



UNILAB

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA

AFRO-BRASILEIRA

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

REGINALDO MARCIANO SÁ

APLICAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NA MELHORIA DE

QUALIDADE DE ENERGIA

REDENÇÃO

2022

REGINALDO MARCIANO SÁ

APLICAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NA MELHORIA DE QUALIDADE
DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. Sabi Yari Moïse
BANDIRI

REDENÇÃO

2022

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Sá, Reginaldo Marciano.

S111a

Aplicação de Redes Elétricas Inteligentes na Melhoria da
Qualidade de Energia / Reginaldo Marciano Sá. - Redenção, 2022.
75f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de
Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção,
2022.

Orientador: Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri.

1. Smart Grids. 2. Qualidade de energia. 3. Distúrbios
Elétricos. 4. Machine Learning. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 351.8722

REGINALDO MARCIANO SÁ

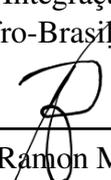
APLICAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NA MELHORIA DE QUALIDADE
DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sabi Yari Moïse BANDIRI (Orientador)
Universidade Da Integração Internacional Da
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Msc. Ramon Mayor Martins
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

Profa. Dra. Rejane Felix Pereira
Universidade Da Integração Internacional Da
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

À minha família, por acreditar em mim e investir em mim. Tia_Mãe (ANA FERNANDES), seu cuidado e dedicação foi que deu a esperança para seguir. Tio_Pai (ANDRÉ JORGE ONHINAM), sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. Obrigado!!

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida e por me permitir chegar até aqui.

A minha família, por me apoiar e acreditar em mim, e por toda a dedicação e paciência, contribuindo diretamente para eu pudesse ter um caminho menos difícil.

Aos Governos, na cooperação solidária para a implantação da UNILAB e pela contribuição na minha formação profissional.

A universidade da integração internacional da lusofonia afro-brasileira (UNILAB), que oportunizou a janela que hoje vislumbro.

Ao Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), pelos ensinamentos acadêmicos e profissionais proporcionado.

Aos meus amigos do curso e da universidade, pela ajuda e motivação que sempre me deram.

Ao Professor Doutor, Sabi Yari Moïse BANDIRI por me orientar em meu trabalho de conclusão do curso, e pela dedicação, compreensão e amizade que teve comigo.

“A competitividade de um país não começa nas indústrias ou nos laboratórios de engenharia. Ela começa na sala de aula.”

(Lee Iacocca)

RESUMO

A demanda por eletricidade no mundo está aumentando e aumentando rapidamente. Isto ocorre devido ao crescimento populacional e à dependência de tecnologias que requerem energia elétrica. E essa dependência cria uma demanda cada vez maior de energia disponível. Como parte do desenvolvimento de ciência e tecnologia, as principais organizações dos países fizeram esforços significativos para criar produtos e serviços relacionados à rede inteligente. Em termos de política de gestão de produtos e serviços, as autoridades reguladoras do país têm procurado acompanhar a evolução tecnológica e as necessidades da indústria, dentro de suas especificidades institucionais e de mercado. A detecção e classificação de distúrbios de qualidade de energia é muito importante para a proteção do sistema de energia e manutenção da fonte de alimentação. O objetivo do presente trabalho é melhorar a qualidade de energia com as redes elétricas inteligentes. Visto que o processo de detecção e classificação contribuirá de forma significativa na elevação destes indicadores, o que culminará na melhoria de qualidade de energia elétrica fornecida pela concessionária. Para a confecção deste trabalho utilizou como metodologia a revisão narrativa de literatura, onde fez-se levantamento de dados a partir de meios digitais e também na biblioteca da própria universidade. Em seguida realizou-se uma compilação dos dados levantados com o intuito de compreender e expandir o conhecimento sobre o tema em estudo. A energia elétrica tornou-se indispensável para a sociedade e importante no processo de industrialização, e com o avanço da tecnologia e as necessidades da sociedade, os requisitos de sua qualidade são cada vez maiores, portanto, é necessário desenvolver ferramentas capazes de detectar e classificar os distúrbios elétricos. Existem diversas técnicas de detecção e classificação dos distúrbios, apenas é preciso saber qual delas se adequa melhor ao tipo de dado que se pretende estudar, uma vez que é impossível saber qual técnica é melhor em relação às outras. Com isso conclui-se que estas técnicas podem ser utilizadas para elevar os indicadores de qualidade de energia a partir do aprendizado de máquinas que daria o sistema elétrico uma autonomia através da autorrecuperação de reestabelecer o sistema de fornecimento de energia, processo esse que melhoraria a qualidade de energia fornecida para os consumidores.

Palavras-chave: *Smart Grids*; Qualidade de energia; Distúrbios Elétricos; *Machine Learning*.

ABSTRACT

The demand for electricity in the world is increasing and increasing rapidly. This occurs due to population growth and dependence on technologies that require electricity. And this dependency creates an increasing demand for available energy. As part of the development of science and technology, leading organizations of countries have made significant efforts to create products and services related to the smart grid. In terms of product and service management policy, the country's regulatory authorities have sought to keep up with technological developments and the needs of the industry, within its institutional and market specificities. The detection and classification of power quality disturbances are very important for power system protection and power supply maintenance. The objective of this work is to improve the quality of energy with smart grids. Since the process of detection and classification will contribute significantly to the elevation of these qualities of electricity provided by the concessionaire. For the preparation of this work used as methodology the narrative review of literature, where data was collected from digital media and also in the library of the university itself. Then a compilation of the data collected was carried out to understand and expand the knowledge on the subject under study. Electricity has become indispensable for society and important in the process of industrialization, and with the advancement of technology and the needs of society, the requirements for its quality are increasing, therefore, it is necessary to develop tools capable of detecting and classifying electrical disturbances. There are several techniques for detecting and classifying disorders, it is only necessary to know which one best suits the type of data that is intended to be studied since it is impossible to know which technique is better than the others. With this, it is concluded that these techniques can be used to raise energy quality indicators from machine learning that would give the electrical system autonomy through self-recovery to re-establish the power supply system, a process that would improve the quality of energy supplied to the consumers.

Keywords: Smart Grids; Energy Quality; Electrics Disturbances; Machine Learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de distribuição primária e secundária.	18
Figura 2 – Fluxograma de conexões entre produtores e consumidores de energia.	19
Figura 3 – Faixas de tensão em relação a tensão de referência.	29
Figura 4 – Afundamento de tensão.	33
Figura 5 – Elevação de tensão.	34
Figura 6 – Interrupção de tensão.	34
Figura 7 – Aprendizado de máquina.	39
Figura 8 – Classificação de dados treinados.	39
Figura 9 – Quadro para elaboração da árvore..	42
Figura 10 – Árvore de decisão simples (<i>Simple Decision Tree</i>).	42
Figura 11 – Relação de entropia e proporção de exemplos.	44
Figura 12 – Problemas lineares (A) vs não lineares (B).	45
Figura 13 – Representação de uma rede neural simples.	46
Figura 14 – Aprendizagem profunda (Deep Learning).	46
Figura 15 – Exemplo de classificação do KNN com dois rótulos de classe com $k = 6$ e $k = 3$	48
Figura 16 – Vetores de suporte e hiperplanos no SVM.	50
Figura 17 – Separação e classificação linear dos dados.	50
Figura 18 – Dados linearmente não separáveis.	52
Figura 19 – Hiperplano circular dividindo dados linearmente não separáveis.	52
Figura 20 – Utilização da função de Kernel para dados linearmente não separáveis.	53
Figura 21 – Transformação de um sinal através da técnica STFT.	56
Figura 22 – Decomposição do sinal no domínio Wavelet.	57
Figura 23 – Medidor inteligente.	62
Figura 24 – Conexão das partes envolvidas no processo de fornecimento de Energia.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório. . .	28
Tabela 2 – Classificação dos distúrbios elétricos.	31
Tabela 3 – Classificação dos transitórios impulsivos.	32
Tabela 4 – Classificação dos transitórios oscilantes.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMI	Infraestrutura Avançada de Medição
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CTW	Transformada Wavelet Contínuo
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos da América
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
DRI	Duração Relativa da Transgressão para Tensão Intolerável
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FT	Trasformada de Fourier
IEA	Agência Internacional de Energia
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoE	<i>internet of energy</i>
IoT	<i>Internet das coisas</i>
K - NN	vizinho mais próximo
MDPI	<i>Multidisciplinary Digital Publishing Institute</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNAs	Redes Neurais Artificiais
SD	sistemas de distribuição
SEI	<i>Smart Energy International</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SGCC	<i>State Grid Corporation of China</i>
STFT	Short Time Fourier Transform
TCCs	Trabalhos de Conclusão de Curso
TW	Transformada Wavelet
TWD	Transformada Wavelet Discreta
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	16
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	16
1.2	Organização do Trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	História do Sistema Distribuição de Energia Elétrica	17
2.2	Redes Elétricas Inteligentes ou <i>Smart Grids</i>	18
<i>2.2.1</i>	<i>Smart Grids no Mundo</i>	19
<i>2.2.2</i>	<i>Smart Grids nos Estados Unidos</i>	20
<i>2.2.3</i>	<i>Smart Grids na Europa</i>	21
<i>2.2.4</i>	<i>Smart Grids na China</i>	21
<i>2.2.5</i>	<i>Smart Grids em África</i>	23
<i>2.2.6</i>	<i>Smart Grids em América Latina</i>	24
<i>2.2.6.1</i>	<i>Investimentos em Infraestrutura de Rede Inteligente</i>	25
<i>2.2.7</i>	<i>Smart Grids no Brasil</i>	26
<i>2.2.7.1</i>	<i>Legislação Brasileira Sobre Smart Grids</i>	27
2.3	Qualidade de Energia	28
2.4	Distúrbios Elétricos	30
<i>2.4.1</i>	<i>Tipos e Causas de Distúrbios Elétricos</i>	31
<i>2.4.2</i>	<i>Transitórios</i>	31
<i>2.4.2.1</i>	<i>Transitórios Impulsivos</i>	31
<i>2.4.2.2</i>	<i>Transitórios Oscilantes</i>	32
<i>2.4.3</i>	<i>Variação de Tensão de Curta Duração</i>	32
<i>2.4.3.1</i>	<i>Afundamento de Tensão</i>	33
<i>2.4.3.2</i>	<i>Elevação de Tensão</i>	33
<i>2.4.3.3</i>	<i>Interrupção</i>	34
<i>2.4.4</i>	<i>Variações Tensão de Longa Duração</i>	35
<i>2.4.5</i>	<i>Desequilíbrios de Tensão</i>	35
<i>2.4.6</i>	<i>Distorções na Forma de Onda</i>	35

2.4.6.1	<i>Nível CC</i>	35
2.4.6.2	<i>Harmônicas</i>	36
2.4.6.3	<i>Inter-harmônicas</i>	36
2.4.6.4	<i>Notches</i>	36
2.4.6.5	<i>Ruídos</i>	37
2.4.7	<i>Flutuações de Tensão</i>	37
2.4.8	<i>Variações de Frequência do Sistema</i>	37
2.5	Formas de Detecção e Classificação dos Distúrbios Elétricos	38
2.5.1	<i>Classificação dos Distúrbios Elétrico</i>	38
2.5.1.1	<i>Árvore de Decisão</i>	41
2.5.1.2	<i>Algoritmo Naïve Bayes</i>	44
2.5.1.3	<i>Redes Neurais Artificiais</i>	45
2.5.1.4	<i>K-vizinhos mais Próximos (K-Nearest Neighbours)</i>	47
2.5.1.5	<i>Support Vector Machines</i>	49
2.5.2	<i>Detecção dos Distúrbios Elétrico na Rede Distribuição</i>	53
2.5.2.1	<i>Detecção Baseada no Valor RMS</i>	53
2.5.2.2	<i>Detecção Baseada na Transformada de Fourier</i>	54
2.5.2.3	<i>Detecção Baseada na Transformada Wavelet</i>	56
3	METODOLOGIA	58
3.1	Levantamento de Informações	58
3.2	Análise das Informações Levantadas	59
4	APLICAÇÃO DAS SMART GRIDS PARA SOLUCIONAR OS DISTÚRBIOS ELÉTRICOS	60
4.1	Melhoria da Qualidade de Energia	60
4.2	Autorrecuperação (<i>Self Healing</i>)	61
4.3	Medidor Inteligente (<i>Smart Meter</i>)	62
4.4	Internet da Energia (<i>internet of energy</i>)	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A demanda por eletricidade no mundo está aumentando e aumentando rapidamente. Esse aumento se deve ao crescimento populacional e à dependência de tecnologias que requerem energia elétrica. Essa dependência cria uma demanda cada vez maior de energia disponível (FURTADO, 2021).

O novo coronavírus provocou grandes mudanças nos hábitos e no modo de vida da população, dentre eles destacam-se o *home-office*, fechamento de indústrias, escolas, universidades, *shoppings*, comércio e restaurantes. Com todas estas mudanças o perfil de consumo energético sofreu grande impacto ao final do mês de maio de 2020, onde se registrou queda de 11%, ligada diretamente às mudanças nos setores industrial e comercial, já a classe residencial registrou aumento de 0,3% (ONS, 2020). O avanço da vacinação contra a COVID-19 em 2021 permitiu a recuperação econômica de atividades da indústria e dos serviços que haviam retraído de forma intensa em 2020. No entanto, dados mais recentes indicam um menor ritmo de crescimento para a economia ao final do ano passado (2021) e início deste ano (2022), em relação ao esperado anteriormente. Nos países desenvolvidos, o consumo de energia elétrica chega a 10.000 KWh/pessoa, nos países em desenvolvimento, onde se concentra a maior parte da população mundial, esse consumo é inferior a 2.000 KWh/pessoa. As aspirações de desenvolvimento da maioria da população mundial só poderão ser realizadas se houver um aumento significativo da eficiência energética e a criação de novas fontes de energia (SIN, 2022).

A tecnologia *Smart Grid* surge no contexto da eficiência e da qualidade de energia, ou seja, ela surge no sentido de mudar os modelos no setor de energia elétrica tradicional na sua forma mundial. E a mesma tem o objetivo de melhorar a geração, a transmissão, a distribuição e o consumo de energia elétrica, para melhorar a qualidade de energia entregue. As concessionárias se beneficiam da quantidade de informações disponíveis à medida que a automação da rede aumenta. Dessa forma, a empresa pode responder melhor aos níveis de demanda, reduzir o custo de infraestrutura e construção de novas plantas, melhorar os serviços e a capacidade de usar os dados para o planejamento do negócio. Para o consumidor, o principal benefício é a diminuição do custo, ou seja, uso mais eficiente da energia proporcionado pelo *smart grid*. Esta redução de gastos é proporcionado pelos fatores como a possibilidade de acesso aos dados da rede em tempo real e a redução nos custos de distribuição de energia. Além do nível econômico, também existem benefícios no que se refere a confiabilidade e qualidade do serviço, e como a rede se torna mais confiável, o usuário pode usufruir da distribuição de energia sem correr o risco de

perder o serviço por sobrecarga da rede (OLIVEIRA; SILVA, 2021).

A utilização da tecnologia *smart grid* no sistema elétrico de potência (SEP), especificamente no sistema de distribuição melhoraria bastante os indicadores de qualidade do produto, isto é, tanto indicadores coletivos como os indicadores individuais seriam afetados positivamente no sentido de reduzir os níveis de interrupção de fornecimento de energia. Visto que é um sistema que utiliza bastante tecnologia de informação, portanto, as concessionárias de energia teriam informações sobre o fornecimento de energia a tempo de providenciar os mecanismos para reparar qualquer inconveniência.

O termo Qualidade de Energia Elétrica tornou-se um termo popular no setor elétrico nos últimos anos, visando expressar através de indicadores os padrões aceitáveis dos serviços e produtos entregues pelas concessionárias aos consumidores. Verifica-se que a sensibilidade e dependência dos consumidores e seus equipamentos estão cada vez mais ligados às condições de fornecimento do sistema de energia elétrica, tanto no nível de cargas domésticas, quanto nas aplicações industriais (ANJOS, 2020).

A qualidade de energia está diretamente ligada a alteração do padrão de energia gerada, ou seja, mudanças na senoide de frequência constante que varia por vários motivos. Essa alteração pode ocorrer na amplitude e na frequência, seja através de interrupções, ruídos, distúrbios, geração e presença de outras frequências diferentes da fundamental (60Hz no Brasil). Diversas nomenclaturas são utilizadas para definir os vários problemas relacionados a falta de qualidade de energia como: afundamento e elevação de tensão, surto, ruído, interrupção, harmônica, entre outros. Todos estes termos representam certos distúrbios relacionados à qualidade de energia e, portanto, passam a ser alvo de preocupação dos profissionais que se encarregam de manter o sistema funcionando e obter o máximo de eficiência (MARTINHO, 2009).

Para manter o sistema funcionando e obter o máximo de eficiência, estes distúrbios precisam ser detectados e classificados, para depois serem solucionados o mais rápido possível. Os distúrbios aos quais o sistema elétrico está exposto podem ser caracterizados de várias maneiras: pela duração do evento, pela faixa de frequência envolvida, pelos efeitos causados ou pela magnitude do impacto. Para fazer qualquer uma dessas classificações, é necessário conhecer as características de cada distúrbios. Existem várias técnicas para fazer a detecção e classificação destes distúrbios, dentre delas estão os reconhecedores de padrão e as transformadas (DECKMANN; POMILIO, 2017).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é melhorar a qualidade de energia com as *Smart Grids*.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Apresentar os indicadores da qualidade de energia com as redes inteligentes;
2. Descrever as técnicas de detecção dos distúrbios na rede elétrica;
3. Descrever as técnicas de classificação dos distúrbios na rede elétrica;

1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo a introdução no primeiro capítulo.

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica, onde foi feita uma abordagem sobre as *Smart Grids* e as principais técnicas de detecção e classificação de distúrbios, permitindo uma compreensão satisfatória dos mecanismos para a análise de sinais.

Em sequência, o Capítulo 3 aborda a metodologia onde são descritos o passo a passo de como se procedeu para a elaboração do presente trabalho, isto é, as fontes consultadas, os critérios de seleção dos materiais e o mecanismo de busca.

O Capítulo 4 versa sobre aplicação das *smart grids* para solucionar os distúrbios elétricos. Neste capítulo são apresentados os desfechos dos métodos e técnicas apresentadas no Capítulo 2, ou seja, os resultados que devem ser encontrados caso os métodos e técnicas descritas na fundamentação teórica seja aplicado.

Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões finais e propostas de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo apresentou as definições dos elementos que compõem o estudo proposto para o trabalho, com a finalidade de esclarecer e solidificar os conceitos neste discutido. Portanto, foram utilizadas diversas fontes de informações que podem ser consultadas nas seções a seguir.

2.1 História do Sistema Distribuição de Energia Elétrica

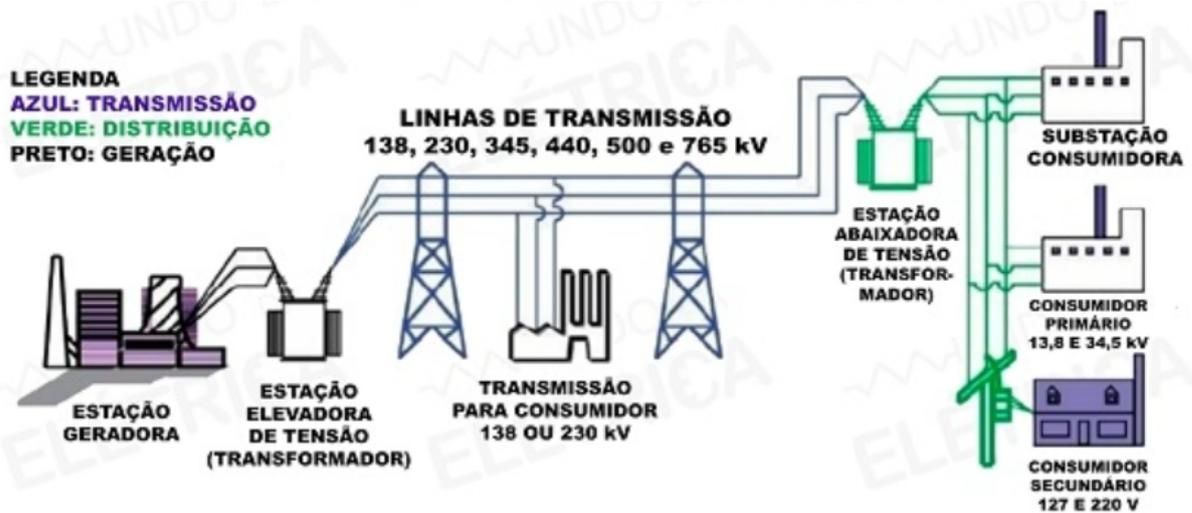
Em 1882 o primeiro sistema de distribuição elétrica desenvolvido por Thomas Edison iluminou a *Pearl Street Station*, a primeira central elétrica de Nova York, (Estados Unidos). Quando o sistema foi ligado, acendeu 52 lâmpadas simultaneamente no *New York Times* (IVAN, 2021). Um sistema de distribuição de energia é um sistema que se integra à topografia das cidades, ramificando-se ao longo de ruas e avenidas para conectar redes de transmissão, incluindo pequenos e médios produtores, às residências. (ABRADEE, 2021). O atual cenário de consumo de energia elétrica tem suscitado discussões em torno das questões ambientais e a mudança comportamental é necessária para manter as condições de vida no planeta. A distribuição de energia elétrica surgiu com o objetivo de aumentar o conforto das pessoas no seu dia a dia (SANTOS; NUNES, 2018).

Um sistema elétrico de potência (SEP) é a estrutura responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. No SEP, o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica é responsável por receber a energia dos agentes de abastecimento, nomeadamente empresas de transmissão, geradoras ou outras distribuidoras, e distribuí-la à unidade consumidora. (ANEEL, 2010). A rede de distribuição possui uma estrutura que lhe permita a continuação do fornecimento de energia, e caso ocorra alguma interrupção no fornecimento a reposição da energia elétrica pode ser feita para o maior número possível de consumidores. O sistema de distribuição de energia pode ser dividido em rede primária conectando o transformador da subestação ao transformador de distribuição e a rede secundária conectando o transformador de distribuição ao consumidor, como indica a Figura 1 (POSSAGNOLO, 2019).

O sistema de distribuição de energia no Brasil é formado por complexas redes de elementos que visam transportar a energia de onde é produzida para onde será consumida. Esse complexo sistema integra unidades de geração de energia, linhas de transmissão, canais de distribuição e consumidores finais. De forma ramificada, por ruas e avenidas, a rede de

distribuição de energia está fisicamente conectada ao sistema de transporte de eletricidade. Os distribuidores de eletricidade conectam, mantêm e entregam eletricidade aos consumidores de forma eficiente por meio de uma empresa específica (SANTOS; NUNES, 2018).

Figura 1 – Sistema de distribuição primária e secundária.



Fonte: Mattede (2022)

2.2 Redes Elétricas Inteligentes ou *Smart Grids*

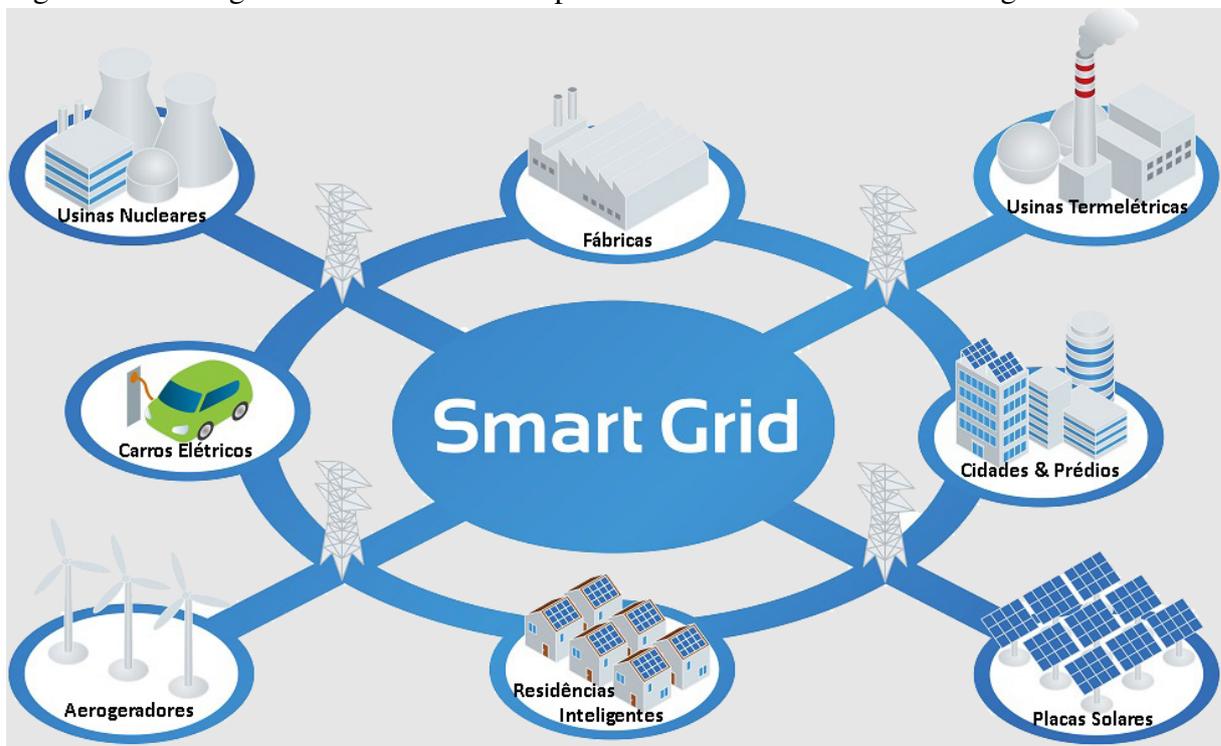
O termo *Smart Grid* foi usado pela primeira vez em 2005 em um artigo escrito por S. Massoud Amin e Bruce F. Wollenberg, publicado na revista Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), intitulado *Towards a Smart Grid : Alimentando o século 21* (MME, 2016). Embora não haja consenso sobre sua definição, pode-se dizer que o termo *Smart Grid* é um conceito amplo relacionado as tecnologias de controle, monitoramento, armazenamento e comunicação que aproveitam recursos elétricos melhores do que os sistemas existentes (ODRIOZOL; GOMES, 2019).

Segundo MME (2016), Efig e Rabelo (2020), o conceito de redes elétricas inteligentes apresenta-se como uma tecnologia que permite o uso eficiente da energia elétrica. O Odriozol e Gomes (2019) demonstra que uma rede elétrica inteligente, ou simplesmente rede inteligente, é um sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica que utiliza recursos digitais e tecnologia da informação para torná-lo mais eficiente, com melhor controle sobre o fluxo de energia.

Para o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2012), *Smart Grids* podem

ser entendidos como uma rede elétrica que utiliza tecnologia digital avançada para monitorar e gerenciar a transmissão de energia em tempo real com fluxos de energia e informações bidirecionais entre o sistema de fornecimento de energia e o cliente final. Já a Agência Internacional de Energia (IEA), conceitua a *Smart Grid* como uma rede elétrica que usa tecnologia digital e outras tecnologias avançadas para monitorar e gerenciar a transmissão de eletricidade de todas as fontes de geração de energia para atender às diferentes necessidades de uso de eletricidade dos clientes, a Figura 2 mostra uma ilustração do papel que a *Smart Grid* desempenha na rede elétrica (IEA, 2021).

Figura 2 – Fluxograma de conexões entre produtores e consumidores de energia.



Fonte: Neves e Bagarolli (2013)

2.2.1 *Smart Grids no Mundo*

O advento das redes inteligentes tem sido objeto de discussões em todo o mundo. Visto que a crescente demanda por energia elétrica estimulou o crescimento econômico, comercial e industrial, e trouxe à tona grandes questionamentos a respeito de como será suprida essa demanda (BARROS, 2018). No entanto, vale lembrar que desde da criação da primeira rede elétrica por Nikola Tesla em 1888, não houve inovação significativa na forma como a energia elétrica é distribuída aos consumidores. Muitas das tecnologias utilizadas na época ainda estão

em uso, o que limita a possibilidade de inovação. Nos últimos cinquenta anos, a rede não evoluiu para enfrentar os desafios da mudança moderna. Ameaças de segurança, disponibilidade de energia alternativa e intermitente, metas de eficiência energética para reduzir a demanda de pico e controles digitais para aumentar a confiabilidade e diminuir os tempos de recuperação, são alguns exemplos de desafios que precisam ser enfrentados (MME, 2016).

Dessa forma, *Smart Grids* são vistas no setor energético como o futuro da distribuição de energia elétrica, pois, agregam os avanços tecnológicos nas áreas de tecnologia de informação, automação, computação aplicada e ao sistema elétrico de potência em favor das melhores práticas em termos ambientais e econômicos (BARROS, 2018). Em um mundo cada vez mais complexo, enfrentando demanda crescente e infraestrutura elétrica envelhecida, a implantação de redes inteligentes é crucial para fornecer energia confiável, eficiente e durável. Até 2025, o mercado global de redes inteligentes deverá ultrapassar USD 50 Bilhões (ALVES, 2022).

Embora a rede elétrica dos Estados Unidos da América (EUA) seja uma das mais eficientes do mundo, e com uma história de liderança mundial em desenvolvimentos tecnológicos no setor, a sua infraestrutura elétrica está envelhecendo e enfrentando estresse à medida que a demanda por eletricidade cresce. Isto torna o argumento para o desenvolvimento da rede elétrica inteligente ainda mais forte (WATCHWIRE, 2020; MORI, 2021). Houve um progresso significativo na implementação de medidores inteligentes, em 2020, mais de 100 milhões de medidores inteligentes foram instalados, e o setor de automação deve ser dominado por investimentos em redes elétricas autorreparáveis, capazes de identificar e reparar remotamente áreas defeituosas do sistema. Estes recursos reduzirão o tempo necessário para restaurar os serviços durante interrupções (ALVES, 2022).

2.2.2 *Smart Grids nos Estados Unidos*

Nos Estados Unidos, o esboço do plano de emprego inclui medidas para construir sistemas de transmissão de energia mais resilientes como parte dos esforços para alcançar a geração de energia livre de carbono até 2035 (IEA, 2021). O primeiro passo político importante dado pelos Estados Unidos em nível federal para o desenvolvimento das redes elétricas inteligentes foi a aprovação do *Energy Policy Act 2005*. Esta lei determinou às concessionárias estaduais incorporações de energias renováveis, inclusive através de créditos fiscais e componentes de preços para redes elétricas inteligentes (MORI, 2021). Essas medidas enfatizam a importância das políticas públicas e regulamentações na mobilização de investimentos e no incentivo à

conexão à rede, especialmente para novos projetos.

2.2.3 *Smart Grids na Europa*

Os momentos decisivos na transformação do setor energético europeu foram realizados com a publicação do Livro Branco em 1995, sobre a Política Energética que fixou como principais objetivos desta política comunitária a concorrência, a segurança de abastecimento e a proteção do meio ambiente. E um ano mais tarde (1996), a publicação do Livro Verde onde se firmou que o desenvolvimento era fundamental para o crescimento econômico sustentável (SILVA, 2002). O primeiro passo político significativo para o desenvolvimento de uma rede inteligente, embora não especificamente relacionado ao tema, foi dado com a Diretiva 2001/77/CE, de 27 de setembro de 2001, sobre a promoção de produção de eletricidade a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da eletricidade (MORI, 2021).

Os planos de expansão da rede de 2021-2030 na Europa fornecem a base para o aumento do investimento apoiado por esquemas de recuperação econômica. Embora o plano de ambição climática da Comissão Europeia para 2030, lançado em setembro de 2020, preveja investimentos anuais na rede de aproximadamente USD 70 Bilhões durante 2021-2030, estes devem ser ainda maiores devido ao seu *Fit for 55%* (apto para) de julho de 2021, que visa que as emissões em 2030 sejam 55% menores do que em 1990, ou seja, em comparação com a redução de 40% do plano anterior (IEA, 2021).

2.2.4 *Smart Grids na China*

As políticas para o desenvolvimento das redes elétricas inteligentes na China estão sendo realizadas em um contexto muito específico. Em primeiro lugar, o mercado de eletricidade chinês ainda está em forte crescimento, e ao contrário do que acontece na grande maioria dos países desenvolvidos isso atrai novos investimentos e facilita a implantação de novas tecnologias. Em segundo lugar, o setor de energia da China é marcado pelo uso intenso de fontes altamente poluentes, como petróleo e carvão, o que torna mais óbvios os benefícios das redes inteligentes. Por fim, a posição internacional de destaque que a China assumiu nas últimas décadas no setor industrial e, mais recentemente, em seus avanços tecnológicos, naturalmente a torna um dos líderes mundiais para o desenvolvimento das redes elétricas inteligentes (MORI, 2021).

O tamanho total do mercado da indústria de redes inteligentes da China atingiu quase 80 Bilhões de *Yuans* em 2020, e no final de 2021 cresceu para cerca de 85,5 Bilhões de *Yuans*. O

desenvolvimento de redes inteligentes foi um dos passos mais importantes na China de baixo carbono, ou seja, uma China mais sustentável com plano de construção de cidades inteligentes (SLOTTA, 2022a). A maior parte da queda de investimentos em 2020 ocorreu no setor de distribuição de eletricidade, pois as metas de expansão da rede elétrica rural foram cumpridas e o foco mudou para transmissão que representa uma parcela menor dos investimentos na rede. No entanto, com metas líquidas zero para 2060 no horizonte, bem como um ambicioso 14º Plano Quinquenal para energias renováveis, espera-se que os impressionantes planos de expansão das concessionárias estatais desencadeiem grandes investimentos (IEA, 2021). Em 2020, a *State Grid Corporation of China* (SGCC) investiu quase 461 Bilhões de *Yuans* em tecnologia de rede inteligente. A empresa não é apenas a maior empresa de serviços públicos na China, mas também em todo o mundo. Um dos objetivos de investimento da empresa é construir linhas de alta energia para transferir energia verde das regiões noroeste e oeste do país para as áreas industriais costeiras (SLOTTA, 2022b).

Em termos de política interna, no âmbito do desenvolvimento científico e tecnológico, observou-se um importante esforço de instituições-chave dos países estudados para a criação de produtos e serviços ligados às redes elétricas inteligentes. Nos Estados Unidos, o apoio a essas atividades em nível federal, se dá principalmente por meio de programas do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE).

No caso dos países da União Europeia, como França e Itália que usam a estrutura de ciência, tecnologia e inovação já montada com diversas instituições envolvidas para avançarem também nas redes elétricas inteligentes.

A China por sua vez conta com algumas instituições-chave para o desenvolvimento científico e tecnológico do país e para as redes elétricas inteligentes, como o Ministério da Ciência e Tecnologia (MoST) e a Academia Chinesa de Ciências (CAS), além das empresas estatais do setor, como a SGCC e a Rede Elétrica do Sul da China (CSPG), inclusive no financiamento de projetos.

Uma preocupação geral observada nos países estudados é com os investimentos das empresas públicas e privadas. Nos Estados Unidos, o papel exercido pelo DOE, por exemplo, com a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada – Energia (ARPA-E), é basicamente assumir o financiamento de pesquisas de altos riscos e alta recompensa, que de outra forma não seriam realizadas devido aos seus altos custos e altos riscos. Na França e na Itália (representantes da União Europeia), incentivos empresariais, políticas de engajamento de consumidores e adoção

de *roll out mandatório* foram determinantes para o rápido avanço da implantação de contadores inteligentes.

Na China, SGCC e CSPG têm papéis centrais nos incentivos empresariais do país. Já as empresas privadas têm uma participação modesta dada a configuração institucional do setor. Já em termos de políticas de regulamentação de produtos e serviços, os reguladores dos países estudados vêm procurando acompanhar o desenvolvimento tecnológico e a demanda setorial dentro das suas particularidades institucionais e especificidades de mercado (MORI, 2021).

2.2.5 *Smart Grids em África*

Na África, as redes elétricas existentes estão ficando velhas, desatualizadas e com enormes restrições de capacidade. A indústria africana de distribuição de eletricidade (ADEI) enfrenta uma série de desafios que têm um impacto direto na sustentabilidade da indústria e na sua capacidade de fornecer serviços de eletricidade fiáveis aos seus clientes. Entre outras coisas, há uma necessidade urgente de resolver os atrasos de manutenção, renovação e reforço de capacidade (UA, 2018). Para enfrentar os desafios paralelos da pobreza energética e da mudança climática, produzindo energia limpa e acessível a uma taxa que atenda à crescente demanda sem prejudicar o meio ambiente, requer que todas as partes interessadas redobrem seus esforços para transformar o sistema energético global para o benefício de todos (ONU, 2017).

Além disso, é importante notar que a rede atual não foi construída com os desafios e requisitos da rede do século XXI em mente, especialmente para necessidade de focar na eficiência energética e no impacto das Mudanças Climáticas. No entanto, há uma enorme oportunidade para a modernização da rede uma vez que o investimento em infraestrutura atrasado é levado em consideração, pois é necessário investir em infraestrutura para atender às necessidades futuras de distribuição de eletricidade. A África está bem posicionada para aprender com os desenvolvimentos no resto do mundo. Considerando que a África não deve estar sujeita ao pleno desenvolvimento do ciclo tecnológico por meio de estudos de aplicação necessários e definição de padrões, as opções de *Smart Grid* mais adequadas para o continente podem ser selecionadas com base em pesquisas conduzidas pelo Instituto Nacional de Desenvolvimento Energético da África do Sul (SANEDI), que prevê solução de problema enfrentado pela indústria de fornecimento de energia elétrica com a chegada das redes inteligentes na África do Sul, isto é, a *Smart Grid* vai atuar como um fator chave para solucionar o problema da energia no continente. E vê-se ainda que este advento ajudará a resolver desafios como: gestão de ativos,

sustentabilidade da indústria, criação de empregos, melhoria da prestação de serviços e satisfação do cliente (UA, 2018).

A África tem uma abundância de recursos naturais, todo o continente pode ser considerado como um gigante em termos de energia solar. A África do Sul, por exemplo, tem um bom nível de incidência solar e recursos eólicos. Com os abundantes recursos de energia renovável no continente africano, a África pode melhorar o acesso aos serviços de eletricidade mediante a adaptação das tecnologias de redes inteligentes para satisfazer a procura de eletricidade no futuro, porque a infraestrutura atual em todos os países africanos é inadequada e requer grandes revisões e melhorias para apoiar o crescimento das redes inteligentes. Lembrando que a maioria dos países africanos não tem qualquer política para rede inteligente o que dificulta muito a transição do sistema elétrico convencional para sistema elétrico inteligente. As políticas de eficiência energética e de conservação devem ser postas em prática. Se a rede fosse apenas 5% mais eficiente, a energia de poupança equivaleria a eliminar permanentemente as emissões causadas pela queima de combustíveis fósseis que por sua vez libera gases de efeito de estufa na atmosfera por meio de milhões de carros e máquinas. A diversificação das fontes de energia deve ser uma prioridade do governo e facilitar o acesso à energia moderna para toda a população (FOLLY, 2013).

2.2.6 *Smart Grids em América Latina*

Globalmente, espera-se que as economias emergentes contribuam com a maior parte do crescimento da demanda de eletricidade nas próximas décadas. A América Latina não é exceção, com uma taxa de crescimento projetada de 2% ao ano até 2040. A resposta a essa necessidade está não apenas na geração de mais energia, mas também na gestão eficiente da energia. Como acontece com a maioria das infraestruturas da região, as redes da América Latina sofrem com a falta de investimento o que se reflete em serviços precários (KOOP, 2022). A empresa de inteligência de mercado *Northeast Group* divulgou um novo relatório analisando o crescimento da infraestrutura de rede inteligente nas economias em desenvolvimento, que diz que cerca de 430 milhões de medidores inteligentes serão implantados em mercados emergentes nos próximos cinco anos (NHEDE, 2020a).

A América Latina é um importante mercado emergente para soluções de redes inteligentes por causa do seu tamanho e taxas de crescimento rápido. Uma característica comum na região é a necessidade de melhorar os níveis de perda de energia técnica e comercial, e

umentar a confiabilidade e a qualidade do serviço (FERREIRA; BARROSO, 2016). Um denominador comum nos países latino-americanos é a saturação das linhas de transmissão, o que significa que a expansão das energias renováveis é retida até que haja um maior investimento no aumento de sua capacidade. Essa situação é agravada pelas perdas de energia que chegam a 15% na América Latina, que comparadas com outras regiões em desenvolvimento são mais altas (KOOP, 2022).

2.2.6.1 Investimentos em Infraestrutura de Rede Inteligente

De acordo com a *Northeast Group*, os países da América do Sul liderados por Brasil, Colômbia e Chile investirão USD 18,1 bilhões em infraestrutura de rede inteligente na próxima década (NHEDE, 2020b).

Em 2010, o grupo *State Grid* adquiriu diversas empresas no Brasil, principalmente espanholas, e recebeu milhares de quilômetros de linhas de transmissão, atingindo 15.761 Km. Para o grupo, que opera cerca de 90% da rede de transmissão de energia elétrica da China, o Brasil é de importância central devido às oportunidades associadas criadas para a venda de equipamentos e tecnologia. Tanto que 60% dos investimentos do grupo fora da China foram realizados no país (Brasil), chegando a 12,4 bilhões de dólares. Esses investimentos garantiram a *State Grid* o controle de 10% das redes de alta tensão e 14% do segmento de distribuição no mercado brasileiro.

A *Three Gorges* possui ativos no Equador, Bolívia, Chile e Brasil, onde está envolvida na operação de 17 usinas hidrelétricas e 11 parques eólicos. Em 2020, a estatal chinesa comprou os ativos da americana *Sempra Energy* no Peru por um montante de 3.590 milhões de dólares, adquirindo também 83,6% da empresa *Luz del Sur*, que distribui eletricidade a mais de um milhão de clientes, além de uma construtora e uma geradora (HARAN; GAVA, 2020)

Com um consumo anual de eletricidade de mais de 1.250 Terrawatt-hora (TWh), a América Latina representa um importante mercado emergente para tecnologias e soluções de redes inteligentes (SG). Investidores e fabricantes que olham para a região se deparam com altas taxas de crescimento da demanda de eletricidade, sem contar que os números ultrapassaram 4% ao ano na última década. Além disso, o amadurecimento das estruturas regulatórias e políticas em mercados importantes, incluindo Brasil, Chile, Colômbia e Peru que iniciaram suas reformas no setor elétrico nas décadas de 1980 e 1990 ajuda a criar confiança para investimentos. E a recente reorganização do setor no México consolida oportunidades no segundo maior mercado

de eletricidade da região (FERREIRA; BARROSO, 2016).

A troca do capital americano pela chinesa, indica a disposição das empresas em pagar por ativos de energia em níveis que nenhum outro concorrente demonstrou estar disponível, especialmente no caso de investimentos em ativos de energia em países propensos à instabilidade política e econômica. A estratégia de longo prazo das empresas públicas chinesas, cujo componente geopolítico é inegável, encontra mais espaço nesta área do que o foco puramente comercial das empresas privadas ocidentais. Além disso, essas mudanças ocorrem no contexto da guerra comercial entre a China e os Estados Unidos que incorpora uma estratégia de ocupação e concessões (HARAN; GAVA, 2020).

2.2.7 Smart Grids no Brasil

A rede inteligente coordena as necessidades e capacidades de todos os produtores de energia, operadores de rede, usuários finais e participantes do mercado, para operar todas as partes do sistema com a maior eficiência possível minimizando custos e impacto ambiental e maximizando a confiabilidade, resiliência e estabilidade do sistema (IEA, 2021). O Brasil está atrasado na distribuição de energia elétrica, as empresas de energia só recebem as informações sobre o consumo de seus clientes uma vez por mês, graças aos medidores, e têm problemas de detecção de interrupção no fornecimento apenas sabem quando o cliente liga para reclamar. Além disso, parte da energia distribuída é perdida devido às práticas ilícitas de alguns clientes, como adulteração de medidores e ligações clandestinas. Sem esquecer que o cliente deve esperar até a chegada da fatura para saber quanta energia gastou no mês. A rede elétrica inteligente permite acompanhar seu consumo de energia em tempo real, o que significa que o consumidor não terá que esperar a conta de energia para avaliar seu consumo e tomar providências, além de tornar a rede uma via de mão dupla, essa tecnologia permite ainda que os consumidores deixem de ser simples receptores de energia e se tornem pequenos produtores (ODRIOZOL; GOMES, 2019). Diversos aplicativos foram desenvolvidos para permitir o acesso a dados de medição auxiliar na tomada de decisão. Dados como consumo em tempo real, aparelhos que mais consomem energia, valor a ser pago até a data prevista para a fatura, previsão de conta ao final do ciclo são alguns exemplos de interação entre usuário e medidor (MME, 2021).

2.2.7.1 Legislação Brasileira Sobre Smart Grids

O tema *Smart Grid* se espalhou pelo mundo e novas tecnologias surgem neste novo panorama visando um sistema muito mais interligado, principalmente porque os consumidores nos sistemas podem se tornar geradores a partir do uso de tecnologias de geração que utilizam fontes alternativas de energia (BARROS, 2018). Nesse sentido, foram criadas algumas leis para regulamentar esse novo sistema, mas também para proteger os usuários do mesmo. Como por exemplo, o Projeto de Lei do Senado nº 356, de 2017 que altera as Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e nº 9.991, de 24 de julho de 2000, para incentivar a modernização das instalações do serviço público de distribuição de energia elétrica. Ela incentiva também a implantação de redes elétricas inteligentes, que permitem monitoramento e gerenciamento do transporte de eletricidade em tempo real, com informações bidirecionais entre o fornecedor e o consumidor. Apesar dos inúmeros benefícios, a popularidade das redes inteligentes é prejudicada pelo alto custo. A situação é agravada à medida que os investimentos nessas tecnologias competem com outros fatores de importância primordial para a melhoria da qualidade dos serviços de entrega. (BRAGA, 2017). O Projeto de Lei nº 2932, de 2015, que dispõe acerca do Plano Nacional de Redes Elétricas Inteligentes (PNREI) e altera a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. No seu parágrafo único deixa explícito o objetivo de promover o desenvolvimento de redes inteligentes de energia elétrica no Brasil de modo a propiciar o aumento da confiabilidade e redução dos tempos de reestabelecimento do fornecimento de energia elétrica, melhorar os indicadores de qualidade, reduzir as perdas elétricas e entre outros benefícios (ABI-ACKEL, 2015).

De maneira similar, pensou-se também na segurança das pessoas que vão utilizar este sistema, deste modo criou-se a Lei Nº 13.853, de 8 de julho de 2019 que altera a Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018, para dispor sobre a proteção de dados pessoais e para criar a Autoridade Nacional de Proteção de Dados (BRASIL, 2019). Com a Privacidade desde a concepção (PbD) sendo implantada antes do início do uso do sistema, a informação pessoal estará protegida desde sua inserção, em sua retenção e uso até sua eventual destruição por rigorosos padrões de segurança. Estes padrões devem garantir a confidencialidade, integridade e disponibilidade dos dados pessoais por todo o seu ciclo, incluindo garantia de destruição segura, criptografia apropriada e rigorosos métodos de registro e controle de acesso (MACHADO *et al.*, 2019).

2.3 Qualidade de Energia

A crescente demanda global por energia e a sua dependência cada vez maior por parte das empresas, das indústrias e dos consumidores além das regras que são gradativamente mais rígidas do órgão regulador (ANEEL), sobre o tempo e o número de desligamentos permitidos aos clientes, torna os programas de gestão e manutenção das redes elétricas cada vez mais necessários e complexos. Estes problemas podem ser verificados indiretamente através dos indicadores coletivos de continuidade fornecidos pela ANEEL. Esses indicadores são, a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) (SANTIAGO *et al.*, 2019). No sistema de distribuição de energia, o conceito de qualidade de energia é construído principalmente a partir de dois outros conceitos a saber, a qualidade do produto que é avaliada por meio de aspectos como nível de tensão, variação de tensão e harmônicos, e a qualidade do serviço que é avaliada por meio do registro do fornecimento intermitente (PEREIRA, 2019). Com o intuito de orientar os consumidores e as concessionárias, a Agência Nacional de Energia Elétrica estabelece algumas diretrizes através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). No seu Módulo 8, a ANEEL aborda os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, onde trata da qualidade do produto, da qualidade do serviço prestado e da qualidade do tratamento de reclamações. Para o estudo da qualidade do produto, aspecto fundamental para análise da qualidade da energia elétrica (QEE), faz-se necessário conhecer os fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório, como listado abaixo na Tabela 1 (FURTADO, 2021).

Tabela 1 – Fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório.

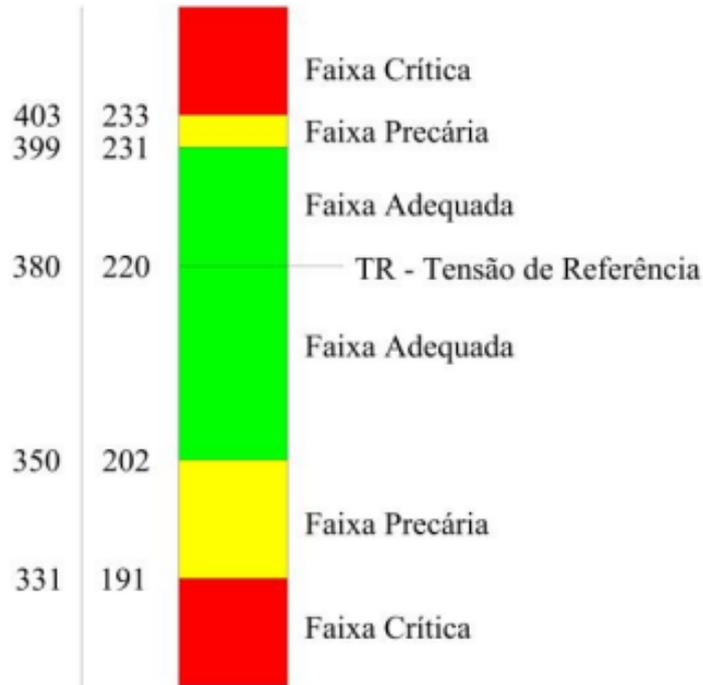
Regime Permanente	Regime Transitório
Tensão em regime permanente	Variação de tensão de curta duração – VTCD
Fator de potência	
Harmônicos	
Desequilíbrio de tensão	
Flutuação de tensão	
Variação de frequência	

Fonte: Adaptado de ANEEL (2018)

Ainda no mesmo Módulo do PRODIST, a ANEEL estabelece também os seguintes limites: adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente em relação a tensão de referência (FURTADO, 2021). A Figura 3 demonstra de forma explícita as

faixas de tensão em relação a tensão de referência, isto é, tanto para tensões acima com abaixo da tensão referencial.

Figura 3 – Faixas de tensão em relação a tensão de referência.



Fonte: ANEEL (2018).

Além dos indicadores coletivos de tensão em regime permanente, existem também os indicadores individuais de tensão no mesmo regime que são: a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP) e a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC), os quais devem estar associados a um mês civil. Para a composição destes indicadores deve-se considerar o registro de 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada equivalente a 168 horas, salvo as que eventualmente sejam expurgadas conforme item 87 do módulo da PRODIST, que diz que para as medições de nível de tensão em regime permanente, na ocorrência de variações temporárias de tensão ou de interrupções de longa duração, o intervalo de medição de 10 minutos deve ser expurgado e substituído por igual número de leituras válidas, sendo opcional o expurgo de intervalos com variações momentâneas de tensão (ANEEL, 2018).

Devido aos problemas de interrupções de fornecimento de energia, elaborou-se o Projeto de Lei nº 3193/21 que estabelece regras de qualidade para a tensão de energia elétrica fornecida pelas distribuidoras aos consumidores de média e baixa tensão medida em volts. Conforme a proposta, a tensão será classificada em três categorias, adequada, precária ou intolerável, que é avaliada consoante a variação da tensão em relação à tensão nominal de

fornecimento. Será considerada adequada apenas a tensão entre 95% e 105% da tensão de referência (por exemplo 220V no Ceará). A qualidade mensal dos níveis de tensão em cada unidade consumidora será medida pelos dois indicadores individuais: a DRP e a Duração Relativa da Transgressão para Tensão Intolerável (DRI), que terão um limite mensal. Sempre que este for ultrapassado, o consumidor será compensado pela distribuidora. O valor máximo da DRP será de 3% ao mês. Este número representa o percentual das leituras em que o nível de tensão está na faixa classificada como precária, já para a DRI, qualquer variação positiva implicará no ressarcimento do usuário (BRASIL, 2022).

2.4 Distúrbios Elétricos

A evolução tecnológica dos equipamentos eletrônicos somada à entrada de geração distribuída são parte fundamental no processo de modernização e crescimento econômico. No entanto, essa evolução é acompanhada tanto pelo aumento da quantidade de distúrbios na rede quanto pelo aumento da sensibilidade dos equipamentos frente a tais distúrbios (CARVALHO *et al.*, 2019). Os distúrbios elétricos são eventos que alteram as condições normais de funcionamento da rede elétrica, e podem ser medidos ou registrados por instrumentos utilizados para monitorar sistemas elétricos. Os sistemas de distribuição (SD) de energia elétrica são responsáveis por fornecer consumidores finais a energia recebida dos sistemas antecedentes (geração e transmissão), é neste sistema que a taxa de ocorrência de interrupções no fornecimento é mais elevada, isso devido às próprias características inerentes a uma rede de distribuição. Estes distúrbios são perturbadores do funcionamento ideal do sistema elétrico, isto é, fazem o sistema funcionar de uma forma atípica e indesejável, trazendo com eles grandes prejuízos materiais e financeiros (FORTES *et al.*, 2021). Há muita pesquisa que se concentra na indústria e não nos consumidores finais em áreas comerciais ou residenciais. Problemas de qualidade de energia elétrica que afetam esses tipos de consumidores, como picos de energia causados por interrupções, são raramente investigados e a concessionária de energia responsabilizada. Isso geralmente ocorre porque é muito difícil provar que o distúrbio foi de responsabilidade da concessionária. Dentre as características avaliadas pela ANEEL, três estão entre as mais importantes: a qualidade de serviço, a qualidade do atendimento e a qualidade do produto (MONTEIRO, 2018).

2.4.1 Tipos e Causas de Distúrbios Elétricos

O distúrbio em energia elétrica produz resultados indesejáveis para o sistema conectado como carga. A maioria dos problemas que surgem nos sistemas elétricos é causada pela excessiva distorção da corrente ou tensões junto ao consumidor final, e a principal causa deste fenômeno deve-se à crescente utilização de equipamentos eletrônicos alimentados pela rede elétrica (LOPEZ, 2013). Estes equipamentos estão diariamente susceptíveis aos riscos relacionados aos distúrbios da rede elétrica, e são mais comuns do que se possa imaginar. Isso porque além das falhas que já se conhece, por exemplo, como o *blackout* ou oscilações de energia, existem outros problemas da rede elétrica que não são tão perceptíveis mas, que prejudicam os seus equipamentos seja reduzindo o desempenho e a vida útil ou até mesmo levando a queima (LIMA, 2017). A Tabela 2 classifica os tipos de distúrbios elétricos e apresenta de forma reduzida as suas descrições.

Tabela 2 – Classificação dos distúrbios elétricos.

Tipos	Descrição
Transitórios	Tipos impulsivos ou oscilatórios
Variações de tensão de curta duração	Instantâneas, momentâneas ou coletivas
Variações de tensão de longa duração	Mudanças, subtensões ou sobretensões sustentadas
Desequilíbrios de tensão	Geradas por má distribuição de carga monofásica, e que fazem surgir no circuito tensão de sequência negativa
Distorções de forma de onda	Nível CC, harmônicas, inter-harmônicas, notching e ruídos
Oscilações de tensão	Variações dos valores propostos, ou esparádicas
Variações da frequência do sistema	Desvios no valor fundamental (50 Hz ou 60 Hz)

Fonte: Adaptado de Lopez (2013)

2.4.2 Transitórios

Os transitórios são divididos em dois, transitórios impulsivos e transitórios oscilantes. Suas principais características são frequências elevadas que seus espectros de frequência apresenta.

2.4.2.1 Transitórios Impulsivos

Transitórios impulsivos são variações de curta duração, eles são unidirecionais (em sentido positivo ou em sentido negativo), e suas principais causas são as descargas atmosféricas. Por serem de curta duração eles apresentam um espectro de frequência com frequências elevadas.

A Tabela 3 apresenta a classificação e as características deste transitório de forma resumida.

Tabela 3 – Classificação dos transitórios impulsivos.

Classificação	Duração Típica (DT)	Tempo de Subida
nanossegundos	$DT < 50 \text{ ns}$	5 ns
microsegundos	$50 \text{ ns} < DT < 1 \text{ ms}$	1 s
milissegundos	$DT > 1 \text{ ms}$	0,1 ms

Fonte: Adaptado de Marques (2007)

2.4.2.2 *Transitórios Oscilantes*

Transitórios oscilantes são oscilações em alta frequência que apresentam um decaimento com o tempo, apresentando espectros de frequência por diversos tipos de chaveamentos de dispositivos, energização de capacitores e transformadores, e do resultado de transitórios impulsivos. Na Tabela 4 pode-se observar a classificação deste transitório e as suas características.

Tabela 4 – Classificação dos transitórios oscilantes.

Classificação de Transitórios Oscilantes	Limite de Espectro (LE)	Duração Típica (DT)	Magnitude (pu)
Baixa frequência	$LE < 5 \text{ kHz}$	$0,3 < DT < 0,5 \text{ ms}$	entre 0 e 4
Média frequência	$5\text{kHz} < LE < 500 \text{ KHz}$	$20 \mu \text{ s}$	entre 0 e 8
Alta frequência	$0,5 \text{ MHz} < LE < 5 \text{ MHz}$	$5 \mu \text{ s}$	entre 0 e 4

Fonte: Adaptado de Marques (2007)

2.4.3 *Variação de Tensão de Curta Duração*

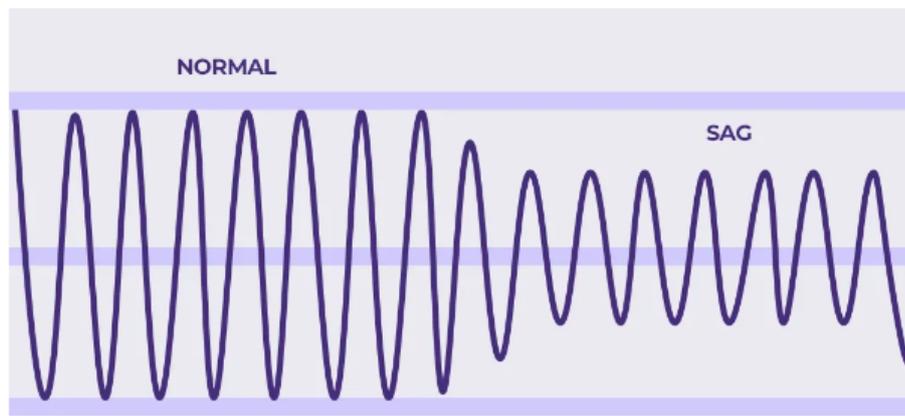
Entre os fenômenos que contribuem para a deterioração da qualidade do fornecimento de energia, prevalecem aqueles relacionados à alteração do valor r.m.s. da tensão. Nesse sentido, Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) mobilizou os esforços de pesquisadores de todo o mundo na busca de soluções tanto para causas quanto para efeitos sistêmicos. Essas variações podem ser descritas como instantâneas (0,5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 segundos) ou transitórias (3 segundos a 1 minuto). As flutuações de tensão de curto prazo são causadas por condições de falha, alimentação de grandes cargas que exigem alta corrente de partida ou perda intermitente de conexões nos cabos do sistema (PAULILLO *et al.*, 2013). As variações de curta duração são classificadas como *sag* (queda de tensão), *swelling* (aumento de tensão) e interrupção, que são de curta duração porque duram no máximo 1 minuto.

2.4.3.1 Afundamento de Tensão

Os afundamentos de tensão, também conhecidos como *Voltage Sag* ou *Voltage dip*, destacam-se como os mais significantes distúrbios da qualidade da energia que se manifestam nas redes elétricas. Tal destaque se justifica pelo fato de que os afundamentos de tensão quer sejam de curta ou de longa duração, são os que mais notadamente se fazem presentes na operação dos complexos elétricos.

O *sag* ou *dip* é a diminuição da amplitude da componente fundamental, como ilustrado na Figura 4, com magnitude entre (0,1 e 0,9 pu), e é classificado entre *sag* instantâneo (duração entre 0,5 a 30 ciclos), *sag* momentâneo com duração entre (30 ciclos a 3 segundos) e *sag* temporário com duração entre (3 s a 1 minuto). Suas principais causas são geralmente associadas com condições de faltas, energização de grandes grupos de cargas e partida de grandes motores.

Figura 4 – Afundamento de tensão.



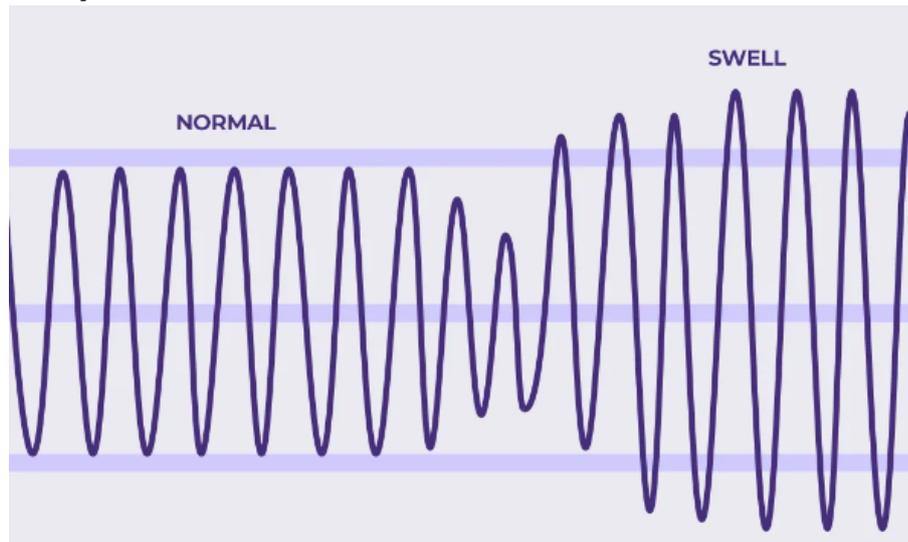
Fonte:LogMaster (2020)

2.4.3.2 Elevação de Tensão

A elevação de tensão também conhecida como *Voltage swell* é o aumento da amplitude da componente fundamental. Sendo classificado entre *swell* instantâneo com duração entre (0,5 e 30 ciclos) e amplitude entre (1,1 a 1,8 pu), *swell* momentâneo com duração entre (30 ciclos a 3 s) e amplitude entre (1,1 a 1,4 pu) e *swell* temporário que tem a duração entre (3 s a 1 minuto) e amplitude entre (1,1 a 1,2 pu). A Figura 5 ilustra a presença da *swell* que é perceptível na senoide.

Assim como *sag*, o *swell* é também associado com condições de falta, mas menos

Figura 5 – Elevação de tensão.



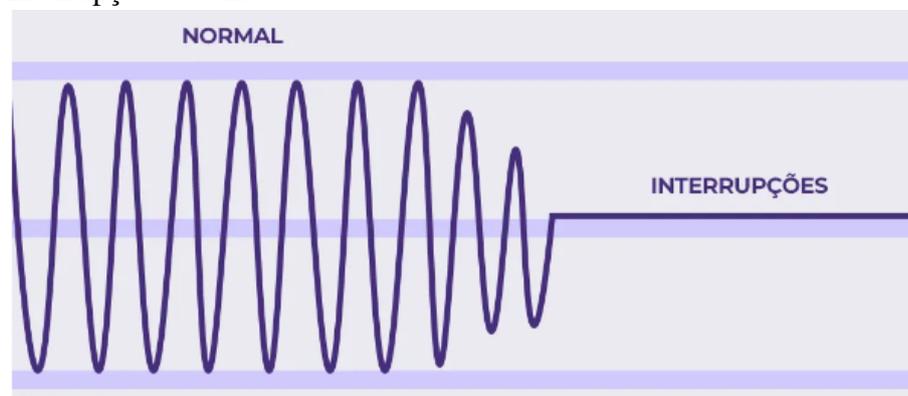
Fonte:LogMaster (2020)

comum em ocorrência. *Swell* também é causado por curto-circuito monofásico-terra, o qual faz com que as fases sãs fiquem com elevações de tensão, e outras causas são saídas de grandes grupos de cargas e grandes grupos de capacitores.

2.4.3.3 Interrupção

A interrupção é a queda brusca da amplitude da componente fundamental em valores abaixo que 0,1 pu, como ilustra a Figura 6. Sendo classificada entre interrupção momentânea com duração entre (30 ciclos e 3 s) e interrupção temporária com duração entre (3 s a 1 minuto). As causas de interrupções são faltas, falhas em equipamentos de fornecimento de energia e equipamentos de controle.

Figura 6 – Interrupção de tensão.



Fonte:LogMaster (2020)

2.4.4 *Variações Tensão de Longa Duração*

As variações de tensão longa duração são classificadas em subtensão, sobretensão e interrupção sustentada, apresentando duração de tempo superior a 1 minuto.

A subtensão é a diminuição da amplitude da tensão entre (0,9 a 0,8 pu). Suas principais causas são entrada de grandes grupos de cargas na rede e saída de bancos de capacitores compensadores de tensão. Normalmente as causas da subtensão são inversas as causas da sobretensão.

A sobretensão é a elevação da amplitude da tensão entre (1,1 a 1,2 pu), além de ser causada pela saída de grandes grupos de cargas na rede, também é causada por deficiências na regulação da tensão por bancos de capacitores e o incorreto uso de *taps* em transformadores.

A interrupção sustentada é a queda da tensão para 0 pu em intervalos de tempo maiores que 1 minuto. Suas causas estão associadas a problemas na geração ou cortes de energia.

2.4.5 *Desequilíbrios de Tensão*

Os desequilíbrios de tensão referem-se as diferenças entre os valores RMS (*root mean square*), e entre as tensões de um sistema trifásico. Podem ser medidos como a razão entre a componente de sequência negativa ou zero da tensão e a componente de sequência positiva. Valores típicos de desequilíbrios de tensão estão entre 0,5% a 2%. As principais fontes de desequilíbrios de tensão são alocações mal dimensionadas de cargas nas fases.

2.4.6 *Distorções na Forma de Onda*

As distorções na forma de onda são distorções que ocorrem na forma senoidal do sinal em condição de estado permanente da tensão ou corrente. Os tipos primários de distorções na forma de onda são nível Corrente Contínua (CC), harmônicos, inter-harmônicos, notches e ruídos.

2.4.6.1 *Nível CC*

Nível CC são presenças de tensões e correntes contínuas permanentes em sistemas de Corrente Alternada (CA). Tal fenômeno é indesejado porque pode contribuir para a saturação de transformadores, causar estresse na isolação dentre outras causas. Nível CC são mais causados por distúrbios geomagnéticos e efeitos de retificadores de meia onda. Valores típicos

da magnitude destes fenômenos se encontram abaixo de 0,001 pu.

2.4.6.2 *Harmônicas*

As harmônicas são os principais distúrbios causadores da deformação na forma de onda dos sinais de corrente e tensão em Sistema Elétrico de Potência (SEP). Elas são sinais senoidais com frequência correspondendo a múltiplos inteiros da frequência fundamental, as quais são combinadas com esta formando uma tensão impura para utilização. A amplitude típica da resultante de harmônicas encontram-se em valores menores que 0,2 pu. As principais fontes de harmônicas são correntes e tensões deformadas devido as alimentações de cargas não-lineares, tais como retificadores, inversores, e diversos equipamentos advindos da eletrônica de potência.

2.4.6.3 *Inter-harmônicas*

As inter-harmônicas são distúrbios que podem se manifestar em frequências discretas diferentes da frequência fundamental ou em faixas de frequência. Normalmente, a amplitude desses fenômenos se encontra abaixo de 0,002 pu. As principais causas de inter-harmônicas são conversores estáticos de frequência, ciclo-conversores, motores de indução e equipamentos a arco. É importante observar que apesar dos ruídos de fundo também serem considerados inter-harmônicas, devido ao fato de abrangerem todo o espectro de frequência, os mesmos são tratados como distúrbios individuais.

2.4.6.4 *Notches*

Os *notches* são distúrbios periódicos na tensão causados pela operação normal de dispositivos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para a outra. Conversores trifásicos são os mais importantes causadores de *notches*, pois durante a comutação da corrente entre duas fases ocorre um momentâneo curto-circuito entre estas fases. Por serem periódicos, os *notches* poderiam ser analisados no espectro harmônico, mas esse fato não se torna atrativo devido à possibilidade de tais distúrbios possuírem espectro em alta frequência, onde equipamentos para análise de harmônicos não são adequados.

2.4.6.5 Ruídos

Os ruídos são indesejáveis componentes nos sinais elétricos, ocupando novamente o espectro de frequência entre 0 a 200 kHz. Usualmente, são modelados como componentes aditivas aos sinais de tensão e corrente. A faixa de frequência e amplitude do ruído depende de sua fonte. Valores típicos de magnitude se encontram em torno de 0,01 pu. Os ruídos podem ser causados por equipamentos de eletrônica de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e chaveamento de fontes geradoras de energia.

2.4.7 Flutuações de Tensão

As flutuações de tensão são variações na forma de onda da tensão como modulações da componente fundamental, similar à modulação em amplitude (AM) com valores típicos de frequência na faixa entre 6 a 8 Hz e limites menores que 25 Hz. Tais fenômenos são aleatórios e fazem com que o valor da tensão da rede geralmente varie na faixa de 0,95 a 1,05 pu. As causas destes fenômenos se devem as cargas que sofrem significantes variações de corrente, especialmente cargas reativas. Fornos a arco ligados a sistemas de transmissão e distribuição são as mais comuns fontes de geração de flutuações de tensão. Geralmente, é usado erroneamente o termo *flicker* para descrever o fenômeno elétrico flutuação de tensão. Na verdade, o termo *flicker* se refere a cintilação luminosa nas lâmpadas visível ao olho nu, causado por um subgrupo de flutuações de tensão.

2.4.8 Variações de Frequência do Sistema

As variações de frequência do sistema são pequenas variações na frequência da tensão fornecida pelo sistema. Normalmente o tempo de duração deste distúrbio é menor que 10 s. Este fenômeno ocorre quando há um desbalanceamento entre a potência solicitada por um sistema de cargas e a potência disponibilizada pelo gerador, e está diretamente ligado a velocidade de rotação do gerador. Valores limites de variações da frequência podem ser ultrapassadas em situações de faltas, saídas e entradas de grandes grupos de cargas. Variações de frequência do sistema é fato raro em sistemas inter-conectados de grande porte. Por outro lado, tais variações são mais propensas em sistemas isolados contendo um só gerador.

2.5 Formas de Detecção e Classificação dos Distúrbios Elétricos

Nas últimas décadas a energia elétrica tornou-se em um elemento indispensável para a sociedade e essencial para o processo de industrialização. Ressalta-se com o avanço da tecnologia e as necessidades da sociedade e da indústria, os requisitos da qualidade de energia são cada vez maiores, portanto, é necessário desenvolver ferramentas capazes de detectar e classificar os distúrbios de energia elétrica. Para o reconhecimento de padrões destes distúrbios algumas técnicas são utilizadas, como por exemplo: os reconhecedores de padrões e as transformadas (MONTEIRO, 2018). A complexidade e a alta densidade do sistema elétrico contribuem para o aumento de possíveis distúrbios. Além disso, observa-se que as consequências de tais eventos geram problemas econômicos para as concessionárias e aos consumidores, podendo inclusive danificar o aparelho do usuário (FERNANDES, 2017).

2.5.1 Classificação dos Distúrbios Elétrico

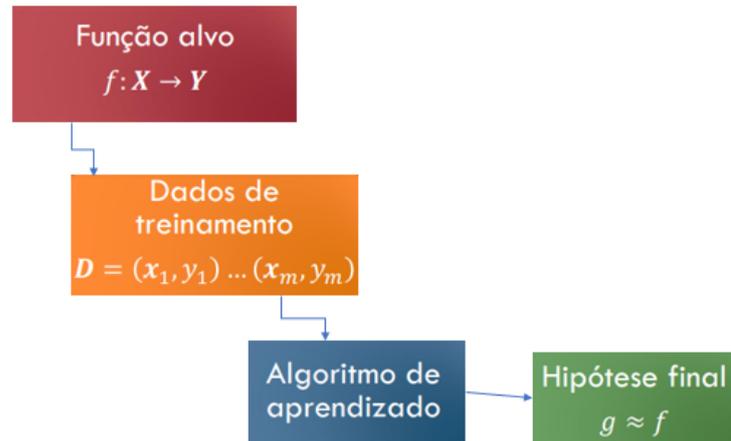
A classificação é o processo de prever a classe de determinados pontos de dados, e estas classes às vezes são chamadas de alvos, rótulos ou categorias. A referida classificação pertence ao tipo de aprendizagem de máquina supervisionada onde os alvos também fornecem os dados de entrada (ASIRI, 2018). A classificação pode ser aplicada a coisas simples, por exemplo, um detector de spam, onde todas as palavras relacionadas com *e-mails* do tipo spam são colhidos a fim de alimentar o algoritmo para prever futuros *e-mails* indesejados. Como também em pesquisas mais profundas, por exemplo, na pesquisa sobre diabetes, em que se utiliza uma base de dados de pacientes com pré diabetes para então prever o diagnóstico de pessoas com diabetes ajudando no retardamento ou tratamento da doença (SANTOS *et al.*, 2021).

Com a tecnologia cada vez mais incorporada nos negócios, a utilização de ciência de dados e de inteligência artificial se tornou mais frequente. Dessa forma, conhecer os tipos de aprendizado de máquina pode lhe ajudar a contratar inovações que de fato atendam suas necessidades (ASIRI, 2018).

Em 1959, Arthur Lee Samuel engenheiro do *MIT* definiu o aprendizado de máquina como campo de estudo que dá aos computadores a capacidade de aprender sem ser explicitamente programado (MACHADO; DRIEMEIE, 2020). O aprendizado de máquina (do inglês *machine learning*), influencia na maneira como a máquina aprende e lida com as atividades pelas quais ela é responsável. Por exemplo, este determina se o software processará o conjunto de dados sozinho

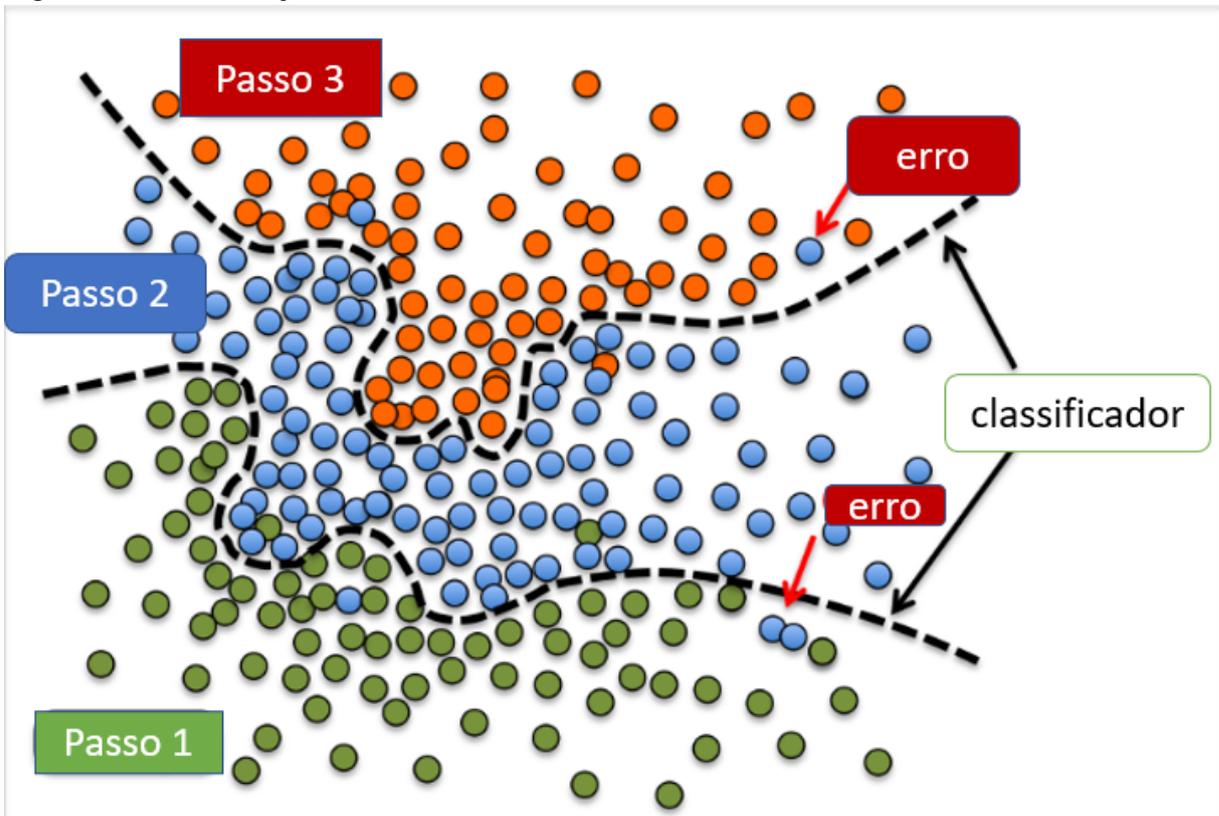
ou com intervenção humana. Portanto, compreender os tipos de aprendizado de máquina é uma maneira de garantir que o software alugado para empresa atenda às necessidades da mesma. A Figura 7 apresenta as etapas para o aprendizado da máquina, e logo em seguida a Figura 8 ilustra a separação ou classificação dos dados (MATHEUS, 2021).

Figura 7 – Aprendizado de máquina.



Fonte: Adaptado de Machado e Driemeie (2020)

Figura 8 – Classificação de dados treinados.



Fonte: Adaptado de Lenz (2017)

Segundo Matheus (2021), existem três principais *machine learning* que são: aprendizado de máquina supervisionado, aprendizado de máquina não supervisionado e aprendizado por reforço. O aprendizado supervisionado em *machine learning* é um daqueles com intervenção humana. Basicamente, uma pessoa fornece um banco de dados e ensina a máquina a encontrar a resposta desejada quando necessário. Desta forma, a máquina aprende a tomar decisões com base em informações pré-estabelecidas. Assim, podemos dizer que o aprendizado supervisionado pode rotular os dados de acordo com os exemplos estabelecidos em seu sistema. Já o aprendizado não supervisionado é aquele em que não há intervenção humana, ou seja, a máquina gera suas próprias regras de operação com base na identificação de padrões. Portanto, a análise de dados é realizada automaticamente. Dessa forma, o aprendizado não supervisionado dá mais independência ao computador. O aprendizado por reforço, é onde as máquinas trabalham com a experiência. Nesse processo, ela lida com o erro, e depois procura a abordagem certa para corrigir o erro e não repeti-lo. O aprendizado por reforço não é um evento único, de fato, a máquina pode tentar diferentes soluções até encontrar a solução mais adequada para o problema com o qual está lidando.

Para o efeito de classificação dos distúrbios será utilizado o aprendizado supervisionado. Segundo Machado e Driemeie (2020), a maioria das aplicações do aprendizado de máquina prático usa aprendizado supervisionado. Ele pode ser dividido em Regressão e Classificação com base no método de previsão usado. Como um dos objetivos do trabalho é apresentar as técnicas de classificação dos distúrbios elétricos, então, o aprendizado supervisionado será utilizado para este efeito. Esses são alguns classificadores do aprendizado supervisionado.

- * Árvores de decisão (SDT);
- * Algoritmo Naive Bayes;
- * Redes neurais;
- * K-vizinhos mais Próximos (*K-Nearest Neighbours*);
- * *Support vector Machine*.

Existem muitos algoritmos de classificação disponíveis hoje em dia, porém, sabe-se que não é possível determinar qual é o melhor. Visto que depende da aplicação e da natureza do conjunto de dados disponível. Por exemplo, se as classes são linearmente separáveis, os classificadores lineares podem superar modelos sofisticados e vice-versa (ASIRI, 2018). De acordo com Monteiro (2018), os classificadores de Árvore de Decisão e *Support Vector Machines* são duas das técnicas mais populares utilizadas no campo de reconhecimento de padrões.

2.5.1.1 Árvore de Decisão

A árvore de decisão utiliza uma estratégia do tipo dividir para conquistar, ou seja, um problema complexo é decomposto em sub-problemas mais simples, onde de forma recursiva a mesma estratégia é aplicada a cada sub-problema. E a sua capacidade de discriminação vem da divisão do espaço definido pelos atributos em sub-espacos, onde a cada sub-espaco é associada uma classe (LOPES, 2018). A árvore de decisão é uma ferramenta de suporte à tomada de decisão que usa um gráfico no formato de árvore e demonstra visualmente as condições e as probabilidades para se chegar aos resultados (PRATES, 2018).

O algoritmo Árvore de Decisão pertence à família de algoritmos de aprendizado supervisionado. O propósito da sua utilização é o de criar um modelo de treinamento que possa ser usado para prever a classe ou valor da variável de destino, ou seja, aprendendo regras de decisão simples inferidas de dados anteriores. Em geral, uma árvore de decisão é composta por perguntas e respostas *booleanas*, classificando um indivíduo ou entidade de acordo com o conjunto de respostas obtidas pelo conjunto de perguntas formuladas (CHAUHAN, 2022).

Basicamente, uma árvore de decisão consiste em um nó inicial (também chamado de raiz), nós internos, ramos e folhas. As árvores de decisão têm uma interpretação muito intuitiva, pois o algoritmo começa pelo topo (ou raiz), e vai se ramificando a cada novo nível implementado. Essa classificação se repete até que nenhuma outra repartição possa ser definida. Uma árvore ideal apresentaria uma ramificação perfeita, com apenas uma das folhas representando os valores, mas o que temos no cotidiano são impurezas, ou seja, ramificações que distribuem os valores contabilizados (CASALI, 2021). Para prever um rótulo de classe para um registro, começamos da raiz da árvore, comparamos os valores do atributo *root* (raiz) com o atributo do registro. Com base na comparação, seguimos o ramo correspondente a esse valor e saltamos para o próximo nó. A Figura 9 ilustra o quadro para elaborar a árvore de decisão, em seguida a Figura 10 representa uma simples árvore de decisão (CHAUHAN, 2022).

O processo de construção do modelo da árvore se chama de indução, e pode exigir bastante poder computacional. O propósito da árvore de decisão é fazer diversas partições dos dados em subconjuntos, de tal forma que os subconjuntos vão ficando cada vez mais puros. Um subconjunto dos dados será mais puro na medida em que contém menos classes da variável *target*. Uma forma de trabalhar matematicamente com a pureza é por meio da análise da entropia e do ganho de informação. Portanto, para entender como funciona o processo de construção de uma árvore de decisão é preciso compreender estes conceitos (PRATES, 2018).

Figura 9 – Quadro para elaboração da árvore..

Dia	Sol?	Vento?	Vou para praia?
1	Sim	Sim	Não
2	Sim	Sim	Não
3	Sim	Não	Sim
4	Não	Não	Não
5	Não	Sim	Não
6	Não	Sim	Não

Fonte: Tech (2022)

Figura 10 – Árvore de decisão simples (*Simple Decision Tree*).

Fonte: Tech (2022)

A construção de uma árvore de decisão é orientada pelo objetivo de reduzir a entropia, ou seja, a aleatoriedade que resulta na dificuldade de previsão da variável que define as classes. Por meio da entropia, o algoritmo verifica como os dados estão distribuídos nas variáveis preditoras com base na mudança na variável *target*. Quanto maior a entropia, maior a desordem dos dados, e quanto menor, maior será a ordem destes dados quando analisados pela ótica da variável *target*. A partir da entropia, o algoritmo verifica o ganho de informação de cada variável. A variável com maior ganho de informação será a variável do primeiro nó da árvore. Podemos interpretar o ganho de informação como a medida de quão bem relacionados os dados da variável preditora estão com os dados da variável *target*, ou seja, o quanto a variável *target* pode ser explicada a partir da variável preditora, sendo que a variável com melhor desempenho será a escolhida para iniciar a árvore (GCV, 2010).

Equação da Entropia

$$Entropia(S) = \sum p_i \log_2 p_i \quad (2.1)$$

$$Entropia(S) = -p_+ \log_2 p_+ - p_- \log_2 p_- \quad (2.2)$$

Onde:

- * S é o conjunto de exemplo de treino;
- * p_+ é a porção de exemplos positivos;
- * p_- é a porção de exemplos negativos;

Equação do Ganho de Informação

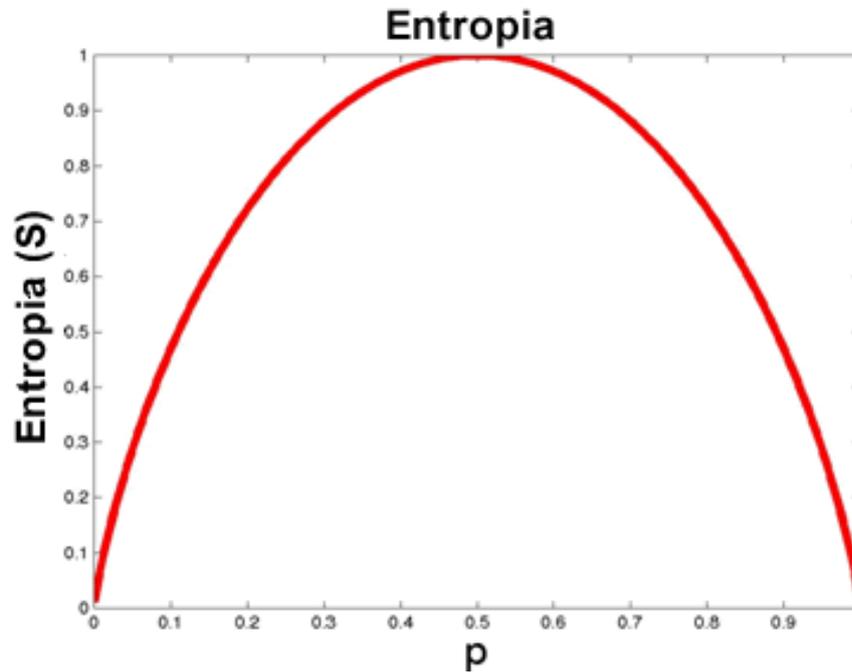
$$Ganho(G)(S, A) = S - \sum_{v \in A} \left| \frac{S_v}{S} \right| \cdot S_v \quad (2.3)$$

Uma árvore de decisão pode ser bastante complexa, com um grande número de arestas. Isso pode levar a um problema conhecido como *overfitting* (sobre-ajuste), que se trata de uma resposta dada a uma situação extremamente específica no conjunto de dados de treinamento, que não seria generalizável. O *overfitting* no aprendizado de máquina ocorre quando um modelo se ajusta muito bem aos dados de treinamento e, portanto, não pode prever com precisão os dados de teste não vistos. Em outras palavras, o modelo simplesmente armazena amostras e ruídos específicos nos dados de treinamento, mas não é flexível o suficiente para fazer previsões em dados reais. Para lidar com esse tipo de situação, existem métodos de *poda* da árvore de decisão (PRATES, 2018). Na Figura 11 pode ser visto a relação entre a entropia e as proporções dos exemplos.

Para Franks *et al.* (2022), a melhor maneira de evitar o sobre-ajuste é seguir as seguintes práticas:

- * Usar mais dados de treinamento e eliminar a tendência estatística;
- * Evitar o vazamento de destino;
- * Usar menos recursos;
- * Otimização de hiper-parâmetro e regularização;
- * Limitações de complexidade do modelo;
- * Validação cruzada.

Figura 11 – Relação de entropia e proporção de exemplos.



Fonte: Gcv (2010)

2.5.1.2 Algoritmo Naïve Bayes

O algoritmo Naïve Bayes é um classificador probabilístico baseado no teorema de Bayes, que foi criado por Thomas Bayes na tentativa de provar a existência de Deus. O algoritmo se tornou popular na área de Aprendizado de Máquina, e por ser muito simples e rápido, possui um desempenho relativamente maior do que outros classificadores para tamanhos de amostra pequenos. Além disso, Naïve Bayes precisa apenas de uma pequena quantidade de dados de teste para completar as classificações com boa precisão (BECKER, 2019). O termo Naïve refere-se à forma como o algoritmo analisa as características de um banco de dados, visto que ele assume que as *features* são independentes entre si. Além disso, ele também assume que as variáveis *features* são todas igualmente importantes para o resultado. No entanto, em cenários onde isso não ocorre, essa técnica deixa de ser a opção ideal. Mas, o desempenho do referido algoritmo é consideravelmente bom com classes múltiplas e ele funciona melhor com *features* categóricas do que com numéricas (SACRAMENTO, 2021).

O algoritmo Naïve Bayes é dado por:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(B)}{P(A)} \quad (2.4)$$

Onde:

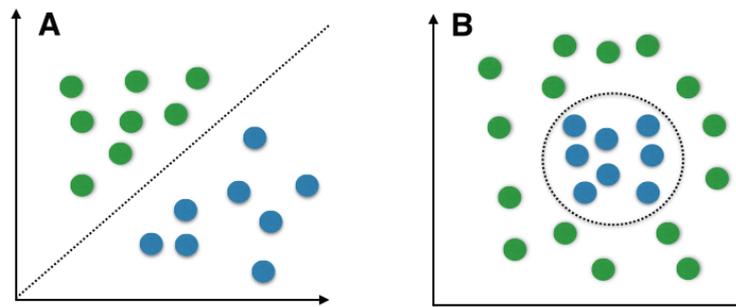
$P(A | B)$ = Probabilidade condicional de A dado B;

$P(B | A)$ = Probabilidade condicional de B dado A;

$P(A)$ = Probabilidade do evento A;

$P(B)$ = Probabilidade do evento B.

Figura 12 – Problemas lineares (A) vs não lineares (B).



Fonte: Raschka (2014)

Amostras aleatórias para duas classes diferentes são mostradas na Figura 12 com esferas coloridas, e as linhas pontilhadas indicam os limites de classe que os classificadores tentam aproximar calculando os limites de decisão. Um problema não linear (B) seria um caso em que classificadores lineares, como Naïve Bayes não seria adequado pois as classes não são separáveis linearmente (RASCHKA, 2014).

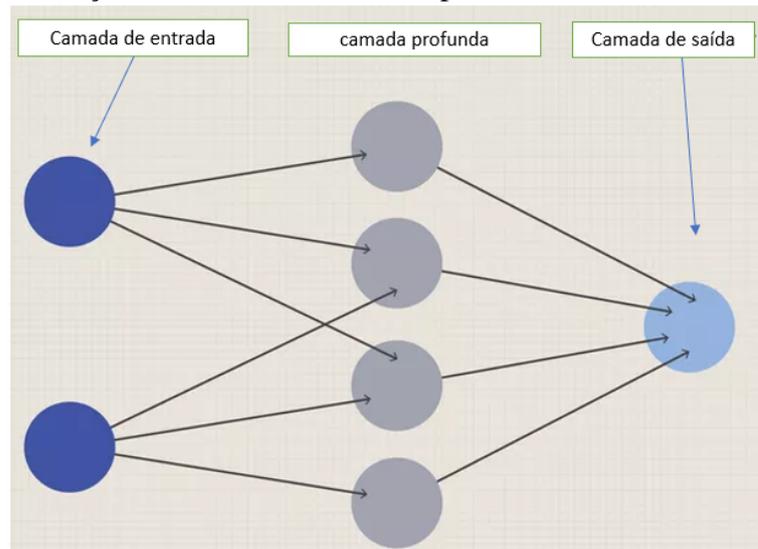
2.5.1.3 Redes Neurais Artificiais

Uma rede neural artificial é uma série de algoritmos que tentam reconhecer as relações subjacentes em um conjunto de dados por meio de um processo que imita o funcionamento do cérebro humano. Nesse sentido, rede neural artificial refere-se a sistemas neurais artificiais (CHEN, 2021). A ideia de uma máquina que pensa pode ser rastreada até aos gregos antigos, mas vai se concentrar aqui nos principais eventos que levaram à evolução do pensamento em torno das redes neurais. As redes neurais, também conhecidas como Redes Neurais Artificiais (RNAs) ou redes neurais simuladas, estão no centro dos algoritmos de aprendizado profundo. Seu nome e estrutura são inspirados no cérebro humano, imitando a maneira como os neurônios biológicos sinalizam uns aos outros (IBM, 2020).

Eles foram propostos pela primeira vez em 1944 por Warren McCullough e Walter Pitts, dois pesquisadores da Universidade de Chicago que se juntaram ao MIT em 1952 como membros fundadores do ordinário, conhecido como a primeira faculdade de ciência cognitiva. *Deep learning* é um novo nome para uma abordagem de inteligência artificial chamada redes

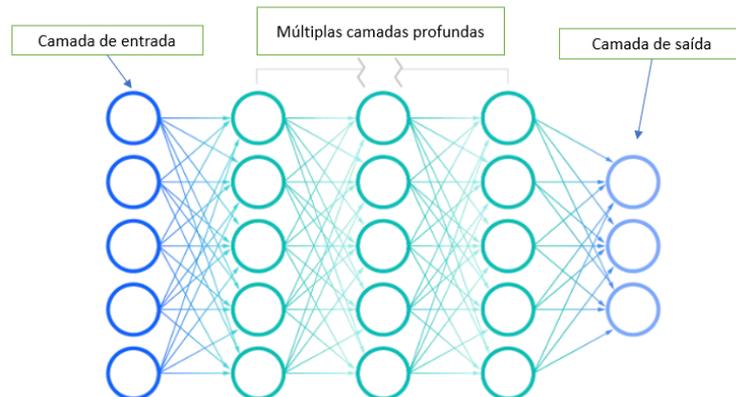
neurais, que está entrando e saindo de moda há mais de 70 anos. As redes neurais foram importante na área de pesquisa em neurociência e ciência da computação até 1969, quando elas foram mortas pelos matemáticos do *MIT*, nomeadamente, Marvin Minsky e Seymour Papert, que um ano depois se tornariam co-diretores da novo Laboratório de Inteligência Artificial do *MIT* (HARDESTY, 2017).

Figura 13 – Representação de uma rede neural simples.



Fonte: Adaptado de Chen (2021)

Figura 14 – Aprendizagem profunda (Deep Learning).



Fonte: Adaptado de IBM (2020)

As redes neurais dependem de dados de treinamento para aprender e melhorar sua precisão ao longo do tempo (IBM, 2020). Quando uma rede neural está sendo treinada, todos os seus pesos e limites são inicialmente definidos para valores aleatórios. Os dados de treinamento são alimentados na camada inferior (camada de entrada) e através de camadas sucessivas, multiplicadas e somadas de maneiras complexas, até serem finalmente transformadas na camada

de saída. Durante o treinamento, os pesos e limites são ajustados continuamente até que os dados de treinamento com o mesmo rótulo sempre produzam a mesma saída. (HARDESTY, 2017). As Figuras 13 e 14 ilustram as redes neurais, onde a primeira representa uma rede neural simples e a segunda refere-se ao aprendizado profundo.

Segundo Seth (2021), a equação para a rede neural é uma combinação linear das variáveis independentes e seus respectivos pesos e termo de polarização (interceptação) para cada neurônio.

$$Z = W_0 + W_1X_1 + W_2X_2 + \dots + W_nX_n \quad (2.5)$$

Onde:

Z = símbolo para denotação da representação gráfica de RNA;

W = são os pesos ou os coeficientes beta;

X = são as variáveis independentes ou as entradas;

W_0 = Viés ou interceptação

Uma rede neural artificial funciona de forma semelhante à rede neural do cérebro humano. Um neurônio em uma rede neural é uma função matemática que coleta e classifica informações de acordo com uma arquitetura específica. Essa rede tem fortes semelhanças com métodos estatísticos, como análise de curva e análise de regressão. Uma rede neural contém camadas de nós interconectados, cada nó é conhecido como perceptron e é semelhante a uma regressão linear múltipla. O perceptron alimenta o sinal produzido por uma regressão linear múltipla em uma função de ativação que pode ser não linear (CHEN, 2021).

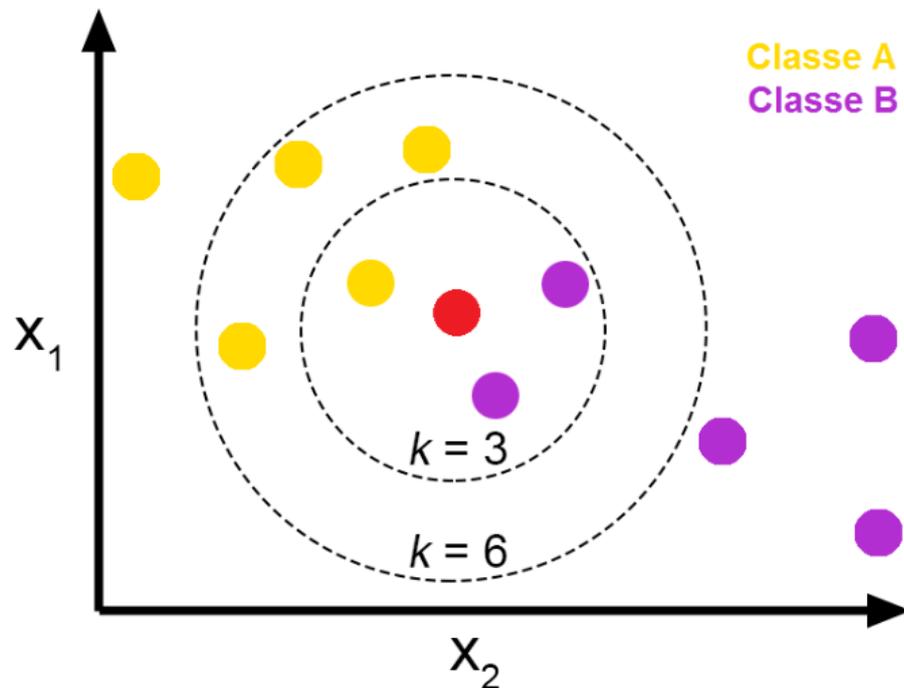
2.5.1.4 *K-vizinhos mais Próximos (K-Nearest Neighbours)*

O algoritmo vizinho mais próximo (K - NN) foi proposto pela primeira vez por Fakunaga e Narendra em 1975. Podemos dizer com certeza que o kNN é frequentemente aplicado em problemas de classificação ou recomendação, por exemplo, para classificar problemas binários (crédito ou não), mas isso não significa que o kNN não possa ser usado em problemas de previsão com regressão (GONÇALVES, 2020). O KNN é um dos muitos algoritmos de aprendizagem supervisionada usado no campo de data *mining* e *machine learning*, ele é um classificador onde o aprendizado é baseado no quão similar é um dado vetor em relação ao outro (JOSE, 2018).

A ideia principal do KNN é determinar o rótulo de classificação de uma amostra

baseado nas amostras vizinhas advindas de um conjunto de treinamento. Em KNN, K representa o número de vizinhos mais próximos. O número de vizinhos é o principal fator decisivo. O K geralmente é um número ímpar se o número de classes for dois (PACHECO, 2017). Ele funciona melhor com um número menor de recursos do que com um grande número de recursos. Visto que o aumento da dimensão leva ao problema de *overfitting*, e para evitar o *overfitting*, os dados necessários precisarão crescer exponencialmente à medida que se aumenta o número de dimensões. Este problema de dimensão superior é conhecido como a Maldição da Dimensionalidade. Para lidar com ele, é preciso realizar uma análise de componentes principais antes de aplicar qualquer algoritmo de aprendizado de máquina ou usar a abordagem de seleção de recursos (NAVLANI, 2018).

Figura 15 – Exemplo de classificação do KNN com dois rótulos de classe com $k = 6$ e $k = 3$.



Fonte: Jose (2018)

Como o kNN opera com aprendizado baseado em instanciação, isto é, calculando e classificando quais objetos (dados) são mais semelhantes de acordo com os K-vizinhos mais próximos, normalmente, efetua-se um cálculo de Distância Euclidiana, considerando as classes dos K-vizinhos mais próximos para realizar a classificação. Calcular a distância é fundamental para o KNN, como pode ser constatado na Figura 15. Existem diversas métricas de distância, e a escolha de qual usar varia de acordo com o problema, porém, a mais utilizada é a distância Euclidiana (GONÇALVES, 2020).

Distância Euclidiana

$$D_E(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} \quad (2.6)$$

$$D_E(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (2.7)$$

Onde (p e q) são dois pontos n-dimensionais

Em relação a escolha do valor k, não existe um valor único para a constante, pois a mesma varia de acordo com a base de dados. É recomendável sempre utilizar valores ímpares e primos, mas o valor ótimo varia de acordo com a base de dados (PACHECO, 2017).

2.5.1.5 Support Vector Machines

Os algoritmos de aprendizado de máquina supervisionados funcionam com conjuntos de dados menores, mas podem ser muito poderosos na construção de modelos. A exemplo disto é o *Support Vector Machine* (SVM) introduzido na década de 1990 por Vapnik e colaboradores. Ele é um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado que pode ser usado para desafios de classificação ou regressão, mas seu objetivo principal é treinar e classificar um conjunto de dados (*dataset*). Os Vetores de suporte são simplesmente as coordenadas da observação individual (BAMBRICK, 2016; ADDAN, 2019). A principal motivação do SVM é separar várias classes no conjunto de treinamento com uma superfície que maximiza a margem entre elas, em outras palavras, o SVM permite maximizar a capacidade de generalização de um modelo (CERVANTES *et al.*, 2020).

Hiperplano (1)

$$w^T x - b = +1 \quad (2.8)$$

Ótimo Hiperplano

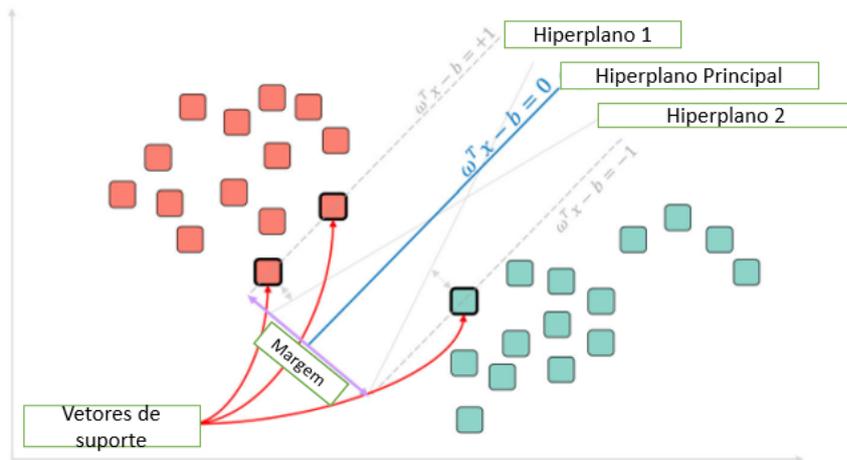
$$w^T x - b = 0 \quad (2.9)$$

Hiperplano (2)

$$w^T x - b = -1 \quad (2.10)$$

Os vetores de suporte são os pontos de dados mais próximos do hiperplano principal, como pode ser visto na Figura 16. Os referidos pontos de dados não devem ser removidos,

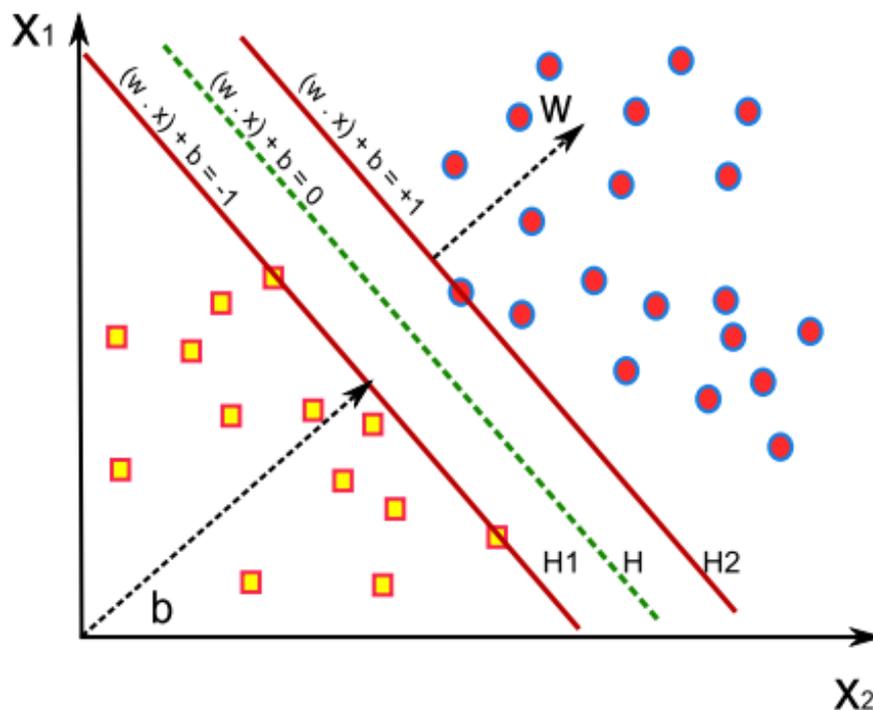
Figura 16 – Vetores de suporte e hiperplanos no SVM.



Fonte: Adaptado de Sheykhmousa *et al.* (2020)

visto que se removidos alterariam a posição do hiperplano divisor. Portanto, eles podem ser considerados os elementos importantes de um conjunto de dados. Pode-se pensar em um hiperplano como uma linha que separa e classifica linearmente um conjunto de dados. Quanto mais distantes do hiperplano principal os pontos de dados estiverem, melhor é a classificação. Com isso, deseja-se sempre que os pontos de dados fiquem o mais longe possível do hiperplano principal, mas ainda no lado correto dele. Como representado na Figura 17 (BAMBRICK, 2016).

Figura 17 – Separação e classificação linear dos dados.



Fonte: Cervantes *et al.* (2020)

Classificador linear $f(x)$

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i \in S} \alpha_i \langle x, x_i \rangle \quad (2.11)$$

Onde:

* $S \implies$ é a coleção de índices desses pontos de suporte;

* β_0 e $\alpha_i \implies$ são os parâmetros encontrados durante o treinamento.

No entanto, existem grupos de dados que não podem ser separados apenas por hiperplanos. Então, utiliza-se o SVM não-linear para delimitar as duas classes, que traçará uma ou mais linhas retas ou curvas para separar as classes da melhor forma possível. Para separar esses tipos de dados, o algoritmo primeiro faz uma transformação não-linear do espaço para depois poder separar os grupos com um SVM linear. Dessa forma, apesar da separação ser um hiperplano no espaço das *features* (nome dado ao espaço depois da transformação), no espaço das entradas (nome do espaço inicial) a separação é não-linear (COUTINHO, 2019). A Figura 18 exemplifica um conjunto de dados não lineares e, conseqüentemente, linearmente não separáveis.

Segundo Vilasboas e Torres (2020), essa transformação mapeia o espaço original das observações para um novo espaço de atributos m - dimensional. Nesse novo espaço as observações passam a ser linearmente separáveis. E com a função de transformação, nosso problema de otimização recai para um SVM linear.

Transformação:

$$x \rightarrow \varphi(x)$$

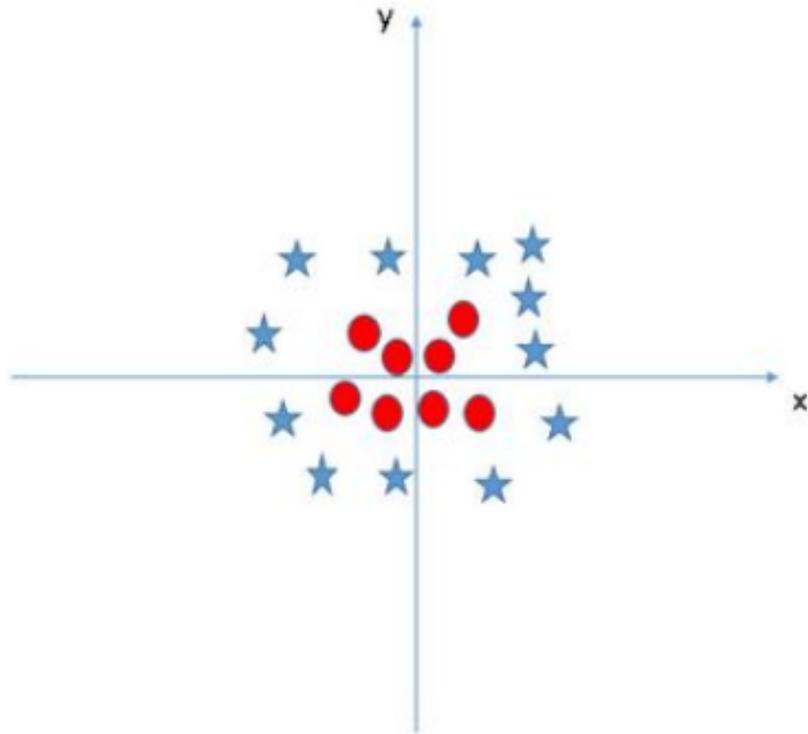
$$\varphi(x) = [\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)] \quad (2.12)$$

O algoritmo linear depende somente de (x, x_i) , portanto o algoritmo transformado também dependerá somente de $[\varphi(x), \varphi(x_i)]$. Esse produto escalar entre os vetores transformados é chamado de função Kernel. Ela nos permite operar no espaço original, sem precisar computar as coordenadas dos dados em um espaço dimensional superior, como ilustra a Figura 20 (VILASBOAS; TORRES, 2020).

Transformação de K:

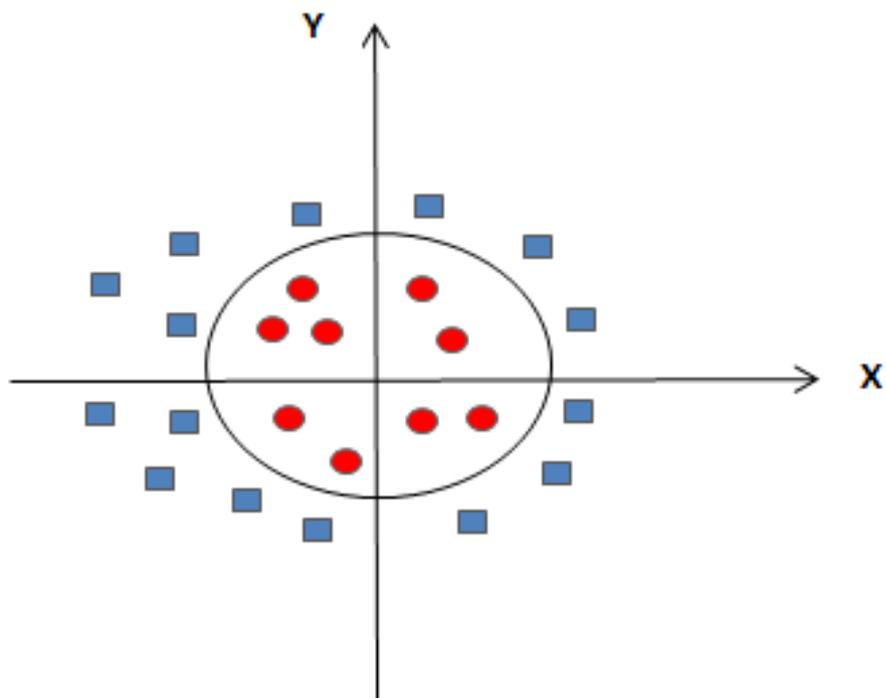
$$K(x, x_i) = \langle \varphi(x), \varphi(x_i) \rangle \quad (2.13)$$

Figura 18 – Dados linearmente não separáveis.



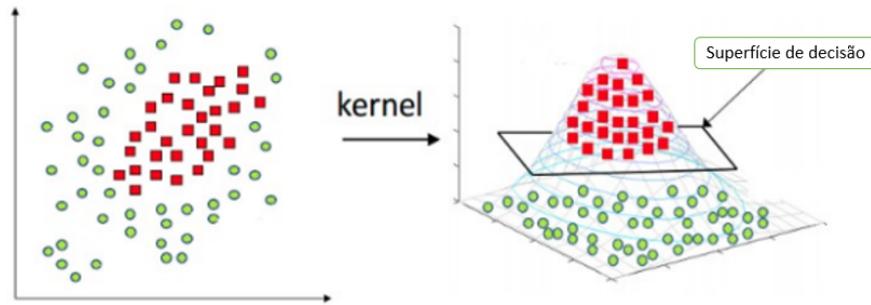
Fonte: Addan (2019)

Figura 19 – Hiperplano circular dividindo dados linearmente não separáveis.



Fonte: Rushikesh (2018)

Figura 20 – Utilização da função de Kernel para dados linearmente não separáveis.



Fonte: Adaptado de Bauchspiess (2021)

2.5.2 Detecção dos Distúrbios Elétrico na Rede Distribuição

A detecção de distúrbios de qualidade da energia elétrica é uma tarefa muito importante para a proteção do sistema elétrico e manutenção do suprimento de energia. Recursos como *Root Mean Square (RMS)*, Transformada de Fourier (TF), Transformada Wavelet (TW) e outros, são utilizados para extrair características de cada tipo de sinal. A detecção de distúrbios, em geral, compreende basicamente a extração de parâmetros e a aplicação de um algoritmo que realize a detecção baseada nos parâmetros extraídos. A extração de parâmetros consiste em uma transformação dos dados para um novo espaço onde as características dos distúrbios são destacadas em relação aos sinais sem distúrbios (FERREIRA, 2010).

2.5.2.1 Detecção Baseada no Valor RMS

A utilização do valor RMS como parâmetro na detecção de distúrbios foi inicialmente visto no trabalho de Gu *et al.* (2004), onde utilizou-se o valor RMS de amostra por amostra considerando-se janelas de meio ciclo do sinal de tensão. Ele é uma das técnicas mais utilizadas para a detecção dos distúrbios da energia elétrica. O valor RMS ou valor eficaz é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade de variável. O nome deriva no fato de que é pego a raiz (*root*) quadrada da média (*mean*) do valor quadrado (*square*) da função. Ele pode ser determinado para variável de dados discretos assim como para variável contínua (RODRIGUES, 2008; CESÁRIO *et al.*, 2011).

Valor RMS de um sinal contínuo

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt} \quad (2.14)$$

Valor RMS de um sinal discreto

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N \bar{s}^2(t)} \quad (2.15)$$

O cálculo do valor r.m.s. é muito simples e garante alta velocidade de processamento e requisitos mínimos de memória do sistema. A limitação desta técnica está na precisão do valor RMS estimado, pois depende do comprimento da janela. Ao analisar sinais suaves, uma janela com a duração de um período do componente fundamental fornece resultados mais precisos do que a outra com duração de apenas meio período. O uso de um comprimento de janela maior leva a uma diminuição temporária na resolução do valor estimado. Deve-se notar também que esta técnica não distingue a fundamental das harmônicas ou componentes de ruído presentes no sistema em análise e, portanto, a precisão da estimativa do valor da amplitude do sinal dependerá diretamente da presença de harmônicas e ruído no sinal (CESÁRIO *et al.*, 2011).

2.5.2.2 Detecção Baseada na Transformada de Fourier

A aquisição do sinal geralmente é feita no domínio do tempo, ou seja, medições normais são feitas em um determinado evento com uma determinada frequência. Entender um sinal com uma dada amplitude e em função do tempo é uma forma muito intuitiva de representá-lo, mas dependendo do tipo de informação que se espera extrair, pode não ser a melhor forma de analisá-lo (MONTEIRO, 2018). As séries de Fourier são utilizadas para transformar para o domínio da frequência um sinal representado originalmente no domínio do tempo. Essa mudança de domínio pode trazer grande vantagem para análise, principalmente quando certas características do sinal não forem observáveis no domínio original (ZANINOTTO; SOARES, 2019).

Série de Fourier de um sinal periódico $f(t)$

$$f(t) = C_o + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (2.16)$$

Sendo os coeficientes de Fourier obtidos pelas expressões abaixo:

$$C_o = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.17)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \omega_n t dt \quad (2.18)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \operatorname{sen} \omega_n t dt \quad (2.19)$$

Como informações valiosas podem estar escondidas no domínio da frequência do sinal, uma das técnicas populares e valiosas aplicadas em diferentes ciências é a Transformada de Fourier (FT). A transformada de Fourier é basicamente uma ferramenta matemática que permite decompor um sinal no domínio do tempo em uma série de senos e cossenos, e através deste processo retornar todas as componentes de frequência existentes em um sinal, obedecendo ao teorema de amostragem (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011).

Transformada de Fourier no domínio de tempo

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.20)$$

A análise de sinal com transformada de Fourier é basicamente limitada a sinais estáticos. Qualquer sinal nos tempos $-\infty < t < \infty$ é levado em consideração, o que significa que, embora seja eficaz na determinação do conteúdo de frequências em um sinal, não é muito eficaz na determinação da posição dentro do intervalo de tempo em que ocorrem. Uma forma encontrada para contornar este inconveniente é o uso da Transformada de Fourier de Curta Duração, ou em inglês Short Time Fourier Transform (STFT). Também conhecida como Transformada de Fourier Janelada, consiste em mover uma janela de tempo pequeno sobre o sinal temporal e obter o espectro de Fourier em função do deslocamento no tempo. A ideia é isolar o sinal nas vizinhanças do instante t , então aplicar a Transformada de Fourier afim de estimar o conteúdo local de frequência neste instante. O comprimento ideal da janela temporal é correspondente a duração de um pulso do sinal. Ao contrário da Transformada de Fourier (FT), a STFT é uma função tridimensional, com seu uso é possível obter uma determinada resolução de tempo e frequência ao mesmo tempo, isso está relacionado ao tamanho da janela utilizada para analisar o sinal, seja ele estacionário ou não. No entanto, a resolução é apenas a resolução de intervalos de tempo e frequência uniformemente espaçados, como se pode ver na Figura 21. A questão aqui é que a seleção da janela não é arbitrária, ela deve corresponder ao sinal que está sendo usado e fornecer igual frequência e resolução de tempo. Porque uma STFT com uma janela infinita simplesmente se reduzirá a uma FT (MONTEIRO, 2018).

Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT)

$$f(\omega, t) \int_{-\infty}^{\infty} f(s) g(s-t) e^{-j\omega s} ds \quad (2.21)$$

Figura 21 – Transformação de um sinal através da técnica STFT.



Fonte: Freire e Santos (2012)

2.5.2.3 Detecção Baseada na Transformada Wavelet

A transformada wavelet é uma ferramenta matemática para analisar sinais no domínio do tempo e da frequência, a partir de uma função base, conhecida como wavelet mãe, gerando novas funções em diferentes escalas. A wavelet também conhecida como wavelet mãe $\phi(t)$ e a função de escala $\theta(t)$ são as componentes bases dessa transformada (MONTEIRO *et al.*, 2019). A Transformada Wavelet (TW) ou *Wavelet Transform* (em inglês) oferece vantagens consideráveis no processamento de sinais em comparação com a transformada de Fourier (FT). Uma delas diz respeito ao tratamento diferenciado dispensado por esta ferramenta a diferentes componentes de frequência existentes no sinal. Um dos principais motivos para a WT ser tecnicamente superior na análise de sinais, em alguns casos, está no fato de que a função base ψ não ser uma função estática, podendo ser escolhida a cores e gostos, mas para isso, ela deve obedecer algumas condições necessárias (MONTEIRO, 2018).

Transformada Wavelet Contínuo (CTW)

$$W_{\psi,x}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.22)$$

Onde:

$x(t)$ ==> sinal a ser decomposto;

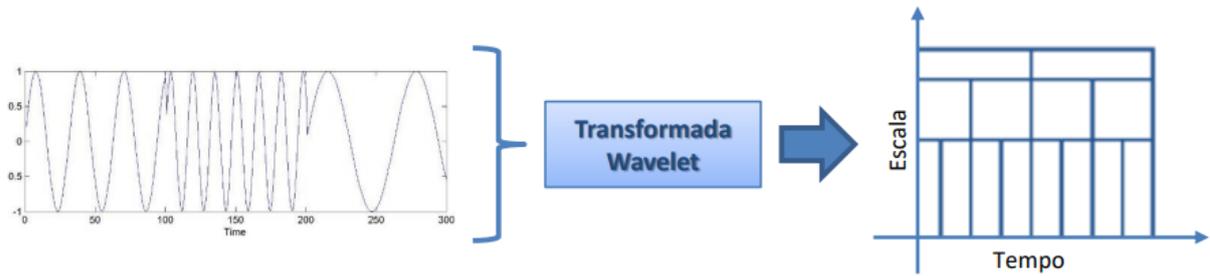
$\psi(t)$ ==> função base com duração limitada no tempo (Wavelet mãe);

a ==> parâmetro de escala (contração/dilatação);

b ==> parâmetro de deslocamento.

A Transformada Wavelet Discreta (TWD) mapeia um sinal discreto unidimensional (tempo) em uma representação bidimensional (tempo e escala) em diferentes escalas com

Figura 22 – Decomposição do sinal no domínio Wavelet.



Fonte: OLIVEIRA e VIEIRA (2019)

diferentes níveis de resolução.

Transformada Wavelet Discreta (TWD)

$$W(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a_o^m}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - n\tau_o a_o^m}{a_o^m}\right) \quad (2.23)$$

Os parâmetros a e τ são funções do parâmetro inteiro m . O k é uma variável inteira que se refere a uma dada amostra no sinal de entrada. A diferença fundamental entre a FT e a WT é a dimensão da análise. Agora, a função base utilizada possui os parâmetros escala (frequência) e translação (tempo ou espaço), diferentemente da FT que possuía apenas frequência (MONTEIRO, 2018).

3 METODOLOGIA

Este trabalho parte de uma revisão bibliográfica. Conforme os autores Barros e Lehfeld (2007), Koche (2011), ela se efetua tentando-se resolver um problema ou adquirir conhecimentos a partir do emprego predominante de informações advindas de livros ou obras congêneres.

Para Martins e Pinto (2001), a revisão bibliográfica procura explicar e discutir um tema com base em referências teóricas publicadas em livros, revistas, periódicos e outros. Também, busca conhecer e analisar conteúdos científicos sobre determinado tema. Silva e Trentini (2002) completam afirmando que a revisão bibliográfica não é imparcial porque permite o relato de outros trabalhos a partir da compreensão do pesquisador sobre como os outros fizeram. No presente trabalho adotou como estratégia metodológica a revisão bibliográfica, onde optou-se por utilizar a revisão narrativa, que é um dos tipos de revisão de literatura, mas também pela possibilidade de acesso à experiências de autores que já pesquisaram sobre o assunto.

Na elaboração deste trabalho foi realizado uma revisão narrativa da literatura nacional e internacional sobre o tema proposto (aplicação de redes elétricas inteligentes na melhoria da qualidade de energia elétrica), visto que esta revisão possibilita dessa forma fazer um resumo das pesquisas já concluídas e obter conclusões a partir do tema de interesse.

3.1 Levantamento de Informações

Para a confecção deste trabalho foi utilizado livros eletrônicos e físicos (nacional e internacional), artigos científicos nacional e internacional, dissertações e teses. Essas contribuições foram pesquisadas no google acadêmico, no scielo, no *science direct*, no *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI), no *Smart Energy International* (SEI), por fim, em sites de órgãos governamentais brasileiro e em outros sites.

A seleção dos materiais de apoio foi realizada a partir de leitura minuciosa dos artigos, teses, Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs), dissertações e livros encontradas nas plataforma digitais e na biblioteca, sendo selecionada apenas os trabalhos que abordam assunto relacionado com o tema proposto par o estudo.

3.2 Análise das Informações Levantadas

Após a coleta dos dados, foi feita a leitura de todo material e as principais informações foram compiladas. Em seguida, realizou-se fichamentos e análise das informações levantadas, procurando a compreensão e a expansão do conhecimento sobre o tema pesquisado com o intuito de elaborar o referencial teórico e o desenvolvimento completo do trabalho.

4 APLICAÇÃO DAS *SMART GRIDS* PARA SOLUCIONAR OS DISTÚRBIOS ELÉTRICOS

Nesse capítulo é apresentada algumas discussões relacionados a qualidade de energias, ou seja, são ilustrados fatores que se solucionados elevariam os indicadores da qualidade de energia. O sistema de autorrecuperação ajuda na redução do tempo de resposta às interrupções no fornecimento, e a medição inteligente ajuda o consumidor final no gerenciamento do consumo de energia, fornecendo para este informações acerca do seu consumo em tempo real. Por fim, tem-se a internet da energia, que pode ser entendida com a união das *Smart Grids* com a Internet das Coisas. Este conecta as partes envolvidas no sistema elétrico permitindo o fluxo de informações e de energia elétrica.

4.1 Melhoria da Qualidade de Energia

Smart Grid é um conceito que visa otimizar o sistema elétrico como um todo, em especial, o sistema de distribuição, utilizando tecnologias avançadas, de controle, de telecomunicação, de armazenamento, de automação, de monitoramento e entre outros sistemas para aproveitar os recursos elétricos de forma mais eficiente possível. Os problemas de distúrbios que estão sendo solucionados pela aplicação das *Smart Grid* nas últimas décadas não são novos, estes ocorriam nos sistemas elétricos tradicionais. Algumas técnicas para as soluções apresentadas neste trabalho vão seguir mais ou menos os mesmos procedimentos que o sistema tradicional. Então, onde entraria as *Smart Grids*?

A *Smart Grid* entra justamente no sentido de acelerar os procedimentos para o solucionamento desses inconvenientes. Devido à velocidade com que ocorrem os eventos em um sistema elétrico o monitoramento das variáveis gera informação que além de volumosa deve ser transmitida para permitir uma atuação eficaz sobre o sistema (ALVES, 2020). Quanto mais rápido for essa atuação, maior será a elevação dos indicadores coletivos (DEC e FEC), que indicam a qualidade na continuidade de fornecimento de energia, sem esquecer os indicadores de continuidade individuais (DIC, FIC e DMIC), onde os dois primeiros informam, respectivamente, o intervalo de tempo de interrupção de cada consumidor e o número de interrupções, enquanto que o terceiro mostra quanto tempo durou a maior interrupção. Já os indicadores de qualidade de tensão fornecida (DRP e DRC), trata-se da avaliação da conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão.

Com a aplicação das técnicas de detecção, classificação e comunicação bilateral, estes

quatro indicadores seriam melhoradas e, conseqüentemente, a qualidade do produto (energia) também.

4.2 Autorrecuperação (*Self Healing*)

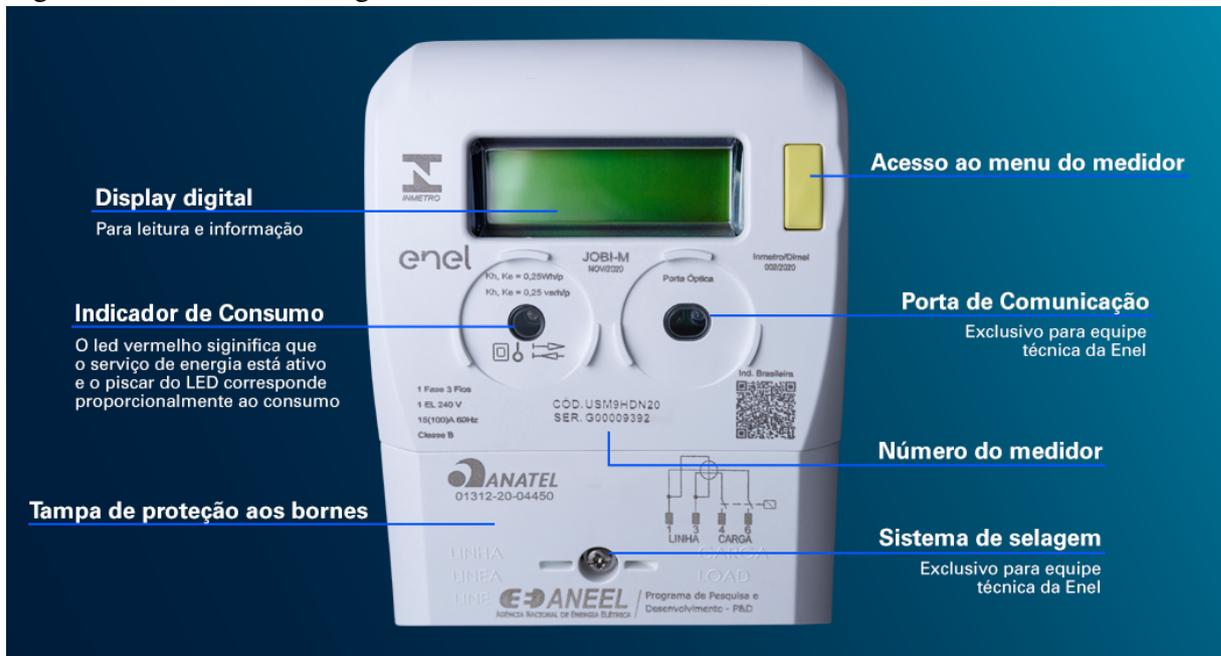
Até recentemente, as concessionárias de energia elétrica dependiam fortemente dos clientes para notificações (reclamações) de interrupção no fornecimento de energia. No entanto, usando soluções de rede inteligente e recursos de autorrecuperação, as concessionárias podem monitorar remotamente os equipamentos de energia para: a identificação rápida das falhas e encurtar a frequência e a duração das interrupções. É um avanço crítico, pois mesmo pequenas interrupções podem incomodar os clientes e causar perdas financeiras e de produtividade (MARTINS, 2018). Entretanto, como a rede seria controlada por uma coleção de computadores em comunicação, as ações corretivas seriam feitas em minutos ou até mesmo em segundos. Visto que o uso de computadores para enviar ações corretivas e disjuntores abertos permite danos mínimos causados por picos de energia. Um problema que isso causa, no entanto, é que a energia é cortada nas áreas onde os disjuntores forem acionados. Entende-se, então, que isso se resolve quando a geração é aumentada automaticamente em um segundo local para suprir o aumento da demanda nas áreas afetadas (ARMANIOUS, 2020).

Uma das principais características de uma rede inteligente é sua capacidade de autocura. Os recursos de autocorreção minimizam os apagões porque permitem autoavaliações contínuas que inspecionam, analisam, reagem e respondem automaticamente a problemas. Isso é possível por meio da ampla implantação de sensores e outros dispositivos inteligentes e controles automatizados que verificam e avaliam os status e a condição da rede para identificar anormalidades e problemas. Usando essas informações, a rede pode isolar com agilidade e precisão as falhas de rede e reagir para proteger a infraestrutura de energia. Essa automação inteligente permite monitoramento e tomada de decisões mais eficazes sem intervenção humana. O resultado geral é uma rede mais confiável que maximiza o tempo de atividade e aumenta a eficiência e a segurança de seus sistemas. A tecnologia também mudou a forma como as concessionárias podem responder a uma interrupção, isto é, há menos dificuldades para determinar onde, quando e porquê o problema (MARTINS, 2018).

4.3 Medidor Inteligente (*Smart Meter*)

Para que haja uma conexão entre o usuário da rede (consumidores finais) e o fornecedor dos serviços (concessionárias), é necessário implementar uma arquitetura computacional, chamada de Infraestrutura Avançada de Medição (AMI), de forma a criar uma comunicação automática e bidirecional entre o consumidor e a concessionária dos serviços através do uso de medidores inteligentes. Os medidores inteligentes são dispositivos utilizados para medir o consumo de energia elétrica regularmente. O que difere estes equipamentos de medidores mais simples é o fato de que os medidores inteligentes permitem o fluxo bidirecional de energia, além de coletar uma quantidade de informações sobre o consumo muito maior em relação aos medidores comuns. Dessa forma, pode ser feita uma monitoração e tarifação mais detalhada da energia, e a integração da rede elétrica como um todo é facilitada pelo grande fluxo de informações. Na Figura 23 pode-se ver um dos modelos do medidor inteligente, com ilustrações das suas funcionalidades.

Figura 23 – Medidor inteligente.



Fonte:Enel (2021)

A disponibilidade de comunicação bidirecional entre as concessionárias e os consumidores permite a inserção de um sistema de precificação dinâmica. Isto é, nesse tipo de sistema, o preço da energia elétrica varia ao longo do dia como forma de incentivar políticas de melhoria do perfil da demanda e, conseqüentemente, redução do custo total de expansão e operação do

sistema elétrico (CAVALHEIRO, 2018).

4.4 Internet da Energia (*internet of energy*)

A Internet da Energia (IoE) está revolucionando a energia do mercado de muitas maneiras, desenvolvendo uma auto-gestão inteligente de infraestrutura para serviços públicos de energia que podem minimizar resíduos. Integrando para esse efeito sensores, Internet, redes inteligentes, energias renováveis, AMI e tecnologias automatizadas. A IoE trouxe uma revolução na produção, transmissão e distribuição de eletricidade (MIGLANI *et al.*, 2020). Existem grandes desafios associados à adoção em larga escala de sistemas de energia renovável, que normalmente exigem um controle complexo de fontes de energia e armazenamentos diversificados e distribuídos para satisfazer a procura. O conceito de rede inteligente como uma infraestrutura inteligente de distribuição de eletricidade que depende fortemente de redes de comunicação de alta velocidade confiáveis para monitoramento e controle, a Internet da Energia pode ser vistas como uma extensão deste conceito. O termo foi criado por Jeremy Rifkin no seu livro *Third Industrial Revolution* em 2008, e refere-se a uma solução da Internet para a eletricidade baseada em informação bidirecional e fluxo de potência (KAFLE *et al.*, 2016).

Figura 24 – Conexão das partes envolvidas no processo de fornecimento de Energia.



Fonte: Adaptado de Kafle *et al.* (2016)

Como descrita na Figura 24, a *internet of energy* (IoE) combina as características da rede inteligente e *Internet das coisas* (IoT). A IoT refere-se à arquitetura baseada na Internet que facilita o intercâmbio de serviços e dados entre os bilhões de objetos inteligentes. Ela pode ser amplamente utilizado em diferentes setores, na rede inteligente de monitoramento, na distribuição de energia, nos serviços telemétricos, etc. A IoE pode fornecer uma comunicação

em dois sentidos entre o sistema de gestão e monitoramento de energia e o controle de unidades geradoras de energia. Portanto, a IoE tem sido cada vez mais utilizados em edifícios, veículos elétricos (EVs), fontes de energia distribuídas, setores doméstico e industrial. A Internet de Energia pode ser utilizada ainda para monitorar e controlar redes de energia. Semelhante ao encaminhamento de informações sobre a Internet, a energia é transferida de uma fonte para uma carga quando é necessário (HANNAN *et al.*, 2018). Ao conectar cada medidor inteligente, cada painel solar, cada veículo elétrico e todos os outros ativos relacionados à energia, uma rede inteligente através da IoE pode analisar inúmeros pontos de contatos e seus dados gerados para ajudar a gerenciar o fluxo de energia disponível e necessário no momento certo e nos lugares certos, para finalmente tornar a rede eficiente e ininterrupta, e ainda por cima elevar a qualidade de energia fornecida.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento de uma sociedade. Devido a sua importância, o sistema elétrico requer investimentos frequentes para garantir padrões mínimos de fornecimento deste serviço para os usuários finais. E mesmo com os esses investimentos o sistema de fornecimento de energia tradicional (envelhecida) não consegue entregar um serviço de qualidade aos consumidores, visto que o próprio sistema sofre com o aumento da demanda, os distúrbios elétricos e desastres naturais. Com o objetivo de elevar o nível da qualidade no fornecimento de energia de forma intermitente e confiável, surgiu o conceito de *Smart Grids*. Eles têm como finalidade, tornar o sistema elétrico mais dinâmico, seguro e de fornecimento de energia confiável, motivo pelo qual governos de vários países e algumas empresas privadas estão investindo na *Smart Grids*.

Países como Estados Unidos, China, alguns países da União Europeia, África do Sul, alguns países de América do Sul, já desenvolveram ou estão desenvolvendo projetos pilotos, isto é, projetos experimentais para observar o comportamento das *Smart Grids* junto as redes tradicionais de energia. Também, estão sendo criado algumas leis para regulamentar esse novo conceito de rede que promete revolucionar o jeito de fornecimento da energia. Essa revolução será percebida através de evolução no sistema de comunicação que passará de uma comunicação unidirecional para bidirecional, sairá de um sistema puramente mecânico para um sistema automático (*self healing*) e os consumidores poderão acompanhar em tempo real o seu consumo de energia, não esperando até o final do mês para receber o boleto através da leitura que se faz nos medidores mecânicos.

Nesse processo de elevação do nível de qualidade de energia através dos indicadores coletivos e individuais aplicando redes elétricas inteligentes é que entra o aprendizado de máquina, visto que toda essa inteligência que o *Smart Grid* dará ao sistema elétrico partirá de aprendizado de máquina (*machine learning*). A inteligência do sistema mencionada seria a união de técnicas de detecção e classificação de sinais, que é uma combinação de artifícios matemáticos e algoritmos computacionais para treinar a máquina para que este consegue resolver os problemas sozinho.

Na elaboração do presente trabalho, foram identificadas várias possibilidades de desenvolvimento de novos projetos:

1. Avaliação quantitativa dos custos computacionais das diferentes técnicas de detecção dos distúrbios elétricos para melhorar a qualidade de energia;

2. Impacto das *Smart Grids* na descarbonização no sistema de geração de energia;
3. Aplicação das redes elétricas inteligentes na análise das perdas elétricas no sistema de distribuição em cenários com a presença das fontes renováveis;
4. Comparação das técnicas de classificação dos distúrbios elétricos.

REFERÊNCIAS

- ABI-ACKEL, P. **PROJETO DE LEI Nº 2932 , DE 2015**. 2015. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1383255>. Acesso em: 29 maio 2022.
- ABRADEE. **A distribuição de energia**. 2021. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- ADDAN, D. **Support Vector Machine**. 2019. Disponível em: <<https://www.inf.ufpr.br/dagoncalves/IA07.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- ALVES, B. **Redes inteligentes nos EUA - estatísticas e fatos**. 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/topics/1125/smart-grids/#topicHeader__wrapper>. Acesso em: 28 abr. 2022.
- ALVES, J. d. S. **Compressão de sinais para smart grid**. 2020.
- ANEEL. **Resolução normativa nº 414:condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada**. 2010. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=112868>>. Acesso em: 14 maio 2022.
- ANEEL. **PRODIST MÓDULO 8 – QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2018. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf>. Acesso em: 31 maio 2022.
- ANJOS, L. M. dos. **AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO ATENDIMENTO ÀS CARGAS CRÍTICAS DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES**. 2020.
- ARMANIOUS, M. **The Self-Healing Grid**. 2020. Disponível em: <<http://environment.umn.edu/education/susteducation/pathways-to-renewable-energy/the-self-healing-grid/>>. Acesso em: 30 jun. 2022.
- ASIRI, S. **Classificadores de aprendizado de máquina**. 2018. Disponível em: <<https://towardsdatascience.com/machine-learning-classifiers-a5cc4e1b0623>>. Acesso em: 17 jun. 2022.
- BAMBRICK, N. **Support Vector Machines: A Simple Explanation**. 2016. Disponível em: <<https://www.kdnuggets.com/2016/07/support-vector-machines-simple-explanation.html>>. Acesso em: 21 jun. 2022.
- BARROS, A. J. d. S.; LEHFELD, N. A. d. S. **Fundamentos de metodologia científica**. 3ª edição. 2007.
- BARROS, M. E. **Redes Eltricas Inteligentes (Smart Grid): Eficácia no Consumo de Energia**. 2018.
- BAUCHSPIESS, A. **SVM – Support Vector Machine**. 2021. Disponível em: <<http://www.ene.unb.br/adolfo/Lectures/IC/SVM.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2022.
- BECKER, L. **Algoritmo de Classificação Naive Bayes**. 2019. Disponível em: <<https://www.organicadigital.com/blog/algoritmo-de-classificacao-naive-bayes/>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

BRAGA, S. E. **PROJETO DE LEI DO SENADO Nº 356, DE 2017**. 2017. Disponível em: <<https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=7204552&ts=1630421290353&disposition=inline>>. Acesso em: 28 maio 2022.

BRASIL. **LEI Nº 13.853, DE 8 DE JULHO DE 2019**. 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Lei/L13853.htm#art1>. Acesso em: 29 maio 2022.

BRASIL. **Projeto estabelece regras para qualidade da tensão fornecida a usuários de energia elétrica** Fonte: **Agência Câmara de Notícias**. 2022. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/846407-projeto-estabelece-regras-para-qualidade-da-tensao-fornecida-a-usuarios-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

CARVALHO, E. L. N.; SILVEIRA, P. M.; PASSOS, F. O.; FILHO, J. M. D. C.; CLÉ, T.; MARIANO, I. C.; COSTA, M. V.; CARNEIRO, J. R.; PEREIRA, N.; FILHO, J. M. **GERENCIAMENTO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**. 2019.

CASALI, R. **Arvore de decisio: como se aplica no aprendizado de mquina**. 2021. Disponível em: <<https://www.digitalhouse.com/br/blog/arvore-de-decisao/>>. Acesso em: 21 jun. 2022.

CAVALHEIRO, R. D. S. **SISTEMA DE INFORMAO INTEGRADO A SMART METER CONSTRUÍDO COM ARDUINO**. 2018. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/1339/1/TCC_SistemaInformacaoIntegrado.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CERVANTES, J.; GARCIA-LAMONT, F.; RODRÍGUEZ-MAZAHUA, L.; LOPEZ, A. **A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends**. [S.l.]: Elsevier, 2020. 189–215 p.

CESÁRIO, F. R. *et al.* **Comparação de métodos de detecção de distúrbios de qualidade da energia elétrica**. [S.l.]: Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

CGEE. **Contexto nacional**. 2012. 172 p.

CHAUHAN, N. S. **Decision Tree Algorithm, Explained**. 2022. Disponível em: <<https://www.kdnuggets.com/2020/01/decision-tree-algorithm-explained.html>>. Acesso em: 18 jun. 2022.

CHEN, J. **Neural Network**. 2021. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/n/neuralnetwork.asp>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

COUTINHO, B. **Modelos de Predição | SVM**. 2019. Disponível em: <<https://medium.com/turing-talks/turing-talks-12-classifica%C3%A7%C3%A3o-por-svm-f4598094a3f1>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. 2017.

EFING, A. C.; RABELO, C. A. **Consumo consciente e a instalação de redes elétricas inteligentes para um desenvolvimento sustentável**. 2020. 27–44 p.

ENEL. **Detalhe de Medidor Inteligente**. 2021. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Redes-do-Futuro/sp-do-futuro/Medidor-Inteligente/detalhes-do-medidor-inteligente.html>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

FERNANDES, R. M. **UMA NOVA TÉCNICA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/bitstream/riu/2161/1/Rafael%20Meister%20Fernandes-2017.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2022.

FERREIRA, D. D. **Análise de distúrbios elétricos em sistemas de potência**. 2010.

FERREIRA, R.; BARROSO, L. A. **Smart Grids in Latin America: Current Stance of Development and Future Perspectives**. 2016. Disponível em: <<https://smartgrid.ieee.org/bulletins/november-2016/smart-grids-in-latin-america-current-stance-of-development-and-future-perspectives>>. Acesso em: 21 maio 2022.

FOLLY, K. **Challenges in Implementing Smart Grid Technologies in Africa**. 2013. Disponível em: <https://www.smart-energy.com/wp-content/uploads/i/p/Komla-Folly_SmartGrid.pdf>. Acesso em: 24 maio 2022.

FORTES, M. Z.; LIMA, G. R.; BRAGA, R. C.; CARDOSO, R. S.; HENRIQUES, H. O.; ZAPAROLI, G. **PROCEDIMENTO PARA MELHORIA DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NA DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DA IDENTIFICAÇÃO E CORREÇÃO DE VTCD**. 2021. 81–97 p.

FRANKS, L.; GRONLUND, C.; BACCAM, N.; MARTENS J. **Evitar dados de sobreajuste e desequilibrados com o machine learning automatizado**. 2022. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/pt-br/azure/machine-learning/concept-manage-ml-pitfalls>>. Acesso em: 21 jun. 2022.

FREIRE, P.; SANTOS, C. **Análise pluviométrica das capitais nordestinas**. 2012.

FURTADO, B. d. C. **Análise da qualidade da energia elétrica no IFG campus Goiânia a partir da implementação de projeto de eficiência energética com adição de sistema fotovoltaico**. [S.l.]: Insitituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.

GCV. **Árvores de Deciso Sistemas Inteligentes**. 2010. Disponível em: <<https://www.cin.ufpe.br/~if684/EC/aulas/Aula-arvores-decisao-SI.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2022.

GONÇALVES, L. P. T. **Algoritmo K-Nearest Neighbors: Usando Loops para o valor de K-vizinhos**. 2020. Disponível em: <<https://luzpaulotavaresgonalves.medium.com/algoritmo-k-nearest-neighbors-usando-loops-para-o-valor-de-k-vizinhos-2b5dd0937de9>>. Acesso em: 28 jun. 2022.

GU, I. Y.; ERNBERG, N.; STYVAKTAKIS, E.; BOLLEN, M. H. **A statistical-based sequential method for fast online detection of fault-induced voltage dips**. [S.l.]: IEEE, 2004. 497–504 p.

HANNAN, M. A.; FAISAL, M.; KER, P. J.; MUN, L. H.; PARVIN, K.; MAHLIA, T. M. I.; BLAABJERG, F. **A review of internet of energy based building energy management systems: Issues and recommendations**. [S.l.]: IEEE, 2018. 38997–39014 p.

HARAN, J. M.; GAVA, M. G. **China amplia presena no mercado de energia eltrica da Amrica Latina**. 2020. Disponível em: <<https://dialogochino.net/pt-br/mudanca-climatica-e-energia-pt-br/36744-china-amplia-presenca-no-mercado-de-energia-eletrica-da-america-latina/>>. Acesso em: 23 maio 2022.

HARDESTY, L. **Explained: Neural networks**. 2017. Disponível em: <<https://news.mit.edu/2017/explained-neural-networks-deep-learning-0414>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

IBM. **Neural Networks**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibm.com/cloud/learn/neural-networks>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

IEA. **Smart Grids , IEA, Paris**. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/smart-grids>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

IVAN. **THOMAS EDISON - EMPRESÁRIO E SUAS INVENÇÕES**. 2021. Disponível em: <<https://www.recantodasletras.com.br/biografias/7264297>>. Acesso em: 14 maio 2022.

JOSE, I. **KNN (K-Nearest Neighbors)**. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/brasil-ai/knn-k-nearest-neighbors-1-e140c82e9c4e>>. Acesso em: 28 jun. 2022.

KAFLE, Y.; MAHMUD, K.; MORSALIN, S.; TOWN, G. **Towards an internet of energy**. 2016. 1–6 p.

KOCHE, J. C. **Fundamentos de Metodologia científica**. 2011. Disponível em: <http://www.adm.ufrpe.br/sites/ww4.deinfo.ufrpe.br/files/Fundamentos_de_Metodologia_Cienti\%CC%\%81fica.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2022.

KOOP, F. **Smart grids: the next step for energy in Latin America**. 2022. Disponível em: <<https://dialogochino.net/en/climate-energy/52564-smart-grids-the-next-step-for-energy-in-latin-america/>>. Acesso em: 21 maio 2022.

LENZ, G. **Uma introdução Didática aos Algoritmos de Classificação de Machine Learning**. 2017. Disponível em: <<https://medium.com/drafter-ai/uma-introdu\%C3\%A7\%C3\%A3o-did\%C3\%A1tica-aos-algoritmos-de-classifica\%C3\%A7\%C3\%A3o-de-machine-learning-460be2d73395>>. Acesso em: 18 jun. 2022.

LIMA, E. **5 principais e mais comuns distúrbios elétricos!** 2017. Disponível em: <<https://blog.se.com/br/gestao-de-energia/2017/04/07/principais-disturbios-eletrico/>>. Acesso em: 09 jun. 2022.

LOGMASTER. **6 distúrbios de energia elétrica que você precisa conhecer**. 2020. Disponível em: <<https://www.logmaster.com.br/6-disturbios-de-energia-eletrica-que-voce-precisa-conhecer>>. Acesso em: 06 jul. 2022.

LOPES, J. A. **Algoritmos clássicos em IA- Árvore de decisão, Naive Bayes e Support vector machines**. 2018. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/JosAhirtonBatistaLop/jos-ahirton-lopes-treinamento-rvores-de-deciso-svm-e-naive-bayes>>. Acesso em: 09 jun. 2022.

LOPEZ, R. A. **Qualidade na Energia Elétrica: efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções**. [S.l.: s.n.], 2013.

MACHADO, I. F.; DRIEMEIE, L. **MACHINE LEARNING: AN INTRODUCTION**. 2020. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5728638/mod_resource/content/1/Aula01_Introd_ML.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022.

- MACHADO, M. F. *et al.* **Medidas de proteção de dados pessoais no planejamento e operação de smart grid utilizando computação em nuvem: estudo no contexto da Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD) do Brasil.** 2019.
- MARQUES, C. A. G. **Técnica de Detecção de Distúrbios para Monitoramento da Qualidade da Energia.** 2007.
- MARTINHO, E. **Distúrbios da energia elétrica.** [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2009.
- MARTINS, G. d. A.; PINTO, R. L. **Manual para elaboração de trabalhos acadêmicos.** 2001.
- MARTINS, J. C. **Self-healing capabilities of smart grid solutions minimize blackouts.** 2018. Disponível em: <<https://blog.se.com/smart-grid/2018/08/03/self-healing-capabilities-of-smart-grid-solutions-minimize-blackouts/>>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- MATHEUS, V. **3 tipos de aprendizado de máquina que você precisa conhecer!** 2021. Disponível em: <<https://predize.com/blog/tipos-de-aprendizado-de-maquina/>>. Acesso em: 17 jun. 2022.
- MATTEDE, H. **O que são linhas de transmissão? Características e Curiosidades!** 2022. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-linhas-de-transmissao-caracteristicas-curiosidades/>>. Acesso em: 31 maio 2022.
- MIGLANI, A.; KUMAR, N.; CHAMOLA, V.; ZEDADALLY, S. **Blockchain for Internet of Energy management: Review, solutions, and challenges.** [S.l.]: Elsevier, 2020. 395–418 p.
- MME. **Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes Ministério de Minas e Energia.** 2016. Disponível em: <<https://url.gratis/ct4JtZ>>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- MME. **RELATÓRIO SMART GRID.pdf.** 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/relatorio-smart-grid-1/documentos/relatorio-smart-grid.pdf/view>>. Acesso em: 28 mai. 2022.
- MONTEIRO, A. T.; MOREIRA, Y. B.; ARAÚJO, M. d. M.; LEMOS, F. V.; LOPES, P. R.; ALMEIDA, A. R. **Contribuição para a Identificação de Distúrbios de Qualidade de Energia com uso da Transformada Wavelet.** 2019.
- MONTEIRO, D. d. A. **Detecção e caracterização de distúrbios em redes elétricas.** 2018.
- MORI, R. L. **AS POLÍTICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES: OS CASOS DOS ESTADOS UNIDOS, DE PAÍSES EUROPEUS E DA CHINA.** 2021. 17–28 p.
- NAVLANI, A. **KNN Classification Tutorial using Scikit-learn.** 2018. Disponível em: <<https://www.datacamp.com/tutorial/k-nearest-neighbor-classification-scikit-learn#how-does-the-knn-algorithm-work?>> Acesso em: 28 jun. 2022.
- NEVES, L. C.; BAGAROLLI, A. **Os desafios da implementação dos projetos-piloto de smart grid no Brasil.** 2013. 15–22 p.

NHEDE, N. **430 million AMI meters to be deployed across 50 emerging markets by 2024**. 2020a. Disponível em: <<https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-grid/430-million-ami-meters-to-be-deployed-across-50-emerging-markets-by-2024/>>. Acesso em: 21 maio 2022.

NHEDE, N. **Smart grid infrastructure investments in South America to hit \$18.1 billion**. 2020b. Disponível em: <<https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-grid/smart-grid-infrastructure-investments-in-south-america-to-hit-18-1-billion/>>. Acesso em: 21 maio 2022.

ODRIOZOL, G. N.; GOMES, P. R. **REDES INTELIGENTES DE ENERGIA**. 2019.

OLIVEIRA, H. C. R. D.; VIEIRA, M. A. C. **TRANSFORMADA WAVELET E SUAS APLICAÇÕES NO PROCESSAMENTO DE IMAGENS**. 2019. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4691178/mod_resource/content/0/Aula%2010%20-%20Wavelets.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.

OLIVEIRA, K. R. de; SILVA, J. F. R. da. **Análise quantitativa da intensidade de riscos em projetos de smart grid no setor privado brasileiro**. 2021. e243101724947–e243101724947 p.

ONS. **2ª Reviso Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2020-2024**. 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NT%20%20C2%AA%20Revis%20%20C3%A3o%20Quadrimestral%202020_final.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2022.

ONU. **Simpósio de Alto Nível - Interconexão Global de Energia: Avançando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2017. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/events/high-level-symposium-global-energy-interconnection-advancing-sustainable-development-goals>>. Acesso em: 24 maio 2022.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. [S.l.]: Pearson Education, 2011.

PACHECO, A. **K vizinhos mais próximos - KNN**. 2017. Disponível em: <<http://computacaointeligente.com.br/algoritmos/k-vizinhos-mais-proximos/>>. Acesso em: 28 jun. 2022.

PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M.; BACCA, I.; FILHO, J. M. de C. **Variações de tensão de curta duração - Parte I**. 2013. Disponível em: <https://www.oseletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/09/ed-88_Fasciculo_Cap-V-Qualidade-de-energia.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2022.

PEREIRA, D. de S. **Localização de faltas em redes de distribuição no contexto de redes elétrica inteligentes utilizando algoritmos evolutivos**. 2019. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-12092019-145549/publico/DanilodeSouzaPereiraCorr19.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2022.

POSSAGNOLO, L. H. F. M. **Planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica considerando restauração do fornecimento**. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2019.

PRATES, W. R. **O que é árvore de decisão (decision tree)? Exemplos em R**. 2018. Disponível em: <<https://cienciaenegocios.com/o-que-e-arvore-de-decisao-decision-tree-linguagem-r/>>. Acesso em: 21 jun. 2022.

- RASCHKA, S. **Naive Bayes and Text Classification**. 2014. Disponível em: <https://sebastianraschka.com/Articles/2014_naive_bayes_1.html>. Acesso em: 27 jun. 2022.
- RODRIGUES, L. C. P. **Técnicas para detecção, classificação e localização no tempo das variações de tensão de curta e longa duração**. 2008. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-04032009-150846/publico/Leticia.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2022.
- RUSHIKESH, P. de. **Support Vector Machines(SVM) — An Overview**. 2018. Disponível em: <<https://towardsdatascience.com/https-medium-com-pupalerushikesh-svm-f4b42800e989>>. Acesso em: 22 jun. 2022.
- SACRAMENTO, G. **NAIVE BAYES: COMO FUNCIONA ESSE ALGORITMO DE CLASSIFICAÇÃO**. 2021. Disponível em: <<https://blog.somostera.com/data-science/naive-bayes>>. Acesso em: 27 jun. 2022.
- SANTIAGO, P. M. *et al.* **Análise dos fatores que afetam os indicadores de continuidade em uma rede de distribuição de energia: estudo de caso baseado na termografia**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- SANTOS, K. *et al.* **CLASSIFICAÇÃO COM ÁRVORES DE DECISÃO EM PARALELO**. [S.l.]: Instituto Federal Goiano, 2021.
- SANTOS, M. d. C.; NUNES, R. P. **Redes inteligentes de energia**. 2018.
- SETH, N. **Estimation of Neurons and Forward Propagation in Neural Net**. 2021. Disponível em: <<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/04/estimation-of-neurons-and-forward-propagation-in-neural-net/>>. Acesso em: 27 jun. 2022.
- SHEYKHMOUSA, M.; MAHDIANPARI, M.; GHANBARI, H.; MOHAMMADIMANESH, F.; GHAMISI, P.; HOMAYOUNI, S. **Support vector machine versus random forest for remote sensing image classification: A meta-analysis and systematic review**. [S.l.]: IEEE, 2020. 6308–6325 p.
- SILVA, D. G. V. da; TRENTINI, M. **Narrativas como técnica de pesquisa em enfermagem**. [S.l.]: SciELO Brasil, 2002. 423–432 p.
- SILVA, S. T. d. **Fontes de energia renovável: quadro normativo da produção da eletricidade**. [S.l.]: CEDOUA, 2002.
- SIN. **1ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2022-2026**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-305/topico-603/NT%201aRQ%202022_EPE-ONS-CCEE_numerado.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- SLOTTA, D. **Tamanho do mercado de rede inteligente na China 2016-2021**. 2022a. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1292160/china-smart-grid-market-size/>>. Acesso em: 04 maio 2022.
- SLOTTA, D. **Valor do investimento em rede inteligente da State Grid Corporation of China 2010-2021**. 2022b. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1277736/state-grid-corporation-of-china-value-of-smart-grid-investments/#statisticContainer>>. Acesso em: 04 maio 2022.

TECH, D. **Como funciona o algoritmo Árvore de Deciso**. 2022. Disponível em: <<https://didatica.tech/como-funciona-o-algoritmo-arvore-de-decisao/>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

UA. **REDE ELÉCTRICA INTELIGENTE**. 2018. Disponível em: <https://au.int/sites/default/files/newsevents/workingdocuments/33313-wd-electricity_smart_grid_p.pdf>. Acesso em: 24 maio 2022.

VILASBOAS, A. E.; TORRES, A. N. **Support Vector Machine - SVM**. 2020. Disponível em: <<https://lamfo.unb.br/wp-content/uploads/2020/08/Oficina-SVM.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

WATCHWIRE. **Smart Grid Explained: How Modernizing the Electric Grid Will Benefit Us All**. 2020. Disponível em: <<https://watchwire.ai/smart-grid-explained-how-modernizing-the-electric-grid-will-benefit-us-all/>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

ZANINOTTO, J. M. R.; SOARES, M. Z. M. C. **Uma aplicação da trigonometria na engenharia de telecomunicações**. 2019. Disponível em: <<https://www.ime.unicamp.br/sites/default/files/lem/material/series-de-fourier.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2022.