

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia

Laís Gomes Barreto Abreu

**METODOLOGIA DE PREVISÃO NA INTENSIFICAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
NO AMBIENTE DE EXPECTATIVA PARA UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA
CONFIÁVEL**

Itajubá
2023

Laís Gomes Barreto Abreu

**METODOLOGIA DE PREVISÃO NA INTENSIFICAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
NO AMBIENTE DE EXPECTATIVA PARA UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA
CONFIÁVEL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Diego Mauricio Yepes Maya

Coorientador: Prof. Vladimir Rafael Melian Cobas

Área de concentração: Sistemas Energéticos

Itajubá

2023

Laís Gomes Barreto Abreu

**METODOLOGIA DE PREVISÃO NA INTENSIFICAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
NO AMBIENTE DE EXPECTATIVA PARA UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA
CONFIÁVEL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Sistemas Energéticos

Prof. Diego Mauricio Yepes Maya – UNIFEI (Orientador)

Prof. Vladimir Rafael Melian Cobas – UNIFEI (Coorientador)

Prof. Juan José Garcia Pabón – UNIFEI (Banca Examinadora)

Nestor Proenza Peres – UNESP (Banca Examinadora)

Itajubá, 13 de Dezembro de 2023

“ [...] tudo o que pedirdes em oração, crendo que o recebestes, será vosso. “
Marcos 11:24

AGRADECIMENTOS

No decorrer do mestrado, tempo de estudo, esforço e empenho, gostaria de agradecer a algumas pessoas em especial que me acompanharam e foram fundamentais para a realização de deste sonho. Expressar em palavras a importância que elas tiveram, ainda tem e sempre terão durante minhas conquistas e a minha sincera gratidão. Primeiramente, agradeço a minha mãe, irmã e meu pai (in memoriam) por sempre sonharem meu sonho e pelo profundo apoio. Obrigada por desejarem sempre o melhor para mim, pelo esforço que fizeram para que eu pudesse superar cada obstáculo em meu caminho e, principalmente, pelo amor imenso que vocês têm a mim. À vocês, minha família, sou grata por tudo que sou, por tudo que consegui conquistar e pela felicidade que tenho. Agradeço ao meu namorado por estar sempre ao meu lado, pelo apoio, compreensão e amor demonstrados. Minha gratidão especial ao Prof. Diego Mauricio Yepes Maya e ao Prof. Vladimir Rafael Melian Cobas, meu orientador e coorientador, pelas pessoas e profissionais que são. Obrigada pela dedicação, que por muitas vezes me ajudou, orientou e não me deixou desistir. E, principalmente, obrigada por sempre terem acreditado e depositado sua confiança em mim ao longo dos anos. Sem as suas orientações, apoio e confiança, nada disso seria possível. Um obrigado especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia pela confiança depositada em mim quando foi necessário. Por fim, o agradecimento mais importante a Deus e a Nossa Senhora, por estarem sempre comigo, me guiando, iluminando cada passo meu e me abençoando. Obrigada por me darem a fé e a força necessária para lutar e enfrentar todos os obstáculos, sem desistir, por tudo de bom que eu tenho e que sou.

RESUMO

O presente estudo concentra-se no cenário energético brasileiro e destaca o aumento progressivo do uso de fontes renováveis na matriz de energia elétrica do país. O principal objetivo deste estudo é contribuir para a busca de soluções e impulsionar debates e reflexões sobre as ações futuras necessárias para o planejamento energético. Para isso, a pesquisa emprega ferramentas computacionais baseadas em *machine learning* e mineração de dados, utilizando fontes de dados governamentais e de mercado de energia. A metodologia da pesquisa começa com a análise de dados históricos relacionados ao mercado de energia elétrica no Brasil, incluindo políticas, diretrizes nacionais e mecanismos de regulação. Em seguida, a pesquisa utiliza ferramentas computacionais para projetar a previsão do mercado de energia elétrica no país. Essas previsões são então comparadas com o horizonte previsto pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. A metodologia empregada inclui a execução de modelos de previsão, destacando o comportamento do mercado energético ao longo do tempo, a partir de três métodos diferentes: Redes Neurais *Multilayer Perceptron* (MLP), Regressão do Processo Gaussiano (GPR) e Regressão Linear para projetar a geração elétrica por fonte no Brasil. Os resultados indicam um crescimento considerável das fontes renováveis no mercado energético nacional até o ano de 2030, aproximando-se do objetivo do Plano Decenal de Expansão de Energia de atingir 90% de renovabilidade, abrangendo fontes como hidrelétrica, biomassa, eólica e solar. O método de Regressão Linear alcança 86% de renovabilidade, enquanto o método de Regressão do Processo Gaussiano atinge 90%, e o método das Redes Neurais *Multilayer Perceptron* chega a 88%. Assim como, os cenários propostos intencionaram no crescimento gradual do uso de fontes renováveis na matriz de energia elétrica e no seu potencial de crescimento. A projeção da previsão do mercado de energia elétrica, possibilitou a identificação dos padrões de comportamento mercadológico, permitindo antecipar as tendências e mudanças no mercado. Essas previsões têm o propósito de fornecer informações para apoiar o desenvolvimento de ações no processo de planejamento energético, contribuindo para a transição para fontes mais sustentáveis e renováveis de energia no Brasil.

ABSTRACT

This study focuses on the Brazilian energy scenario and highlights the progressive increase in the use of renewable sources in the country's electrical energy matrix. The main objective of this study is to contribute to the search for solutions and encourage debates and reflections on the future actions necessary for energy planning. To achieve this, the research employs computational tools based on machine learning and data mining, using government and energy market data sources. The research methodology begins with the analysis of historical data related to the electricity market in Brazil, including policies, national guidelines and regulatory mechanisms. The research then uses machine learning and data mining tools to forecast the electricity market in the country. These forecasts are then compared with the horizon predicted by the Ten-Year Energy Expansion Plan 2030. The methodology used includes the execution of forecast models, highlighting the behavior of the energy market over time, using three different methods: Multilayer Neural Networks Perceptron (MLP), Gaussian Process Regression (GPR) and Linear Regression to project electrical generation by source in Brazil. The results indicate considerable growth in renewable sources in the national energy market until 2030, approaching the objective of the Ten-Year Energy Expansion Plan of reaching 90% renewability, covering sources such as hydroelectric, biomass, wind and solar. The Linear Regression method achieves 86% renewability, while the Gaussian Process Regression method achieves 90%, and the *Multilayer Perceptron* Neural Networks method reaches 88%. Likewise, the scenarios proposed for the Brazilian energy market intended to gradually increase the use of renewable sources in the electrical energy matrix and its growth potential. The projection of the electricity market forecast made it possible to identify market behavior patterns, allowing trends and changes in the market to be anticipated. These forecasts are intended to provide information to support the development of actions in the energy planning process, contributing to the transition to more sustainable and renewable sources of energy in Brazil.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Introdução	14
1.2. Justificativa.....	17
1.3. Objetivo Geral.....	17
1.3.1. Objetivos Específicos	17
1.4. Estrutura da dissertação	18
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. O setor elétrico brasileiro.....	19
2.1.1. Histórico do setor elétrico	22
2.1.2. Estrutura institucional.....	27
2.1.3. Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo.....	30
2.2. Panorama Energético Brasileiro.....	32
2.2.1. Caracterização das fontes de energia brasileira.....	35
2.2.1.1. Hidroeletricidade.....	37
2.3. Comercialização de energia elétrica no Brasil	41
2.3.1. Mecanismos de comercialização	44
2.4. Políticas Públicas Energéticas Brasileiras	50
2.5. Mineração de dados como ferramenta de análise	53
2.5.1. Método de Previsão	54
2.5.2. Modelo de Redes Neurais <i>Multilayer Perception</i>	57
2.5.3. Modelo de Regressão do Processo Gaussiano.....	58
2.5.4. Modelo de Regressão Linear	59
2.5.5. Métricas	60
2.6. <i>Software machine learnig</i> – WEKA.....	61
2.7. Construção de Cenários	63
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1. Descrição metodológica	65
3.1.1. Classificação da Pesquisa.....	65
3.1.2. Definição dos Dados	66
3.1.3. Análise dos Dados.....	67
3.2. Construção de Cenários	70
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4.1. Validação dos Modelos	72
4.2. Análise dos Dados	73

4.3.	Redes Neurais <i>Multilayer Perceptron</i>	74
4.4.	Regressão do Processo Gaussiano.....	77
4.5.	Regressão Linear	79
4.6.	Prospecção de Cenários	82
4.7.	Apontamentos e Discussões	85
	CONCLUSÕES	89
	APÊNDICE I – FIGURAS	93
	REFERÊNCIAS	1

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa do Sistema de Transmissão	20
Figura 2.2 - Distribuição Geográfica dos Sistemas Isolados	21
Figura 2.3 - Governança corporativa no setor	29
Figura 2.4 - Cadeia do setor elétrico brasileiro.....	32
Figura 2.5 - Oferta Interna de Energia em 2021	33
Figura 2.6 - Participação das fontes na capacidade instalada em 2021	33
Figura 2.7 - Capacidade Instalada de Geração Elétrica entre os anos de 1974 a 2021.....	33
Figura 2.8 - Geração de Energia Elétrica Total entre 1970 e 2021	33
Figura 2.9 - Contratos registrados na CCEE no ACL e ACR.....	33
Figura 3.1 – Interface WEKA para aba Preprocess.....	69
Figura 3.2 - Interface WEKA para aba Basic configuration.....	69
Figura 3.3 - Interface WEKA para aba Advanced configuration.	70
Figura 3.4 - Diagrama de blocos para a projeção da previsão da geração elétrica por fonte no Brasil	70
Figura 4.1 - Geração elétrica por fonte no Brasil de 2012 a 2022 (GWh).....	74
Figura 4.2 - Geração elétrica por fonte pelo método MLP - 2012 - 2030	77
Figura 4.3 - Geração elétrica por fonte pelo método Regressão do Processo Gaussiano - 2012 – 2030.....	79
Figura 4.4 - Geração elétrica por fonte pelo método Regressão Linear - 2012 - 2030.....	82
Figura 4.5 – Comparativo entre os métodos para a previsão da expansão da geração elétrica por fonte.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características do Setor Elétrico Brasileiro.....	28
Tabela 2.2 - Causas e Consequências da crise hídrica.....	39
Tabela 2.3 - Evolução da Indústria de Energia Elétrica Brasileira.....	43
Tabela 2.4 - Leis da comercialização de energia.....	45
Tabela 2.5 - Decretos da comercialização de energia.....	46
Tabela 2.6 - Resoluções da comercialização de energia.....	47
Tabela 3.1 - Geração elétrica por fonte no Brasil.....	47
Tabela 3.2 - Reescrita da Geração elétrica por fonte no Brasil.....	47
Tabela 4.1 Parâmetros dos dados.....	73
Tabela 4.2 - Previsão da Geração Elétrica por Fonte 2030 pelo método MLP (GWh).	75
Tabela 4.3 - Métricas do método MLP.....	76
Tabela 4.4 - Previsão da Geração Elétrica por Fonte 2030 pelo método Regressão do Processo Gaussiano (GWh).....	77
Tabela 4.5 - Métricas do método Regressão do Processo Gaussiano.....	78
Tabela 4.6 - Previsão da Geração Elétrica por Fonte 2030 pelo método Regressão Linear (GWh).....	79
Tabela 4.7 - Métricas do método Regressão Linear.....	81
Tabela 4.8 - Estruturação dos Cenários.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica

ABiogás - Associação Brasileira de Biogás e de Biometano

ABRACEEL - Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia

ABRAGEL - Associação Brasileira de Energia Limpa

ACL - Ambiente de Contratação Livre

ACR - Ambiente de Contratação Regulada

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN - Balanço Energético Nacional

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento

CCEAR - Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCON - Comitê Coordenador de Operação do Nordeste

CCPE - Comitê Coordenativo do Planejamento Elétrico

CGH - Centrais Geradoras Hidrelétricas

CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco

CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

CONFAZ - Conselho Nacional de Política Fazendária

COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

GCOI - Grupo Coordenador para a Operação Interligada

GCPS - Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos

GPR - Regressão do Processo Gaussiano

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IPI - Impostos sobre Produtos Industrializados

MAE - Erro Absoluto Médio

MAE - Mercado Atacadista de Energia

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MAPE - Erro Percentual Médio Absoluto

MLP - *Multilayer Perceptron*

MME - Ministério das Minas e Energia

MW - Megawatt

ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU - Organizações das Nações Unidas

PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas

PDE Plano Decenal de Expansão de Energia

PIS - Programa de Integração Social

PLS - Projeto de Lei do Senado

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

PPSA - Empresa Brasileira de Administração do Petróleo e Gás Natural

PPT - Programa Prioritário de Termoeletricas

PROALCOOL - Programa Nacional do Alcool

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

ProGD - Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica

PROINFA - Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PRONAF - Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar

REC - Brazil Programa de Certificação de Energia Renovável

REIDI - Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura

RMSE - Erro Quadrático Médio

RESEB - Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro

SIN - Sistema Interligado Nacional

tep - Tonelada Equivalente de Petróleo

TWh - Terawatt-hora

UHE - Usina Hidrelétrica

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório delinea as importantes motivações para desenvolvimento do trabalho, apresentando as justificativas e objetivos atrelados ao desenvolvimento da pesquisa, e, finaliza, elucidando a estrutura e organização da dissertação, abrangendo a fundamentação teórica, materiais e métodos empregues, resultados e discussão alcançados e conclusões abrangendo as recomendações para trabalhos futuros e produtos pretendidos.

1.1. Introdução

A população e economia mundial se propagaram, a partir da década de 70, ocasionando um crescimento exponencial na demanda energética global, orientado, principalmente, pelo uso do petróleo, fonte primária de combustível fóssil, base da matriz energética mundial. E, nos últimos anos, a dependência da energia determina o processo da economia a partir do petróleo, gás natural, carvão, energia nuclear e hidroeletricidade (BARROS, 2010).

Com a diminuição das reservas de petróleo, associado ao grande consumo e a sua dependência, outras fontes de energia serão decisivas para o desenvolvimento da economia global. Ao avaliar as alternativas energéticas substitutas ao petróleo, as fontes de energias renováveis possuem custos de produção mais elevados e, em alguns casos, demandam uma quantidade de energia maior para serem produzidas, com relação à extração de petróleo (BARROS, 2010; CASTRO; LYRA FILHO, 2005).

Entre os anos de 1980 a 2018, ocorreram profundas alterações estruturais na matriz energética mundial, no que tange o uso das fontes energéticas primárias, ainda que, a participação das fontes energéticas renováveis abrange uma estreita parcela no suprimento das demandas mundiais, teve o crescimento de, aproximadamente, 1,8% a nível mundial (SACHSIDA *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2016; VENTURA FILHO, 2014).

Estudos desenvolvidos concernentes ao progresso da matriz energética e da matriz de energia elétrica mundial sustentam que não ocorrerão mudanças significativas no suprimento das demandas nas fontes energéticas, assim, os combustíveis fósseis estarão, em sua grande maioria, na produção de energia (VENTURA FILHO, 2014).

As fontes renováveis estarão de forma complementar, na produção de energia, posto que não possuem disponibilidade suficiente, tecnologia desenvolvida e viabilidade ambiental comprovada para que ocorra a substituição dos combustíveis fósseis, de forma expressiva a suprir as demandas mundiais de energia (VENTURA FILHO, 2014).

Entretanto, o desenvolvimento populacional ocasiona o crescimento na demanda energética, resultante do aumento do consumo de energia elétrica devido às buscas por melhorias nas condições socioeconômicas, na eclosão de novos consumidores e desenvolvimento de novas áreas residenciais, comerciais e industriais, gerando, assim, impactos nos sistemas de geração, transmissão e distribuição (LAMIN, 2009; PEREIRA JÚNIOR, BENVINDO RODRIGUES; COSSI, ANTÔNIO MARCOS; MANTOVANI, 2011).

Já no caso do Brasil, a matriz energética diferencia-se da matriz mundial em decorrência da utilização em abundância de fontes renováveis, especialmente a biomassa, o vento, o sol e a hidroeletricidade (PEREIRA, 2014; VENTURA FILHO, 2014).

No decorrer dos anos, em consequência das políticas energéticas aplicadas no país, objetivando a redução da dependência da importação do petróleo, as fontes renováveis mantiveram-se em operação, em uma parcela superior, se comparado às não renováveis (SACHSIDA *et al.*, 2022).

A hidroeletricidade caracteriza-se por representar uma fonte de energia renovável, com baixa emissão de gases poluentes e que se integra a variados recursos hídricos, entretanto, a mesma, modifica, drasticamente, o ecossistema em seu entorno, pela migração desordenada da fauna, desmatamento decorrente e alteração do curso dos rios, bem como, influencia negativamente na esfera social, econômica e cultural/sentimental onde está inserida. No Brasil, a Eletrobrás utiliza-a como a fonte energética para a produção de energia elétrica, em razão do potencial elétrico, competitividade econômica, viabilidade socioambiental e tecnologia dominada (VENTURA FILHO, 2014).

A matriz de energia elétrica do Brasil, do ano de 2021, retrata que o país, no setor de eletricidade, detém grande participação da atuação de fontes energéticas renováveis, correspondendo a 78,1%. E, em 2021 aproximou-se dos 679 GWh na oferta de energia elétrica, com crescimento de 3,9%, quando comparado ao ano anterior (EPE, 2022; SACHSIDA *et al.*, 2022).

Em geral, atualmente, a hidroeletricidade detém 64,9% do suprimento total na produção de energia elétrica no país, seguidamente, 8,6% correspondendo a geração eólica, 8,4% a biomassa e 1% a solar, representando as fontes energéticas renováveis e com baixa emissão de gases de efeito estufa (SACHSIDA *et al.*, 2022, EPE, 2022).

Atualmente, no setor elétrico transcorre o conflito entre interesses, entre as esferas públicas e privadas, por ser um setor híbrido e pelos riscos de mercado que condicionam indistintamente as empresas (CASTRO; LYRA FILHO, 2005).

Estudos desenvolvidos recentemente apontam que, quando na ausência de alternativas, os preços elevados dos combustíveis fósseis acarretam pobreza energética e perda de competitividade,

assim, transcorre da vontade e determinação política moldar e determinar o horizonte para a transição que conduzirá para um mundo mais inclusivo, equitativo e estável (IRENA, 2022).

A eletricidade oriunda em energia renovável, atualmente, é considerada como a energia mais barata em grande parte das regiões, tendo como característica a opção de expansão da capacidade do setor energético em grande parte dos países, dominando, assim, os investimentos atuais, pelo qual, o desenvolvimento necessita de políticas, investimentos e tecnologias para sua aplicabilidade e redução do impacto econômico e social (IRENA, 2022).

Ademais, no ano de 2023, a geração e transmissão de energia elétrica no Brasil tem como dominância as usinas hidrelétricas, correspondendo a 60,3% da capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo, o mesmo, constituído por quatro subsistemas, sendo o Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, seguidamente, as outras fontes renováveis representam, aproximadamente, 25,4% de capacidade instalada do total de 182.671 MW, tendo como previsão de expansão para 2027 de 204.859 MW (ONS, 2023a).

Independentemente de qual seja o prazo da previsão, o seu desenvolvimento engloba complexidades das associações entre a carga do sistema elétrico e os aspectos que a afeta, tendo em vista as incertezas existentes no decorrer do tempo sobre as variáveis incorporados nos planejamentos das operações elétricas e energéticas para sua ampliação (ZARUR, 2005; PINHO, OLIVEIRA, SILVA, 2017; SANTOS, LIMA, SILVA, 2018).

O Brasil detém um dos maiores e melhores potenciais energéticos do mundo, ainda que as reservas de combustíveis fósseis são consideravelmente reduzidas, os potenciais hidráulicos, solar, biomassa e eólico são suficientemente abundantes, garantindo a autossuficiência energética do país (ZARUR, 2005; GOLDEMBERG, LUCON, E PACCA, 2010; LIMA E TEIXEIRA, 2016).

A fonte hidráulica e o petróleo detêm grande importância para o setor elétrico brasileiro, entretanto, com o crescimento da demanda, insuficiência de oferta e limitações financeiras, socioeconômicas e ambientais à expansão, o suprimento de energia elétrica no futuro irá demandar o aproveitamento de fontes energéticas alternativas (ZARUR, 2005; GOLDEMBERG, LUCON E FREIRE, 2008; LA ROVERE, OLIVEIRA E ROCHA, 2013).

Portanto, o planejamento e a regulamentação do setor energético devem buscar mecanismos de suprimento compatíveis com as potencialidades e necessidades socioeconômicas, aproveitando estrategicamente cada fonte energética, garantindo a maximização dos benefícios e minimização dos impactos negativos gerados, onde, por meio dos resultados da previsão de demanda futura torna-se possível o planejamento do setor (ZARUR, 2005; MORET, 2014; PEREIRA, SILVA E DA SILVA, 2018).

1.2. Justificativa

Frente a grande participação das hidrelétricas, representando, indiretamente, o regime de monopólio na geração de energia elétrica e a falta de incentivos fiscais e financeiros, a vagariedade do crescimento das energias renováveis, como biomassa, eólica e solar, torna-se perceptível frente a resistência de crescimento e desenvolvimento, ainda que, o Plano Nacional de Energia 2050 prevê um patamar de 75% de fonte hídrica na capacidade instalada da matriz elétrica em 2050, entretanto, a ausência de mecanismos para o crescimento dificulta a expansão de geração e comercialização (MME; EPE, 2020).

Mas, frente ao cenário atual do mercado de energia elétrica e de cara para uma transição energética sustentável, quais os mecanismos estratégicos a serem desenvolvidos para o crescimento das fontes renováveis na matriz energética? Quais são impactos, sociais e econômicos, frente a esse crescimento? Contestar a estes questionamentos, ou parte deles será o principal objetivo do trabalho.

Assim, mediante ao cenário energético brasileiro, o crescimento gradual do uso de fontes renováveis na matriz de energia elétrica e o potencial de crescimento, o intuito ao se esboçar diferentes perspectivas a um determinado período torna-se cabível a contribuição para possíveis soluções, impulsionando o debate e a reflexão sobre ações futuras, base do exercício de planejamento.

1.3. Objetivo Geral

Delimitar mecanismos de competitividade das energias renováveis, mensurando as estratégias de participação utilizando ferramentas computacionais fundamentadas em *machine learning* e mineração de dados, a partir de fontes de dados governamentais e do mercado de energia com o intuito de fornecer informações fiáveis para o setor de planejamento energético.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Estudar dados históricos acerca do mercado de energia brasileiro, delineando as políticas e diretrizes nacionais de atuação e os mecanismos de regulação, com a finalidade de realizar o levantamento de dados históricos para identificar e compreender as políticas e diretrizes governamentais que influenciaram o setor energético, bem como, os instrumentos regulatórios que foram implementados para governar o mercado de energia.
- Projetar a previsão do mercado de energia elétrica no Brasil, por meio da mineração de dados e ferramentas computacionais do tipo *machine learning*, tendo por propósito a criação de modelos de previsão que estimem como o mercado de energia elétrica no Brasil evoluirá ao longo do tempo, pela aplicação de algoritmos de *machine learning* para desenvolver modelos de previsão a partir dos dados históricos e fazer projeções futuras.

- Delinear o comparativo para com o horizonte previsto pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, intencionando-se a comparação entre os resultados das previsões geradas pelos modelos aplicados e as metas e previsões estabelecidas no Plano Decenal de Expansão de Energia, verificando, assim, o alinhamento ou discrepância entre as previsões do modelo e as expectativas do plano.
- Descrever os possíveis cenários de previsão para aumento da participação das fontes renováveis no mercado energético brasileiro, com o intuito de analisar e apresentar diferentes perspectivas relacionadas ao crescimento da presença de fontes de energia renovável no cenário energético do Brasil.
- Elaborar e disponibilizar ferramentas computacionais para a realização de extrapolação de projeções energéticas para cenários futuros ou horizontes temporais mais amplos, considerando a complexidade e dinâmica do setor energético.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação estará organizada em 5 capítulos, incluindo este introdutório. O Capítulo 2 configura o estado da arte da pesquisa e tem como objetivo apresentar os principais conceitos envolvidos com o tema da dissertação, sob forma de uma revisão bibliográfica.

O Capítulo 3 apresenta os dados aplicados e descreve os mecanismos de criação e implementação da extrapolação de tendências pela utilização dos métodos de Redes Neurais *Multilayer Perceptron* (MLP), Regressão do Processo Gaussiano (GPR) e Regressão Linear.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões acerca do caso, apresentando os dados alcançados pelos métodos aplicado e o seu aprendizado indutivo.

O Capítulo 5, além de apresentar as discussões gerais do trabalho de forma conclusiva, finaliza expondo a dissertação com os resultados e contribuições relevantes, dificuldades encontradas e as indicações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo configura o estado da arte da dissertação, empenhando-se em argumentar os assuntos e requisitos relacionados a setor elétrico brasileiro, sendo posto os principais conceitos, o histórico, a estrutura institucional e importância de cada um no processo, evidenciando sua relevância para o atual mercado de comercialização e políticas públicas do setor energético.

2.1. O setor elétrico brasileiro

O sistema de geração e transmissão de energia elétrica do Brasil caracteriza-se por ser um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, tendo como predominância as usinas hidrelétricas e os múltiplos proprietários (ONS, 2023b).

Na década de 1960 os sistemas elétricos brasileiros necessitaram que sua forma de funcionamento tornassem integrados em decorrência ao crescimento do consumo de energia elétrica, necessitando, assim, o aumento da capacidade instalada em suas usinas geradoras de energia e da malha de transmissão, objetivando o melhoramento racional de forma econômica das fontes energéticas disponíveis a exploração, com isso, a integração dos sistemas transcorreu pela construção de empreendimentos de geração e transmissão, por órgãos públicos federais e estaduais (OLIVEIRA, 2020).

A operação integrada de sistemas elétricos, de geração e transmissão, tem como resultado a sinergia quando empreendida de forma coordenada, integrada e centralizada, proporcionando benefícios econômicos e melhoramento da qualidade do serviço, como o sistema brasileiro, majoritariamente hidroelétrico, destacando-se para o uso da água na geração, o crescimento da disponibilidade energética, diminuição dos custos de operação e modicidade tarifária e aumento da confiabilidade de serviço aos consumidores finais de energia (OLIVEIRA, 2020; ONS, 2023b).

No Brasil, a contínua expansão das redes de transmissão, com a operação coordenada e integrada dos sistemas, proporcionou a interligação das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, conforme apresentado na Figura 2.1, conduzindo o desenvolvimento de um grande sistema interligado, nomeado de Sistema Interligado Nacional (SIN), no qual, o mesmo, engloba, aproximadamente, 99% do mercado de energia elétrica (OLIVEIRA, 2020; ONS, 2023b).

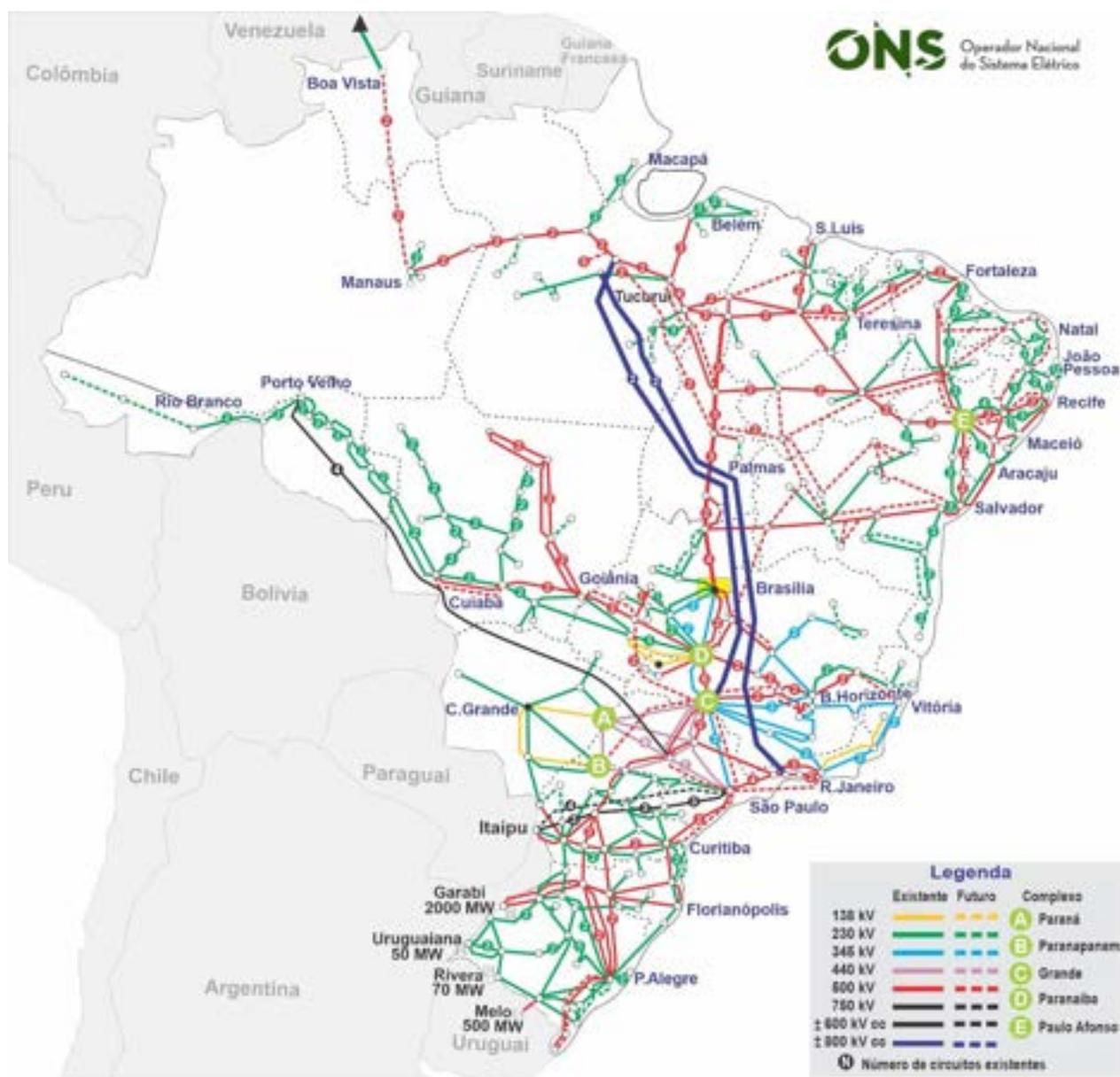


Figura 2.1 - Mapa do Sistema de Transmissão (ONS, 2023b).

A capacidade instalada de geração do SIN compreende, principalmente, usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas em diversas regiões do país, bem como, usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, e as usinas térmicas, localizadas nas proximidades dos principais centros de carga e desempenham papel estratégico significativo, contribuindo para a segurança do SIN. Bem como, os sistemas de transmissão constituem as fontes de produção de energia e propiciam o suprimento do mercado consumidor (ONS, 2023b).

Entretanto, atualmente, 176 localidades não estão interligadas pelo SIN, localizados, principalmente, na região norte do país, abrangendo os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e a ilha de Fernando de Noronha, constituindo, assim, os Sistemas Isolados (SISOL), sendo a distribuição geográfica desses sistemas apresentados na Figura 2.2 (ONS, 2022).



Figura 2.2 - Distribuição Geográfica dos Sistemas Isolados (ONS, 2022).

São sistemas predominantemente identificados em áreas remotas ou de difícil acesso, tendo como características geográficas estarem localizadas distantes dos principais centros de geração e demanda de energia elétrica (PONTE, 2018).

Devido à localização remota, esses sistemas enfrentam desafios logísticos consideráveis para o abastecimento de combustíveis e a manutenção das instalações. Para garantir a disponibilidade de energia em situações de variação de carga ou falhas, é necessário manter uma capacidade de reserva que possa atender a toda a carga do sistema (FROTA E BAJAY, 2004; PONTE, 2018).

A distribuição geográfica desses sistemas é fundamental para entender a complexidade de atender regiões distantes dos centros de produção e consumo de energia (PONTE, 2018).

Os Sistemas Isolados utilizam, predominantemente, as usinas térmicas com combustível a óleo diesel para atendimento energético, tendo como características grande número de unidade geradoras de pequeno porte e dificuldade de logística de abastecimento, necessitando, para geração, uma capacidade disponível de reserva de atendimento à totalidade de carga, prevendo possíveis falhas ou variações de carga (ONS, 2022).

O uso predominante de usinas térmicas nesses sistemas ressalta a dependência de fontes não renováveis e as questões associadas ao transporte e armazenamento de combustíveis nessas localidades, além de ser uma necessidade devido à ausência de conexão com fontes mais tradicionais, como usinas hidrelétricas (FROTA E BAJAY, 2004; ONS, 2022).

Por conseguinte, esses sistemas desempenham um papel crucial em fornecer energia para áreas onde a interligação com o SIN é desafiadora, mas também evidenciam a necessidade de

considerações específicas para garantir a confiabilidade e a sustentabilidade do fornecimento de energia nessas regiões (PONTE, 2018).

2.1.1. Histórico do setor elétrico

Durante o período de 1920 e 1950 o Brasil foi acometido por mudanças significativas no que tange a demanda interna por energia elétrica, em decorrência da aceleração da exportação do café e o crescimento da produção industrial, entretanto, ele não detinha estrutura para atendimento desse crescimento (OLIVEIRA, 2000; KORZENIEWICZ, 2021).

Mediante ao crescimento, o governo iniciou os investimentos em desenvolvimento de capacidade interna, por meio da criação de políticas, tal como, objetivando o crescimento na exploração de fontes de energias renováveis e reduzir a dependência do petróleo (KORZENIEWICZ, 2021).

Em 1939, o Brasil não detinha instalações de transmissão de energia a longas distâncias, pelo qual, o mercado dividia-se territorialmente entre empresas estrangeiras do Canadá e Estados Unidos como domínio de mais de 70% da capacidade instalada (SILVEIRA, 2018).

A partir de 1948, iniciou-se a expansão da indústria de eletricidade brasileira, tendo iniciativa estatal, com a instauração da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (Chesf), na qual, detinha maior potência instalada (OLIVEIRA, 2000; SILVEIRA, 2018).

Assim, ao longo das décadas de 1940, 1950 e 1960, sofreu inúmeras modificações estruturais para que fosse possível propiciar que as companhias estatais fornecessem a maior parcela da eletricidade, gás e óleo, promovendo, assim, a institucionalização as entidades Petróleo Brasileiro S.A. e a Centrais Elétricas Brasileiras S.A, em 1953 e 1954, respectivamente, onde, as mesmas, auxiliaram o crescimento e fortalecimento econômico e governamental (OLIVEIRA, 2000; KORZENIEWICZ, 2021; SILVEIRA, 2018).

Portanto, a Petrobras proporcionou a operação, em escala mundial, na extração de petróleo e na capacitação tecnológica do país, bem como, a Eletrobras promoveu o progresso hidrelétrico por meio da coordenação do setor, ainda que não detivesse o monopólio de produção e transmissão da energia (KORZENIEWICZ, 2021).

O governo brasileiro, objetivando a prover a demanda correspondente ao consumo de energia no país, instituiu, também a Eletrosul, Furnas e outras companhias estatais (LORENZO, 2002; KORZENIEWICZ, 2021).

Bem como, até a década de 1960, conhecimentos acerca da expansão eram desenvolvidos por capital privado, objetivando o aproveitamento energéticos de potenciais hidrelétricos locais, uma vez

que se utilizavam geração térmica e sistemas de transmissão radiais e/ou isolados para o atendimento as demandas (KORZENIEWICZ, 2021).

O Ministério das Minas e Energia (MME) foi estabelecido pela Lei nº 3.782, de julho de 1960, responsável pela produção mineral e energia e aplicabilidade de políticas ambientais (BRASIL, 1960; KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

As construções de grandes hidrelétricas deram-se pela conjuntura da industrialização, no qual, o governo, através da aplicação de investimentos, objetivava a expansão da produção de energia elétrica para suprimento da demanda interna, entretanto, ocorrendo impactos negativos, uma vez que a construção desconsiderava os impactos causados, entendendo que os benefícios seriam superiores (KORZENIEWICZ, 2021).

Em 1968, o convenio celebrado com a Comissão Nacional de Energia Nuclear, pela Eletrobras, desencadeou a construção da primeira usina nuclear no Brasil (SILVEIRA, 2018).

A partir de 1970, iniciou-se o desenvolvimento por fontes geradoras de energias renováveis, em decorrência ao aumento do preço do barril de petróleo, assim, o Brasil, buscou a substituição do petróleo por fontes hídricas, álcool, inovação tecnológica em energia e exploração de petróleo em águas profundas. Bem como, a implementação da energia nuclear como fonte promissora de energia, em 1971, pela central nuclear em Angra dos Reis (LORENZO, 2002; GOMES E VIEIRA, 2009; KORZENIEWICZ, 2021).

Em 1975, o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), por estímulos governamentais, propulsou a produção de etanol, tendo como matéria prima a cana-de-açúcar, corroborando para a constituição da matriz energética renovável (KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

A década de 1970, também foi delimitada pelo estruturamento do planejamento setorial centralizado, considerando investimentos estatais, a instalação de grandes reservatórios de regularização plurianual e a criação de subsistemas regionais interligados, com início da operação de 46 subsistemas elétricos, por meio do Grupo Coordenador para a Operação Interligada – GCOI e o Comitê Coordenador de Operação do Nordeste – CCON (KORZENIEWICZ, 2021).

O Plano 90, iniciado na década de 1970 pela Eletrobrás, correspondeu ao grande marco de planejamento da expansão, onde, por meio dele foi instituído o programa nuclear brasileiro para produção de energia elétrica de origem nuclear. Bem como, o Plano 92, o Plano 95 e o Plano 2000, delineando a indicação de estratégias de longo prazo do setor elétrico brasileiro (KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

Na década de 1980 pelo início dos debates acerca do planejamento energéticos e fontes ambientalmente renováveis, o Ministério de Minas e Energia e o Ministério da Indústria e Comércio criaram o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), objetivando a redução

da perda de energia desde a sua geração (GOMES E VIEIRA, 2009; MERCEDES, RICO, POZZO, 2015; KORZENIEWICZ, 2021).

Nesta mesma década, o processo do planejamento da expansão foi estabelecido, por meio do Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS), tendo como participantes os agentes setoriais, ambicionando o aumento do consumo, a interligação do subsistemas Sul/Sudeste/Centro-Oeste, Norte/Nordeste e Norte/Sul, bem como, a instituição do capital estatal e a inserção do planejamento ambiental (LORENZO, 2002; KORZENIEWICZ, 2021).

Em 1984, a Usina de Itaipu iniciou sua operação, no qual, detinha o título de maior hidrelétrica no mundo (LORENZO, 2002; SILVEIRA, 2018).

Em 1986, ocorreram, também, a criação do Manual de Inventário e de Viabilidade de Usinas Hidroelétricas, o 1º Plano Diretor de Meio Ambiente e a realização de novos mecanismos de planejamento, tendo em consideração cenários mercadológicos, planejamento probabilístico e sob incertezas (KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

No início da década de 1990, o MME estabeleceu o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), tendo como intuito de, por meio de metas, reduzir a demanda por petróleo, e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para regulação do setor elétrico e estímulo a eficiência energética. Bem como, também, foram instituídas a Lei Nacional de Política de Recursos Hídricos, a de Crimes Ambientais, e a da Política Nacional de Educação Ambiental (LORENZO, 2002; KORZENIEWICZ, 2021).

Com a Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, denominada Lei das Concessões, o setor elétrico iniciou seu processo de reforma e privatização, proporcionando a concorrência na construção de novos empreendimentos, antes restrito as empresas estatais (BRASIL; 1995a; OLIVEIRA, 2000; GOMES E VIEIRA, 2009; KORZENIEWICZ, 2021).

O Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RESEB), fomentou a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica em 1997, como uma agência reguladora independente; em 1998, o Operador Nacional do Sistema Elétrico e Mercado Atacadista de Energia (MAE) como forma de mercado de livre contratação no suprimento, instituiu, também, o Comitê Coordenativo do Planejamento Elétrico (CCPE) em 1999 para conduzir o planejamento na geração e transmissão, substituto ao GCPS e, em 2000, instaurou o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) (MERCEDES, RICO, POZZO, 2015; KORZENIEWICZ, 2021).

Na década de 1990, também, iniciou-se a desverticalização das empresas de energia elétrica, segmentando a geração, transmissão e distribuição de energia, incentivando a competição entre os de geração e comercialização e mantendo a regulação estatal dos de distribuição e transmissão (LORENZO, 2002; KORZENIEWICZ, 2021).

A partir das crises de abastecimento de energia, ocorrida no final dos anos 90 e início dos anos 2000, o Brasil detinha fragilidades no setor elétrico, tanto na produção quanto na distribuição, repercutindo, assim, em mudanças estruturais nas empresas de energia e privatizações do setor, iniciando, então o processo de competição na exploração de energia, bem como, comprometimento governamental atrelada a pesquisa e desenvolvimento (MERCEDES, RICO, POZZO, 2015; KORZENIEWICZ, 2021).

Assim, nesse período, o setor elétrico brasileiro submete-se a uma grave crise de abastecimento, acarretando um racionamento de energia que afetou todas as esferas do setor, sendo necessária a realização de inúmeras medidas para controlar o consumo energético (MERCEDES, RICO, POZZO, 2015; GOMES E VIEIRA, 2009; KORZENIEWICZ, 2021).

O Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado em 2002, propiciou o início da pauta energética, no qual, o mesmo, objetivava a diversificação da matriz energética do país, considerando as características regionais e leis de compensações tarifárias, fomentando, assim, a expansão da produção de energia elétrica (KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

A Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004 e o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004 delineavam os mecanismos de reestruturação, instaurando a modicidade tarifária, a universalização do acesso e a segurança energética de energia elétrica frente ao suprimento, em decorrência ao racionamento elétrico de 2001, a crise financeira ocorrida em 2002 e as sobras de energia ocorridas em 2003 (BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004c; MERCEDES, RICO, POZZO, 2015; KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

Em 2004, foram criados o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), objetivando a avaliação contínua do suprimento de energia elétrica, de forma a garantir segurança em seu fornecimento e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), responsabilizando-o por todo o processo de comercialização de energia no sistema interligado (KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

A criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2004, tinha como intuito a atuação de estudos e pesquisas acerca do setor energético, sendo, a mesma, responsabilizado por estabelecer estimativas da oferta e do consumo nacional de energia, por meio do Balanço Energético Nacional (BEN). Posteriormente, em 2005, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) instituiu o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) para promoção da produção e desenvolvimento rural sustentável a partir do uso de biodiesel (MERCEDES, RICO, POZZO, 2015; KORZENIEWICZ, 2021).

A Petrobrás, em 2006, encontrou petróleo na camada de pré-sal no território nacional, representando, assim, autossuficiência do país, tendo impactos significativos no âmbito energético e econômico para com o crescimento e desenvolvimento brasileiro, como isso, o governo iniciou a estruturação e planejamento de ações para garantia da regulamentação da sua exploração. E, no ano de 2010, criou-se a Empresa Brasileira de Administração do Petróleo e Gás Natural – Pré-Sal Petróleo S.A. (PPSA), vinculando ao Ministério de Minas e Energia (GOMES E VIEIRA, 2009; KORZENIEWICZ, 2021).

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), criado nos anos 2000, atrela-se a sociedade, no qual, objetiva-se o apontamento das perspectivas de expansão de energia em conformidade aos planos governamentais (MERCEDES, RICO, POZZO, 2015; KORZENIEWICZ, 2021).

O Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso de Energia Elétrica – Luz para Todos, regulamentado pela Lei nº 12.212/2010 e o Decreto nº 7.583, concretiza-se como um marco legislativo para universalização do atendimento a energia elétrica, sob forma de política pública, promovendo o seu acesso a áreas remotas (BRASIL, 2010; BRASIL, 2011; FORNASIER; KNEBEL, 2021; ANEEL, 2023).

Em 2015, o MME implementou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), intencionando a ampliação e aprofundamento das ações que estimulam a geração de energia elétrica por consumidores, microgeração e minigeração de energia, a partir de fontes renováveis, por meio de incentivos e subsídios (KORZENIEWICZ, 2021; ANEEL, 2023).

Em 2016, o Brasil realizou leilões de energia que visavam contratar novos projetos de geração, incluindo fontes renováveis, como energia eólica e solar, como parte dos esforços contínuos para diversificar a matriz energética (ANEEL, 2016). E, a energia eólica ganhou destaque como uma fonte significativa de geração de eletricidade, com investimentos contínuos em parques eólicos em várias regiões do Brasil (EPE, 2016).

Bem como, o setor elétrico brasileiro começou a considerar investimentos em tecnologias avançadas, como redes inteligentes (*smart grids*) e armazenamento de energia, como parte de sua preparação para os desafios futuros (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Em 2016, por meio do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) do governo federal, no qual objetivava a venda ou concessão de projetos de energia, aeroportos, rodovias, portos, ferrovias e mineração, ocorreu o primeiro leilão de privatização do setor elétrico (ANEEL, 2023).

A maior linha de transmissão do mundo, com 2.539 quilômetros, foi inaugurada em 2019, atravessando cinco estados e 81 cidades. Bem como, no mesmo ano, foi criada a Lei nº 13.848/2019, dispondo sobre o processo organizacional e decisório, a gestão e o controle social das agências reguladoras do mercado energético brasileiro (BRASIL, 2019; ANEEL, 2023).

Em 2021 ocorreu a desestatização da Eletrobras, a criação do Programa de Incentivo à Redução Voluntária do Consumo de Energia Elétrica, no qual, detém como propósito o incentivo ao consumidor de redução de energia no decorrer do período de escassez hídrica, e o anúncio da bandeira tarifária “Escassez Hídrica” (ANEEL, 2023).

Pela Lei nº 14.300 de 2022, foram instituídos o marco legal da Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e a criação do Programa de Energia Renovável Social (PERS) intencionando ao financiamento de instalações de geração fotovoltaica e outras fontes renováveis para consumidores de baixa renda e o início da cobrança tarifária de uso da rede de distribuição (BRASIL, 2022; ANEEL, 2023).

Em 2023, foi inaugurado o primeiro sistema de armazenamento de energia em baterias em larga escala do sistema de transmissão brasileiro, no município de Registro no estado de São Paulo, objetivando atuar como um reforço à rede elétrica a fim de evitar interrupções no fornecimento de energia, contando com 30 MW de potência, sendo capaz de entregar 60 MWh de energia por duas horas (ANEEL, 2023).

Por conseguinte, o marco constitucional sobre acesso à energia elétrica, instituído como direito fundamental, tendo como garantia sua disponibilidade, advém da regulação da produção e comercialização de energia, sob regulamentação da União, no qual, a mesma, estabelece concessões e permissões a empresas para disponibilização do serviço de acesso à energia elétrica (FORNASIER; KNEBEL, 2021).

A imprescindibilidade de regulação do setor elétrico e a promoção de políticas públicas, para delegação do desenvolvimento desse serviço público, decorre dos processos de desestatização ocorridos ao longo do tempo, por meio do Programa Nacional de Desestatização pela Lei nº 8.031/90, a Constituição Federal e inúmeros outras Constituições estaduais brasileira (BRASIL, 1990; FORNASIER; KNEBEL, 2021).

Portanto, cabe as políticas públicas de universalização da energia nortear o acesso à energia mediante ao interesse público, por meio dos agentes privados.

2.1.2. Estrutura institucional

A estrutura institucional do setor elétrico Brasileiro, ao longo dos anos, vivenciou inúmeras variações, alterando-se de um paradigma privado e descentralizado para um de forte participação estatal e gestão centralizada, e, posteriormente, a um de grande participação privada e gestão descentralizada (OLIVEIRA, 2020). As mudanças sucedidas no setor elétrico brasileiro, ao longo das últimas décadas, se apresentam, em resumo, no Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características do Setor Elétrico Brasileiro (OLIVEIRA, 2020).

CARACTERÍSTICAS	ATÉ 1995	ENTRE 1995 E 2003	A PARTIR DE 2004
Empresas	Majoritariamente públicas e verticalizadas	Públicas e privadas desverticalizadas	
Planejamento e coordenação da operação	Coordenado pela Eletrobras e por meio GCOI	Coordenado pelo ONS	
Planejamento da expansão	Coordenado pela Eletrobras por meio do GCPS Indicativo na geração e transmissão	Coordenado pelo CNPE Indicativo na geração Determinativo na transmissão	Coordenado pela EPE Indicativo na geração Determinativo na transmissão
Regulação e fiscalização	Coordenado pela Eletrobras	Coordenado de forma independente pela ANEEL	
Comercialização de energia	Rateio entre as empresas	Coordenado pelo MAE	Coordenado pela CCEE
Administração da transmissão	Não existia	Coordenado pelo ONS	

A coordenação das políticas públicas para operação do setor elétrico brasileiro atualmente compreende o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), o Ministério de Minas e Energia (MME), a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

A Figura 2.3, retrata o fluxograma macro da estrutura institucional atual de governança corporativa do setor de energia brasileira, delineando, de forma sucinta, as suas atribuições.

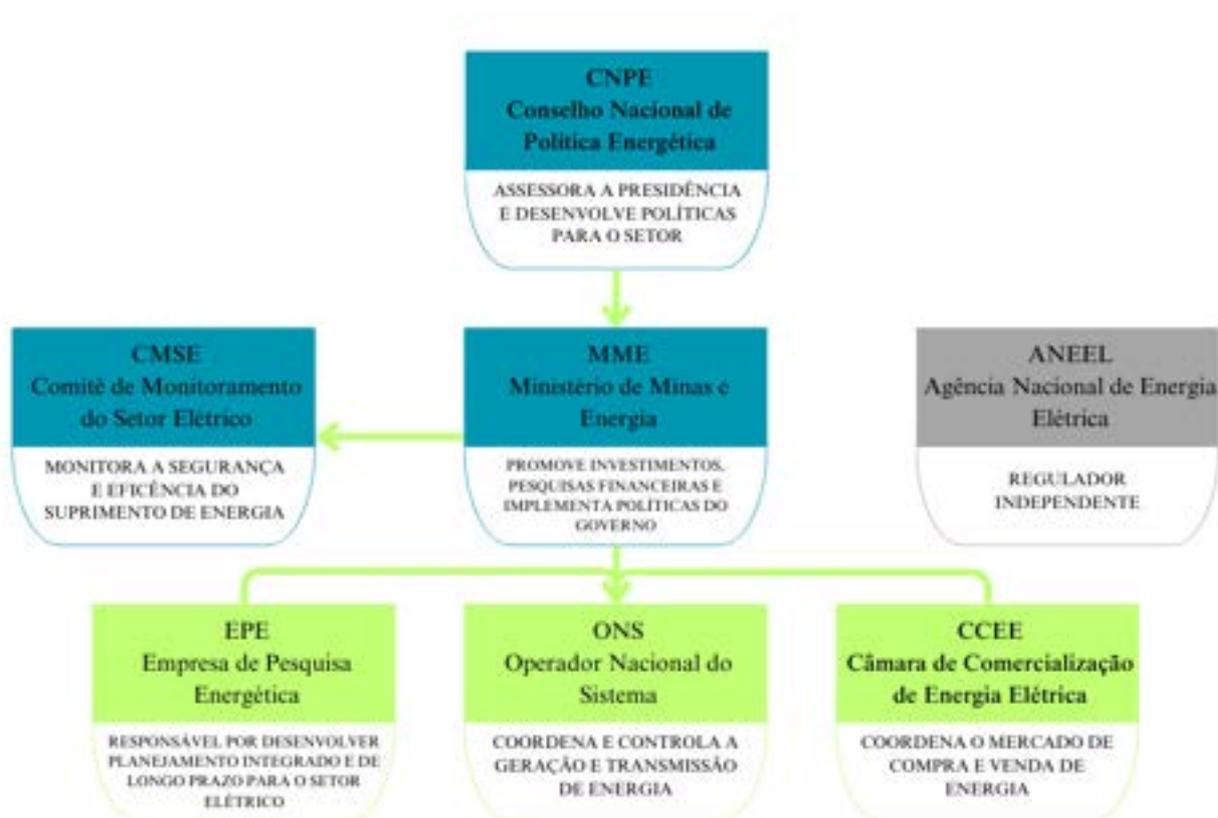


Figura 2.3 - Governança corporativa no setor (ENERGISA, 2023).

O CNPE, criado em 1998 objetivando a responsabilização de formular políticas e diretrizes, corresponde ao órgão interministerial de assessoramento à Presidência da República, no qual tem como prerrogativas assegurar o suprimento de insumos energéticos ao País, assim como, o MME responsabiliza-se pela condução das políticas energéticas, sendo um órgão do Governo Federal (FONSECA *et al.*, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023; ANEEL, 2023).

O CMSE, estabelecido em 2004, órgão coordenado pelo MME, para acompanhamento e avaliação da continuidade e segurança do suprimento elétrico em todo território, objetivando, assim, a segurança de suprimentos, sendo constituído, também, pela Aneel, ANP, ONS, EPE e CCEE (FONSECA *et al.*, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

A Aneel, criada no ano de 1996 como órgão regulador, detém como competência a regulação e fiscalização do processo de produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica (FONSECA *et al.*, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023; ANEEL, 2023).

Bem como, a CCEE engloba as empresas e instituições que propiciam as operações de compra e venda de energia, encarregando-se das operações de curto prazo no mercado energético (FONSECA *et al.*, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

A EPE se caracteriza como uma instituição vinculada ao MME, tendo como objetivo a execução de estudos e pesquisas designadas a subsidiar o planejamento do setor energético, atrelados a energia elétrica, petróleo, gás natural e derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis, biocombustíveis e eficiência energética, tendo os estudos dirigidos a sustentabilidade, minimização dos impactos socioambientais na produção, geração e transmissão de energia em âmbito nacional e internacional (FONSECA *et al.*, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

E, o ONS, instituído em 1998, tendo como propósito zelar pela regulamentação técnica, responsabiliza-se pela operação, supervisão e controle da geração de energia elétrica no Sistema Integrado Nacional, assim como, pela administração da rede básica de transmissão de energia elétrica no Brasil (FONSECA *et al.*, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023; ANEEL, 2023).

2.1.3. Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo

A indústria elétrica, consolidada no final do século XX, passou por importantes mudanças estruturais industrial, regulatória e de propriedade, englobando as atividades de geração, transmissão e distribuição, bem como, a sua interdependência, indispensáveis ao seu funcionamento, carecendo de coordenação técnica, organizacional e institucional, para suas atividades de operação, manutenção e expansão (BRITO, 2002; PEREIRA, FREITAS, E MATOS, 2016).

O setor energético brasileiro compõe-se por um conglomerado de atribuições envolvendo a produção, transformação, estocagem, transporte, distribuição e comercialização de energia, por meio de sistemas de infraestrutura física e de prestação de serviços, garantindo, assim, o suprimento necessário atual e futuro (FONSECA *et al.*, 2020).

Assim, o setor elétrico brasileiro constitui-se por quatro segmentos, geração, transmissão, distribuição e comercialização, no qual a geração tem por função a geração de energia, proveniente de geradores públicos e privados autoprodutores e/ou produtores independentes; a transmissão objetiva o transporte de energia do ponto de geração ao ponto de distribuição ou consumo por empresas públicas ou privadas que detém os lotes; a distribuição ocorre sob a forma de conversão tensão de energia e transporte ao consumidor final por meio de concessionárias de distribuição; e a comercialização correlaciona a compra e venda de energia elétrica através de geradores, comercializadores, consumidores, exportadores e importadores (ENERGISA, 2023).

A oferta e a demanda de energia, envolvendo o setor energético, caracterizam as inúmeras interações entre economia, tecnologia, meio ambiente e política internacional, no qual, a política energética, influenciada pelo aproveitamento da energia, relaciona-se, diretamente, às tecnologias empregues na exploração, extração, produção e utilização das fontes de energia (FONSECA *et al.*, 2020).

A produção de energia, estruturada ao desenvolvimento sustentável, alinha a expansão da oferta, o consumo consciente, a preservação do meio ambiente e a melhoria da qualidade de vida, suprimindo as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade de atendimento de necessidades das gerações futuras (FONSECA *et al.*, 2020).

Por conseguinte, no que se refere a produção, a finalidade abrange a diversificação e a despoluição da matriz energética nacional, assim como, no que tange o consumo, objetiva-se a promoção do emprego de fontes energéticas ambientalmente limpas, aplicação de projetos de eficiência energética perante os consumidores e programas de universalização de atendimento de novos clientes ao sistema elétrico (FONSECA *et al.*, 2020).

O Brasil, almejando o melhoramento da eficiência e autonomia na capacidade instalada de energia, promoveu reformas estruturais nos segmentos de geração, transmissão e distribuição, passando-os a operarem separadamente, com a administração operada por agentes distintos, em que a geração e distribuição tornaram-se segmentos competitivos, em decorrência das existências de inúmeros agentes e do insumo ser homogêneo (SERRANO *et al.*, 2022).

O setor de transmissão de energia, monopólio natural, detém uma estrutura física economicamente inviável frente a competição entre dois agentes de concessão. E, a geração de energia elétrica correlaciona-se como o segmento responsável por produzir a energia e incorporá-la ao sistema de transmissão e distribuição para atendimento aos consumidores finais (SERRANO *et al.*, 2022).

O segmento de geração caracteriza-se como segmentado, abrangendo 7429 empreendimentos geradores em 2019, subdividindo-se em 3009 usinas termelétricas de médio porte, operadas a gás natural, biomassa, óleo diesel, óleo combustível e carvão mineral; 217 hidrelétricas de grande porte, de origem limpa; 426 pequenas centrais hidrelétrica; 699 micros usina hidrelétricas; 606 usinas eólicas; 2469 usinas solares; e 2 usinas nucleares.

O segmento de distribuição, responsabilizado pelo maior esforço no gerenciamento e concentração de inovações no setor elétrico, constitui-se por redes físicas de baixa voltagem na transmissão, conectadas ao sistema de alta voltagem ou plantas geradoras, fazendo, assim, interface entre os consumidores e o mercado de energia, atualmente, com 7.822 km de linhas de transmissão interligadas ao SIN. Tendo como características indispensáveis em sua atuação (SERRANO *et al.*, 2022):

- i. cada sistema corresponde a uma unidade, geograficamente separada e restringida pela localidade atendida;
- ii. constituída por peças homogêneas, arranjas em conformidade as particularidades de localização;

- iii. com funcionamento em ambientes restritivos;
- iv. tem contado direto e imediato com os consumidores finais;
- v. apresenta variações espaciais e temporais de demanda, com confiabilidade de fornecimento;
- vi. detém monopólio natural, em decorrência à presença de economias de escala e especificidade de ativos.

A cadeia de suprimentos da energia elétrica atrela-se, então, a inúmeras linhas de operação produtiva, necessitando, a cada uma, a continuidade no processo, estruturando, assim, uma rede interconectada, tendo sua composição as organizações envolvidas nos fluxos produtivos, desde a fonte primária de energia até o consumidor final (FALCÃO *et al.*, 2019).

A Figura 2.4, retrata os setores e agentes presentes na cadeia de suprimentos do setor elétrico.

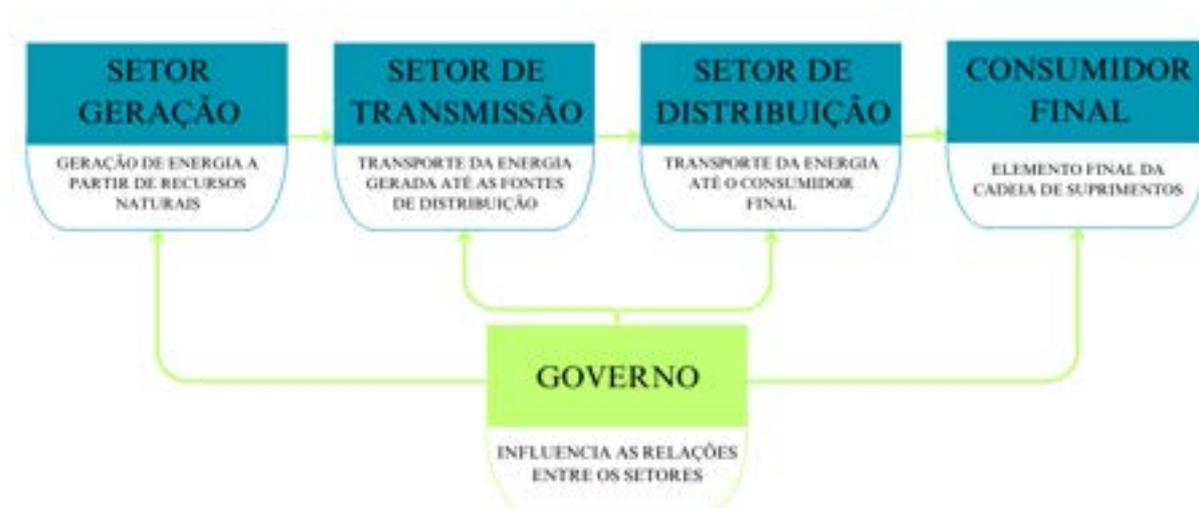


Figura 2.4 - Cadeia do setor elétrico brasileiro (FALCÃO *et al.*, 2019).

Em uma visão ampla, os segmentos presentes na cadeia de suprimentos, atrelados ao governo, enfrentam diretamente influências das decisões governamentais, sujeitando-se aos riscos regulatórios decorrentes de fatores de modificações na estrutura legal, atualizações tarifárias, imposições de limites e restrições, ambos de preservação e defesa do interesse público (FALCÃO *et al.*, 2019).

2.2. Panorama Energético Brasileiro

A expansão e o desenvolvimento de energias renováveis perante o cenário mundial atrelam-se a institucionalização de políticas governamentais que delineiam a redução das emissões de gases de efeito estufa e a segurança energética.

Na atualidade, admite-se a energia como um bem essencial e indispensável, as indústrias, transporte e particular de cada pessoa, no qual, a geração de energia decorre dos recursos naturais disponíveis, e, assim, o encadeamento entre energia e desenvolvimento é intrínseca, na eminência de o consumo de energia per capita mensurar o desenvolvimento dos países.

A matriz energética engloba as parcelas das fontes de energia disponíveis em uma determinada região, compreendendo os recursos energéticos locais, onde, perante a análise da matriz energética, torna-se realizável o planejamento do setor energético, estabelecendo políticas públicas de promoção da qualidade de vida (GEHRKE; GORETTI; ÁVILA, 2021).

O Brasil é reconhecido como o terceiro país da América Latina em ter em sua matriz energética maior participação de energias renováveis, posteriormente ao Paraguai e Uruguai (KORZENIEWICZ, 2021).

A Figura 2.5 delinea as fontes internas de energia presentes na matriz energética brasileira em 2021, em sua composição abrangendo fontes de energia renováveis e não renováveis, no qual, as fontes de energia não renováveis representam cerca de 55%, destacando o petróleo e o gás natural em grande parcela, e as fontes renováveis de energia representam os 45% restante da matriz, evidenciando as fontes de energia derivadas da cana-de-açúcar e da água (GEHRKE; GORETTI; ÁVILA, 2021).

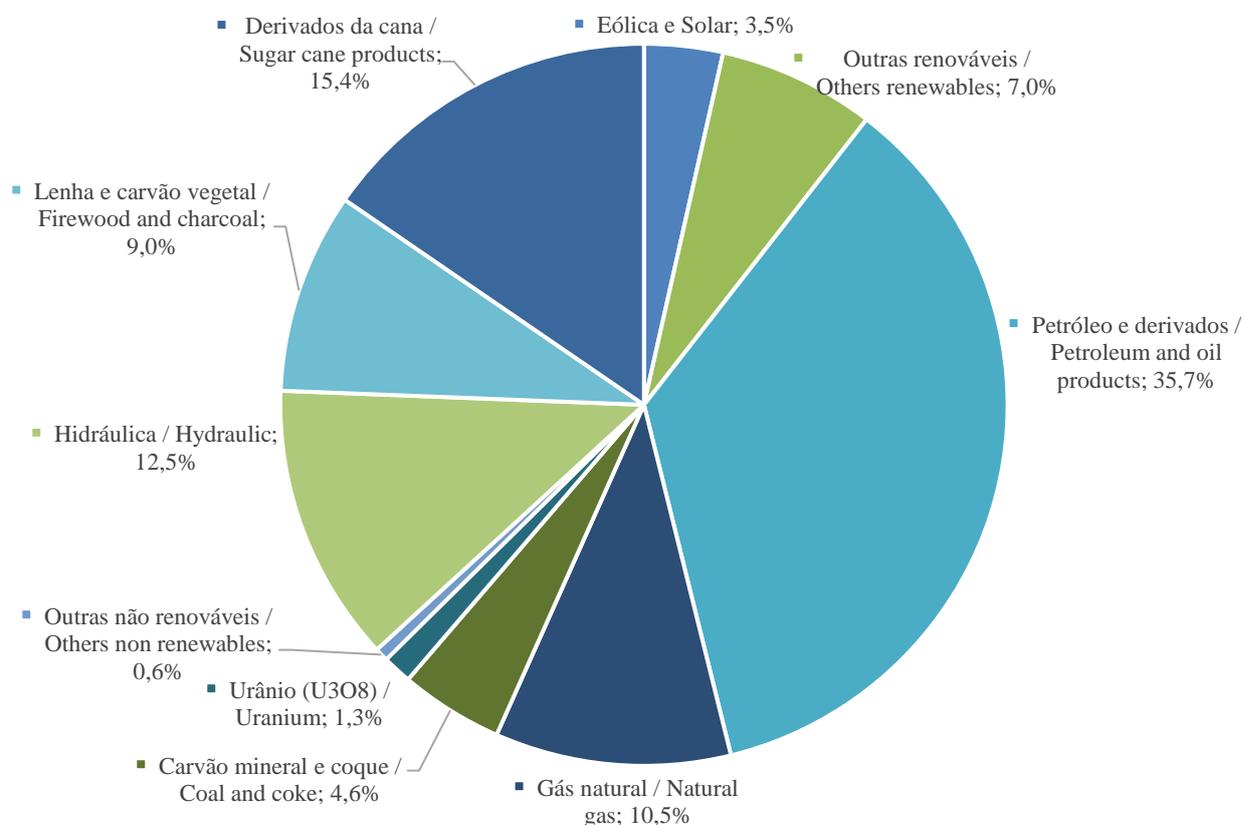


Figura 2.5 - Oferta Interna de Energia em 2021 (EPE, 2022).

A matriz energética brasileira, composta por recursos energéticos renováveis e não renováveis em sua forma de energia primária são retratados conforme Apêndice I, onde as fontes de energia

primária caracterizam-se por recursos naturais aplicados na geração de energia, como a água, o carvão mineral, o petróleo, a biomassa, o vento, a irradiação solar, entre outros, sendo estes elementos apresentados e contabilizados em sua forma química.

As fontes energias não renováveis correspondem a representaram 60,5% da produção de energia primária brasileira em 2021, sendo $203,7 \cdot 10^3$ toneladas equivalentes de petróleo, com um crescimento de 2%, quando comparado ao ano anterior.

Até a década de 1990, a produção de energia primária brasileira evidenciava-se à frente dos outros países por deter uma matriz energética limpa, composta, em grande parte, por energias renováveis. Entretanto, posteriormente a este período, ocorreram mudanças significativas no setor energético, apresentando, assim, a redução na produção de energias renováveis, indo contra ao cenário mundial e as agendas globais com propósito no desenvolvimento sustentável e geração de energia limpa (KORZENIEWICZ, 2021).

Conforme Apêndice I, retratam a produção de energia primária brasileira discriminada por fontes, onde identifica-se que a produção de petróleo expandiu a partir dos anos 90, ultrapassando a produção de energia proveniente da lenha, de maneira que, em 2021, o petróleo correspondia a 45% da produção de energia primária, seguidamente por 15% da cana de açúcar, 15% do gás natural e 9% da energia hidráulica.

Em 2019, o Brasil ocupava o 2º lugar em capacidade instalada de geração hidrelétrica no mundo, atrás apenas da China e o 8º lugar em geração por fontes alternativas no mundo, quando considerada a geração eólica, sendo os três primeiros China, Estados Unidos e Alemanha (EPE, 2022).

No Brasil, a matriz elétrica vem apresentando diversas modificações ao longo do tempo, sendo amplamente compreendida pelo uso de energias alternativas, em sua maior parcela pela energia hidrelétrica, maior fonte geradora brasileira, correspondendo a, aproximadamente, 60% da capacidade instalada (EPE, 2022; GEHRKE; GORETTI; ÁVILA, 2021). No que se refere às fontes de energias empregadas para geração de energia elétrica no país, o percentual do uso das fontes renováveis corresponde a, aproximadamente, 78% (EPE, 2022).

A matriz elétrica constitui-se, também, por outras fontes de energias renováveis, como a solar, a eólica, a biomassa e a hídrica, e fontes não renováveis, de combustíveis fósseis como petróleo, carvão, petróleo e gás natural.

A Figura 2.6 apresenta a participação das fontes na capacidade instalada em 2021 na matriz elétrica brasileira, onde a hidroeletricidade, considerada energia renovável, predomina com a sua capacidade de 60,2%, seguidamente, das fontes não renováveis, com a parcela de 16%.

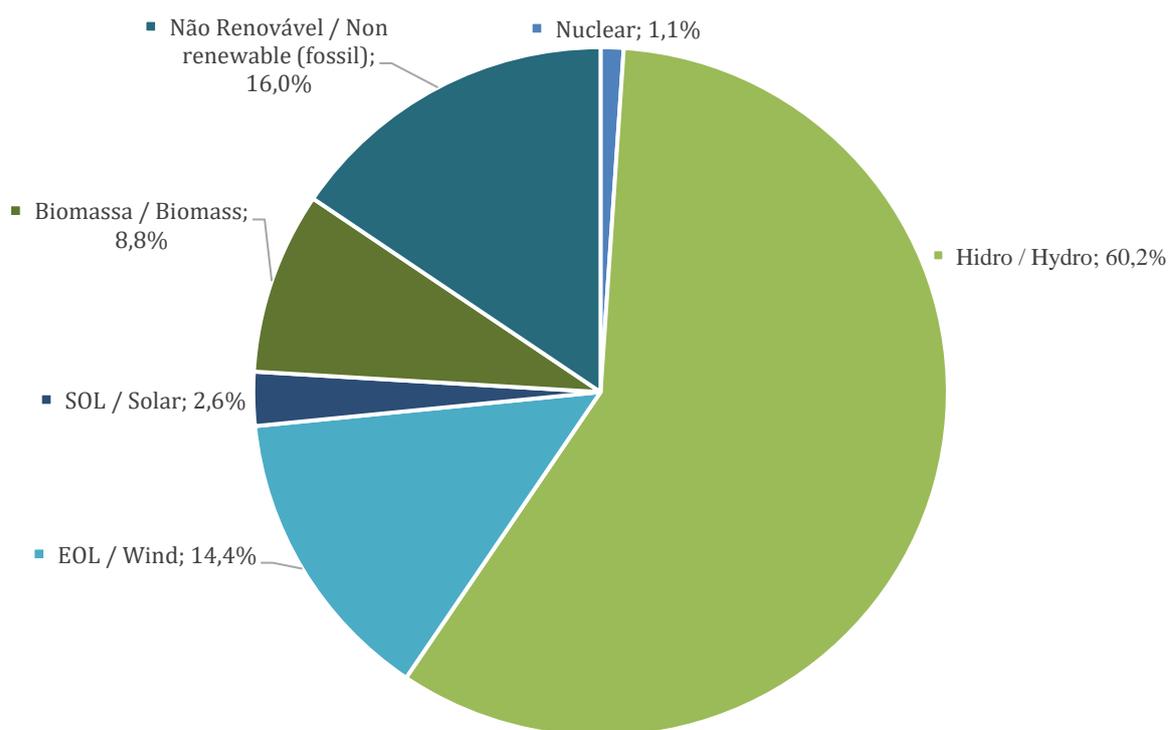


Figura 2.6 - Participação das fontes na capacidade instalada em 2021 (EPE, 2022).

Pressupõe-se que, até 2040, o setor de energia renovável se torne responsável por quase metade da matriz elétrica mundial ou a maior parcela de sua energia por meio de fontes renováveis, promovendo, assim, o uso mais eficiente da energia em inúmeros setores da economia e a diversificação da matriz energética (GEHRKE; GORETTI; ÁVILA, 2021).

2.2.1. Caracterização das fontes de energia brasileira

A energia, definida pela física como a capacidade de um corpo, substância ou sistema de realizar trabalho, por meio da conversão de fontes primárias, pode ser ponderada como renovável ou não renovável, em conformidade com a fonte empregada para a sua produção.

As energias renováveis são correlacionadas aos processos e ciclos naturais renováveis da Terra, caracterizando-se como fontes que detêm a capacidade de se manter no longo prazo, uma vez que seus recursos são infinitos. Diferentemente, as fontes de energias não renováveis, dispõem de quantidades finitas e limitadas, e se tornam insuficientes à medida que são empregadas.

Segundo a Aneel, as fontes de energias estão relacionadas aos recursos naturais utilizados para impulsionar maquinários e equipamentos a gerar energia, tendo como recursos a água, carvão, derivados do petróleo, biomassa, vento, irradiação solar e gás natural (EPE, 2021).

A fonte hidráulica corresponde a maior fonte de participação na oferta interna de energia elétrica brasileira, com 56,8%, constituída por Usinas (UHE), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), tendo como características energéticas a disponibilidade de recursos no país, a comodidade de aproveitamento e rendimento e sua especificidade renovável (LOSEKANN E HALLACK, 2018; EPE, 2022; KORZENIEWICZ, 2021).

A fonte eólica, resultante da energia cinética oriunda das massas de ar em movimento, tem a parcela de 10,6% na oferta interna de energia elétrica brasileira, sua geração dar-se pela conversão de energia proveniente dos ventos através de turbinas eólicas ou aerogeradores, atualmente, entre as mais modernas fontes de energia e em expansão (LOSEKANN E HALLACK, 2018; EPE, 2022; KORZENIEWICZ, 2021).

A biomassa, proveniente de origem animal ou vegetal, considerada matéria orgânica, apresenta-se em parcela de 8,2% na oferta interna de energia elétrica brasileira, considerada com uma forma indireta de energia solar, onde a sua extração se delineia de forma tradicional, pela combustão de madeira, lenha e resíduos agrícolas ou de forma urbana/moderna, pela produção de biocombustíveis (LOSEKANN E HALLACK, 2018; EPE, 2022; KORZENIEWICZ, 2021).

A fonte solar, representando 2,47% da energia na oferta interna de energia elétrica brasileira, está em constante expansão, onde o seu processo de obtenção da energia dar-se pela captação da potência elétrica dos raios solares, por meio de painel rígido, filmes finos e a célula orgânica (LOSEKANN E HALLACK, 2018; EPE, 2022; KORZENIEWICZ, 2021).

O gás natural, segunda maior fonte de energia de participação na oferta interna de energia elétrica brasileira, correspondendo a 12,8%, representa uma determinada substância em estado gasoso, tendo como características físico-químicas naturais, não renováveis, presente em reservatórios subterrâneos resultante da decomposição de matéria orgânica (LOSEKANN E HALLACK, 2018; EPE, 2022).

O petróleo, também presente na oferta interna de energia elétrica brasileira, representando sua parcela em 3%, caracteriza-se como o combustível fóssil de queima mais limpa e abundantemente disponível na natureza, encontrando em ambiente terrestre e marítimo, sendo originada pela decomposição de material orgânico, posteriormente, submetido aos processos de extração, refinamento e distribuição, entretanto, mesmo possuindo vantagens socioeconômicas, essa fonte de energia possui desvantagens socioambientais (LOSEKANN E HALLACK, 2018; EPE, 2022; KORZENIEWICZ, 2021).

O Brasil dispõe da 6ª maior reserva de urânio do mundo, tendo a energia nuclear ou energia nucleoeletrica 2,2% da parcela na oferta interna de energia elétrica brasileira, onde apresenta sua geração pela fissão de urânio em um reator nuclear, onde pelo calor gerado do urânio produz-se a

corrente elétrica pelos circuitos primário, secundário e de refrigeração, sistema equivalente ao de uma termelétrica convencional (LOSEKANN E HALLACK, 2018; EPE, 2022).

O carvão mineral e seus derivados detém 3,9% da oferta interna de energia elétrica brasileira, sendo caracterizado como um composto de orgânicos sólidos fossilizados ao longo dos anos, sua exploração e mineração ocorrem sob forma subterrânea ou a lavra a céu aberto, constituindo-se por dois terços dos recursos energéticos não renováveis do país, com suas reservas 20 vezes maiores do que as de petróleo e 75 vezes superiores as de gás natural, entretanto, causa inúmeros danos socioambientais e emissão de gases poluentes (REZA, 2018; EPE, 2022; KORZENIEWICZ, 2021).

2.2.1.1. Hidroeletricidade

Grande parte da energia elétrica empreendida no Brasil provém das usinas hidrelétricas, tendo o potencial hidrelétrico existente, em 2021, estimado, em 246 GW, com 44% efetivamente aproveitados, onde, a região Norte detém o maior potencial disponível com 40% no território nacional, seguidamente das regiões Sudeste com 17,7%, Sul com 17,1%, Centro-Oeste 16,2% e Nordeste com 9% (EPE, 2022).

A capacidade instalada de geração elétrica brasileira dá-se por fontes hídricas, solares, eólicas, nucleares e térmicas, conforme evidenciado na Figura 2.7. Onde, no ano de 2022 a capacidade total corresponde a 189 mil MW, no qual, a geração por fonte hídrica corresponde a 58% do total.

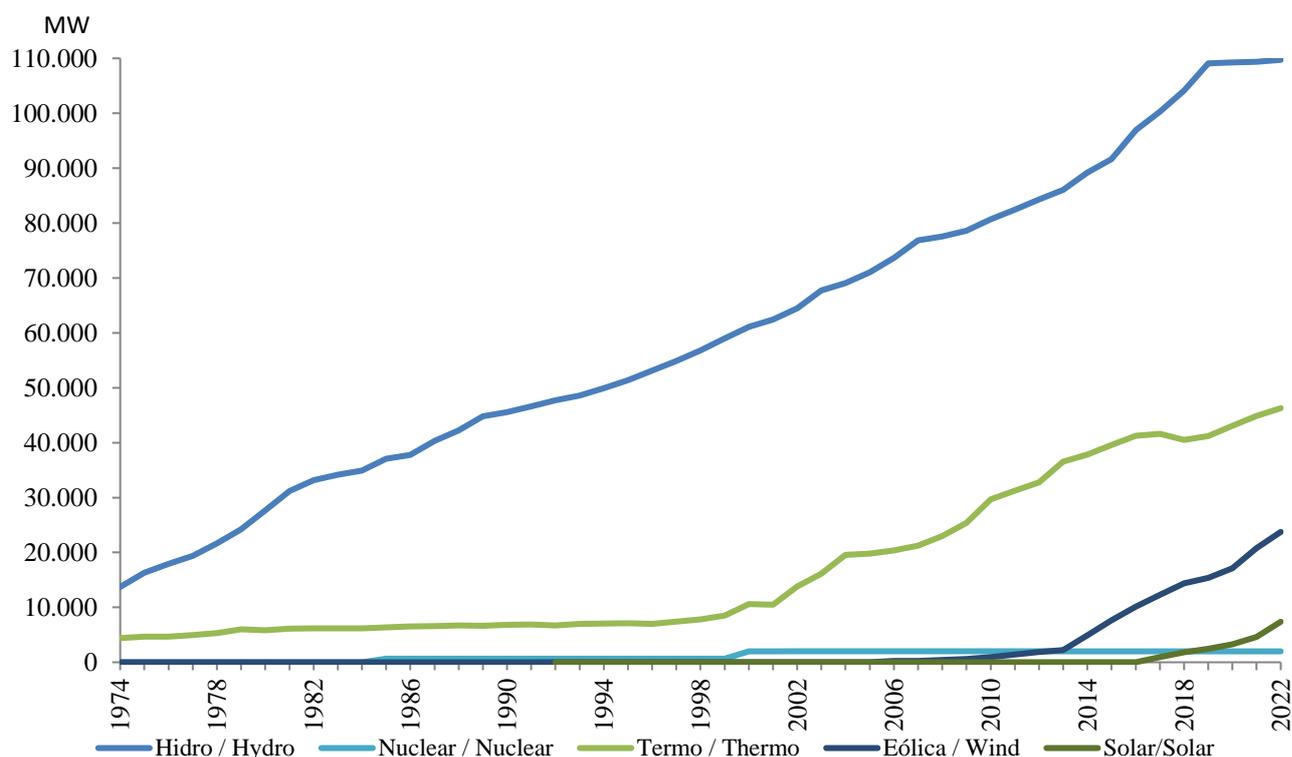


Figura 2.7 - Capacidade Instalada de Geração Elétrica entre os anos de 1974 a 2022 (EPE, 2023).

Em defluência ao grande potencial hidrelétrico brasileiro, a partir da primeira metade do século XX, iniciaram-se a implantação das usinas hidrelétricas no país, dispondo de, aproximadamente, 1% do potencial hidrelétrico disponíveis no período. Atualmente, a Usina de Itaipu Binacional caracteriza-se como a segunda maior hidrelétrica do mundo com, representando o 6º lugar em potência instalada, 14 mil MW de capacidade instalada no ano de 2021 (SILVEIRA, 2018).

Por conseguinte, a Usina de Itaipu Binacional representa um marco no setor elétrico brasileiro, desde o Tratado de Itaipu em 1973, no qual, a mesma, proporcionou e expandiu a instalação e exploração de fontes de energias renováveis no país (SILVEIRA, 2018).

Em geração hidrelétrica, o Brasil detém o 2º lugar, como 398 TWh, correspondendo a 9,2% de produção mundial, ficando atrás apenas da China, com 1307 TWh (EPE, 2022).

As fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil, onde a composição setorial do consumo de eletricidade abrange os setores energéticos, residencial, comercial, público, agropecuário, transportes e industrial, tendo, em 2021 um consumo final de, aproximadamente, 50 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (EPE, 2022).

O estímulo ao desenvolvimento de energias renováveis no Brasil objetiva a diversificação das fontes frente as hidrelétricas mediante a segurança energética, possibilitando, assim, a redução dos impactos sociais e ambientais, bem como a vulnerabilidade hídrica do país (GOLDEMBERG, LUCON E FREIRE, 2008).

O princípio da crise elétrica ocorrida em 2001 no Brasil originou-se na década de 1990, pela promoção governamental de reformas no setor elétrico brasileiro, quanto a desverticalização organizacional, a expansão da participação de empresas privadas, os estímulos a competição dos setores e a promoção do livre acesso, nos quais, ocorreram, simultaneamente, ao processo de reestruturação econômica de ajuste fiscal e controle da inflação (TOLMASQUIM, 2002; SIQUEIRA, 2002; ALMEIDA, 2022).

Assim, mediante ao cenário, ocorreram falhas de coordenação e a complexidade de desenvolvimento de um mercado livre confiável, onde a expansão da demanda por eletricidade, no decorrer da reestruturação, não foi alcançada pelos setores de geração e transmissão (ALMEIDA, 2022).

No ano de 2001, os reservatórios hídricos detinham uma capacidade hídrica insuficiente para o atendimento a demanda, sendo necessária a adoção de medidas emergenciais de contenção, na qual, ocorreu a obrigatoriedade de redução do consumo elétrico, por meio do racionamento (TOLMASQUIM, 2002; ALMEIDA, 2022).

Ainda que como estímulos governamentais a reeducação energética e desenvolvimento do consumo consciente de energia elétrica, bem como, a instauração do processo de contratação de geração emergencial, criação do Programa Prioritário de Termoeletricas (PPT) e execução dos Leilões de Capacidade, o Brasil sofreu graves crises do setor, sendo a maior em 2003, considerada com o apagão (ALMEIDA, 2022).

O período do “apagão”, em 2003, foi ponderado como um erro crucial de planejamento governamental, uma vez que foram emitidos inúmeros indicativos ligados ao setor acerca do desastre futuro, onde o governo ignorou as previsões a fim de refrear a crise energética, onde, posteriormente, intensificou-se o racionamento de energia e as práticas de conscientização de uso racional (SILVEIRA, 2018).

Entretanto, em 2015, o Brasil sofreu outra crise do setor energético, acarretando ao aumento das tarifas de energia (SILVEIRA, 2018). Uma vez que, entre os anos de 2011 a 2015, o país enfrentou um quadro hidrológico crítica, mesmo sendo considerado um país com os maiores percentuais de água doce do planeta, correspondendo a 12% (FALCÃO *et al.*, 2019).

O Tabela 2.2, retrata as predominantes causas e consequências da crise brasileira do setor energético, intensificada entre os anos de 2014 e 2015.

Tabela 2.2 - Causas e Consequências da crise hídrica (FALCÃO *et al.*, 2019).

PRINCIPAIS CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DA CRISE HÍDRICA	
Causas	Consequências
Falta de precipitações chuvosas regulares (estiagem)	Diminuição do nível de água nos reservatórios
Degradação dos recursos naturais	Insuficiência de água para abastecimento da população
Consumo excessivo de água	Redução na quantidade de energia geradas nas usinas hidrelétricas
Desperdício de água durante o abastecimento da população	Elevação do preço da energia para o consumidor final

A crise hídrica brasileira tem como sua principal causa a ausência de precipitações chuvosas, onde, em 2014, os seus níveis ficaram abaixo do esperado, decorrendo em baixas históricas nos níveis de água em reservatórios em todo o país, tomando como contribuição o desmatamento dos biomas terrestres, deterioração dos biomas aquáticos, aumento da poluição atmosférica e desmatamento, bem

como, o desperdício e consumo exagerado (COLLISCHONN E PAIVA, 2016; MARENGO, NOBRE, SAMPAIO, SALAZAR E CAMARGO, 2019).

Por conseguinte, a crise hídrica ocasionou sérias consequências para o Brasil, como a falta de água para o abastecimento da população e o aumento nas contas de energia elétrica, impactando o consumidor final (FALCÃO *et al.*, 2019).

No Brasil, as hidrelétricas constituem-se por serem responsáveis pela maior parte da energia elétrica gerada, entretanto, nos períodos de crise, a produção sofreu drástica redução, em decorrência ao declínio do volume de água dos reservatórios, consequentemente, aumentando o uso do sistema de geração de energia por usinas térmicas (FALCÃO *et al.*, 2019), conforme evidenciado na Figura 2.8, onde entre os anos de 2000 a 2015 houve um aumento substancial no uso de fontes não renováveis na geração de energia elétrica (EPE, 2023).

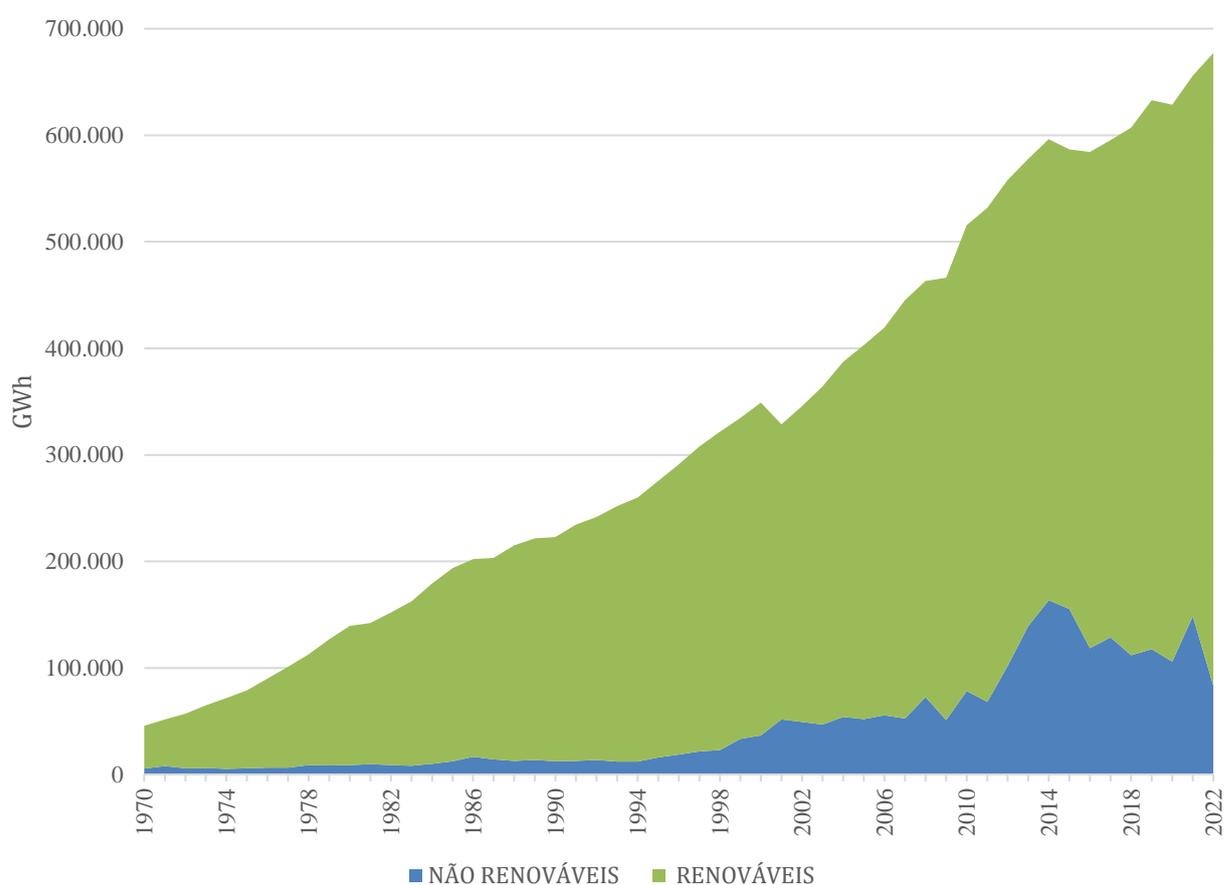


Figura 2.8 - Geração de Energia Elétrica Total entre 1970 e 2022 (EPE, 2023).

Pelo baixo nível de água nos reservatórios, e, consequentemente, a redução na geração de energia pelas usinas hidrelétricas, outras fontes de geração primárias de energia necessitaram serem acionadas, para que fosse evitado o colapso no fornecimento de energia no país.

Assim, em 2015, o consumidor final foi o maior afetado pela crise hídrica, no qual ocorreram elevações nas contas de energia, pela implementação do sistema de bandeiras tarifárias, como custo

adicional, tendo, o mesmo, base nas condições para sua geração. Assim como, o setor elétrico teve como consequência a sua desestruturação frente aos fluxos econômicos das empresas do setor (FALCÃO *et al.*, 2019).

Por conseguinte, no decorrer do período de crise econômico, social e hídrica, toda a cadeia produtiva do setor é impactada, ocasionando mudanças recorrentes, desde a esfera social até a governamental.

2.3. Comercialização de energia elétrica no Brasil

Entre as décadas de 1940 e 1980, com o predomínio das estatais na indústria de energia elétrica brasileira, a expansão do fornecimento de energia elétrica e à presença do poder regulador do Estado, a comercialização de energia caracterizava-se por ser totalmente regulada e submetida ao regime tarifário, bem como, as relações de suprimento e fornecimento eram instituídas pelo Decreto n° 41.019/1957 (BRASIL, 1957; MAGALHAES, 2009).

Ainda neste período, com a forte presença estatal, a indústria de energia elétrica brasileira se expandiu, tendo um aumento de, aproximadamente, 500% relacionado a sua capacidade de produção, entretanto, em decorrência da crise econômica mundial, na década de 1980, a indústria foi acometida, impactando, assim, no modo de organização e modelo de financiamento, fundamentada em captação externa e impostos setoriais (MAGALHAES, 2009).

No Brasil, a Constituição Federal de 1988 sancionou a livre concorrência e a livre iniciativa, bem como, conjecturou que os serviços e instalações de energia elétrica se destinariam a exploração mediante concessão, permissão ou autorização (MAGALHAES, 2009).

A energia elétrica introduziu-se, então, como mercadoria susceptível a livre comercialização a partir da década de 90, em decorrência da desregulamentação dos setores elétricos em inúmeros países, onde, nos mesmos, anteriormente, decorriam o monopólio de estatais, com forte regulamentação para impedimentos de interferências dos preceitos de mercado no setor (CASTRO; LYRA FILHO, 2005).

Ademais, a Lei n° 8.631 de 1993 extinguiu a política de equalização tarifária, a Lei n° 8.987 de 1995 regulamentou as concessões de serviços públicos e estabeleceu parâmetros para a política tarifária e a prestação de serviços adequados e a Lei n° 9.074 de 1995 estabeleceu o direito de livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição de energia, originando, assim, o mercado livre e competitivo de energia elétrica (BRASIL, 1993; BRASIL, 1995a; BRASIL, 1995b; MAGALHAES, 2009).

E, em 1996, o Governo Federal iniciou o desenvolvimento do plano de reestruturação do mercado de energia elétrica, no qual, foi proposto que ocorresse a privatização de empresas estatais;

a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo responsável pela fiscalização e regulação do setor; a criação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), para o registro, a contabilização e a liquidação das operações envolvendo a compra e venda de energia elétrica; a criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), para operacionalizar, de forma coordenada, os recursos energéticos e o sistema de transmissão interligado; redução da contratação sob a forma regulação, assim, ocorrendo a liberação para a comercialização no mercado livre; e alteração do regime econômico-financeiro das concessões (MAGALHAES, 2009).

Com inúmeros problemas decorrentes do plano de reestruturação do mercado energético, as Leis nº 10.438/2002 e nº 10.604/2002 foram instituídas, prevendo a obrigatoriedade da execução de procedimentos públicos e transparentes para a comercialização de energia elétrica pelas geradoras estatais, eliminando, também, a possibilidade de as distribuidoras negociarem a compra de energia, obrigando-as a participação em leilões de energia (BRASIL, 2002a; BRASIL, 2002b; MAGALHAES, 2009).

Em 2003 ocorreu, novamente, uma reforma fundamental para o setor de energia elétrica, pelo aperfeiçoamento do modelo passado, e, assim, determinada pelas Leis nº 10.847/2004 e nº 10.848/2004, regulamentadas pelos Decretos nº 5.081/2004, nº 5.163/2004, nº 5.175/2004, nº 5.177/2004 e nº 5.184/2004, no qual foram instituídas: o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR); a proibição da venda de energia elétrica livremente negociados entre distribuidora de consumidores livres e a obrigatoriedade da compra mediante a leilões no ACR; a alternativa de outorga da concessão/autorização para geração e venda de energia as distribuidoras pertencentes ao ACR; a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), para contribuição do planejamento setorial (BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004b; BRASIL, 2004c; BRASIL, 2004d; BRASIL, 2004e; BRASIL, 2004f; BRASIL, 2004g; MAGALHAES, 2009).

A Tabela 2.3, retrata a evolução do modelo do setor de energia elétrica no Brasil comparando o modelo até 1995, o modelo RESEB/Revitalização, ocorrido entre 1995 e 2003, e o novo modelo, iniciado em 2004 e em exercício atualmente (MAGALHAES, 2009).

Tabela 2.3 - Evolução da Indústria de Energia Elétrica Brasileira (MAGALHAES, 2009) *apud* Caderno Visão Geral das Operações na CCEE, 2009.

MODELO ANTIGO (ATÉ 1995)	MODELO RESEV/REVITALIZAÇÃO (1995 A 2003)	NOVO MODELO (2004)
Recursos públicos	Recursos públicos e privados	Recursos públicos e privados
Empresas verticalizadas	Empresas segmentadas por atividade	Empresas segmentadas por atividade
Predominantemente estatais	Abertura e ênfase na privatização das empresas	Convivência entre empresas estatais e privadas
Monopólios e competição inexistente	Competição na geração e comercialização	Competição na geração e comercialização
Consumidores cativos	Consumidores livres e cativos	Consumidores livres e cativos
Tarifas reguladas em todos os segmentos	Preços livremente negociados na geração e comercialização	Preços negociados no ACL e menor tarifa obtida em leilão no ACR
Mercado regulado	Mercado livre e regulado	Mercado livre e regulado
Planejamento determinativo pelo e Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas (GCPS)	Planejamento indicativo pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)	Planejamento centralizado com o apoio da EPE e do CMSE
Contratação: 100% do mercado	Contratação: 85% do mercado (até agosto/2003) e 95% do mercado (após setembro/2003)	Contratação: 100% do mercado
Sobras/déficits do balanço energético rateados entre compradores	Sobras/déficits do balanço energético liquidados no MAE	Sobras/déficits do balanço energético liquidados na CCEE ou entre distribuidoras mediante Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficit

Atualmente, no setor elétrico transcorre o conflito entre interesses, entre as esferas públicas e privadas, por ser um setor híbrido e pelos riscos de mercado que condicionam indistintamente as empresas (CASTRO; LYRA FILHO, 2005).

A contratação bilateral de energia caracteriza-se como instrumento empregue na redução dos efeitos das ameaças nos investimentos, garantindo, assim, o preço futuro e a redução da exposição ao preço no mercado de curto prazo (CASTRO; LYRA FILHO, 2005).

A comercialização de energia no Ambiente de Contratação Livre (ACL) ocorre mediante a livre negociação entre compradores e vendedores, em acordo livremente estabelecidos entre as partes, sendo registrado o contrato na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Bem como, a comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada destina-se a contratação por concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição, ocorrendo,

principalmente, por meio de leilões, promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com diretrizes fixadas pelo Ministério de Minas e Energia (MME), tendo como participantes os agentes permissionários ou autorizados de geração e os autorizados de comercialização ou importação de energia.

2.3.1. Mecanismos de comercialização

Com a criação do mercado livre, em 1995, a comercialização de energia elétrica proporcionou aos agentes a liberdade de negociação e transação, entretanto, ocorrendo algumas mudanças no modelo em 2002. E, posteriormente, no ano de 2004 a comercialização de energia elétrica segmentou-se em dois ambientes, o de contratação regulada e o de contratação livre (MAGALHAES, 2009).

No que tange o Ambiente de Contratação Livre, o mecanismo de transação ocorre mediante a contratos livremente negociados entre os geradores, comercializadores, consumidores livres e especiais, apresentando dinâmica distinta entre os agentes participantes, as formas de contratação e de competição, no qual as partes dispõem da liberdade de ajuste de montantes, preços, prazos e flexibilidade no uso da energia contratada (MAGALHAES, 2009).

Ademais, o Ambiente de Contratação Livre rege-se pelas leis, decretos e resoluções normativas, abrangendo as Leis nº 9.074/1995 e nº10.848/2004, o Decreto 5.163/2004 e as Resoluções Normativas da ANEEL nº 281/1999, nº 109/2004, nº 247/2006 e nº 376/2009, no qual, servindo, também, como referência para a celebração, entre os agentes, dos Contratos de Compra e Venda de Energia Elétrica (BRASIL, 1995b; BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004c; ANEEL, 1999; ANEEL, 2004a; ANEEL, 2009).

As Tabela 2.4, 2.5 e 2.6 retratam a relação das principais normas aplicáveis ao exercício de comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Livre.

A Tabela 2.4 apresenta uma síntese de leis relacionadas ao setor de energia elétrica no Brasil, abordando diversos aspectos desde a eliminação da política de equalização tarifária até a criação de órgãos e ambientes específicos para a contratação e regulação do mercado.

Tabela 2.4 - Leis da comercialização de energia (BRASIL, 1993; BRASIL, 1995a; BRASIL, 1995b; BRASIL, 1996; BRASIL, 1998a; BRASIL, 1998b; BRASIL, 2002a; BRASIL, 2002b; BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004b)

LEIS

8.631/1993	Elimina a política de equalização tarifária, mantendo o regime tarifário de serviço pelo custo.
8.987/1995	Disciplina as concessões de serviço públicos, inclusive a política tarifária e parâmetros para prestação de serviço adequado
9.074/1995	Disciplina a figura do consumidor livre, além de outras questões
9.427/1996	Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica, tratando dos consumidores especiais e do desconto tarifário para a comercialização advinda de fontes incentivadas, além de outros assuntos
9.648/1998	Disciplina a transição do mercado regulado para o mercado livre mediante liberação gradual da energia elétrica e confere tratamento para os processos de privatização, além de outras questões.
10.438/2002	Dispõe sobre diversas medidas, das quais se destaca a obrigatoriedade de venda de energia elétrica pelas geradoras estatais por meio de leilões
10.604/2002	Disciplina diversos assuntos, dos quais se destaca a vedação à aquisição de energia elétrica livremente negociada pelas distribuidoras
10.847/2004	Cria a Empresa de Pesquisa Energética
10.848/2004	Cria o Ambiente de Contratação Livre e o Ambiente de Contratação regulada, tratando das características de cada um.

A Tabela 2.5 apresenta um resumo dos decretos relacionados à comercialização de energia elétrica no Brasil, detalhando a regulamentação e disciplina de diferentes aspectos do setor, no qual, esses decretos desempenham um papel crucial na organização, operação e regulamentação do setor elétrico brasileiro, proporcionando diretrizes para diferentes entidades e organismos envolvidos na comercialização e gestão da energia elétrica.

Tabela 2.5 - Decretos da comercialização de energia (BRASIL, 1957; BRASIL, 1997b; BRASIL, 1996; BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004c; BRASIL, 2004d; BRASIL, 2004e; BRASIL, 2004f; BRASIL, 2004g)

DECRETO

41.019/1957	Regulamenta os serviços de energia elétrica, sendo que diversas de suas disposições estão revogadas por norma posterior.
2.335/1997	Regulamenta a Lei nº 9.427/1996, tratando das atribuições da agência reguladora.
2.655/1998	Regulamenta Lei nº 9.648/1998, tratando do mercado atacadista de energia elétrica, do operador nacional e outras questões – diversas disposições desta norma já foram revogadas por norma posterior.
5.081/2004	Disciplina o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)
5.163/2004	Regulamenta e Lei nº 10.848/2004, detalhando a comercialização no ACR e no ACL
5.175/2004	Disciplina o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE)
5.177/2004	Disciplina a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)
5.184/2004	Disciplina a Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

A Tabela 2.6 apresenta resumos das resoluções emitidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que regulamentam diversos aspectos relacionados à comercialização de energia elétrica no Brasil, onde essas resoluções desempenham um papel fundamental na definição das regras e diretrizes que orientam a comercialização de energia elétrica no país.

Tabela 2.6 - Resoluções da comercialização de energia (ANEEL, 1998a; ANEEL, 1998b; ANEEL, 1998c; ANEEL, 1999; ANEEL, 2000; ANEEL, 2003a; ANEEL, 2003b; ANEEL, 2004a; ANEEL, 2004b; ANEEL, 2008; ANEEL, 2009b)

RESOLUÇÕES ANEEL

249/1998	Estabelece as condições de participação dos agentes no Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE) e diretrizes para estabelecimento do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE).
264/1998	Estabelece as condições relativas a contratação de energia elétrica pelos consumidores livres; revogado pela RN n° 376/2009
265/1998	Estabelece as condições relativas ao exercício das atividades de comercialização de energia elétrica no mercado de livre negociação
281/1999	Disciplina condições de acesso aos sistemas elétricos de distribuição e de transmissão, compreendendo responsabilidades e tratamento tarifário
290/2000	Homologa as Regras do MAE e fixa as diretrizes para sua implantação gradual
91/2003	Estabelece as condições para implementação do limite de contratação de energia elétrica para agentes participantes do MAE
353/2003	Estabelece as condições gerais para a venda exclusiva de excedentes de energia elétrica, decorrentes da liberação dos Contratos Iniciais ou Equivalentes, mediante licitação, na modalidade de leilão público, para consumidores finais
77/2004	Dispõe sobre a redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição na comercialização da energia elétrica de fontes incentivadas
109/2004	Norma que aprova a Convenção de Comercialização da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)
247/2006	Trata da comercialização de energia elétrica de fontes incentivadas com consumidores especiais
323/2008	Estabelece os critérios e procedimentos para a informação, registro, aprovação e homologação, dos contratos de comercialização de energia elétrica
336/2008	Aprova a alteração das Regras de Comercialização de Energia Elétrica, referente à metodologia de cálculo das garantias financeiras, associadas à liquidação do mercado de curto prazo
373/2009	Estabelece as condições para contratação de energia elétrica, por consumidor livre, no âmbito do Sistema Interligado Nacional (SIN) e revoga a Resolução ANEEL 246/1998

A Figura 2.9 apresenta, ao longo do tempo os contratos validos e vigentes registrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, abrangendo o Ambiente de Contratação Livre e o Ambiente de Contratação Regulada (MME, 2019).

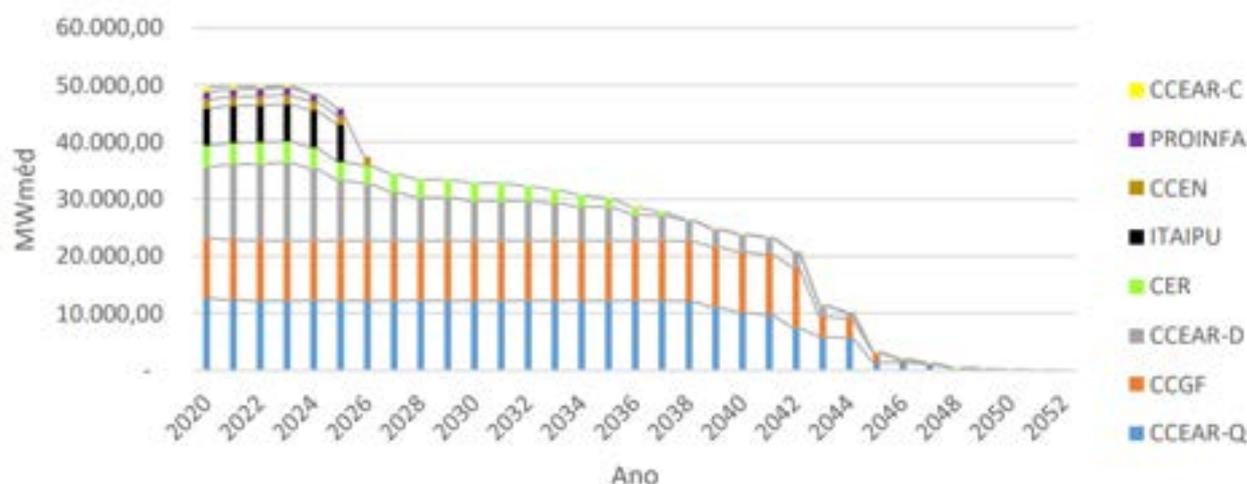


Figura 2.9 - Contratos registrados na CCEE no ACL e ACR (MME, 2019).

As inúmeras regras de comercialização, desordenadas entre as Leis, Decretos e Normas Regulamentadoras, e requisitos a serem alcançados pelos agentes de geração dificulta a evolução do desenho regulatório e incomplexibilidade do sistema (MADUREIRA, 2009; OLIVEIRA E ROCHA, R, 2014).

Ademais, no decorrer da evolução regulamentadora, tendo a preservação do mercado livre, evidencia-se que a regulação acerca do Ambiente de Contratação Livre se intensificou e aprimorou, onde, o mesmo, atualmente, possui papel fundamental na formatação e efetivação das transações de energia (FARIA, PEREIRA E ROCHA, 2018; MACEDO, SILVA E LIMA, 2014).

Diferentemente, a formalização da contratação de energia, por meio de leilões, ocorre pelo Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR), subdividindo-se em Contratos de Cota de Garantia Física; Contratos de Cotas de Energia Nuclear; Contratos de Itaipu; Contratos do PROINFA; Contratos de Leilão de Ajuste; e Contratos Bilaterais Regulados (CCEE, 2023).

Os aspectos legais e regulatórios da comercialização de energia frente ao Ambiente de Contratação Regulada, inicialmente, teve como marco regulatório a Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004, dispondo sobre a comercialização de energia elétrica, e alterando as Leis nº 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências, ademais, regida Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004, onde, o mesmo, regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo

de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências (BRASIL, 1971; BRASIL, 1993; BRASIL, 1995b; BRASIL, 1996; BRASIL, 1997a; BRASIL, 2000; BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004c).

Com a criação da Lei nº 10.848/04, o marco regulatório do setor elétrico brasileiro foi alterado, modificando, assim, as regras de comercialização de energia elétrica, de licitação para outorga de concessões, de obrigatoriedade da segmentação de atividades das concessionárias de distribuição de energia elétrica, de relação dos agentes consumidores livres e cativos, dentre outras (BRASIL, 2004a).

Pela Lei nº 10.848/04 instituiu-se, também, a obrigatoriedade dos leilões, tornando-se o principal mecanismo para a contratação do suprimento de energia elétrica pelos agentes de distribuição e estabeleceu as condições gerais e as diretrizes para a contratação regulada de energia, propiciando a modicidade tarifária, as garantias, os prazos de antecedência de contratação e de sua vigência, as condições e limites para o repasse do custo de aquisição de energia elétrica para os consumidores finais (BRASIL, 2004a).

Em suma, o processo de comercialização de energia elétrica, abrange, também, a Resoluções Normativas nº 109/2004 que institui a Convenção de Comercialização de Energia Elétrica; nº 622/2014 dispendo sobre as garantias financeiras e a efetivação de registros de contratos de compra e venda de energia elétrica, associados à comercialização no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica; e nº 783/2017 que estabelece os critérios e procedimentos para controle dos contratos de comercialização de energia elétrica (ANEEL, 2004a).

No que tange o Ambiente de Contratação Regulado, o mecanismo de leilão, para a compra e venda de energia elétrica, caracteriza-se como determinador de preços e montantes contratados, onde pelo Decreto 5.163/04, ao regulamentar a Lei 10.848/04, conjecturou a realização de leilões de energia nova e de energia existente, ambos para contratação da energia no âmbito do ACR (BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004c).

No ACR, as distribuidoras dispõem da obrigação de suprimento aos consumidores cativos e devem comprar a energia elétrica para a garantia do atendimento, em totalidade, de seus respectivos mercados, por intermédio de processo licitatório, promovido, direta ou indiretamente, pela ANEEL (MACEDO, SILVA E LIMA, 2014).

Ademais, pela Lei 10.848/04, também, institui que as concessionárias, permissionárias e autorizadas de distribuição, detentoras de ativos de geração ou de transmissão, separassem os seus ativos energéticos em diferentes empresas, tendo, como consequência, o estabelecimento de novos contratos para equilibrar a parcela faltante de energia, atendida, anteriormente, por geração própria (BRASIL, 2004a).

Bem como, o Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado, por imposição legal, necessita ser celebrado entre cada geradora e todas as distribuidoras, às prerrogativas aquelas permissionárias ou autorizadas, da comercialização de energia, com mercado inferior a 500 GWh/ano (BACELLAR E VASQUEZ, 2018).

Ainda que o Brasil detenha um conhecimento relativamente recente no desenvolvimento de leilões para a contratação de energia no setor elétrico, sua estrutura proporciona a modicidade tarifária, o alcance da eficiência energética e a garantia da oferta (OLIVEIRA E ROCHA, 2014; MOREIRA, E OLIVEIRA, 2017).

No cenário brasileiro, a adoção de políticas públicas é necessária para estimular o desenvolvimento e expansão da energia renovável, bem como, a construção de ferramentas tecnológicas para identificação, medição e modelagem de locais adequados para sua instalação, objetivando maior eficiência e aproveitamento energético (DUTRA, SZKLO E SCHAEFFER, 2014).

2.4. Políticas Públicas Energéticas Brasileiras

No decorrer dos períodos em que houve os choques do petróleo os governos foram submetidos a se moldarem e buscarem outras fontes energéticas para serem exploradas no país, no qual, por meio a implementação das políticas governamentais, a matrizes energéticas são moldadas, adaptando-se ao cenário mundial (BUENO E RIBEIRO, 2005; SOVACOOOL E MUKHERJEE, 2011).

Assim como, mediante a concepção das agendas mundiais pela redução da emissão de gases poluentes, os incentivos ao desenvolvimento sustentável e o emprego de fontes renováveis de energia foram sendo potencializados (JACOBSSON E LAUBER, 2006; MITCHELL, 2006).

A vista disso, políticas energéticas estão atreladas em conformidade a fatores externos, tencionando a desprender-se da dependência externa de produção de energia ou superar os altos preços do petróleo. Bem como, a conversão da matriz energética nacional e mundial moldam-se mediante ao cenário nacional e mundial, tendo em consideração o período existente e a concepção de políticas (SOVACOOOL E MUKHERJEE, 2011).

Assim, as políticas públicas caracterizam-se como fundamentais para o delineamento da matriz energética, alterando os hábitos de consumo e a geração de incentivos a oferta energética no mercado. O Brasil dispõe de inúmeras políticas nacionais atreladas ao segmento energético para desenvolvimento de uma matriz energética renovável (DUTRA, SZKLO E SCHAEFFER, 2014).

O Convênio nº 101/97 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) estabelece a concessão de isenção do ICMS em operação que envolvam equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica, abrangendo os de energia eólica, bomba para líquidos,

usados em sistema de energia solar fotovoltaico em corrente contínua, aquecedores solares de água, geradores fotovoltaicos, entre outros (BRASIL, 1997c).

O Programa de Certificação de Energia Renovável (REC Brazil), instituído em 2011 pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), Associação Brasileira de Energia Limpa (Abragel), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia (ABRACEEL) e a Associação Brasileira de Biogás e de Biometano (ABiogás), estimula o mercado de energia no uso de fontes renováveis com desempenho sustentável para empreendimentos de geração, por meio do Selo REC Brazil, garantindo, assim, ao cliente final uma energia que atende aos critérios de adicionalidade, sustentabilidade nas esferas sociais e ambientais e relacionamento comunitário (SOARES, LIMA E VASCONCELOS, 2020).

A Resolução Normativa nº 482/2012 “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica”, no qual, permite, assim, o consumidor gerar sua própria energia elétrica, por meio de fontes renováveis ou cogeração qualificada, fornecendo, também, o excedente para a rede de distribuição. Onde, a partir, da mesma, tornou-se possível a geração de estímulos benéficos ao sistema elétrico, como redução no carregamento das redes, perdas e impacto ambiental, diversificação da matriz energética e prorrogação dos investimentos da expansão dos sistemas de transmissão (ANEEL, 2012).

A Resolução Normativa nº 687/2015 altera a Resolução Normativa nº 482/2012, objetivando a redução dos custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração, a harmonização do Sistema de Compensação de Energia Elétrica frente as condições de fornecimento de energia e a expansão do público-alvo (ANEEL, 2012).

O Senado Federal outorgou o Projeto de Lei do Senado nº 167 em 2013, prevendo a isenção de Impostos sobre Produtos Industrializados (IPI) para painéis fotovoltaicos, bem como outros elementos como cabos, conectores e estruturas de suporte. Entretanto, o PLS nº 167/2013 foi modificado, tornando-se o Projeto de Lei nº 8322/2014, atualmente em tramitação na Câmara de Deputados, mantendo como ementa a isenção do imposto sobre importação os equipamentos e componentes de geração elétrica de fonte solar (BRASIL, 2014).

O plano de ação conjunta, da Aneel, BNDS e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Inova Energia, instituído em 2013, representa a iniciativa governamental atribuída a coordenação de ações de estímulo a inovação e aperfeiçoamento da integração dos instrumentos: no desenvolvimento e difusão de dispositivos eletrônicos, microeletrônicos, sistemas, soluções integradas e padrões para implementação de redes elétricas inteligentes; no apoio as empresas para promoção e domínio tecnológico na produção de energia elétrica renovável de fontes solar fotovoltaica, termossolar e

eólica; apoio na promoção do desenvolvimento de integradores e concentração da cadeia de componentes na produção de veículos híbridos/elétricos e melhoria de eficiência energética de veículos automotores; e aumento do gerenciamento das ações de estímulos e aprimoramento dos instrumentos de apoio financeiro disponíveis (PEREIRA E CASTRO, 2016).

Em 2015, a CONFAZ, instituiu, também o Convênio nº 16/2015 para autorizar a concessão de isenção de ICMS nas operações internas referentes a circulação de energia elétrica, sob faturamento pelo Sistema de Compensação de Energia Elétrica da Resolução Normativa nº482/2012, no qual, a unidade consumidora que injeta energia na rede poderá ser compensada por meio de créditos de energia ativa (ANEEL, 2012).

O Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), introduzido em 2015, compreende a ampliação e o aprofundamento de ações frente a estímulos à geração de energia pelos consumidores, por meio de fontes renováveis de energia, especialmente a solar fotovoltaica (PEREIRA E CASTRO, 2016).

E, o Convênio nº156/2017 concebe a prorrogação de ICMS frente ao 101/97, para até 31 de dezembro de 2028, frente a isenção do ICMS em operações que abrangem equipamentos e componentes na geração de energia solar e eólica (BRASIL, 2017).

O Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), criado em 1995 e sendo remodelado ao longo do tempo, objetivando a promoção do desenvolvimento no meio rural, estimulando a geração de renda e melhoramento do uso da mão de obra familiar, abrange a linha de crédito Pronaf ABC+ Bioeconomia, no qual, proporciona o financiamento de empreendimentos para aproveitamentos hidroenergéticos e tecnologias de energia renovável, como o emprego da energia solar, biomassa, eólica, miniusinas de biocombustíveis e a transição de tecnologia de combustível fóssil por renovável em equipamentos e máquinas agrícolas (SOARES, LIMA E VASCONCELOS, 2020).

O Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) dispõe do Fundo Clima - Subprograma Energias Renováveis, para suporte a investimentos em geração e distribuição local de energia renovável, no desenvolvimento tecnológico e na cadeia produtiva do setor de energias renováveis, provenientes de energia solar, eólica, hidráulica, de biomassa, de óleos vegetais hidrotratados, de resíduos sólidos urbanos e dos oceanos (SOARES, LIMA E VASCONCELOS, 2020).

O Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), instaurado pela Lei Federal nº 11.488, de 15 de junho de 2007, tem como finalidade a isenção das contribuições para PIS e COFINS da implantação de projetos de infraestrutura sob a venda e/ou locação de máquinas, aparelhos, instrumentos e equipamentos, venda de materiais de construção e

prestação de serviços frente a obras de infraestrutura nos setores de transportes, portos, energia, saneamento básico e irrigação (BRASIL, 2007).

Por conseguinte, mediante a políticas públicas de incentivo a geração de energia renovável, o Brasil detém inúmeras frentes de promoção ao desenvolvimento para a geração e consumo, entretanto cada vez mais torna-se necessário a criação de novas estratégias e reformulação dos mecanismos já implementados, possibilitando, assim, equiparar-se o cenário mundial (RIBEIRO, SZKLO E SCHAEFFER, 2010; LA ROVERE, DE MELLO LEMOS E GERK, 2013).

Atualmente, há a necessidade do desenvolvimento de tecnologias avançadas de energia, tendo com intuito o enfrentamento dos desafios globais de energia limpa, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável (JACOBSON E DELUCCHI, 2011).

Mediante a esse cenário, inúmeros países têm buscado mecanismos para intensificar o desenvolvimento de fontes renováveis, como forma de incentivo, a exemplo, a adoções de mecanismo como a tarifa feed-in, o subsídio ao investimento inicial, o Programa Tributário e Contábil, o incentivo e obrigatoriedade de contratação de energia renovável, os fundos de Investimento, o *Net Metering*, as ações voluntárias de bancos e distribuidoras, entre outros (JACOBSSON E LAUBER, 2006).

2.5. Mineração de dados como ferramenta de análise

A mineração de dados aplicada à análise de dados é uma abordagem poderosa para descobrir informações e padrões ocultos em conjuntos de dados complexos. Ela desempenha um papel fundamental em diversas áreas, desde ciência de dados até tomada de decisões em empresas. A mineração de dados tem sido aplicada além dos seus limites, a qualquer análise de dados, caracterizada como uma ferramenta de descoberta de conhecimento em base de dados, pela extração de informações preliminarmente desconhecidas e possivelmente usuais em grandes bases de dados, pela utilização de diferentes abordagens técnicas (ZARUR, 2005; WITTEN, FRANK, HALL, E PAL, 2016).

Pela mineração de dados alcança-se informações e conhecimentos de apoio a tomada de decisão, predição, previsão e estimação, de tal modo que pode ser aplicado em inúmeras áreas, sob duas formas, a orientada à verificação e à descoberta (ZARUR, 2005).

A aplicação da mineração de dados divide-se em quatro etapas básicas, inicialmente, pela seleção de dados a serem minerados, segmentando-os sob alguns critérios; pela transformação de dados, ocorrendo a organização dos dados e definição de novos atributos; seguidamente pela mineração dos dados, na aplicação de técnicas de extração de informações; e, por fim, a interpretação

dos resultados, desenvolvendo a análise das informações alcançadas para suporte à decisão e objetivos (TAN, STEINBACH E KUMAR, 2006).

A mineração de dados é um processo que envolve as seguintes etapas, sendo sequencialmente seguidas (HAN *et al*, 2011; PROVOST E FAWCETT, 2013; WITTEN *et al*, 2016):

Coleta de Dados: A primeira etapa envolve a coleta de dados de várias fontes, como bancos de dados, registros de transações, sensores, mídias sociais e muito mais. Esses dados podem ser estruturados (em tabelas) ou não estruturados (como texto ou imagens).

Pré-processamento de Dados: Antes da análise, os dados geralmente passam por uma fase de pré-processamento. Isso inclui a limpeza de dados para remover valores ausentes ou inconsistentes, normalização para garantir que os dados estejam em uma escala comparável e seleção de características relevantes.

Exploração de Dados: Nesta etapa, os analistas exploram os dados para entender sua natureza. Isso pode incluir a criação de visualizações gráficas, como gráficos e histogramas, para identificar tendências, distribuições e relações entre variáveis.

Mineração de Dados: A mineração de dados propriamente dita envolve o uso de algoritmos e técnicas de aprendizado de máquina para descobrir padrões, tendências e relações nos dados. Isso pode incluir a identificação de clusters de dados semelhantes, previsões de eventos futuros ou a criação de modelos de classificação.

Avaliação e Validação: Após a aplicação das técnicas de mineração de dados, os resultados são avaliados quanto à sua relevância e qualidade. Isso pode envolver a utilização de métricas de desempenho para verificar a precisão dos modelos criados.

Interpretação e Comunicação: Os insights obtidos com a mineração de dados são interpretados e comunicados para as partes interessadas. Isso é feito por meio de relatórios, visualizações e apresentações que destacam as descobertas mais importantes.

Tomada de Decisão: Com base nas informações descobertas, as organizações podem tomar decisões informadas. Isso pode incluir estratégias de negócios, otimização de processos, previsões de demanda e muito mais.

Aprendizado Contínuo: A análise de dados é um processo contínuo. À medida que novos dados se tornam disponíveis, os modelos de mineração de dados podem ser atualizados e refinados para manter a relevância das análises.

2.5.1. Método de Previsão

O método de previsão auxilia na identificação do que ainda não é conhecido, entretanto necessita conhecer para iniciar a tomada de decisões mais adequada e sensata, correspondendo a um

método de previsão que se baseia na análise de dados históricos para identificar padrões e tendências que podem ser extrapolados para prever valores futuros. O método assume que o comportamento passado é um indicador razoável do comportamento futuro em um ambiente relativamente estável (ZARUR, 2005; HYNDMAN E ATHANASOPOULOS, 2018).

A previsão clássica pela técnica de extrapolação considera-se como um modelo de fornecimento de explicação do passado, pela análise retrospectiva, a verificação da continuidade para previsão do futuro. Assim, se desenvolve pelo processo de que as variáveis existentes continuam evoluindo do passado para o presente e do presente ao futuro (ZARUR, 2005; MAKRIDAKIS *et al*, 1998).

Considerando a série temporal como uma descrição do passado, o procedimento lógico para realização de previsões futuras aplica-se ao uso dos dados históricos, uma vez que dados passados corresponde a indicativos do que se espera do futuro, por meio de modelo matemático representativo do processo (ZARUR, 2005).

As séries temporais possuem dados exatos e seus períodos de ocorrência definidos, facilitando, assim, a tomada de decisão e investigação, permitindo a previsão de valores futuros, de curto, médio e longo prazos e extração de informações relevantes ao planejamento. Ademais, o modelo de previsão fundamentado na evolução de séries históricas tem como premissa que o futuro não será alterado significativamente (BROCKWELL E DAVIS, 2016).

Por conseguinte, a extração de conhecimento das séries de dados históricas, por meio da aplicação de técnicas de mineração de dados proporcionam o descobrimento de padrões futuros para o exercício de planejamento, na qual, as principais etapas da previsão por extrapolação de tendências abrangem (MAKRIDAKIS *et al*, 1998; SHUMWAY E STOFFER, 2017; HYNDMAN E ATHANASOPOULOS, 2018):

Coleta de Dados Históricos: A primeira etapa envolve a coleta de dados históricos relevantes para o fenômeno que está sendo previsto. Isso pode incluir dados temporais, como vendas mensais, dados econômicos, dados climáticos, entre outros.

Análise de Dados: Os dados históricos são analisados para identificar tendências e padrões. Isso pode ser feito por meio de gráficos, análise estatística e métodos de suavização, como a média móvel.

Seleção de Modelo de Tendência: Com base na análise, é selecionado um modelo de tendência que melhor se ajusta aos dados. Os modelos comuns incluem tendência linear, exponencial ou polinomial, dependendo da natureza da tendência identificada.

Estimação de Parâmetros: Os parâmetros do modelo de tendência são estimados usando técnicas estatísticas, como regressão linear. Isso envolve encontrar os coeficientes que melhor se ajustam aos dados históricos.

Extrapolação Futura: Com os parâmetros do modelo estimados, o próximo passo é extrapolar a tendência para o futuro. Isso envolve a projeção de valores futuros com base na equação do modelo de tendência.

Avaliação do Erro: A precisão da previsão é avaliada comparando-se os valores previstos com os valores reais que ocorrem no futuro. Métricas como o erro médio absoluto (MAE) ou o erro quadrático médio (MSE) podem ser usadas para avaliar o desempenho da previsão.

Um estudo relevante que emprega Redes Neurais MLP na previsão de séries temporais é apresentado por Zhang *et al.* em “*Time Series Forecasting Using a Hybrid ARIMA and Neural Network Model*” os autores exploram a combinação de modelos ARIMA e MLP para melhorar a precisão das previsões temporais, tendo o objetivo melhorar a precisão das previsões de séries temporais. A abordagem híbrida visava explorar as vantagens de ambos os métodos para obter resultados mais robustos na previsão temporal (ZHANG, PATUWO E HU, 2003).

No contexto de regressão do processo gaussiano, uma pesquisa valiosa foi conduzida por Rasmussen e Williams em “*Gaussian Processes for Machine Learning*”, teve como objetivo fornecer uma compreensão abrangente e aprofundada dos fundamentos teóricos e das aplicações práticas dos Processos Gaussianos, explorando o uso dessa técnica em diversas áreas, incluindo previsão, oferecendo insights valiosos para pesquisadores e praticantes (RASMUSSEN E WILLIAMS, 2006).

A aplicação da regressão linear em previsão, evidenciada por Montgomery *et al.* em “*Introduction to Linear Regression Analysis*”, oferece uma introdução abrangente à análise de regressão linear e suas aplicações em diversos contextos, incluindo previsões, no qual objetivava a introdução e exploração dos conceitos fundamentais da análise de regressão linear, buscando capacitar os leitores na compreensão e aplicação dessa técnica em diversas situações, incluindo previsão (MONTGOMERY, PECK E VINING, 2012).

Em “*Short-Term Load Forecasting of Power Systems Using Artificial Neural Networks: A Review and Comparison*” Charytoniuk *et al.* revisam e comparam diferentes abordagens de Redes Neurais MLP para previsão de carga em sistemas de energia elétrica, visando fornecer uma análise crítica das técnicas existentes, destacando suas vantagens e limitações (CHARYTONIUK, CZABANSKI E WITCZAK, 2017).

A aplicação da regressão do processo gaussiano na modelagem da incerteza é explorada por Wilson e Nickisch em “*Kernel Interpolation for Scalable Structured Gaussian Processes (KISS-GP)*” Os autores propõem uma abordagem eficiente para lidar com grandes conjuntos de dados, propondo

uma abordagem eficiente, chamada KISS-GP, buscando oferecer uma solução escalável para a modelagem da incerteza em grandes conjuntos de dados (WILSON E NICKISCH, 2015).

Em “*Electricity Consumption Forecasting Using Hybrid Model Based on Variational Mode Decomposition and Neural Networks*” Li *et al.* apresentam um modelo híbrido que combina a Decomposição Modal Variacional (VMD) com Redes Neurais MLP para prever o consumo de eletricidade, buscando melhorar a precisão das previsões ao integrar diferentes técnicas (LI, ZHANG E ZHU, 2019).

No âmbito da regressão linear, a aplicação prática por Hyndman e Athanasopoulos em “*Forecasting: Principles and Practice*” fornece insights sobre a utilização de técnicas simples de regressão linear para previsões eficazes (HYNDMAN E ATHANASOPOULOS, 2018).

2.5.2. Modelo de Redes Neurais *Multilayer Perception*

As Redes Neurais *Multilayer Perceptron* (MLP) são um tipo popular de rede neural artificial que consiste em múltiplas camadas de neurônios interconectados. Cada camada é composta por uma série de neurônios que processam informações e aprendem a partir dos dados. As MLPs são amplamente utilizadas em tarefas de aprendizado de máquina, como classificação e regressão (AGGARWAL, 2018).

A arquitetura das MLPs consiste em uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. Cada neurônio em uma camada está conectado a todos os neurônios na camada subsequente. As camadas ocultas permitem que as MLPs capturem relações complexas nos dados. A configuração da arquitetura, incluindo o número de neurônios em cada camada, é um fator crucial que afeta o desempenho da rede (GOODFELLOW, BENGIO E COURVILLE, 2016).

O treinamento de MLPs envolve o ajuste dos pesos das conexões entre neurônios para que a rede possa realizar tarefas específicas, como classificação ou previsão. O processo de treinamento geralmente é feito usando algoritmos de otimização, como o gradiente descendente. Durante o treinamento, a rede é alimentada com dados de entrada e compara suas saídas com as saídas desejadas, ajustando gradualmente os pesos para minimizar o erro (GOODFELLOW, BENGIO E COURVILLE, 2016).

As MLPs são amplamente aplicadas em diversas áreas, incluindo processamento de linguagem natural, visão computacional, previsão de séries temporais, reconhecimento de padrões e muito mais. Seu poder reside na capacidade de aprender representações complexas dos dados, tornando-as eficazes em tarefas desafiadoras (KRIZHEVSKY, SUTSKEVER E HINTON, 2012).

A fórmula geral para calcular a saída de um neurônio em uma MLP é uma combinação linear das entradas ponderadas, passando por uma função de ativação. No qual, as fórmulas-chave para o

cálculo da saída de um neurônio em uma camada oculta e na camada de saída de uma MLP corresponde a (GOODFELLOW, BENGIO E COURVILLE, 2016):

Para um neurônio na camada oculta de uma MLP, a fórmula para calcular a saída (z) é dada pela Equação 1:

$$z = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \omega_i) + b \quad (1)$$

Onde:

z é a soma ponderada das entradas.

x_i são as entradas da camada anterior.

ω_i são os pesos associados às entradas.

b é o viés (bias).

Posteriormente ao cálculo de z , a saída da camada oculta (a) é obtida pela aplicação de uma função de ativação (f):

$$a = f(z)$$

Para a camada de saída de uma MLP, a fórmula é semelhante, mas a função de ativação pode variar dependendo do tipo de problema que a rede está resolvendo. A fórmula geral para a camada de saída é semelhante à da camada oculta, representada pela Equação 2:

$$z = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \omega_i) + b \quad (2)$$

Onde:

z é a soma ponderada das entradas.

x_i são as entradas da camada anterior.

ω_i são os pesos associados às entradas.

b é o viés (bias).

Após o cálculo de z , a saída da camada oculta (a) é obtida pela aplicação de uma função de ativação (f) apropriada:

$$a = f(z)$$

Nas redes MLP, o processo de treinamento envolve o ajuste dos pesos (ω_i) e do viés (b) para minimizar o erro entre as saídas da rede e os valores desejados, onde, para redes complexas podem envolver várias camadas ocultas e diferentes funções de ativação, dependendo da tarefa em questão (GOODFELLOW, BENGIO E COURVILLE, 2016).

2.5.3. Modelo de Regressão do Processo Gaussiano

A Regressão do Processo Gaussiano corresponde a um método de aprendizado de máquina não paramétrico que é usado para modelar relacionamentos não lineares entre variáveis. Ela se baseia

em processos estocásticos e é uma técnica de regressão bayesiana (RASMUSSEN E WILLIAMS, 2006).

O GPR modela a relação entre uma variável de entrada X e uma variável de saída Y . No qual, supondo um conjunto de dados de treinamento (X_{train}, Y_{train}) , onde X_{train} é uma matriz de entradas e Y_{train} é o vetor de saída correspondente, tem-se por objetivo prever Y para novos valores de X (RASMUSSEN E WILLIAMS, 2006).

A formulação básica do GPR, apresentada pela Equação 3, envolve a construção de um modelo probabilístico da função desconhecida que mapeia X para Y . O GPR assume que a saída Y segue uma distribuição gaussiana condicional (RASMUSSEN E WILLIAMS, 2006):

$$Y|X \sim N (f(X), \sigma^2 I) \quad (3)$$

Onde:

$f(X)$ é uma função desconhecida que modela a relação X e Y .

σ^2 é a variância do ruído associado à observação de Y .

I é a matriz identidade.

A função $f(X)$ é modelada como um processo gaussiano, o que significa que qualquer subconjunto das variáveis aleatórias $f(X_1), f(X_2), \dots$ segue uma distribuição gaussiana multivariada (RASMUSSEN E WILLIAMS, 2006).

2.5.4. Modelo de Regressão Linear

A regressão linear é um método estatístico amplamente utilizado para modelar a relação entre uma variável de resposta ou variável dependente e uma ou mais variáveis explicativas ou variáveis independentes (MOORE, MCCABE E CRAIG, 2014; WITTEN, FRANK E HALL, 2016).

A regressão linear simples modela a relação entre uma variável de resposta Y e uma única variável explicativa X . A fórmula da regressão linear simples corresponde a representada pela Equação 4 (MOORE, MCCABE E CRAIG, 2014):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (4)$$

Onde:

Y é a variável de resposta.

X é a variável explicativa.

β_0 é o coeficiente linear (intercept).

β_1 é o coeficiente de inclinação (slope).

ε é o erro aleatório.

A tarefa da regressão linear é encontrar os valores de β_0 e β_1 que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos, ou seja, a diferença entre os valores observados e os valores previstos.

2.5.5. Métricas

As métricas RMSE (*Root Mean Square Error*), MAE (*Mean Absolute Error*) e MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) são comumente usadas para avaliar a qualidade de modelos de previsão, como modelos de regressão ou previsão de séries temporais. Elas fornecem insights sobre o quão bem um modelo se ajusta aos dados observados e o quão precisa é a previsão (HYNDMAN E KOEHLER, 2006; MONTGOMERY, PECK E VINING, 2012).

O RMSE corresponde a uma métrica que calcula a raiz quadrada da média dos erros quadrados entre as previsões do modelo e os valores observados, onde quanto menor o RMSE, melhor o modelo está se ajustando aos dados, resultando pela Equação 5 (MONTGOMERY, PECK E VINING, 2012):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

Onde:

n é o número de observações.

y_i é o valor observado.

\hat{y}_i é o valor previsto pelo modelo.

O MAE refere-se a uma métrica que calcula a média dos valores absolutos dos erros entre as previsões do modelo e os valores observados, fornecendo uma medida simples da magnitude dos erros do modelo. Ele é menos sensível a outliers em comparação com o RMSE. Tendo para o MAE a Equação 6 (MONTGOMERY, PECK E VINING, 2012):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

Onde:

n é o número de observações.

y_i é o valor observado.

\hat{y}_i é o valor previsto pelo modelo.

O MAPE corresponde a métrica que calcula a média das porcentagens absolutas dos erros em relação aos valores observados. Ele expressa os erros como uma porcentagem dos valores reais, o que pode ser útil para compreender o erro relativo do modelo, sendo especialmente útil quando se deseja avaliar a precisão do modelo em termos percentuais em relação aos valores reais. O MAPE representa pela Equação 7 (HYNDMAN E KOEHLER, 2006):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \right) \cdot 100\% \quad (7)$$

Onde:

n é o número de observações.

y_i é o valor observado.

\hat{y}_i é o valor previsto pelo modelo.

2.6. *Software machine learnig* – WEKA

O WEKA, acrônimo para *Waikato Environment for Knowledge Analysis*, corresponde a uma suíte de *software* de mineração de dados e aprendizado de máquina desenvolvida pela Universidade de *Waikato*, na Nova Zelândia. Criado em Java, é uma ferramenta de código aberto amplamente utilizada em pesquisa e aplicações práticas de análise de dados.

Assim, caracteriza-se por um *software* amplamente utilizado para mineração de dados e aprendizado de máquina, oferecendo uma variedade de ferramentas e algoritmos que permitem aos pesquisadores e profissionais analisar dados, criar modelos preditivos e tomar decisões baseadas em dados.

O *software* WEKA é um ambiente de código aberto amplamente utilizado que oferece uma série de recursos para análise de dados, classificação, *clustering*, regressão e pré-processamento de dados (WITTEN, FRANK, E HALL, 2016). Tendo como características notáveis a variedade de algoritmos de aprendizado de máquina, onde inclui algoritmos para classificação, como *Naive Bayes*, Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Redes Neurais, bem como algoritmos para agrupamento, como *K-Means* e *Hierarchical Clustering*, e pela sua diversidade de opções possibilita aos usuários a escolha do algoritmo mais adequado para suas necessidades específicas (HALL *et al*, 2009).

O WEKA utiliza uma variedade de métodos numéricos para realizar tarefas de análise de dados e aprendizado de máquina, sendo os métodos numéricos aplicados em diferentes partes do fluxo de trabalho, desde a preparação e pré-processamento de dados até a execução de algoritmos de aprendizado de máquina e avaliação de resultados, contribuindo para a eficácia e a flexibilidade do *software* em lidar com uma ampla gama de problemas de análise de dados. Alguns dos métodos numéricos fundamentais incluem dados de (WITTEN, FRANK, E HALL, 2016):

Álgebra Linear: essencial para muitos algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente aqueles que envolvem transformações e manipulações de matrizes e vetores. O WEKA utiliza conceitos de álgebra linear em algoritmos como regressão linear, análise de componentes principais (PCA) e outros.

Otimização Numérica: muitos algoritmos de aprendizado de máquina envolvem a otimização de funções, seja para ajustar parâmetros ou minimizar/maximizar uma determinada métrica, os métodos numéricos de otimização são usados para encontrar os melhores parâmetros que minimizam ou maximizam a função objetivo.

Cálculo Numérico: técnicas de cálculo numérico são empregadas em várias partes do WEKA, desde o processamento de dados até a implementação de algoritmos específicos, podendo incluir integração numérica, diferenciação numérica e outras operações fundamentais.

Métodos Estatísticos: o WEKA incorpora métodos estatísticos para análise de dados e inferência, incluindo técnicas estatísticas para testes de hipóteses, estimação de parâmetros e avaliação de modelos.

Computação Numérica Distribuída: com a crescente demanda por processamento distribuído e paralelo, o WEKA pode aproveitar métodos numéricos que facilitam a execução eficiente de algoritmos em ambientes distribuídos.

Validação Cruzada e *Bootstrap*: essas técnicas envolvem repetidas execuções de algoritmos em subconjuntos dos dados para avaliação de desempenho, onde os métodos numéricos são utilizados para garantir resultados robustos e estatisticamente significativos.

Além disso, o software permite a avaliação de modelos, a seleção de atributos e a visualização de resultados, bem como oferece uma variedade de opções para análise e processamento de dados, possibilitando aos usuários realizar tarefas como seleção de atributos, normalização de dados e tratamento de valores ausentes, simplificando o processo de pré-processamento, permitindo que os usuários preparem seus dados de maneira eficiente antes de aplicar algoritmos de aprendizado de máquina (HALL *et al.*, 2009).

Ademais, além dos algoritmos clássicos de aprendizado de máquina, o WEKA também oferece suporte a técnicas avançadas, como validação cruzada, *bootstrap* e técnicas de redução de dimensionalidade. Essas técnicas são essenciais para garantir a robustez e a confiabilidade dos modelos criados, sendo algumas das técnicas principais usadas no *software* WEKA (HALL *et al.*, 2009; WITTEN, FRANK, E HALL, 2016):

Classificação: o software oferece uma variedade de algoritmos de classificação, incluindo *Naive Bayes*, Máquinas de Vetores de Suporte (SVM), Redes Neurais, Árvores de Decisão, entre outros, sendo utilizados para atribuir rótulos ou categorias a instâncias de dados.

Regressão: para problemas de previsão numérica, o WEKA inclui algoritmos de regressão, como Regressão Linear, Regressão Logística e Máquinas de Vetores de Suporte para Regressão (SVR), onde são usados para prever valores contínuos.

Agrupamento: algoritmos de agrupamento, como *K-Means*, EM (*Expectation-Maximization*), e *Hierarchical Clustering*, são empregados para identificar padrões ou grupos naturais nos dados.

Associação: para descobrir padrões de associação entre diferentes variáveis, o WEKA oferece algoritmos como *Apriori* e *FPGrowth*, frequentemente utilizados em mineração de dados.

Mineração de Regras de Associação: algoritmos como o *Apriori* são usados para descobrir regras de associação entre diferentes itens em conjuntos de dados.

Seleção e Extração de Atributos: técnicas são incorporadas para selecionar os atributos mais relevantes ou reduzir a dimensionalidade dos dados, incluindo métodos como *Information Gain*, *Principal Component Analysis* (PCA) e outros.

Validação e Avaliação de Modelos: o WEKA oferece métodos de validação cruzada, *holdout* e outras técnicas para avaliar o desempenho dos modelos de aprendizado de máquina.

Pré-processamento de Dados: técnicas de pré-processamento, como normalização, discretização, tratamento de valores ausentes, são incorporadas para preparar os dados antes da aplicação dos algoritmos de aprendizado.

Uma das grandes vantagens do WEKA é sua capacidade de avaliar modelos de aprendizado de máquina e oferecer uma interface gráfica que facilita a visualização dos resultados. A suíte é projetada para ser versátil e abrange muitos aspectos do processo de análise de dados e aprendizado de máquina. Cada técnica é aplicada dependendo do tipo de problema a ser resolvido e da natureza dos dados envolvidos. Sua contribuição na análise e extração de informações a partir de dados complexos é inegável, e seu impacto é evidente em inúmeros estudos e aplicações de sucesso (HALL *et al.*, 2009; WITTEN, FRANK, E HALL, 2016).

O WEKA oferece uma ampla gama de algoritmos de aprendizado de máquina que podem ser aplicados à previsão de dados futuros, assim, oferece uma variedade de algoritmos de aprendizado de máquina, como árvores de decisão, redes neurais, regressão linear e séries temporais. Esses algoritmos podem ser usados para modelar relações entre variáveis históricas e prever valores futuros (MURPHY, 2012).

2.7. Construção de Cenários

O planejamento baseado em cenários corresponde a uma ferramenta de visualização de futuros possíveis, possibilitando a minimizar a incertezas mediante a previsões, seguindo do princípio de que o futuro não está definido e qualquer previsão deve ser tomado como exercício de alto grau de incerteza e risco (ZARUR, 2005)

Os cenários caracterizam-se por descrições de acontecimentos futuros, sendo concebíveis e plausíveis, de fácil entendimento e úteis para a tomada de decisão (ZARUR, 2005), tendo como

benefícios do planejamento baseado em cenários a possibilidade de antecipação de mudanças, ajudando as organizações a antecipar mudanças no ambiente de negócios e a se adaptar mais rapidamente; a redução de riscos, permitindo a identificação e mitigação proativa de riscos potenciais; a melhor tomada de decisões, fornecendo informações para uma tomada de decisão mais informada e estratégica; e a flexibilidade, capacitando a organização a ser mais flexível e ágil em face de incertezas (VAN DER HEIJDEN, 1996).

Os cenários classificados como exploratórios são delimitados por demonstrar futuros possíveis ou prováveis dentro com contexto analisado, por meio de simulações e desdobramentos das condições iniciais, sob a ótica exploratória do presente para o futuro (ZARUR, 2005).

O planejamento baseado em cenários caracteriza-se por uma abordagem estratégica que envolve a criação de diferentes cenários hipotéticos do futuro, cada um representando uma série de condições e eventos possíveis. Esses cenários são desenvolvidos para ajudar as organizações a entender e se preparar para incertezas e mudanças no ambiente em que operam. Assim, as principais etapas do planejamento baseado em cenários abrangem (VAN DER HEIJDEN, 1996; SCHWARTZ, 1996; FAHEY E RANDALL, 1998):

Identificação de Fatores Críticos: A primeira etapa envolve a identificação dos fatores críticos que podem impactar a organização, como mudanças no mercado, avanços tecnológicos, mudanças regulatórias, eventos geopolíticos, entre outros.

Criação de Cenários: Com base nos fatores identificados, são desenvolvidos cenários alternativos do futuro. Cada cenário descreve uma narrativa coesa e plausível sobre como o ambiente da organização poderia evoluir.

Análise e Avaliação: Os cenários são analisados quanto à probabilidade de ocorrência e ao impacto potencial na organização. Isso ajuda a priorizar os cenários mais relevantes.

Desenvolvimento de Estratégias: Com base nos cenários, são elaboradas estratégias adaptativas. Cada estratégia é projetada para lidar com as condições específicas de um cenário particular.

Implementação e Monitoramento: As estratégias são implementadas e monitoradas ao longo do tempo. À medida que o ambiente muda, a organização pode ajustar suas ações de acordo com o cenário que se materializa.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo descreve a metodologia proposta da pesquisa, mediante a execução de modelos de previsão para explanação de como poderá se comportar o mercado energético nacional ao longo do tempo. Prossegue com a apresentação dos dados a serem extrapolados no estudo e com o comparativo entre os métodos empregados.

A proposição dessa pesquisa assenta-se na intenção de simular e projetar delineamentos do mercado energético nacional, objetivando ter visualização de seu comportamento ao longo dos anos.

Delimitou-se para a pesquisa o recorte temporal de 2012 a 2022, para os dados históricos. O processo se desenvolveu na definição do método a ser empregado, pré-seleção dos dados, estruturação de um horizonte temporal para uma década.

3.1. Descrição metodológica

O objeto de estudo refere-se a Matriz Energética e Elétrica brasileira, constituindo as inúmeras formas de geração de energia, onde, por meio da qual, objetivam aplicação de instrumentos para previsão da intensificação de energia renováveis mediante ao alcance do ambiente de expectativa para uma transição energética confiável.

A metodologia baseia-se na previsão futura pelos modelos de Redes Neurais *Multilayer Perceptron* (MLP), Regressão do Processo Gaussiano (GPR) e Regressão Linear da geração elétrica por fonte no Brasil.

Os princípios norteadores do modelo a ser desenvolvido abrange o conhecimento e a expertise da mineração de dados e o conhecimento e informações do sistema energético.

Quanto ao horizonte temporal dos dados a serem extrapolados, empregou-se a escala anual com amplitude de 11 anos, considerados como horizontes suficiente para projeção futura do ambiente energético.

Por conseguinte, com o contínuo desenvolvimento da mineração de dados torna-se possível a proposição de uma abordagem flexível e dinâmica, desde a adequação e preparação do modelo aos resultados das simulações realizadas, proporcionando descobertas de padrões do mercado energético e desenvolvimento de subsídios do planejamento estratégico do setor.

3.1.1. Classificação da Pesquisa

A natureza da pesquisa é aplicada, onde objetiva-se desenvolver conhecimentos para a solução de problemas específicos. Quanto à abordagem, a pesquisa é quantitativa, pois interpretará

em números informações para classificação e análise, requerendo assim a utilização de recursos e de técnicas estatísticas, buscando uma maior margem de segurança nos dados gerados.

Do ponto de vista quanto aos objetivos, a pesquisa classificou-se como exploratória, na qual, deseja-se o fornecimento de hipóteses em circunstâncias de serem testadas em estudos subsequentes, conduzindo a obtenção de observações, assim como identificando as relações entre os fenômenos estudados, proporcionando um maior entendimento do problema.

Quanto aos procedimentos técnicos, utilizou a pesquisa bibliográfica, pois foi desenvolvida a partir de material já publicado. Estudo de caso, partindo do princípio de que permitiu um amplo e detalhado conhecimento, proporcionando uma visão completa do problema, identificando prováveis fatores que influenciam ou são influenciados, utilizando-se de informações, dados e projeções.

3.1.2. Definição dos Dados

Os modelos de previsão utilizaram dados acerca da matriz energética brasileira, tendo dados históricos extraídos do Anuário Estatístico de Energia Elétrica.

O Anuário Estatístico de Energia Elétrica apresenta as informações relativas à cadeia de energia elétrica do Brasil, sendo extraído os dados históricos referentes a Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh), conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh) (EPE, 2021).

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
TOTAL	552.498	570.835	590.542	581.486	578.898	587.962	601.396	626.324	621.250	656.108	677.173
HIDRÁULICA (I)	415.342	390.992	373.439	359.743	380.911	370.906	388.971	397.877	396.381	362.818	427.114
GÁS NATURAL DERIVADOS DE PETRÓLEO (II)	46.679	68.942	81.073	79.503	56.550	65.591	54.295	60.188	53.515	86.861	42.035
CARVÃO	16.293	22.223	31.529	25.708	12.207	12.911	10.293	7.846	8.556	18.244	7.816
NUCLEAR	8.422	14.801	18.385	19.096	17.001	16.257	14.204	15.327	11.946	17.585	7.988
BIOMASSA (III)	16.038	15.450	15.378	14.734	15.864	15.739	15.674	16.129	14.053	14.705	14.559
EÓLICA	34.706	39.684	44.987	47.394	49.236	49.385	51.876	52.111	55.613	51.711	51.783
SOLAR	5.050	6.578	12.210	21.626	33.489	42.373	48.475	55.986	57.051	72.286	81.632
OUTRAS (IV)	2	5	16	59	85	831	3.461	6.651	10.748	16.752	30.126
	9.966	12.160	13.524	13.623	13.554	13.968	14.147	14.210	13.387	15.146	14.121

Notas:

- (1) Inclui PCH, CGH e autoprodução;
- (2) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível;
- (3) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia;
- (4) Outras: gás de coqueria, outras não renováveis e outras renováveis.

3.1.3. Análise dos Dados

A definição da aplicação dos modelos de Redes Neurais *Multilayer Perceptron* (MLP), Regressão do Processo Gaussiano (GPR) e Regressão Linear resultarão na estimativa de previsão futura, proporcionando deste modo a leitura e análise dos dados acerca do mercado de energia nacional. Assim como, a definição dos limites a serem extrapolados considera o horizonte no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, para se seja factível, a efeito de comparação, a análises dos dados a alcançados.

Posteriormente a delimitação dos dados de geração elétrica por fonte extraídos do Anuário Estatístico de Energia Elétrica, serão tabulados, analisados, interpretados e apresentados a sob forma gráfica, mediante aos modelos de Redes Neurais *Multilayer Perceptron* (MLP), Regressão do Processo Gaussiano (GPR) e Regressão Linear da série temporal para os períodos obtidos até o ano de 2022, último ano de medição das séries históricas disponíveis na base de dados.

A primeira etapa da mineração de dados, consiste em obter os dados referentes à série histórica a ser analisada da geração elétrica por fonte, reescrevendo as grandezas para facilitar a visualização das informações a serem extraídas, subdividindo-as quatro frentes, as usinas hidrelétricas, as fontes renováveis, as não renováveis e outras fontes, conforme Tabela 3.2.

As usinas hidrelétricas correspondem as fontes hidráulica, incluindo PCH, CGH e autoprodução, as não renováveis abrangem as fontes de gás natural, carvão, nuclear e derivados de petróleo, como óleo diesel e óleo combustível. Para as renováveis, são consideradas as fontes eólica, solar e biomassa, como lenha, bagaço de cana e lixo e a categoria outras corresponde a fontes de gás de coqueria, outras não renováveis e outras renováveis.

Tabela 3.2 – Reescrita da Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh)

FONTES	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
USINAS HIDRELÉTRICAS	415.342	390.992	373.439	359.743	380.911	370.906	388.971	397.877	396.381	362.818	427.114
NÃO RENOVÁVEIS	87.432	121.416	146.365	139.041	101.622	110.498	94.466	99.490	88.070	137.395	72.398
RENOVÁVEIS	39.758	46.267	57.213	69.079	82.810	92.589	103.812	114.748	123.412	140.749	163.541
OUTRAS	9.966	12.160	13.524	13.623	13.554	13.968	14.147	14.210	13.387	15.146	14.121
TOTAL	552.498	570.835	590.541	581.486	578.897	587.961	601.396	626.325	621.250	656.108	677.173

Posteriormente, mediante a adequação para entrada no software, os dados foram convertidos para o formato ARFF (*Attribute-Relation File Format*), objetivando, delimitar o conjunto de observações analisadas, sendo a estrutura reescrita para definição dos atributos analisados.

@relation 'Geração Elétrica por Fonte'

@attribute ANO numeric

@attribute USINAS HIDRELÉTICAS numeric

@attribute NÃO RENOVÁVEIS numeric

@attribute RENOVÁVEIS numeric

@attribute OUTRAS numeric

@data

2012,415.342,87.432,39.758,9.966

2013,390.992,121.416,46.267,12.160

2014,373.439,146.365,57.213,13.524

2015,359.743,139.041,69.079,13.623

2016,380.911,101.622,82.810,13.554

2017,370.906,110.498,92.589,13.968

2018,388.971,94.466,103.812,14.147

2019,397.877,99.490,114.748,14.210

2020,396.381,88.070,123.412,13.387

2021,362.818,137.395,140.749,15.146

2022, 427.114,72.398,163.541,14.121

A terceira etapa, consiste no início do uso do software WEKA, pela abertura e carregamento do arquivo ARFF na aba *Preprocess*, conforme Figura 3.1. No pré-processamento dos dados, os mesmos, são submetidos a diversas etapas de preparação, tais como normalização, tratamento de valores faltantes e seleção de atributos, com o intuito de otimizar a qualidade e a consistência dos dados. Essa fase preparatória visa criar um conjunto de dados robusto e coerente para análise de padrões, extração de conhecimento e aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina.

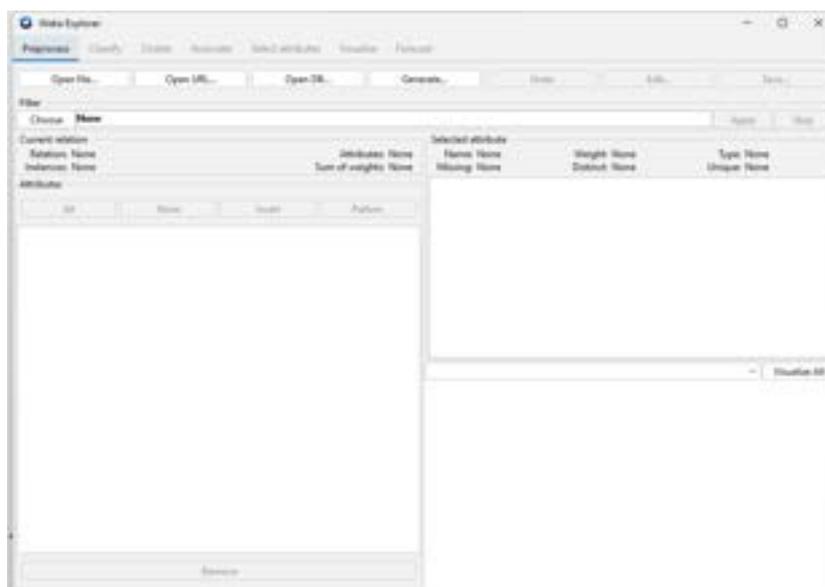


Figura 3.1 – Interface WEKA para aba *Preprocess*.

E quarta etapa refere-se à configuração dos parâmetros, abrangendo a seleção de variáveis objetivo, o número de unidades de tempo a ser previsto, a variável de referência temporal e a periodicidade da série temporal, assim como, a seleção das métricas a serem apresentadas.

A configuração dos parâmetros na aba *Forecast* para geração dos modelos subdivide-se em duas etapas, uma na aba *Basic configuration* e uma na aba *Advanced configuration*. A primeira etapa delimitou o número de unidades de tempo a ser feito a previsão para 8, a variável de referência temporal como sendo o ano, a periodicidade anual para a série temporal e marcação do *Perform evaluation*, para retorno das métricas de erro, conforme Figura 3.2.

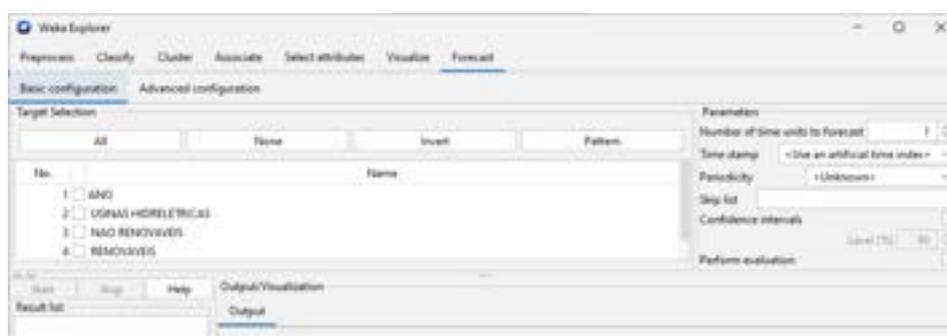


Figura 3.2 - Interface WEKA para aba *Basic configuration*.

Para a aba *Advanced configuration*, delimitou o algoritmo do método de previsão, o intervalo de defasagem e a seleção das métricas de avaliação, conforme Figura 3.3.

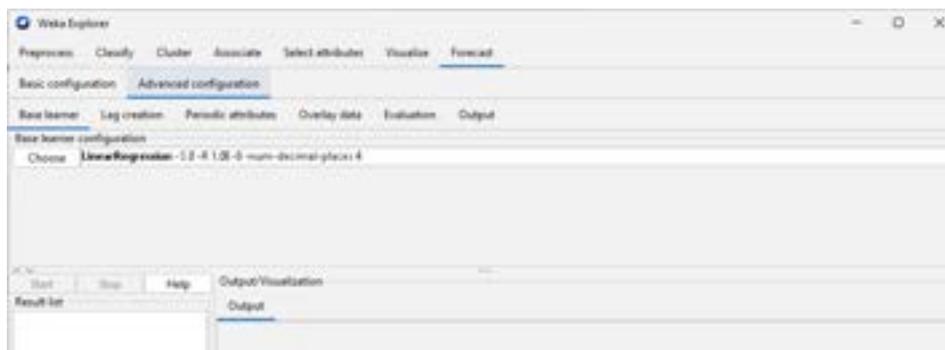


Figura 3.3 - Interface WEKA para aba *Advanced configuration*.

Por conseguinte, após definição dos parâmetros, foi realizada a previsão dos modelos de Redes *Neurais Multilayer Perceptron* (MLP), Regressão do Processo Gaussiano (GPR) e Regressão Linear, para análise dos padrões de comportamento futuro da geração elétrica por fonte no Brasil.

O diagrama de blocos para a projeção da previsão da geração elétrica por fonte no Brasil, por meio da mineração de dados e ferramentas computacionais do tipo *machine learning* ocorreu conforme a Figura 3.4.

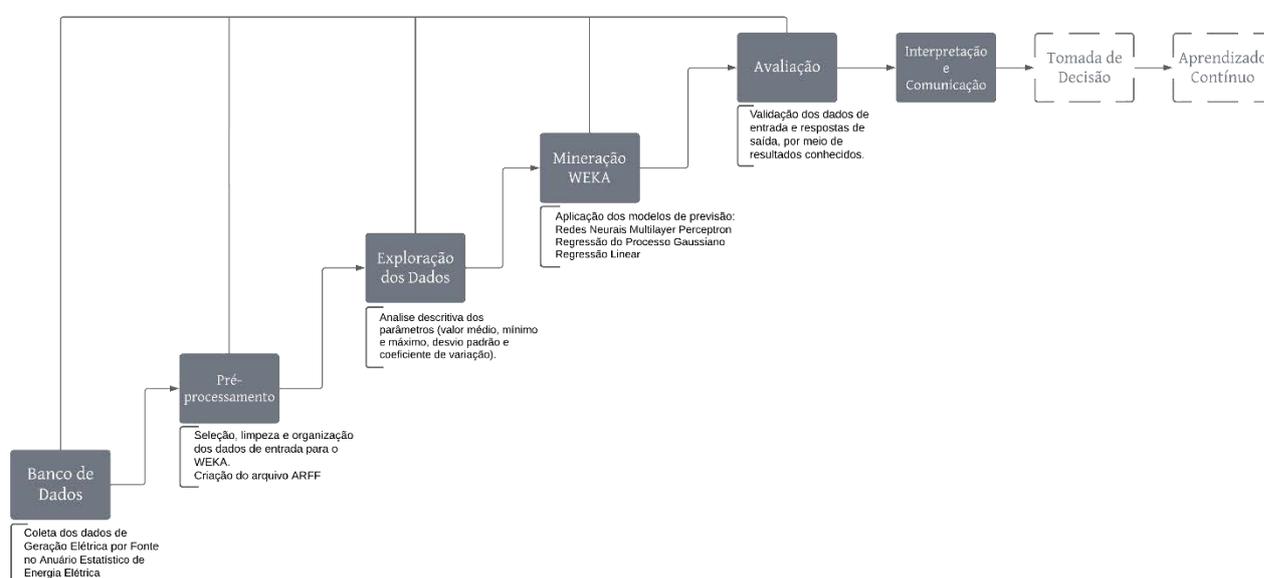


Figura 3.4 - Diagrama de blocos para a projeção da previsão da geração elétrica por fonte no Brasil

3.2. Construção de Cenários

A prospecção de cenário delineia expressar a percepção das diferentes formas em que as conjunturas competitivas e a indústria energética podem assumir, sob a forma de planejamento estratégico de médio e longo prazos, sendo segmentados em realista, otimista e pessimista.

O cenário realista engloba eventos que proporcionam notáveis perspectivas de serem manifestadas como favoráveis a realidade. O cenário otimista considera eventos com médias e altas expectativas de virem a realizar-se, sendo consideradas adequadas, favoráveis e com probabilidade

de ocorrência. O cenário pessimista constitui-se por eventos que apresentam médias e elevadas perspectivas de ocorrerem não sendo favoráveis ao setor energético.

A construção dos cenários abrange perspectivas atreladas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), adotado por 193 países por meio do Protocolo Internacional da Assembleia Geral das Organizações das Nações Unidas (ONU), constituindo a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.

Bem como, abrange as concepções do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, do Plano Nacional de Energia 2050, do Plano da Operação Energética 2022-2026 e considera, também, as complexidades provenientes das hidrelétricas, como o risco hidrológico e os impactos sociais e ambientais negativos.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7, trata da Energia limpa e acessível, no qual, tem como pressuposto assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos, delineando até 2030, manter elevada a participação de energias renováveis na matriz energética nacional (ONU, 2023).

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, prever que, em 2030, a capacidade instalada de geração elétrica brasileira atinja o nível de renovabilidade de 86%; e quanto a oferta de eletricidade, baseada em fontes renováveis como hidráulica, biomassa, eólica e solar, o nível de renovabilidade se aproxime de 90% ao longo do horizonte decenal (MME E EPE, 2021).

O Plano Nacional de Energia 2050 prevê uma matriz elétrica brasileira praticamente 100% renovável, mediante a um sistema centralizado, desde que a complementação de potência necessária fosse empreendida a partir de fontes renováveis (MME E EPE, 2022).

O Plano da Operação Energética, retrata a evolução da oferta elétrica da matriz nacional entre 2022 e 2026, por tipo de fonte, na qual, destaca-se o crescimento percentual para a expansão das usinas solares fotovoltaicas em 110,98%, usinas eólicas em 33,31% e biomassa em 11,23%, tendo as usinas hidráulicas um crescimento de 0,74% no mesmo período (ONS, 2022).

Ademais, o Balanço Energético Nacional retrata que no ano de 2021 a participação de renováveis na matriz energética nacional declinou em 3,8% quando comparado ao ano anterior, decorrente da oferta de energia hidráulica, correlacionada a escassez hídrica e a demanda das usinas termelétricas (EPE, 2022).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a aplicação dos modelos de Redes Neurais *Multilayer Perceptron* (MLP), Regressão do Processo Gaussiano (GPR) e Regressão Linear aos dados históricos, por meio de estimativas de previsão futura. Discute, também, os resultados extraídos por meio de análises das métricas RMSE, MAE e MAPE, apresentando o comportamento do mercado energético brasileiro no horizonte 2030 estudado.

Além do mais, apresenta as formulações dos cenários realista, otimista e pessimistas, a fim de alcançar estruturas de planejamento que impulsionem o debate e a reflexão sobre ações futuras.

4.1. Validação dos Modelos

A validação dos modelos se caracteriza como uma etapa crítica no desenvolvimento de algoritmos de *machine learning*, sendo um processo que avalia o desempenho, possibilitando a identificação da capacidade do modelo em realizar previsões precisas, no qual assegura a confiabilidade e aplicabilidade a novos dados.

A análise dos dados de treinamento que abrangem a série histórica da geração elétrica por fonte entre os anos de 2012 a 2017 revela informações valiosas para compreender o desempenho dos modelos de previsão em relação ao ano de 2018, conforme indicado pelo Anuário Estatístico de Energia Elétrica, onde apresenta a geração elétrica por fonte para o ano de 2018 de 601.396 GWh. Entre os modelos utilizados, o *Multilayer Perceptron* de Redes Neurais obteve uma geração elétrica estimada para 2018 de 581.156 GWh, com um MAPE de 3,37%, no qual o resultado indica uma precisão relativamente boa, mostrando a capacidade do modelo neural em ajustar-se à complexidade dos dados de geração elétrica.

Além disso, a Regressão do Processo Gaussiano apresentou um desempenho competitivo, gerando uma estimativa de 593.330 GWh para 2018, com um MAPE de 1,34%, demonstrando ser eficaz na captura de padrões de variação nos dados históricos. Por outro lado, a Regressão Linear, gerou uma estimativa de 605.864 GWh para o ano 2018, com o menor MAPE entre os modelos, com apenas 0,74%, no qual, apesar de sua abordagem menos complexa, revelou-se robusto na previsão da geração elétrica, indicando que, em certos contextos, simplicidade pode ser uma vantagem.

Por conseguinte, a análise dos modelos de previsão destaca a eficácia dos algoritmos utilizados na projeção da geração elétrica para o ano de 2018. A escolha do modelo apropriado dependerá da natureza dos dados e dos requisitos específicos, considerando a complexidade do sistema elétrico e a necessidade de precisão nas estimativas.

4.2. Análise dos Dados

A análise descritiva dos dados baseia-se na análise dos parâmetros, avaliando o valor médio, o valor mínimo, o valor máximo, o desvio padrão e o coeficiente de variação referentes à série histórica da geração elétrica por fonte, entre os anos de 2012 a 2022, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Parâmetros dos dados

ANÁLISE DOS PARÂMENTROS	USINAS HIDRELÉTRICAS	NÃO RENOVÁVEIS	RENOVÁVEIS	OUTRAS
MÉDIA (GWH)	387.681	108.927	93.668	13.437
MÍNIMO (GWH)	359.743	72.398	39.758	9.966
MÁXIMO (GWH)	427.114	146.356	163.541	15.146
DESVIO PADRÃO (GWH)	21.074	24.208	39.668	1.36
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	5,436	22,224	42,350	1,012

Sabendo que o coeficiente de variação corresponde a uma medida da dispersão dos dados em relação à média, para as usinas hidrelétricas o coeficiente de variação corresponde a 5,436%, para as fontes energéticas não renováveis, 22,224% de coeficiente de variação, para as renováveis, 42,350% e para outras fontes, 1,012% de coeficiente de variação, assim, os considera-se que os dados são homogêneos em relação à média quando considerados os dados históricos das usinas hidrelétricas e outras fontes e considerados heterogêneos para as renováveis e não renováveis, indicando maior variabilidade na produção de energia em relação à média.

Assim, as usinas hidrelétricas correspondem a principal fonte de geração de energia em média, e têm a maior produção mínima. As fontes renováveis têm o maior desvio padrão, significando que a produção de energia pode variar consideravelmente ao longo do tempo, frente as usinas hidrelétricas que têm o menor desvio padrão, indicando uma produção mais consistente.

Por conseguinte, as usinas hidrelétricas caracterizam-se por ser a fonte mais estável de produção de energia, com a menor variabilidade. As fontes renováveis, embora possam ter a capacidade de produzir grandes quantidades de energia em momentos ideais, também apresentam a maior variabilidade em relação à média e as fontes não renováveis têm um desempenho intermediário.

Ainda que, no contexto brasileiro, as hidrelétricas tenham historicamente desempenhado um papel crucial na matriz energética, observa-se um crescente interesse e investimento em fontes renováveis solar e eólica. Essa transição busca equilibrar a necessidade de fornecer energia de maneira eficiente com a consideração dos impactos ambientais e sociais.

Entretanto, as usinas hidrelétricas, ao aproveitarem a energia da água, oferecem uma produção estável e contínua de eletricidade, assim, a geração de energia hidrelétrica caracteriza-se por ser relativamente constante, proporcionando uma resposta flexível à demanda de eletricidade.

As fontes renováveis, como solar e eólica, são influenciadas por fatores climáticos e ambientais, no qual, a produção de energia solar está diretamente relacionada a quantidade de luz solar disponível, enquanto a geração eólica depende da velocidade e consistência do vento, essa dependência de fatores naturais resulta em variabilidade sazonal e diária.

E, ainda que as fontes renováveis possam atingir altos níveis de produção em momentos ideais, como dias ensolarados ou ventosos, sua variabilidade em relação à média significa que a produção não é constante ao longo do tempo, criando desafios para a integração eficiente dessas fontes na matriz energética, uma vez que se torna necessário lidar com flutuações na produção.

A variabilidade das fontes renováveis pode criar desafios para o gerenciamento da rede elétrica, exigindo soluções como o armazenamento de energia ou a implementação de tecnologias avançadas de previsão. A capacidade de prever e gerenciar efetivamente a variabilidade é crucial para otimizar a integração dessas fontes na matriz energética.

Em suma, o desafio reside em encontrar um equilíbrio entre a estabilidade oferecida pelas usinas hidrelétricas e a necessidade de integrar eficientemente as fontes renováveis, reconhecendo suas características variáveis, torna-se um papel crucial no processo de transição para uma matriz energética mais sustentável.

A geração elétrica por fonte no Brasil, para o recorte histórico de 2012 a 2022 apresenta-se na Figura 4.1, podendo ser visualizado seu comportamento ao longo do tempo, pelo qual se identifica no ano de 2015 uma redução na geração elétrica pelas usinas hidrelétricas, assim como, no ano de 2021, correspondendo o período de escassez hídrica mais crítico nos últimos 90 anos, sendo necessário o uso da geração por fontes não renováveis, para suprir a demanda energética.

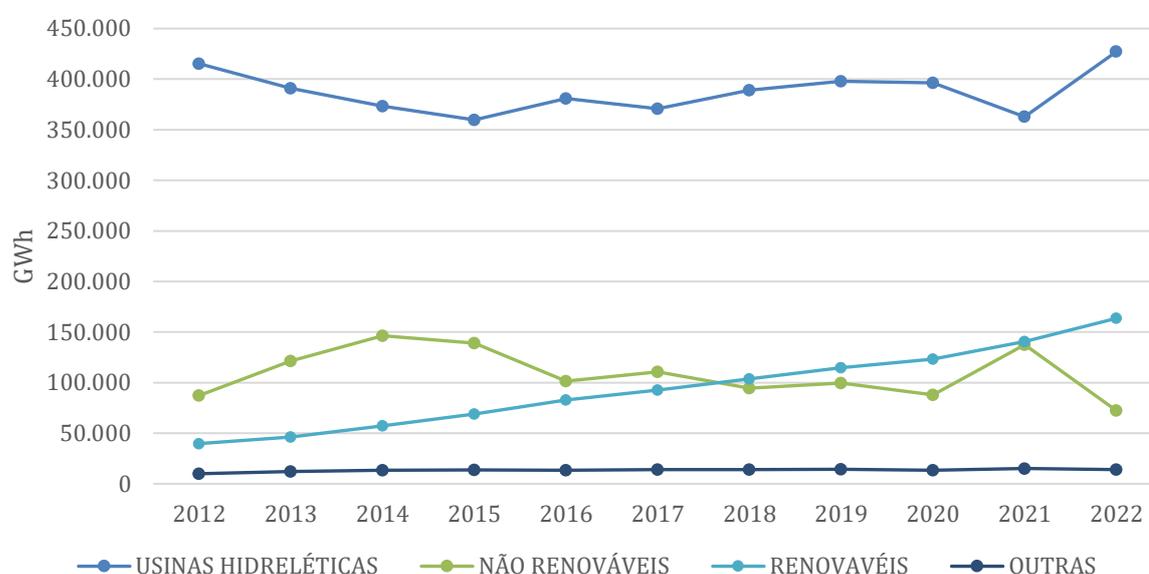


Figura 4.1 - Geração elétrica por fonte no Brasil de 2012 a 2022 (GWh)

4.3. Redes Neurais *Multilayer Perceptron*

A aplicação das Redes Neurais *Multilayer Perceptron*, a partir de diferentes camadas de arquitetura e ajuste de hiperparâmetros, obteve como resultado os dados apresentados na Tabela 4.2, onde apresenta a previsão da geração elétrica por fonte para o período de 2023 a 2030.

Os hiperparâmetros foram delimitados pelo número de camadas ocultas “a” correspondendo ao número de atributos + número de classes, a taxa de aprendizagem de 0.3, o impulso de 0.2 e o número de épocas de 500.

Tabela 4.2 - Previsão da Geração Elétrica por Fonte 2030 pelo método MLP (GWh).

FONTES	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
USINAS HIDRELÉTRICAS	375.800	383.564	395.483	442.795	325.483	462.431	399.194	384.585
NÃO RENOVÁVEIS	115.018	93.164	119.871	56.678	207.132	55.141	104.574	78.165
RENOVÁVEIS	157.577	187.646	206.991	219.090	226.458	286.524	249.830	289.596
OUTRAS	14.112	15.454	17.651	12.346	17.749	15.557	14.729	15.469
TOTAL	662.507	679.828	739.996	730.909	776.822	819.653	768.327	767.815

As usinas hidrelétricas apresentam valores variáveis ao longo dos anos, com uma variação de 325.483 GWh em 2027 a 462.431 GWh em 2028, as mesmas, representam uma parte substancial da produção total de energia elétrica, entretanto pela previsão, ocorre flutuações consideráveis em sua contribuição ao longo do período.

As fontes não renováveis, como o carvão, gás natural e petróleo, também se apresenta com variações significativas nas previsões, no qual os valores vão de 55.141 GWh em 2028 a 207.132 GWh em 2027, indicando uma produção de energia que pode ser altamente volátil.

Para as fontes renováveis, como energia solar, eólica e biomassa, apresentam um aumento constante na previsão de geração de energia ao longo dos anos, com valores variando de 157.577 GWh em 2023 a 289.596 GWh em 2030, sendo considerada uma fonte de crescimento constante na produção de energia.

E, a categoria de outras fontes, apresenta valores relativamente estáveis ao longo do período, com uma variação de 12.346 GWh em 2026 a 17.751 GWh em 2027.

No geral, pelo método de previsão MLP, a produção total de energia elétrica varia de 662.507 GWh em 2023 a 819.653 GWh em 2028, no entanto, há uma diminuição na produção total em 2030, voltando a 767.815 GWh.

Os resultados alcançados pelo método MLP das métricas, MAE, MAPE e RMSE para o conjunto de dados extrapolados, de 6 *steps ahead*, se apresentam na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Métricas do método MLP.

MÉTRICAS	6 STEP AHEAD
USINAS HIDRELÉTRICAS	
MAE	0.2805
MAPE	0.0657
RMSE	0.2805
NÃO RENOVÁVEIS	
MAE	0.1031
MAPE	0.1424
RMSE	0.1031
RENOVÁVEIS	
MAE	0.2355
MAPE	0.144
RMSE	0.2355
OUTRAS	
MAE	0.0115
MAPE	0.0812
RMSE	0.0115

As métricas para as usinas hidrelétricas indicam que as previsões estão relativamente próximas dos valores reais, onde O MAE e o RMSE são iguais, o que sugere que os erros de previsão são consistentes ao longo do tempo, com um valor absoluto médio de 0.2805.

Para as fontes não renováveis, as métricas indicam que as previsões têm um erro médio absoluto de 0.1031, onde o MAPE sugere que o erro percentual médio absoluto é de 14.24%, o que significa que as previsões têm uma precisão moderada.

As métricas para as fontes renováveis indicam um erro médio absoluto de 0.2355, com um MAPE de 14.4%, isso sugere uma precisão razoável nas previsões, embora ligeiramente menos precisa do que as usinas hidrelétricas.

Para as outras fontes, as métricas indicam que as previsões têm um erro médio absoluto muito baixo de 0.0115, com um MAPE de 8.12%, isso sugere uma alta precisão nas previsões para essa categoria.

O comportamento dos resultados obtidos pela aplicação do método MLP, considerando o intervalado de confiança de 95%, visualiza-se pela Figura 4.2.

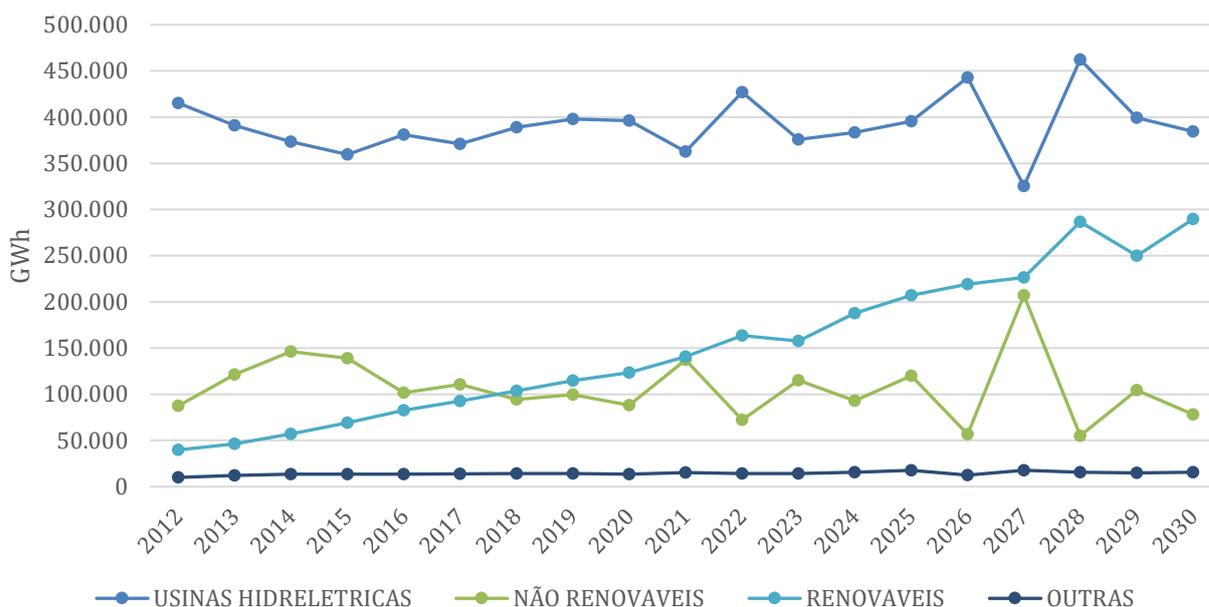


Figura 4.2 - Geração elétrica por fonte pelo método MLP - 2012 - 2030

4.4. Regressão do Processo Gaussiano

Pelo método de Regressão do Processo Gaussiano, a partir de processos estocásticos, obteve como resultado os dados apresentados na Tabela 4.4, onde apresenta a previsão da geração elétrica por fonte para o período de 2023 a 2030.

Tabela 4.4 - Previsão da Geração Elétrica por Fonte 2030 pelo método Regressão do Processo Gaussiano (GWh).

FONTES	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
USINAS HIDRELÉTRICAS	373.466	402.534	371.336	417.247	360.569	417.219	366.067	423.762
NÃO RENOVÁVEIS	119.261	87.668	130.470	72.326	139.133	72.872	130.303	66.284
RENOVÁVEIS	141.024	165.478	176.821	193.738	198.195	243.960	241.042	283.913
OUTRAS	14.505	14.657	15.802	14.380	16.347	15.380	16.690	15.420
TOTAL	648.256	670.337	694.429	697.691	714.244	749.431	754.102	789.379

Considerando as usinas hidrelétricas, a previsão indica um aumento constante na geração de energia por usinas hidrelétricas ao longo dos anos, atingindo um pico de 423.762 GWh em 2030, podendo ser um indicativo de uma maior dependência de usinas hidrelétricas para atender à demanda de energia elétrica, considerando seu aumento constante.

Para as fontes não renováveis há a previsão de uma queda acentuada ao longo dos anos, chegando a 66.284 GWh em 2030, podendo ser resultante de políticas de redução de emissões de carbono e uma mudança em direção a fontes mais limpas de energia.

A previsão para fontes de energia renovável, por outro lado, mostra um aumento constante, atingindo 283.913 GWh em 2030, isso sugere um maior investimento e crescimento na produção de energia renovável, como energia solar e eólica, para atender à crescente demanda.

As outras fontes de geração de energia apresentam variações relativamente pequenas ao longo dos anos, com um aumento geral de 15.420 GWh em 2030.

Assim, a geração total de energia elétrica no Brasil prevista pelo método GPR mostra um aumento constante, atingindo 789.379 GWh em 2030, isso sugere um aumento geral na capacidade de geração de energia no país para atender à demanda crescente.

Os resultados alcançados pelo método GPR das métricas, MAE, MAPE e RMSE para o conjunto de dados extrapolados, de 1 *steps ahead*, sendo métricas importantes para avaliar o desempenho do modelo em relação às previsões reais, se apresentam na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Métricas do método Regressão do Processo Gaussiano.

MÉTRICAS	1 STEP AHEAD
USINAS HIDRELÉTRICAS	
MAE	9.092
MAPE	2.3199
RMSE	12.0123
NÃO RENOVÁVEIS	
MAE	7.1953
MAPE	6.9193
RMSE	11.3891
RENOVAVÉIS	
MAE	6.9605
MAPE	5.4008
RMSE	7.6869
OUTRAS	
MAE	0.308
MAPE	2.1307
RMSE	0.3821

Para as usinas hidrelétricas, o MAE de 9.092 GWh indica que, em média, as previsões do modelo estão erradas por aproximadamente 9.092 GWh. O MAPE de 2.3199% é relativamente baixo, o que significa que as previsões são, em média, cerca de 2.32% diferentes dos valores reais. O RMSE de 12.0123 GWh indica que o erro médio das previsões é de cerca de 12.0123 GWh.

Considerando as fontes não renováveis, o MAE de 7.1953 GWh mostra que o modelo tem um erro médio absoluto de aproximadamente 7.1953 GWh nas previsões. O MAPE de 6.9193% indica que as previsões têm, em média, uma diferença de cerca de 6.92% em relação aos valores reais. O RMSE de 11.3891 GWh sugere que o erro médio das previsões é de cerca de 11.3891 GWh.

E, para as fontes renováveis, o MAE de 6.9605 GWh indica um erro médio absoluto de cerca de 6.9605 GWh nas previsões. O MAPE de 5.4008% sugere que as previsões têm, em média, uma diferença de aproximadamente 5.40% em relação aos valores reais. O RMSE de 7.6869 GWh mostra um erro médio das previsões de cerca de 7.6869 GWh.

Quando consideradas as outras fontes, o MAE de 0.308 GWh indica um erro médio absoluto muito baixo, sugerindo que as previsões são bastante precisas. O MAPE de 2.1307% indica uma diferença média de cerca de 2.13% em relação aos valores reais, o que também é bastante baixo. O RMSE de 0.3821 GWh mostra um erro médio das previsões muito baixo.

O comportamento dos resultados obtidos pela aplicação do método de Regressão do Processo Gaussiano, considerando o intervalo de confiança de 95%, visualiza-se pela Figura 4.3.

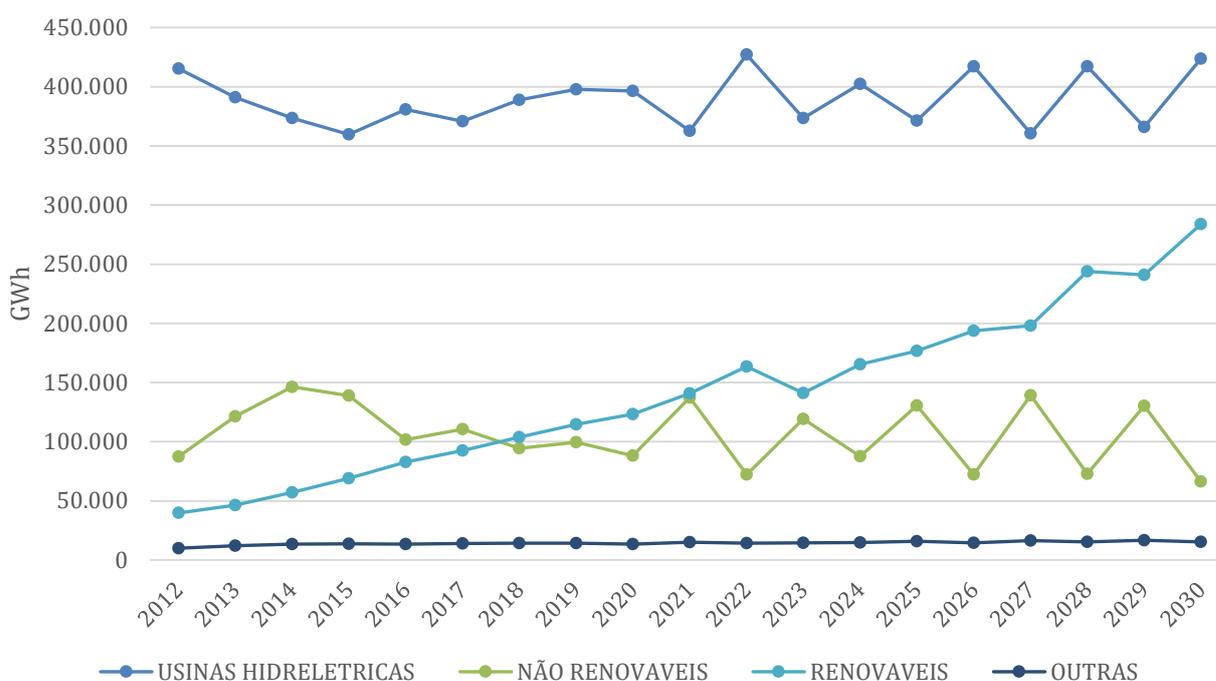


Figura 4.3 - Geração elétrica por fonte pelo método Regressão do Processo Gaussiano - 2012 – 2030.

4.5. Regressão Linear

A metodologia de Regressão Linear obteve como resultado os dados apresentados na Tabela 4.6, onde apresenta a previsão da geração elétrica por fonte para o período de 2023 a 2030.

Tabela 4.6 - Previsão da Geração Elétrica por Fonte 2030 pelo método Regressão Linear (GWh).

FONTES	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
USINAS HIDRELÉTICAS	362.828	376.443	384.748	409.628	340.541	416.418	383.304	384.134
NÃO RENOVÁVEIS	127.348	98.621	132.763	61.370	186.429	74.148	116.776	76.265
RENOVAVÉIS	144.526	167.348	189.002	166.595	172.553	197.342	192.248	176.111
OUTRAS	14.153	14.153	14.153	14.153	14.153	14.153	14.153	14.153

TOTAL	648.855	656.565	720.666	651.746	713.676	702.061	706.481	650.663
-------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

A geração prevista de energia pelas usinas hidrelétricas mostra uma variação ao longo dos anos, com valores que aumentam gradualmente até atingir o pico em 2026 e, em seguida, diminuem. É notável que a geração em 2027 é significativamente menor, seguida por uma recuperação em 2028. Essa variação pode ser influenciada por fatores climáticos, disponibilidade de recursos hídricos e investimentos no setor.

Notavelmente, em 2027, há uma queda acentuada na geração hidrelétrica, podendo ser indicativo de uma possível redução na disponibilidade de água para a produção de energia, sendo interpretada como um sinal de potencial crise hídrica nesse ano. E, com a diminuição na produção hidrelétrica, resulta em desafios para atender à demanda crescente por eletricidade, levando a adoção de medidas de racionamento e/ou a necessidade de aumentar a participação de outras fontes de energia para compensar a queda na produção hídrica.

A geração de energia a partir de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis, mostra uma tendência de aumento gradual, com algumas oscilações. Em 2026, há uma queda acentuada, seguida por uma recuperação em 2027, podendo estar relacionado a mudanças nas políticas energéticas, variações no preço do petróleo e outros fatores.

A geração de energia a partir de fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa, também apresenta uma tendência de aumento, mas com menos variações em comparação com as outras fontes, isso reflete o crescimento contínuo das energias renováveis no mix energético.

As outras fontes energéticas mostram valores constantes e inalterados ao longo dos anos, o que pode representar fontes de geração constante, como a nuclear.

A geração total de energia elétrica pelo método de Regressão Linear varia ao longo dos anos, refletindo as tendências nas fontes individuais, ressaltando a diminuição em 2027 e a recuperação subsequente em 2028.

Tabela 4.7 - Métricas do método Regressão Linear.

MÉTRICAS	2 STEP AHEAD
USINAS HIDRELÉTRICAS	
MAE	6.5027
MAPE	1.6392
RMSE	9.2307
NÃO RENOVÁVEIS	
MAE	5.1197
MAPE	5.1664
RMSE	7.3313
RENOVÁVEIS	
MAE	0.3037
MAPE	0.2057
RMSE	0.4448
OUTRAS	
MAE	0.371
MAPE	2.5909
RMSE	0.5616

As métricas indicam que as previsões para usinas hidrelétricas possuem um baixo erro médio (MAE), baixo erro percentual médio (MAPE) e baixo erro quadrático médio (RMSE), sugerindo que o modelo de regressão linear está bem ajustado para essa fonte. A baixa variabilidade entre as previsões e os valores reais é um indicativo de boa precisão.

As métricas para as fontes não renováveis mostram um MAE e MAPE mais elevados, indicando um erro médio e percentual maior em comparação com as usinas hidrelétricas. No entanto, o RMSE ainda é relativamente baixo, o que sugere que o modelo é capaz de fazer previsões razoavelmente precisas.

Para as fontes renováveis, as métricas indicam um desempenho muito bom. O MAE e o MAPE são extremamente baixos, sugerindo que as previsões estão muito próximas dos valores reais. O RMSE também é baixo, o que confirma a precisão do modelo.

As métricas para as outras fontes energéticas mostram um MAE e RMSE baixos, indicando que o modelo é preciso. No entanto, o MAPE é um pouco mais alto, sugerindo um erro percentual médio maior em comparação com as fontes renováveis.

O comportamento dos resultados obtidos pela aplicação do método de Regressão Linear, considerando o intervalado de confiança de 95%, visualiza-se pela Figura 4.4.

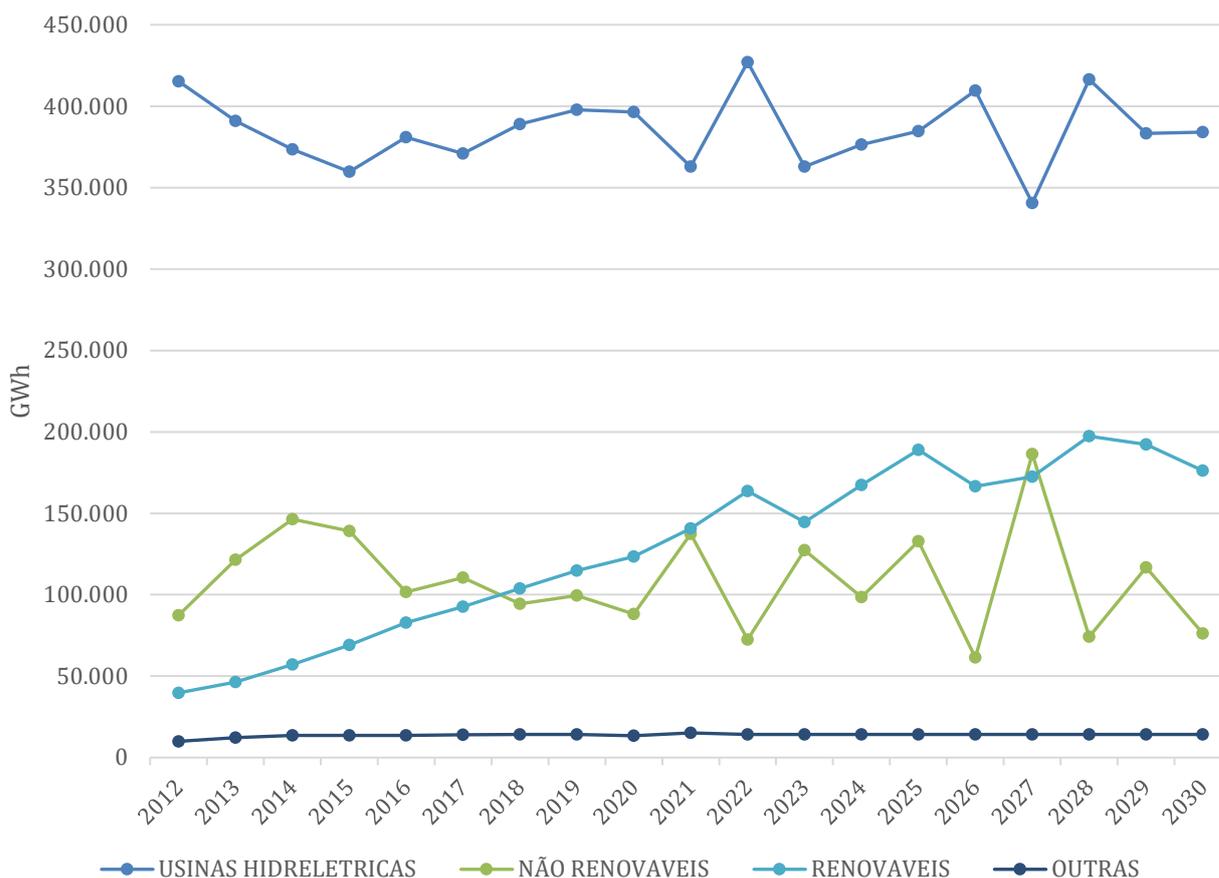


Figura 4.4 - Geração elétrica por fonte pelo método Regressão Linear - 2012 - 2030

4.6. Prospecção de Cenários

Quanto a definição e construção dos cenários propostos, os mesmos, estruturam-se com base nas diretrizes e premissas do Objetivos do Desenvolvimento Sustentável 7, Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, Plano Nacional de Energia 2050 e Balanço Energético Nacional, no qual, o processo de decisão das premissas orientadoras da construção dos cenários considerou o julgamento de valor sobre a realidade futura previstas no PDE 2030 e PNE 2050, mediante a interpretação e suas relações.

Por conseguinte, o cenário realista tem como premissa: (i) aumento da participação de fontes renováveis em 0,5% ao ano abrangendo todas as fontes energéticas renováveis na matriz brasileira. Assim, tem-se que ocorrerá o aumento da participação de fontes renováveis em 0,5% ao ano, abrangendo todas as fontes energéticas renováveis na matriz brasileira, assim, considerando a premissa de crescimento do PDE, adotou-se que as usinas hidrelétricas crescerão 0,36% e as outras renováveis, biomassa, eólica e solar, em 0,14% ao ano.

O cenário otimista considera as premissas de: (i) estagnação da fonte hídrica mediante a expansão da energia solar, eólica e biomassa em 20% no decorrer dos anos; e (ii) adoção de políticas governamentais e incentivos fiscais. Pressupondo-se, então, a estagnação da fonte hídrica a partir do

ano de 2026 mediante a expansão da energia solar, eólica e biomassa, assim, as mesmas, irão expandir em 20% no decorrer dos anos, por meio da adoção de políticas governamentais e incentivos fiscais.

O cenário pessimista abrange as premissas: (i) crise hídrica; e (ii) aumento da fonte energética nuclear. Assim, considerando o desencadeamento da crise hídrica entre os anos de 2024 e 2025, onde atribui-se a redução da capacidade instalada semelhante à ocorrida na crise hídrica de 2015, assim como, nos anos subsequentes, um desaceleramento do crescimento hídrico em, aproximadamente, 30% ao ano e aumento da fonte energética nuclear, para compensar a hídrica.

Em suma, os cenários foram estruturados mediante as diretrizes na ODS 7, PDE 2030, PNE 2050 e BEN, tomando como orientação as características definidas para cada cenário, conforme Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Estruturação dos Cenários

Cenário	Característica	Diretrizes	Estrutura de Perspectiva
Realista	Eventos com perspectivas favoráveis a realidade.	Manter elevada a participação de energias renováveis na matriz energética nacional (ONU, 2022);	Aumento da participação de todas as fontes renováveis em 0,5% ao ano.
Otimista	Eventos com médias e altas expectativas consideradas adequadas, favoráveis e com probabilidade de ocorrência.	A capacidade instalada de geração elétrica atinja o nível de renovabilidade de 86% e a oferta de eletricidade, baseada em fontes renováveis, o nível de renovabilidade se aproxime de 90% (MME E EPE, 2021); Previsão de uma matriz elétrica brasileira praticamente 100% renovável (MME E EPE, 2020).	Estagnação da fonte hídrica a partir do ano de 2026; Expansão da energia solar, eólica e biomassa em 20% no decorrer dos anos.
Pessimista	Eventos com médias e elevadas perspectivas de ocorrerem, não sendo favoráveis.	Declínio da participação de renováveis na matriz energética em 3,8% no ano de 2021, decorrente da oferta de energia hidráulica, pela escassez hídrica e a demanda das usinas termelétricas (EPE, 2022).	Ocorrência da crise hídrica entre os anos de 2024 e 2025, com parâmetros da crise hídrica de 2015; Após 2025, desaceleramento do crescimento hídrico em 30% ao ano; Aumento da fonte nuclear, para compensar a hídrica.

4.7. Apontamentos e Discussões

As previsões são fundamentais para o planejamento e a gestão do setor de energia elétrica, fornecendo *insights* sobre as contribuições de diferentes fontes de energia ao longo do tempo. Entretanto, ressalta-se que as previsões estão sujeitas a incertezas e podem variar com base em diversos fatores, incluindo condições climáticas, mudanças na demanda e avanços tecnológicos.

É fundamental monitorar e ajustar as previsões conforme necessário para garantir um fornecimento confiável de energia no futuro, assim como, é importante considerar essas métricas ao avaliar a confiabilidade das previsões e ao planejar a geração futura de energia com base nos resultados.

Em suma, as métricas mostram que o método MLP é capaz de fornecer previsões com diferentes níveis de precisão, dependendo da categoria de fonte de energia, no qual as usinas hidrelétricas têm as previsões mais precisas, seguidas outras fontes, as renováveis e as não renováveis.

Para o método GPR é importante observar que a precisão das previsões depende da qualidade dos dados de entrada e da adequação do modelo GPR, onde as incertezas associadas a essas previsões também precisam ser consideradas ao tomar decisões estratégicas no setor de energia.

O método de Regressão Linear parece funcionar bem para prever a geração de energia a partir de várias fontes, no entanto, é importante observar que o desempenho varia entre as diferentes fontes, com as fontes renováveis tendo as previsões mais precisas, assim, a escolha de métricas específicas deve depender dos requisitos de precisão do sistema elétrico e do setor energético.

Por conseguinte, a análise dos dados corresponde a um passo crucial para compreender as tendências futuras na geração de energia elétrica e planejar adequadamente o suprimento de energia para o país, podendo ser valiosa para o planejamento do setor energético, identificando tendências e variações que podem afetar a oferta e a demanda de energia no futuro.

Além do mais, considerar outros fatores, como políticas energéticas, mudanças tecnológicas e impactos ambientais, ao interpretar esses resultados torna-se importante.

O comportamento dos resultados da geração elétrica por fonte para o intervalo anual de 2023 a 2030, obtidos pela aplicação dos métodos MLP, GPR e Regressão Linear, apresentam-se pela Figura 4.5, onde relaciona o comparativo entre os métodos.

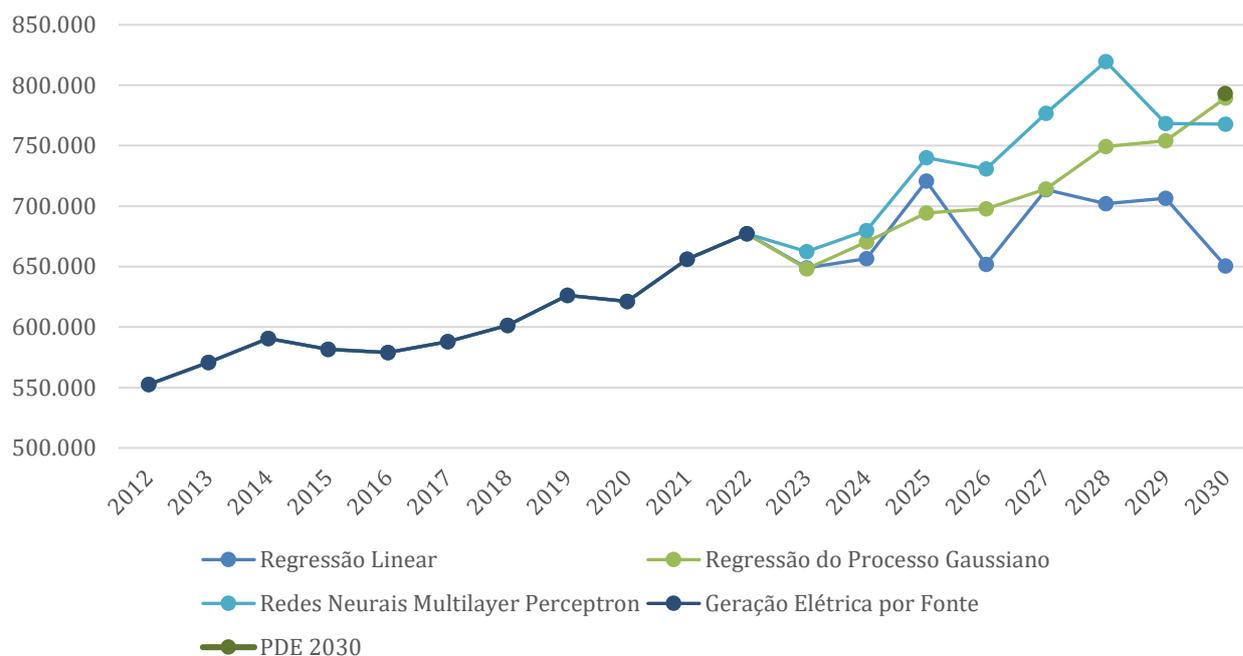


Figura 4.5 – Comparativo entre os métodos para a previsão da expansão da geração elétrica por fonte

Considerando as projeções de geração elétrica pelos métodos de Regressão Linear, Regressão do Processo Gaussiano e Redes Neurais *Multilayer Perceptron* para o período de 2023 a 2030 tem-se que:

- Pela Regressão Linear: A projeção da geração elétrica por fonte começa em 648.855 GWh em 2023 e aumenta ao longo dos anos, atingindo 702.061 GWh em 2028. No entanto, a projeção cai em 2029 e 2030, atingindo 650.663 GWh.
- Pela Regressão do Processo Gaussiano: A projeção da geração elétrica por fonte é semelhante à Regressão Linear nos anos iniciais. No entanto, mantém uma tendência de crescimento mais estável, atingindo 754.102 GWh em 2029 e 789.379 GWh em 2030.
- Redes Neurais *Multilayer Perceptron*: A projeção da geração elétrica por fonte começa em 662.507 GWh em 2023 e cresce até 739.996 GWh em 2025. Após 2025, há uma oscilação, e a projeção varia em torno de 730.909 GWh a 776.822 GWh até 2030.

Assim, o método de Regressão Linear demonstrou uma tendência de crescimento moderado, com alguma variação nos anos finais do período, o método de Regressão do Processo Gaussiano parece ser mais otimista quanto ao crescimento da geração de energia e o Redes Neurais *Multilayer Perceptron* tem uma tendência de crescimento mais variável.

A Regressão Linear e o Processo Gaussiano tendem a produzir projeções mais estáveis, enquanto as Redes Neurais MLP mostra maior variabilidade ao longo do tempo.

Quando comparado ao PDE 2030, mediante a previsão da geração elétrica por fonte, o método Regressão do Processo Gaussiano alcança 789.379 GWh em 2030 e a meta estabelecida pelo Plano Decenal de Expansão de Energia pressupõe que em 2030 se atinge 793.000 GWh, alcançando o RMSE 21564 GWh, MAE 3.621 GWh e MAPE 0,5%, por conseguinte, evidencia-se uma proximidade nos valores projetados, indicando que o método proposto está alinhado com as metas estabelecidas pelo planejamento energético.

A pequena diferença, de aproximadamente 3.621 GWh, entre a previsão do método de Regressão do Processo Gaussiano e a meta do PDE 2030 sugere uma adequação razoável do modelo na estimativa da geração elétrica futura, tencionando a essa proximidade um indicativo de que o método pode ser considerado confiável para fornecer projeções realistas, ainda que considere as incertezas e variabilidades inerentes ao sistema energético.

Em suma, pela análise comparativa sugere que o método Regressão do Processo Gaussiano apresenta resultados coerentes e alinhados com as metas do PDE 2030, fornecendo uma base sólida para as projeções futuras da geração elétrica por fonte.

Torna-se essencial considerar os resultados das métricas de desempenho, como MAE, MAPE e RMSE, para avaliação da precisão das previsões de cada método, determinando o mais adequado ao propósito desejado, uma vez que as métricas fornecem informações valiosas sobre quão próximas as projeções estão dos valores reais.

Assim, para o método de Regressão Linear, alcançou-se o MAE de 142.337 GWh, MAPE de 17,9% e RMSE de 142.337 GWh, bem como, para as Redes Neurais *Multilayer Perceptron* o MAE corresponde a 25.185 GWh, o MAPE de 3,2% e RMSE de 117.151 GWh.

Ademais, as inferências dos cenários propostos, realista, otimista e pessimista, fornecem uma visão abrangente das possíveis trajetórias futuras da matriz energética brasileira, considerando diferentes fatores e diretrizes, no qual, cada cenário reflete uma abordagem única para enfrentar os desafios e oportunidades no setor energético, proporcionando uma base para análise e planejamento estratégico.

O cenário realista, pautado em perspectivas favoráveis à realidade, destaca a importância de manter uma participação elevada de energias renováveis na matriz energética nacional, buscando atingir metas ambiciosas de renovabilidade, considerando um crescimento gradual e sustentável, alinhado com as diretrizes do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030.

No cenário otimista, fundamentado em expectativas positivas, antecipa eventos como a estagnação da fonte hídrica e uma significativa expansão das energias solar, eólica e biomassa, tendo uma visão mais positiva destaca oportunidades de crescimento acelerado dessas fontes, contribuindo para uma matriz energética mais diversificada e sustentável.

Contrastando com os cenários anteriores, o cenário pessimista prevê desafios significativos, como a redução da participação de renováveis devido à escassez hídrica e a ocorrência de crises, demandando a implementação de estratégias de mitigação, como o aumento da participação da energia nuclear.

Assim, cada cenário reflete uma abordagem única para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades no setor energético, tendo as projeções o intuito de fornecer uma base crucial para análise e planejamento estratégico, permitindo uma melhor compreensão das possíveis trajetórias futuras e subsidiando decisões informadas para o desenvolvimento sustentável do sistema energético brasileiro.

CONCLUSÕES

Os dados acerca do mercado de energia brasileiro, ao delinear as políticas, diretrizes nacionais de atuação e os mecanismos de regulação que influenciam o setor energético, proporcionam uma compreensão mais profunda do desenvolvimento histórico do mercado de energia brasileiro e das influências das políticas e regulamentações, tornando-se a criação dessa contextualização histórica crucial para informação das projeções futuras e as estratégias de planejamento energético.

A projeção da previsão do mercado de energia elétrica no Brasil, realizada por meio da mineração de dados e ferramentas computacionais do tipo *machine learning*, possibilitou a identificação dos padrões de comportamento mercadológico, onde, essa análise de dados permite antecipar as tendências e mudanças no mercado, contribuindo para um planejamento mais informado e estratégico no setor energético.

Ao delinear o horizonte previsto pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, possibilita a criação de uma visão para avaliação de quão próximas ou distantes as projeções obtidas pelos modelos estão das metas governamentais, sendo fundamental para compreender a viabilidade e a eficácia das estratégias propostas, contribuindo para uma abordagem mais precisa e alinhada com as diretrizes governamentais.

Ademais, ao inferir de possíveis cenários de previsão para aumento da participação das fontes renováveis no mercado energético brasileiro, obtêm-se uma compreensão aprofundada dos caminhos pelos quais as fontes renováveis podem ganhar uma presença mais significativa, proporcionando informações valiosas para formuladores de políticas, investidores e outros stakeholders do setor.

A utilização do software WEKA, em conjunto com os métodos de Redes Neurais *Multilayer Perceptron*, Regressão do Processo Gaussiano e Regressão Linear, representa um avanço significativo na análise de dados e previsão para o mercado energético. Ao longo desta dissertação, foi explorado as capacidades e potencialidades dessas técnicas, evidenciando como elas podem ser valiosas ferramentas na tomada de decisões e versátil na análise de dados e previsão da geração elétrica por fonte no Brasil.

No que tange às Redes Neurais *Multilayer Perceptron*, observa-se sua capacidade de aprendizado a partir de dados históricos, sua adaptabilidade a diferentes tipos de problemas e sua habilidade de capturar relações não-lineares entre variáveis. A avaliação das previsões por meio das métricas MAPE, MAE e RMSE revelou um desempenho satisfatório, com a capacidade de fornecer estimativas precisas e confiáveis em uma variedade de domínios.

A Regressão do Processo Gaussiano, por sua vez, destaca-se por sua capacidade de modelar relacionamentos entre variáveis sob incerteza. Ao adotar uma abordagem probabilística, essa técnica fornece estimativas confiáveis e intervalos de confiança, sendo fundamental para avaliar e quantificar

as incertezas inerentes aos dados. A avaliação por meio das métricas MAPE, MAE e RMSE destacou a capacidade dessa técnica de fornecer estimativas confiáveis em cenários de alta incerteza.

A Regressão Linear, embora mais simples em comparação com os outros métodos, permanece como uma ferramenta valiosa em muitos cenários, oferecendo interpretabilidade e facilidade de implementação, podendo fornecer previsões aceitáveis, especialmente quando a relação entre as variáveis é predominantemente linear.

Além do mais, a metodologia proposta de previsão da geração elétrica por fonte, com um mercado brasileiro majoritariamente de participação hídrica, alcançou os resultados esperados, em conformidade com as premissas do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030.

O crescimento do mercado energético nacional, mediante aos métodos aplicados, para a geração elétrica por fonte para o ano de 2030, retrata que as fontes renováveis tiveram um crescimento considerável, estando próximo ao objetivo do Plano Decenal de Expansão de Energia para o horizonte delimitado, em que delineia ser atingido o nível de renovabilidade de 90% abrangendo as fontes hidráulica, biomassa, eólica e solar.

Para os métodos de Regressão linear, alcançou a renovabilidade de 86%, assim como, para a Regressão do Processo Gaussiano 90% e para a Redes Neurais *Multilayer Perceptron* a renovabilidade atingiu 88%.

Há a necessidade do desenvolvimento do conjunto de políticas para que se alcance o atingimento dos níveis necessários das metas propostas, devendo apoiar a transição energética mediante ao aumento dos níveis de investimentos e redução dos custos de tecnologia.

Ademais, a expectativa do sistema elétrico brasileiro de manter e expandir a oferta de geração renovável acarreta mudanças na composição da matriz, gerando desafios de planejamento, mediante a fonte hídrica e o aumento da participação de outras fontes renováveis, necessitando da expansão de potência e desenvolvimento de tecnologias contribuintes para o cenário futuro.

Os cenários propostos para o mercado energético brasileiro intencionam-se no crescimento gradual do uso de fontes renováveis na matriz de energia elétrica e no seu potencial de crescimento, entretanto, para que seja factível a sua ocorrência e progresso, deverá ser desenvolvidas estratégias políticas governamentais de revisão de planos, políticas, regimes fiscais e estruturas do setor energético brasileiro.

As previsões retratadas pelos métodos visam a promoção de argumentações que possibilitem o desenvolvimento de ações presumidas para o processo de planejamento energético.

Recomendações para trabalhos futuros

Como contribuição para o desenvolvimento contínuo do campo de previsão e planejamento energético, sugere-se que sejam realizadas abordagens para projetar a previsão do mercado de energia elétrica no Brasil mediante aos cenários propostos, delineando o comparativo dos cenários desenvolvidos para com os horizontes previstos.

Com desenvolvimento dos cenários e o contínuo desenvolvimento da mineração de dados, é possível a proposição de uma abordagem flexível e dinâmica, proporcionando descobertas de padrões do mercado energético e desenvolvimento de subsídios do planejamento estratégico do setor, recomenda-se a realização de uma análise mais detalhada e abrangente dos cenários propostos, comparando não apenas com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, mas também incorporando as metas e diretrizes do Plano Nacional de Energia 2050.

Sugere-se, também, o aprofundamento da projeção do mercado de energia elétrica no Brasil, considerando variáveis adicionais e refinando os modelos de *machine learning* para melhorar a precisão das previsões, assim como, investigar a inclusão de cenários adicionais que possam surgir devido a mudanças tecnológicas, políticas ou econômicas, adaptando o modelo para capturar as nuances desses possíveis desenvolvimentos.

E, a realização de um estudo aprofundado sobre o impacto econômico, social e ambiental do aumento da participação das fontes renováveis, fornecendo *insights* adicionais para formuladores de políticas e tomadores de decisão.

Produtos pretendidos

Considerando possíveis publicações decorrente do desenvolvimento do estudo intenciona-se, ter como produto futuro a concepção de artigos acerca do tema proposto, a fim de promover discussões relevantes e inspirar pesquisas futura.

Os artigos derivados do estudo abrangerão, a metodologia de previsão energética e a análise de cenários futuros.

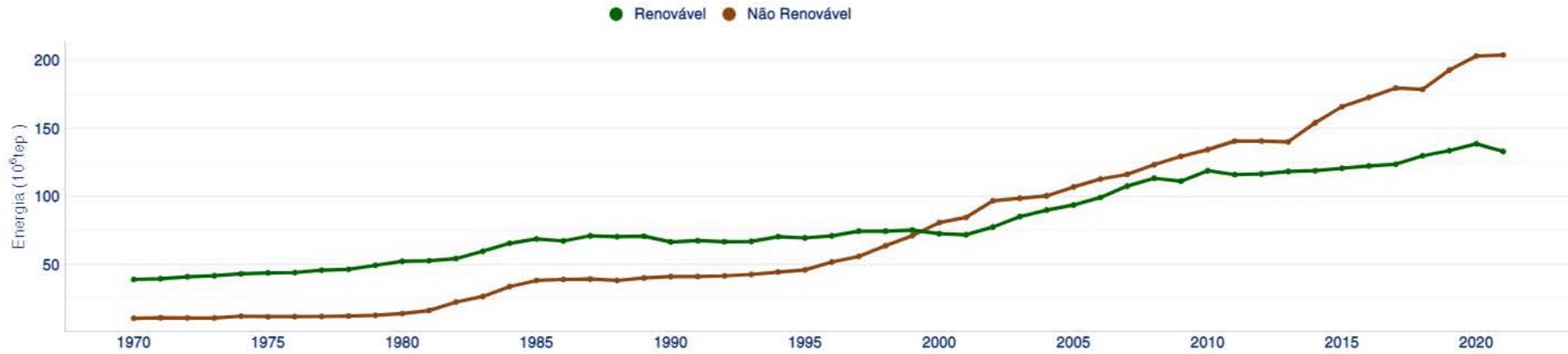
Para a metodologia de previsão energética, se desenvolverá uma descrição detalhada da metodologia utilizada, destacando os métodos de *machine learning* (Redes Neurais MLP, Regressão do Processo Gaussiano e Regressão Linear) e a abordagem adotada para a análise de dados, intitulado “Explorando o Futuro da Energia: Uma Análise Detalhada da Metodologia de Previsão Energética com ênfase em Machine Learning e Análise de Dados”.

E, para análise de cenários futuros o enfoque será na análise dos cenários propostos, destacando as tendências identificadas, os fatores que mais influenciam as projeções e as implicações para o planejamento energético, sendo o artigo “Antecipando o Amanhã: Análise Aprofundada dos Cenários Futuros e Suas Implicações no Planejamento Energético”.

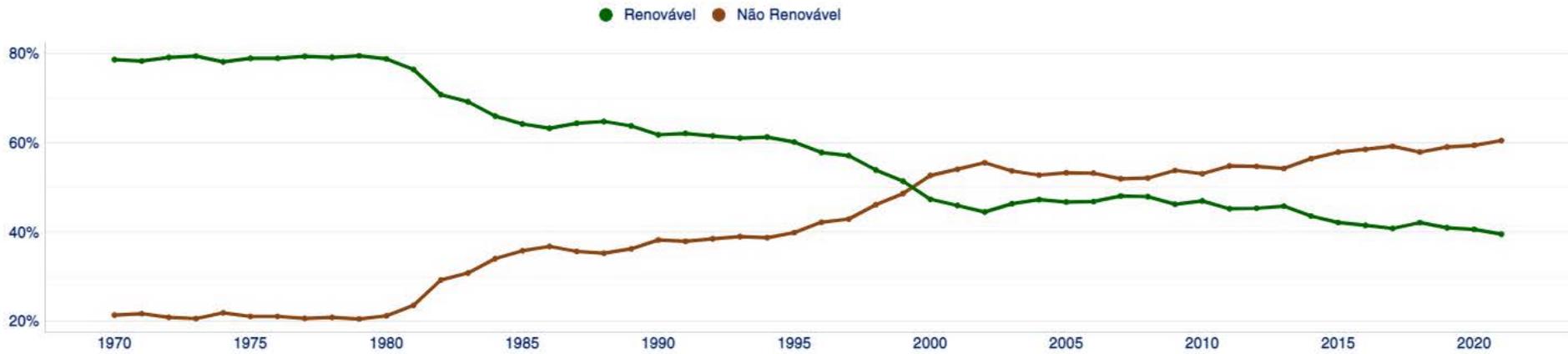
Intenciona-se, também, a obtenção de registro de software computacional acerca da metodologia de previsão realizada, onde gerará dados futuros mediante a inserção de dados históricos pelos métodos de Redes Neurais MLP, Regressão do Processo Gaussiano e Regressão Linear, em conformidade com o horizonte do tempo.

O modelo computacional atua para definição, previsão e oportunidades do setor energético, tendo como embasamento o cenário atual e passado, para desenvolvimento da base de planejamento. No qual, por meio da inserção de dados históricos, alcançará a previsão no horizonte a ser alcançado.

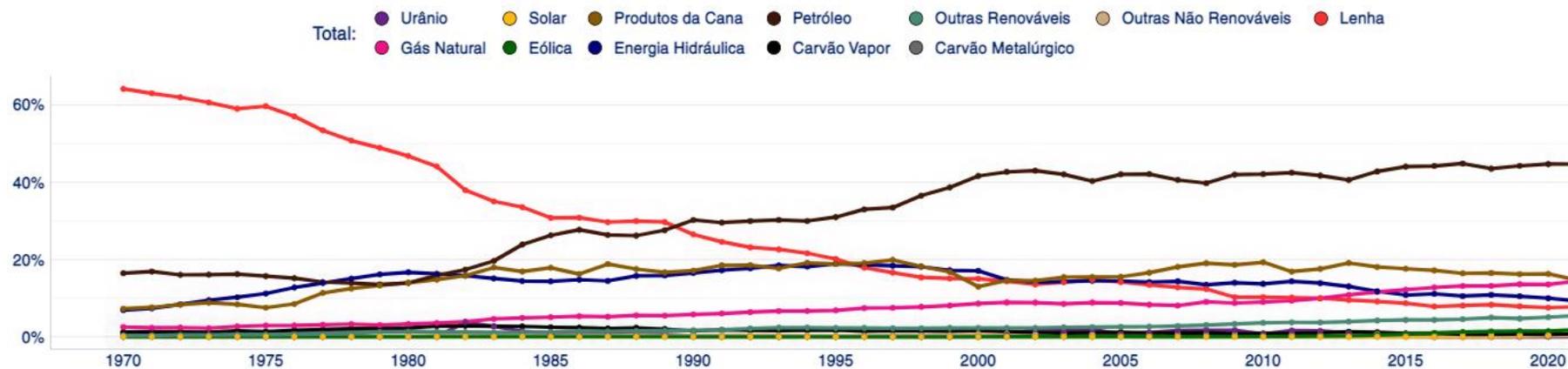
APÊNDICE I – FIGURAS



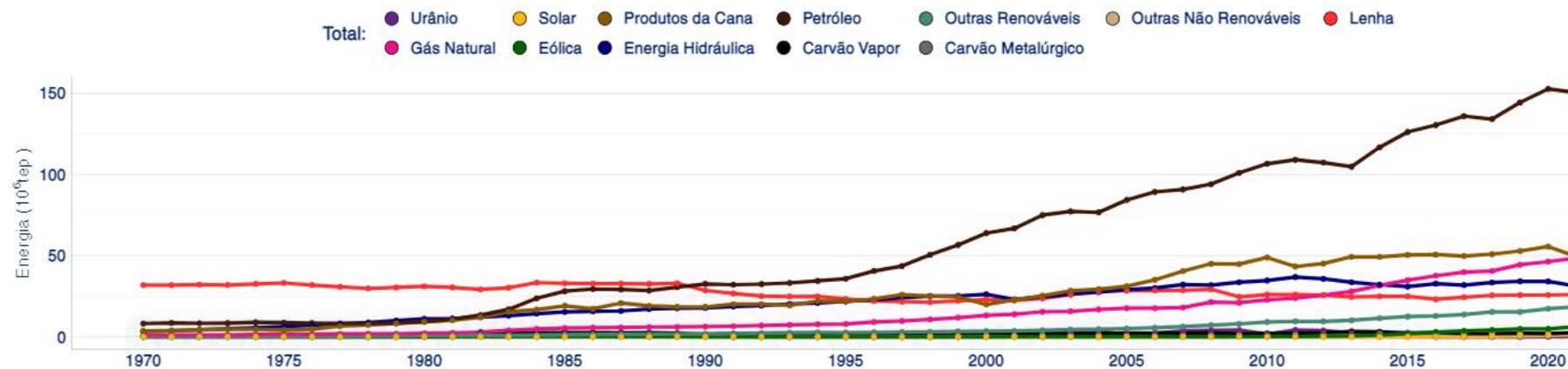
Produção de Energia Primária Brasileira por Fontes de 1970 a 2021 (Energia) (EPE, 2022).



Produção de Energia Primária Brasileira por Fontes de 1970 a 2021 (%) (EPE, 2022).



Produção de Energia Primária Brasileira por Fontes de 1970 a 2021 (%) (EPE, 2022).



Produção de Energia Primária Brasileira por Fontes de 1970 a 2021 (Energia) (EPE, 2022).

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, C. C. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook. Springer. 2018.

ALMEIDA, D. N. A crise no fornecimento e distribuição de energia elétrica no Brasil em 2001: Uma análise panorâmica com foco em na prevenção de eventos análogos futuros. v. 11, n. 1, p. 1–21, 2022.

ANEEL. Caminhos do Setor Elétrico Brasileiro. 2023. Disponível em: <https://caminhosregulacao.aneel.gov.br/caminhos3.asp>. Acesso em: 20 out. 2023.

ANEEL. Resolução Normativa nº 109, de 26 de outubro de 2004. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 27 de outubro de 2004a.

ANEEL. Resolução Normativa nº 249, de 11 de agosto de 1998. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 12 de agosto de 1998a.

ANEEL. Resolução Normativa nº 264, de 13 de agosto de 1998. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 14 de agosto de 1998b.

ANEEL. Resolução Normativa nº 265, de 13 de agosto de 1998. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 14 de agosto de 1998c.

ANEEL. Resolução Normativa nº 281, de 1 de outubro de 1999. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 2 de outubro de 1999.

ANEEL. Resolução Normativa nº 290, de 3 de agosto de 2000. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 4 de agosto de 2000.

ANEEL. Resolução Normativa nº 323, de 08 de julho de 2008. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 09 de julho de 2008.

ANEEL. Resolução Normativa nº 353, de 22 de julho de 2003. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 23 de julho de 2003b.

ANEEL. Resolução Normativa nº 373, de 27 de agosto de 2009. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 28 de agosto de 2009b.

ANEEL. Resolução Normativa nº 376, de 25 de agosto de 2009. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 26 de agosto de 2009a.

ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 18 de abril de 2012.

ANEEL. Resolução Normativa nº 77, de 18 de agosto de 2004. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 19 de agosto de 2004b.

ANEEL. Resolução Normativa nº 91, de 27 de fevereiro de 2003. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. Diário Oficial da União, 28 de fevereiro de 2003a.

BACELLAR, J. S., VASQUEZ, R. V. The Brazilian electricity market: Regulatory framework, market power and efficiency. Energy Economics, 74, 616-634. 2018.

BARROS, E. V. DE. A Matriz Energética Mundial E a Competitividade Das Nações: Bases De Uma Nova Geopolítica. *Engevista*, v. 9, n. 1, p. 47–56, 2010.

BRASIL. Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 31 de julho de 2004c.

BRASIL. Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997. Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 7 de outubro de 1997b.

BRASIL. Decreto nº 2.655, de 2 de julho de 1998. Regulamenta o Mercado Atacadista de Energia Elétrica, define as regras de organização do Operador Nacional do Sistema Elétrico, de que trata a Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 3 de julho de 1998b.

BRASIL. Decreto nº 41.019, de 26 de fevereiro de 1957. Regulamenta os serviços de energia elétrica. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 27 de fevereiro de 1957.

BRASIL. Decreto Nº 5.081, de 14 de maio de 2004. Regulamenta os arts. 13 e 14 da Lei no 9.648, de 27 de maio de 1998, e o art. 23 da Lei no 10.848, de 15 de março de 2004, que tratam do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 15 de maio de 2004d.

BRASIL. Decreto nº 5.175 de 9 de agosto de 2004. Constitui o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico - CMSE de que trata o art. 14 da Lei no 10.848, de 15 de março de 2004. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 10 de agosto de 2004e.

BRASIL. Decreto nº 5.177 de 12 de agosto de 2004. Regulamenta os arts. 4o e 5o da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, e dispõe sobre a organização, as atribuições e o funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 13 de agosto de 2004f.

BRASIL. Decreto nº 5.184 de 16 de agosto de 2004. Cria a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, aprova seu Estatuto Social e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 17 de agosto de 2004g.

BRASIL. Decreto nº 7.583, de 13 de outubro de 2011. Regulamenta a aplicação da Tarifa Social de Energia Elétrica, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 14 de outubro de 2011.

BRASIL. Lei 8.631 de 4 de março de 1993. Dispõe sobre a fixação dos níveis das tarifas para o serviço público de energia elétrica, extingue o regime de remuneração garantida e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 5 de março de 1993.

BRASIL. Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 06 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 16 de março de 2004a.

BRASIL. Lei nº 9.074 de 7 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 8 de julho de 1995b.

BRASIL. Lei nº. 3.782, de 22 de julho de 1960. Cria os Ministérios da Indústria e do Comércio e das Minas e Energia e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 22 de julho de 1960.

BRASIL. Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, no 9.648, de 27 de maio de 1998, no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 5.655, de 20 de maio de 1971, no 5.899, de 5 de julho de 1973, no 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 27 de abril de 2002a.

BRASIL. Lei nº 10.604 de 17 de dezembro de 2002. Dispõe sobre recursos para subvenção a consumidores de energia elétrica da Subclasse Baixa Renda, dá nova redação aos arts. 27 e 28 da Lei no 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 de dezembro de 2002b.

BRASIL. Lei nº 10.847 de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 de março de 2004b.

BRASIL. Lei nº 11.488 de 15 de junho de 2007. Cria o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infra-Estrutura - REIDI; reduz para 24 (vinte e quatro) meses o prazo mínimo para utilização dos créditos da Contribuição para o PIS/Pasep e da Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social - COFINS decorrentes da aquisição de edificações; amplia o prazo para pagamento de impostos e contribuições; altera a Medida Provisória no 2.158-35, de 24 de agosto de 2001, e as Leis nos 9.779, de 19 de janeiro de 1999, 8.212, de 24 de julho de 1991, 10.666, de 8 de maio de 2003, 10.637, de 30 de dezembro de 2002, 4.502, de 30 de novembro de 1964, 9.430, de 27 de dezembro de 1996, 10.426, de 24 de abril de 2002, 10.833, de 29 de dezembro de 2003, 10.892, de 13 de julho de 2004, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 10.438, de 26 de abril de 2002, 10.848, de 15 de março de 2004, 10.865, de 30 de abril de 2004, 10.925, de 23 de julho de 2004, 11.196, de 21 de novembro de 2005; revoga dispositivos das Leis nos 4.502, de 30 de novembro de 1964, 9.430, de 27 de dezembro de 1996, e do Decreto-Lei no 1.593, de 21 de dezembro de 1977; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 de junho de 2007.

BRASIL. Lei nº 12.212 de 20 de janeiro de 2010. Dispõe sobre a Tarifa Social de Energia Elétrica; altera as Leis nos 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.925, de 23 de julho de 2004, e 10.438, de 26 de abril de 2002; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 de janeiro de 2010.

BRASIL. Lei nº 13.848 de 25 de junho de 2019. Dispõe sobre a gestão, a organização, o processo decisório e o controle social das agências reguladoras, altera a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997, a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, a Lei nº 9.782, de 26 de janeiro de 1999, a Lei nº 9.961, de 28 de janeiro de 2000, a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, a Lei nº 9.986, de 18 de julho de 2000, a Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001, a Medida

Provisória nº 2.228-1, de 6 de setembro de 2001, a Lei nº 11.182, de 27 de setembro de 2005, e a Lei nº 10.180, de 6 de fevereiro de 2001. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 26 de junho de 2019.

BRASIL. Lei nº 14.300 de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 7 de janeiro de 2022.

BRASIL. Lei nº 5.655 de 20 de maio de 1971. Dispõe sobre a remuneração legal do investimento dos concessionários de serviços públicos de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 de maio de 1971.

BRASIL. Lei nº 9.478 de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 7 de agosto de 1997a.

BRASIL. Lei nº 9.648 de 27 de maio de 1998. Altera dispositivos das Leis no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 8.666, de 21 de junho de 1993, no 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, no 9.074, de 7 de julho de 1995, no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e autoriza o Poder Executivo a promover a reestruturação das Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS e de suas subsidiárias e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 de maio de 1998a.

BRASIL. Lei nº 9.991 de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 25 de julho de 2000.

BRASIL. Lei nº. 8.031, de 12 de abril de 1990. Cria o Programa Nacional de Desestatização, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 13 de abril de 1990.

BRASIL. Lei nº. 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previstos no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 14 de fevereiro de 1995a.

BRASIL. Lei nº. 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 27 de dezembro de 1996.

BRASIL. Convênio nº 156, de 10 de novembro de 2017. Prorroga o Convênio ICMS 101/1997, que concede isenção do ICMS nas operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica que especifica. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 dez. 2017.

BRASIL. Convênio nº 101, de 12 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a concessão de benefícios fiscais do ICMS nas saídas de mercadorias destinadas a consumidor final, cuja aquisição seja feita no

estabelecimento de produtor ou de estabelecimento comercial, industrial ou de prestador de serviços localizado em outro Estado. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 dez. 1997c.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº 8322, de 2014. Dispõe sobre Isenta do imposto sobre importação os equipamentos e componentes de geração elétrica de fonte solar. Brasília, DF, 2014.

BRITO, M. A. R. A reestruturação do setor elétrico brasileiro e as mudanças nos contratos de concessão de geração de energia elétrica. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). 2002.

BROCKWELL, P. J., DAVIS, R. A. Introduction to time series and forecasting. Springer. 2016.

BUENO, R. S., RIBEIRO, A. O Programa Brasileiro de Álcool (Proálcool) e a Reestruturação do Setor Sucroalcooleiro. Economia & Tecnologia (UEL), 1(1), 101-114. 2005.

CASTRO, R.; LYRA FILHO, C. Um método de suporte a decisões sobre investimento e comercialização de energia elétrica no Brasil. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 16, n. 4, p. 478–494, 2005.

CHARYTONIUK, T., CZABANSKI, R., & WITCZAK, M. Short-term load forecasting of power systems using artificial neural networks: A review and comparison. Energies, 10(10), 1448. 2017.

CCEE. Procedimentos de Comercialização. 2023.

COLLISCHONN, W., PAIVA, R. C. D. Extreme drought events in Brazil: structural and institutional challenges in the water sector. Water Policy, 18(6), 1257-1279. 2016.

DUTRA, R. M., SZKLO, A. S., SCHAEFFER, R. Renewable energy policy in Brazil: A policy evaluation of the PROINFA programme. Energy Policy, 65, 523-533. 2014.

ENERGISA. SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO. 2023.

EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica Ano Base 2020. Empresa De Pesquisa Energética, p. 255, 2021.

EPE. Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021 - Relatório Final. p. 264, 2022.

EPE. Balanço Energético Nacional (BEN) 2023: Ano base 2022 - Relatório Final. p. 275, 2023.

FAHEY, L., RANDALL, R. M. Learning from the Future: Competitive Foresight Scenarios. 1998.

FALCÃO, Â. W. D. S. *et al.* Os Reflexos Da Crise Hídrica Brasileira Na Estrutura De Custos Das Empresas Do Setor De Energia Elétrica. ABCustos, v. 14, n. 2, p. 1–36, 2019.

FARIA, A. D., PEREIRA, M. V. F., ROCHA, R. P. Overview of the Brazilian electricity market after 20 years of restructuring. In: 2018 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. 2018.

FONSECA, P. M. P. *et al.* Sustentabilidade corporativa no setor de energia elétrica Brasileiro: um estudo de caso. p. 337–368, 2020.

- FORNASIER, M. D. O.; KNEBEL, N. M. P. Comercialização de energia elétrica peer-to-peer, contratos inteligentes e a regulação do acesso à energia no Brasil. *Direito e Desenvolvimento*, v. 12, n. 1, p. 218–237, 2021.
- FROTA, W. M.; BAJAY, S. V. Política energética, planejamento e regulação para os sistemas isolados. In: *ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 2004, Campinas. Proceedings online.
- GEHRKE, P.; GORETTI, A. A. T.; ÁVILA, L. V. Impactos da matriz energética no desenvolvimento sustentável do Brasil. *Revista de Administração da UFSM*, v. 14, p. 1032–1049, 2021.
- GOLDEMBERG, J., LUCON, O., FREIRE, F. Oil and natural gas in the energy mix of Brazil. *Energy Policy*, 36(10), 3835-3842. 2008.
- GOLDEMBERG, J., LUCON, O., FREIRE, F. Renewable energy - A new paradigm. *Energy Policy*, 36(1), 38-47. 2008.
- GOLDEMBERG, J., LUCON, O., PACCA, S. Energy for sustainable development in Brazil. *Energy Policy*, 38(1), 194-203. 2010.
- GOMES, J. P. P.; VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. *Revista de Administração Pública*, [S.L.], v. 43, n. 2, p. 295-321, abr. 2009.
- GOODFELLOW, I., BENGIO, Y., COURVILLE, A. *Deep Learning*. MIT Press. 2016.
- HALL, M., FRANK, E., HOLMES, G., PFAHRINGER, B., REUTEMANN, P., WITTEN, I. H. The WEKA data mining software: An update. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 11(1), 10-18. 2009.
- HAN, J., KAMBER, M., & PEI, J. *Data mining: concepts and techniques*. Elsevier. 2011.
- HYNDMAN, R. J., ATHANASOPOULOS, G. *Forecasting: Principles and Practice*. 2018.
- HYNDMAN, R. J., KOEHLER, A. B. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679-688. 2006.
- JACOBSSON, S., LAUBER, V. The politics and policy of energy system transformation— Explaining the German diffusion of renewable energy technology. *Energy Policy*, 34(3), 256-276. 2006.
- JACOBSON, M. Z., DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154-1169. 2011.
- KORZENIEWICZ, M. B. D. V. Análise da matriz energética brasileira e a participação das energias renováveis a partir das políticas ambientais energéticas. 2021.
- KRIZHEVSKY, A., SUTSKEVER, I., HINTON, G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. In *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012.
- LA ROVERE, E. L., OLIVEIRA, L. C., ROCHA, M. G. Brazil's energy-related CO2 emissions: Future scenarios using an energy system approach. *Energy Policy*, 62, 1145-1158. 2013.

- LA ROVERE, E. L., DE MELLO LEMOS, L. T., GERK, A. Energy transition in Brazil: History, scenarios, and policies. *Energy*, 60, 442-451. 2013.
- LAMIN, B. C. F. Gerenciamento de projetos aplicado ao planejamento do sistema elétrico de distribuição: estudo de caso. 2009.
- LIMA, I. B. T., TEIXEIRA, R. F. M. Potential of renewable energy in Brazil: An analysis of wind, solar, and biomass power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 270-294. 2016.
- LI, Y., ZHANG, J., ZHU, Q. Electricity Consumption Forecasting Using a Hybrid Model Based on Variational Mode Decomposition and Neural Networks. *Energies*, 12(24), 4698. 2019.
- LORENZO, H. C. O setor elétrico brasileiro: passado e futuro. *Perspectivas*, São Paulo, 147-170, 2002.
- MACEDO, L. A. S., SILVA, J. M. L., LIMA, F. O. Ambiente de Contratação Livre (ACL) de energia elétrica: uma revisão da literatura. *Revista de Administração e Inovação*, 11(3), 85-110. 2014.
- MADUREIRA, A. M. Electricity regulation in Brazil: Lessons for developing countries. *Utilities Policy*, 17(3-4), 319-330. 2009.
- MAGALHAES, G. D. S. C. Comercialização de energia elétrica no ambiente de contratação livre: uma análise regulatório-institucional a partir dos contratos de compra e venda de energia elétrica. 2009.
- MAKRIDAKIS, S. G., WHEELWRIGHT, S. C., HYNDMAN, R. J. *Forecasting: Methods and Applications*. 1998.
- MARENCO, J. A., NOBRE, C. A., SAMPAIO, G., SALAZAR, L. F. B., CAMARGO, H. A Brief Review of the South American Monsoon System. *Climatology & Weather Forecasting*, 7(2), 241. 2019.
- MERCEDES, S. S. P., RICO, J. A. P., POZZO, L. Y. Uma revisão histórica do planejamento elétrico brasileiro. *Revista USP*. São Paulo, n. 104, p. 13-36, 2015.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Conheça as instituições do setor elétrico brasileiro e as competências de cada uma. 2023.
- MITCHELL, C. Energy policy in the UK: A shifting paradigm? *Energy Policy*, 34(15), 2232-2242. 2006.
- MME. Relatório do Grupo de Trabalho da Modernização do Setor Elétrico. p. 90, 2019.
- MME; EPE. Plano Nacional de Energia - PNE 2050. Plano Nacional de Energia - PNE 2050, v. 53, n. 9, p. 1689-1699, 2020.
- MONTGOMERY, D. C., PECK, E. A., VINING, G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons. 2012.
- MOORE, D. S., MCCABE, G. P., CRAIG, B. A. *Introduction to the Practice of Statistics*. W. H. Freeman. 2014.

- MOREIRA, M. S., OLIVEIRA, W. M. Power auctions in Brazil: An analysis of the reserve energy auctions and the case of the 2015 edition. *Energy Policy*, 107, 671-679. 2017.
- MORET, M. A. Análise da expansão do setor elétrico brasileiro considerando os impactos socioeconômicos e ambientais. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). 2014.
- MURPHY, K. P. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. MIT Press. 2012.
- OLIVEIRA, A. F. Setor elétrico, perspectivas e desafios para contabilidade de custo. VII Congresso Brasileiro de Custos. Recife, 2000.
- OLIVEIRA, F. J. A. O planejamento da operação energética no sistema: conceitos, modelagem matemática, previsão de geração e carga. [s.l.] Artliber, 2020.
- OLIVEIRA, W. M., ROCHA, R. P. Brazilian electricity auctions: An overview and lessons learned. In: 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. 2014.
- OLIVEIRA, W. M., ROCHA, R. P. Brazilian electricity regulation and its relation to the evolution of the electric industry. In: 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. 2014.
- ONS. EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA NO SIN - FEVEREIRO 2023/ DEZEMBRO 2027. 2023a.
- ONS. O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL. 2023b.
- ONS. PLANO ANUAL DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS SISTEMAS ISOLADOS PARA 2023. 2022.
- PEREIRA JÚNIOR, BENVINDO RODRIGUES; COSSI, ANTÔNIO MARCOS; MANTOVANI, J. R. S. Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de programação não linear inteiro misto e busca tabu. XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, p. 815–826, 2011.
- PEREIRA, A. O., SILVA, A. R. S., DA SILVA, W. B. Forecasting electricity consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2), 1636-1643. 2018.
- PEREIRA, M. V. F., FREITAS, A. F., MATOS, R. A. F. A Evolução do Setor Elétrico Brasileiro e sua Estrutura de Governança." *Revista de Administração Pública*, 50(3), 437-460. 2016.
- PEREIRA, T. C. G. Planejamento Energético e as políticas públicas: Aspectos conceituais e metodológicos. [s.l: s.n.].
- PEREIRA, R. R., CASTRO, R. D. Renewable energy innovation in Brazil: Policies, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1637-1645. 2016.
- PINHO, J. T., OLIVEIRA, R., SILVA, A. L. Impact of renewable energy uncertainty on the scheduling of power systems. In: IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2017.
- PONTE, G. P. Geração de energia elétrica em Sistemas Isolados: desafios e propostas para aumento da participação de fontes renováveis com base em uma análise multicritérios. Rio de Janeiro, 2018. 164p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

- PROVOST, F., FAWCETT, T. Data science for business: What you need to know about data mining and data-analytic thinking. O'Reilly Media. 2013.
- RASMUSSEN, C. E., WILLIAMS, C. K. I. Gaussian Processes for Machine Learning. The MIT Press. 2006.
- REZA, S. M. S. Environmental Impacts of Coal Mining and Utilization: A Comprehensive Review. Journal of Cleaner Production, 176. 2018.
- RIBEIRO, F. N., SZKLO, A. S., SCHAEFFER, R. O potencial técnico e econômico das fontes de energia renovável no Brasil. Energy Policy, 38(1), 76-87. 2010.
- SACHSIDA, A. *et al.* Resenha Energética Brasileira. 2022.
- SANTOS, A. C., LIMA, F. O., SILVA, M. P. Análise de incertezas em previsões de carga de curto prazo para o planejamento operacional do sistema elétrico. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE). 2018.
- SCHWARTZ, P. The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World. 1996.
- SERRANO, A. L. M. *et al.* ANÁLISE E INVESTIGAÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL ATRAVÉS DE MODELO PARAMÉTRICO. Revista Produção Online, v. 22, p. 2570–2593, 2022.
- SHUMWAY, R. H., STOFFER, D. S. Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples. 2017.
- SILVEIRA, P. G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira * Energía y cambio climático: impactos ambientales y sociales de las plantas hidroeléctricas y la diversificación de la matriz ene. v. 17, n. 33, p. 123–147, 2018.
- SIQUEIRA, J. R. A crise do setor elétrico brasileiro: o apagão, a posição do governo e suas consequências. Energia na Agricultura, 17(1), 56-66. 2002.
- SOARES, M. R. S., LIMA, A. S., VASCONCELOS, L. A. M. Renewable energy certification in Brazil: Analysis of the legal framework and challenges. Energy Reports, 6, 1181-1191. 2020.
- SOUZA, V. H. A. DE *et al.* Um Panorama Do Biodiesel No Brasil E No Mundo: Esforços Para a Ampliação Do Setor E Desafios. Revista Augustus, v. 21, n. 41, p. 117–130, 2016.
- SOVACOOOL, B. K., MUKHERJEE, I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. Energy, 36(8), 5343-5355. 2011.
- TAN, P. N., STEINBACH, M., KUMAR, V. Introduction to data mining. Pearson Addison Wesley. 2006.
- TOLMASQUIM, M. T. A crise do setor elétrico: causas, consequências e lições. Revista de Economia Política, 22(1), 151-170. 2002.
- VAN DER HEIJDEN, K. Scenarios: The Art of Strategic Conversation. 1996.

VENTURA FILHO, A. A Política Energética do Brasil. cadernos adenauer xv, v. 3, p. 121–143, 2014.

WITTEN, I. H., FRANK, E., HALL, M. A., PAL, C. J. Data mining: practical machine learning tools and techniques. Morgan Kaufmann. 2016.

WILSON, A. G., & NICKISCH, H. Kernel interpolation for scalable structured Gaussian processes (KISS-GP). Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning, 1775-1784. 2015.

ZARUR, M. A. F. Modelo para Elaboração de Cenários do Setor Energético, utilizando técnicas de data mining. p. 107, 2005.

ZHANG, G. P., PATUWO, B. E., & HU, M. Y. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. Neurocomputing, 50, 159-175. 2003.