

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Renato Grethe Negri

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO
DEPLECIONAMENTO/REPLECIONAMENTO DE RECURSOS
HÍDRICOS E GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS HIDRELÉTRICAS**

Santa Maria, RS, Brasil

2023

Renato Grethe Negri

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO DEPLECIONAMENTO/REPLECIONAMENTO
DE RECURSOS HÍDRICOS E GERAÇÃO DE ENERGIA EM
USINAS HIDRELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica,
da Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito parcial para a
obtenção do Título de **Engenheiro Eletricista**.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Alzenira da Rosa Abaide

Santa Maria, RS
2023

Renato Grethe Negri

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO
DEPLECIONAMENTO/REPLECIONAMENTO DE RECURSOS
HÍDRICOS E GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS HIDRELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do Título de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 07 de dezembro de 2023:

Alzenira da Rosa Abaide, Dra. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva, Dr Eng. (CEESP, UFSM)

Marcelo Bruno Capeletti, MSc. Eng. (CEESP, UFSM)

Santa Maria, RS, Brasil
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar este momento para expressar minha gratidão a todos que fizeram parte da minha jornada acadêmica e do meu trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus queridos pais, Carlos e Eliete, que me apoiaram desde o início da minha jornada acadêmica, há quem devo tudo o que sou hoje. Sem o amor, apoio e incentivo de vocês, eu não teria chegado até aqui. Muito obrigado por acreditarem em mim e me ajudarem a alcançar meus objetivos.

Agradeço também ao meu irmão Vinícius, que sempre esteve ao meu lado, dando força e me incentivando a nunca desistir. Sua presença constante, incentivo e encorajamento foram fundamentais para que eu pudesse superar os momentos difíceis. Agradeço profundamente pela ajuda e incentivo que me foram concedidos ao longo dessa jornada e quero que saiba que seu papel em minha vida é inestimável.

A minha família, que sempre me apoiou e me incentivou a seguir meus sonhos, mesmo quando eles pareciam impossíveis. Vocês foram minha base durante todo este caminho.

Aos meus colegas de turma, agradeço pela amizade, pelo companheirismo e pelo apoio mútuo. Foi uma honra ter compartilhado essa jornada com vocês, e tenho certeza de que nossa amizade perdurará por muitos anos.

Aos meus professores, que compartilharam seu conhecimento e experiência comigo, eu sou imensamente grato. Em especial, a professora Dra^o Alzenira da Rosa Abaide, por ter sido minha orientadora nesse trabalho, e em toda a minha graduação nos projetos de pesquisa, suas aulas e orientações foram fundamentais para a minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, gostaria de agradecer ao Dr^o Bruno Knvetiz Hammerschmitt, por toda ajuda e suporte ao longo da minha graduação no CEESP, e do meu Trabalho de Conclusão de Curso. Suas orientações, conselhos, críticas, elogios, foram fundamentais para o meu sucesso acadêmico. Por isso, gostaria de expressar meu sincero agradecimento por toda a ajuda e pela grande amizade que construímos.

Mais uma vez, a todos vocês, meu muito obrigado. Sou grato por ter tido a oportunidade de contar com o apoio de pessoas tão especiais em minha vida.

*" A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original".*

(Albert Einstein)

RESUMO

MODELAGEM MATEMÁTICA DO DEPLECIONAMENTO/REPLECIONAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS HIDRELÉTRICAS

AUTOR: Renato Grethe Negri

ORIENTADORA: Alzenira da Rosa Abaide

COORIENTADOR: Bruno Knevitz Hammerschmitt

A produção de energia elétrica nas usinas hidrelétricas é influenciada pelo nível do reservatório, o qual pode variar devido a fatores naturais e humanos. A escassez hídrica causada pela desregularização dos períodos chuvosos são fatores impactantes para redução dos potenciais hidráulicos. Contudo, o aproveitamento dos recursos hídricos ao considerar usinas hidrelétricas em cascata maximiza a produção de eletricidade. Embora esta seja uma alternativa viável, há a necessidade de aprimoramento da gestão dos níveis dos reservatórios observando o deplecionamento/replecionamento, e considerando a geração de energia de cada hidrelétrica presentes na mesma bacia hidrográfica. Nesse contexto, este estudo tem por objetivo avaliar a produção de energia em usinas hidrelétricas por meio da análise dos dados de nível do reservatório e energia gerada diariamente. Para isso, foi desenvolvido um modelo matemático que busca estabelecer a relação entre o nível do reservatório e a geração de energia. A implementação desse modelo auxilia na tomada de decisões estratégicas, minimizando desperdícios e garantindo um fornecimento contínuo e confiável de eletricidade. Os resultados deste estudo também contribuem no aprimoramento da gestão e operação das usinas hidrelétricas unitárias e em cascata, proporcionando uma matriz energética mais sustentável e eficiente.

Palavras-chave: Usinas hidrelétricas; Gestão de recursos hídricos; Replecionamento; Deplecionamento; Geração de energia.

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODELING OF DEPLETION/REPLETION OF HYDRO RESOURCES AND POWER GENERATION IN HYDROPOWER PLANTS

AUTHOR: Renato Grethe Negri

ADVISOR: Alzenira da Rosa Abaide

CO-ADVISOR: Bruno Knevitz Hammerschmitt

The production of electricity in hydropower plants is influenced by the reservoir level, which can vary due to natural and human factors. The water shortage caused by the deregularization of rainy periods are shocking factors for reduction of hydraulic potential. However, the exploitation of water resources when considering cascading hydroelectric power plants maximizes electricity generation. Although this is a viable alternative, there is a need to improve the management of reservoir levels by observing depletion/repletion, and considering the generation of energy from each hydropower plant present in the same hydrographic basin. In this context, this study aims to evaluate energy production in hydropower plants through the analysis of reservoir level data and energy generated daily. For this, a mathematical model was developed that seeks to establish the relationship between the reservoir level and energy generation. The implementation of this model helps in making strategic decisions, minimizing waste and ensuring a continuous and reliable supply of electricity. The results of this study also contribute to improving the management and operation of unit and cascade hydropower plants, providing a more sustainable and efficient energy matrix.

Keywords: Hydropower Plants; Hydro Resources Management; Repletion; Depletion; Power Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada existente e contratada do SIN	16
Figura 2 - Comparação da matriz de energia elétrica no Brasil e no mundo.	17
Figura 3 – Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica.....	18
Figura 4 - Separação dos Tópicos da Metodologia Adotada.....	27
Figura 5 - Dados organizados no Excel.....	28
Figura 6 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação do Inverno da UHE de Passo Real.	35
Figura 7 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação da Primavera da UHE de Passo Real.....	35
Figura 8 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação do Verão da UHE de Passo Real.	36
Figura 9 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação do Outono da UHE de Passo Real.	36
Figura 10 - Resultado da simulação realizada da Potência simulada superior a Potência real no mês de março.	37
Figura 11- Resultado da simulação realizada da Potência simulada inferior a Potência real no mês de março.	38
Figura 12 – Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente Durante as Quatro Estações da UHE de Passo Real.....	45
Figura 13 - Resultado da simulação realizada da Potência simulada superior a Potência real no período anual da UHE de Passo Real.	45
Figura 14 - Resultado da simulação realizada da Potência simulada inferior a Potência real no período anual da UHE de Passo Real.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MME	Ministério de Minas e Energia
MMGD	Micro e Mini Geração Distribuída
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE	Plano Nacional Energético
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SPE	Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético
SPG	Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.....	14
2.2 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	16
2.2.1 Termelétricas	19
2.2.2 Eólicas	19
2.2.3 Solares	20
2.3 HIDRELÉTRICAS	21
2.3.1 Hidrelétricas Predominantes no Brasil.....	21
2.3.2 Diferença entre UHE, PCH, CGH.....	22
2.3.3 Diferença entre usinas com reservatório e fio d'água.....	23
2.3.4 Usinas em Cascata.....	24
3. METODOLOGIA	26
3.1 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS HIDROLÓGICOS E DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS.	27
3.2 AVALIAÇÃO DOS DADOS DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO	28
3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DOS NOVOS NÍVEIS DE RESERVATÓRIO DE USINAS HIDRELÉTRICAS.....	29
3.3.1 Análise da Variação do Nível do Reservatório.....	29
3.3.2 Análise da Potência Diária Real.	30
3.3.3 Taxa de Deplecionamento/Replecionamento do Reservatório.....	31

3.3.4 Novo Nível do Reservatório.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 RESULTADOS DE VALIDAÇÃO DO MODELO.....	34
4.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DA POTÊNCIA SIMULADA SUPERIOR A POTÊNCIA REAL	37
4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DA POTÊNCIA SIMULADA INFERIOR A POTÊNCIA REAL	38
5. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	41
APÊNDICE A	45

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica através das Usinas Hidrelétricas (UHEs) é uma importante fonte de abastecimento de energia para muitas regiões do mundo. No entanto, a eficiência e a capacidade dessas usinas podem ser significativamente influenciadas pelo nível do reservatório, o qual está sujeito a variações, causadas tanto por fatores naturais quanto por ações humanas.

No Brasil, a energia elétrica é majoritariamente produzida através de fonte hídrica, o que apresenta vantagens, como baixos custos. Contudo, o país enfrenta desafios devido à imprevisibilidade dessa geração, sua vulnerabilidade às mudanças climáticas e os diversos usos da água. Em períodos de escassez hídrica, a água armazenada em reservatórios é usada para garantir a geração de eletricidade (D. HUNT; A. V. FREITAS, 2016).

Para obter um bom aproveitamento dos recursos hídricos e para produção de energia elétrica, tem-se implementação de usinas hidrelétricas em cascata. Esse arranjo possibilita uma melhor distribuição da energia gerada ao longo da bacia hidrográfica, otimizando o uso dos recursos disponíveis.

Contudo, a gestão eficiente dos níveis dos reservatórios e a sincronização das usinas hidrelétricas em cascata são desafios cruciais para alcançar uma produção de energia mais sustentável e eficiente. Para isso, é necessário um estudo aprofundado e a aplicação de um modelo matemático capaz de estabelecer a relação entre o nível do reservatório e a geração de energia diária. Essa abordagem propicia uma avaliação precisa da produção de energia nas diferentes usinas, garantindo um fornecimento contínuo e confiável de eletricidade.

Diante disto, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e aplicação de um modelo matemático para determinação dos níveis dos reservatórios de UHEs. Para isso será desenvolvido um modelo matemático que busca estabelecer a relação entre o nível do reservatório e a geração de energia, com o intuito de aprimorar a gestão e operação das UHEs. Além de contribuir para uma matriz energética mais sustentável, a implementação desse modelo pode fornecer informações estratégicas que minimizem desperdícios e maximizem a eficiência de UHEs.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um modelo matemático para modelagem do deplecionamento/replecionamento dos níveis dos reservatórios das UHEs e da geração de energia.

1.1.2 Objetivos Específicos

Com base no objetivo geral, esse trabalho tem como objetivos específicos os seguintes tópicos:

- Extração e organização dos dados hidrológicos e de geração de energia elétrica de cada UHE;
- Avaliação dos dados de nível do reservatório e energia produzida diariamente;
- Identificação das correlações e padrões entre os dados de nível do reservatório e da energia produzida;
- Determinação da relação nível e geração real de cada UHE, para avaliar a variação do nível ocorrida durante um determinado período específico;
- Definição da potência simulada fornecida diariamente por cada UHE;
- Estabelecimento da taxa de deplecionamento/replecionamento, a partir da variação do nível e da potência simulada;
- Cálculo do novo nível do reservatório da UHE em estudo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Cada capítulo é organizado da mesma maneira: inicia-se com um aspecto geral acerca do assunto que será tratado, e após, os itens principais são colocados em pauta, apresentando a maneira como serão tratados.

O capítulo 1 introduz os principais temas do trabalho, juntamente com toda a parte de metodologia e estudos de caso que serão feitos a fim de validar a proposta do sistema de estudo.

O capítulo 2 contempla a revisão bibliográfica sobre os principais temas ligados ao desenvolvimento deste trabalho. É apresentada uma explicação detalhada sobre o Sistema Elétrico de Potência (SEP), incluindo uma análise minuciosa de sua operação, com especial atenção para o papel desempenhado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) em sua gestão. Além disso, é abordado a significância do estudo de planejamento do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) e das diversas fontes de energia que compõem a matriz elétrica nacional. Também é realizada uma análise abrangente dos principais órgãos reguladores do setor de energia elétrica

do país, e da predominância das usinas hidrelétricas no Brasil, com destaque para suas categorias e o funcionamento do sistema em cascata.

O capítulo 3 apresenta a metodologia para o desenvolvimento do modelo para gestão dos recursos hídricos e geração de energia em usinas hidrelétricas. A função do modelo é determinar o nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas para diferentes situações. Nesta seção, serão apresentados todos os passos utilizados para a obtenção do modelo matemático, bem como seus cálculos e condições para o funcionamento correto do modelo.

O capítulo 4 mostra os resultados e discussões do estudo onde são apresentados em três seções. A primeira seção trata da simulação do modelo, onde os dados da potência diária real foram utilizados como entrada na potência simulada, visando validar a metodologia. Além disso, foi realizada uma análise das estações do ano e seu impacto nos níveis do reservatório e na geração de energia. Na segunda seção, uma simulação foi realizada com um aumento na potência simulada em comparação com a potência diária real, enquanto na terceira seção, a simulação envolveu uma redução na potência simulada em relação à potência real. Em ambos os casos, os efeitos da geração de energia nos níveis do reservatório foram discutidos para o período analisado.

O capítulo 5 apresenta as conclusões sobre a eficácia da metodologia utilizada, enfatizando as simulações realizadas para validar o modelo, abrangendo cenários com a potência simulada superior e inferior à potência diária real. Essas simulações têm como finalidade garantir e aprimorar a gestão dos recursos hídricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica em relação aos temas de estudo do trabalho. Será introduzida com uma diligência sobre o que é, e como funciona o SEP, abordando a atuação do ONS na gestão do SIN. Será abordado também a importância do estudo de planejamento do SEB e as diferentes fontes de energia na matriz elétrica do país. Também será realizada uma abordagem nos principais órgãos regulamentadores de energia elétrica do país. Ademais, serão feitas revisões conceituais relevantes sobre a predominância das usinas hidrelétricas no Brasil, destacando suas características e o funcionamento do sistema em cascata.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O SEB é composto pelo sistema de geração, esse é composto por usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas e solares, pelas linhas de transmissão por onde é conduzida a energia produzida, e pelo sistema de distribuição onde a energia elétrica é entregue aos consumidores. Além de ser um dos maiores sistemas elétricos do mundo, o SEB é fundamental para o desenvolvimento econômico e social do Brasil, uma vez que a energia elétrica é um insumo essencial para a produção industrial, serviços e para o bem-estar da população.

Diante da complexidade de gestão, coordenação e operação de um sistema elétrico como o SEB, são atribuídas competências a diferentes órgãos vinculados ao setor de energia. Os principais órgãos e entidades relacionadas a regulação do setor elétrico brasileiro são: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Ministério de Minas e Energia (MME) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (RASCHE; PEREIRA, 2021).

O SEB é regulamentado pela ANEEL, que é responsável por estabelecer as diretrizes e normas, além de fiscalizar as atividades das empresas que atuam nesse segmento. Já o ONS é a empresa responsável por operar e controlar o SIN. O ONS é responsável por garantir a segurança e a confiabilidade do SIN, além de planejar e controlar a geração e transmissão de energia elétrica no país. Também é responsável por planejar e executar as ações necessárias para garantir a continuidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica, além de garantir a realização dos leilões de energia (ONS, 2023a).

O SIN é o conjunto de instalações elétricas de geração e transmissão de energia elétrica no território nacional. O SIN é uma estrutura complexa e abrangente, que inclui usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares e outras fontes de energia elétrica, além de linhas

de transmissão e subestações. O SIN é subdividido em quatro grandes subsistemas sendo eles o subsistema Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Norte e Nordeste, os quais são interligados através das linhas de transmissão. O objetivo é garantir a continuidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica, possibilitando o aproveitamento das sinergias entre os diferentes subsistemas (ONS, 2023b).

Os estudos de planejamento são fundamentais para o SEB, pois permitem antecipar as necessidades e desafios do setor elétrico, garantindo o abastecimento de energia elétrica em todo o país. O planejamento energético envolve a avaliação das necessidades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em curto, médio e longo prazo, levando em consideração fatores como o crescimento econômico, as mudanças tecnológicas, as políticas públicas e as preocupações ambientais. Os estudos de planejamento ajudam a definir a expansão da capacidade de geração de energia elétrica, indicando qual a melhor fonte de energia a ser utilizada e qual a localização ideal das usinas. Também ajudam a definir investimentos em transmissão e distribuição de energia elétrica, garantindo que a energia gerada chegue aos consumidores de forma eficiente e segura (EPE; MME, 2020).

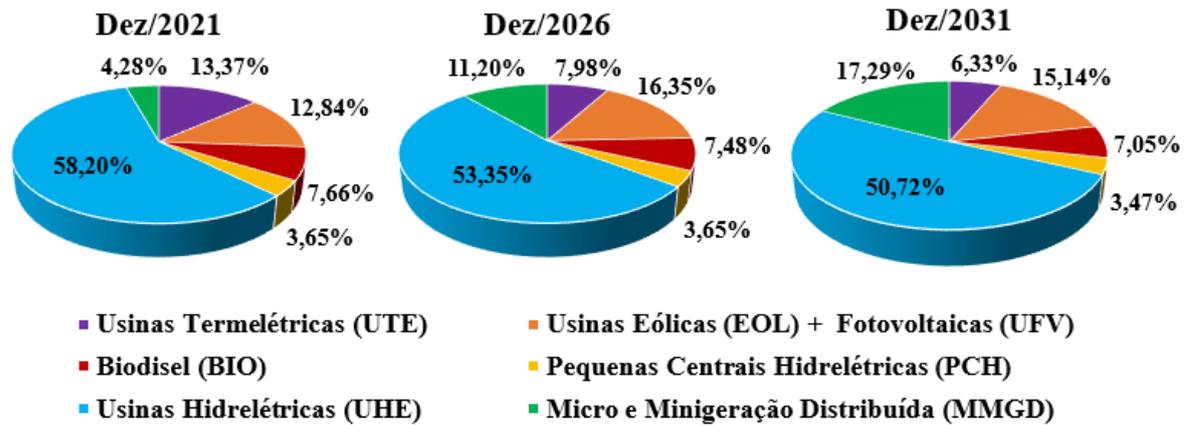
O problema do planejamento em um sistema complexo como o SEB, com um parque de geração diversificado, embora majoritariamente hidráulico, e uma malha de transmissão interconectada, envolve não apenas a expansão da capacidade instalada para garantir o atendimento à totalidade da demanda, mas também a coordenação da operação. As decisões sobre a operação do sistema estão acopladas no tempo e no espaço em função da interligação das bacias e reservatórios e sua multiplicidade de proprietários e usos. Para o planejamento da expansão, o conhecimento da capacidade energética do sistema é fundamental e, para este, o planejamento da operação e suas regras são determinantes. Assim, o planejamento da operação e o da expansão guardam uma estreita relação (SEGER et al., 2015).

Neste sentido têm-se o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), o qual é um documento elaborado anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) sob as diretrizes e o apoio das equipes do MME, coordenados pelas Secretarias de Planejamento e Desenvolvimento Energético (SPE/MME) e de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (SPG/MME) (EPE, 2023a). O PDE define as diretrizes, objetivos e metas para o setor energético brasileiro para os próximos 10 anos, cujo objetivo principal é garantir o suprimento de energia elétrica de forma segura, confiável, sustentável e a preços competitivos, levando em conta as necessidades de desenvolvimento econômico e social do país. De acordo com o PDE 2031, estão previstos investimentos em diversas áreas do setor de energia elétrica, como a ampliação da capacidade de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a

solar, eólica e biomassa, além de medidas para a exploração de novas fontes de petróleo e gás natural no país (EPE; MME, 2022).

Nesse decênio (2021 a 2031), a demanda por energia elétrica no país está projetada para ter um aumento de 41%. Este aumento será impulsionado principalmente pelo setor residencial, no qual a participação da eletricidade sobe de 47% para 56%. Tal crescimento é indicado pela elevação do consumo de eletricidade, especialmente para climatização de ambientes e também para a conservação de alimentos, o que abre uma tendência para a implantação de muitos projetos de termoeletricidade a base de gás natural, mitigando riscos climáticos, como o que se vivencia recentemente, em função de uma dependência atual da ordem de 62% da geração elétrica por fonte hídrica (VICTER, 2022). A seguir, a Figura 1 ilustra a evolução da capacidade instalada existente e contratada do SIN.

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada existente e contratada do SIN



Fonte: Adaptado de (EPE; MME, 2022).

A Figura 1 apresenta a evolução da capacidade instalada existente e contratada nos anos de 2021, e previsão para 2026 e 2031. Os gráficos também incluem a parcela da Micro e Mini Geração Distribuída (MMGD), devido à sua crescente importância. Essa configuração é conhecida como Caso Base do PDE 2031 e é usada para determinar os requisitos do sistema. Observa-se que a participação absoluta da hidrelétrica na matriz permanece praticamente inalterada, por outro lado, há um crescimento significativo das fontes de energia eólica e solar fotovoltaica centralizada.

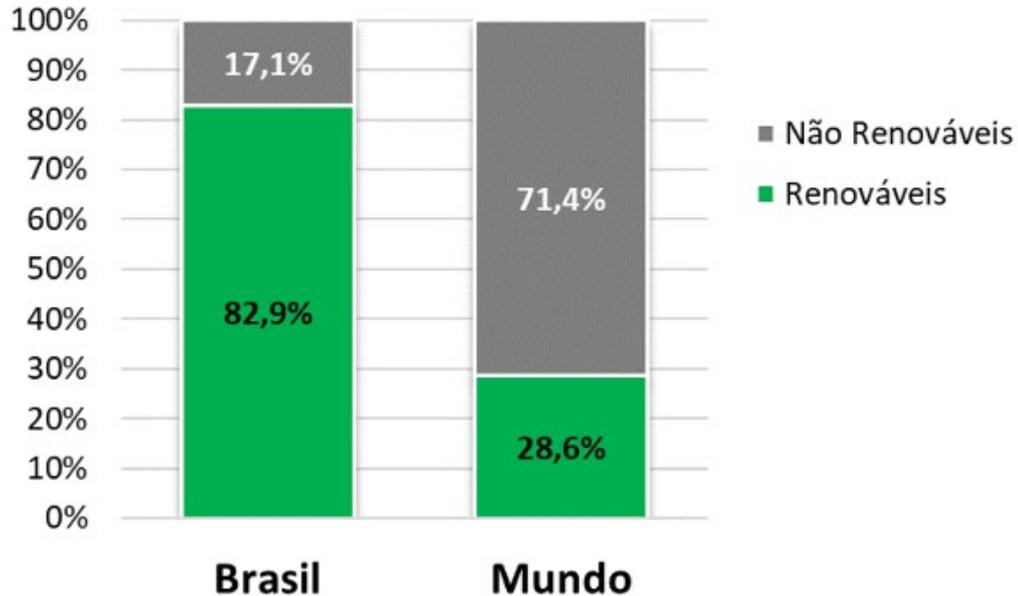
2.2 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A matriz elétrica brasileira é considerada como referência mundial no uso de energias renováveis para a geração de energia elétrica (ASLAM et al., 2021). De acordo com os dados da EPE, a matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética como um todo,

considerando que a maior parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de UHEs. Vale destacar novamente que a energia eólica e a solar têm avançado rapidamente, contribuindo para elevar esse percentual.

A Figura 2, ilustra a comparação da matriz de energia elétrica no Brasil e no mundo.

Figura 2 - Comparação da matriz de energia elétrica no Brasil e no mundo.



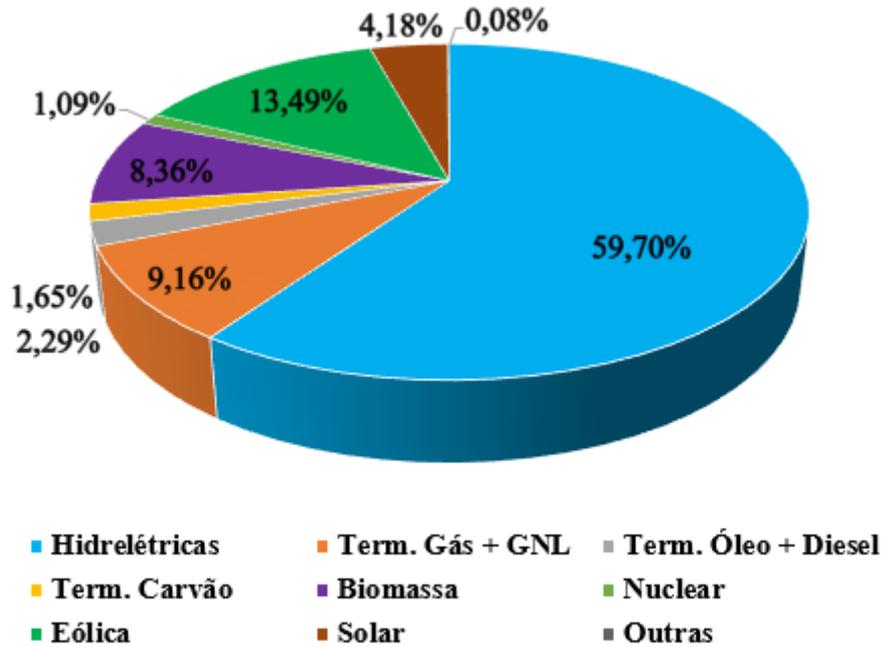
Fonte: (EPE, 2023)

Segundo o levantamento da EPE, a matriz elétrica brasileira é baseada 82,9% em fontes renováveis, enquanto a média mundial é de apenas 28,6%, uma desigualdade que mostra o quanto a geração é muito mais limpa no país em relação ao resto do planeta (EPE, 2022)

De acordo com a ANEEL, até março de 2023, foi registrado que 23,4 mil unidades geradoras ofereciam juntas uma potência fiscalizada de 190,79 GW. Deste total, 103,2 GW (53,58%) eram de UHEs de grande porte, 46,15 GW (24,70%) de termelétricas e 24,92 GW (13,12%) de usinas eólicas. Além disso, segundo a ANEEL, 83,44% da geração de energia do país é considerada renovável, o que demonstra o compromisso do Brasil com a sustentabilidade e a preservação do meio ambiente (ANEEL, 2023b)

A contextualização da matriz elétrica brasileira é importante para entender a situação atual dos recursos energéticos utilizados no país. Para isso são apresentados dados por fontes, caracterizando-as em relação a sua disponibilidade, seus custos e sua vida útil das usinas elétricas. A capacidade instalada de geração de energia elétrica, pode ser vista na Figura 3, com base nos dados do sistema em números do ONS.

Figura 3 – Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica
Matriz Elétrica Brasileira - Março 2023



Fonte: Adaptado de (ONS, 2022).

Com os dados da Figura 3, destaca-se a predominância das UHEs, seguidas das termelétricas. Dentre as fontes térmicas, tem-se fontes renováveis, como a biomassa, e não renováveis, como o gás e os derivados do petróleo. A participação de usinas térmicas, além da disponibilidade de fonte primária, é importante na operação do SIN, pois as termelétricas utilizam máquinas elétricas rotativas em regime permanente para gerar energia elétrica, estratégia fundamental para o controle da tensão e da frequência gerada e, conseqüentemente, da estabilidade elétrica de todo o SIN, o que justifica sua utilização com esse montante, somando-se a outras variáveis que compõem o planejamento energético integrado brasileiro (SILVA; DISET, 2020).

A energia eólica *onshore*, que consiste em usinas com aerogeradores localizados no continente e não em plataformas marítimas, é atualmente a terceira maior fonte de capacidade instalada no Brasil. O país possui um enorme potencial eólico, que deve se tornar ainda mais significativo nos próximos anos. No entanto, a energia eólica é considerada uma fonte intermitente, com uma despachabilidade reduzida em comparação com as usinas hidrelétricas e termelétricas. Por isso, a sua integração na conversão em energia elétrica e no SIN exige um maior esforço para o controle de estabilidade, além de uma operação mais dinâmica do sistema elétrico (SILVA; DISET, 2020).

Com base na participação de cada fonte na matriz elétrica brasileira, apresentam-se, a seguir, as características individuais de cada uma.

2.2.1 Termelétricas

As usinas termelétricas são as instalações onde ocorre a geração da energia termoelétrica por meio por meio de diferentes combustíveis: gás natural, biomassa, carvão mineral, nuclear, óleo combustível entre outros. A definição do combustível para geração, especialmente para usinas de grande porte, está relacionada ao atendimento de critérios técnicos, econômicos, logísticos, ambientais e, em alguns casos, de políticas energéticas.

A inclusão de usinas termelétricas no conjunto de fontes de energia elétrica do SIN é considerada um elemento estratégico importante para o SEB. Como as fontes hídricas desempenham um papel fundamental na produção de energia elétrica no Brasil, as usinas termelétricas são utilizadas em momentos de escassez de recursos hídricos. Além disso, com o aumento da participação de fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar, no sistema nacional, as usinas termelétricas podem desempenhar um papel importante na estabilização da variação de geração dessas fontes em curto prazo (EPE, 2023b).

No Brasil, as fontes de energia térmica utilizadas na produção de eletricidade são consideradas como fontes complementares às demais fontes de energia disponíveis. Dessa forma, os principais combustíveis térmicos utilizados são classificados como sendo de origem renovável, como a biomassa, e não renovável, como o gás natural, os derivados do petróleo, o carvão mineral e o urânio. Entre esses combustíveis, o gás natural e a biomassa são os mais promissores, com potencial de crescimento nos próximos anos e incentivos para sua expansão. Por outro lado, a ampliação do uso de combustíveis derivados do petróleo e do carvão mineral é desestimulada devido à sua alta poluição ambiental. Além disso, a energia nuclear gerada a partir do urânio enfrenta problemas relacionados ao alto risco de exposição à radioatividade desse combustível (HAMMERSCHMITT et al., 2023).

2.2.2 Eólicas

A energia eólica é gerada a partir do movimento do ar (ventos) que gera energia cinética e é capturada por meio de turbinas dos aerogeradores. Essa energia é convertida em eletricidade, fornecendo uma fonte de energia limpa que reduz as emissões de gases poluentes causados pela queima de combustíveis fósseis. Atualmente, juntamente com a energia solar fotovoltaica, a tecnologia eólica lidera a expansão das fontes de energia renovável na geração de eletricidade em todo o mundo.

Nos últimos anos, houve uma crescente busca global por energias alternativas, limpas e renováveis. Isso se deve à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diminuir a dependência de combustíveis fósseis e diversificar as fontes de energia. A energia eólica tem se destacado nesse contexto devido ao seu baixo impacto ambiental e à rápida implementação de aerogeradores (ARRAIS et al., 2015). Com o avanço e expansão recentes da energia eólica no mundo, juntamente com os incentivos estabelecidos pela legislação brasileira, a energia gerada a partir do vento desempenhará um papel significativo na matriz elétrica do Brasil, especialmente no subsistema nordeste, devido ao enorme potencial eólico da região (L NASCIMENTO; MARANGON LIMA, 2008).

De acordo com informações obtidas do ONS, a energia eólica atualmente representa 12,9% da matriz elétrica brasileira. A previsão é que até 2028, o Brasil terá 44,78GW de capacidade instalada de energia, representando cerca de 24,3% da matriz elétrica brasileira, sendo que os principais parques estão localizados na região Nordeste do país (ONS, 2023c).

2.2.3 Solares

As usinas solares são sistemas fotovoltaicos de grande porte projetados para a produção e comercialização de energia elétrica, através do processo de conversão da energia pela irradiação solar. No Brasil, a energia de centrais fotovoltaicas e outras usinas elétricas são injetadas e distribuídas pelas regiões do país por meio do SIN e da geração distribuída.

O Brasil tem um grande potencial para fornecimento de energia solar e tem passado por importantes mudanças regulatórias nos últimos anos. Essas mudanças têm como objetivo incentivar e promover a adoção de sistemas descentralizados de energia, como micro e mini arranjos solares, além de tecnologias relacionadas a redes inteligentes. Além disso, a energia solar é uma fonte de energia de base, assim como a energia hidrelétrica e eólica. Promover a expansão de sistemas fotovoltaicos pode diversificar a oferta de eletricidade renovável e aumentar a segurança energética do país (STILPEN; CHENG, 2015).

A participação da energia solar na matriz elétrica é de 5%, apresentando um crescimento de 63% nos últimos doze meses, contados a partir de março de 2023. A energia solar centralizada, que é gerada por grandes usinas, corresponde a 2%, enquanto a energia solar distribuída, produzida por pequenas centrais de geração, é responsável por 3% da matriz. De acordo com o MME, nos últimos três anos, o crescimento da energia solar centralizada foi de 200%, enquanto a solar distribuída passou de 2.000%. Adicionalmente, em 2020, a capacidade instalada em energia solar fotovoltaica cresceu 66% no país (GOV, 2022).

2.3 HIDRELÉTRICAS

A hidreletricidade tem sido a principal fonte de geração do SEB por várias décadas, tanto pela sua competitividade econômica quanto pela abundância deste recurso energético a nível nacional. Trata-se de uma tecnologia madura e confiável que, no atual contexto de maior preocupação com as emissões de gases de efeito estufa, apresenta a vantagem adicional de ser uma fonte renovável de geração (TOLMASQUIM, 2016). Em suma, as hidrelétricas são fontes de energia limpa e renovável que desempenham um papel fundamental na matriz energética do planeta, sendo assim, destaca-se a importância e a dominância das hidrelétricas na matriz elétrica brasileira, a qual têm um papel crucial na geração de energia no país e da manutenção da operação do SIN.

2.3.1 Hidrelétricas Predominantes no Brasil

A energia hidrelétrica tem desempenhado um papel central na produção de eletricidade no Brasil por muitos anos, tanto devido à sua viabilidade econômica quanto à abundância deste valioso recurso energético em todo o território nacional. O Brasil dispõe de um sistema gerador com um diversificado *mix* de energia, e com predominância hidrelétrica (ANEEL, 2023b). Essa predominância decorre da extensa superfície territorial do país, com muitos planaltos e rios caudalosos. O potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em 176 GW, considerando somente o potencial inventariado, que é o potencial de usinas em projeto e já em construção. Aproximadamente 70% do potencial ainda não aproveitado está localizado nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins – Araguaia (EPE; MME, 2020).

Os principais reservatórios de água usados para a geração de energia hidrelétrica no Brasil estão localizados na bacia do rio Paraná. Contudo, a maior concentração de UHEs são encontradas nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste. A região Sudeste é responsável por cerca de 70% da capacidade total de armazenamento de energia. Os maiores reservatórios hidrelétricos estão situados próximos às regiões com maior demanda por energia. Quando completamente cheios, esses reservatórios podem fornecer energia suficiente para atender às necessidades energéticas por até cinco meses. No entanto, esse período é significativamente menor do que o observado na década de 1970, quando a capacidade máxima de armazenamento dos reservatórios poderia atender às demandas por três ou quatro anos (DIAS et al., 2018).

No Brasil, a principal e maior UHE é a Itaipu, que está situada no rio Paraná. Seguindo da usina de Belo Monte, que é a terceira maior do mundo, com capacidade de 11.233 MW, ficando atrás apenas da Itaipu (com 14.000 MW) e da Três Gargantas, na China, que é a maior do mundo, com capacidade de 22.500 MW (DIAS et al., 2018).

No ano de 2015, a barragem de Itaipu produziu uma quantidade de energia elétrica de 89,2 TWh, o que é superior à produção da barragem de Três Gargantas. Essa produção foi responsável por fornecer 17% da energia elétrica consumida pelo Brasil e mais de 75% da energia elétrica consumida pelo Paraguai. Na mesma linha, em relação às UHEs no Brasil, como Xingó e Tucuruí, embora sejam menores em termos de capacidade de geração de energia em comparação com a grandiosidade de Itaipu e Três Gargantas, elas continuam sendo empreendimentos de considerável importância. A Usina de Tucuruí, por exemplo, com sua capacidade de 4.240 MW, figura como uma das maiores do Brasil e desempenha um papel fundamental na geração de energia para a região em que está localizada. Xingó, com 3.000 MW, também é uma usina de grande porte, contribuindo de maneira significativa para o suprimento de eletricidade (THÉRY; MELLO-THÉRY, 2016).

2.3.2 Diferença entre UHE, PCH, CGH

A ANEEL adota três classificações para hidrelétricas: Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) (com até 1 MW de potência instalada), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) (entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada) e UHEs (usinas com mais de 30 MW).

As PCHs são hidrelétricas com tamanho e potência limitados, situados entre 5 e 30 MW de potência e menos de 13 km² de área de reservatório. Apesar de seu nome não transparecer, as PCHs representam atualmente cerca de 3,5% da capacidade total instalada do SIN (ABRAPCH, 2023).

As CGHs também utilizam o potencial hidráulico para gerar energia, mas se diferenciam das PCHs por serem ainda menores, tanto em tamanho quanto em potência. Conforme estabelecido pela ANEEL, esses empreendimentos podem ter capacidade entre 0 a 5 MW. (ABRAPCH, 2023). Segundo o banco de dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), até novembro de 2023, estavam em operação 689 CGHs em todo o Brasil, representando uma potência instalada de 869MW (ANEEL, 2023a).

As UHEs de grande porte, com capacidade instalada de mais de 30 MW, são caracterizadas por possuírem grandes reservatórios, característica que lhes possibilitam operar por algum tempo em período de estiagem. O país tem 219 UHEs de grande porte em operação, das quais, se destacam três principais, sendo elas, UHE de Itaipu (Paraná), UHE de Belo Monte (Pará), e UHE São Luiz do Tapajós (Pará). Destaca-se que a UHE de Itaipu é considerada a maior geradora de energia limpa do planeta, tendo produzido mais de 2,9 milhões de GWh desde o início de sua operação.

De fato, a geração hidrelétrica apresenta a vantagem de ser uma fonte renovável, com baixo custo, além de possuir grande flexibilidade operativa, capaz de reservar energia e de responder prontamente às variações de demanda em horários de pico. Os projetos hidrelétricos se adaptam às características físicas dos locais, utilizando quedas d'água de diversas alturas e diferentes vazões, em centrais geradoras de pequeno porte, como no caso das CGHs e PCHs, ou em UHEs de grande porte, com reservatórios de acumulação ou à fio d'água (TOLMASQUIM, 2016).

2.3.3 Diferença entre usinas com reservatório e fio d'água

Em se tratando dos tipos de reservatórios existem duas classificações, os de acumulação e os a fio d'água. Os de acumulação normalmente são formados nas cabeceiras dos rios, em locais que ocorrem altas quedas d'água e consistem em reservatórios com grande acúmulo de água. Já os reservatórios a fio d'água aproveitam a velocidade das águas do rio para gerar eletricidade, assim geram o mínimo ou nenhum acúmulo de água.

Usinas com reservatório de acumulação caracterizam-se pela sua capacidade de armazenar grandes quantidades de água, o que permite mitigar a variabilidade hidrológica sazonal e, dependendo das dimensões dos reservatórios, mitigar o impacto de um período de estiagem severa. A água armazenada em períodos de hidrologia favorável pode ser utilizada para garantir a geração nos meses ou anos mais secos (TOLMASQUIM, 2016).

Para operar reservatórios de forma eficiente, é importante otimizar as liberações ou o volume de armazenamento, com o objetivo de atingir metas específicas, tais como maximizar a geração de energia, minimizar o déficit hídrico, reduzir o risco de inundações e diminuir os custos de operação (RIBEIRO et al., 2020).

Usinas a fio d'água produzem energia elétrica em função quase exclusivamente das vazões que chegam aos seus reservatórios. Podem apresentar pequena capacidade de armazenamento, permitindo alguma flexibilidade operativa ao longo do dia, como a necessária para acompanhar a variação horária de carga (TOLMASQUIM, 2016).

As usinas hidrelétricas a fio d'água são reconhecidas por serem mais sustentáveis do ponto de vista ambiental quando comparadas às hidrelétricas de reservatório, uma vez que a quantidade limitada de água armazenada resulta em um impacto ambiental menor. Apesar disso, em termos de gerenciamento da rede e operação individual da usina, essas usinas apresentam uma série de desafios operacionais próprios. Grande parte desses desafios derivam do fato de que há pouca ou nenhuma reserva de água nas UHEs a fio d'água. Conseqüentemente, a geração de energia deve ser ajustada em tempo real para corresponder às variações da vazão de água.

Qualquer variação repentina na geração de energia, seja ela um aumento ou uma diminuição, acarreta diversos obstáculos para os operadores do sistema de energia (ROY et al., 2022).

Uma observação a ser feita é de que a UHE de Itaipu é considerada uma usina a fio d'água. Embora possua reservatório e apresente uma vasta área de alagado, que compreende uma área de cerca de 1.350 km², seu reservatório possui pequeno volume ao ser comparado com a vazão natural do rio que o abastece, caracterizando-a como uma UHE a fio d'água. (ITAIPU BINACIONAL, 2023)

Assim sendo, ambos os tipos de usinas têm vantagens e desvantagens, e a escolha entre uma usina com reservatório e uma usina a fio d'água depende de diversos fatores, como a disponibilidade de água, as condições topográficas, o impacto ambiental e os requisitos de geração de energia elétrica.

2.3.4 Usinas em Cascata

Um sistema é conhecido como sistema hidrelétrico em cascata, quando duas ou mais UHEs são implementadas em série, de modo que a vazão de escoamento de uma UHE é usada como entrada da próxima UHE (BOU-FAKHREDDINE et al., 2016). É possível construir UHEs em cascata, em um mesmo rio, nesse caso, as usinas que possuem reservatórios de acumulação são geralmente localizadas na parte superior do rio, enquanto as usinas a fio d'água ficam mais abaixo. Nessa configuração, as usinas com reservatórios de acumulação têm uma capacidade de produção de energia menor em comparação às usinas a fio d'água, devido ao uso mais intenso de seus reservatórios para maximizar o ganho de energia ao longo da cascata (TOLMASQUIM, 2016).

As configurações das UHEs em cascata envolvem um uso avançado dos recursos hídricos, permitindo a exploração eficiente do potencial energético da região, resultando em um funcionamento mais econômico. Além disso, um sistema hidrelétrico com reservatório e com configuração em cascata garante a regularização de todas as UHEs a jusante, o que aumenta os parâmetros energéticos, assim como a disponibilidade de água para os consumidores no trecho a jusante do rio. O gerenciamento efetivo de um sistema em cascata seria impossível sem considerar os fatores específicos de seu trabalho. Os estágios do sistema em cascata podem estar interligados hidrológicamente, por meio do consumo de água, e eletricamente (MITROFANOV et al., 2022).

Em resumo, a configuração de um sistema de UHEs em cascata tem como principal atributo a maximização do potencial hidráulico para a geração de energia. Embora essas usinas

tenham benefícios em termos de eficiência energética, elas também podem ter impactos negativos no meio ambiente.

3. METODOLOGIA

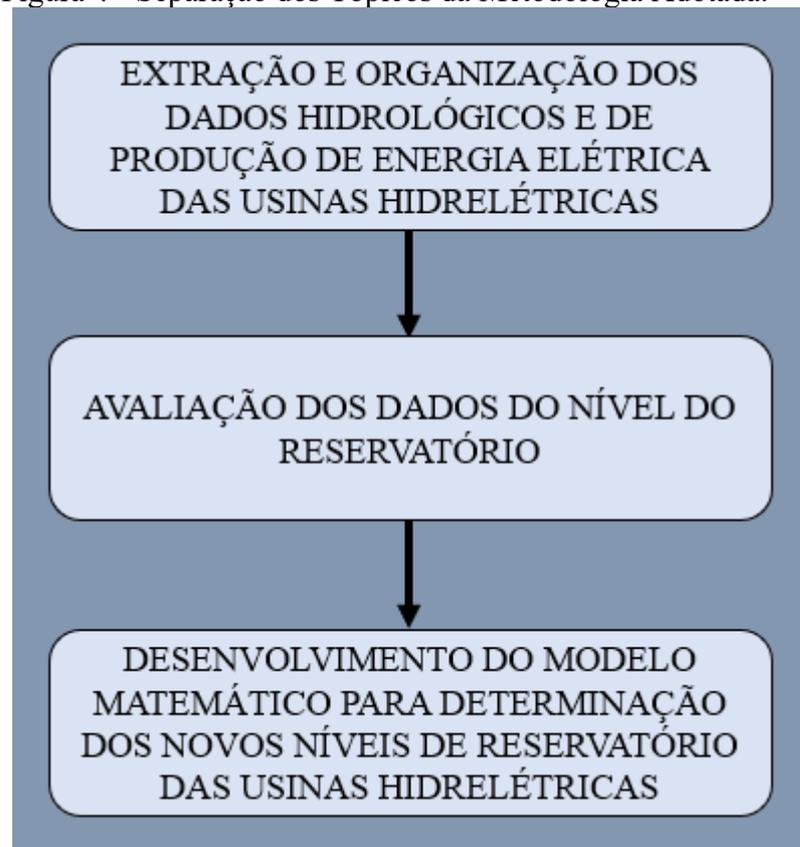
Neste capítulo é especificado a metodologia base para a determinação dos níveis dos reservatórios de UHEs. O primeiro estágio da metodologia proposta compreende na extração e organização dos dados hidrológicos (nível do reservatório), e dos dados de geração de energia elétrica da UHE.

Em primeiro lugar, foram realizadas a extração e organização dos dados hidrológicos e de geração de energia do sistema em estudo. O período de coleta dos dados abrangeu um período de um ano, desde 01 de março de 2022 até 01 de março de 2023. A resolução temporal adotada para a coleta dos dados foi diária, possibilitando uma visão mais precisa das variações e tendências ao longo do tempo. Esses dados foram obtidos junto às empresas responsáveis pelas usinas e foram devidamente registrados e armazenados para análise subsequente (ONS, 2023d).

Na segunda etapa da pesquisa, procedeu-se à avaliação dos dados do nível do reservatório e da energia gerada pela UHE. Com base nessas informações, buscou-se estabelecer uma relação entre o nível do reservatório e a geração de energia elétrica. Através da análise estatística, foram identificados correlações e padrões entre os dados do nível do reservatório e a energia produzida. Essa correlação foi estabelecida considerando os valores mínimo e máximo do reservatório, juntamente com o nível real diário registrado. Essas relações permitiram compreender o comportamento do sistema hidrelétrico em estudo.

Na terceira e última etapa do estudo, foi desenvolvido um método para determinação dos níveis dos reservatórios analisando diferentes condições de geração da UHE. Para atingir esse objetivo, foram realizados equacionamentos, considerando os dados hidrológicos e de produção obtidos nas etapas anteriores. Os resultados foram avaliados e comparados com os dados reais disponíveis, verificando a eficácia do método proposto. A Figura 4 apresenta o diagrama macro da metodologia deste estudo.

Figura 4 - Separação dos Tópicos da Metodologia Adotada.



Fonte: Autor próprio, 2023.

3.1 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS HIDROLÓGICOS E DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS.

Na etapa de extração de dados foram coletados os dados hidrológicos referentes ao nível do reservatório e da geração de energia elétrica da UHE de Passo Real. A UHE selecionada está localizada nas águas favoráveis do Rio Jacuí, no estado do Rio Grande do Sul.

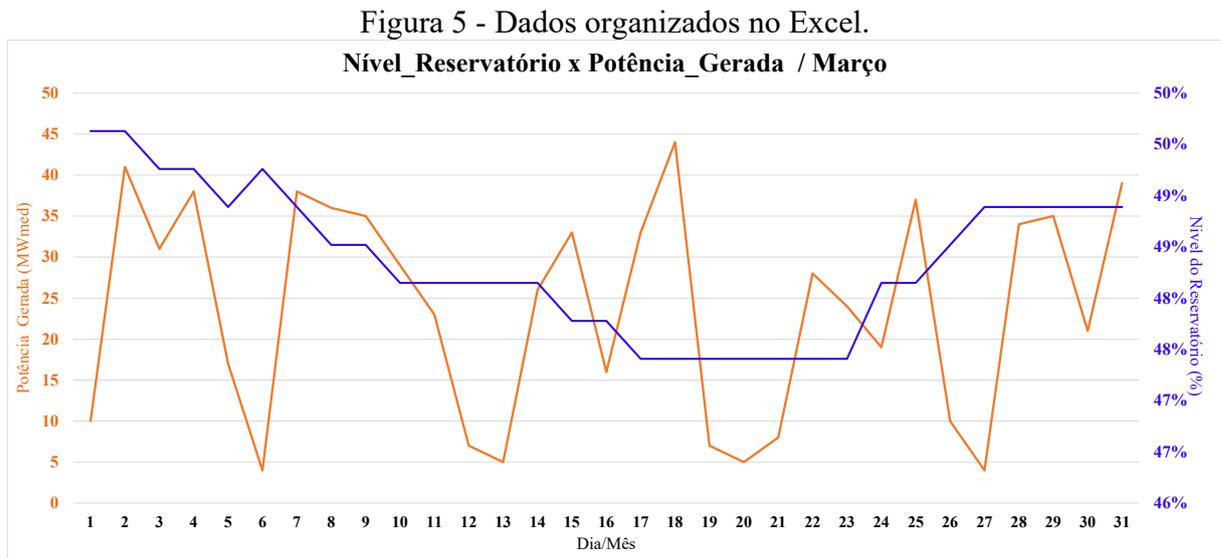
Os dados hidrológicos consistem nas medições diárias dos níveis do reservatório, enquanto os dados de geração de energia elétrica fornecem informações sobre a quantidade de energia gerada pela usina em cada dia. Esses dados foram extraídos dos relatórios disponíveis no site do ONS e organizados em uma estrutura adequada para análise (ONS, 2023d).

A análise dos dados abrangeu um período de um ano, de 01 de março de 2022 a 01 de março de 2023, com uma resolução temporal diária. Essa ampla abrangência temporal e a frequência diária dos dados nos permitiram investigar de maneira detalhada como as variações hidrológicas impactam na produção de energia. Para organizar os dados, foi utilizada a ferramenta de software Excel, com o objetivo de analisar os níveis diários do reservatório e a energia produzida diariamente, a fim de identificar as variações e padrões dessas variáveis ao longo do tempo.

Para a coleta de dados hidrológicos, foram registrados os níveis do reservatório em metros (m), visto que é a variável medida a montante do rio, analisado diariamente. Esses dados foram inseridos em uma planilha do Excel, onde foram organizados em uma coluna específica denominada "Dados Hidrológicos". A partir desses dados, foram identificados os valores de cota máxima e mínima da UHE observados durante o período analisado.

Através da análise dos dados de geração de energia, foram registradas as potências geradas diariamente, em megawatts médios (MW_med). Essas informações também foram inseridas na planilha do Excel, em uma coluna denominada "Produção de Energia Diária". Com base nesses dados, foi possível identificar os valores máximos e mínimos de potência de energia produzida ao longo do período.

Com a figura 5 abaixo, é possível visualizar os dados organizados coincidindo a resolução temporal.



Fonte: Autor próprio, 2023.

Na Figura 5, foi analisada a UHE Passo Real, onde foi plotado graficamente um período de 30 dias, correspondente ao mês de março de 2022, para uma melhor visualização da organização dos dados do nível do reservatório e da potência gerada. Portanto, com os dados organizados na planilha do Excel, foi possível prosseguir para próxima etapa do modelo matemático, onde consistiu em avaliar a variação dos níveis do reservatório.

3.2 AVALIAÇÃO DOS DADOS DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

Inicialmente foi realizada uma análise estatística dos dados coletados, utilizando técnicas apropriadas para identificar possíveis correlações e padrões. O objetivo era

compreender a influência do nível do reservatório na geração de energia elétrica e estabelecer uma relação significativa entre essas variáveis.

Com base nos dados hidrológicos disponíveis, os quais incluem informações sobre o nível máximo e mínimo da UHE, foi possível estabelecer uma equação que relaciona esses valores com o nível diário registrado. Essa equação desempenha um papel fundamental na gestão da usina, pois permite uma estimativa mais precisa do comportamento do reservatório ao longo do tempo. Com base nos níveis máximo e mínimo da UHE, é possível determinar uma faixa de operação aceitável que leva em consideração fatores como a capacidade de armazenamento do reservatório.

Para estabelecer essa relação, foi estabelecido a seguinte equação:

$$Nível_{DIÁRIO} = \frac{Nível_{REAL} - Nível_{MINÍMO}}{Nível_{MÁXIMO} - Nível_{MINÍMO}} \quad (1)$$

Onde as variáveis representam:

$Nível_{DIÁRIO}$	Nível de operação diário normalizado do reservatório da UHE em estudo.
$Nível_{REAL}$	Nível real registrado diariamente do reservatório da UHE em estudo.
$Nível_{MINÍMO}$	Nível Mínimo do reservatório da UHE em estudo.
$Nível_{MÁXIMO}$	Nível Máximo do reservatório da UHE em estudo.

A equação (1), utilizada para calcular e normalizar a variação diária do nível é uma ferramenta eficiente e de extrema importância para as próximas etapas do processo. Ao analisar o nível de operação diário normalizado, é possível identificar padrões e tendências de variação ao longo do tempo.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DOS NOVOS NÍVEIS DE RESERVATÓRIO DE USINAS HIDRELÉTRICAS.

A terceira etapa da pesquisa consistiu na determinação dos novos níveis do reservatório. Para realização desta etapa, inicialmente foi necessário analisar a variação dos níveis ao longo dos dias. Posteriormente, passa-se a analisar a potência real gerada diariamente pelo sistema. E finalmente, foram estimadas as taxas de deplecionamento/replecionamento de cada reservatório.

3.3.1 Análise da Variação do Nível do Reservatório.

Para a análise da variação do nível do reservatório, foram consideradas duas variáveis: o nível do dia atual e o nível do dia a frente. A diferença entre esses dois valores de níveis

diários foi fundamental para compreender a variação ocorrida no reservatório durante esse período específico. Essa diferença permitiu avaliar se o reservatório estava acumulando ou perdendo água ao longo do tempo. A variável do nível do dia atual foi chamada de “ $Nível_{Dia_X}$ ”, e a variável do nível do dia a frente, foi chamada de “ $Nível_{Dia_{X+1}}$ ”, para fins de organização do modelo.

Com as variáveis definidas, utilizou-se então uma função condicional nas células do Excel, comparando os valores de níveis do dia a frente ($Nível_{Dia_{X+1}}$) com os valores de nível do dia atual ($Nível_{Dia_X}$). Para esclarecimento, os valores de níveis são os resultados da normalização realizada anteriormente. A condição fornecida é apresentada na equação (2).

$$x(n) = \begin{cases} 1E^{-50}, & x(n) = 0 \\ [Nível_{Dia_{X+1}} - Nível_{Dia_X}], & x(n) \neq 0 \end{cases} \text{ em } (\%) \quad (2)$$

Onde as variáveis representam:

$x(n)$	Varição do Nível do reservatório considerado da UHE em estudo.
$Nível_{Dia_{X+1}}$	Nível real medido do dia a frente da UHE em estudo.
$Nível_{Dia_X}$	Nível real medido no dia atual da UHE em estudo.
$1E^{-50}$	Valor próximo de zero, mas não zero.

Na equação (2), foi apresentada a condição utilizada no Excel, a qual verifica se a expressão $x(n)$ é igual ou diferente de zero, ou seja, se o resultado da expressão for igual a zero é retornado um valor próximo de zero, mas não zero. Caso contrário, o resultado será a diferença entre $Nível_{Dia_{X+1}}$ e $Nível_{Dia_X}$. Essa definição da condição retornar um valor próximo de 0 mas não 0 é adotada para evitar problemas decorrentes da divisão por zero, que poderiam resultar em erros de cálculo, interrompendo o fluxo da equação para etapas subsequentes do modelo.

3.3.2 Análise da Potência Diária Real.

Para a análise da potência real diária utilizou-se novamente da função condicional do Excel para comparar os valores da potência, porém, a variável utilizada foi somente a potência real medida, a qual foi chamada de “Potência_Real_Diaria”. Desta forma, observando a equação (3), têm-se os critérios de definição para a utilização da potência real diária.

$$y(n) = \begin{cases} 1E^{-50}, & P_{DR} = 0 \\ [P_{DR}], & P_{DR} \neq 0 \end{cases} \text{ em } (MW) \quad (3)$$

Onde as variáveis representam:

$y(n)$	Potência Diária considerada da UHE em estudo.
P_{DR}	Potência Diária Real Medida da UHE em estudo.
$1E^{-50}$	Valor próximo de zero, mas não zero.

Na Equação (3) verifica-se que a potência diária, dada pela expressão $y(n)$, pode ser igual ou diferente de zero, ou seja, se o resultado da expressão for igual a zero é retornado um valor próximo de zero, mas não zero. Caso contrário, se o resultado for diferente de zero, será o valor da potência real. Mais uma vez, foi empregado um valor extremamente próximo de zero, porém não exatamente zero, com um valor de $1E^{-50}$. Isso atende às exigências necessárias para os cálculos na próxima fase do método.

3.3.3 Taxa de Deplecionamento/Replecionamento do Reservatório.

Após estabelecer as condições para a variação de nível do reservatório, e da potência diária, foi possível determinar a taxa de deplecionamento/replecionamento dos reservatórios, que é um indicador importante, onde mede a variação do nível de água ao longo do tempo.

Inicialmente, com os valores da variação do nível do reservatório, e da potência diária, foi feita novamente uma condição, para determinar a relação do nível pela potência. O resultado é expresso por uma variável que combina a variação do nível do reservatório em porcentagem e a potência diária em megawatts ($\%/MW$). A escolha em porcentagem como unidade principal na taxa de deplecionamento/replecionamento visa obter uma medida mais precisa e assertiva para o nível do reservatório. Essa abordagem refinada contribui para uma melhor avaliação do nível de água, fornecendo informações mais precisas para a gestão e operação do reservatório.

Logo, tem-se a condição utilizada para determinação da relação do nível pela potência, expresso pela equação (4).

$$z(n) = \begin{cases} 1E^{-50}, & y(n) = 1E^{-50} \\ \left[\frac{x(n)}{y(n)} \right], & y(n) \neq 1E^{-50} \end{cases} \quad em (\%/MW) \quad (4)$$

Onde as variáveis representam:

$z(n)$	Nível em porcentagem por megawatt do reservatório em estudo.
$x(n)$	Variação do Nível do reservatório considerado da UHE em estudo.
$y(n)$	Potência Diária considerada da UHE em estudo.

Após a determinação da relação $z(n)$, a qual servirá de insumo para a próxima etapa, foi possível obter a taxa de deplecionamento/replecionamento do reservatório.

Logo, tem-se a equação da Taxa de Deplecionamento/Replecionamento do reservatório exposto pela equação (5).

$$k(n) = \begin{cases} [z(n) \times P_{D_S}], & x(n) < 0 \\ \{[z(n) \times y(n)] + [z(n) \times (y(n) - P_{D_S})]\}, & x(n) \geq 0 \end{cases} \quad em (\%) \quad (5)$$

Onde as variáveis representam:

$k(n)$	Taxa de Deplecionamento/Replecionamento do reservatório em estudo.
$z(n)$	Nível em porcentagem por megawatt do reservatório em estudo.
$x(n)$	Varição do Nível do reservatório considerado da UHE em estudo.
$y(n)$	Potência Diária considerada da UHE em estudo.
P_{D_S}	Potência Diária Simulada da UHE em estudo.

Em resumo, a equação (5) é utilizada para calcular diferentes valores dependendo da mudança no nível do reservatório. Se estiver diminuindo (deplecionamento), é utilizada a potência simulada para o cálculo. Se estiver aumentando (replecionamento), é usada uma combinação da potência real e simulada. Ao realizar essas modificações e obter novas variações no nível do reservatório, é possível avaliar os efeitos das variações na potência diária sobre a capacidade de replecionamento ou deplecionamento do reservatório.

3.3.4 Novo Nível do Reservatório.

Por fim, após as definições e critérios matemáticas realizados nas etapas anteriores, foi possível obter os novos níveis do reservatório. Para se determinar a relação do novo nível, foi utilizado um sistema de condições, na qual verifica-se a potência diária simulada (P_{D_S}). Esse sistema de condições é dado pela equação (6).

$$i(n) = \begin{cases} [Nível_{Dia_{X+1}}], & P_{D_S} = 0 \\ [i(n-1) + k(n)], & P_{D_S} \neq 0 \end{cases} \quad em (\%) \quad (6)$$

Onde as variáveis representam:

$i(n)$	Novo Nível encontrado para o dia a frente no reservatório da UHE em estudo.
P_{D_S}	Potência Diária Simulada da UHE em estudo.
$Nível_{Dia_{X+1}}$	Nível real medido do dia a frente da UHE em estudo.
$i(n - 1)$	Nível medido no dia atual da UHE em estudo.
$k(n)$	Taxa de Deplecionamento/Replecionamento do reservatório da UHE em estudo.

Na condição apresentada na equação (6), é possível observar que a expressão condicional no Excel analisa o valor de P_{D_S} e determina o nível do dia a frente. Esse condicionamento se fez necessário pois caso não houvesse despacho de energia na UHE em estudo, a geração de energia não teria impacto no deplecionamento/replecionamento do reservatório. Do contrário, a influência da geração no nível do reservatório é obtida pelo nível atual do reservatório somado a taxa de deplecionamento/replecionamento. Essa lógica condicional permite realizar um cálculo dinâmico do nível do reservatório, levando em consideração os valores atuais e futuros. Desta forma, considerando a metodologia matemática desenvolvida neste trabalho, é possível determinar os novos níveis do reservatório da UHE em análise. Além disso, esta metodologia também pode auxiliar em estudos de gestão do sistema para situações específicas, simulando a potência desejada em sistemas em cascata, a fim de garantir o controle dos níveis dos reservatórios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados deste estudo foi dividida em três subseções. Na primeira seção foi realizada a simulação do modelo aplicando os dados da potência diária real como variável de entrada na potência simulada, com o intuito de validar a metodologia desenvolvida. Além disso, nesta mesma seção, foi realizado uma avaliação das diferentes estações do ano e o impacto nos níveis do reservatório e na geração de energia.

Na segunda seção foi realizado uma simulação com um acréscimo na potência simulada em comparação com a potência real diária. De modo contrário, na terceira seção foi realizada a simulação com diminuição na potência simulada em relação a potência real. Em ambos os casos foram discutidos os impactos da geração nos níveis do reservatório para as diferentes estações do ano. Para este estudo foram utilizados dados de níveis e potência gerada da UHE de Passo Real, a qual possui como cota os níveis de máximo e mínimo de 327 e 300 metros, respectivamente, e potência máxima outorgada de 159 MW.

4.1 RESULTADOS DE VALIDAÇÃO DO MODELO

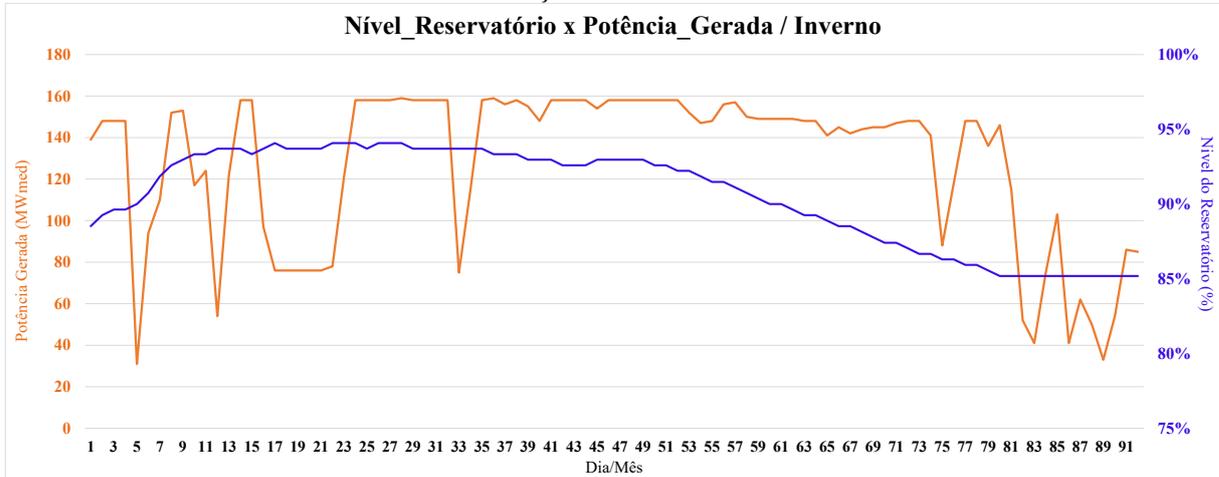
A fim de validar a metodologia criada, o modelo foi testado utilizando os dados reais da potência real na variável de potência simulada, resultando em níveis medidos que coincidiram com os níveis reais. Essa abordagem foi adotada para verificar a eficácia do modelo matemático aplicado na metodologia.

Assim, com os dados organizados na planilha do Excel, foi possível visualizar graficamente as variações dos níveis do reservatório e da produção de energia ocorridas ao longo das quatro estações do ano. Através de gráficos de linha, foi possível identificar tendências e padrões de comportamento dessas variáveis ao longo do tempo.

A extração e organização dos dados revelaram uma correlação direta entre os níveis do reservatório e a produção de energia, onde observa-se que, durante o inverno, houve um aumento significativo nos níveis do reservatório. Isso ocorreu devido às maiores precipitações pluviométricas registradas nessa estação. Os gráficos demonstraram uma curva ascendente, indicando um aumento gradual no nível do reservatório ao longo dos meses mais chuvosos. Conseqüentemente, a produção de energia também foi afetada positivamente durante o inverno. Com um maior volume de água disponível no reservatório, as hidrelétricas puderam gerar mais eletricidade, resultando em um aumento na produção energética diária. Esse aumento foi observado no gráfico correspondente à produção de energia, que acompanhou a curva

ascendente dos níveis do reservatório. A figura 6, demonstra as curvas encontradas na estação do inverno.

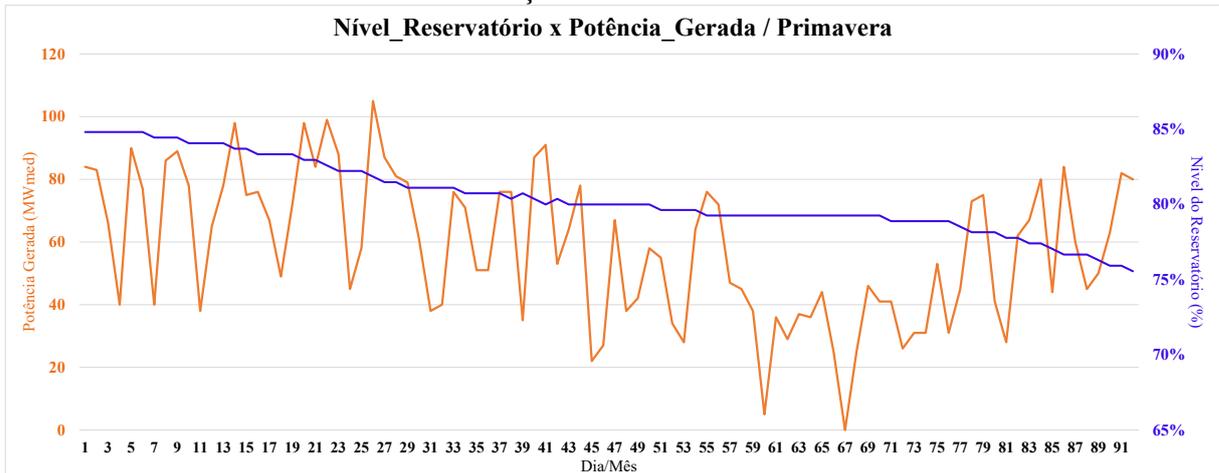
Figura 6 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação do Inverno da UHE de Passo Real.



Fonte: Autor próprio, 2023.

Na primavera, os níveis do reservatório e a produção de energia começaram a diminuir gradualmente. Isso pode ser explicado pela redução das chuvas nessa estação. Houve uma tendência de queda nos níveis do reservatório, o que consequentemente resultou em uma diminuição na produção de energia. Como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação da Primavera da UHE de Passo Real.

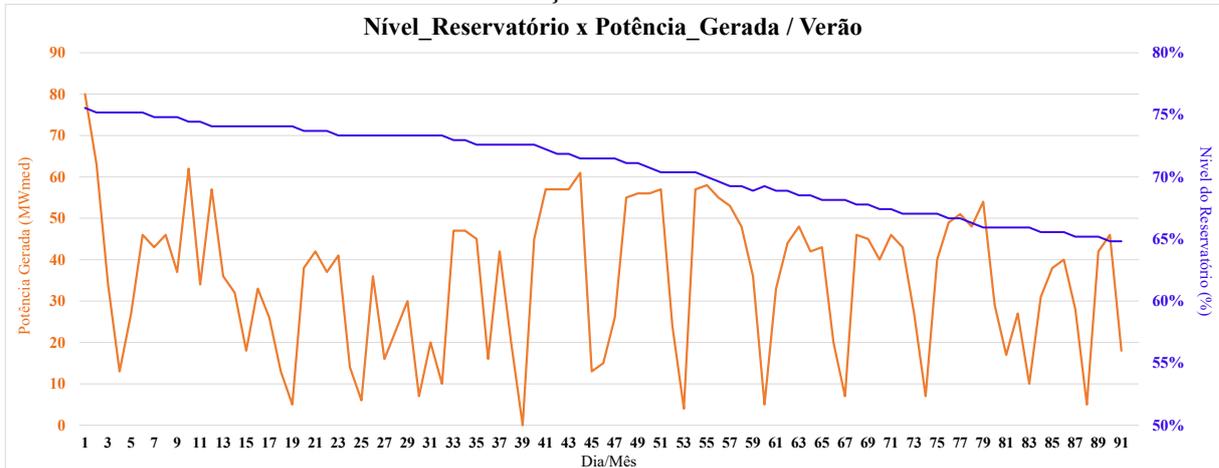


Fonte: Autor próprio, 2023.

Durante os meses de verão e outono, como pode ser observado nas Figuras 8 e 9, os reservatórios enfrentaram os desafios das vazões mais baixas do ano. No auge do verão, quando a estação seca estava em pleno curso, os níveis do reservatório chegaram ao seu ponto mais baixo. Essa situação impactou diretamente na produção de energia, que sofreu uma queda significativa, pois a disponibilidade de água estava mais limitada. No entanto, à medida que a

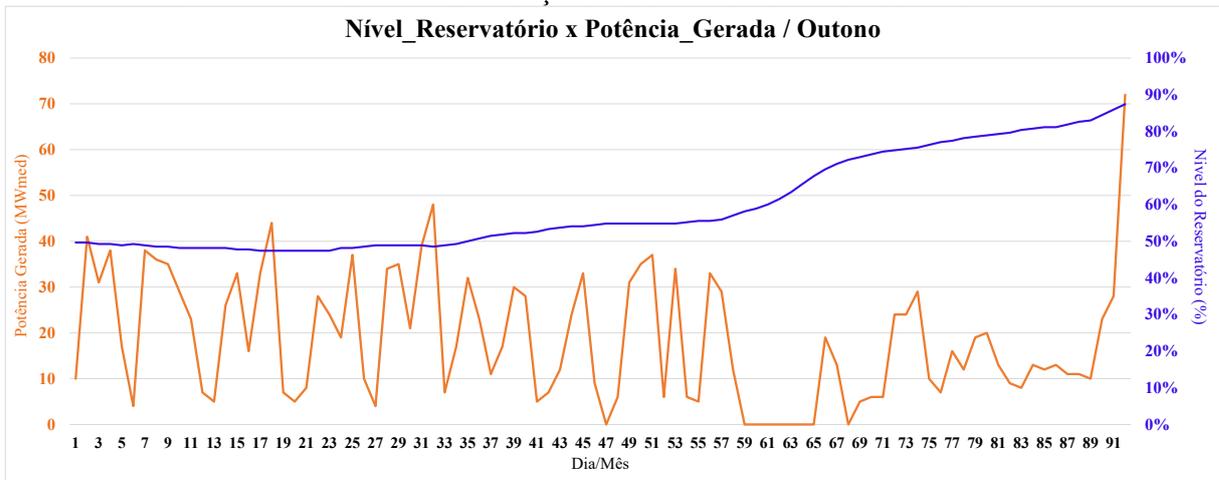
estação avançava para o outono, verificou-se uma ligeira recuperação nos níveis do reservatório e, conseqüentemente, na produção de energia. Apesar disso, eles conseguiram se manter em um nível aceitável de operação.

Figura 8 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação do Verão da UHE de Passo Real.



Fonte: Autor próprio, 2023.

Figura 9 - Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente durante a Estação do Outono da UHE de Passo Real.



Fonte: Autor próprio, 2023.

Portanto, a correlação entre dados hidrológicos e produção de energia é evidente ao longo das quatro estações do ano. A disponibilidade de água afeta diretamente o nível dos reservatórios, que por sua vez influencia a capacidade de geração das usinas hidrelétricas. É importante ressaltar que essas observações são específicas e podem variar dependendo das características geográficas e climáticas de cada região. Além disso, é essencial considerar outros fatores, como o tamanho dos reservatórios, a capacidade instalada das usinas hidrelétricas e a demanda por energia elétrica, para uma compreensão completa da relação entre dados hidrológicos e produção de energia.

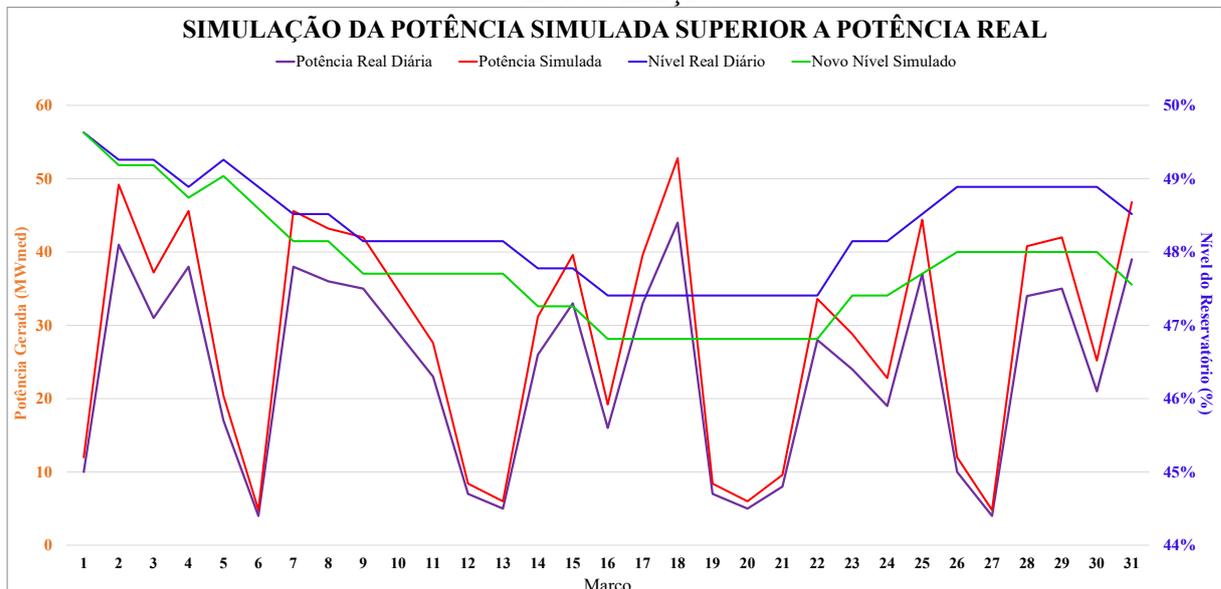
Com o objetivo de obter uma melhor compreensão visual da validação dos modelos ao longo de todo o período analisado. No Apêndice A deste documento, é apresentado na Figura 12, o gráfico plotado com as quatro estações analisadas na validação.

4.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DA POTÊNCIA SIMULADA SUPERIOR A POTÊNCIA REAL

Com o propósito de analisar a metodologia criada, realizou-se uma simulação com um acréscimo de 20% na potência simulada em comparação com a potência real diária. O objetivo principal foi analisar os impactos dessa geração adicional nos níveis do reservatório durante o mês de março. Focando em um único mês, se obteve uma visualização mais clara e detalhada dos efeitos dessa variação de potência na água armazenada no reservatório.

Diante disto, é apresentado na Figura 10 uma representação gráfica do aumento na potência simulada. Nessa figura, compara-se os valores da potência simulada com o novo nível simulado no reservatório, bem como o nível real diário em relação à potência real diária. Essa representação visual nos permite visualizar mudança no novo nível medido, destacando as variações que ocorrem ao longo do período analisado, com o decréscimo do nível para o período em análise.

Figura 10 - Resultado da simulação realizada da Potência simulada superior a Potência real no mês de março.



Fonte: Autor próprio, 2023.

Conforme apresentado na Figura 10, é possível visualizar os resultados obtidos, onde destaca-se o aumento na potência simulada, totalizando em 147,4MW a mais produzidos no mês de março comparado com a produção real. É importante ressaltar que, antes da simulação o nível final real estava estabelecido em 48,89%. Contudo, em decorrência do aumento da

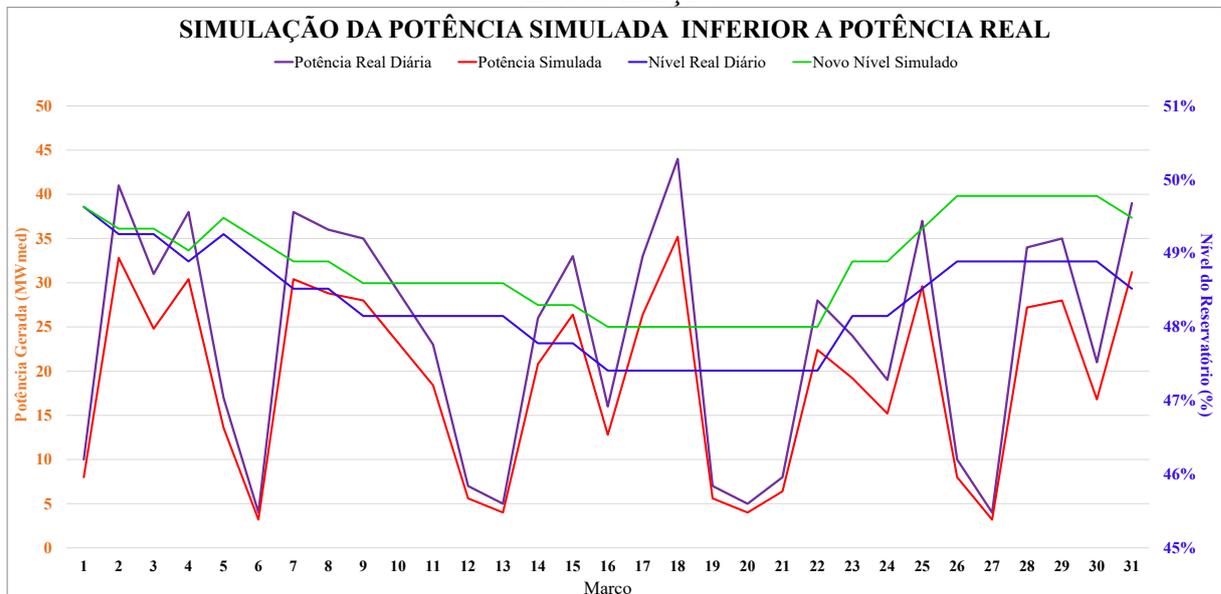
potência, essa porcentagem sofreu uma queda significativa, atingindo a marca de 47,56%. Essa mudança revela a correlação inversa entre a potência aplicada e o nível final alcançado, configurando um fator essencial para a avaliação e entendimento do funcionamento do sistema abordado.

4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DA POTÊNCIA SIMULADA INFERIOR A POTÊNCIA REAL

Em contrapartida, nessa etapa foi realizado uma simulação com um decréscimo de 20% na potência simulada em comparação com a potência real diária, com o objetivo de comparar e analisar os impactos dessa redução na geração de energia nos níveis do reservatório durante o mês de março.

Na Figura 11, apresenta-se um gráfico que representa a redução na potência simulada. Nesse gráfico, fazemos uma comparação entre os valores da potência simulada e o novo nível simulado no reservatório, além de relacioná-los com o nível real diário em relação à potência real diária. Essa representação visual nos permite observar graficamente as mudanças no novo nível medido, evidenciando de forma clara como essa diminuição afeta o nível do reservatório ao longo do período analisado.

Figura 11- Resultado da simulação realizada da Potência simulada inferior a Potência real no mês de março.



Fonte: Autor próprio, 2023

De acordo com a representação gráfica na Figura 11, com a diminuição na potência simulada, resultou em uma produção de 147,4 MW inferior no mês de março em comparação com a produção real. Observamos também que, antes da simulação, o nível final real era de

48,89%, com o devido decréscimo na potência, essa porcentagem teve um acréscimo, chegando a um nível simulado de 49,48%.

Portanto, analisando os gráficos representados com um acréscimo e decréscimo de 20% na potência simulada, foi possível analisar o impacto na variação nos níveis do reservatório. Mesmo que a variação na determinação do novo nível do reservatório seja relativamente pequena, a análise demonstra que a potência tem uma influência significativa nos níveis do reservatório. Isso nos permite entender de forma mais precisa como as mudanças na geração de energia afetam o armazenamento de água no reservatório.

Em suma, os resultados dessa análise ressaltam a eficácia da metodologia proposta para determinar o novo nível para o reservatório com base na potência simulada. Essa metodologia pode servir de aporte para futuras pesquisas e aplicações, especialmente no que diz respeito à gestão do sistema em situações específicas. A capacidade de prever e ajustar os níveis do reservatório com base na potência simulada pode ser explorada para otimizar sistemas em cascata, onde múltiplas usinas hidrelétricas estão interconectadas. Adicionalmente, no Apêndice A deste documento são apresentados pela Figura 12 e Figura 13 a representação anual de simulação do acréscimo e decréscimo de 20% na potência simulada em relação a potência real.

5. CONCLUSÕES

A produção de energia elétrica em usinas hidrelétricas é um processo complexo e altamente dependente do nível do reservatório, que por sua vez é afetado por fatores naturais e atividades humanas. No entanto, para otimizar essa produção, é fundamental aprimorar a gestão dos níveis dos reservatórios, considerando o deplecionamento e replecionamento, e levando em conta a geração de energia em toda a bacia hidrográfica.

O presente trabalho abordou de forma abrangente o desenvolvimento de um sistema de gestão de recursos hídricos e geração de energia em usinas hidrelétricas no contexto do SEB. Os objetivos gerais e específicos deste trabalho foram claramente definidos, abrangendo desde a extração e organização de dados hidrológicos até a avaliação das correlações entre os níveis dos reservatórios e a produção de energia. A metodologia apresentada detalhou os passos para a construção desse modelo matemático, enfatizando a sua relevância para a gestão eficaz dos recursos hídricos e a garantia da geração de energia nas UHEs.

Os resultados e discussões forneceram uma análise detalhada das simulações realizadas, destacando a validação do modelo através da comparação da potência simulada com a potência diária real. Além disso, exploraram o impacto das estações do ano nos níveis dos reservatórios e na geração de energia. Essas análises ajudaram a compreender o funcionamento das usinas hidrelétricas em diferentes condições.

Por fim, este estudo explora uma nova abordagem para auxílio na gestão dos recursos hídricos em UHEs, que pode ser empregada tanto para estudos de operação como para o planejamento de disponibilidade de energia em UHE unitária ou em cascata. Diante disto, os direcionamentos de trabalhos futuros relacionados ao tema podem ser elencados pela otimização de UHEs em cascata, exploração da hibridização dos recursos energéticos renováveis, e análise de múltiplos reservatórios com o sistema integrado de energia.

REFERÊNCIAS

ABRAPCH. **Associação Brasileira de PCH's e CGH's**. Disponível em: <<https://abrapch.org.br/o-setor/o-que-sao-pchs-e-cghs/>>. Acesso em: 21 mar. 2023.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 10 nov. 2023^a.

ANEEL. **Brasil ultrapassa os 190 GW em capacidade de geração de energia elétrica**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/brasil-ultrapassa-os-190-gw-em-capacidade-de-geracao-de-energia-eletrica#:~:text=Uma%20expans%C3%A3o%20de%202%2C04,capacidade%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20este%20ano.>>. Acesso em: 8 mar. 2023^b.

ARRAIS, E. et al. **STRATEGY CONTROL CONVERTER TO ENHANCE THE PERFORMANCE IN THE GRID-CONNECTED PMSG WIND POWER GENERATION SYSTEM**. IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)Fortaleza, BrazilIEEE, , 2015.

ASLAM, S. et al. **A Survey On Deep Learning Methods For Power Load And Renewable Energy Forecasting in Smart Microgrids**. Renewable and Sustainable Energy ReviewsElsevier Ltd, , 1 jul. 2021.

BOU-FAKHREDDINE, B. et al. **Short-term 41mpac 41mpacto f41 scheduling of cascade plants operating on Litani River 41mpacto-Lebanon**. 2016 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries, REDEC 2016. **Anais...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 26 set. 2016

D. HUNT, J.; A. V. FREITAS, M. **USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS SAZONAIS E SEUS BENEFÍCIOS PARA O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO**. . [s.n.].

DIAS, V. DE S. et al. **Nos Overview of Hydropower Reservoirs in Brazil: Current Situation, Future Perspectives and Impacts of Climate Change. Water (Switzerland)** MDPI AG, , 3 maio 2018.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 6 out. 2023.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>>. Acesso em: 8 mar. 2023^a.

EPE. **Expansão da Geração.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>>. Acesso em: 2 abr. 2023^b.

EPE; MME. **PNE 2050 – PLANO NACIONAL DE ENERGIA.** . [s.n.].

EPE; MME. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031/ Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética.** . [s.l: s.n.].

GOV. **Energia Renovável Chega a Quase 50% da Matriz Elétrica Brasileira.** Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1#:~:text=Energia%20renov%C3%A1vel%20chega%20a%20quase%2050%25%20da%20matriz%20energ%C3%A9tica%20brasileira,-Estudo%20indica%20que&text=Quase%20metade%20da%20energia%20energ%C3%A9tica,Minist%C3%A9rio%20de%20Minas%20e%20Energia.>>. Acesso em: 4 jul. 2023.

GOV. **Itaipu Em numeros.** Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>>. Acesso em: 4 abr. 2023.

HAMMERSCHMITT, B. K. et al. Engenharia elétrica e de computação: docência, pesquisa e inovação tecnológica.
PANORAMA DAS FONTES TÉRMICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

ELÉTRICA NO BRASIL, p. 156–170, 2023.
D.O.I.:<https://doi.org/10.22533/at.ed.465231601>

ITAIPU BINACIONAL. **Itaipu Binacional**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 29 out. 2023.

L NASCIMENTO, M. H.; MARANGON LIMA, J. W. **The Impact of Wind Power Stations in the Brazilian Electricity Markets**. 2005 IEEE Rússia Power TechSt. Petersburg, Russia, 2008.

MITROFANOV, S. et al. **Aggregation of Water-Energy Blocks of the Hydroelectric Power Plants Cascade Simulation Model**. 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON 2022. **Anais...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>>. Acesso em: 1 mar. 2023^a.

ONS. **O Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 8 jan. 2023^b.

ONS. **O Sistema em Números**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 10 jan. 2023^c.

ONS. **Resultados da Operação – Dados Gerais**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais>>. Acesso em: 29 out. 2023^d.

RASCHE, A. C. L.; PEREIRA, D. D. C. **O Setor Elétrico Brasileiro e o Código Brasileiro de Energia Elétrica**. 2021.

RIBEIRO, F. DE S. L. et al. **Operação ótima do reservatório da usina hidrelétrica de Jirau usando otimização não linear**. 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE). **Anais...** Istanbul, Turkey: 12 jun. 2020

ROY, N. et al. **Operational and Economic challenges due to Run-of-River (RoR) Hydro and ways to address the challenges**. 4th International Conference on Energy, Power, and Environment, ICEPE 2022. **Anais...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022

SEGER, S. et al. Uma Revisão Histórica do Planejamento do Setor Elétrico Brasileiro. **REVISTA USP**, p. 13–36, jan. 2015.

SILVA, R. D. DE S.; DISET. **CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E O PLANEJAMENTO DA INFRAESTRUTURA NO LONGO PRAZO**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

STILPEN, D. V. DE S.; CHENG, V. **Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference: (IRSEC'15)**. Solar fotovoltaica no Brasil: um promissor mercado de energia renovável. **Anais...** Marrakech, Marrocos: 10 dez. 2015

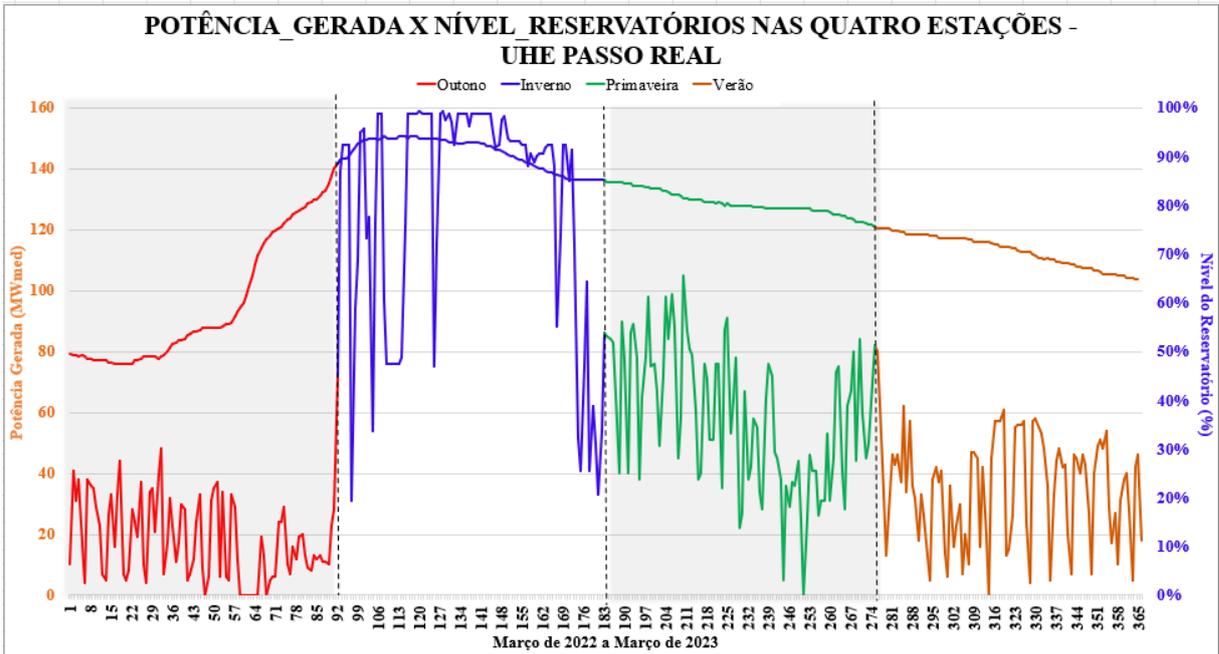
THÉRY, H.; MELLO-THÉRY, N. A. DE. O sistema elétrico brasileiro. **Confins : Revue Franco-Brésilienne de Géographie = Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 26, 19 fev. 2016. D.O.I.:10.4000/confins.10797

TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável. Em: EPE (Ed.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. [s.n.].

VICTER, W. **O Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Importante conhecer e contribuir**. Disponível em: <<https://editorabrasilenergia.com.br/o-plano-decena-de-expansao-de-energia-2031-importante-conhecer-e-contribuir/>>. Acesso em: 8 mar. 2023.

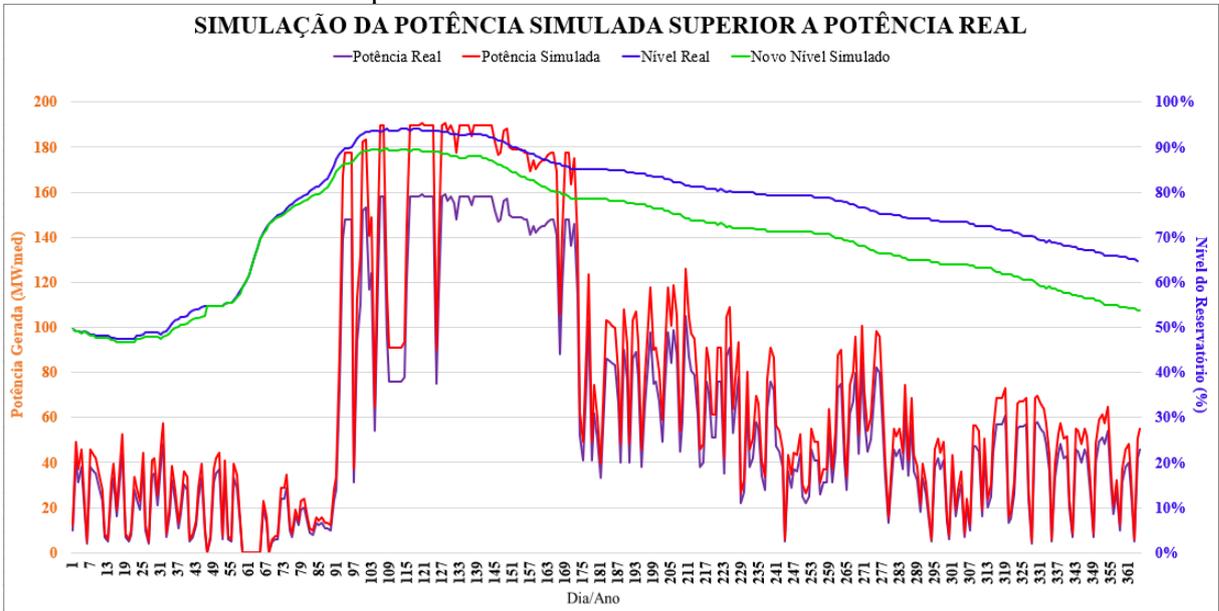
APÊNDICE A

Figura 12 – Gráfico da Relação entre o Nível do Reservatório e a Potência de Energia Gerada Diariamente Durante as Quatro Estações da UHE de Passo Real.



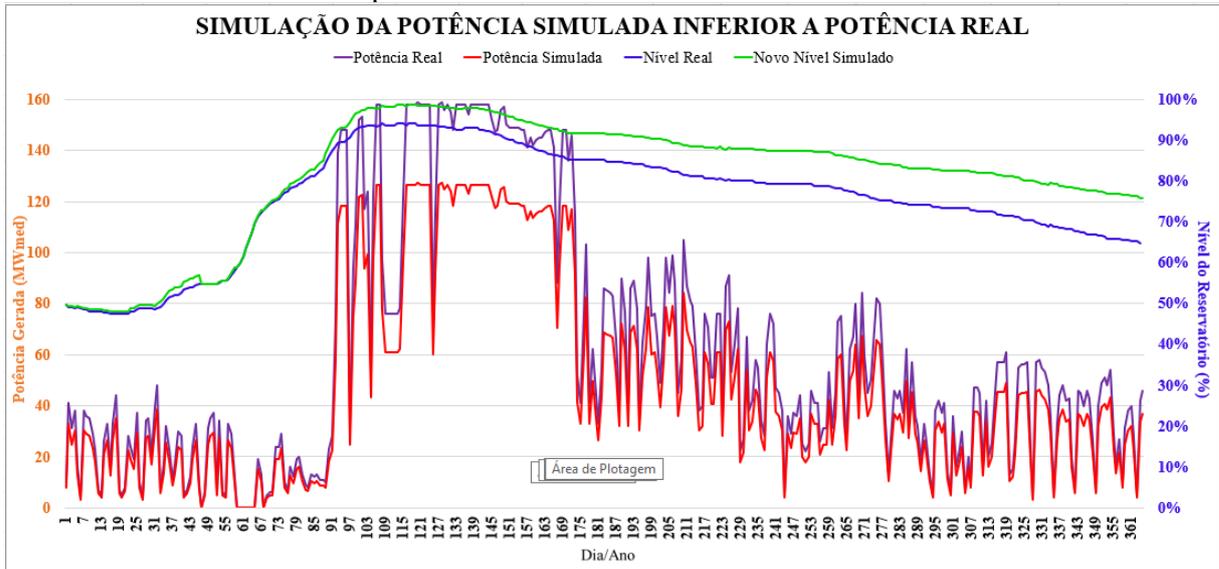
Fonte: Autor próprio, 2023.

Figura 13 - Resultado da simulação realizada da Potência simulada superior a Potência real no período anual da UHE de Passo Real.



Fonte: Autor próprio, 2023.

Figura 14 - Resultado da simulação realizada da Potência simulada inferior a Potência real no período anual da UHE de Passo Real.



Fonte: Autor próprio, 2023.

NUP: 23081.150455/2023-12

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
4	Trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.32)	TCC_FINAL_FINAL_Corrigido.pdf

Assinaturas

21/12/2023 13:21:10

ALZENIRA DA ROSA ABAIDE (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR (Ativo))
07.37.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ELETROMECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA - DESP

03/01/2024 07:38:51

DIEGO BERLEZI RAMOS (Coordenador(a) de Curso)
07.09.02.00.0.0 - CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - CEELE



Código Verificador: 3687168

Código CRC: d5bf1e4e

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

