

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIA EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Medidores de energia elétrica aplicados em  
instalações de baixa tensão – aspectos  
relacionados à qualidade da energia elétrica**

Pedro Mendes de Souza

**Trabalho de Conclusão de Curso**



PEDRO MENDES DE SOUZA

**Medidores de energia elétrica aplicados em  
instalações de baixa tensão – aspectos  
relacionados à qualidade da energia elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Elétrica  
pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Claudionor Francisco  
do Nascimento

Coorientador: Prof. Dr. Wesley Angelino de  
Souza

São Carlos  
28 de fevereiro de 2025



*Este trabalho é dedicado primeiramente à Deus, que constantemente guia meus passos e, nos momentos de dificuldade, me concede força para prosseguir. Aos meus pais, Adauto Pedro de Souza e Nilza Mendes de Souza, que sempre se doaram ao máximo para que eu pudesse me desenvolver e ter uma educação de qualidade, como também nunca mediram esforços para me apoiar em diversas situações. À minha querida avó, cuja sabedoria e carinho sempre iluminaram meu caminho. Seu amor e incentivo foram essenciais em minha caminhada. À minha namorada Clara, pelo carinho e companheirismo nos bons e maus momentos. Ao meu orientador, Claudionor, seu apoio, orientação, paciência e conhecimento fizeram desta uma experiência inspiradora para mim.*

# Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer ao meu pai, Aauto, por ser uma fonte constante de inspiração e orientação. Seu incentivo incansável e sua sabedoria foram fundamentais para me manter focado em meus objetivos. Suas palavras de encorajamento nos momentos de desafio foram luzes que iluminaram meu caminho. Obrigado por sempre acreditar em mim e por ser o meu exemplo de determinação.

À minha mãe, Nilza, minha eterna fonte de amor e força, expresso minha sincera gratidão. Sua paciência infinita, seu apoio emocional e suas palavras gentis foram meu porto seguro ao longo dessa jornada exigente. Você sempre esteve ao meu lado, celebrando cada conquista e me confortando em momentos de dúvida. Este trabalho é dedicado a você tanto quanto a mim, pois sua dedicação moldou quem sou hoje.

À minha querida avó, que sempre me ensinou o valor do conhecimento e da dedicação. Sua força, sabedoria e incentivo foram fundamentais em minha caminhada. Cada palavra de apoio e cada gesto de carinho me motivaram a seguir em frente, acreditando no poder da educação para transformar vidas. Sou imensamente grato por tê-la ao meu lado.

À minha amada namorada, Clara, seu amor inabalável e sua presença constante foram a luz que iluminou os dias mais difíceis. Suas palavras de encorajamento e seu ouvido atento tornaram cada desafio mais fácil de enfrentar.

Ao meu orientador Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento, que acreditou em minha capacidade e sempre que precisei, esteve disposto para dar suporte ao longo da trajetória acadêmica.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Wesley Angelino de Souza, pelo apoio, pelas orientações valiosas e por contribuir significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, Samuel, Marcelo e Matheus César, a minha vida foi enriquecida pela sua amizade e apoio inabaláveis. As risadas compartilhadas foram um lembrete constante de que a jornada é tão importante quanto o destino.

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”*  
*(Robert Collier)*

# Resumo

Este estudo avalia a qualidade da energia elétrica em instalações de baixa tensão por meio da análise de medidores inteligentes, com ênfase nos desequilíbrios de tensão e baixo fator de potência. A pesquisa considera a regulamentação da ANEEL, a evolução tecnológica dos medidores e sua eficácia na detecção de anomalias. Para a coleta de dados, utilizou-se o medidor inteligente JE05 WATT METER (BIN Technology) em configuração bifásica, monitorando parâmetros como tensão RMS, frequência, potências ativa e reativa e fator de potência ao longo de sete dias, com análise posterior realizada no software MATLAB. Os resultados demonstram a superioridade dos medidores inteligentes na identificação de falhas críticas, como tensões fora dos padrões regulamentados e baixo fator de potência.

**Palavras-chave:** Qualidade de energia, Medidores, Baixa tensão.



# Abstract

This study evaluates the quality of electrical energy in low-voltage installations through the analysis of smart meters, with an emphasis on voltage imbalances and low power factor. The research considers ANEEL regulations, the technological evolution of meters, and their effectiveness in detecting anomalies. Data collection was performed using the JE05 WATT METER (BIN Technology) smart meter in a two-phase configuration, monitoring parameters such as RMS voltage, frequency, active and reactive power, and power factor over seven days, with subsequent analysis conducted in MATLAB software. The results demonstrate the superiority of smart meters in identifying critical failures, such as voltages outside regulatory standards and low power factor.

**Keywords:** Power quality, Meters, Low voltage.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Aspectos relacionados a qualidade dos serviços elétricos . . . . .	18
Figura 2 – Sistema Trifásico Equilibrado . . . . .	22
Figura 3 – Tensões em um sistema desequilibrado . . . . .	23
Figura 4 – Sistema trifásico de sequência positiva . . . . .	25
Figura 5 – Sistema trifásico de sequência negativa . . . . .	26
Figura 6 – Sistema trifásico de sequência zero . . . . .	26
Figura 7 – Faixa de Tensão em relação a de referência . . . . .	33
Figura 8 – Medidor de energia eletromecânico . . . . .	40
Figura 9 – Medidor de energia eletrônico . . . . .	40
Figura 10 – Medidor de energia digital ou Inteligente . . . . .	41
Figura 11 – A arquitetura das redes smart grid . . . . .	51
Figura 12 – Principais elementos de um sistema SCADA . . . . .	54
Figura 13 – Ciclo pergunta-resposta do mestre para o escravo . . . . .	55
Figura 14 – Representação gráfica da varredura cíclica . . . . .	56
Figura 15 – Arquitetura de comunicação do protocolo IEC 61850 . . . . .	57
Figura 16 – Sistema de funcionamento do protocolo DNP3 . . . . .	58
Figura 17 – Medidor inteligente JE05 WATT METER BIN Technology . . . . .	68
Figura 18 – Dashboard do JE05 WATT METER BIN Technology . . . . .	69
Figura 19 – Tensão RMS ao decorrer do período amostrado . . . . .	70
Figura 20 – Tensão RMS durante a falha . . . . .	71
Figura 21 – Classificação da qualidade da tensão RMS . . . . .	71
Figura 22 – Variação da Frequência amostrada . . . . .	72
Figura 23 – Variação do Fator de Potência Total . . . . .	73

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica . . .	21
Tabela 2 – Terminologia aplicável ao cálculo do desequilíbrio de tensão . . . . .	34
Tabela 3 – Limites para os indicadores de tensão . . . . .	34
Tabela 4 – Sintetização e terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas	35
Tabela 5 – Comparativo entre os medidores de energia elétrica. . . . .	43
Tabela 6 – Comparativo entre as Redes elétricas convencionais e as redes elétricas inteligentes . . . . .	46
Tabela 7 – Características dos medidores de energia elétrica . . . . .	66
Tabela 8 – Indicadores de desempenho do sistema elétrico . . . . .	74

# Lista de abreviaturas e siglas

<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>QEE</b>	Qualidade da Energia Elétrica
<b>FEC</b>	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
<b>DEC</b>	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
<b>CAPEX</b>	Dispêndios de Capital
<b>OPEX</b>	Custos Operacionais
<b>DRP</b>	Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária
<b>DRC</b>	Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica
<b>FER</b>	Frequência Equivalente de Reclamação
<b>DER</b>	Duração Equivalente de Reclamação
<b>EBT</b>	Extra-Baixa Tensão
<b>BT</b>	Baixa Tensão
<b>AT</b>	Alta Tensão
<b>TS</b>	Tensão de Segurança
<b>PRODIST</b>	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
<b>NEMA</b>	National Electrical Manufacturers Association
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineers
<b>ANSI</b>	American National Standards Institute
<b>CIGRÉ</b>	Conseil International des Grands Réseaux Électrique
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>TR</b>	Tensão de Referência
<b>VTCD</b>	Variações de Tensão de Curta Duração
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform



# Lista de símbolos

$V_N$	Tensão Nominal
$Ca(i)$	Número de Unidades Consumidoras Atendidas
$Cc$	Número Total de Unidades Consumidoras Atendidas
$i$	Número de interrupções de 1 a n
$T(i)$	Duração de cada interrupção do conjunto de consumidores considerados
$K$	Fator de desequilíbrio
$V_a$	Tensão de Fase
$V_b$	Tensão de Fase
$V_c$	Tensão de Fase
$V_m$	Valor médio
$\Delta V$	Máximo desvio da tensão de linha
$V_{ab}$	Tensão de linha a-b
$V_{bc}$	Tensão de linha b-c
$V_{ca}$	Tensão de linha c-a
$TR + \Delta ADSUP, TR + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP$	Faixa precária de tensão
$TR - \Delta ADINF - \Delta PRINF, TR - \Delta ADINF$	Faixa precária de tensão
$TR + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP$	Faixa crítica de tensão
$h$	Harmônica de ordem individual
$FP$	Fator de Potência
$\phi$	Ângulo entre o sinal de tensão e corrente
$P$	Potência ativa
$S$	Potência aparente



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.0.1	Qualidade da energia elétrica	13
1.0.2	Fornecimento de energia elétrica no Brasil	14
<b>1.1</b>	<b>Motivação e justificativa</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>A qualidade da energia elétrica</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica</b>	<b>17</b>
2.2.1	Indicadores de confiabilidade	18
2.2.2	Indicadores de conformidade	19
2.2.3	Indicadores de presteza	20
2.2.4	Os principais fenômenos relacionados à qualidade de energia	21
2.2.5	Fatores de desequilíbrio	22
2.2.6	Componentes simétricos	24
2.2.6.1	Sistema trifásico de sequência positiva	25
2.2.6.2	Sistema trifásico de sequência negativa	25
2.2.6.3	Sistema trifásico de sequência zero	26
2.2.7	Os métodos IEEE-1, NEMA e CIGRÉ	26
<b>2.3</b>	<b>A ANEEL e o Sistema Regulatório do Fornecimento de Energia Elétrica</b>	<b>28</b>
2.3.1	A Conformidade na Distribuição da Energia Elétrica – As Distorções na Tensão	31
2.3.2	Os desequilíbrios de tensão e as distorções harmônicas	33
2.3.3	Os harmônicos e a série de Fourier	36
<b>3</b>	<b>OS MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Classificação dos Medidores de Energia Elétrica</b>	<b>39</b>
3.1.1	Medidor eletromecânico	39
3.1.2	Medidor eletrônico	40
3.1.3	Medidor digital ou inteligente	41
<b>3.2</b>	<b>A Implementação e a Regulamentação dos Medidores Inteligentes</b>	<b>43</b>

3.2.1	A Evolução dos Medidores de Energia Elétrica um breve resumo . . . . .	43
3.2.2	As Principais iniciativas de Expansão das Redes Elétricas Inteligentes . . . .	46
3.2.3	As redes inteligentes pelo Mundo . . . . .	49
3.2.4	Medidores Inteligentes e as Redes Inteligentes – Considerações e Arquitetura	50
3.2.5	Requisitos de arquitetura das redes inteligentes . . . . .	51
3.2.6	Principais protocolos utilizados pelas concessionárias de energia elétrica bra- sileiras . . . . .	53
3.2.7	A realidade das redes inteligentes no Brasil . . . . .	58
3.2.8	A normatização das redes elétricas inteligentes no Brasil . . . . .	59
<b>3.3</b>	<b>Desagregação de Cargas – Parâmetros de Tensão e de Corrente Relacionados ao Consumo . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>3.4</b>	<b>Medidores Instalados – LIGHT E CPFL . . . . .</b>	<b>63</b>
3.4.1	Os afundamentos de tensão e as interrupções de fornecimento – O que os medidores conseguem detectar . . . . .	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Metodologia de Aquisição de Dados . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Representação Gráfica dos Indicadores de Qualidade de Energia . . . . .</b>	<b>69</b>
4.2.1	Qualidade do produto . . . . .	70
4.2.2	Qualidade do fornecimento . . . . .	72
4.2.3	Parâmetros de Qualidade da Energia . . . . .	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>77</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Na configuração da sociedade atual, a eletricidade é considerada um bem de consumo primordial, estando diretamente atrelada aos avanços tecnológicos e a qualidade de vida da sociedade.

A demanda por energia elétrica se caracteriza por ser um processo ascendente que progride de forma diretamente proporcional aos avanços tecnológicos e ao crescimento populacional (Ministério da Economia, 2004).

No entanto, tamanha demanda por energia elétrica acaba por gerar questionamentos a respeito da qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias, tendo em vista a quantidade de falhas perceptíveis no fornecimento de energia. A problemática envolvendo a qualidade do fornecimento pode ser analisada por três vértices. O primeiro diz respeito aos avanços tecnológicos. O mercado consumidor acaba sendo invadido por tecnologias que não se adaptam ao sistema de fornecimento como, por exemplo, cargas elétricas comandadas eletronicamente. Esses equipamentos, por vezes, não se adaptam adequadamente ao sistema de fornecimento, o que pode gerar falhas na qualidade do serviço (Lauretto, 2014). O segundo diz respeito ao crescimento do consumo que resulta na sobrecarga no sistema. Por fim, o terceiro aspecto está relacionado a fenômenos naturais, como raios, que ao atingirem a rede elétrica podem causar instabilidades no fornecimento e até mesmo danos a eletrodomésticos (Mehl, 2002). Esses fatores estão diretamente ligados às falhas e ao funcionamento inadequado dos medidores de energia elétrica

## 1.0.1 Qualidade da energia elétrica

A qualidade da energia elétrica (QEE) consolidou-se como um conceito fundamental para a operação eficiente e segura dos sistemas elétricos modernos, abrangendo não apenas características técnicas das tensões e correntes, mas também aspectos regulatórios, econômicos e ambientais. A QEE, em sentido amplo, refere-se à adequação da energia fornecida às necessidades dos consumidores, garantindo conformidade com parâmetros que assegurem o funcionamento confiável de equipamentos e processos. No Brasil, essa discussão ganhou relevância com a reestruturação do setor elétrico no fim da década de 90, marcada pela privatização de empresas e pela criação de órgãos reguladores como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por estabelecer normas e fiscalizar a produção, transmissão e distribuição de energia (DECKMANN; POMILIO, 2024).

A qualidade da energia elétrica (QEE) é definida como a capacidade de a energia fornecida atender adequadamente às necessidades dos consumidores, considerando dois

critérios fundamentais: continuidade no fornecimento e aderência a padrões operacionais seguros para o sistema elétrico e os equipamentos conectados. Essa avaliação envolve a análise de distúrbios como:

- Deformações nas formas de onda de tensão ou corrente;
- Oscilações na magnitude da tensão;
- Variações temporárias (curta ou média duração) no nível de tensão;
- Instabilidades na frequência nominal da rede;
- Assimetrias em sistemas trifásicos;
- Perturbações transitórias rápidas.

Esses fenômenos estão diretamente ligados às características da corrente alternada, em que as tensões são reguladas pelas concessionárias (responsáveis pela geração, transmissão e distribuição), enquanto as correntes dependem das cargas instaladas pelos consumidores (DECKMANN; POMILIO, 2024).

[...] Diversos aspectos permitem a avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, entre eles podemos citar a continuidade do fornecimento, nível de tensão, oscilações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas de tensão e interferência em sistemas de comunicações. [...] (Mehl, 2002, p. 1).

No entanto, sob a ótica do consumidor final, a qualidade da energia fornecida não é tão perceptível e muitas vezes só é notada quando causa algum prejuízo como o mau funcionamento de equipamentos elétricos, a queima de eletrodomésticos ou quando ocorrem os frequentes “apagões”.

## 1.0.2 Fornecimento de energia elétrica no Brasil

Conforme definido pela NR10, no Brasil, a energia elétrica é disponibilizada em quatro tipos de tensão: a extra-baixa tensão, a tensão de segurança, a baixa tensão e a alta tensão. Sendo, cada uma, limitada por diferentes níveis de tensão, a saber:

1. **Extra-Baixa Tensão (EBT):** Tensão não superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra (Ministério do Trabalho e Emprego, 2004)

2. **Tensão de Segurança (TS):** Tensão originada em uma fonte de segurança (Ministério do Trabalho e Emprego, 2004).
3. **Baixa Tensão (BT):** Tensão superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua e igual ou inferior a 1000 volts em corrente alternada ou 1500 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra (Ministério do Trabalho e Emprego, 2004).
4. **Alta Tensão (AT):** Tensão superior a 1000 volts em corrente alternada ou 1500 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra (Ministério do Trabalho e Emprego, 2004).

## 1.1 Motivação e justificativa

Em 2019, no bairro Jardim Embaré em São Carlos-SP, os moradores reclamaram que as oscilações de tensão na rede elétrica danificaram eletrônicos domésticos, como inter-fones e sistemas de segurança, com níveis de tensão chegando a 7,64% — mais que o dobro do limite aceitável de 3% (EPTV, 2019). Outro caso emblemático ocorreu em novembro de 2023, quando um apagão em São Paulo afetou 3,1 milhões de imóveis, causando perdas de R\$ 1,65 bilhão e suspensão de serviços essenciais por quatro dias. (FECOMERCIO, 2024). Dados da CNI ainda revelam que 67% das indústrias brasileiras sofrem prejuízos significativos com interrupções energéticas, incluindo perda de produção e matérias-primas (Confederação Nacional da Indústria, 2016).

Esses casos evidenciam que, devido às particularidades do fornecimento de energia — como oscilações pontuais e falhas sistêmicas —, poucos são os estudos que analisam a qualidade da energia elétrica em níveis específicos de tensão através do monitoramento contínuo dos medidores.

É necessário ampliar os estudos dos medidores de energia elétrica, tendo em vista que estes estudos são capazes de demonstrar a qualidade da energia fornecida, o que contribui para conscientizar tanto as concessionárias, incentivando o aprimoramento de seus serviços, quanto os consumidores, capacitando-os a exigir melhorias na qualidade do fornecimento, que ainda enfrenta frequentes oscilações no Brasil

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Neste trabalho é avaliada a qualidade da energia elétrica em baixa tensão com base no medidor inteligente, com foco em duas problemáticas comuns no fornecimento de energia: os desequilíbrios de tensão e baixo fator de potência.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Conceituar a qualidade da energia elétrica;
- Demonstrar os principais problemas de qualidade averiguados nas redes elétricas;
- Demonstrar as normas da ANEEL que regulamentam o setor elétrico no Brasil;
- Abordar as principais características dos três principais tipos de medidores de energia existentes no mercado;
- Abordar os principais protocolos de comunicação utilizados pelas concessionárias de energia elétrica;
- Analisar qualitativamente e quantitativamente através dos dados levantados no simulador a qualidade da energia elétrica utilizando um medidor inteligente; e
- Comparar a qualidade da energia elétrica verificada no medidor inteligente com os indicadores.
- Ampliar os estudos sobre medidores de energia elétrica e suas contribuições para avaliar a qualidade da energia fornecida.
- Aplicar os conhecimentos adquiridos durante minha formação como engenheiro para contribuir academicamente com futuros estudos na área, promovendo o avanço do conhecimento técnico e científico no setor de energia elétrica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A qualidade da energia elétrica

A responsabilidade pelo controle da qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica é da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual está incumbida de

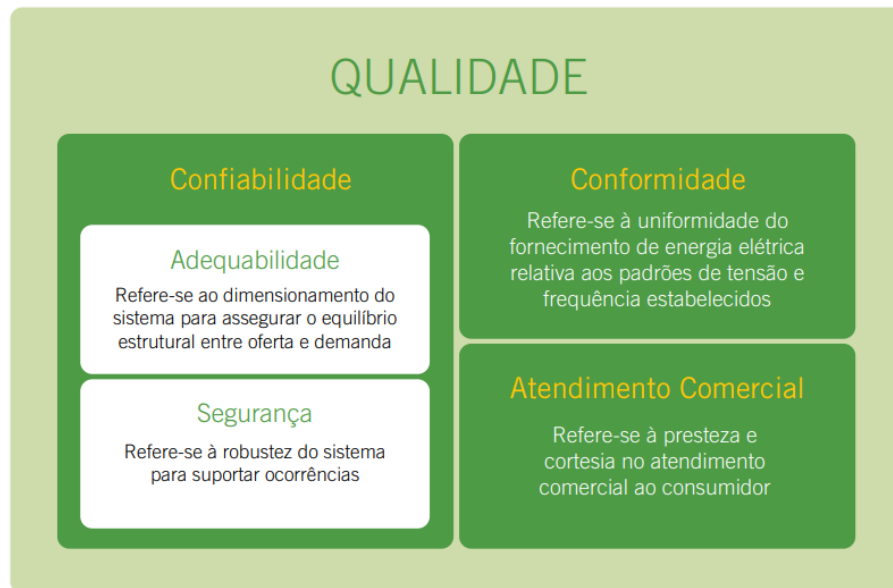
[...] regular o serviço concedido, permitido e autorizado e fiscalizar permanentemente sua prestação [...] (ANEEL, 1996, cap. I, art. 3º, inc. XIX).

A (ANEEL, 2021), estabelece os procedimentos relativos à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), por meio da qualidade do produto, qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações. No que diz respeito a qualidade do produto, estabelece a terminologia e os indicadores, descreve os fenômenos, define os limites ou valores de referência, além de abordar estudos específicos sobre a qualidade da energia elétrica para a integração aos sistemas de distribuição. Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades. E para a qualidade do tratamento de reclamações, estabelece a metodologia de cálculo dos limites do indicador de qualidade comercial.

### 2.2 Indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica

Na Figura 1, se apresentam os aspectos relacionados a qualidade dos serviços elétricos.

Figura 1 – Aspectos relacionados a qualidade dos serviços elétricos



Fonte: (Instituto Acende Brasil, 2014, p. 5)

### 2.2.1 Indicadores de confiabilidade

Tipicamente avalia-se a confiabilidade do fornecimento de energia com base em indicadores de continuidade. Há duas famílias básicas de indicadores de continuidade:

1. As que mensuram a frequência de interrupções durante um determinado intervalo de tempo (Instituto Acende Brasil, 2014); e
2. As que mensuram a duração cumulativa das interrupções ocorridas durante um determinado intervalo de tempo. A frequência de interrupções está associada principalmente às condições físicas dos ativos da distribuidora: a configuração da rede, o grau de redundância e o estado dos equipamentos (idade dos equipamentos e qualidade de sua manutenção). Assim, a frequência está mais associada aos Dispendios de Capital (CAPEX), isto é, aos investimentos realizados pela empresa ao longo dos anos. Já a duração das interrupções está associada principalmente aos recursos humanos e materiais disponibilizados para realizar reparos visando à recomposição e ao reparo da rede, ou seja, está mais associada aos Custos Operacionais (OPEX) incorridos pela distribuidora (Instituto Acende Brasil, 2014).

Os indicadores de continuidade mais conhecidos no Brasil são o Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) e Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC). O FEC é calculado dividindo o número total

de interrupções registradas no período pelo número total de unidades consumidoras atendidas. O DEC é obtido somando a duração total de todas as interrupções ocorridas no período e dividindo pelo número total de unidades consumidoras atendidas (PRODIST, 2020).

O DEC pode ser calculado tal como se apresenta na Equação 2.1.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i) \times t(i)}{C_c} \quad (2.1)$$

Já o FEC pode ser calculado tal como se apresenta na Equação 2.2:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)}{C_c} \quad (2.2)$$

Em que,

Número de Unidades Consumidoras Atendidas ( $Ca(i)$ ) (Baixa Tensão ou Média Tensão)

Número de interrupções de 1 a n ( $i$ )

Duração de cada interrupção do conjunto de consumidores considerados ( $T(i)$ ) (Horas)

Número Total de Unidades Consumidoras Atendidas ( $C_c$ ) (Baixa Tensão ou Média Tensão)

## 2.2.2 Indicadores de conformidade

O fator usualmente monitorado para avaliar a conformidade é o nível de tensão. A partir de campanhas de leitura de tensão é avaliada a incidência de desvios de diferentes magnitudes do nível de tensão contratado. Isso é feito classificando as tensões apuradas na campanha de leitura em três categorias (PRODIST, 2020):

1. **Adequada:**  $117V \leq V_N \leq 133V$
2. **Precária:**  $110V \leq V_N \leq 117V$  ou  $133V \leq V_N \leq 135V$
3. **Crítica:**  $V_N \leq 110V$  ou  $V_N \geq 135V$

Em que,

Tensão Nominal ( $V_N$ ) (V)

Cada categoria representa um grau de discrepância crescente, para cima ou para baixo, da tensão contratada (PRODIST, 2020).

Com base nessa informação pode-se então construir dois índices:

1. **Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP):** que representa o percentual das leituras em que o nível de tensão estava na faixa de tensão classificada como precária (PRODIST, 2020); e
2. **Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC):** Indica o percentual de leituras na faixa de tensão crítica (PRODIST, 2020)

### 2.2.3 Indicadores de prestação

Com o objetivo de monitorar a qualidade do atendimento comercial, a ANEEL definiu dois indicadores análogos ao FEC e DEC, sendo eles a Frequência Equivalente de Reclamação (FER), que mede a quantidade de reclamações procedentes a cada mil unidades consumidoras da distribuidora; e o Duração Equivalente de Reclamação (DER), que mede o prazo médio de solução das reclamações procedentes solucionadas pela distribuidora (medido em dias) (PRODIST, 2020).

Apesar dos esforços com o intuito de melhorar a qualidade da energia elétrica muitas falhas ainda são encontradas. O consumidor final ainda é severamente atingido por queimas de produtos eletrodomésticos, interrupções de fornecimento, erros na averiguação do consumo, centrais de atendimento precárias, dentre outros.

Nesse sentido, segundo (Instituto Acende Brasil, 2014) a qualidade do fornecimento de energia elétrica envolve quatro desafios:

1. Assegurar a adequação do suprimento, isto é, garantir a capacidade necessária para atender à demanda (equilíbrio estrutural entre oferta e demanda);
2. Assegurar a segurança do sistema, isto é, a robustez para suportar contingências;
3. Assegurar a conformidade da corrente elétrica de forma a possibilitar o funcionamento adequado dos aparelhos elétricos; e
4. Assegurar a prestação do atendimento comercial. Para atingir esses objetivos é preciso que todos os agentes que compõem o setor elétrico brasileiro (geradoras, transmissoras e distribuidoras) desempenhem suas funções de forma adequada e harmoniosa. Isso requer um conjunto de mecanismos regulatórios para que os agentes internalizem os impactos de sua atuação sobre a qualidade do sistema.

## 2.2.4 Os principais fenômenos relacionados à qualidade de energia

São vários os fenômenos que podem alterar a qualidade da energia elétrica fornecida, levando a falhas nos serviços, mesmo com toda a configuração dos parâmetros de qualidade a serem seguidos. Eles estão exemplificados na Tabela 1 que demonstra o tipo de distúrbio, as causas típicas, os efeitos e as possíveis soluções.

Tabela 1 – Principais fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica

Tipo do Distúrbio	Causas Típicas	Efeitos	Soluções
<b>Transitórios Impulsivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Descargas atmosféricas;</li> <li>– Chaveamento de banco de capacitores e/ou cargas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Excitação de circuitos ressonantes;</li> <li>– Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Filtros;</li> <li>– Supressores de surto;</li> <li>– Transformadores de isoladores.</li> </ul>
<b>Transitórios Oscilatórios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Descargas atmosféricas;</li> <li>– Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.;</li> <li>– Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Filtros;</li> <li>– Supressores de surto;</li> <li>– Transformadores de isoladores.</li> </ul>
<b>Sub e Sobre tensão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Partidas de motores;</li> <li>– Variações de cargas;</li> <li>– Chaveamento de capacitores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores;</li> <li>– Falhas em equipamentos eletrônicos;</li> <li>– Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores. TP's e TC's;</li> <li>– Operação indevida de relés de proteção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reguladores de tensão;</li> <li>– Fontes de energia de reserva;</li> <li>– Chaves estáticas;</li> <li>– Geradores de energia.</li> </ul>
<b>Interrupções</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Curto-Circuito;</li> <li>– Operação de disjuntores;</li> <li>– Manutenção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Falha de equipamentos eletrônicos e iluminação;</li> <li>– Desligamento de equipamentos;</li> <li>– Interrupção do processo produtivo (altos custos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fontes de energia sobressalentes;</li> <li>– Sistemas 'nobreak';</li> <li>– Geradores de energia.</li> </ul>
<b>Desequilíbrios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fornos a arcos;</li> <li>– Cargas monofásicas e bifásicas;</li> <li>– Assimetrias entre as impedâncias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Redução da vida útil de motores de indução e máquinas;</li> <li>– Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Operação simétrica;</li> <li>– Dispositivos de compensação.</li> </ul>
<b>Nível CC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Saturação de transformadores;</li> <li>– Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Filtros.</li> </ul>
<b>Harmônicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cargas não lineares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução;</li> <li>– Danificação de capacitores, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Filtros;</li> <li>– Transformadores isoladores.</li> </ul>
<b>Interharmônicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Conversores estáticos de potência;</li> <li>– Cicloconversores;</li> <li>– Motores de indução;</li> <li>– Equipamentos a arco, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Interferência na transmissão de sinais 'carrier';</li> <li>– Indução de 'Flicker' visual no display de equipamentos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Filtros.</li> </ul>
<b>Ruídos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência;</li> <li>– Radiações eletromagnéticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aterramento das instalações;</li> <li>– Filtros.</li> </ul>
<b>Oscilações de tensões</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cargas intermitentes;</li> <li>– Fornos a arcos;</li> <li>– Partidas de motores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 'Flicker';</li> <li>– Oscilações de potência e torque nas máquinas elétricas;</li> <li>– Queda de rendimento de equipamentos elétricos;</li> <li>– Interferência nos sistemas de proteção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sistemas estáticos de compensação de reativos;</li> <li>– Capacitores série.</li> </ul>
<b>Variações de frequência</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Perda de geração, perda de transmissão, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pode causar danos severos nos geradores e nas paletas das turbinas, etc.</li> </ul>	

Fonte: Adaptado de Silva (2008).

Os fatores relacionados a qualidade de energia, quando constatados, podem levar a prejuízos tanto para as concessionárias quanto para os consumidores finais, sendo muito importante o monitoramento constante da aparição destes fenômenos e a correção imediata das falhas.

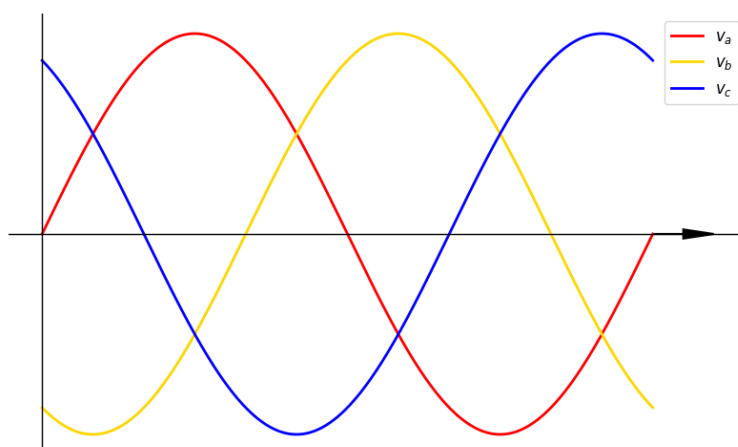
### 2.2.5 Fatores de desequilíbrio

Segundo o Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)

[...] O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de  $120^\circ$  entre as tensões de fase do mesmo sistema [...] (ANEEL, 2020, p. 16).

Um sistema trifásico está equilibrado ou simétrico se as tensões e as correntes tiverem a mesma amplitude e deslocadas de  $120^\circ$  uma em relação à outra, conforme pode se apresenta na Figura 2.

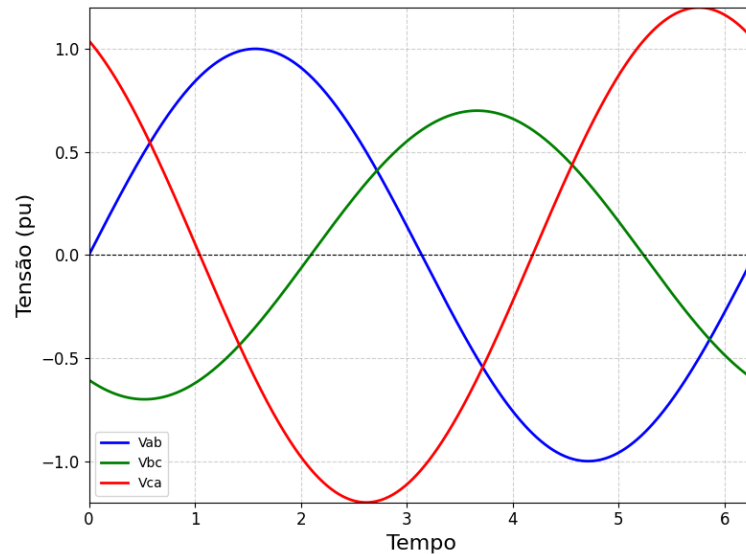
Figura 2 – Sistema Trifásico Equilibrado



Fonte: Adaptada de (Guimarães, 2020)

Se uma ou ambas destas condições acima não forem atendidas, o sistema é chamado desequilibrado ou assimétrico, conforme se apresenta na Figura 3.

Figura 3 – Tensões em um sistema desequilibrado



Fonte: Adaptada de (Teixeira, 2018)

Segundo (Teixeira, 2018) as origens destes desequilíbrios geralmente são nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tensões desequilibradas podem também ser resultados da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

De acordo com (Tahan; Gouvêa; Kagan, 2015) nas redes de distribuição podem ocorrer desequilíbrios de naturezas distintas:

1. O primeiro aspecto refere-se a assimetria da rede, por características tais como a de não transposição das fases da rede trifásica, ou pelos tipos de transformadores (ou bancos de transformadores) de distribuição utilizados. Neste caso, mesmo que a carga seja perfeitamente equilibrada (desequilíbrio de corrente nulo), serão detectados níveis de desequilíbrio de tensão; e
2. O segundo aspecto é função da natureza da carga, ou seja, de como os consumidores (monofásicos, bifásicos ou trifásicos) estão conectados nas fases e neutro da rede de distribuição e com os diferentes níveis de corrente que absorvem em cada instante de tempo da curva de carga diária.

Nesse sentido, estes problemas têm origem quando a concessionária tenta prover uma tensão de sistema equilibrada entre a rede de distribuição e a rede interna do cliente. Sob condições normais essas tensões são determinadas pelas (Guimarães, 2020):

1. Tensões nos terminais dos geradores;
2. Impedância do sistema elétrico; e
3. Cargas desequilibradas pelas fases.

(Guimarães, 2020) explicita ainda que os geradores síncronos das grandes centrais produzem tensões simétricas. No entanto, atualmente os consumidores podem utilizar instalações fotovoltaicas que são conectadas à rede de forma monofásica. A impedância do sistema elétrico não é exatamente a mesma para cada fase. A configuração geométrica das linhas aéreas causa diferenças nos parâmetros das linhas. Nos projetos elétricos, as cargas monofásicas são distribuídas de forma equilibrada, no entanto, no transformador as cargas são flutuantes devido a distribuição estatística do funcionamento das cargas. Na maioria dos casos práticos, a assimetria das cargas é a causa principal de desequilíbrios.

### 2.2.6 Componentes simétricos

De acordo com (Teixeira, 2018) todo conjunto de fasores (tensão ou corrente) desequilibrado pode ser decomposto em 3 conjuntos de fasores equilibrados, a saber:

1. Um de sequência positiva;
2. Um de sequência negativa; e
3. Um de sequência zero.

Representados pelas Equações 2.3 a 2.4.

$$\theta = \frac{2\pi}{k} = \frac{360^\circ}{k} \quad (2.3)$$

Se  $k = 3$ , tem-se que

$$\theta = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ \quad (2.4)$$

Os operadores vetoriais tem módulo 1 e quando multiplicam um vetor, rodam esse vetor em  $120^\circ$ , isto é (Teixeira, 2018):

1. Qualquer fasor multiplicado por  $a$  tem como resultante um outro vetor de mesmo módulo defasado  $+120^\circ$ ;

2. Qualquer fasor multiplicado por  $a^2$  tem como resultante um outro vetor de mesmo módulo defasado  $-120^\circ$ , representados pelas Equações 2.5 a 2.7.

$$a = 1\angle\theta = 1\angle 120^\circ \quad (2.5)$$

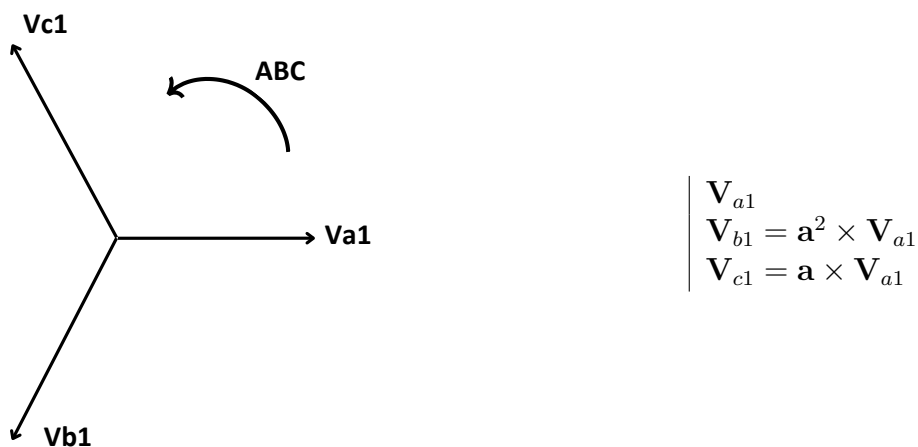
$$a^2 = (1\angle 120^\circ) \cdot (1\angle 120^\circ) \quad (2.6)$$

$$a^2 = (1\angle 240^\circ) = (1\angle -120^\circ) \quad (2.7)$$

#### 2.2.6.1 Sistema trifásico de seqüência positiva

É um conjunto de três fasores balanceados, ou seja, de mesmo módulo, defasados de  $120^\circ$ , com seqüência de fase idêntica à do sistema trifásico original desbalanceado (Teixeira, 2018). Representados tal como se apresenta na Figura 4.

Figura 4 – Sistema trifásico de seqüência positiva

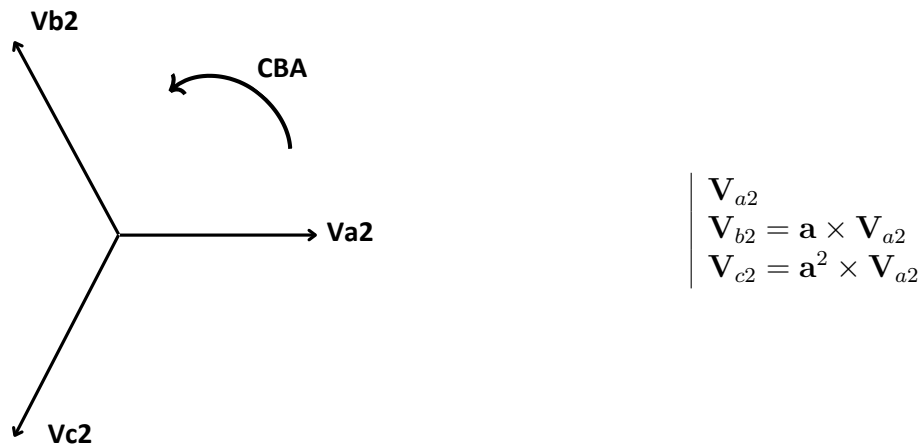


Fonte: Adaptada de (Teixeira, 2018)

#### 2.2.6.2 Sistema trifásico de seqüência negativa

É um conjunto de três fasores balanceados, girando numa seqüência de fase contrária à do sistema original desbalanceado, em velocidade síncrona contrária a da seqüência positiva (Teixeira, 2018). Representados tal como se apresenta na Figura 5.

Figura 5 – Sistema trifásico de sequência negativa



Fonte: Adaptada de (Teixeira, 2018)

### 2.2.6.3 Sistema trifásico de sequência zero

É um conjunto de três fasores iguais, em fase, girando no mesmo sentido da sequência do sistema original desbalanceado, isto é, da sequência positiva. O índice 0 representa a sequência positiva (Teixeira, 2018). Representados tal como se apresenta na Figura 6.

Figura 6 – Sistema trifásico de sequência zero



Fonte: Adaptada de (Teixeira, 2018)

O método das Componentes Simétricas (também chamado de "verdadeira definição") expressa a relação entre a componente da tensão de sequência negativa e a componente positiva, em porcentagem, sendo um dos métodos mais recomendados por considerar a configuração real do sistema (i.e. magnitude e ângulo) (Diefenthäler et al., 2017)

### 2.2.7 Os métodos IEEE-1, NEMA e CIGRÉ

Segundo (Diefenthäler et al., 2017) alguns equipamentos de medição utilizados na rede elétrica não disponibilizam os valores dos ângulos dos fasores de tensão, necessários ao cálculo do fator  $K$  a partir deste método, assim, outros métodos alternativos foram

desenvolvidos, os quais consideram apenas as amplitudes das tensões trifásicas, sendo os principais deles os métodos IEEE-1, NEMA e CIGRÉ, sendo estas três metodologias com características distintas, muito recomendadas pela literatura técnica.

O Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) (IEEE, 2018) define um método para o cálculo do fator  $K$  considerando as tensões de fase do sistema, tal como se apresenta na Equação 2.8.

$$K(\%) = \frac{\max[|V_a - V_m|, |V_b - V_m|, |V_c - V_m|]}{V_m} \cdot 100 \quad (2.8)$$

Em que,

Tensão de Fase ( $V_a$ )

Tensão de Fase ( $V_b$ )

Tensão de Fase ( $V_c$ )

Valor médio ( $V_m$ )

Fator de desequilíbrio ( $K$ )

O valor médio é definido tal como apresentado na Equação 2.9.

$$V_m = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (2.9)$$

Esse método considera apenas o módulo das tensões de fase, e o limite máximo para a análise do desequilíbrio de tensão no sistema é estabelecido em 2%.

Já o método conhecido como National Electrical Manufacturers Association (NEMA) (NEMA, 2016) analisa o desvio das tensões de linha (diferentemente do método IEEE), em relação ao seu valor médio. O fator  $K$  é apresentado na Equação 2.10.

$$K(\%) = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Em que,

Máximo desvio da tensão de linha ( $\Delta V$ )

Definido pela Equação 2.11.

$$\Delta V = \max[|V_{ab} - V_m|, |V_{bc} - V_m|, |V_{ca} - V_m|] \quad (2.11)$$

E,  $V_m$ , para esse caso, é definido pela Equação 2.12.

$$V_m = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2.12)$$

Em que,

Tensão de linha a-b ( $V_{ab}$ )

Tensão de linha b-c ( $V_{bc}$ )

Tensão de linha c-a ( $V_{ca}$ )

O método NEMA é recomendado pela norma American National Standards Institute (ANSI), a qual determina que os sistemas elétricos sejam projetados e operados de modo a limitar o máximo desequilíbrio de tensão em 3% pelo método NEMA.

Por último o método proposto pelo Conseil International des Grands Réseaux Électrique (CIGRÉ) (CIGRÉ, 1986) é um dos mais utilizados e recomendados por órgãos reguladores por considerar a configuração real do sistema e utilizar o valor dos módulos das tensões de linha. O fator K é calculado tal como se apresenta na Equação 2.13.

$$K(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

Em que,

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.14)$$

Assim, como o método das Componentes Simétricas, o método de CIGRÉ fornece resultados rigorosos, sendo esperado um valor de K igual ou inferior a 2%.

## 2.3 A ANEEL e o Sistema Regulatório do Fornecimento de Energia Elétrica

A ANEEL é responsável por fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal, podendo inclusive regular os preços praticados ao consumidor.

Portanto ela é a principal responsável pela qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores finais. Para tanto ela preceitua normas e procedimentos incluídos em todo os processos de fornecimentos. A **Resolução Normativa n° 1.000/2021** (ANEEL, 2021), consolida as principais regras da Agência para a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, onde estão dispostos os direitos e deveres dos consumidores, sendo eles:

a) Principais Direitos dos Consumidores:

1. **Ressarcimento de danos a equipamentos:** O consumidor terá até cinco anos para pedir à distribuidora o ressarcimento por equipamentos danificados devido a falhas no fornecimento de energia. Agora o consumidor pode consertar o equipamento, por sua conta e risco e sem autorização, antes do término do prazo definido para verificação dos equipamentos pela distribuidora. E caso o consumidor faça o pedido em até 90 dias, seguirá um rito simplificado para obter se ressarcimento;
2. **Imóveis com a conta de luz atrasada:** Se o ocupante anterior de um imóvel deixou contas de luz em atraso, a distribuidora de energia elétrica não pode cobrar o valor do novo ocupante como condição para transferir a titularidade, nem exigir que ele assine qualquer documento se responsabilizando pela quitação. A dívida pertence ao titular da conta em atraso (no caso, ao antigo morador) e não ao imóvel, portanto o novo titular no mesmo imóvel não tem nada a ver com ela. Essa já era a regra da ANEEL e agora ela ficou mais explícita;
3. **Simplificação de prazos para conexão à rede:** em função da publicação da **Lei nº 14.195, de 26 de agosto de 2021**, que trata da política da Modernização do Ambiente de Negócios no Brasil e contém um capítulo sobre a obtenção de eletricidade, a nova norma estabeleceu um rito específico que prevê a conexão em 45 dias para unidades consumidoras do Grupo A, com potência contratada de até 140kVA, em área urbana, distância até 150 metros da rede e onde não haja a necessidade de obras de ampliação, de reforço ou de melhoria no sistema de distribuição;
4. **Devolução de cobrança feita pela distribuidora indevidamente:** A norma estabelece que, se a distribuidora cobrar um valor a maior do consumidor de forma indevida, deverá devolvê-lo em dobro. A devolução não será em dobro, ou seja, será no mesmo valor pago, se a cobrança indevida tiver ocorrido por responsabilidade exclusiva do consumidor ou de terceiros não relacionados à distribuidora. E caso a distribuidora faça a devolução de forma simples, terá que fundamentar sua decisão por escrito;
5. **Conexão gratuita de comunidades indígenas/quilombolas:** Reconhecido o direito ao atendimento gratuito nessas comunidades com fundamento na Constituição Federal de 1988;
6. **Redução de juros na quitação antecipada de débitos:** Trata-se do direito à quitação antecipada do débito (ex. parcelamento), total ou parcialmente,

mediante redução proporcional dos juros e demais acréscimos. Ele já existe no Código de Defesa do Consumidor **Lei 8.078/1990** e é reforçado pela Resolução 1.000;

7. **Vedação de corte da energia nos finais de semana e feriados:** A distribuidora não pode mais suspender o fornecimento de energia por falta de pagamento na sexta-feira, no sábado ou no domingo, bem como em feriado ou véspera de feriado. Distribuidora deverá avisar quando começa o corte de energia: A empresa fica obrigada a comunicar ao consumidor o dia inicial da suspensão de fornecimento;
8. **Pagamento de compensações financeiras por descumprimento de prazos:** O valor da compensação a ser paga aos consumidores, caso haja violação dos prazos estabelecidos nas regras, sofreu um aumento. A ideia é desincentivar a violação dos prazos e uma vez violado, que as distribuidoras o regularizem o mais rapidamente possível;
9. **Atendimento ao consumidor:** A Resolução 1.000 abre novas possibilidades de atendimento, incluindo videochamada nos postos presenciais, internet, chat, e-mail e reclamação na plataforma Consumidor.gov do Ministério da Justiça, cuja adesão será obrigatória para todas as distribuidoras. A geração de protocolo será obrigatória em todos os canais de atendimento. Em caso de auto-atendimento, todos os serviços oferecidos serão gratuitos. Na ligação telefônica, a distribuidora não pode finalizar a chamada antes de concluir o atendimento; e
10. **Micro e minigeração distribuída:** A consolidação aprimora os procedimentos e condições para a conexão das instalações do consumidor e demais usuários, o que inclui as unidades consumidoras com geração distribuída. Assim, as unidades consumidoras com geração distribuída se beneficiarão das novas regras de atendimento ao consumidor e de compensação em caso de violação de prazo.

b) Principais deveres dos consumidores:

1. **Normas técnicas dos Órgãos oficiais:** Observar as normas técnicas dos órgãos oficiais, do concessionário, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); com especial atenção aos aspectos de segurança;
2. **Instalação dos equipamentos em local adequado:** Instalar em local adequado e de fácil acesso, os dispositivos necessários para a colocação do medidor e equipamentos de proteção;

3. **Manter fielmente sob sua guarda os equipamentos os matérias da concessionária:** Manter sob sua guarda, na condição depositário fiel e gratuito, os equipamentos de medição do concessionário;
4. **Adequação das instalações elétricas:** As instalações elétricas internas da unidade consumidora que estiverem em desacordo com as normas deverão ser reformadas ou substituídas;
5. **Declarar fielmente a carga elétrica a ser utilizada:** Declarar toda a carga elétrica que será utilizada na unidade consumidora;
6. **Celebração de contrato:** Celebrar contrato de fornecimento ou de adesão com o concessionário;
7. **Informação de atividade a ser desenvolvida:** Informar ao concessionário a atividade que será desenvolvida na unidade consumidora; e
8. **Manter os pagamentos do fornecimento em dia:** Fazer os pagamentos correspondentes aos serviços prestados pelo fornecimento da energia;

### 2.3.1 A Conformidade na Distribuição da Energia Elétrica – As Distorções na Tensão

Em relação ao fornecimento de Energia a (ANEEL, 2021) preceitua que quanto a qualidade dos produtos estes devam ter a terminologia, as características dos fenômenos e estabelece ainda os indicadores e limites ou valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão;

Já quanto a qualidade do serviço ela define os conjuntos de unidades consumidoras, estabelece as definições, os limites e os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento;

Em relação ao controle da qualidade ela denomina os fenômenos em regime permanente ou transitório, sendo avaliados em:

#### 1. Permanente:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuação de tensão;
- f) variação de frequência.

## 2. Transitório

### a) Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD);

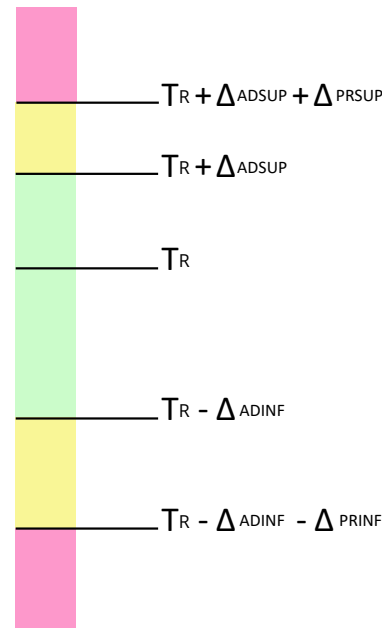
Não é objetivo deste trabalho trazer em voga todos os fenômenos em caráter permanente; e sim dissertar sobre os fenômenos que maior correlação guardam com o tema aqui proposto que são tensão em regime permanente (por estar associado a medição da qualidade da energia elétrica) nos itens desequilíbrios de tensão e distorções harmônicas.

Quanto a tensão em regime permanente são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e de registro e os prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores. A tensão em regime permanente deve ser acompanhada em todo o sistema de distribuição, devendo a distribuidora dotar-se de recursos e técnicas modernas para tal acompanhamento, atuando de forma preventiva para que a tensão em regime permanente se mantenha dentro dos padrões adequados.

A conformidade da tensão elétrica refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos (ANEEL, 2021)

Ainda segundo a (ANEEL, 2021) a tensão em regime permanente deve ser avaliada por meio de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada, de acordo com a metodologia descrita para os indicadores individuais e coletivos, A conformidade dos níveis de tensão deve ser avaliada nos pontos de conexão à Rede de Distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras, por meio dos indicadores estabelecidos. A tensão de atendimento associada às leituras deve ser classificada segundo faixas em torno da Tensão de Referência (TR), conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Faixa de Tensão em relação a de referência



Fonte: Adaptada de (ANEEL, 2021)

Em que,

Faixa precária de tensão  $(T_R + \Delta_{ADSUP}, T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP})$

Faixa precária de tensão  $(T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}, T_R - \Delta_{ADINF})$

Faixa crítica de tensão  $(T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP})$

### 2.3.2 Os desequilíbrios de tensão e as distorções harmônicas

Este trabalho se propôs a estudar tanto os desequilíbrios de tensão como as distorções harmônicas tendo em vista que adicionalmente, não somente os desequilíbrios de tensão assim como também as taxas de distorção harmônica das correntes poderão provocar erros de medição da energia ativa, mas também os desequilíbrios de tensão podem afetar significativamente o desempenho dos medidores de energia elétrica, devendo-se avaliar em conjunto as presenças de correntes e tensões com distorções harmônicas e os desequilíbrios existentes nas tensões (Silva, 2008).

Segundo a (ANEEL, 2021) O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de  $120^\circ$  entre as tensões de fase do mesmo sistema.

Tabela 2 – Terminologia aplicável ao cálculo do desequilíbrio de tensão

Identificação da grandeza	Símbolo
Fator de desequilíbrio de tensão	<b>FD</b>
Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental	<b>V-</b>
Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental	<b>V+</b>
Magnitude das tensões eficazes de linha – frequência fundamental	<b>V<sub>ab</sub>, V<sub>bc</sub> e V<sub>cb</sub></b>
Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	<b>FD95%</b>

Fonte: Adaptada de (ANEEL, 2021)

Sendo a expressão para o cálculo de desequilíbrio de tensão apresentado na Equação 2.15.

$$FD(\%) = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2.15)$$

A ANEEL estabelece ainda limites para os indicadores de tensão demonstrados na tabela abaixo:

Tabela 3 – Limites para os indicadores de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0\text{kV}$	$1,0\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: Adaptada de (ANEEL, 2021)

(Souza, 2008) afirma ainda que os desequilíbrios de tensões presentes nas redes elétricas são fenômenos referentes à alteração do padrão de sistemas de transmissão/distribuição. É a condição, na qual as fases apresentam tensões com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular diferente de  $120^\circ$ , ou ainda, as duas situações simultaneamente. Com o surgimento de correntes desequilibradas, percorrendo o circuito elétrico, têm-se quedas de tensões provenientes dessas correntes.

Já as distorções harmônicas segundo a (ANEEL, 2021) são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

(Silva, 2008) ratifica e explicita ainda que as correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas na rede de distribuição de energia elétrica. A circulação das correntes harmônicas gera tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação. No passado predominavam cargas lineares com valores de impedâncias fixas (iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade). Atualmente, tem-se uma enorme quantidade de cargas não-lineares geradoras de poluição elétrica (harmônicas).

A (ANEEL, 2021) sintetiza a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas, observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Sintetização e terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas

Identificação da grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	$V_h$
Ordem harmônica	$h$
Ordem harmônica máxima	$h_{máx}$
Ordem harmônica mínima	$h_{mín}$
Tensão fundamental medida	$V_1$
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{p,95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{i,95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{3,95\%}$

Fonte: Adaptada de (ANEEL, 2021)

As expressões para o cálculo das grandezas  $DIT_h\%$ ,  $DTT\%$ ,  $DTT_p\%$ ,  $DTT_i\%$  e  $DTT_3\%$  são apresentadas nas Equações 2.16 a 2.17.

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.16)$$

Em que,

Harmônica de ordem individual ( $h$ )

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.17)$$

Em que,

$h$  = todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{máx}$  conforme a classe A ou S.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.18)$$

Em que,

$h$  = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ( $h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, \dots$ )  $h_3$  = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Na averiguação da qualidade da energia elétrica faz-se necessário avaliar os erros em medidores de energia ocasionados pela influência de distorções harmônicas em ondas de tensão e corrente. Sendo analisados também os efeitos de desequilíbrios de tensões, os quais também podem afetar o funcionamento dos medidores de energia (Souza, 2008).

Segundo (Rodrigues, 2009) a problemática na aferição da qualidade de energia é que os equipamentos responsáveis pela medição de energia elétrica são projetados, aferidos e calibrados para operarem apenas na presença de tensões e correntes senoidais. Sabe-se que isso normalmente não ocorre, devido aos distúrbios presentes nas tensões e correntes dos sistemas de energia elétrica. Portanto quanto mais testes forem feitos utilizando diversificados medidores trabalhando em vários tipos de tensão de energia um melhor panorama da qualidade da energia elétrica distribuída pode ser constatada.

### 2.3.3 Os harmônicos e a série de Fourier

Segundo (Santos; Medeiros, 2019) a Série de Fourier possui diversas aplicações. Além das aplicações na resolução de equações diferenciais, as séries de Fourier possuem aplicações em engenharia elétrica, análise de vibrações, processamento de imagens e sinais, física quântica, econometria, entre outras.

Ainda segundo (Santos; Medeiros, 2019) no campo da Engenharia Elétrica faz-se necessário diversas vezes trabalhar com sinais e sistemas, de modo que os conceitos de Fourier estão presentes no dia a dia para facilitar as operações, seja em um diodo retificador, sinais de ondas eletromagnéticas ou senoides produzidas na propagação de corrente alternada. A ideia de Fourier, ao deduzir a Equação foi aproximar qualquer função através de uma soma de senos e cossenos, ou seja, funções senoides, e destrinchar um sinal de modo a analisar os sinais que formam a onda. Desta maneira, pode-se aplicá-la na identificação e tratamento de sinais harmônicos que por definição são justamente sinais senoidais de tensão ou corrente que sofreram algum tipo de alteração por outras formas de onda. A teoria de Fourier, pode ser separada em duas partes, nas séries, que utilizam de funções trigonométricas e de forma exponencial, e na transformada. Este trabalho abordará o uso da Série de Fourier na sua forma harmônica, tal como apresentada na Equação 2.19.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t - \phi_n) \quad (2.19)$$

Como visto anteriormente, as componentes harmônicas surgem de cargas não lineares. Na área industrial, equipamentos como motores de indução, transformadores, fontes chaveadas, pontes retificadoras etc. são responsáveis pelo crescimento de cargas não lineares. Instalações residenciais devido ao aumento de aparelhos eletrônicos, também tem contribuído negativamente com a QEE. A formação de harmônicas, reduz a qualidade da energia transmitida. Além disso, também são responsáveis pela redução da vida útil dos aparelhos, rompimento do dielétrico do banco de capacitores, aquecimento da fiação através de sobretensões e sobrecorrentes com consequente perda de carga. (Santos; Medeiros, 2019)

Segundo as determinações da ANEEL o sinal de saída global será a soma das componentes harmônicas mais o sinal fundamental. As componentes harmônicas são múltiplos inteiros da frequência fundamental, ou seja, para uma frequência habitual de 60Hz, são formadas harmônicas de 120Hz, 180Hz e assim por diante, afetando diretamente a quantidade de energia transformada em trabalho útil, limitada pelo fator de potência, mensurado tal como se apresenta na Equação 2.20.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.20)$$

$$(2.21)$$

$$FP = \frac{VI \cos \theta}{VI} \quad (2.22)$$

$$(2.23)$$

$$FP = \cos \theta \quad (2.24)$$

Em que,

Fator de Potência ( $FP$ )

Ângulo entre o sinal de tensão e corrente ( $\phi$ )

Potência ativa ( $P$ )

Potência aparente ( $S$ )

Devido a maioria das cargas serem de natureza indutiva, o fator de potência das instalações costuma ser indutivo. O fator de potência mínimo aceitável para uma instalação, segundo a (ANEEL, 2018) deve ser 0,92. Abaixo desse percentual, pode ser penalizada pela

concessionária, pois injeta harmônicas na rede que reduzem a QEE. Por exemplo, no caso dos consumidores industriais, que devido à grande quantidade de máquinas de indução e outros equipamentos eletrônicos possuem alto nível de cargas não-lineares. Ocasionalmente pelo ritmo crescente da geração distribuída, também inspira maiores atenções da concessionária os consumidores residenciais, de forma manter o fator de potência sempre elevado (ANEEL, 2018).

O nível de distorção pode ser definido pela taxa de distorção harmônica (DDT), regulamentado pela a (ANEEL, 2018) o nível da distorção varia de 5 a 10% a depender da tensão nominal, acima disso a poluição produzida pelas harmônicas afeta consideravelmente o sinal. Uma ferramenta matemática extraída diretamente da transformada de Fourier é a Fast Fourier Transform (FFT), encontrada facilmente em osciloscópios digitais e em software de simulação. Pode ser utilizada para tratar o sinal e influência das harmônicas na rede, medindo inclusive a DTT, dada pela Equação 2.25.

$$DDT = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \quad (2.25)$$

Em que,  $h$  representa a magnitude do sinal da harmônica equivalente.

Segundo a (ANEEL, 2018) um sistema que seja afetado por componentes harmônicas, terá seu fator de potência alterado com acréscimo da parcela que leva em conta a DTT. Desta maneira, pode ser apresentado na Equação 2.26.

$$FP = \frac{\cos\theta}{\sqrt{DDT^2 + 1}} \quad (2.26)$$

## 3 OS MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Vários são os tipos e modelos de medidores de energia elétrica encontrados no mercado. Especificamente neste trabalho serão utilizados os medidores: a) eletromecânicos, b) eletrônicos, c) inteligentes, sem fazer referência a marcas específicas.

Segundo (Ciríaco, 2022) os tipos de medições realizadas podem ser direta ou indireta. Na medição direta o medidor é conectado diretamente ao circuito medido. Suporta correntes elevadas chegando até 200 A. Assim sendo, é aplicado apenas em circuitos de baixa tensão. Já na medição indireta o medidor é conectado ao circuito medido por meio de transformadores de potencial e corrente. Portanto, suporta correntes menores que os medidores de corrente direta, tipicamente 1 ou 5A, com valores máximos de 20A.

Ainda segundo (Ciríaco, 2022) os medidores são classificados como monofásicos, bifásicos ou trifásicos. O monofásicos realizam a medição de circuitos com apenas uma fase, sendo esta aplicação tipicamente residencial. Os bifásicos realizam a medição de circuitos com duas fases podendo ser aplicado em residências e comércios em geral. Por fim, os trifásicos realizam a medição de circuitos com três fases. Sendo aplicados em grandes comércios e indústrias.

### 3.1 Classificação dos Medidores de Energia Elétrica

#### 3.1.1 Medidor eletromecânico

Segundo (Mattede, 2023) o medidor do tipo eletromecânico é o mais antigo e funciona através da indução eletromagnética. Ele possui um disco de metal que gira ao passar eletricidade pelas bobinas, gerando um campo magnético. Esse campo impulsiona o disco, girando-o e fazendo com que os ponteiros do medidor se movam quando a energia é consumida. A velocidade de rotação do disco está diretamente relacionada com o campo magnético, portanto, quanto mais forte for o campo magnético, mais energia será consumida, e, conseqüentemente, mais rápido o disco irá girar. Estes aparelhos utilizam o sistema de medição “in loco” realizadas por técnicos das concessionárias. Este medidor por ser analógico tem como fundamentação básica a medida de corrente (amperímetro).

Figura 8 – Medidor de energia eletromecânico



Fonte: Adaptado de (Mattede, 2023)

### 3.1.2 Medidor eletrônico

Os medidores eletrônicos são mais modernos e precisos que os eletromecânicos. Eles utilizam circuitos eletrônicos para medir o consumo de energia e possuem displays digitais que facilitam a leitura dos dados, sendo monitorados e a coleta de dados realizada à distância.

Figura 9 – Medidor de energia eletrônico



Fonte: Adaptado de (Potenza, 2023)

### 3.1.3 Medidor digital ou inteligente

Figura 10 – Medidor de energia digital ou Inteligente



Fonte: Adaptado de (Mattede, 2023)

Também conhecido como smart meter este tipo de medidor de energia é uma evolução dos medidores eletrônicos. Ele possui funcionalidades avançadas, como comunicação bidirecional com a concessionária, monitoramento em tempo real do consumo e a possibilidade de gerenciar a energia de forma mais eficiente. Também sendo monitorados à distância (MATTEDE, 2019).

Se nos instrumentos analógicos o modelo básico é o amperímetro, a operação dos aparelhos digitais tem como fundamento a medida de tensão (voltímetro). A alteração da configuração inicial permite que sejam medidas outras grandezas, como corrente, resistência, frequência, temperatura e capacitância.

Ressalte-se que todos os medidores de energia elétrica estão sujeitos a margem de erro, sendo esta uma medida de incerteza que pode afetar a medição do consumo elétrico. Essa margem de erro é definida como a diferença entre o valor real do consumo de energia e o valor medido pelo medidor. Os medidores de energia elétrica são projetados para medir o consumo com uma precisão determinada, mas existem fatores que podem interferir nessa medição, como as condições climáticas, a qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária e a idade do medidor (GRACO, 2023).

Segundo a ANEEL (2021) a margem de erros na medição de energia permitida é definida de acordo com a classe de tensão medida, ou seja, se é utilizado em medições de consumo residencial, comercial, industrial ou de outra natureza. Para cada classe, são estabelecidas as especificações técnicas e os limites de tolerância para a margem de erro entre o que está sendo medido e o que realmente está sendo consumido, fisicamente. Para

os medidores das distribuidoras, ou os “relógios de energia”, normalmente, a margem de erro permitida no Brasil para medidores de energia elétrica residenciais é de até 2%. Para medidores de energia elétrica industriais é de até 2% para medidores de demanda ativa e até 3% para medidores de demanda reativa.

Além da margem de erro prevista, outros problemas podem afetar o funcionamento dos medidores de energia. Graco (2023) exemplifica algumas fontes de erro que podem alterar o funcionamento dos medidores alterando a medição, sendo eles:

1. **Erro de calibração:** Os medidores de energia elétrica devem ser calibrados periodicamente para garantir que estejam funcionando corretamente e fornecendo medições precisas. Se houver desvios na calibração, as medições realizadas pelo medidor podem ser imprecisas. É comum que o horário interno do medidor comece a mudar com o tempo, o que pode alterar no horário de ponta e fora de ponta, logo é importante realizar a calibração da data do medidor;
2. **Erro de medição do medidor:** Os próprios medidores de energia elétrica podem introduzir erros de medição. Isso pode ocorrer devido a problemas de precisão nos componentes internos do medidor, como os sensores de corrente e tensão, ou devido a desgaste ou envelhecimento dos componentes ao longo do tempo. Também pode acontecer do uso de medidores com dimensionamento errado, por exemplo TCs de 1000 ampéres em cargas de 100 amperes;
3. **Interferência eletromagnética:** A presença de campos eletromagnéticos externos pode interferir nas medições de energia elétrica. Essa interferência pode ser causada por equipamentos elétricos próximos, cabos de alimentação mal aterrados ou até mesmo por fenômenos naturais, como raios. A interferência eletromagnética pode levar a leituras imprecisas dos medidores;
4. **Variações na tensão e na corrente:** Flutuações na tensão e na corrente elétrica podem afetar a precisão das medições de energia. Por exemplo, se a tensão fornecida pela rede elétrica não for estável, isso pode resultar em medições incorretas de energia;
5. **Perdas nos condutores:** Nos fios e cabos podem ocorrer perdas devido à resistência natural dos cabos e componentes elétricos. Essas perdas podem resultar em medições de energia mais baixas do que a energia real consumida; e
6. **Erros de leitura e manipulação dos dados:** Erros humanos durante a leitura dos medidores ou na manipulação dos dados coletados também podem introduzir erros nas medições de energia elétrica. Isso pode incluir erros de leitura, transcrição

incorreta de valores ou falhas no registro dos dados. Além do uso de técnicas de processamento dos dados, como a truncagem. Para evitar isso, é necessário o uso de softwares e medidores inteligentes configurados por profissionais qualificados.

A tabela 5 apresenta um comparativo entre os três tipos de medidores de energia elétrica: eletromecânicos, eletrônicos e inteligentes. Destacando as principais características de cada tecnologia, incluindo aspectos como precisão, tempo de vida útil, custo médio de aquisição, além da capacidade de comunicação remota.

Tabela 5 – Comparativo entre os medidores de energia elétrica.

Medidor	Precisão(%)	Tempo de Vida Útil (anos)	Custo Médio Aquisição (R\$)	Capacidade de comunicação remota
Eletromecânico	2%	20-25	150,00	Indisponível
Eletrônico	1%	15-25	250,00	Indisponível
Inteligente	0,1%	13-20	1400,00	Disponível

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2 A Implementação e a Regulamentação dos Medidores Inteligentes

### 3.2.1 A Evolução dos Medidores de Energia Elétrica um breve resumo

Segundo a Embrasul (2022) a primeira demonstração pública de iluminação elétrica no Brasil ocorreu em 1879, na Central do Brasil, na cidade do Rio de Janeiro, por iniciativa do imperador D. Pedro II, que havia recebido um conjunto de lâmpadas incandescentes do inventor americano Thomas Edison, quando foram instaladas 6 lâmpadas a arco voltaico “velas Jablochhoff”, alimentadas por dois dínamos “Gramme”. No entanto, a iluminação elétrica ainda não estava disponível para toda a população, pois dependia da construção de usinas geradoras e de redes de distribuição.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2021) a primeira cidade brasileira a ter iluminação elétrica permanente nas ruas foi Campos dos Goytacazes, no norte do estado do Rio de Janeiro, em 1883. A cidade contava com uma usina termelétrica movida a lenha que fornecia energia para 39 lâmpadas instaladas em postes de ferro.

Os primeiros sistemas de geração e distribuição de energia elétrica em centros urbanos surgiram no final do século XIX. Esses sistemas eram baseados na produção de corrente elétrica por meio de máquinas movidas a vapor ou a água, chamadas de geradores ou dínamos, que eram instalados em centrais elétricas próximas aos locais de consumo.

A distribuição da corrente elétrica era feita por meio de cabos condutores que saíam das centrais elétricas e se ramificavam pelas ruas, conectando-se aos postes de iluminação ou às residências e estabelecimentos comerciais. A tensão da corrente elétrica era reduzida por meio de transformadores, que eram dispositivos capazes de alterar a relação entre a tensão e a corrente em um circuito elétrico, mantendo constante a potência. Desde então as usinas geradoras expandiram e se ramificaram em todo o mundo (EMBRASUL, 2022).

Para a captação do consumo, as primeiras concessionárias de energia tinham a necessidade da instalação, nas unidades consumidoras, de mecanismos de mensuração de consumo. Em 1888 Oliver B. Shallenberger, a partir de experimentos relacionados à construção de uma lâmpada de arco corrente alternada, conseguiu desenvolver o medidor ampère-hora para corrente alternada, que fez sucesso nos anos seguintes, tornando-se o padrão adotado pelas indústrias da época. (LIMA e PEREIRA, 2011).

A partir da rápida expansão do setor elétrico, os motores elétricos utilizavam a corrente alternada para seu acionamento, mas os medidores existentes à época não tinham capacidade de mensurar o consumo em diferentes tipos de tensões, tampouco em baixa potência de corrente alternada. Assim, Shallenberger conseguiu desenvolver um novo modelo de medidor funcional, composto por um pequeno motor de indução com bobinas de tensão e corrente defasadas de 90 graus entre elas. Considerado inovador para a época, o protótipo era pesado (19 kg) e de custo elevado (VAZ, 2012).

Ainda segundo Vaz (2012) os primeiros medidores watt-hora datam de 1903, comercializados em massa pela General Electric. Tal tecnologia de medição foi então amplamente utilizada até o início da década de 70 e adotada por diversos fabricantes.

A partir da década de 1970 começaram a surgir novos avanços na medição de energia elétrica. Surgiram os medidores híbridos que faziam uso do sistema mecânico tradicional, porém dotados de visores eletrônicos para facilitar a leitura do consumo de energia. No setor elétrico brasileiro, os medidores eletrônicos passaram a surgir apenas na virada da década de 1980 para 1990 (Lima,2011).

O sistema convencional de medição de energia dos anos 90 e início dos anos 2000 foi caracterizado pelas seguintes propriedades: coleta mensal, medidor eletromecânico ou eletrônico, leitura manual e processamento manual ou automático e, também, por banco de dados. Com o passar dos anos, a medição passou a ser mais automática, sendo chamada de Automated Meter Reading (AMR), sua particularidade é a coleta em quase tempo-real, comunicação mono-direcional, medidor eletrônico, leitura automática, processamento automático e banco de dados. Em seguida, teve mais avanços com as tecnologias e a medição passa a ser chamada de Infraestrutura de Medição Automatizada (Advanced Metering Infrastructure – AMI)

Desde os tempos primórdios da história da eletricidade até os dias atuais, muitas inovações tecnológicas se aliam a medição da energia. Nos dias atuais, segundo censo do IBGE (2022) dos 203.080.756 brasileiros, 99,7% possuem a disponibilidade de energia elétrica, existindo inúmeras concessionárias trabalhando no sentido de suprir a necessidade de energia do povo brasileiro. Este trabalho se torna profícuo na obtenção de uma melhor qualidade de energia elétrica fornecida imposta pela necessidade de adaptação às Legislações brasileiras da área, além é claro, da obtenção do consumo o mais próximo da realidade.

Na atualidade, existe 3 tipos de medidores disponíveis no mercado. Os eletromecânicos ou analógicos, os eletrônicos e os inteligentes. Os medidores inteligentes se destacam por conseguirem mensurar com exatidão a qualidade da energia elétrica, produzindo dados fidedignos de consumo, apesar de ainda serem usados os medidores analógicos e eletrônicos em grande parte da demanda consumidora. Segundo Faerman (2023) o país conta atualmente com mais de 4 milhões de unidades consumidoras automatizadas, segundo levantamento com os principais grupos de distribuição de energia, para um restante ainda de aproximadamente 85,8 milhões em futuras implementações, o que demonstra uma gama ainda pequena de implementação dos medidores inteligentes.

Ainda Segundo Faerman (2023), além de disponibilizar em detalhes o consumo individual e otimizar o monitoramento e predição remota de falhas, ocorrências, furtos e demais perdas não técnicas, assim como o fluxo de carga da geração distribuída e outros componentes da rede, ainda colabora para eficiência da operação. Esses dispositivos podem ajudar as concessionárias no ajuste de preços e proteção à receita, incentivando também o uso mais responsável da energia e o empoderamento do consumidor.

O funcionamento dos medidores inteligentes depende de uma rede elétrica com uma arquitetura apropriada. Fazem parte dessa arquitetura múltiplos dispositivos de medição e comunicação, equipamentos de acionamento e controle, sistemas de comunicação de dados e sistemas computacionais, que devem operar de forma integrada. Essa interação produz fluxo de dados capazes de alcançar grandes volumes, com exigências distintas em relação a tempos de resposta e também com uma demanda elevada na capacidade de processamento. A medição eletrônica envolve questões que vão muito além dos medidores instalados nas residências, comércio e indústrias. O processo de medição começa na geração e vai até o consumidor final (GALLOTTI, 2021).

A bem da verdade, pode-se afirmar que as redes elétricas convencionais não estão totalmente preparadas para o funcionamento dos medidores inteligentes. Quando se compara as redes elétricas convencionais e as redes inteligentes, nota-se grande discrepância nos parâmetros exigidos. Existe uma concordância de que a infraestrutura de comunicação atual que suporta as operações das redes necessita de modernização. No Brasil a

infraestrutura utilizada não foi projetada para atender as necessidades das indústrias com os requisitos atuais. Nesse contexto, a inserção do conceito de redes inteligentes fornecerá uma concordância entre a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia e a infraestrutura de comunicações digitais e processamento de dados (FROTA, 2012). Na tabela abaixo pode-se observar um comparativo entre as redes elétricas convencionais e as redes elétricas inteligentes:

Tabela 6 – Comparativo entre as Redes elétricas convencionais e as redes elétricas inteligentes

<b>Rede Padrão</b>	<b>Rede Inteligente</b>
Os usuários desatualizados e não participam do sistema.	As informações estão disponíveis de maneira que o usuário pode escolher entre muitos planos, preços e opções de compra e venda.
Sujeita a uma produção centralizada, com limitações na geração e armazenamento.	Recursos de energia <i>plug and play</i> para ajudar na produção centralizada.
Mercado com limitações e sem integração	Mercado integrado e que possui inovações
Concentração nas falhas.	Concentração na qualidade com uma diversificação de preços a depender da necessidade do cliente.
Inteligência da rede com limitações.	Rede inteligente integrada com a gerência.
Foco na proteção depois que ocorre a falha.	Evita interrupções, diminuição do impacto e recuperação rápida das falhas.
Vulnerável a destruidores e a desastres naturais	Identifica, atenua e se restaura rapidamente e de maneira eficiente após desastres.

Fonte: Lopes et al., 2015, apud Menezes, p. 14, 2020.

### 3.2.2 As Principais iniciativas de Expansão das Redes Elétricas Inteligentes

A fim de que as redes elétricas sejam modernizadas e seja possível transformar o sistema Smart grid em uma realidade escalável, várias iniciativas estão sendo tomadas por empresas privadas já a longa data, a fim de que se expandam por todo o Brasil. Dentre os principais investimentos podem ser citados:

As concessionárias fluminenses foram as pioneiras no uso de medidores eletrônicos em favor do combate às perdas comerciais. A Ampla, instalou cerca de 300 mil unidades entre 2003 e 2009, o equivalente a 12% dos seus clientes. Com isso, foi possível reduzir suas perdas em 5 pontos percentuais, de 25% para 20%, para 2010 a meta é instalar 50 mil aparelhos. A Light, com uma perda total de 21%, sendo que 15% se referem a perdas comerciais, optou por instalar medidores digitais em locais de alto poder aquisitivo. Até o momento foram instalados cerca de 40 mil aparelhos, que reduziu as perdas desses consumidores de 25% para 9%. (DUTRA, 2023).

Já a Eletrobras Segundo Dutra (2023) anunciou investimentos na ordem de R\$700 milhões em automação e processos operacionais e comerciais nas distribuidoras do grupo. Pretendendo desta forma implantar um centro de controle de medição com o objetivo de reduzir as perdas. Além disso, quer levar para suas subsidiárias a experiência que vem dando bons resultados nas concessionárias do Rio de Janeiro que é a instalação de medidores eletrônicos, sua meta é instalar mais de 400 mil medidores em clientes de média e baixa tensão.

A Cemig, por sua vez, trabalhou num programa de automação da distribuição, a chamada Cidade do Futuro. O projeto foi implantado em Sete Lagoas (MG), que possui mais de 80 mil unidades consumidoras (DUTRA, 2023).

A Bandeirantes implementou um projeto-piloto no município de Aparecida (SP) com o objetivo de implantar: (i) um sistema completo de medição inteligente, nas unidades consumidoras; (ii) medidores em todos os alimentadores de média tensão e em todas as estações transformadoras (ABDI, 2012).

A CPFL faz parte desde 2009 do Global Intelligent Utility Network Coalition, que é um grupo formado com o intuito de desenvolver estudos e discutir as formas de aplicação de smart grid. Única representante da América Latina, a companhia atua juntamente com outras 11 distribuidoras de países como Estados Unidos, Índia e Austrália no planejamento de um estudo que visa a automação de 100% das empresas (DUTRA, 2023).

A EDP, holding de energia de origem portuguesa, lançou no Brasil, por meio de duas de suas distribuidoras, a EDP Bandeirante e a EDP Escelsa, dois projetos de cidades inteligentes denominados InovCity. O primeiro foi lançado na cidade de Aparecida (SP), em outubro de 2011 e o segundo foi inaugurado nos municípios de Domingos Martins e Marechal Floriano, situados no Estado do Espírito Santo.

O Projeto Parintins foi lançado em junho de 2011. Foram instalados mais de três mil medidores inteligentes em consumidores de baixa tensão e, atualmente, está sendo implantado um sistema de monitoramento dos transformadores da cidade que permitirá, além da análise de parâmetros técnicos como a sobrecarga, realizar o balanço energético com vistas à redução de perdas não técnicas (MOREIRA, 2014).

O Grupo Enel, por meio da distribuidora de energia Ampla, desenvolveu um projeto piloto de cidades inteligentes em Armação de Búzios. Iniciado em novembro de 2011, o projeto foi dividido em cinco fases: elaboração e planejamento, definição de tecnologias e contratações, execução, medições e elaboração dos relatórios finais. Durante o processo de execução foram instalados 9.400 medidores inteligentes com leitura de fibra ótica, totalizando 85 km, entre malha e tronco, por toda a cidade de Búzios. A iluminação pública também foi beneficiada, com a colocação de 60 luminárias Led com pontos de luz telecomandados na Lagoa da Usina e mais de 70 luminárias na Estrada da Usina. O projeto

incorporou também novas fontes de energia renováveis à rede local existente pela instalação de painéis fotovoltaicos em edifícios públicos e microssistemas eólicos no município (MOREIRA, 2014).

Em iniciativa mais recente A Neoenergia opera, desde 2020, uma rede privada 4G/LTE que atende toda a região de Atibaia, em São Paulo. Trata-se de um projeto pioneiro de digitalização da rede elétrica e da operação da companhia, com mais de 78 mil medidores inteligentes e esquema completo de automação da rede com Self-Healing em operação. Usando a infraestrutura básica desse projeto, há ainda iniciativas complementares, como o desenvolvimento de uma prova de conceito (PoC) com medidores inteligentes comunicando em 4G LTE com frequência de 410-415MHz, o que é uma evolução no modelo de aplicação e permitirá no futuro, em larga escala, acelerar a implantação com investimento otimizado, levando benefícios para os clientes de todas as distribuidoras (NEOENERGIA, 2024)

A Neoenergia ainda é responsável pela modernização da medição inteligente no arquipélago de Fernando de Noronha. Em janeiro de 2023, a empresa substituiu mais de mil medidores homologados com funcionalidades mais amplas que permitem atender solicitações remotamente. O processo incluiu ainda a manutenção do sistema de telecomunicação na região, com equipamentos projetados especialmente para uma gestão precisa das redes elétricas. A iniciativa também integra o projeto Energia do Futuro (NEOENERGIA, 2024).

A Enel instalou em 2021 100 medidores inteligentes no bairro de Perus e Pirituba, zona oeste de São Paulo. Os equipamentos fazem da primeira fase do projeto piloto *smart meter*<sup>1</sup>.

A CPFL faz esforços contínuos para modernizar a sua rede elétrica. Em 2020, o investimento na instalação de religadores, chaves e outros equipamentos telecomandados somou R\$ 160,4 milhões. Em 2021, 89,2% dos atendimentos realizados aos clientes em toda a área de concessão foram realizados por meio de plataformas e canais digitais<sup>2</sup>.

A Light comprometida com a manutenção e qualidade dos serviços prestados, vem atualizando processos e sistemas. Para combater as perdas de energia, um dos maiores desafios de sua área de concessão, a empresa investiu R\$ 1,7 bilhão, nos últimos cinco anos, em soluções, como a blindagem da rede elétrica para 50 mil clientes, que reduz as fraudes e melhora a qualidade do fornecimento de energia. A empresa modernizou grande parte dos seus medidores, implantando a tecnologia de telemedição, que permite a realização de serviços à distância, como leitura, religação e corte de energia <sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Informações retiradas do site da concessionária. Acesso em: 12 ago. 2024

<sup>2</sup> Informações retiradas do site da concessionária. Acesso em: 12 ago. 2024

<sup>3</sup> Informações retiradas do site da concessionária. Acesso em: 12 ago. 2024

Segundo a Abradee (2024) desde 2022, os investimentos em tecnologias que modernizam a rede elétrica, como monitoramento remoto, automação e outras inovações que aumentam a resiliência, praticamente dobraram, atingindo R\$ 31 bilhões por ano. Focando na expansão, os investimentos das distribuidoras aumentaram significativamente, passando de R\$ 9 bilhões em 2019 para R\$ 19,6 bilhões em 2022, um crescimento de 118%.

As redes inteligentes representam o futuro das instalações elétricas do Brasil, os primeiros percalços, que impossibilitavam a instalação das redes inteligentes estão sendo vencidos e as redes inteligentes tendem, em pouco tempo, a se tornarem uma realidade escalável trazendo inúmeros benefícios, não somente as concessionárias, assim como também aos consumidores.

### 3.2.3 As redes inteligentes pelo Mundo

São reportadas abaixo as principais iniciativas de implantação de redes elétricas inteligentes ao redor do mundo.

No Reino Unido, o órgão regulador OFGEM tem uma iniciativa denominada zona de energia registrada voltada ao Acompanhamento Setorial para estimular o desenvolvimento e implementação de soluções inovadoras para conectar geradores distribuídos à rede das empresas distribuidoras. Os recursos provem do fundo para baixa emissão de carbono que destinará até £\$ 500 milhões de libras para projetos que testem, operem e comercializem novas tecnologias (ABDI, 2012).

O programa das companhias elétricas japonesas prevê o desenvolvimento de redes do tipo smart grid que contemplem a geração de energia solar, cujo investimentos governamentais superam U\$ 100 milhões. Outras iniciativas são voltadas para o desenvolvimento de medidores inteligentes (ABDI, 2012).

Na Itália Em 2011, o órgão regulador italiano Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas aprovou oito projetos para a modernização do sistema de distribuição de média tensão, a serem financiados pelas tarifas de uso de energia, voltados para demonstrar o gerenciamento e a automação das soluções de integração do sistema, em escala comercial (ABDI, 2012).

No Canadá, o governo do Estado de Ontário obriga a instalação de medidores eletrônicos em empresas e casas. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2014).

Na União Europeia, os 27 países membros têm trabalhado para renovar e expandir suas redes de geração, transmissão e distribuição. O principal objetivo é a redução de emissões de gases do efeito estufa a partir do aumento do uso de fontes renováveis. (BNDES, 2014).

De acordo com a Mordor Intelligence (2024) em 2021, as concessionárias de energia elétrica dos EUA tinham cerca de 111 milhões de instalações de infraestrutura de medição avançada (inteligente) (AMI), que representam cerca de 69% do total de instalações de medidores elétricos. Os clientes residenciais representaram cerca de 88% do total de instalações AMI, e cerca de 69% do total de contadores elétricos residenciais eram contadores AMI.

Espera-se que os Estados Unidos dominem o mercado norte-americano de redes inteligentes. Espera-se ainda que o crescimento do mercado de redes inteligentes nos Estados Unidos seja significativo durante o período de previsão, com a expectativa de que a participação de instalação de medidores inteligentes atinja 80% entre os clientes de eletricidade até o final de 2024.

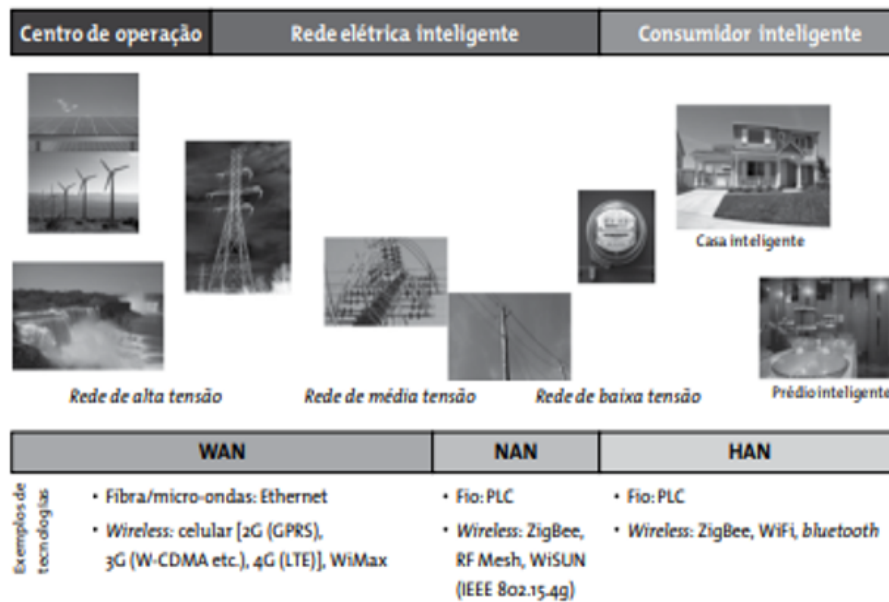
### 3.2.4 Medidores Inteligentes e as Redes Inteligentes – Considerações e Arquitetura

O medidor Inteligente é um dos componentes principais de todo o sistema. Ele é o responsável pela maioria das tarefas em uma rede inteligente. Capaz de processar dados e enviar comandos para vários outros equipamentos, permitindo a integração de toda a cadeia de fornecimento. Além de medir o consumo em intervalos programados, o medidor inteligente se utiliza de uma combinação de tecnologias, como sensores de tempo real, notificação de falta de suprimento e monitoramento da qualidade da energia. Uma de suas maiores vantagens é que ele possui comunicação bidirecional, podendo receber e enviar dados. Várias tecnologias podem ser usadas para tal, como ZibBee, PLC, rede Mesh, GRPS, entre outras (RELATÓRIO SMART GRID, 2012).

A complexidade dos atores envolvidos nas redes inteligentes reforça a necessidade da padronização. Fabricantes de equipamentos elétricos, software, indústrias de TIC, de bens de eletrônica de consumo e de produtos de refrigeração, aquecimento e ventilação, entre outros, formam um conjunto amplo de provedores de produtos e serviços que nunca trabalharam juntos e precisarão colaborar para o desenvolvimento das redes inteligentes. Caso contrário, as potencialidades da automação residencial não poderão ser exploradas a contento (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Na Figura 11 é possível visualizar todos os atores envolvidos na rede inteligente.

Figura 11 – A arquitetura das redes smart grid



Fonte: Rivera; Esposito; Teixeira, (2013)

A complexidade dos atores envolvidos nas redes inteligentes reforça a necessidade da padronização. Fabricantes de equipamentos elétricos, software, indústrias de TIC, de bens de eletrônica de consumo e de produtos de refrigeração, aquecimento e ventilação, entre outros, formam um conjunto amplo de provedores de produtos e serviços que nunca trabalharam juntos e precisarão colaborar para o desenvolvimento das redes inteligentes. Caso contrário, as potencialidades da automação residencial não poderão ser exploradas a contento (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

### 3.2.5 Requisitos de arquitetura das redes inteligentes

a) **Comunicação de dados:** Segundo Lopes (2012) do ponto de vista das redes de comunicação de dados, as redes inteligentes podem fazer uso potencial de um conjunto abrangente de tecnologias de rede, tais como:

- PLC (Power Line Communications) – versões faixa larga e faixa estreita;
- Ethernet (E-Carrier, Gigabit, EPON e outras);
- IP/MPLS (MultiProtocol Label Switching) e IP/GMPLS (Generalized MPLS) (IP com comutação de circuito eficiente e restauração);
- IP/WDM (IP com redes óticas de alto desempenho);
- DCN (Dynamic Circuit Network) (redes com provisionamento de circuitos dinâmicos);

- Redes de Sensores sem Fio (WSN – Wireless Sensor Networks) e redes em malha (mesh);
- WiFi - IEEE 802.11;
- WiMax; Soluções tecnológicas baseadas na telefonia móvel (GSM, GPRS, 3G, 4G);
- ZigBee;
- Bluetooth, dentre outras.

b) **Modelo de dados:** Segundo o relatório Smart Grid (2012) os dados transmitidos em uma interface devem ser apresentados em modelo de dados que seja compreendido entre distintas entidades. A tendência atual em formatar informação semântica em formatos baseados em XML – Extensible Markup Language – deve ser seguida.

Há vários do uso do modelo de dados baseados em XML:

- A norma IEC 61850 define um modelo para aquisição de dados de dispositivos eletrônicos inteligentes. A norma define uma linguagem de configuração SCL – Substation Configuration Language – que é baseada em XML. A partir dessa configuração, o projetista pode planejar um esquema de supervisão, controle e proteção de uma subestação. O modelo é utilizado para a definição de parâmetros dos IEDs. Isto permite que um fabricante de IED forneça a informação a um fabricante de sistema de supervisão de dados de forma que se torna simples importar os dados;
- A norma CIM – Common Information Model – define um modelo comum para dados de sistema de supervisão e controle. O modelo é passível de extensão e vem sendo adotado por operadores e empresas do setor elétrico. Atualmente ocorrem testes de interoperabilidade entre diversos fabricantes;
- A norma IEC 61968 define uma extensão do modelo CIM para dados de sistemas de distribuição de energia.

c) **Segurança da Informação:** Segundo relatório Smart Grid (2012) é necessário definir soluções que garantam a integridade de dados transmitidos de forma a evitar possíveis fraudes, ou ataques aos sistemas de informação, como por exemplo, medição eletrônica. Também é necessário definir autenticidade de entidades que transmitem e das que recebem dados.

A área de segurança é reconhecida pelo NIST como uma área em que o estado da arte ainda se encontra aquém do necessário para os requisitos de segurança em Smart

Grid. Há necessidade de proteções contra violação de informação em medidores eletrônicos, por exemplo, ao atualizar firmware de dispositivos. Em termos sistêmicos, um desafio é a gerência de credenciais como chaves criptográficas de uma quantidade grande de dispositivos, talvez da ordem de dezenas de milhões.

Os requisitos para segurança são inúmeros e as soluções provavelmente vão compreender uma camada adicional ao nosso modelo, em paralelo à camada lógica de supervisão e medição.

- d) **Capacidade de Armazenamento e processamento:** Segundo relatório Smart Grid (2012) é esperado grande volume de dados causado por grande número de fontes de tráfego ou por alta intensidade na demanda de dados. Em sistemas SCADA tipicamente há um fluxo intenso de limitadas fontes de tráfego fornecendo dados para uma unidade concentradora. Essas fontes de tráfego incluem, por exemplo, dispositivos eletrônicos inteligentes. No caso de sistemas de medição, ocorre um fluxo de dados entre um número grande de fontes de tráfego e uma unidade concentradora. Estas fontes de tráfego incluem, por exemplo, medidores eletrônicos de consumo. O número de fontes de tráfego é grande e potencialmente crescente, de forma que a comunicação deve ser escalável.

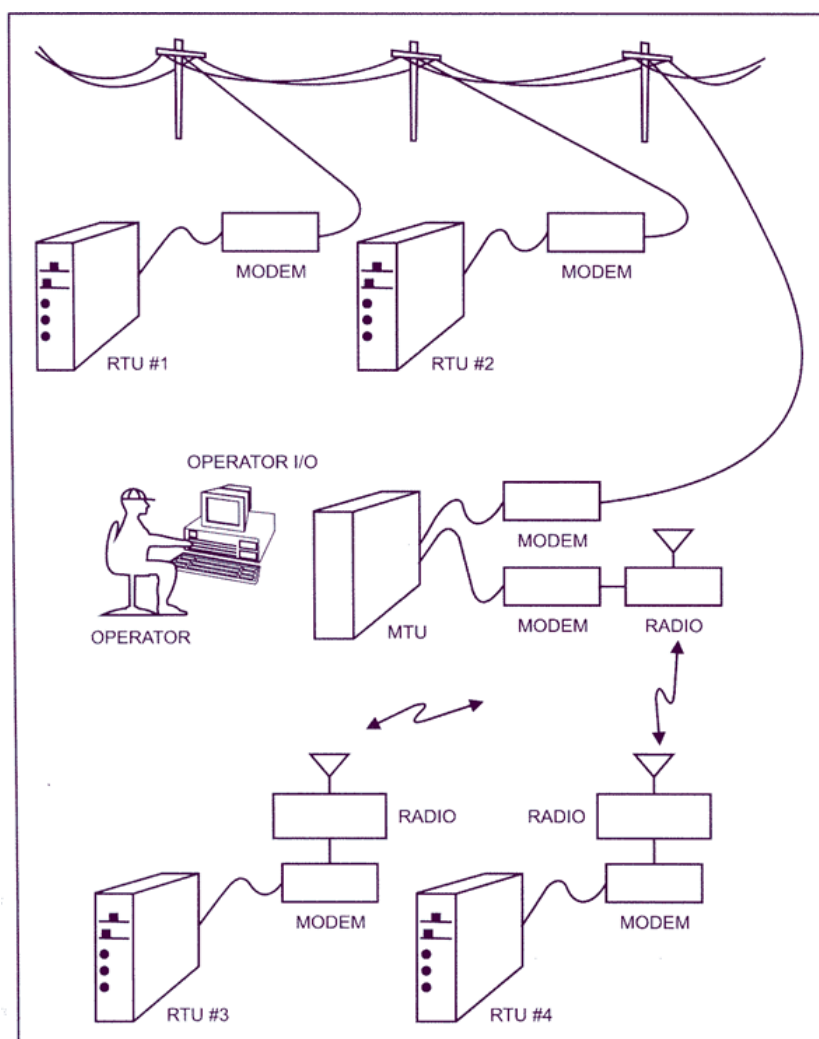
### 3.2.6 Principais protocolos utilizados pelas concessionárias de energia elétrica brasileiras

Atualmente existem várias arquiteturas aplicáveis à automação de subestações de energia elétrica, normalmente baseadas em Unidades Terminais Remotas - UTRs. As UTRs foram desenvolvidas com o objetivo de atuar como unidade de comunicação e interface entre os instrumentos de campo e um computador mestre. “São utilizadas para coletar uma grande quantidade de informações digitais e analógicas, como alarmes, eventos e medições, e enviá-las até o operador do centro de controle (STRAUSS, 2003, p. 46 APUD OLIVEIRA, 2005 P. 18).”

Segundo Oliveira (2005) as concessionárias de energia elétrica ou empresas do setor de energia automatizaram o seu parque de subestações, não sendo mais necessários operadores trabalhando em turnos. Todas as informações importantes e os controles dos equipamentos ficam disponíveis em tempo real no centro de controle da empresa, sendo, assim, operados remotamente. Sendo este sistema chamado de SCADA Supervisory Control And Data Acquisition, (Controle Supervisório e de Aquisição de Dados).

Na figura 12 podem ser observados os principais elementos de um sistema SCADA

Figura 12 – Principais elementos de um sistema SCADA



Fonte: Adaptado de (Oliveira, 2005)

Para dois ou mais equipamentos inteligentes se intercomunicarem, torna-se necessário o uso de um protocolo de comunicação. Halsall (1996) define protocolo:

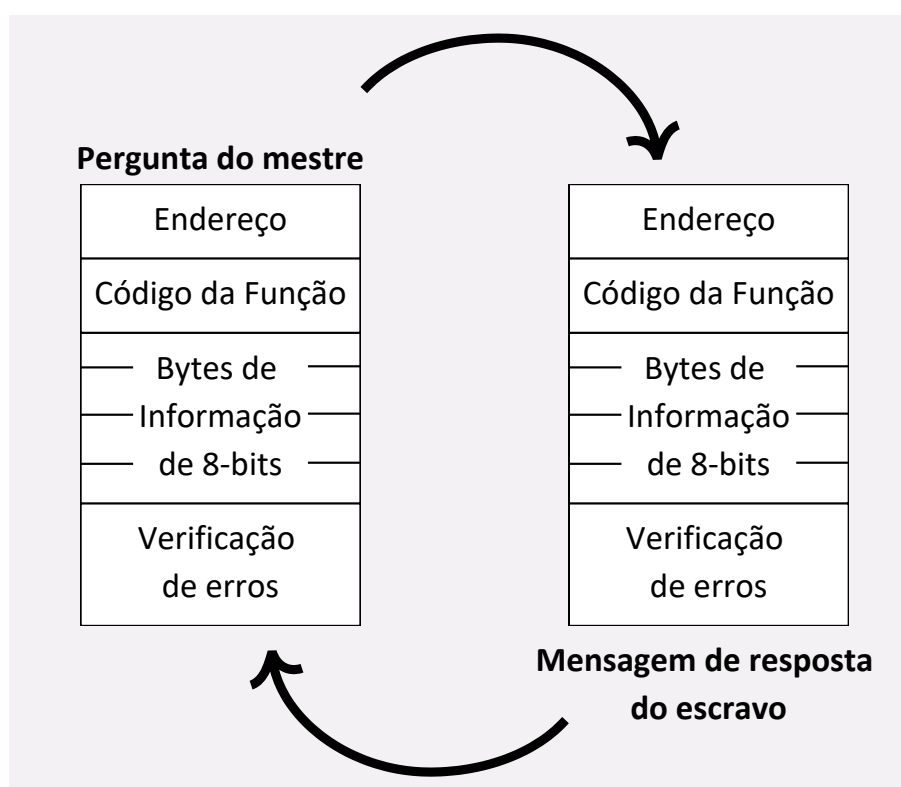
como um conjunto de regras para troca de mensagens. De fato, os documentos oficiais dos protocolos de comunicação definem regras para cada bit, palavra ou pacote de bytes trocado entre os equipamentos, para o correto tráfego de informações (HALSALL,1996, P. 14 APUD OLIVEIRA P. 24).

Segundo Oliveira (2005) no Brasil, pode-se citar alguns protocolos mais utilizados como o Modbus, o IEC 61850 e o DNP3.0.

- a) **Protocolo Modbus:** Segundo Oliveira (2005) o Modbus é um protocolo aberto, cujas especificações podem ser livremente baixadas pela Internet. Segue o esquema

mestre-escravo tradicional, ou seja, o equipamento mestre sempre inicia a comunicação, enviando uma mensagem de “pergunta” endereçada a um escravo, que responde com outro pacote. Esse processo é cíclico, como representado na figura a seguir.

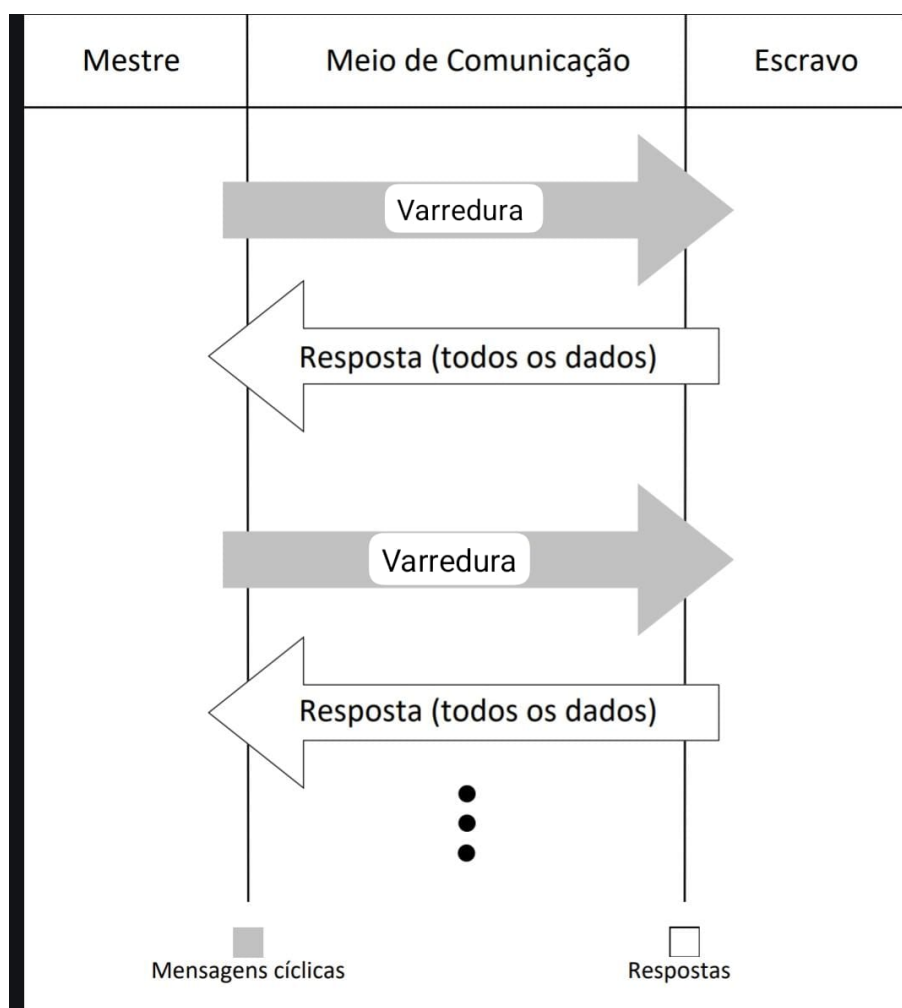
Figura 13 – Ciclo pergunta-resposta do mestre para o escravo



Fonte: Adaptado de (Oliveira, 2005)

A essa pergunta cíclica do mestre dá-se o nome de varredura (polling). Na Figura 14 observa-se a representação gráfica da varredura cíclica.

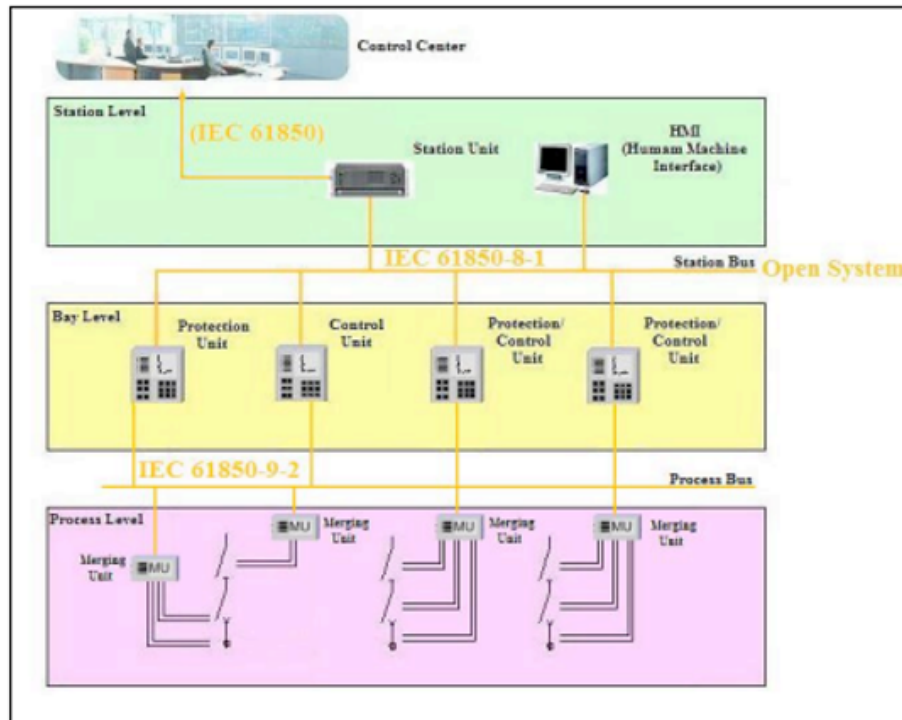
Figura 14 – Representação gráfica da varredura cíclica



Fonte: Adaptado de (Oliveira, 2005)

- b) **Protocolo de Comunicação IEC 61850:** Segundo Renda (2018) A norma IEC 61850 foi desenvolvida para ser um padrão de comunicação de equipamentos dentro da subestação. O documento elaborado engloba praticamente todos os aspectos da rede de comunicação em subestações. A norma utiliza um conceito diferente para estruturar os dados e serviços. Nesse modelo, os diversos tipos de dados e serviços presentes na subestação são abstraídos e são criados objetos para cada tipo. A grande vantagem em fazer-se isso está no fato destes objetos, ou seja, a estrutura de dados, ser independente do protocolo que está sendo utilizado para a comunicação, possibilitando que posteriormente mapeie-se esses objetos sob o protocolo escolhido. A arquitetura de comunicação do protocolo IEC 61850 pode ser observada na figura 15.

Figura 15 – Arquitetura de comunicação do protocolo IEC 61850



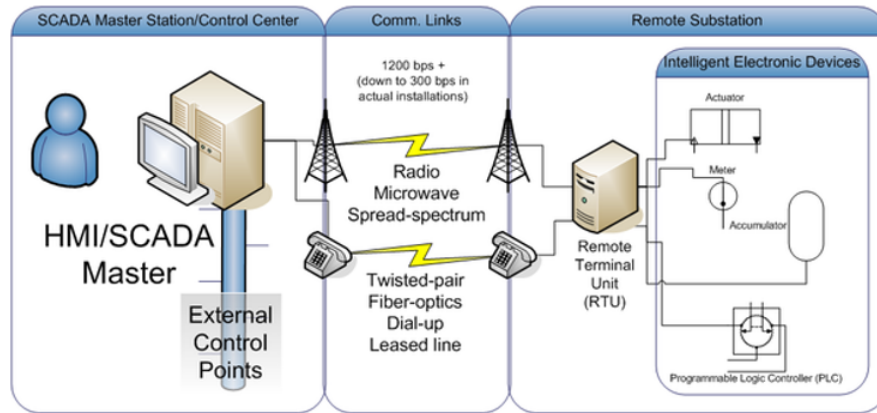
Fonte: Adaptado de (Renda, 2018)

Um dos principais benefícios que o IEC 61850 traz é o fato de ser possível obter valores através da rede, necessitando assim de menos entradas e saídas que acabariam por gerar maior demanda de tempo nas comunicações (RENDA, 2018).

- c) **Protocolo DNP3:** O DNP3 (Distributed Network Protocol) é um protocolo de comunicação de código aberto. Assim como o Modbus ele define dois tipos de estações, uma mestre (master) e outra escrava (outstation). Além disso, ele é amplamente utilizado em Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition), porque ele possibilita a comunicação entre dispositivos dentro de um sistema de automação como as smart grids (dispositivos inteligentes) (UFRJ, 2014).

O sistema de funcionamento do protocolo DNP3 pode ser observado na figura 16.

Figura 16 – Sistema de funcionamento do protocolo DNP3



Fonte: Adaptado de (UFRJ, 2014)

Como todo protocolo o DNP3 define um conjunto de regras para que a comunicação entre dispositivos aconteça. O DNP3 é um protocolo para transmissão de dados de um ponto A para um ponto B, que pode ser feita tanto por comunicação serial quanto IP. Diferente da maioria dos protocolos que não se preocupam com a qualidade do serviço e trabalham com a ideologia do menor esforço o DNP3 foi desenvolvido para otimizar a comunicação (UFRJ, 2014). O protocolo DNP3 tem importantes características que o tornam robusto e eficiente, pois, ele oferece fragmentação dos dados, verificação de erros, controle de link, etc. Tornando-se amplamente utilizado e mais eficiente que o Modbus.

Os protocolos de comunicação compreendem um grande avanço na área da energia elétrica, porém os ataques contra estes protocolos podem ser devastadores, pois incluem toda a rede de energia, compreendendo desde as subestações e redes de distribuição até as residências e instalações comerciais e industriais. As consequências dos ataques variam de falhas no serviço até danos físicos, no caso em que um atacante é capaz de perturbar o sistema de proteção, comprometendo a segurança em instalações elétricas (YONA ET. AL. 2016).

Segundo Yona et. al (2016) apesar de serem um grande avanço precisam ser monitorados de perto e aprimorados quanto a segurança e confiabilidade de forma contínua, pois também podem representar problemas que afetam a qualidade da energia elétrica.

### 3.2.7 A realidade das redes inteligentes no Brasil

Observa-se que o universo de distribuição de energia elétrica que é formado por 105 agentes, sendo 52 Concessionárias, 52 Permissionárias e 1 Designada, entre públicos,

privados e de economia mista, (ANEEL, 2021) as redes inteligentes no Brasil, em algumas regiões, apesar de terem saído do processo embrionário, ainda não conseguiram se expandir de forma escalável.

Segundo Marcolino (2019) para que ocorra um maior crescimento desta tecnologia no setor elétrico brasileiro, é necessário um maior incentivo às distribuidoras, especialmente no que tange a aquisição e implantação dos equipamentos, já que os impactos positivos não ficam concentrados apenas nas distribuidoras, mas são vistos em diferentes áreas de todo o setor elétrico. Em se tratando dos medidores inteligentes, estes ainda apresentam um custo alto de aquisição (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Segundo Dutra (2023) os estudos e projetos pilotos geralmente são focados em alguns aspectos, como qualidade de energia, segurança social e mobilidade urbana, entretanto existem inúmeros outros desafios para que exista de fato uma integração completa. Como o Brasil é um país de dimensões continentais, a troca dos medidores de energia por si só já representa um gigantesco desafio, somado a isso cada região possuindo suas próprias características sejam elas econômicas, geográficas, climáticas e culturais, leva ao surgimento de mais variáveis a equação, que devem ser estudadas e apresentadas soluções de novas tecnologias para atender cada alvo.

Ainda Segundo Dutra (2023) existem algumas questões que precisam ser aprimoradas, tais como: atualizações da rede, questões ambientais, segurança energética, confiabilidade e qualidade do produto, fontes intermitentes de geração, dentre outros.

Os medidores inteligentes são a peça fundamental para a implantação das redes inteligentes, e o que se observa é que muitas operadoras e concessionárias ainda não conseguiram atualizar seus equipamentos, ou se o fizeram, o fizeram em pequena escala, e ainda, os medidores necessitam de uma rede inteligente repleta de componentes de tecnologia de ponta, de alto custo.

### 3.2.8 A normatização das redes elétricas inteligentes no Brasil

No Brasil, o marco regulatório das redes smart grids aconteceu em 2010 por iniciativa do Ministério de Minas e Energia fundou um Grupo de Trabalho por meio da Portaria nº 440 com o objetivo de compreender e verificar ações necessárias para incentivar o estabelecimento de políticas públicas para a implementação de um Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente.

Segundo Gallotti (2021) com a implementação das redes inteligentes, existe a necessidade de uma nova regulamentação para reorganizar e redistribuir os custos e os benefícios dessas transformações entre consumidores e agentes envolvidos.

É essencial, para isso, a regulação atual diminuir as barreiras percebidas pelas distribuidoras no que se refere à perda de receita com a diminuição da utilização de eletricidade pelos seus consumidores finais. Elas têm que ser incentivadas a perceber a eficiência energética e a geração distribuída como oportunidade de negócios (GALLOTTI, 2021).

A criação de Leis para as novas tecnologias passa pelo desafio de equilibrar a garantia da proteção de direitos sem a restrição aos avanços tecnológicos, sendo esta a finalidade dos legisladores brasileiros (BEHNKE, 2024).

A regulamentação das redes elétricas inteligentes envolve um arcabouço legislativo imenso e cheio de especificidades. Neste arcabouço podem ser citadas como principais as normatizações:

- a) ABNT NBR 14519 Medidores eletrônicos de energia elétrica – Especificação;
- b) ABNT NBR 14520 Medidores eletrônicos de energia elétrica – Método de ensaio;
- c) ABNT NBR 14521 Aceitação de lotes de medidores eletrônicos de energia elétrica – Procedimento;
- d) ABNT NBR 14522 Intercâmbio de informações para sistemas de medição de energia elétrica;
- e) ABNT NBR 6146 - Invólucros de equipamentos elétricos - Proteção – Especificação;
- f) Resolução ANEEL 345/2008 Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica Nacional – PRODIST;
- g) Resolução ANEEL 1000/2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica;
- h) Resolução ANEEL 502/2012 – regulamenta sistemas de medição de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B;
- i) Resolução normativa Nº 733, de 06 de setembro de 2016. determinou as regras comerciais para aplicação da tarifa branca, bem como o cronograma de adesão dos consumidores;
- j) Resolução Normativa Nº 871, de 11 de fevereiro de 2020. Aprovou a revisão dos Módulos 6 e 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST;
- k) Portaria 587/2012 – Regulamento Técnico Metrológico para Apreciação Técnica de Medidores, de 05/11/2012;

- l) Ata de reunião Inmetro – Segurança de Software e Interoperabilidade – Datas: 23/06/15, 02/07/2015, 03/07/2015 e 22/09/2015. 4.15. INIGLB009 - Inspeção de materiais;
- m) PROJETO DE LEI N° 2.932, DE 2015. Dispõe acerca do Plano Nacional de Redes Elétricas Inteligentes;
- n) Regulamento 817/2023 Aprova o Regulamento dos Serviços das Redes Inteligentes de Distribuição de Energia Elétrica.

### 3.3 Desagregação de Cargas – Parâmetros de Tensão e de Corrente Relacionados ao Consumo

Segundo Sant’Ana (2018) técnicas de desagregação de carga exibem dados relevantes que podem ser explorados para desenvolver a melhor estratégia, que atue no sistema e forneça recomendações ao consumidor, para atingir a meta de reduzir as despesas com energia e fazer uso mais racional da mesma.

Uma tendência crescente na área de energia é a ocorrência de investimentos na área de microgeração, fato que incentiva a transição do modelo atual de transmissão de energia elétrica para as Redes Inteligentes. Considerando esse cenário em ascensão, novas formas de tarifação de energia têm surgido, a exemplo da Tarifa Branca no Brasil: essa, possui variação do valor da energia, conforme o horário do dia que se efetua o consumo, tendo como público alvo o perfil residencial. E, considerando esse cenário envolvendo diferentes tarifações e troca de informação bidirecional, o gerenciamento energético ganha espaço para o desenvolvimento, auxiliando agora os residentes, o que incentiva a aplicação de técnicas e métodos para identificar as cargas, entender sua demanda e elaborar a melhor estratégia para o consumidor (SANT’ANA, 2018).

Ainda é possível afirmar que as técnicas de desagregação possuem a finalidade de monitorar cargas e permitir diferenciá-las entre si. Essas técnicas podem atuar através de três vertentes, conhecidas como ILM (Monitoramento Intrusivo da Carga), NILM (Monitoramento de Carga Não-intrusivo) e o SILM (Monitoramento de Carga Semi-intrusivo).

Primeiramente, o método NILM foi criado com base no comportamento ao longo do tempo da potência dos equipamentos ligados, a partir de medições realizadas em apenas um ponto (comum), sem atuar no sistema, exibindo a medição apenas (DAMBROS; CAMPOS; SAUSEN, 2020).

No método NILM há um processamento complexo das informações, sendo a parte de computação bem arquitetada, podendo até ser utilizada a Inteligência Artificial na clas-

sificação da carga por exemplo. Ainda, o NILM é contemplado pelo conceito de assinatura de potências, onde cada eletrodoméstico em uma residência possui um padrão de uso da eletricidade que é singular, próprio. Como ele utiliza um único ponto de medição, ocorre a sobreposição de assinaturas de potência, demandando as etapas citadas acima para extrair e tratar adequadamente as informações. Porém essa característica se mostra mais viável economicamente pois necessita de somente um aparelho para realizar a medição e processamento (DAMBROS; CAMPOS; SAUSEN, 2020).

Ainda segundo Dambros; Campos; Sausen (2020), no sistema ILM, em contrapartida, há um elemento intermediário entre o equipamento e a tomada, o qual tem por função atuar como identificador de passagem de corrente, característica a qual permite que o sistema de gerenciamento atue nas cargas. A estrutura da operação envolvida nessa técnica é formada pela central de tratamento dos dados, a qual recebe as informações dos identificadores de cada equipamento presente no lar. E nota-se que cada carga possui um identificador, responsável por apontar um número para a mesma (ID4 = aspirador de pó), como também enviar essa informação para a central processadora. Essa se encarrega de apresentar gráficos de consumo e afins para cada tomada inteligente identificada.

E por último o SILM que busca utilizar o processamento de informações em equilíbrio com sensores distribuídos na instalação, para medição e identificação. A ideia é usar os sensores com ID em cargas de risco, de difícil modelagem tendo o benefício da segurança para esses casos; e, as outras cargas, utilizar um medidor NILM pois tem um padrão melhor definido e não oferecem risco (SANT'ANA, 2018).

Através da obtenção das formas de ondas de tensão e corrente de cada carga, são definidos e calculados os parâmetros básicos para desagregação. O gerenciamento energético representa uma aplicação de grande importância, fazendo uso de tecnologias modernas, técnicas de monitoramento e identificação de eventos que favorecem a criação de sistemas robustos e que atendam a requisitos específicos, customizados para cada cliente, como por exemplo: o consumo por equipamento, quais eletrodomésticos estão obsoletos ou com mal funcionamento e dicas de consumo eficiente (GARCIA, 2018).

Sant'Ana (2018) em seu estudo, realizou a modelagem computacional da rede e das cargas de uma residência utilizando o software PSIM, uma vez que tal simulador dispõe de um bloco específico que permite desenvolver programas em C, o qual foi utilizado para calcular, usando as equações regidas pela CPT (Teoria de Potência Conservativa) (GARCIA, 2018), e os parâmetros elétricos de interesse: a corrente IRMS, FP (Fator de potência), QF (Fator de Reatividade) e VF (Fator de Distorção). O trabalho foi concluído através do estudo das técnicas de desagregação e após adotar uma delas, obteve as curvas características de tensão e corrente de cada carga, bem como dos parâmetros básicos de desagregação de cargas.

Este estudo concluiu que o gerenciamento energético representa uma aplicação de grande importância, pois, ele se utiliza de tecnologias modernas, técnicas de monitoramento e identificação de eventos que favorecem a criação de sistemas robustos e que atendam a requisitos específicos, customizados para cada cliente.

Em um outro estudo realizado por Amaro (2022) a respeito da desagregação de cargas, teve o objetivo de identificar o consumo individual de energia elétrica de cada dispositivo dentro de uma residência. Foram usadas duas abordagens para resolver o problema do Monitoramento de carga não intrusivo (NILM - Non-intrusive load monitoring), uma baseada no Modelo fatorial de markov oculto (FHMM - Hidden markov factorial model) e a outra baseada em uma rede de Memória longa de curto prazo (LSTM - Long short term memory). Os dados de consumo de energia foram obtidos de uma base de dados pública denominada REDD, que contém medições de seis casas em baixa frequência na escala de 1Hz e disponibiliza os dados de consumo total e consumo real dos dispositivos em uma sequência de observações no período de um mês.

Foi possível concluir com este trabalho, que as sequências de entrada medidas em um sinal agregado impactam diretamente na predição e comparação dos resultados das abordagens e, a utilização de ferramentas e bases de dados públicas facilitam o pré-processamento e uso dos dados para realizar a desagregação do consumo de energia dos dispositivos.

A desagregação de dados constitui um avanço tecnológico possibilitado por intermédio do uso de medidores inteligentes. A desagregação ainda admite a utilização de vários modelos na obtenção e na manipulação dos dados.

### 3.4 Medidores Instalados – LIGHT E CPFL

Segundo a Light (2024) a companhia de energia elétrica utiliza 3 tipos de medidores, o eletrônico, o ciclométrico e o relógio de ponteiros, sendo os dois últimos considerados analógicos. Já a CPFL Energia está em uma campanha acirrada para a realização da troca de seus medidores analógicos e digitais por medidores de energia inteligente (CPFL ENERGIA, 2024).<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Não foi possível quantificar a tipologia dos medidores instalados pelas concessionárias por cliente. Foi feito contato telefônico com ambas as concessionárias que afirmaram que não disponibilizam esta informação, que agregaria muito a este estudo.

### 3.4.1 Os afundamentos de tensão e as interrupções de fornecimento – O que os medidores conseguem detectar

Segundo a ANEEL (2021) os afundamentos de tensão são casos particulares de variações momentâneas ou temporárias de tensão. No primeiro caso – afundamento momentâneo de tensão –, a duração do evento tem período entre 1 ciclo a 3 segundos e amplitude de tensão entre 0,1 pu e 0,9 pu, em relação à tensão de referência. No segundo caso – afundamento temporário de tensão –, a duração do evento tem um período de ocorrência de 3 segundos a 3 minutos, com a mesma faixa de variação do item anterior em relação à tensão nominal (0,1 pu a 0,9 pu).

Já as interrupções de energia segundo a ANEEL (2021) também conhecidas por desligamentos ou faltas da energia, são eventos de rápida ou longa duração, em que a tensão elétrica está abaixo de 70% da tensão elétrica de fornecimento (0,7pu). Por exemplo, para uma unidade consumidora atendida com tensão elétrica de 127V, será considerada uma interrupção do fornecimento quando a tensão está abaixo de 88,9V (127 x 0,7). Estes eventos são segregados entre interrupções de curta e longa duração. As interrupções de curta duração são aquelas em que o evento possui duração superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos, enquanto as interrupções de longa duração são aquelas em que o evento possui duração superior ou igual a 3 minutos.

Segundo a Clou Energia (2024) os medidores da Light, em sua maioria analógicos, representam um grande desafio relativo à sua capacidade de medir com precisão o consumo de eletricidade. Embora esses medidores possam fornecer normalmente uma precisão de +/- 2% do uso de energia, eles estão sujeitos a várias fontes de erro que podem levar a imprecisões adicionais. Além disso, fatores ambientais como temperatura, vibração e campos magnéticos podem interferir na operação do medidor, levando a leituras incorretas. Além disso, os medidores geralmente exigem inspeção e calibração manuais, introduzindo oportunidades adicionais para erro humano. Como resultado, podem ocorrer variações nos valores medidos fornecidos por diferentes medidores eletromecânicos, mesmo quando instalados em condições semelhantes.

Os medidores analógicos fornecem apenas dados cumulativos de uso de energia, o que significa que eles não podem fornecer informações de consumo detalhadas ou em tempo real. Essa falta de dados em tempo real torna difícil para os consumidores monitorar seus padrões de uso de energia e fazer ajustes para economizar energia. Também limita a capacidade das concessionárias de implementar modelos de preços dinâmicos com base na demanda em tempo real. Em suma, os medidores eletromecânicos têm funcionalidade limitada. Eles são projetados para medir apenas o consumo de energia e não oferecem suporte a recursos adicionais, como monitoramento de qualidade de energia, leitura remota,

desconexão remota ou notificação de interrupção. Isso limita a capacidade das concessionárias de fornecer serviços de valor agregado e gerenciar suas redes com mais eficiência (CLOU ENERGIA, 2024).

Segundo Mattede (2019) os medidores eletrônicos ou digitais são a evolução dos medidores eletromecânicos. Os modelos mais modernos possuem um display digital que exibe a quantidade de energia consumida em tempo real. Eles são capazes de calcular a energia ativa (kWh) e a energia reativa, fornecendo informações mais detalhadas sobre o consumo. Os medidores eletrônicos utilizam circuitos eletrônicos e microprocessadores para converter as grandezas elétricas em valores digitais, tornando a leitura mais precisa e confiável. Esses medidores também oferecem recursos adicionais, como a capacidade de monitoramento remoto e a possibilidade de detectar picos de consumo, auxiliando na identificação do consumo excessivo de energia e na implantação de medidas de eficiência energética.

Os medidores de energia eletrônica ou digitais podem ser unidirecionais ou bidirecionais. Medidores Unidirecionais são medidores que computam a energia em registradores de energia direta independentemente do sentido do fluxo de potência. Esse tipo de medidor possui, portanto, um registrador único para energias diretas e reversas, sejam elas, ativas ou reativas. Qualquer fluxo de potência reversa será computado no seu respectivo registrador de energia direta. Já os bidirecionais são medidores capazes de computar a energia em registradores específicos independentemente do sentido do fluxo de potência. Esse tipo de medidor possui, portanto, um registrador diferente para energias diretas e reversas, sejam elas, ativas ou reativas. São comumente utilizados em setores onde a análise do sentido do fluxo é importante, como exemplo, consumidores que possuam geração de energia (exemplo: energia solar) (PINTO FILHO, 2019).

A light utiliza tanto medidores analógicos como medidores eletrônicos ou digitais. O modelo digital é da Landis e 430 que é bidirecional. Ou seja em uma ponta a Light apresenta medidores analógicos de pouca precisão e em outra ela utiliza medidores mais modernos eletrônicos bidirecionais, capazes de detectar afundamentos de tensão e interrupções de energia (LIGHT, 2024).

A CPFL em seu site não detalha os tipos de medidores utilizados, porém ela expõe que está realizando uma campanha a fim de trocar os seus medidores analógicos e eletrônicos por medidores inteligentes. Estes medidores possuem um componente essencial da infraestrutura de medição avançada (AMI), sendo dispositivos digitais que medem e registram o consumo de eletricidade, em tempo real e transmitem as informações para as concessionárias. Os medidores inteligentes armazenam os consumos de energia a cada hora, inclusive, com maior granularidade. Isto possibilita faturar o consumo de cada pe-

ríodo de tempo com uma tarifa diferente, de tal maneira que cada cliente possa escolher a opção que lhe permita minimizar sua fatura em função de seu perfil de consumo.

Além de armazenar as medidas dos consumos de energia, os medidores inteligentes permitem coletar informações sobre a situação da rede elétrica em tempo real. Eles identificam interrupções de fornecimento, voltagens ineficientes e conexões incorretas. Isto possibilita melhorar consideravelmente a qualidade do fornecimento e o tempo de localização e reposição de avarias, sendo bidirecionais. Na tabela 7 pode-se observar algumas características dos medidores de energia elétrica propostos neste capítulo.

Tabela 7 – Características dos medidores de energia elétrica

Medidores	Características			
	São bidirecionais?	Detectam Afund. Tens. E Interr.	São confiáveis?	Controlam a qualidade
Eletromecânicos	Não	Não	Não	Não
Eletrônicos	Depende do Modelo	Depende do Modelo	Sim	Sim
Inteligentes	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que em nível de medição da qualidade fornecida, os medidores inteligentes são completamente capazes de mensurar a qualidade da energia elétrica fornecendo ainda, dados preventivos da rede elétrica, sendo bidirecionais. Os eletrônicos, dependendo do modelo, possuem funcionalidades semelhantes aos inteligentes mas deixam a desejar no sentido da prevenção da rede e dos equipamentos. Já os eletromecânicos ou analógicos deixam totalmente a desejar no quesito qualidade.

Apesar da CPFL não informar a tipologia atual de seus medidores, a ideia que se tem é a de que eles pretendem, em um curto período, só utilizarem os medidores inteligentes o que se adapta totalmente as especificadores de qualidade no fornecimento de energia elétrica.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos dados coletados através do medidor inteligente JE05 WATT METER em configuração bifásica, operando continuamente por 7 dias. Foram processados os registros de tensão, corrente e parâmetros derivados (potências ativa, reativa e fator de potência), com amostragem a cada 5 minutos. Os resultados demonstram os eventos de qualidade de energia, particularmente variações de tensão e fator de potência. A metodologia adotada combina análise dos dados dos arquivos CSV com correlação temporal e os eventos críticos identificados.

### 4.1 Metodologia de Aquisição de Dados

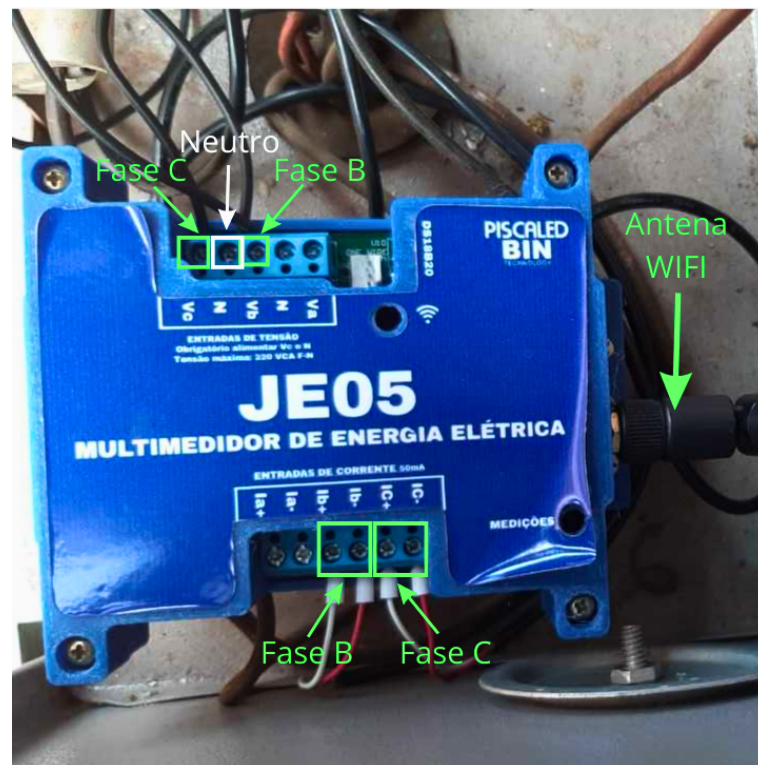
O sistema de monitoramento adotado neste trabalho emprega o medidor inteligente **JE05 WATT METER** da BIN Technology, originalmente projetado para sistemas trifásicos, mas adaptado para análise em configuração bifásica. O medidor JE05 foi escolhido por custar menos que alternativas similares, usando hardware integrado (como ESP8266 e sensores SCT-013 inclusos), sem exigir componentes extras. A instalação é rápida e segura: fixação em trilho DIN, conexão direta das fases e medição de corrente por clamps (como um alicate amperímetro), sem cortar fios. Além disso, realiza aquisição remota de dados via supervisorio, gerando relatórios em formato CSV com medições instantâneas e históricas.

A seguir estão listados os aspectos de instalação considerados e os parâmetros a serem monitorados.

- **Configuração adaptada:** Aplicação bifásica utilizando 2 entradas de tensão (fases B e C, 0–300 VAC) e 2 entradas de corrente (sensor analógico STC-013, 100A/0–50mA).
- **Parâmetros monitorados:**
  - Tensões RMS (fases B e C);
  - Corrente de entrada;
  - Potências ativa, reativa e aparente (por fase e total);
  - Fator de potência (individual e total);
  - Frequência da rede.

A Figura 17 apresenta o medidor já instalado em uma residência rural bifásica, com as devidas adaptações descritas anteriormente, em destaque estão as entradas de tensão utilizando os bornes Vb, N e Vc e as correntes de entrada estão inseridas nos bornes Ic-, Ic+, Ib- e Ib+. Além disso, é possível observar a antena WIFI responsável pela transmissão dos dados coletados em tempo real.

Figura 17 – Medidor inteligente JE05 WATT METER BIN Technology



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

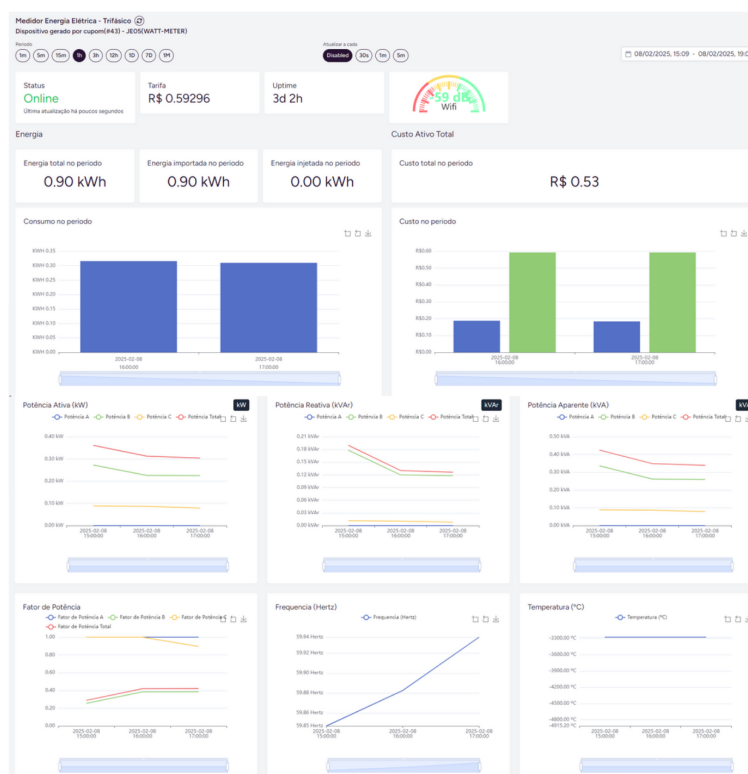
A arquitetura do medidor, compatível com trilho DIN, integra-se ao sistema bifásico sem exigir interrupção do circuito, graças à medição não invasiva de corrente por sensores magnéticos. A comunicação Wi-Fi 802.11 b/g/n possibilita a transmissão contínua dos dados para um supervisor personalizado, cujo *dashboard* foi estruturado para monitoramento em tempo real e análise histórica, contemplando:

- Visualização de curvas de carga temporal (tensão, corrente e potências);
- Indicadores de qualidade de energia: variações de tensão RMS e de frequência.

A Figura 18 apresenta o dashboard hospedado no site <https://iot.piscaled.com.br>. Na parte superior, é exibido o dispositivo responsável pelo envio das informações, além de permitir a configuração do valor da tarifa para monitorar o consumo residencial em tempo real. Na parte inferior, estão os indicadores configurados, apresentados em gráficos

interativos. Cada gráfico permite ativar ou desativar as fases exibidas, além de visualizar o período correspondente a cada amostra recebida pelo supervisor.

Figura 18 – Dashboard do JE05 WATT METER BIN Technology



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A configuração adaptada mantém as especificações técnicas originais do equipamento para medições em sistemas bifásicos. A escolha do JE05 WATT METER justifica-se por sua interoperabilidade, permitindo futura adaptação para sistemas trifásicos mediante ativação da terceira fase apenas conectando ao dispositivo.

## 4.2 Representação Gráfica dos Indicadores de Qualidade de Energia

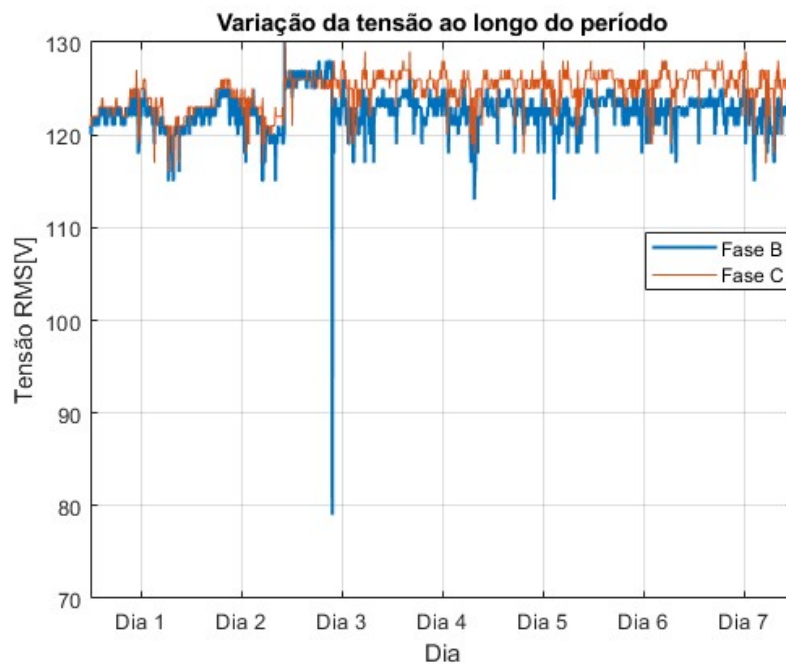
Conforme apresentado na introdução, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) pode ser avaliada sob diferentes perspectivas: qualidade do produto, qualidade do serviço prestado e eficiência no tratamento de reclamações.

Nesta seção, são explorados os indicadores relacionados à qualidade do produto e ao fornecimento de energia, utilizando dados coletados pelo medidor JE05 WATT METER durante 7 dias consecutivos. O equipamento realizou medições minuto a minuto, transmitindo médias consolidadas a cada 5 minutos para o supervisor, os dados coletados e processados no software MATLAB. Cada indicador é analisado com base nos parâmetros extraídos, durante 7 dias, com amostras coletadas destacando os aspectos mais relevantes para a avaliação da qualidade da energia elétrica.

#### 4.2.1 Qualidade do produto

Para a identificação de falhas no fornecimento de energia, a Figura 19 apresenta o gráfico da tensão RMS ao decorrer do período amostrado.

Figura 19 – Tensão RMS ao decorrer do período amostrado

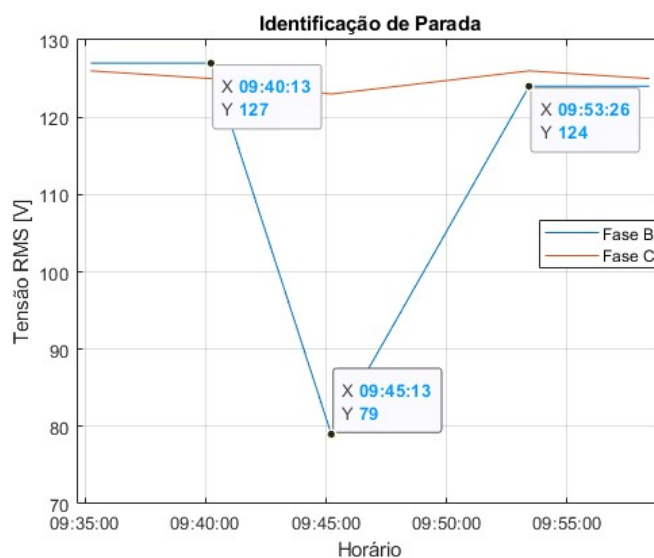


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Foi identificado que, no dia 3 de fevereiro, a tensão média na fase B permaneceu abaixo de 80V, constatando que teve apenas uma falha no fornecimento de energia durante o período analisado.

Por meio da técnica de janelamento, foi possível determinar, conforme ilustrado no gráfico da Figura 20, que a falha ocorreu durante o intervalo de medições com periodicidade de 5 minutos.

Figura 20 – Tensão RMS durante a falha

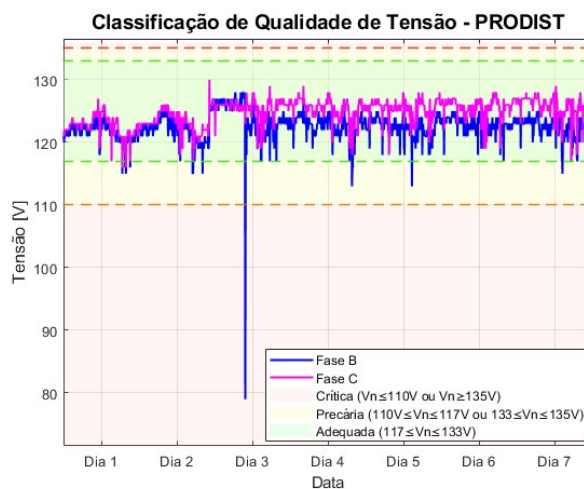


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O afundamento de tensão descrito anteriormente, pode ter sido ocasionado por curto-circuitos, sobrecargas ou partida de grandes motores. O que influencia diretamente a qualidade do fornecimento de energia, podendo levar a falha em equipamentos sensíveis como computadores.

De acordo com a ANEEL (2021), os indicadores de conformidade avaliam o nível da tensão RMS para verificar se está dentro dos padrões adequados. Com base nesse critério, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 21, que classifica os níveis de tensão RMS em três categorias: adequada, precária e crítica.

Figura 21 – Classificação da qualidade da tensão RMS



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise revelou que as tensões das fases B e C estão sendo fornecidas em níveis adequados, com valores variando entre 117 e 133 V RMS. No entanto, foram identificadas oscilações pontuais em determinados momentos, entrando na faixa considerada precária. A falha mencionada anteriormente foi o único momento em que o fornecimento esteve dentro da faixa crítica.

#### 4.2.2 Qualidade do fornecimento

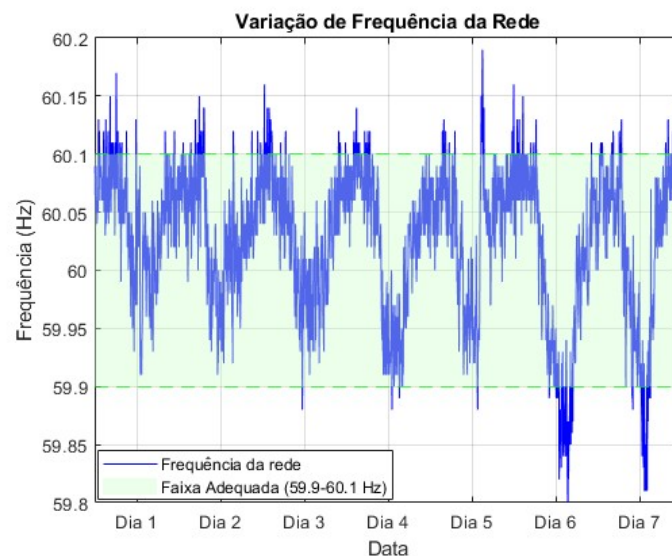
Para avaliar a qualidade do fornecimento energético, foram analisados dois parâmetros fundamentais:

- Variação da frequência da rede elétrica no período monitorado;
- Comportamento do fator de potência total do sistema.

A Figura 22 detalha a flutuação da frequência nominal, com destaque para a faixa operacional adequada estabelecida pelas normativas técnicas. Observa-se que:

- Em *93%* do período analisado, a frequência permaneceu dentro da zona aceitável (59.9 Hz a 60.1 Hz).
- Registrou-se um pico significativo de 60,2 Hz em 5 de fevereiro, ultrapassando o padrão nominal de 60 Hz. Nos dias subsequentes (6 e 7 de fevereiro), observaram-se variações críticas, com valores mínimos de 59,8 Hz,, o que sugere flutuações transitórias no balanço entre geração e demanda energética.

Figura 22 – Variação da Frequência amostrada

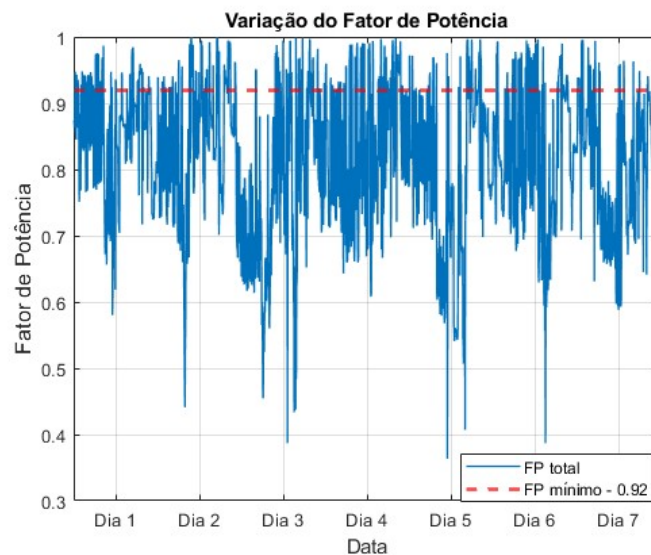


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A variação de frequência é um fator preocupante quando relacionado a qualidade de energia elétrica uma vez que pode causar falhas e até mesmo danos aos equipamentos, comprometendo seu funcionamento adequado, podendo levar à redução da vida útil dos dispositivos.

O fator de potência total do sistema, calculado pela razão entre as potências ativas e aparentes agregadas das fases B e C, apresenta valores consistentemente abaixo do mínimo regulamentar, como evidenciado na Figura 23. Essa condição sugere predominância de características indutivas no sistema, típicas de equipamentos como motores, que consomem energia reativa sem compensação adequada.

Figura 23 – Variação do Fator de Potência Total



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A correção do fator de potência indutivo pode ser realizada instalando bancos de capacitores, que fornecem potência reativa capacitiva para compensar a reativa indutiva das cargas. Outra estratégia importante é a análise e o monitoramento contínuo do fator de potência, identificando os pontos do sistema onde a correção é mais necessária. Além disso, a gestão cuidadosa das cargas indutivas, desligando-as quando não são necessárias, contribui para melhorar a eficiência energética.

#### 4.2.3 Parâmetros de Qualidade da Energia

Esta seção apresenta a análise quantitativa dos parâmetros críticos para estabilidade do sistema elétrico. Os dados experimentais coletados durante o período de testes encontram-se sintetizados na Tabela 8, que contrasta valores medidos com referenciais normativas.

Tabela 8 – Indicadores de desempenho do sistema elétrico

<b>Parâmetro</b>	<b>Referencial</b>	<b>Medido</b>
Fator de potência mínimo	0,92	0,36
Varição máxima de frequência	60,0 $\pm$ 0,1 Hz	60,0 $\pm$ 0,2 Hz
Número de falhas (7 dias)	-	1
Varição máxima de tensão	133 V	130 V

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise dos indicadores operacionais do sistema elétrico, revela uma discrepância significativa entre os parâmetros medidos e os valores de referência estabelecidos pelas normativas técnicas. O fator de potência mínimo registrado de 0,36 apresenta-se substancialmente inferior ao patamar ideal de 0,92, caracterizando uma condição operacional crítica que impacta diretamente na eficiência energética do sistema.

No que se refere à qualidade da energia, a variação máxima de tensão registrada foi de 130 V, permanecendo dentro dos limites estabelecidos pela norma como adequados. Isso assegura que a tensão fornecida pela concessionária está em conformidade com os padrões regulamentares. Em continuidade, a frequência da rede manteve-se estável dentro da faixa aceitável, permanecendo abaixo da variação máxima permitida de  $\pm$ 0,1 Hz. No entanto, no quinto dia de coleta de dados, foi registrada uma oscilação pontual de 60,19 Hz.

Ao longo dos sete dias de monitoramento, foi registrada uma falha operacional no sistema. O evento ocorreu em um único momento dentro do período analisado, sem reincidência.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a qualidade da energia elétrica em baixa tensão por meio da utilização de um medidor inteligente, com foco nos desequilíbrios de tensão, nas variações de frequência e no fator de potência. Os objetivos específicos, como conceituar a qualidade da energia elétrica, demonstrar os principais problemas e as normas regulamentadoras, apresentar as características dos medidores e analisar os dados coletados com o medidor inteligente JE05 WATT METER, foram alcançados. Isso resultou na exposição dos principais indicadores de qualidade da energia, como variações de tensão, oscilações de frequência e fator de potência.

Além disso, foram apresentadas as principais características dos medidores eletromecânicos, eletrônicos e inteligentes, evidenciando que os medidores inteligentes possuem a capacidade de enviar informações em tempo real. Essa funcionalidade permite a identificação imediata de falhas ou anomalias na rede elétrica, como interrupções no fornecimento, sobrecargas ou quedas de tensão. Isso é extremamente relevante para que as concessionárias possam agir rapidamente na correção dos problemas e para que os clientes sejam informados com precisão sobre o estado do fornecimento de energia em suas unidades consumidoras, algo inviável com os medidores convencionais.

. A análise dos resultados evidenciou que os medidores inteligentes são mais eficientes na identificação de anomalias críticas. Por exemplo, durante o período de monitoramento, foi registrada uma falha significativa na tensão RMS em 3 de fevereiro, com valores abaixo de 80 V na fase B, enquanto as fases B e C mantiveram-se dentro dos limites regulamentares (117-133 V RMS). Além disso, o fator de potência mínimo observado foi de 0,36, muito inferior ao mínimo exigido pela ANEEL (0,92), destacando a necessidade de compensação reativa. Apesar disso, a frequência da rede mostrou-se estável em 93% do tempo analisado. Contudo, uma limitação importante foi a ausência de informações detalhadas sobre a precisão do equipamento fornecidas pelo fabricante do JE05 WATT METER, o que pode gerar incertezas nos resultados.

Os achados deste estudo reforçam que os medidores inteligentes são ferramentas indispensáveis para avaliar a qualidade da energia elétrica e detectar eventos críticos que os modelos tradicionais não conseguem identificar. No entanto, para garantir maior confiabilidade nas análises, é essencial que os fabricantes forneçam especificações técnicas completas sobre seus dispositivos. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar os estudos sobre a precisão dos medidores inteligentes e investigar sua aplicação em redes elétricas mais complexas. Além disso, seria relevante explorar avanços tecnológi-

cos que permitam maior integração entre medidores inteligentes e sistemas automatizados para promover eficiência energética e segurança no fornecimento.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências.** 1996. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9427cons.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9427cons.htm)>. Acesso em: 19 jan. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA — ANEEL. **PRODIST — Módulo 8 — Qualidade da Energia Elétrica.** 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 1 jan. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA — ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.000/2021, que consolida as principais regras da Agência para a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, onde estão dispostos os direitos e deveres dos consumidores.** 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/conheca-a-resolucao-1-000-que-reune-os-direitos-e-deveres-do-consumidor-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- AMARO, E. L. **Desagregação de cargas usando o Modelo Fatorial de Markov Oculto e a rede Long Short Term Memory.** 33 f. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS - ANSI. Nema mg 1-2016 - motors and generators. **National Electrical Manufacturers Association**, 2016.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELETRICA. **Distribuidoras de energia vão investir 130 bilhões no brasil até 2027.** 2024. Disponível em: <<https://abradee.org.br/>>. Acesso em: 12 ago. 2024.
- BEHNKE, E. **Desafio de criar leis sobre IA envolve proteção de direitos e da democracia.** 2024. Senado notícias. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/03/27/desafio-de-criar-leis-sobre-ia-envolve-protecao-de-direitos-e-da-democracia>>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Power Systems.** 1. ed. New York: Plenum Publishing Corporation (Springer), 1996. 514 p. ISBN 978-1-4899-1860-4.
- CIGRE. A new simple and effective approximate formulation for the determination of three-phase unbalances by voltmeter method. **Conseil International des Grands Réseaux Électriques**, 1986.
- CIRIACO, R. **O que é e como funciona um medidor de energia elétrica?** 2022. Disponível em: <<https://memt.com.br/o-que-e-e-como-funciona-um-medidor-de-energia-eletrica/#:~:text=Isso%20posto%>>

2C%20existem%20basicamente%20dois, trif% C3%A1sicos%20%E2%80%93%20cada%20apresenta%20caracter% C3%ADsticas%20espec% C3%ADficas>. Acesso em: 23 jan. 2024.

Confederação Nacional da Indústria. **SONDAGEM ESPECIAL: Indústria e energia: Dois terços da indústria tem prejuízos com falhas de fornecimento de energia elétrica.** 2016. Relatório técnico com dados de 2.876 empresas entrevistadas em outubro de 2015. Disponível em: <<http://www.cni.org.br/sondespecial>>.

CPFL ENERGIA. **Energia Inteligente.** Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/energia-inteligente>>. Acesso em: 16 maio 2024.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Qualidade da energia elétrica: conceituação e processamento digital.** 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Blucher, 2024. 386 p. (Coleção Projeto SBA). Il.

DIEFENTHÄLER, A. T. et al. Equilíbrio de tensão em uma rede real de distribuição primária de energia elétrica. **O Manancial - Repositório Digital da UFSM**, p. 5, 2017. Disponível em: <[https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/30656/submission-91525-701216-field\\_submission\\_abstract\\_file2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/30656/submission-91525-701216-field_submission_abstract_file2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality.** 3. ed. New York: McGraw Hill Education, 2012. 577 p.

DUTRA, G. A. **Desafio em inserir redes inteligentes no cenário brasileiro.** 70 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2023.

EMBRASUL. **Energia elétrica no Brasil: história, conquistas, desafios e perspectivas.** 2022. Acesso em: 08 ago. 2024.

EPTV. Oscilação de energia elétrica causa prejuízos aos moradores em bairro de são carlos. **EPTV1**, 2019. Acesso em: 11 ago. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2019/08/11/moradores-de-sao-carlos-tem-aparelhos-queimados-por-oscilacoes-na-eletricidade.ghhtml>>.

FAERMAN, H. . **Medição inteligente avança com mais de 4 milhões de pontos no Brasil.** 2023. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/especiais/53252520/medicao-inteligente-avanca-com-mais-de-4-milhoes-de-pontos-no-brasil>>. Acesso em: 10 ago. 2024.

FECOMERCIO. **Prejuízos com falta de energia em São Paulo estão perto de somar R\$ 2 bilhões.** 2024. Acesso em: 1 mar. 2025. Disponível em: <<https://www.fecomercio.com.br/noticia/prejuizos-com-falta-de-energia-em-sao-paulo-estao-perto-de-somar-r-2-bilhoes>>.

FILHO, P.; MIRANDA, T. L. de. **Medidor Eletrônico de Energia Elétrica Bidirecional não Invasivo.** 55 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

- FROTA, M. N. **Automação da medição e segurança de dados em redes inteligentes: estudo de experiência brasileira**. 56 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) — Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.
- GALLOTTI, V. Redes de energia elétrica inteligentes (smart grids). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, 2021.
- GARCIA, F. D. **Medidor Cognitivo de Energia para Aplicações em Eficiência Energética**. Bauru: Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, 2018. 1-182 p.
- GRACO, R. **Erros na Medição de Energia**. Rio de Janeiro: Cubi Energia, 2023.
- GUIMARÃES, P. **Como resolver problemas com Desequilíbrio de Tensão**. 2020. Disponível em: <<https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/como-resolver-problemas-com-desequilibrio-de-tensao>>. Acesso em: 14 maio 2024.
- HALSALL, F. **Data Communications, Computer Networks and Open Systems**. 4. ed. Harlow: Addison-Wesley, 1996.
- IEEE. 112-2017: Ieee standard test procedure for polyphase induction motors and generators. **IEEE**, 2018.
- INSTITUTO ACENDE BRASIL. **Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica: Confiabilidade, Conformidade E Presteza**. Ed. nº 14/julho 2014. Disponível em: <[https://acendebrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/04/2014\\_WhitePaperAcendeBrasil\\_14\\_Qualidade\\_Fornecimento\\_Energia\\_Rev\\_0.pdf](https://acendebrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/04/2014_WhitePaperAcendeBrasil_14_Qualidade_Fornecimento_Energia_Rev_0.pdf)>. Acesso em: 19 jan 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama**. 2024. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- JR., C. A. de O. **Desenvolvimento de um Protocolo de Comunicação para Automação de Subestações Móveis Via Satélite**. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia ELÉTRICA) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.
- KAGAN, N.; GOUVÊA, M. R.; TAHAN, C. M. V. Análise de desequilíbrios em redes de baixa tensão. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)**, São Paulo, p. 5, 2015.
- LAURETTO, R. F. **Simulador de qualidade de energia elétrica**. 84 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- LIGHT S/A COMPANHIA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tipos de medidores utilizados pela Light**. Disponível em: <<https://www.light.com.br/SitePages/page-tipos-de-medidores.aspx>>. Acesso em: 16 maio 2024.
- LIMA, A. V.; PEREIRA, V. O. **Transmissão Automática de Dados de Energia TAD-E., Brasil**. 53 p. Monografia (Graduação - Departamento de Engenharia Elétrica) — Faculdade Novo Milênio, Vila Velha, 2011.

LOPES, Y. et al. Capítulo 4: Desafios de segurança e confiabilidade na comunicação para smart grids. In: \_\_\_\_\_. Rio de Janeiro: XVI Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais — SBSeg, 2016. p. 20–35.

LOPES, Y. et al. Smart grid e iec 61850: Novos desafios em redes e telecomunicações para o sistema elétrico. **XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, Brasília, 2012.

MARCOLINO, A. J. C. **Oportunidades e Desafios para a Implementação de Smart Grid no Setor Elétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro: FGV, 2019.

MATTEDE, H. **Medidores de energia – Tipos e características**. 2019. Mundo da Elétrica. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/medidores-de-energia-tipos-caracteristicas/>>. Acesso em: 22 jan 2023.

MEDIDORES de energia eletromecânicos: entendendo suas limitações. 2024. Clou Energia. Disponível em: <<https://clouglobal.com/pt/medidores-de-energia-eletromecanicos-entendendo-suas-limitacoes/>>. Acesso em: 16 maio 2024.

MEHL, E. L. M. **Qualidade de Energia Elétrica**. 2002. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<https://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2023.

MENEZES, W. **Medidores Inteligentes e Comunicação de Dados em Redes Inteligentes**. 47 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA (SECRETARIA DO TRABALHO). **NR10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Brasília, DF: Ministério da Economia, 2004.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **RELATÓRIO SMART GRID. Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes**. 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/relatorio-smart-grid.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **SMART GRIDS NO BRASIL**. 2014. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2011/arquivos/s404.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Pioneiros na América Latina**. 2024. Disponível em: <[https://x.com/Minas\\_Energia/status/1783489161258815674](https://x.com/Minas_Energia/status/1783489161258815674)>. Acesso em: 10 ago. 2024.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR10: Segurança em instalações elétricas e serviços em eletricidade**. 2004. Texto dado pela Portaria MTE n.º 598, de 07 de dezembro de 2004. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-10.pdf>>. Acesso em: 29 dez. 2024.

- MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de redes inteligentes da América do Norte e análise de ações – tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029)**. 2024. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/north-america-smart-grid-network-market-industry>>. Acesso em: 12 ago. 2024.
- MOREIRA, B. **Cidades Inteligentes: O Futuro do Smart Grid no Brasil**. 2014. O setor elétrico. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/cidades-inteligentes-o-futuro-do-smart-grid-no-brasil/>>. Acesso em: 12 ago. 2024.
- NEO ENERGIA. **Principais projetos da Neoenergia na área de Smart Grids**. 2024. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/inovacao-em-energia/smart-grids>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- PAZINATTO, M. T.; OLIVEIRA, W. C. de. **Qualidade de Energia: As Distorções Harmônicas nas Instalações com Inversores Fotovoltaicos**. 2021. Célula Energia (cursos e treinamento). Disponível em: <<https://celulaenergia.com/qualidade-de-energia-as-distorcoes-harmonicas-nas-instalacoes-com-inversores-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 19 jan. 2023.
- RENDA, T. G. **Redes de Comunicação em Subestações de Energia - Protocolo IEC 61850**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2018.
- RIVERA, R.; ESPOSITO, A.; TEIXEIRA, I. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local**. Brasília: BNDES, 2013.
- RODRIGUES, A. M. **Influência da Distorção Harmônica e de Desequilíbrios em Medidores de Energia Elétrica Ativa**. 11 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- SANTOS, C. A. S.; MEDEIROS, R. Álamo Oliveira de. Harmônicas analisadas através do espectro de frequência. **Congresso Nacional de pesquisas e ensino em ciências**, Paraíba, p. 8, 2019.
- SANT'ANA, M. estudo das técnicas de desagregação de cargas e modelagem de cargas residenciais para gestão de energia elétrica. **10º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP 27 e 28 de novembro de 2019**, Sorocaba, 2019.
- SAUSEN, P.; CAMPOS, M.; DAMBROS, H. Modelagem de cargas residenciais com identificação não intrusiva utilizando redes neurais artificiais. **XXV Jornada de Pesquisa ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis. 20 a 23 de outubro de 2020**, Santa Rosa, 2020.
- SILVA, L. carlos evangelista da. **Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa**. 203 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2008.
- TEIXEIRA, M. D. **Tópicos Avançados em Eletrônica I**. 2018. Universidade do Paraná. Disponível em: <[https://www.eletrica.ufpr.br/p/\\_media/professores:mateus:te274\\_-\\_desequilibrio\\_de\\_tensao.pdf](https://www.eletrica.ufpr.br/p/_media/professores:mateus:te274_-_desequilibrio_de_tensao.pdf)>. Acesso em: 14 mai. 2024.

UFRJ. **Smart Grid - Padrão DNP3**. 2014. Aula 879. Disponível em: <[https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2014\\_2/lyang/dnp3.html](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2014_2/lyang/dnp3.html)>. Acesso em: 22 jan. 2023.

VAZ, L. M. M. **Impactos e Benefícios do Sistema de Medição Centralizada. Estudo de caso numa concessionária brasileira de eletricidade**. 63 p. Dissertação (Mestrado - Departamento Pós-MQI) — Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.