renovável eólica e fotovoltaica intensificaram suas participações na matriz energética brasileira. Esse fato tem impulsionado o crescimento quanto à preocupação com a QEE devido ao aumento do número de componentes com características não-lineares empregados na conexão dessas plantas de geração no SEP. Além disso, a presença de cargas não-lineares também cresce entre os consumidores residenciais e industriais, podendo causar efeitos indesejáveis na rede como aumento dos níveis de componentes harmônicas, ocasionando distúrbios, sobreaquecimento de condutores, erros em medição de grandezas elétricas e atuação indevida da proteção do SEP. De maneira geral, os problemas de QEE causam perda de potência, sobrecargas, sobreaquecimentos, baixo fator de potência e oscilações de tensão, entre outros, podendo gerar impactos econômicos, que afetam tanto as concessionárias quanto os consumidores residenciais, comerciais e industriais de energia elétrica (ARAÚJO, 2019).

Neste sentido, é importante ressaltar que o monitoramento e análises de índices de QEE é o primeiro passo para mitigar problemas relacionados à QEE.

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é analisar índices de QEE (tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas total de tensão, desequilíbrio de tensão e variação de frequência) de uma planta eólica, assim como investigar as possíveis causas de problemas relacionados a uma má QEE, baseados nos parâmetros estabelecidos pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST e os procedimentos de rede (PROREDE) elaborados pelo operador nacional do sistema elétrico (ONS).



#### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo da normatização, regulamentação e indicadores de qualidade;
- Avaliar medições das grandezas elétricas por meio do analisador de energia *PowerLogic®*, modelo ION7650 da *Schneider Electric*;
- Avaliar possíveis causas de distúrbios de QEE;
- Contribuir na melhoria da QEE do complexo eólico.

#### 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica referente à QEE, no qual é abordado definições de distúrbios e índices de QEE.

No Capítulo 3 são apresentadas as principais normas e recomendações nacionais e internacionais sobre indicadores de QEE.

No Capítulo 4 é abordada a metodologia empregada para analisar e qualificar os indicadores da QEE.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos pelo analisador de energia elétrica.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e sugestões para a continuidade da pesquisa e trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada à área QEE, bem como as definições dos principais distúrbios de QEE.

### 2.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Em termos gerais, problemas de QEE estão associados com fenômenos que alteram as propriedades ideais das grandezas elétricas do SEP. Dugan (2012) define distúrbios de QEE como qualquer problema de energia que manifeste desvios de tensão, corrente ou frequência, resultando em falha ou operação incorreta de equipamentos. Problemas de QEE podem ser caracterizados, entre tantos outros, como variações nas formas de onda da tensão e corrente, distorção harmônica, interrupção do fornecimento de energia e flutuações de amplitudes. Além disso, uma má QEE pode causar prejuízos financeiros, uma vez que o descumprimento dos requisitos mínimos estabelecidos pelas agências regulamentadoras de energia elétrica está sujeito à multa (REIS, 2018).

A QEE é avaliada por meio das características de continuidade do fornecimento e conformidade com base em parâmetros estabelecidos como desejáveis para qualidade do serviço e produto da distribuidora e também para a operação adequada das cargas elétricas do consumidor final. A ANEEL analisa os principais índices da QEE para o atendimento das concessionárias de energia, com a medição dos indicadores de duração equivalente de interrupção por consumidor (DEC) e a medição da frequência equivalente de interrupção por consumidor (FEC). No entanto, os indicadores DEC e FEC levam em consideração apenas a confiabilidade do sistema, desconsiderando os fenômenos da QEE referentes à conformidade dos aspectos de comportamento do sistema (PIMENTEL, 2010).

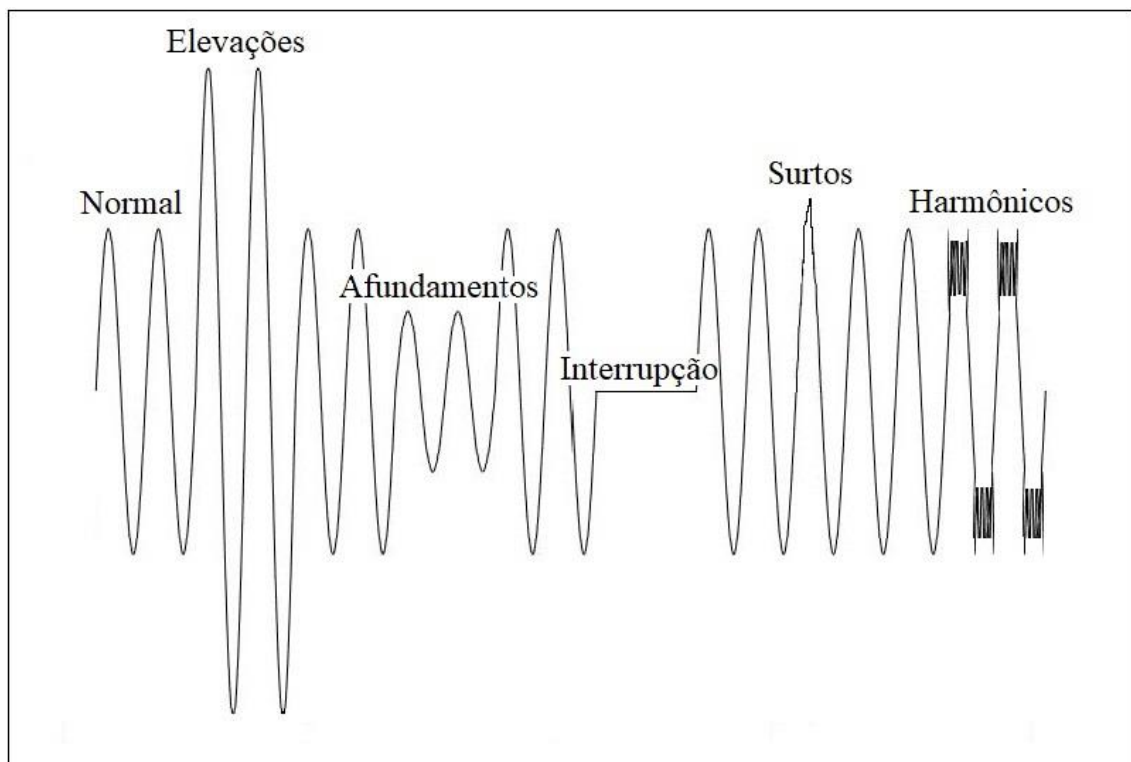
Segundo Dugan (2012), o aumento da preocupação quanto às ocorrências de distúrbios no sistema elétricos, pode ser entendido a partir das seguintes razões:

- A produção de novos equipamentos, baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos, apresentam maiores sensibilidades às variações de qualidade de energia do que os equipamentos fabricados no passado.
- O aumento na aplicação de dispositivos eletrônicos para acionamentos de motores com velocidade ajustável como inversores de frequência, resultam no aumento de componentes harmônicas no SEP.

- Os processos integrados, interconectados à rede elétrica, estão se tornando mais comuns e a falha de qualquer componente desses processos tem consequências muito mais importantes, gerando uma maior dependência de fontes de energia de qualidade.

Em um SEP trifásico ideal, operando em corrente alternada (CA), é esperado que sejam fornecidas às cargas tensões senoidais perfeitamente equilibradas, com amplitude e frequência constantes, defasadas entre si de  $120^\circ$ . Entretanto, o uso de cargas não-lineares por consumidores residenciais, indústrias e até mesmo fontes de energia alternativas conectadas ao sistema de transmissão e distribuição causam distorções das condições ideais de operação do SEP. A Figura 1 ilustra a forma de onda de um sinal elétrico distorcido com diferentes representações de distúrbios que comumente afetam a QEE como elevações e afundamentos em sua amplitude, interrupção do sinal, surtos na rede elétrica e componentes harmônicas.

Figura 1 - Distúrbios relacionados à QEE na forma de onda de um sinal elétrico.



Fonte: MARTINHO, 2009.

De acordo com a Figura 1, as características dos fenômenos eletromagnéticos de QEE, tal como o conteúdo espectral específico, duração e magnitude são meios importantes para a

compreensão dos problemas de QEE e sua categorização. De acordo com Dugan (2012), os fenômenos eletromagnéticos podem ser sumarizados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos fenômenos eletromagnéticos em sistemas elétricos de energia.

<b>Categorias</b>	<b>Espectro típico</b>	<b>Duração típica</b>	<b>Tensão típica</b>
1. Transitórios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanossegundos	5ns	< 50ns	
1.1.2 Microssegundos	1µs	50ns – 1ms	
1.1.3 Milissegundos	0,1ms	> 1ms	
1.2 Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 pu
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20µs	0 – 8 pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5µs	0 – 4 pu
2. Variações de Tensão de Curta Duração			
2.1 Instantâneas			
2.1.1 Afundamento		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2 Elevação		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 Momentâneas			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3s	< 0,1 pu
2.2.2 Afundamento		30 ciclos – 3s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 Elevação		30 ciclos – 3s	1,1 – 1,4 pu
2.3 Temporárias			
2.3.1 Interrupção		3s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2 Afundamento		3s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 Elevação		3s – 1 min	1,1 – 1,2 pu
3. Variações de Tensão de Longa Duração			
3.1 Interrupção Sustentada		> 1 min	0,0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1,1 – 1,2 pu
4. Desequilíbrio de Tensão		Permanente	0,5 – 2%
5. Distorção da Forma de Onda			
5.1 DC Offset		Permanente	0 – 0,1%
5.2 Harmônicas		Permanente	0 – 20%
5.3 Interharmônicas		Permanente	0 – 2%
5.4 Corte de Tensão		Permanente	
5.5 Ruído		Permanente	0 – 1%
6. Flutuação de Tensão		Intermitente	0,1 – 7%
7. Variação de Frequência		< 10s	

Fonte: DUGAN, 2012.

### 2.1.1 Transitórios

Transitório é termo utilizado para definir um evento de natureza momentânea que ocorre de forma indesejada no SEP. São fenômenos caracterizados por desvios de grandezas elétricas (tensão ou corrente) com duração finita, ou seja, referem-se a eventos de alta frequência produzidos durante uma situação transitória do sistema que se dissipam rapidamente. Apesar dos sistemas elétricos serem projetados para operarem em regime permanente, eles são submetidos a condições transitórias, tais como chaveamento de cargas, operação de relés e contadores, chaveamento de capacitores para correção do fator de potência e descargas atmosféricas. De um modo geral, os transitórios podem ser classificados em duas categorias, impulsivos e oscilatórios, que se refletem na forma de onda como um transiente de corrente ou tensão (DUGAN, 2012).

#### 2.1.1.1 Transitório impulsivo

Oriundos de mudanças repentinas na condição de estado estacionário das grandezas elétricas de tensão e corrente no SEP, os transientes impulsivos são caracterizados por sua polaridade unidirecional (positiva ou negativa) e por não causarem alterações na frequência do sistema. Embora não seja comum, os transitórios impulsivos podem excitar a frequência natural do sistema e produzir transitórios oscilatórios. Os transientes impulsivos possuem seus tempos de subida e descida característicos, assim como seu conteúdo espectral e sua principal causa são as descargas atmosféricas. Devido suas altas frequências, os transitórios impulsivos são amortecidos rapidamente pela resistividade apresentada dos componentes do sistema de transmissão e distribuição que restringem a sua propagação (DUGAN, 2012).

A ocorrência de um transitório impulsivo pode causar inúmeras consequências no circuito, como provocar uma diferença de potencial de terra de vários quilovolts, em relação ao ponto de ocorrência e outros pontos de terra, como também induzir altas tensões nos condutores fase, com a fuga da corrente para a terra. Além disso, pode-se ter falhas em para-raios, transformadores, e danos a equipamentos dos consumidores devido à reflexão na baixa tensão (PIMENTEL, 2010).

### 2.1.1.2 Transitório oscilatório

O transitório oscilatório também é caracterizado por uma mudança repentina nas condições de estado estacionário das grandezas elétricas de tensão e corrente do SEP. No entanto, diferentemente dos transitórios impulsivos, possui polaridade positiva e negativa, variando de amplitude rapidamente (DUGAN, 2012). Em outras palavras, os transientes oscilatórios consistem em uma tensão ou corrente cujo valor instantâneo inverte sua polaridade rapidamente. Os transitórios oscilatórios possuem seu conteúdo espectral definido por sua frequência predominante, duração e magnitude conforme a Tabela 1, são divididos nas subclasses de alta, média e baixa frequência.

Transitórios oscilatórios com componente de frequência predominante maior que 500 kHz e duração da ordem de microssegundos pertencem à subclasse de transitórios de alta frequência. É comum que esta subclasse de transientes seja o resultado de uma resposta do sistema a uma excitação de um transiente impulsivo. Um transiente de frequência dominante entre 5 e 500 kHz com duração medida na ordem de dezenas de microssegundos é classificado como transiente de média frequência. Transientes de média frequência são consequências, por exemplo, da energização *back-to-back* de banco de capacitor. Os transitórios de frequência predominante menor que 5 kHz e duração entre 0,3 e 50 ms são definidos como transientes de baixa frequência. São fenômenos frequentemente encontrados em sistemas de subtransmissão e de distribuição, causados por eventos como a energização de banco de capacitores, ferrorressonância e energização do transformador (DUGAN, 2012).

### 2.1.2 Variação de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração são caracterizadas por desvios no valor RMS (do inglês, *root mean square*) ou valor eficaz, na frequência do SEP, por mais de 1 minuto, ultrapassando as tolerâncias de tensão de estado estacionário estabelecidas. Essas variações podem gerar sobretensões, subtensões e interrupções sustentadas (quando a interrupção no fornecimento de energia é permanente). Suas causas estão relacionadas com variações de carga e operações de chaveamento de banco de capacitores (MARTINHO, 2012).

### 2.1.2.1 Sobretensão

Uma sobretensão pode ser definida como um aumento no valor eficaz da tensão maior que 110% ou 1,1 pu (por unidade), na frequência de alimentação, durante um período maior que 1 minuto (DUGAN, 2012).

Em geral, as sobretensões são resultados da comutação de cargas como o desligamento de uma grande carga, energização de um banco de capacitor e configuração incorreta do tap de transformadores. Isso ocorre devido a fragilidade do sistema na regulação da tensão desejada ou dos controles de tensão inadequados. A ocorrência desse tipo de fenômeno no sistema pode acarretar sobreaquecimento de motores, queima de placas eletrônicas e atuação dos dispositivos de proteção (MARTINHO, 2012).

### 2.1.2.2 Subtensão

Uma subtensão é caracterizada por uma diminuição no valor eficaz da tensão CA para menos de 90% ou 0,9 pu, na frequência de alimentação, durante um período maior que 1 minuto (DUGAN, 2012).

As subtensões são resultados de eventos de chaveamento de cargas, sendo o oposto dos eventos que causam sobretensões. A inserção de uma carga, o desligamento de um banco de capacitores, a sobrecarga de circuitos alimentadores e o excesso de reativos podem causar o afundamento da tensão para valores abaixo da tolerância, caracterizando as subtensões. Esse fenômeno causa o aumento das perdas por aquecimento em motores, operação incorreta ou parada de dispositivos eletrônicos e de comando de motores (MARTINHO, 2012).

### 2.1.2.3 Interrupção sustentada

Quando a tensão eficaz de alimentação tem seu valor nulo, ultrapassando um período de tempo superior a 1 minuto, esse distúrbio é considerado uma interrupção sustentada. As interrupções de tensão superiores a 1 minuto, normalmente, possuem caráter permanente, ou seja, requerem intervenção humana para o reestabelecimento da alimentação e operação do sistema (DUGAN, 2012).

Esses fenômenos podem ser de natureza planejada ou não planejada: manutenções preventivas ou manobras de transferência da fonte de alimentação são exemplos de

interrupções sustentadas de forma planejada; falhas no sistema como atuação de disjuntores, descargas atmosféricas e rompimento de linhas são exemplos de interrupções sustentadas não planejadas (MARTINHO, 2012).

### 2.1.3 Variação de tensão de curta duração

As variações de tensão de curta duração são desvios no valor eficaz da tensão em intervalos de tempo inferior ou igual a 1 minuto, podendo ser classificada como instantânea, momentânea ou temporária, dependendo de sua duração. Esses fenômenos podem ser causados por curto-circuito no sistema elétrico, energização de grandes cargas que demandam elevadas correntes de partida ou conexões intermitentes de cabeamento de energia. Os impactos causados ao sistema, quando submetidos a situações de falta, são elevações de tensão (*swell*), quedas de tensão (*sag*) ou a perda completa da tensão (interrupção). Em caso de condições de curto-circuitos, a variação da tensão possui uma duração curta devido à rápida atuação dos dispositivos de proteção para eliminá-la (DUGAN, 2012).

#### 2.1.3.1 Elevação de tensão (*swell*)

Uma elevação de tensão é definida como aumentos entre 110% e 180% ou 1,1 e 1,8 pu no valor eficaz da tensão, na frequência de alimentação, com durações de 0,5 ciclo a 1 minuto (DUGAN, 2012).

Esse distúrbio está associado, principalmente, às condições de falta fase-terra no sistema, quando ocorre um aumento da tensão nas fases que não foram afetadas. Além das faltas fase-terra, as elevações de tensão podem ser causadas por desligamento de uma grande carga ou energização de um grande banco de capacitores (MARTINHO, 2012).

As elevações de tensão podem vir a danificar, principalmente, os componentes eletrônicos, por possuírem maior sensibilidade às variações de tensão, bem como a redução da vida útil de inúmeros componentes elétrico da rede.



### 2.1.3.2 Afundamento de tensão (*sag*)

Um afundamento de tensão é caracterizado por uma diminuição do valor eficaz da tensão entre 10% e 90% ou 0,1 e 0,9 pu, na frequência de alimentação, com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto (DUGAN, 2012).

Os afundamentos de tensão, em geral, estão associados a falta fase-terra no sistema de transmissão e distribuição, devido ao elevado valor da corrente de curto-circuito. Entretanto, também podem ser causadas pela energização de grandes cargas como a partida de motores que demanda elevada corrente durante o arranque e pela corrente de energização de um transformador (REIS, 2018).

Assim como as elevações de tensão, os afundamentos podem causar mau funcionamento de equipamentos compostos por circuitos eletrônicos como microcontroladores e microprocessadores, por possuírem maior sensibilidade às variações de tensão (MARTINHO, 2012).

### 2.1.3.3 Interrupção

Uma interrupção pode ser entendida como uma diminuição do valor eficaz da tensão de alimentação para menos de 10% ou 0,1pu por um período inferior a 1 minuto (DUGAN, 2012).

As interrupções são o resultado de faltas no sistema de energia, falhas de equipamento e mau funcionamento do sistema de controle da rede. A duração de uma interrupção devido a uma falta no sistema é determinada pelo tempo de operação dos dispositivos de proteção para extinguir o evento e reestabelecer as condições ideais do sistema. O reestabelecimento instantâneo geralmente limitará a interrupção causada por uma falta intermitente menor que 30 ciclos. O atraso do dispositivo de proteção para realizar o reestabelecimento pode causar uma interrupção momentânea ou temporária. Já o atraso no reestabelecimento operacional do sistema compreende o período entre 0,5 ciclos à 3 segundos, devido a uma falta fase-terra, fase-fase, por descargas atmosféricas e por situações naturais como a queda de galhos de arvores em redes de distribuição que geram uma interrupção momentânea. Um período entre 3 segundos a 1 minuto corresponde às interrupções temporárias (DUGAN, 2012).

#### 2.1.4 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão pode ser definido como sendo a variação máxima da tensão em relação ao valor médio da tensão em cada uma das fases. Normas internacionais associam o desbalanceamento percentual com os componentes simétricos, utilizando a razão entre o componente de sequência negativa ou zero e o componente de sequência positiva (DUGAN, 2012).

A causa do desequilíbrio de tensão está relacionada, principalmente, com cargas monofásicas em um circuito trifásico, com a má distribuição das cargas entre fases, mas também pode ser resultado de fusíveis queimados em uma fase de um banco de capacitores trifásicos (ARAÚJO, 2019).

#### 2.1.5 Distorção na forma de onda

Uma distorção na forma de onda é descrita como um desvio de estado estacionário ou regime permanente de uma onda senoidal ideal, na frequência fundamental da rede, caracterizada principalmente pelo conteúdo espectral. As distorções na forma de onda podem ocorrer por um deslocamento CC (*offset DC*), harmônicos, inter-harmônicos, recortes (*notching*) e ruídos (*noise*) (DUGAN, 2012).

##### 2.1.5.1 Deslocamento CC (*offset DC*)

Deslocamento CC ou *offset* é a presença de uma tensão ou corrente CC em um sistema de energia CA que provoca o um desvio na forma de onda. Segundo Dugan (2012), esse fenômeno pode ocorrer como resultado de uma perturbação na operação assimétrica de conversores eletrônicos de potência e da operação ideal de retificadores de meia-onda. Desvio do nível CC em sistemas de corrente CA pode haver um aumento na saturação de transformadores em operação normal, resultando em perdas por aquecimento e redução de sua vida útil, além da corrosão eletrolítica dos eletrodos e conectores de aterramento (DUGAN, 2012).

### 2.1.5.2 Harmônicos

Os harmônicos são distorções que podem ocorrer nas tensões ou correntes senoidais com frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema de alimentação (50 ou 60 Hz, por exemplo). Esses distúrbios são provenientes das características não lineares de elementos do sistema de energia (DUGAN, 2012).

A distorção harmônica é medida pela razão do espectro harmônico completo, com a magnitude de cada componente harmônico individual. Mas também pode-se usar uma única grandeza, a distorção harmônica total (DHT), como medida do valor efetivo da distorção harmônica de uma onda em relação a onda senoidal fundamental. Os níveis de distorção harmônica de corrente caracterizados por um valor de DHT pode não ser tão efetivo quanto como para tensões. Isso se justifica pelo fato de que em baixos níveis de correntes podem haver um elevado nível de DHT e, devido à magnitude dessa corrente harmônica ser baixa, acabam por não serem um problema com efeitos significativos. Essa característica dos sinais de correntes de baixa amplitude gerou uma preocupação em como caracterizar as correntes harmônicas de maneira efetiva, resultando no surgimento de um novo termo, a distorção de demanda total (DDT). O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define a DDT como uma porcentagem da magnitude da corrente nominal, em vez de uma porcentagem da corrente fundamental no momento da medição (IEEE 519, 2014).

As cargas não lineares responsáveis pela injeção de harmônicos no sistema como fornos industriais, conversores de potência, inversores de frequência, máquinas de solda, lâmpadas fluorescentes, entre outros, podem causar a excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias, vibração e ruídos em motores ou transformadores, aquecimento de núcleos ferromagnéticos, erro de medição de grandezas elétricas e atuação incorreta de dispositivos de proteção (REIS, 2018).

### 2.1.5.3 Inter-harmônicos

Inter-harmônicos podem ser entendidos como uma particularidade dos harmônicos mencionados anteriormente, diferenciando-se por suas componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema de alimentação (50 ou 60 Hz, por exemplo). Os inter-harmônicos de tensão ou corrente apresentam componentes de frequência

em todas as faixas espectrais, podendo ser encontradas em redes de diferentes classes de tensões (DUGAN, 2012).

A origem dos inter-harmônicos está relacionada ao emprego de conversores de potência estáticos, fornos industriais e dispositivos de arco elétrico. Os inter-harmônicos podem também provocar ressonâncias com a frequência natural do sistema. Por não estarem sincronizadas com a componente de frequência fundamental, as inter-harmônicas afetam o valor eficaz da tensão, provocando flutuações que induzem o efeito de cintilação luminosa em lâmpadas, provocando o desconforto visual causado pela variação de luminosidade, denominado *flicker* (DUGAN, 2012).

#### 2.1.5.4 Recorte (*notching*)

Recorte ou *notching* é um distúrbio de caráter periódico de tensão, causado pela operação normal de conversores de potência durante uma comutação de corrente de uma fase para outra. Devido seu comportamento contínuo ou de regime permanente, o recorte pode ser caracterizado como um caso especial de distorção harmônica. Todavia, suas altas componentes de frequência associadas podem não ser facilmente detectadas por equipamentos de medição em análise harmônica (DUGAN, 2012).

O alto grau harmônico associado à transposição de correntes entre fases configura os conversores trifásicos como as principais fontes de recorte de tensão, devido a curto-circuito provocado na comutação, que tende a zerar a tensão instantaneamente (REIS, 2018).

#### 2.1.5.5 Ruído (*noise*)

Ruídos ou *noises* são sinais elétricos com conteúdo espectral inferior a 200 kHz, sobrepostos às formas de onda da tensão ou corrente presentes de forma indesejada no SEP. Em geral, o ruído consiste em qualquer distorção indesejada no sinal elétrico que não se classifica como distorção harmônica ou transiente. Esse fenômeno pode ser causado por dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos de arco, retificadores de estado sólido e fontes de alimentação chaveadas. Como consequência, os ruídos provocam perturbações em dispositivos eletrônicos, como microcomputadores e controladores programáveis. Esses problemas podem ser amenizados com o uso de filtros, transformadores de isolamento e um sistema de aterramento adequado (DUGAN, 2012).

### 2.1.6 Flutuação de tensão

As flutuações de tensão são definidas como variações sistemáticas ou mudanças aleatórias no valor eficaz da tensão, cuja magnitude não exceda o valor limite entre 90% a 110% ou 0,9 a 1,1 pu. Normalmente, as flutuações de tensão são geradas a partir da variação contínua e rápida na magnitude da corrente de grandes cargas como fornos a arco, máquinas de solda, laminadores, elevadores e grandes motores. Efeitos como oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção e cintilação luminosa ou *flicker*, são resultados da ocorrência de flutuação de tensão no sistema elétrico (DUGAN, 2012).

A monitoração ou análise da tensão quanto à flutuação do seu valor eficaz tem como maior objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa à sensibilidade do olho humano. Assim, a magnitude da flutuação de tensão é medida em relação à sensibilidade do olho humano, expressa como uma porcentagem da fundamental. O método de medição simula a função de transferência lâmpada – olho - cérebro para produzir uma métrica denominada sensação de cintilação de curto prazo ( $P_{st}$ ). Outra medida denominada sensação de cintilação de longa duração ( $P_{lt}$ ), é uma média de longo prazo de amostras  $P_{st}$ . As amostras  $P_{st}$  são relatadas em intervalos de 10 minutos e o valor  $P_{lt}$  é produzido a cada 2 horas a partir dos valores de  $P_{st}$  (PRODIST, 2021).

### 2.1.7 Variação de frequência

Uma variação de frequência é caracterizada como alterações no valor da frequência fundamental da fonte de alimentação de energia (50 ou 60 Hz) (DUGAN, 2012). A frequência fundamental do sistema está associada com a velocidade de rotação dos geradores que o alimentam, em condições normais de operação e em regime permanente. Essa frequência pode sofrer pequenas variações à medida que o sistema apresenta um desequilíbrio entre a carga e a geração.

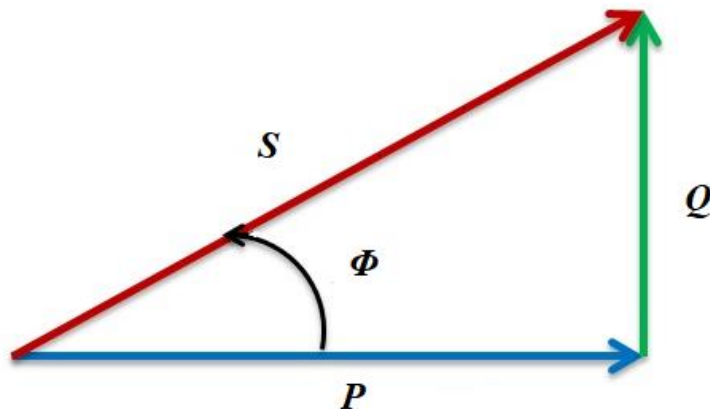
Essas variações de frequência podem ser causadas por curtos-circuitos no sistema de transmissão de energia, o desligamento de um grande bloco de carga ou a desconexão de uma grande fonte de geração da rede. Nesses casos, a resposta do regulador de tensão a mudanças abruptas de carga, em sistemas modernos e interconectados, é imediata, mantendo os valores dentro dos limites exigidos por equipamentos sensíveis à frequência. As variações de

frequência com magnitude e tempo de permanência significativos são mais prováveis de ocorrer em cargas providas por alimentadores isolado do sistema de energia (REIS, 2018).

### 2.1.8 Fator de potência

Em princípio, a potência entregue a uma carga é composta pela resultante da soma vetorial de duas componentes, a potência ativa ( $P$ ), medida em W, e a potência reativa ( $Q$ ), medida em VAR. A potência ativa é aquela consumida por cargas para efetivamente realizar trabalho, já a potência reativa é usada apenas para criar e suprir os campos eletromagnéticos e não gera trabalho. A potência resultante da soma vetorial de  $P$  e  $Q$  é denominada de potência aparente ( $S$ ). A relação entre as três componentes da potência é ilustrada na Figura 2 (triângulo de potências).

Figura 2 - Triângulo de potências.



Fonte: Autoria própria.

A análise do triângulo de potências é um dos métodos utilizados para determinar parâmetros presentes na potência demandada por uma carga, como a potência aparente, potência ativa, potência reativa e ângulo ( $\Phi$ ) entre  $P$  e  $S$ , também denominado de ângulo FP.

O FP é um parâmetro que indica a eficiência do uso da energia elétrica, sendo definido pela razão entre as potências  $P$  e  $S$  consumidas por uma carga. Essa razão fornece valores que variam entre 0 e 1, sendo 1 o valor que representa a máxima eficiência para o sistema de energia. Valores abaixo do limite estabelecido por agências regulamentadoras e concessionárias evidencia um alto consumo de energia reativa, o que pode gerar multas para

os consumidores do grupo A (fornecimento de energia elétrica em tensão igual ou superior a 2,3 kV). O excesso de energia reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a fonte de alimentação e a carga, exigindo condutores de maior secção, além de provocar perdas por aquecimentos e queda de tensão no sistema elétrico.

As cargas que fornecem energia reativa são denominadas de cargas capacitivas, como capacitores e compensadores síncronos. As que consomem energia reativa são intitulados de cargas indutivas, como transformadores, reatores e motores de indução. E as cargas que não fornecem e nem consomem energia reativa são definidas como cargas resistivas, como lâmpadas incandescentes e aquecedores elétricos (REIS, 2018).

Um baixo fator de potência pode ser corrigido seguindo a ideia do equilíbrio entre energia reativa consumida e a fornecida. Em geral, são utilizados compensadores síncronos como opostos a reativos capacitivos, e bancos de capacitores para a compensação de reativos.

### **3      NORMATIZAÇÃO, PADRONIZAÇÃO E INDICADORES DE QUALIDADE**

Neste capítulo será apresentado a normatização, padronização e indicadores de QEE aplicados no setor elétrico brasileiro (SEB), assim como uma breve análise atual e histórica deste setor.

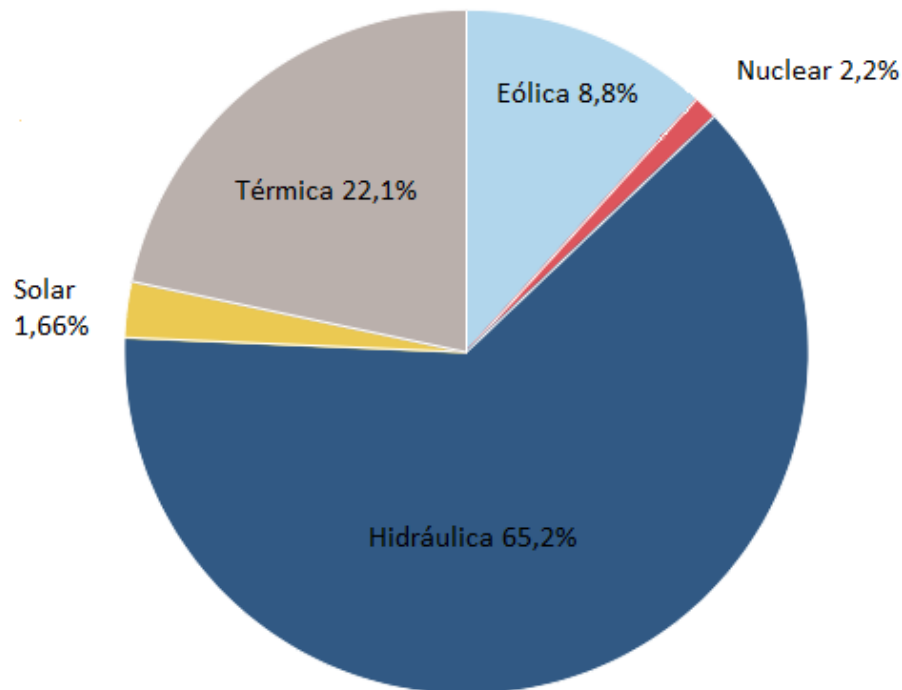
#### **3.1    SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN)**

O sistema interligado nacional (SIN) é responsável pela integralização do sistema de produção e transmissão de energia elétrica em todo território brasileiro. Atualmente, o Brasil possui um sistema de produção com capacidade instalada maior que 170 GW de potência e uma rede de transmissão de energia elétrica com cerca de 145 mil quilômetros de extensão (ONS, 2022). É um sistema com predominância de usinas hidrelétricas na produção de energia, devido aos extensos recursos hídricos. Sua operação, além de proporcionar a conexão entre as usinas geradoras e centros consumidores das distribuidoras, permite que diversas regiões exportem ou importem energia entre si, evitando que os diferentes regimes de chuvas entre regiões brasileiras afetem o suprimento de energia elétrica em nível nacional. Nos períodos do ano mais secos, em que as condições hídricas são desfavoráveis, as usinas térmicas desempenham papel estratégico no fornecimento de eletricidade. As termelétricas, localizadas nas proximidades dos centros de carga, são acionadas em períodos de estiagem, cujo armazenamento de água nas hidrelétricas é precário, assegurando o fornecimento energético do SIN.

Segundo a empresa de pesquisa energética (EPE) com a publicação do balanço energético nacional (BEN) com base no ano de 2021, cerca de 65,2% da matriz energética brasileira é composta por usinas hidrelétricas de grande e médio portes, e de pequenas centrais hidrelétricas (BEN, 2021). A participação de outras fontes na capacidade de geração de energia elétrica do Brasil é ilustrada na Figura 3.



Figura 3 - Composição da matriz elétrica brasileira 2021.



Fonte: BEN, 2021.

### 3.2 O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

A história do setor elétrico brasileiro (SEB) iniciou-se após a invenção da lâmpada por Thomas Edison em 1879, com a implementação da iluminação pública. O processo de industrialização e urbanização, no Brasil, proporcionou um grande desenvolvimento do SEB. A necessidade de suprir a demanda energética da época obrigou o Estado a investir na construção de grandes usinas hidrelétricas. A forte presença do Estado, no SEB, promoveu uma maior regulação dos serviços por meio do decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934, que formaliza o código de águas e também por meio da criação de empresas estatais. O código de águas atribui ao Estado o poder de autorizar ou conceder o aproveitamento da energia hidráulica (SILVA, 2012). No entanto, crises econômicas e a intensificação dos diferentes regimes de chuvas entre regiões brasileiras, deram início aos desafios no fornecimento de energia elétrica, gerando a necessidade da criação de um modelo que melhorasse a eficiência do setor. Nesse contexto, um projeto de reestruturação do setor elétrico elaborou mudanças institucionais e operacionais baseadas na ideologia de Estado regulador e não executor. Essas mudanças promoveram a desverticalização do SEB (segregação das atividades de geração,

transmissão e distribuição), a privatização de empresas estatais e a concorrência no mercado do setor elétrico (ARAÚJO, 2019). Portanto, o novo modelo de coordenação das políticas públicas para regulação, operação e expansão do SEB foi constituído por sete órgãos, conforme:

1. O conselho nacional de política energética (CNPE): Órgão de assessoramento à Presidência da República responsável pela elaboração das políticas públicas e diretrizes a respeito do suprimento dos recursos energéticos a todo território nacional.
2. O ministro de minas e energia (MME): Órgão sobre responsabilidade do governo federal, encarregado pela condução do planejamento e da implementação das políticas energéticas do país.
3. O comitê de monitoramento do setor elétrico (CMSE): Órgão criado para acompanhar e avaliar a continuidade e a segurança do suprimento elétrico do país, coordenado pelo MME.
4. A EPE: Órgão vinculado ao MME com finalidade de elaborar estudos e pesquisas orientadas para o subsídio do planejamento do setor energético.
5. A ANEEL: Órgão de regulamentação e fiscalização da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica.
6. A CCEE: Órgão sob regulação e fiscalização da ANEEL, que reúne empresas e instituições para viabilizar a compra e venda de energia elétrica, bem como sua contabilização e liquidação.
7. O operador nacional do sistema elétrico (ONS): Órgão responsável por operar, supervisionar e controlar a geração e transmissão de energia do SIN e da rede básica do território brasileiro.

Dentre os órgãos, destacam-se a ANEEL e o ONS como os principais órgãos contribuintes na elaboração das disposições referentes às conformidades gerais da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

No âmbito da QEE a ANEEL define por meio PRODIST os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição. Já o ONS por meio dos procedimentos de rede (PROREDE) apresenta os critérios e requisitos a serem atendidos por instalações que contenham elementos cujas características não lineares ou especiais possam comprometer o desempenho da rede básica.

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL (PRODIST)

A ANEEL, em 2008, publicou o documento nomeado de PRODIST para estabelecer normas e padrões referentes às atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Atualmente o PRODIST contém onze módulos, sendo o módulo 8 o responsável por estabelecer os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica, no que se refere à qualidade do produto, à qualidade do serviço e à qualidade comercial. O módulo 8 do PRODIST é subdividido em 4 seções: a primeira seção trata a respeito da qualidade do produto, definindo sua terminologia, caracterizando os fenômenos e estabelecendo os indicadores e limites de referência; a segunda seção refere-se à qualidade do serviço e define os limites e os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e de atendimento às ocorrências emergenciais aos conjuntos de unidades consumidoras; a terceira seção é responsável pela qualidade comercial, definindo os procedimentos para a contabilização dos indicadores de reclamações e cumprimentos dos prazos, e estabelece a metodologia dos limites do indicador de frequência equivalente de reclamações (FER); a quarta seção estabelece as condições de acompanhamento da segurança do trabalho e das instalações.

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE REDE (PROREDE)

O PROREDE são documentos elaborados pelo ONS compostos por regras destinadas às atividades de coordenação e controle operacional da geração e da transmissão de energia elétrica dos integrantes do SIN.

A ANEEL, em 2020, aprovou a nova estrutura do PROREDE que passou a ser dividida em nove módulos: relacionamento com os agentes; critérios e requisitos; planejamento da operação; programação da operação; operação do sistema; avaliação da operação; integração de instalações; administração dos contratos e contabilização financeira; indicadores.

Os submódulos 2.9 (requisitos mínimos de QEE para acesso ou integração à rede básica) e o 9.7 (indicadores de QEE da rede básica) são responsáveis por estabelecer os procedimentos relativos à QEE.

### 3.4.1 Indicadores de qualidade de energia elétrica

Para desenvolvimento deste trabalho foram levados em consideração os indicadores de QEE referentes ao contexto de qualidade do produto (seção 1 do módulo 8 do PRODIST), com destaque aos fenômenos, parâmetros e valores de referência quanto à tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência.

Os indicadores de QEE abordados neste capítulo estão em conformidade, também, com os valores estabelecidos no PROREDE do ONS.

#### 3.4.1.1 Tensão em regime permanente

A conformidade da tensão em regime permanente é quantificada por meio de indicadores do valor da tensão medida ou de leitura (TL), em relação aos níveis de referência da tensão nominal (TN). Os níveis de referência sumarizados na Tabela 2 classificam o valor da TL em relação a TN como adequados, precários e críticos, conforme estabelecido no módulo 8 do PRODIST. A medição da TL utiliza os valores da tensão eficaz de fase, integralizados em intervalos de 10 minutos, durante 168 horas, obtendo-se 1008 leituras válidas.

Tabela 2 - Classificação da tensão de leitura em função da tensão nominal.

Tensão nominal - TN (kV)	Classificação da tensão de atendimento em regime permanente		
	Adequada	Precária	Crítica
$TN \geq 230$	$0,95TN \leq TL \leq 1,05TN$	$0,93TN \leq TL < 0,95TN$ $1,05TN < TL \leq 1,07TN$	$TL < 0,93TN$ $TL > 1,07TN$
$69 \leq TN < 230$	$0,95TN \leq TL \leq 1,05TN$	$0,90TN \leq TL < 0,95TN$ $1,05TN < TL \leq 1,07TN$	$TL < 0,90TN$ $TL > 1,07TN$
$1 < TN < 69$	$0,93TN \leq TL \leq 1,05TN$	$0,90TN \leq TL < 0,93TN$	$TL < 0,90TN$ $TL > 1,05TN$

Fonte: PRODIST, 2021.

Os indicadores que avaliam a tensão em regime permanente são denominados como duração relativa da transgressão de tensão precária (*DRP*) e a duração relativa da transgressão de tensão crítica (*DRC*). O cálculo dos indicadores *DRP* e *DRC* é realizado conforme:

$$DRP(\%) = \frac{NLP}{NL} 100, \quad (1)$$

$$DRC(\%) = \frac{NLC}{NL} 100, \quad (2)$$

em que *NLP* representa o número de leituras precárias, *NLC* o número de leituras críticas e *NL* o número de leitura total (1008).

#### 3.4.1.2 Fator de potência

O valor do *FP* medido no ponto de conexão às instalações de transmissão deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências *P* e *Q* ou em termos das energias ativa (*EA*) e reativa (*ER*), como segue:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}, \quad (3)$$

$$FP = \frac{EA}{\sqrt{EA^2+ER^2}}. \quad (4)$$

No módulo 8 do PRODIST, a ANEEL estabelece para as unidades consumidoras do GRUPO A (tensão de fornecimento  $\geq 2,3$  kV) ou ponto de conexão entre distribuidoras com nível da tensão inferior a 230 kV, os limites para o valor do *FP*. Segundo a ANEEL, o *FP* no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1 indutivo ou 1 e 0,92 capacitivo.

Para centrais geradoras (eólicas ou fotovoltaicas) o ONS estabelece no submódulo 2.10 (requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão) do PROREDE que estas devem operar, independentemente do nível de tensão, com valores de *FP* entre 0,95 a 1 indutivo ou 0,95 a 1 capacitivo.

### 3.4.1.3 Distorção harmônica de tensão

Os indicadores de distorções harmônicas que causam deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental são sintetizados na Quadro 1, seguidos de suas respectivas simbologias.

Quadro 1 - Indicadores de distorções harmônicas de tensão.

Descrição	Simbologia
Distorção harmônica individual de tensão de ordem $h$	$DHIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DHTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DHTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DHTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DHTT_3\%$
Valor do indicador $DHTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DHTT_{95\%}$
Valor do indicador $DHTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DHTT_{p,95\%}$
Valor do indicador $DHTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DHTT_{i,95\%}$
Valor do indicador $DHTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DHTT_{3,95\%}$

Fonte: PRODIST, 2021.

O cálculo dos indicadores de distorção harmônica  $DHIT_h\%$ ,  $DHTT\%$ ,  $DHTT_p\%$ ,  $DHTT_i\%$  e  $DHTT_3\%$  é definido como segue (PRODIST, 2021):

$$DHIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} 100, \quad (5)$$

$$DHTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} 100, \quad (6)$$

$$DHTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} 100, \quad (7)$$

$$DHTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} 100, \quad (8)$$

$$DHTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_3} V_h^2}}{V_1} 100, \quad (9)$$

em que  $V_h$  representa a tensão harmônica de ordem  $h$ ; o  $h$  é a ordem harmônica individual;  $V_1$  representa a tensão fundamental medida;  $h_{m\acute{a}x}$  é a ordem harmônica máxima;  $h_p$  são as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3;  $h_i$  são as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3;  $h_3$  as ordens harmônicas múltiplas de 3.

Os limites de referência para os indicadores de distorções harmônicas totais correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema elétrico. Esses valores estão indicados na Tabela 3 conforme estabelecido no módulo 8 do PRODIST.

Tabela 3 - Limites para a avaliação dos indicadores *DHTT* em função da tensão nominal.

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )		
	$V_n \leq 2,3$ kV	$2,3$ kV $< V_n < 69$ kV	$69$ kV $\leq V_n < 230$ kV
<b><i>DHTT</i><sub>95%</sub></b>	10,0%	8,0%	5,0%
<b><i>DHTT</i><sub>p</sub>95%</b>	2,5%	2,0%	1,0%
<b><i>DHTT</i><sub>i</sub>95%</b>	7,5%	6,0%	4,0%
<b><i>DHTT</i><sub>3</sub>95%</b>	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: PRODIST, 2021.

#### 3.4.1.4 Desequilíbrio de tensão

A diferença verificada nas amplitudes entre as tensões de fase das três fases de um sistema elétrico trifásico é quantificada pelo fator de desequilíbrio de tensão (*FD%*). O indicador *FD%* exprime a relação entre as componentes da tensão de sequência negativa ( $V_-$ ) e a positiva ( $V_+$ ) e são definidos conforme:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100, \quad (10)$$

ou

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}}, \quad (11)$$

sendo  $\beta$  obtido como segue:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}, \quad (12)$$

em que  $V_-$  representa a magnitude da tensão de sequência negativa;  $V_+$  a magnitude da tensão de sequência positiva;  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  representam as magnitudes das tensões de linha.

O desequilíbrio de tensão é avaliado a partir da comparação do indicador  $FD95\%$  com os limites definidos na Tabela 4, conforme estabelecido no módulo 8 do PRODIST. Esse indicador representa o valor de  $FD\%$  que foi superado em apenas 5% das medições.

Tabela 4 - Limites para a avaliação do indicador  $FD$  em função da tensão nominal.

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )	
	$V_n \leq 2,3$ kV	$2,3\text{kV} < V_n < 230$ kV
<b><math>FD95\%</math></b>	3,0%	2,0%

Fonte: PRODIST, 2021.

#### 3.4.1.5 Flutuação de tensão

A variação dos valores eficaz ou de pico da tensão, bem como a qualidade da tensão do sistema, é determinada com base nos indicadores de flutuação de tensão  $P_{st}$ ,  $P_{lt}$  e o  $P_{st}95\%$ . A determinação desses indicadores avalia o grau de incômodo causado pelo efeito de cintilação luminosa ao olho humano.

O indicador  $P_{st}$  corresponde aos níveis de cintilação luminosa da flutuação de tensão analisada em um período contínuo de 10 minutos, sendo calculado conforme:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}}, \quad (13)$$

em que  $P_i$  ( $i = 0,1; 1; 3; 10; 50$ ) representa o nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante  $i\%$  do tempo.

O indicador  $P_{lt}$  corresponde a 12 amostras consecutivas de  $P_{st}$  num período contínuo de 2 horas, sendo calculado conforme:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st_i})^3}, \quad (14)$$



O indicador  $P_{st}95\%$  representa o valor do indicador  $P_{st}$  que foi superado em 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), tendo seus limites definidos na Tabela 5 conforme estabelecido no módulo 8 do PRODIST.

Tabela 5 - Limites para a avaliação do indicador  $P_{st}$  em função da tensão nominal.

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )		
	$V_n \leq 2,3$ kV	$2,3$ kV < $V_n$ < 69kV	$69$ kV $\leq V_n$ < 230 kV
$P_{st}95\%$	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: PRODIST, 2021.

O módulo 8 do PRODIST não estabelece limites para o indicador  $P_{lt}95\%$  que representa o valor do indicador  $P_{lt}$  que foi superado em 5% dos registros obtidos no período de 1 semana (7 dias) completos e consecutivos. No entanto, o ONS estabelece no submódulo 2.9 (requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à rede básica) do PROREDE os limites globais para os indicadores  $P_{st}$  e  $P_{lt}$  em função do fator de transferência ( $FT$ ) entre o barramento sob avaliação e o barramento da rede secundária de distribuição, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Limites para a avaliação do indicador  $P_{st}D95\%$  e  $P_{lt}S95\%$  em função de  $FT$ .

Indicador	Limite global inferior	Limite global superior
$P_{st}D95\%$	1 pu / $FT$	2 pu / $FT$
$P_{lt}S95\%$	0,8 pu / $FT$	1,6 pu / $FT$

Fonte: PROREDE, 2020.

A Tabela 7 apresenta os valores do  $FT$  em função da tensão nominal do barramento sob avaliação.

Tabela 7 - Valores de  $FT$  em função da tensão nominal.

	Tensão nominal ( $V_n$ )		
	$V_n < 69$ kV	$69$ kV $\leq V_n$ < 230 kV	$230$ kV $\leq V_n$
$FT$	1,0 pu	0,8 pu	0,65 pu

Fonte: PROREDE, 2020.

### 3.4.1.6 Variação de tensão de curta duração

A variação de tensão de curta duração (VTCD) é avaliada a partir dos desvios significativos da amplitude do valor eficaz ou *RMS* da tensão fase-neutro e o intervalo de tempo de duração do evento (inferior a 1 minuto). A partir dos parâmetros de amplitude e duração, as VTCD são classificadas de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação da VTCD.

<b>Tipo de VTCD</b>	<b>Duração da VTCD</b>	<b>Amplitude da VTCD (em relação a nominal)</b>
Interrupção momentânea de tensão ( <b>IMT</b> )	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 pu
Afundamento momentâneo de tensão ( <b>AMT</b> )	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação momentânea de tensão ( <b>EMT</b> )	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 pu
Interrupção temporária de tensão ( <b>ITT</b> )	Superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto	Inferior a 0,1 pu
Afundamento temporário de tensão ( <b>ATT</b> )	Superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação temporária de tensão ( <b>ETT</b> )	Superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto	Superior a 1,1 pu

Fonte: PRODIST, 2021.

A análise da QEE quanto à VTCD, além dos parâmetros de amplitude e duração máxima, é realizada também por meio da contabilização da frequência de ocorrência do evento aleatório de tensão em termos de amplitude e duração da elevação e afundamentos.

### 3.4.1.7 Variação de frequência

Os indicadores de QEE que avaliam um sistema quanto à variação da frequência são estabelecidos como desempenho da frequência em distúrbios (DFD) e desempenho da frequência em regime permanente (DFP).

Por definição, as instalações conectadas ao sistema devem, em condições normais de variação de carga e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência entre 59,9

Hz e 60,1 Hz. Os desvios na frequência instantânea em relação ao valor nominal não poderão exceder a 0,1 Hz para mais ou para menos, para o indicador DFP (PRODIST, 2021).

Em condições extremas, sob a ocorrência de distúrbios no sistema a frequência instantânea não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz. A Tabela 9 apresenta os limites de tempo máximo de exposição a desvios de frequência para o indicador DFD conforme estabelecido no módulo 8 do PRODIST.

Tabela 9 - Limites para a avaliação do indicador DFD.

<b>Indicador DFD</b>	<b>Tempo máximo de exposição a desvios de frequência (segundos)</b>
$63,5 \text{ Hz} < f \leq 66,0 \text{ Hz}$	30,0
$62,0 \text{ Hz} < f \leq 63,5 \text{ Hz}$	150,0
$60,5 \text{ Hz} < f \leq 62,0 \text{ Hz}$	270,0
$58,5 \text{ Hz} \leq f < 59,5 \text{ Hz}$	390,0
$57,5 \text{ Hz} \leq f < 58,5 \text{ Hz}$	45,0
$56,5 \text{ Hz} \leq f < 57,5 \text{ Hz}$	15,0

Fonte: PRODIST, 2021.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia empregada na análise dos indicadores de QEE, desde a conexão do medidor de energia à coleta de dados das grandezas elétricas.

### 4.1 O EMPREENDIMENTO

A planta eólica, localizado no norte do estado da Bahia, compõe um complexo eólico formado por outras 7 plantas eólicas que totalizam 107 unidades geradoras cuja potência instalada total é de 247,45 MW, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Potência instalada das eólicas.

<b>Plantas</b>	<b>Unidades</b>	<b>Modelos</b>	<b>Potência (MW)</b>
Eólica 1	14	E92 (2,35 MW)	32,9
Eólica 2	14	E92 (2,35 MW)	32,9
Eólica 3	14	E92 (2,35 MW)	32,9
Eólica 4	14	E92 (2,35 MW)	32,9
Eólica 5	11	E92 (2,35 MW)	25,85
Eólica 6	6	V90 (3,0 MW)	30,0
	6	V100 (2,0 MW)	
Eólica 7	4	V90(3,0 MW)	30,0
	9	V100 (2,0 MW)	
Eólica 8	15	V100 (2,0 MW)	30,0

Fonte: Autoria própria.

Os modelos E92, V90 e V100 representam aerogeradores fabricados por diferentes empresas, por exemplo, o modelo E92 representa o aerogerador fabricado pela *Wobben*, empresa alemã, com potência nominal de 2,35 MW; V90 representa o fabricado pela *Vestas*, empresa dinamarquesa, com potência nominal de 3 MW; V100 descreve o modelo, também, fabricado pela *Vestas*, cuja potência nominal é de 2 MW.

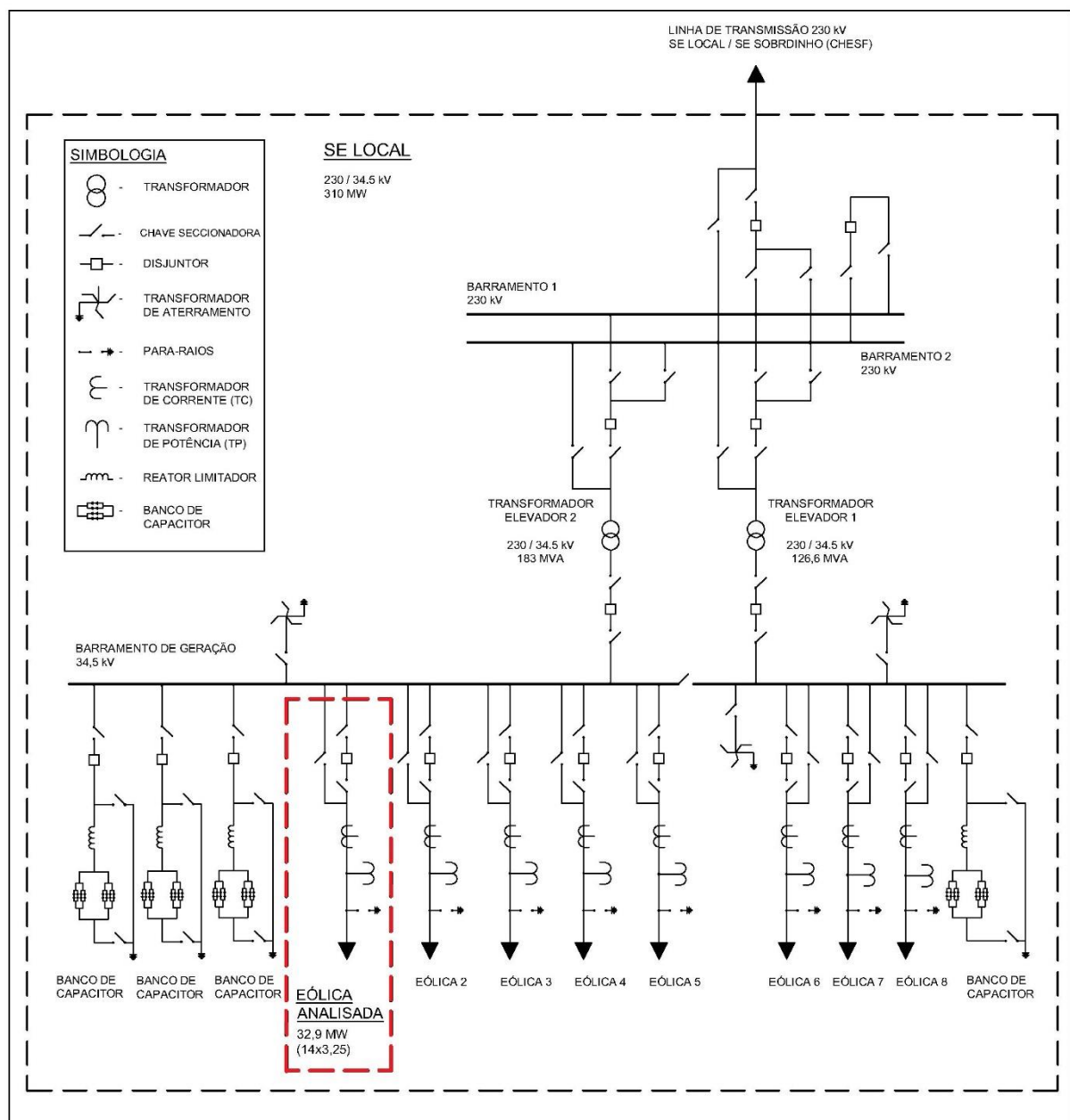
A energia gerada pelos aerogeradores da planta eólica é entregue a rede elétrica de distribuição, cujo nível de tensão é da ordem de 34,5 kV. A rede de distribuição é conectada ao barramento também de 34,4 kV da subestação (SE) elevadora do empreendimento, a qual é composta por 2 bancos de transformadores monofásicos de 126,6 MVA (3x42,2) e 183 MVA (3x61), ambos de 34,5 kV no lado de baixa e 230 kV no lado de alta tensão. Conectado ao barramento de 34,5 kV, a SE possui 1 banco de capacitor cuja potência é de 9 MVar e 3 de

bancos de 25 MVar. A energia gerada pelo complexo eólico é elevada de 34,5 para 230 kV e transmitida para a SE-Sobradinho, que por sua vez é integrada ao SIN.

O presente trabalho aborda a análise da QEE fornecida pela planta eólica 1 que possui 14 aerogeradores, todos do modelo E92, gerando cerca de 32,9 MW, representando cerca de 0,01765% da potência instalada do SIN.

A Figura 4 ilustra o diagrama unifilar com os principais elementos que compõem a SE do complexo eólico.

Figura 4 - Diagrama unifilar da subestação.



Fonte: Autoria própria.

## 4.2 ESPECIFICAÇÃO DO MEDIDOR

Para realizar a análise da QEE do empreendimento, foi utilizado o analisador de energia *PowerLogic*®, modelo ION7650, fabricado pela empresa *Schneider Electric*, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - *PowerLogic*® ION7650.



Fonte: Schneider Electric, 2019.

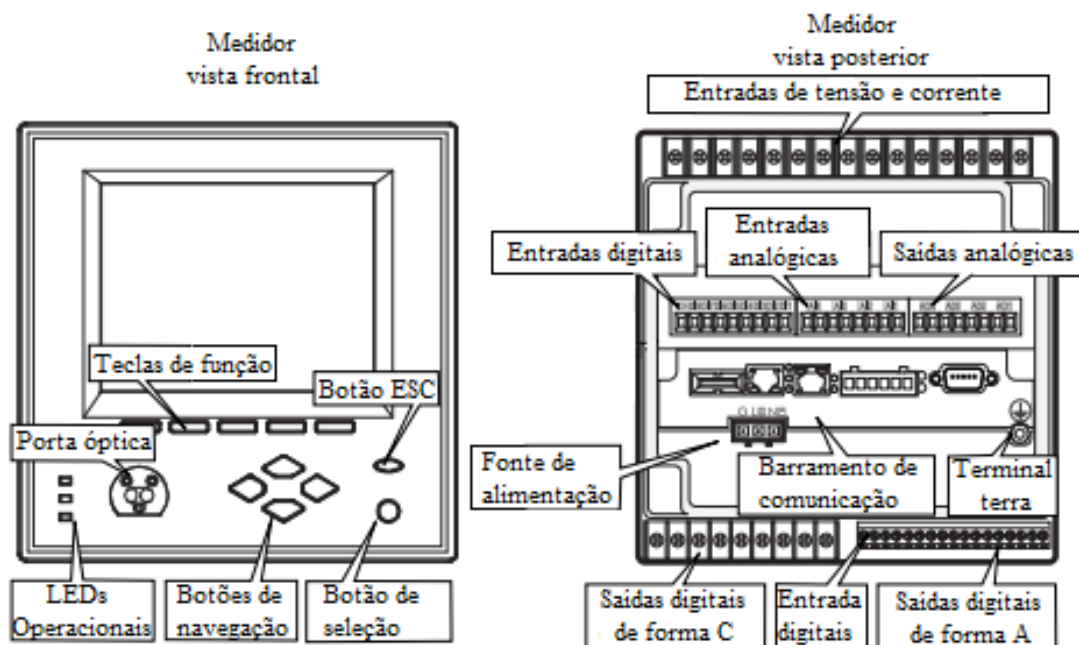
As principais características do medidor, segundo manual do fabricante *Schneider Electric*, são descritas a seguir:

- Medidor digital microprocessado com 4 entradas de tensão (até 600 V) e 5 de corrente (5 A);
- Interfaces de comunicação: duas no padrão RS-485 e uma ótica no painel frontal.
- Interface *Ethernet* opcional;
- Oito entradas digitais para contagem de pulsos, verificação de estado e gatilho de funções.

- Sete saídas digitais para funções de controle e telecomando, sendo duas por relés eletromecânicos e quatro por relés de estado sólido;
- Display *LCD* com *backlight*.
- Memória de dados com registro com intervalos de até 5 milissegundos.
- Alimentação de 84 a 270 V (CA) ou 110 a 300 V (CC) com seleção automática;
- Funções de medição: tensão; corrente; potência; fator de potência; frequência; energia; demanda; distorção harmônica; transitórios; *flicker*; picos e afundamentos de tensão (*sag* e *swell*) e registro de medições e eventos.
- Protocolos de comunicação ION, DNP-3.0 e MODBUS RTU;

A seguir será apresentada uma visão geral do medidor, ilustrada na Figura 6, em que é descrito cada um dos botões e portas encontrados no lado frontal, e as entradas de tensão e corrente, terminais de entrada e saída de sinais elétricos, e portas de comunicação encontradas no lado posterior.

Figura 6 - Visão geral do *PowerLogic®* ION7650.

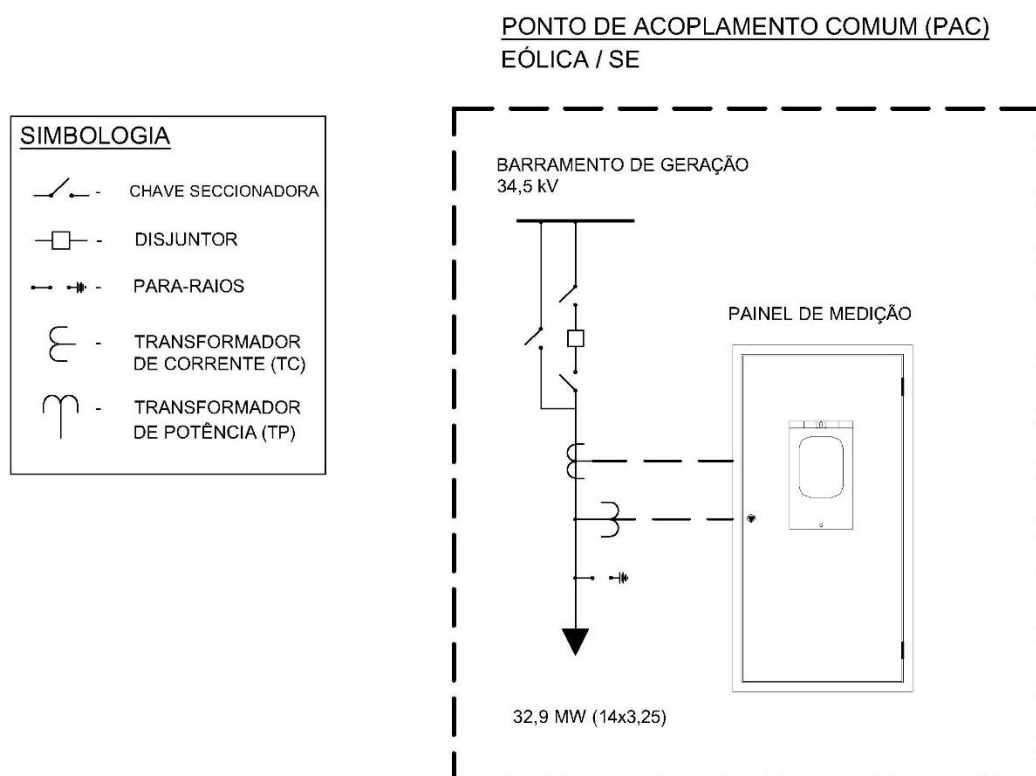


Fonte: Schneider Electric, 2019.

### 4.3 INSTALAÇÃO DO MEDIDOR

Instalado no painel de medição de faturamento da produção do parque eólico, o ION7650 é conectado ao ponto de acoplamento comum (PAC) da planta eólica com a SE (barramento de geração de 34,5 kV) por meio de transformadores de potencial (TP's) e transformadores de corrente (TC's), conforme Figura 7.

Figura 7 - Diagrama unificar PAC.

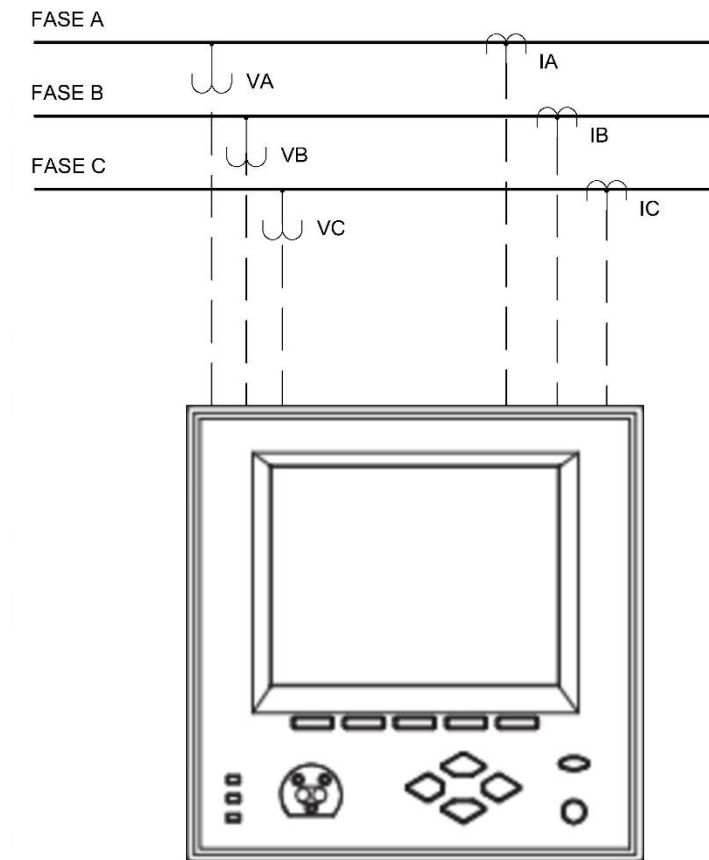


Fonte: Autoria própria.

O medidor fornece indicadores de QEE a partir dos valores aferidos pelos TP's e TC's, que têm a função de reduzir os valores de tensão e corrente elétrica para valores padronizados e que podem ser conectados nos medidores e nos relés de proteção. A Figura 8 ilustra a conexão do analisador de energia ao painel de medição.



Figura 8 - Conexão do medidor ao painel de medição.



Fonte: Schneider Eletric, 2019.

Na Figura 9 é apresentada uma fotografia real do painel e das conexões dos terminais de tensão e corrente (oriundos de TP's e TC's), cabo *Ethernet*, terminal de aterramento e alimentação do medidor, conforme descrito anteriormente na seção 4.2.

Figura 9 - Conexões reais do medidor / painel de medição.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 REGISTRO E COLETA DE DADOS DE MEDIÇÃO

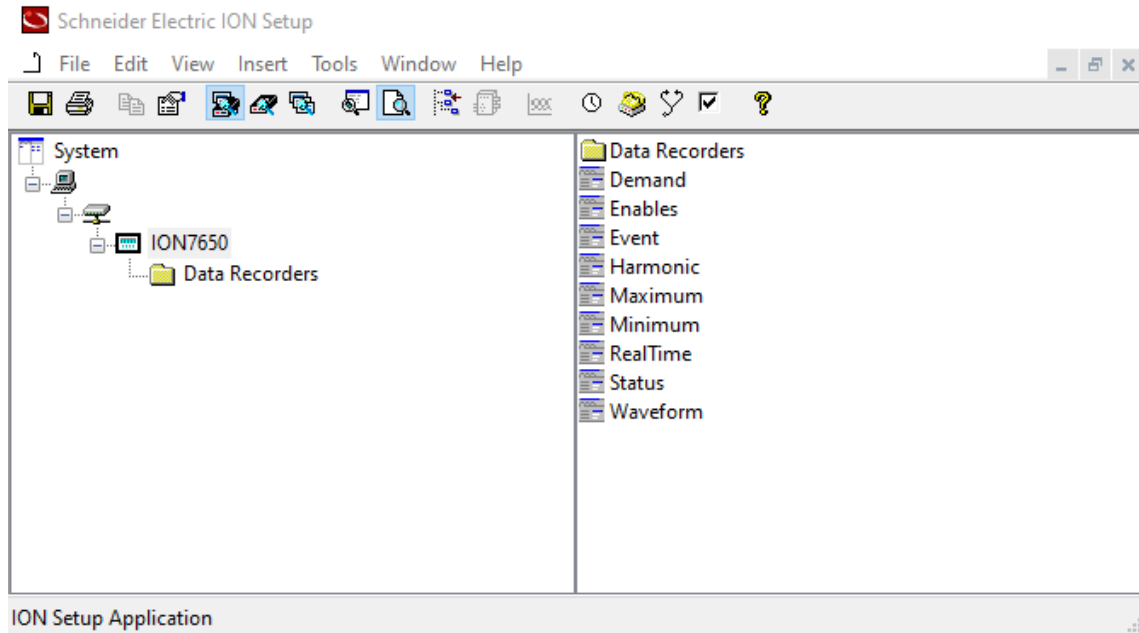
O medidor de energia utilizado cuja parametrização é destinada a princípio para o registo da produção de energia elétrica da planta eólica na CCEE, também permite ser configurado para obtenção do conjunto de leituras necessárias para gerar os indicadores de QEE.

A análise dos indicadores de QEE produzida pelo empreendimento foi realizada entre os dias 17/12/2021 às 00h00min e 24/12/2021 às 00h00min, por meio dos registros de medições disponíveis na memória do equipamento com períodos de integralização de 15 minutos.

Para a obtenção das leituras das grandezas elétricas, armazenadas na memória do medidor, foi utilizado o *software ION Setup* fabricado pela *Schneider Electric*. O *ION Setup* é uma ferramenta de configuração que fornece um ambiente virtual para configurar, verificar e acessar de maneira remota os medidores *PowerLogic* da *Schneider Electric*, conforme

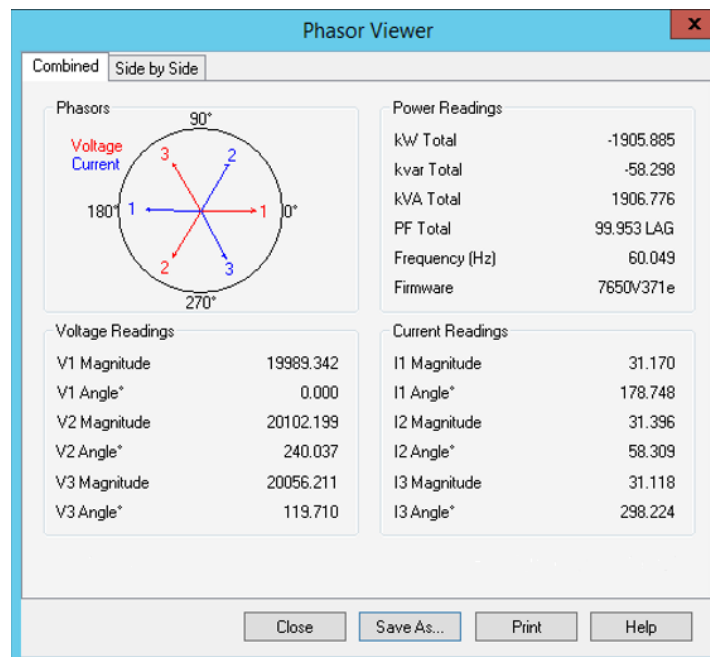
apresentado na Figura 10. Também é possível verificar alguns parâmetros de medição em tempo real, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 10 - Ambiente virtual do medidor no *ION Setup*.



Fonte: Autoria própria.

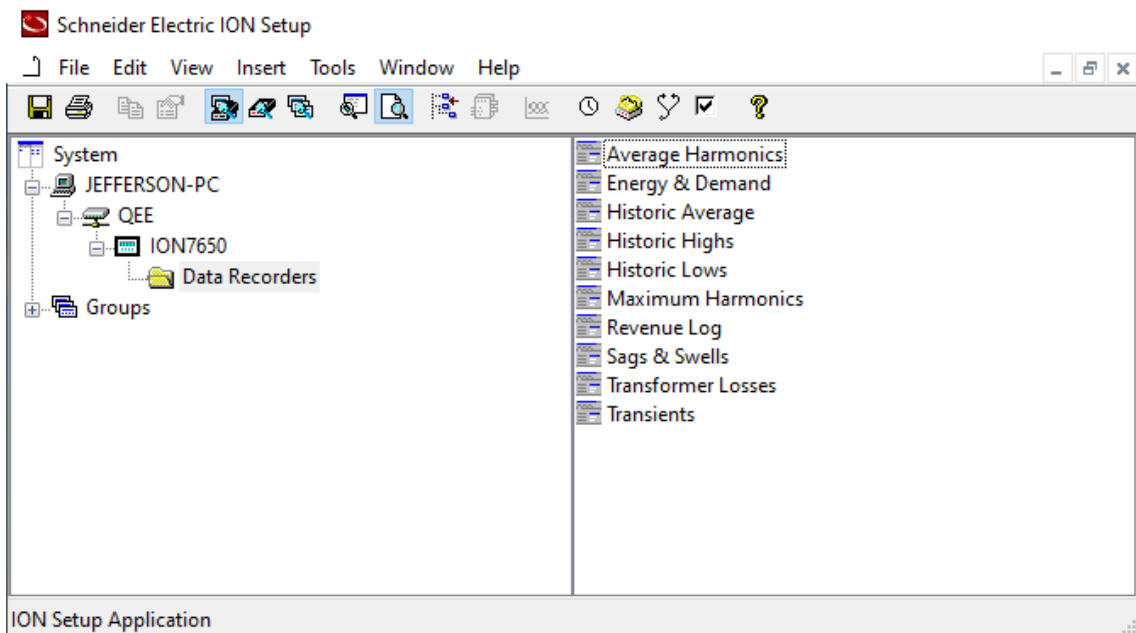
Figura 11 - Registro em tempo real.



Fonte: Autoria própria.

Acessando os registros salvos na memória do ION7650 na pasta *Data Recorders* é possível exportar os dados e registros de eventos em formato .csv, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - *Data Recorders ION Setup*



Fonte: Autoria própria.

Os arquivos em formato .csv são exportados para um computador para o tratamento dos dados utilizando o *software* Excel fabricado pela Microsoft. Após exportar os dados de tensão em regime permanente, *DHT*, *FP*, frequência, desequilíbrio e flutuação de tensão, a análise dos indicadores de QEE foi realizada considerando parâmetros e valores de referência determinados pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST e o PROREDE pelo ONS.

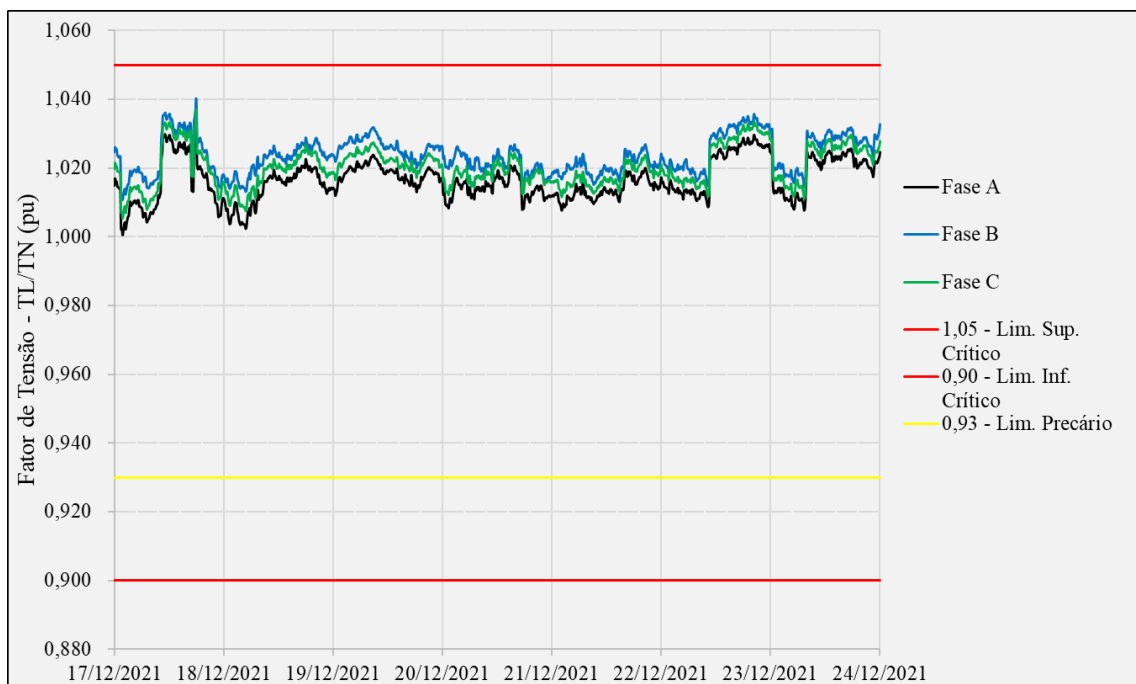
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises dos principais índices de QEE de uma planta eólica, aferidos a partir do medidor de energia ION7650 da *Schneider Electric*. Para fins de análise, o nível de tensão adotado neste capítulo como a tensão nominal foi de 34,5 kV, a tensão do barramento de geração onde encontra-se instalado o painel de medição. O registro de medição iniciou-se no dia 17/12/2021 às 00h00min, sendo finalizado no dia 24/12/2021 às 00h00min. Além disso, os valores de registro das grandezas foram integralizados em períodos contínuos de 15 minutos.

### 5.1 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

A Figura 13 ilustra o fator de tensão (relação entre a tensão de leitura (TL) e a tensão nominal (TN)) das fases A, B e C em regime permanente.

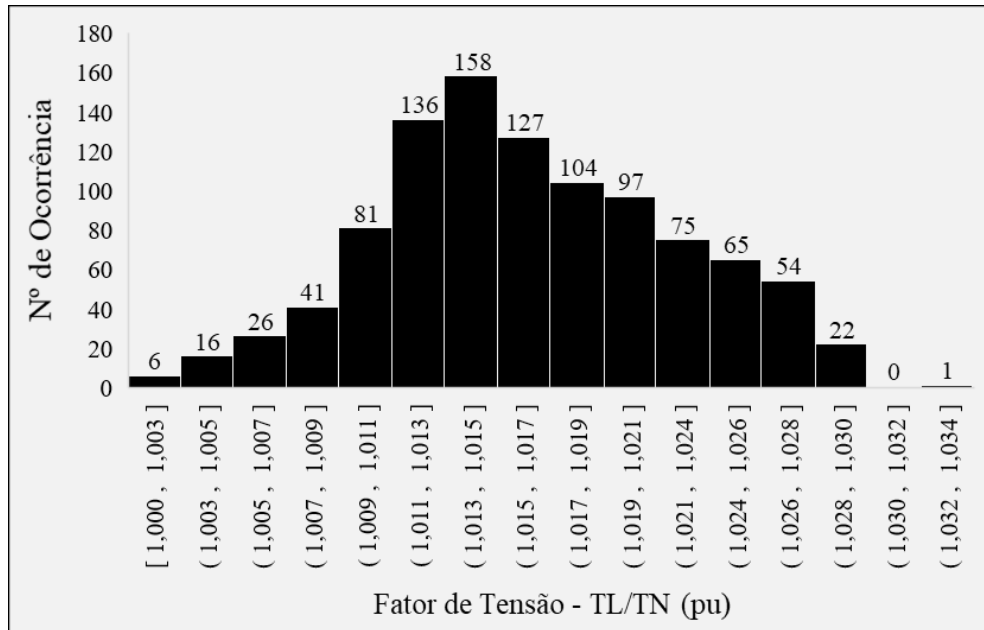
Figura 13 - Tensão em regime permanente (fases A, B e C).



Fonte: Autoria própria.

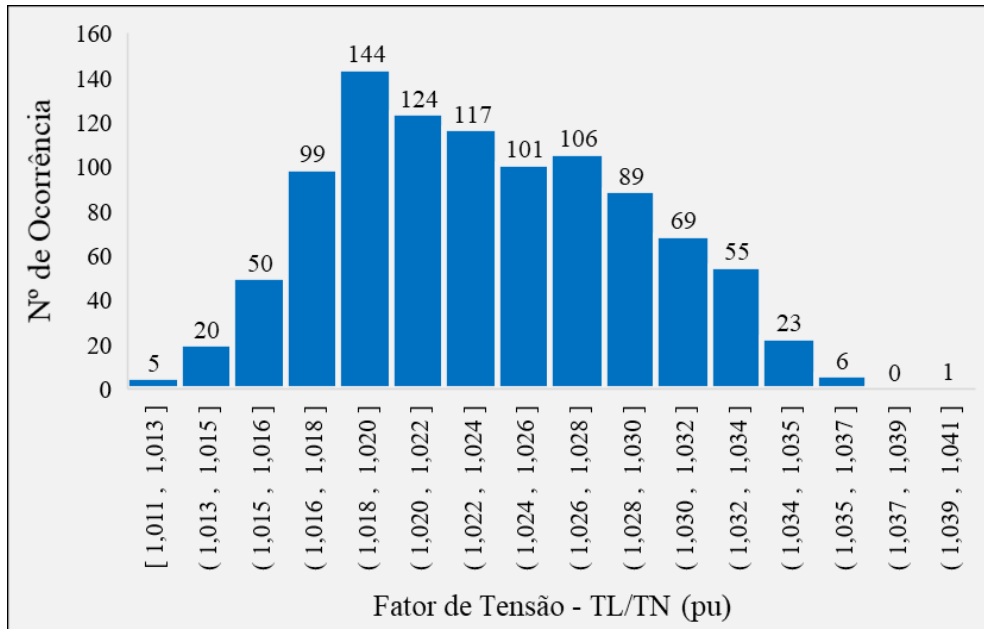
Os histogramas representados na Figura 14, 15 e 16 exibem o agrupamento do número de ocorrência da tensão de leitura em relação à tensão nominal em regime permanente, de acordo com as faixas de classificação.

Figura 14 - Histograma fase A.



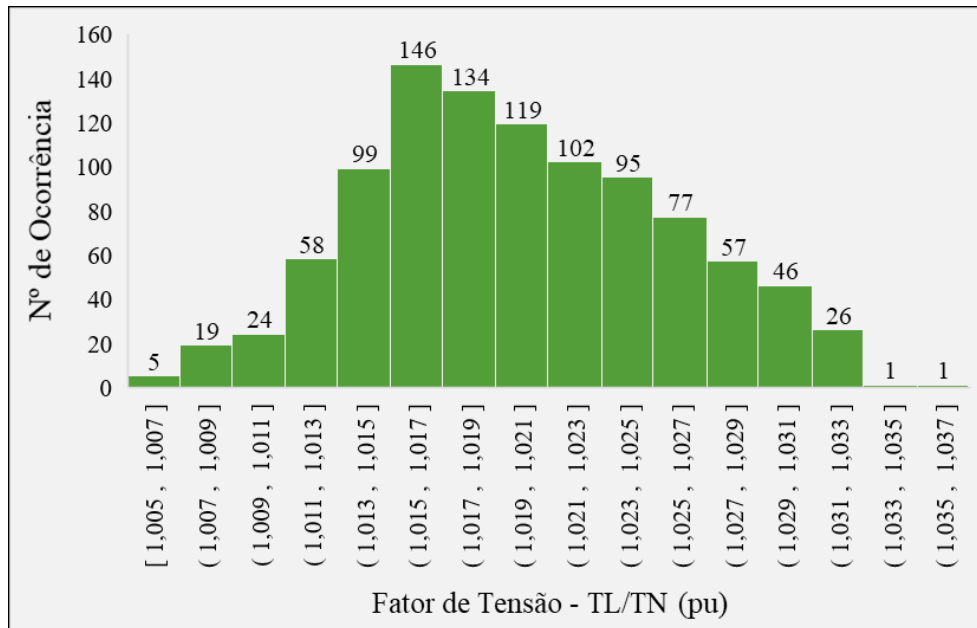
Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Histograma fase B.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Histograma fase C.



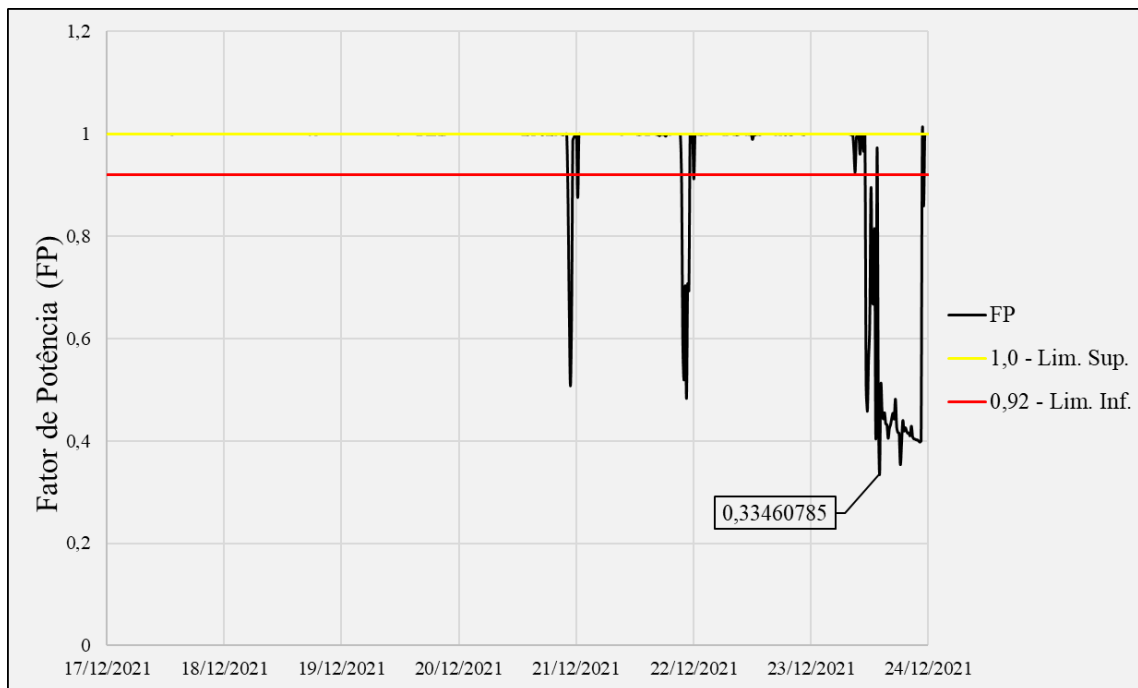
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 13 e os histogramas das Figura 14, 15 e 16 pode-se observar que os valores medidos da tensão em regime permanente estão dentro da faixa considerada como adequada, conforme os limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST para a faixa de tensão nominal da planta (34,5 kV) e sumarizados na Tabela 2. Não havendo transgressões dos limites para os valores da tensão de leitura, os índices de DRP e DRC durante todo o período de análise foram nulos.

## 5.2 FATOR DE POTÊNCIA

No que diz respeito ao FP, a Figura 17 ilustra o comportamento do FP trifásico em todo o período de medição.

Figura 17 - Fator de potência trifásico.



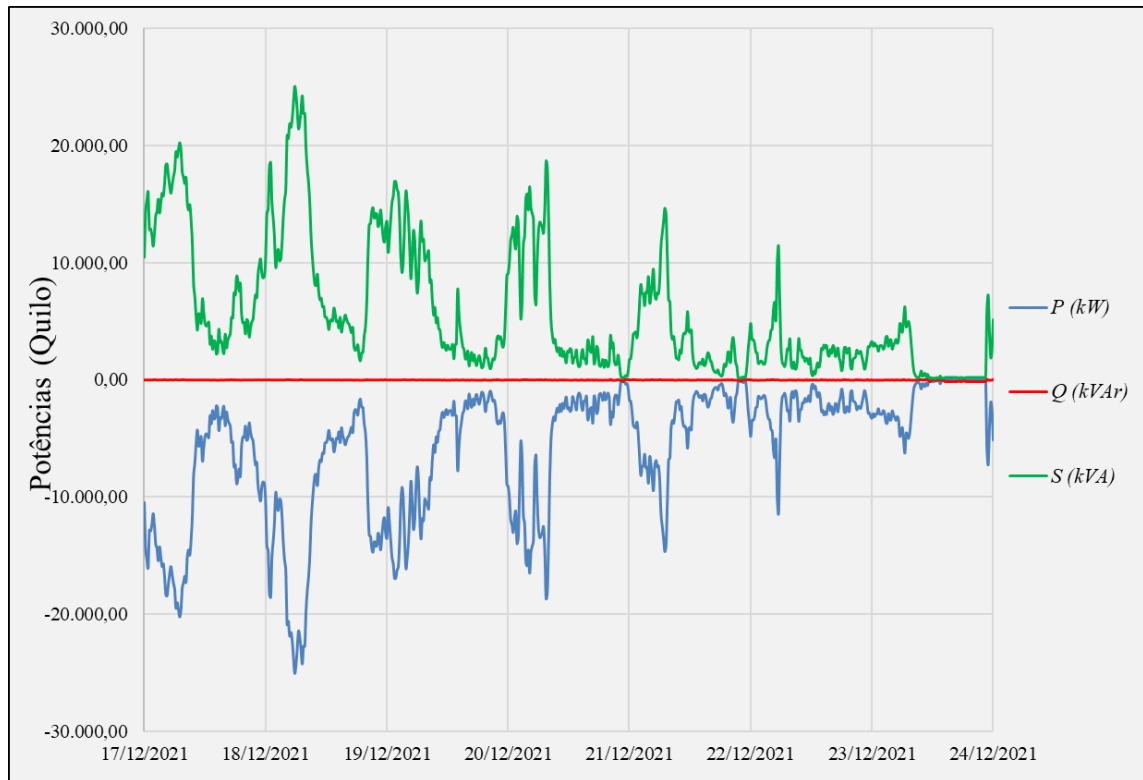
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 17, o FP entre os dias 20/12/2021 e 21/12/2021, 21/12/2021 e 22/12/2021, e 23/12/2021, apresenta valores inferiores aos limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST e submódulo 2.9 do PROREDE, conforme exposto na seção 3.4.1.2. O menor valor do FP registrado ocorreu no dia 23/12/2021, às 14h00min, atingindo aproximadamente 0,3346.

Os instantes em que o FP da instalação excedeu o limite inferior de referência pré-estabelecidos coincidem com os períodos de produção nula, conforme o comportamento das potências  $P$ ,  $Q$  e  $S$  durante o período de medição, ilustradas na Figura 18.



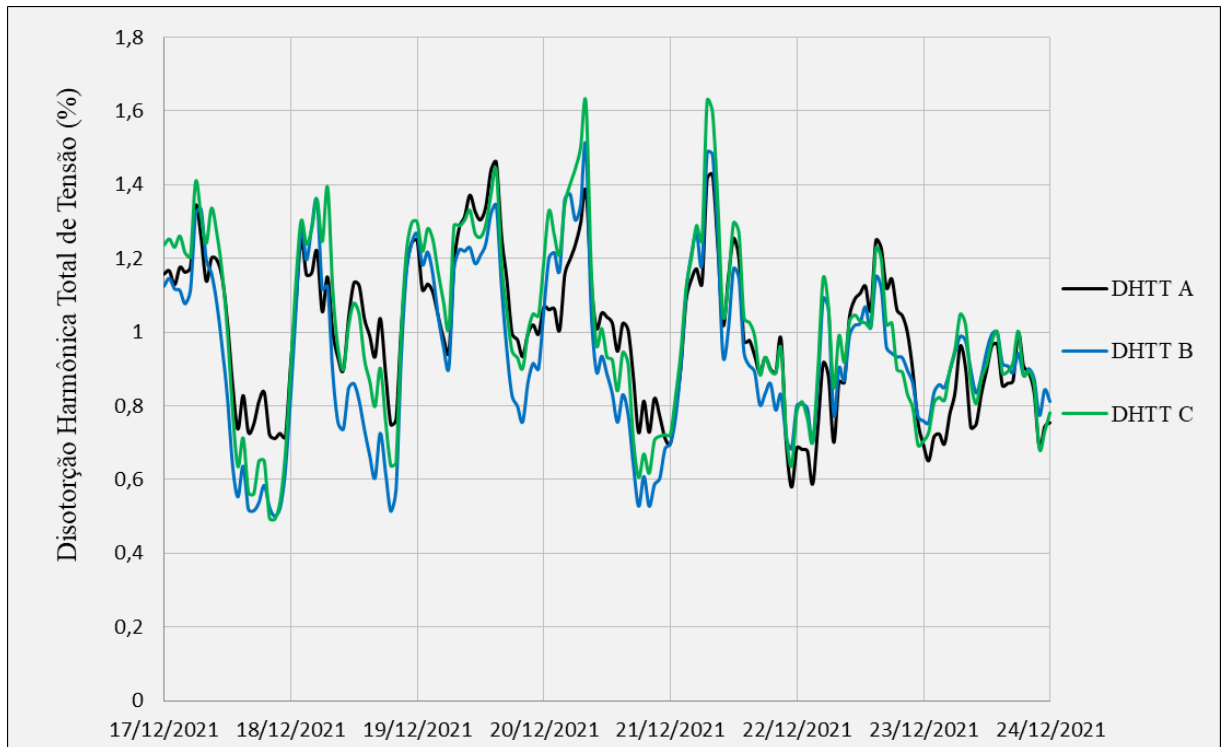
Figura 18 - Comportamento das potências ativa, reativa e aparente.



Fonte: Autoria própria.

### 5.3 DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO

Com relação aos dados de medição da distorção harmônica, a Figura 19 ilustra os valores registrados dos níveis da  $DHTT\%$  durante todo o período em análise.

Figura 19 - *DHTT%* das fases A, B e C.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 11 são sintetizados os resultados referentes ao indicador *DHTT95%* que representa o valor do indicador *DHTT%* que foi superado em apenas 5% das leituras.

Tabela 11 - Registro do indicador *DHTT%* das fases A, B e C.

Indicador	Níveis de <i>DHTT%</i>		
	Fase A	Fase B	Fase C
<i>DHTT95%</i>	1,321768%	1,329141%	<b>1,385000%</b>

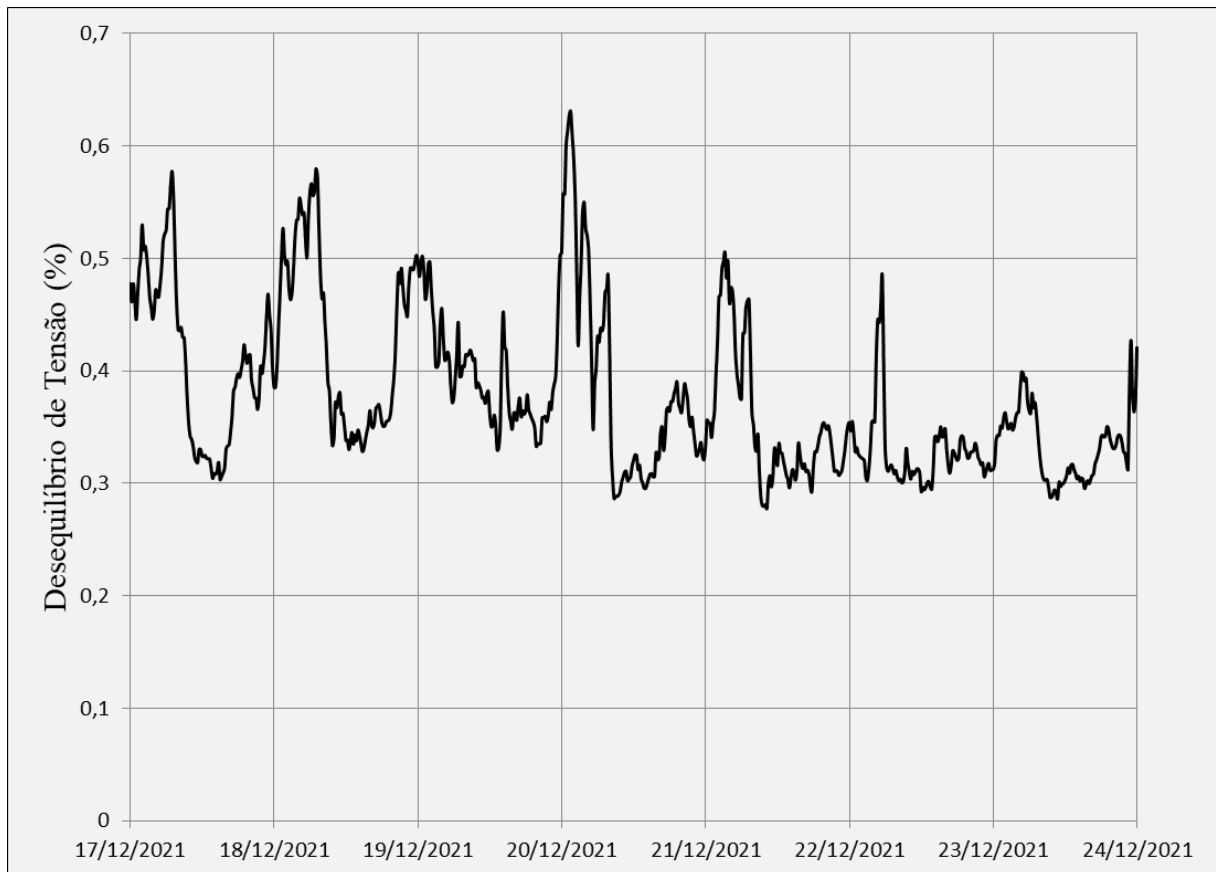
Fonte: Autoria própria.

O indicador *DHTT95%* é avaliado pelo índice global (maior valor dentre as fases A, B e C em todo o período da campanha de medição). Conforme a Tabela 11, o indicador *DHTT95%* está de acordo com o valor de referência estabelecido no módulo 8 do PRODIST, não sendo ultrapassado o limite de 8%, conforme a Tabela 3.

#### 5.4 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Referente ao desequilíbrio de tensão, a Figura 20 ilustra o resultado percentual do indicador  $FD\%$  que a diferença de amplitude entre as tensões das fases A, B e C ao longo de todo período de medição.

Figura 20 - Desequilíbrio de tensão entre as fases A, B e C.



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 12 são sintetizados os resultados referentes ao indicador  $FD95\%$  que representa o valor do indicador  $FD\%$  que foi superado em apenas 5% das leituras.

Tabela 12 - Registro do indicador  $FD95\%$ .

Indicador	Níveis de $FD\%$
$FD95\%$	0,523006%

Fonte: Autoria própria.

O indicador  $FD95\%$ , o qual representa o valor do  $FD\%$  que foi superado em apenas 5% das leituras válidas, se manteve dentro do limite estabelecido no módulo 8 do PRODIST, não sendo ultrapassado o limite de 2%, conforme a Tabela 4.

## 5.5 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

A análise dos níveis de flutuação de tensão, neste trabalho, se resume ao indicador  $P_{lt}$ , verificado em um período contínuo de 2 horas. Apesar do indicador  $P_{lt}$  ser calculado a partir dos valores do indicador  $P_{st}$ , verificado em períodos contínuos de 10 minutos, não foi possível obter os registros do indicador  $P_{st}$  devido a configuração pré-estabelecida do medidor de energia elétrica, o qual é empregado na medição de faturamento da planta eólica.

A Tabela 13 apresenta o resultado dos registros referentes ao indicador  $P_{lt}$  que quantifica os níveis de flutuação de tensão.

Tabela 13 - Registros do indicador  $P_{lt}S95\%$ .

$P_{lt}S95\%$ Fase A	$P_{lt}S95\%$ Fase B	$P_{lt}S95\%$ Fase C	$P_{lt}S95\%$
0,3350824	0,2222302	0,3737518	<b>0,3737518</b>

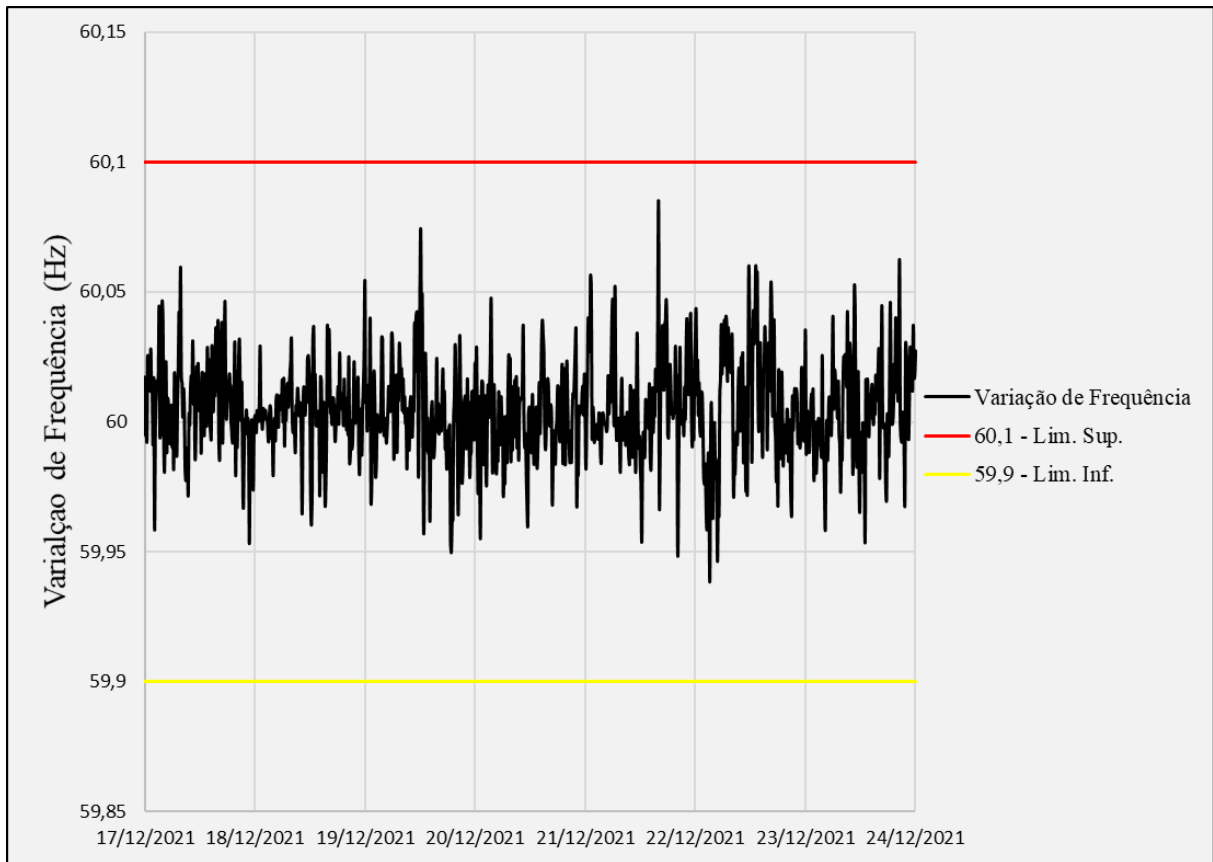
Fonte: Autoria própria.

O indicador  $P_{lt}S95\%$  que representa o valor do indicador  $P_{lt}$  que foi superado em apenas 5% das leituras é avaliado pelo índice global (maior valor dentre as fases A, B e C em todo o período da campanha de medição). De acordo com a Tabela 13, o indicador  $P_{lt}S95\%$  está em conformidade com os limites de referência estabelecidos no submódulo 2.9 do PROREDE, não sendo ultrapassado o limite global inferior de 0,8 pu, conforme a Tabela 6.

## 5.6 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

O registro do indicador  $DFP$  que avalia o desempenho da variação da frequência em termos da tensão de regime permanente está ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Variação de frequência.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 14 é apresentado os valores máximo e mínimo dos registros referentes à variação da frequência em regime permanente.

Tabela 14 - Registro dos valores máximo e mínimo do indicador DFP.

<b>Indicador</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>
<b><i>DFP</i></b>	60,082680 Hz	59,938477 Hz

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 14, concluiu-se que os valores máximo e mínimo do indicador *DFP* durante todo o período de medição estão dentro dos limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST, não sendo ultrapassados os limites entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da análise do estudo em questão e as recomendações para continuidade dos trabalhos futuros nesta área do estudo.

### 6.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma análise da QEE de uma planta eólica localizada no norte do estado da Bahia, visando contemplar os principais distúrbios fundamentados nos referenciais teóricos, normatizações, regulamentação e indicadores de qualidade. Apesar da utilização do analisador de energia elétrica previamente configurado para desempenhar a medição de faturamento do parque eólico, os valores de registro das grandezas elétricas obtidos foram satisfatórios para a apresentação de um diagnóstico capaz de evidenciar problemas relacionados à QEE. Os valores de registro das grandezas elétricas obtidos foram integralizados em períodos contínuos de 15 minutos. Foram analisados indicadores de QEE tais como tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas total de tensão, desequilíbrio de tensão e variação de frequência.

Os resultados obtidos comprovam que os valores medidos estão dentro dos limites regulamentados pelo PRODIST, com exceção do FP trifásico, que em alguns momentos apresentou valores abaixo da referência. Neste caso, um baixo fator de potência obtido está associado ao regime de produção de energia elétrica de uma planta eólica que dependendo da sazonalidade do vento da região, variando de velocidade durante o dia e estações do ano. Nos períodos de baixa velocidade do vento, a planta deixa de fornecer energia elétrica, passando a consumir uma pequena parcela de energia da rede para alimentação de cargas com características indutivas (por exemplo, transformadores e motores de posicionamento dos aerogeradores). Neste caso a parcela de energia reativa é superior à energia ativa, fazendo com que o FP trifásico da instalação assuma valores abaixo dos limites de referência. No entanto, a planta eólica possui bancos de capacitores instalados na subestação para a compensação de reativo, ficando a critério do ONS a solicitação de controle.

Os indicadores de variações de tensão de curta duração (VTCD) e flutuação de tensão (indicador de severidade de cintilação luminosa de curta duração – Pst) não foram avaliados neste trabalho, devido a utilização do equipamento destinado a medição de faturamento, impossibilitando alterações em sua configuração para registros destes indicadores.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para continuidade dos estudos realizados neste trabalho, as seguintes propostas de trabalhos futuros são sugeridas:

- Utilização de um medidor de energia elétrica externo que possibilite realizar uma configuração de maneira que seja possível fornecer mais informações;
- Ampliar a análise da QEE para todo o complexo eólico, abrangendo todas as 8 plantas;
- Realizar estudos detalhados para detecção de possíveis causas que contribuam para uma má QEE, assim como maneiras que mitigá-las.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021**, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. [S. l.]: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>. Acesso em: 14 fev. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL nº 9036/2020**, de 8 de dezembro de 2020. Aprova a reestruturação e a revisão dos Procedimentos de Rede e estabelece procedimentos e critérios para alterações. [S. l.]: ANEEL, 2021. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020903.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2022

ALVES, Denis Keuton. **Estimação em tempo real de potência e impedância da rede elétrica utilizando a Transformada Wavelet Packet Estacionária**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/27363>. Acesso em: 21 fev. 2022.

ARAÚJO, Henrique Lopes Angueth. **Estudo de caso: comparação de campanha de indicadores de qualidade de energia elétrica em usinas de geração de energia renovável**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Fontes Renováveis, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/37210>. Acesso em: 21 fev. 2022.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Qualidade dos Sistemas Elétricos de Energia**. 3. ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2021: ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de rede**. ONS, 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 14 fev. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O sistema em números**. ONS, 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 21 fev. 2022.

PIMENTEL, Priscila Maciel. **Estudo da importância da monitoração da qualidade de energia elétrica nos sistemas de distribuição**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/85241805-Estudo-da-importancia-da-monitoracao-da-qualidade-de-energia-eletrica-nos-sistemas-de-distribuicao-priscila-maciel-pimentel.html>. Acesso em: 21 fev. 2022.



REIS, Carlos Eduardo Pereira. **Análise de eficiência energética e qualidade de energia: um estudo de caso demonstrando o papel do engenheiro electricista como consultor analista**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário Do Sul de Minas, Varginha, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/557>. Acesso em: 21 fev. 2022.

SILVA, Isabela Michel e. **Normas e regulamentações em qualidade da energia elétrica sob a ótica do fornecedor**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9BVH2S>. Acesso em: 21 fev. 2022.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Erica. 2012.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Manual de instalação PowerLogic ION7550/ION7650**. [S.l.]: SCHNEIDER ELECTRIC, 2019. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/download/document/70002-0247/>. Acesso em: 06 dez. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Manual de configuração do dispositivo PowerLogic ION Setup 3.0**. [S.l.]: SCHNEIDER ELECTRIC, 2018. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/download/document/7EN02-0293/>. Acesso em: 06 dez. 2021.