



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Luciano Bendo Scandolara Filho

Análise da Importância Estratégica do Setor Hidrelétrico no Plano Decenal de
Expansão de Energia: Papel Atual, Tendências Futuras e Desafios para a
Sustentabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro

Araranguá
2025

Luciano Bendo Scandolara Filho

Análise da Importância Estratégica do Setor Hidrelétrico no Plano Decenal de
Expansão de Energia: Papel Atual, Tendências Futuras e Desafios para a
Sustentabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologia e Sociedade da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia

Orientador(a): Prof.(a) Giuliano Arns Rampinelli, Dr.(a)

Araranguá

2025

Ficha catalográfica para trabalhos acadêmicos

Scandolara Filho, Luciano Bendo

Análise da importância estratégica do setor hidrelétrico no plano decenal de expansão de energia : papel atual, tendências futuras e desafios para a sustentabilidade do sistema elétrico brasileiro / Luciano Bendo Scandolara Filho ; orientador, Giuliano Arns Rampinelli, coorientador, Leonardo Elizeire Breermann, 2025.

51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Hidrelétricas. 3. Planejamento Energético. 4. PDE 2034. I. Rampinelli, Giuliano Arns. II. Breermann, Leonardo Elizeire. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. IV. Título.

Luciano Bendo Scandolara Filho

Análise da Importância Estratégica do Setor Hidrelétrico no Plano Decenal de
Expansão de Energia: Papel Atual, Tendências Futuras e Desafios para a
Sustentabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia,
foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes
membros:

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Orientador

Prof. Leonardo Elizeire Bremermann, Dr.
Coorientador

Prof. Kátia Rodrigues Madruga, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Me. Beatriz Silveira Buss
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado
adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof. Kátia Rodrigues Madruga, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Orientador

Luciano Bendo Scandolara Filho
Autor

Araranguá, 07 de julho de 2025.

AGRADECIMENTOS

Pelo presente trabalho, gostaria de agradecer a toda a minha família pelo apoio que tive ao longo de toda essa jornada acadêmica na Universidade Federal de Santa Catarina. Agradeço também aos meus professores orientadores Giuliano, pela disponibilidade em aceitar meu convite, e Leonardo pela paciência e suporte que recebi ao longo desse período para estudos e realização do trabalho. Também gostaria de mencionar meus amigos Gustavo, Julia, Martina e Ranielly, que ao longo dessa caminhada foram muito mais que isso, e sim minha segunda família. Por fim agradeço minha namorada Érica por toda motivação e alegria que recebi para finalização do mesmo.

Muito obrigado a Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade e hospitalidade que recebi nesses anos para finalização da minha graduação, sendo pública e gratuita, permitindo a obtenção do meu título de Bacharel em Engenharia de Energia.

RESUMO

As usinas hidrelétricas são, historicamente, a principal fonte de geração de energia no Brasil, destacando-se por sua capacidade de regulação, confiabilidade e integração com outras fontes renováveis. Este trabalho tem como objetivo analisar a importância das usinas hidrelétricas no contexto do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Para alcançar esse objetivo, foram realizadas revisões bibliográficas e documental de relatórios técnicos oficiais, com destaque para dados do Sistema Interligado Nacional (SIN) e projeções da EPE. Os desafios associados à expansão da hidrogeração no cenário brasileiro, como limitações socioambientais e necessidade de modernização de plantas geradoras existentes também foram discutidos ao longo do estudo. A análise mostrou que, mesmo que sua participação relativa na matriz elétrica brasileira deva diminuir, as usinas hidrelétricas continuam a desempenhar sua função no equilíbrio sistêmico e na segurança energética, provando que sua importância continua sendo fundamental para a operação de todo o sistema elétrico. Portanto, o setor continua sendo a principal fonte de geração de energia para o próximo horizonte decenal. A pesquisa reforça a relevância do planejamento energético integrado e a necessidade de investimentos coordenados que considerem tanto a sustentabilidade quanto a confiabilidade do sistema elétrico nacional.

Palavras-chave: hidrelétricas, planejamento energético, PDE 2034, matriz elétrica, geração renovável.

ABSTRACT

Hydropower plants have historically been the main source of electricity generation in Brazil, standing out for their regulation capacity, reliability, and integration with other renewable sources. This study aims to analyze the importance of hydropower plants within the scope of the Ten-Year Energy Expansion Plan 2034 (PDE 2034), prepared by the Energy Research Company (EPE). To achieve this objective, bibliographic and documentary reviews of official technical reports were conducted, with emphasis on data from the National Interconnected System (SIN) and EPE projections. The study also discusses the challenges related to hydropower expansion in Brazil, such as socio-environmental constraints and the need to modernize existing power plants. The analysis shows that, even though their relative share in the Brazilian energy matrix is expected to decline, hydropower plants will continue to play a crucial role in ensuring system balance and energy security, confirming their fundamental importance for the operation of the national power system. Therefore, the sector remains the main energy generation source for the next ten-year planning horizon. The research highlights the relevance of integrated energy planning and the need for coordinated investments that consider both the sustainability and reliability of the national electricity system.

Keywords: hydropower, energy planning, PDE 2034, electricity matrix, renewable generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rendimentos nominais das turbinas Francis Horizontal Simples	23
Figura 2 – Rendimentos nominais das turbinas Kaplan com gerador a jusante	24
Figura 3 – Rendimentos nominais das turbinas Kaplan com gerador a montante	24
Figura 4 – Vazões médias mensais das PCH/CGH cadastradas a partir de 2018	25
Figura 5 – Distribuição das UHEs no Brasil	27
Figura 6 – Mapa do SINDAT	29
Figura 7 – Evolução da Capacidade instalada no SIN	30
Figura 8 – Curvas de Carga Horária nos dias de ponta por mês em 2034 (GWh/h)	37
Figura 9 – Configuração do Cenário de Referência do PDE 2034 em 2024 e 2034	38
Figura 10 – Evolução da Capacidade Instalada Existente e Contratada do SIN	39
Figura 11 – Valores de Investimento (CAPEX), em R\$/kW, por fonte de geração	40
Figura 12 – Percentual de renovabilidade da geração de energia elétrica do SIN	40
Figura 13 – Expansão Indicativa acumulada para o Cenário de Referência	42
Figura 14 – Geração Hidrelétrica total média do SIN	43
Figura 15 – Taxa de conversão da Energia Afluente Bruta em geração hidráulica	43
Figura 15 – Geração Hidrelétrica total média do SIN e Garantia Física	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de eletricidade	35
Tabela 2 – SIN e subsistemas: carga de energia	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CGH – Central Geradora Hidrelétrica

CMO – Custo Marginal de Operação

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GF – Garantia Física

MDI – Modelo de Decisão de Investimento

MME – Ministério de Minas e Energia

MMGD – Micro e Minigeração Distribuída

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PdRs – Procedimentos de Rede

PNE – Plano Nacional de Energia

SIN – Sistema Interligado Nacional

SINDAT – Sistema de Informações de Dados Técnicos de Geração

UHE – Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA	15
1.3	MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS	15
1.4	ESTRUTURA	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	CONCEITOS E MÉTODOS DE PLANEJAMENTO	17
2.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA	21
2.3	O SIN E DESPACHO DE USINAS HIDRELÉTRICAS	28
3	METODOLOGIA	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	DEMANDA DE ENERGIA	34
4.2	CENÁRIO HIDRELÉTRICO	37
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXO A – Diagrama Esquemático das Usinas Hidrelétricas do SIN	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor elétrico brasileiro sempre ocupou uma importante posição para o desenvolvimento do país, não devido apenas ao seu tamanho, mas também sua complexidade atrelada a seus desafios e seu papel desempenhado na transição energética global. A matriz elétrica brasileira, quando comparada aos outros países no cenário internacional, aparece como destaque na geração de energia limpa, sendo 80% da capacidade instalada provenientes de fontes renováveis (EPE, 2024). Esse fato, no entanto, não se deve apenas aos recursos hídricos em abundância, mas também à crescente expansão das fontes eólicas, solares e de biomassa. Essa diversificação da matriz energética, oriunda das diretrizes políticas e inovações tecnológicas, mostrou-se fundamental para manter a sua segurança elétrica, além das reduções de poluentes e dependência de combustíveis fósseis (MME, 2020).

O planejamento energético nacional da última década foi marcado pela procura de uma matriz com foco voltado à sustentabilidade, segurança em seu fornecimento e modicidade tarifária. Ao analisar documentos como o Plano Nacional de Energia (PNE 2050) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034), fica evidente a necessidade de uma matriz cada vez mais diversificada e flexível, considerando as variações de demandas dos últimos anos e fenômenos climáticos extremos (MME, 2020; EPE, 2024). Diante desse cenário, a inserção de outras fontes de energia não hidráulicas como eólica e solar, tornam o sistema mais flexível e renovável. Essa expansão permitiu maior descentralização de geração, favorecendo inclusão energética e garantia de fornecimento em regiões isoladas e afastadas dos grandes centros geradores (FERREIRA et al, 2024).

Essa transformação não é uma particularidade do setor elétrico brasileiro, mas sim uma tendência global com foco em uma transição e expansão energética limpa e sustentável através da substituição de fontes fósseis de energia. Segundo a Agência Internacional de Energia, essa expansão por fontes renováveis superou as expectativas em 2022, com investimentos no mundo inteiro superiores a U\$ 500 bilhões (IEA, 2023). Essa transição tem como objetivo reduzir a emissão de gases de efeito estufa e garantir segurança energética aos mercados internacionais instáveis.

Apesar da geração de energia por meio das usinas hidrelétricas corresponder à maior parcela da matriz elétrica, no Brasil nota-se que sua dependência vem diminuindo gradualmente. Entretanto, a geração hidrelétrica continua sendo parte essencial para a operação do sistema elétrico nacional devido a sua capacidade de regulação e armazenamento de energia, servindo como suporte complementar para fontes intermitentes. Crises climáticas, no entanto, como as que ocorreram nos anos de 2001 e 2021, mostraram os riscos existentes relacionados a não diversificação das fontes de geração de energia e dependência das fontes hídricas, devido a necessidade de ativação de fontes intermitentes, que muitas vezes não são capazes de suprir todo o sistema (EPE, 2024). A crise de 2001 foi provocada por longos períodos de estiagem, que acabaram resultando em um racionamento energético no nível nacional, culminando na criação da Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica, evidenciando a fragilidade que o sistema possuía. Já em 2021, embora medidas preventivas bem estruturadas tenham sido implantadas, como o acionamento de usinas termelétricas e aderência da bandeira tarifária de escassez hídrica, novamente o país enfrentou dificuldades relacionadas ao desabastecimento decorrentes da agravamento dos regimes de chuvas e baixa nos reservatórios de água (SOARES e COSTA, 2024). Tais eventos influenciaram diretamente nas estratégias adotadas pelo PDE que passou a aprofundar estudos associados a cenários extremos, estratégias de mitigação e métodos para proporcionar resiliência ao sistema elétrico nacional. Esses fenômenos só aceleraram o processo de transição energética, retomando debates sobre sustentabilidade e planejamento.

Em 2023, as hidrelétricas somavam 109 GW de capacidade instalada, sendo de vital importância para regulação de carga do Sistema Nacional Interligado (SIN) (EPE, 2024). O Ministério de Minas e Energia (MME) (2020) ainda reforça o grande potencial para crescimento em áreas remotas por meio de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), não apenas com o objetivo de geração em grande escala, especialmente quando atrelado a facilidade de implantação e critérios de sustentabilidade ambiental. O planejamento espacial das hidrelétricas no Brasil ultrapassou por diferentes cenários ao longo de sua história, não apenas devido a mudanças tecnológicas, mas também à evolução de políticas públicas. A partir da década de 1950, o país adotou estratégias sistemáticas como construção de grandes usinas, tornando-o como um dos países mais desenvolvidos da América

Latina para a área. Hoje, o atual obstáculo para expansão é marcado por restrições socioambientais, exigindo um novo trabalho de planejamento com avaliação dos impactos acumulados (SILVA e LIMA, 2022).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem desempenhado um importante papel para a normatização e incentivo na utilização de fontes alternativas. Uma de suas ações foi a atualização do marco regulatório da micro e minigeração distribuída (MMGD) através da Resolução Normativa nº 1.059/2023, com vistas à equidade tarifária e à sustentabilidade do sistema elétrico (ANEEL, 2023). O antigo modelo de compensação beneficiava os consumidores geradores, mas causava discussões em relação a alocação de custos referente à infraestrutura elétrica (SANTANA, MONASTÉRIO, CALDEIRA, 2023). A atuação do estado é necessária, não exclusivamente como um agente regulador, mas também indutor de políticas públicas que contribuam para a manutenção do sistema nacional, mais democrático e diversificado (MORAIS et al, 2024).

Além dos ganhos ambientais, a utilização das energias renováveis para operação do sistema energético brasileiro promove o desenvolvimento socioeconômico, com geração de empregos e fortalecimento de cadeia produtiva (ANTÔNIO e MATTA, 2024).

Apesar das políticas para incentivo e avanços tecnológicos, ainda tem-se grandes obstáculos para serem superados, como modernização das redes elétricas, implementação de sistemas armazenadores de energia e adequações quanto a regulações para as novas configurações do setor. Nesse aspecto, o planejamento energético deve analisar variáveis como descentralização, digitalização e descarbonização, promovendo resiliência ao sistema por longos períodos (FERREIRA et al, 2024).

Construir um sistema elétrico nacional mais moderno exige coordenação entre governo, iniciativas privadas e sociedade civil. Este trabalho portanto, busca trazer uma análise das políticas governamentais adotadas e planejamento estratégico dos próximos anos, utilizando os Planos Decenais de Expansão de Energia 2024-2034 e Plano Nacional de Energia 2050. Sua proposta é focar nas fontes renováveis, particularmente, a hídrica, considerando sua importância para confiabilidade e segurança da matriz elétrica.

1.2 PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA

O Plano Decenal de Expansão de Energia é o principal objeto de planejamento energético do governo federal. Criado e publicado todos os anos pela EPE em conjunto com o MME, o PDE faz previsões, considerando cenários de oferta e demanda, referente à expansão do setor energético nacional para a próxima década. O documento contém informações como projeções de geração, transmissão e consumo final, levando em conta emissões e metas de políticas energéticas para o setor. Sua primeira edição foi publicada em 2006, e desde então o plano evoluiu e passou a tratar de aspectos adicionais como meio ambiente, sustentabilidade e cenários de resiliência climática. Em sua versão mais recente, o PDE de 2034 reafirma a importância do papel das fontes renováveis, projetando que 83% da capacidade energética instalada seja proveniente de energias limpas até o final do horizonte decenal (EPE, 2024; MME, 2025).

Analisando o panorama para a geração hidrelétrica, mesmo com a diminuição na participação das grandes usinas geradoras, o PDE 2034 destaca que essas permanecerão como o principal alicerce da matriz elétrica do país, principalmente pela sua capacidade de regular a oferta energética em períodos de escassez. O plano também menciona a importância do aproveitamento dos recursos hídricos remanescentes por meio de PCHs, devido aos impactos ambientais reduzidos e maior viabilidade regional, junto com o aumento de usinas hidrelétricas reversíveis (EPE, 2024). Essa transição, da utilização de grandes usinas geradoras de energia, sendo visto como um modelo tradicional, para pequenos arranjos e distribuídos ao longo do território nacional é um reflexo das novas exigências para o cenário contemporâneo, seja devido causas sociais, ambientais ou institucionais (SILVA e LIMA, 2022).

1.3 MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

O tema deste trabalho foi escolhido devido a importância histórica da hidrogeração no país, analisando o contexto da matriz elétrica brasileira e mudanças vigentes no setor energético nacional, especialmente referindo-se a transição energética e expansão de fontes renováveis. Embora enfrentem obstáculos referentes à sua implantação, como restrições ambientais e regulatórias para novos

empreendimentos, as usinas hidrelétricas continuam ocupando uma parcela representativa na geração de eletricidade no Brasil, sendo o principal fator para a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional.

A análise do papel da hidrogeração no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034) permite a compreensão das diretrizes do planejamento energético de médio e longo prazo, levando em consideração pontos como desafios econômicos, técnicos e socioambientais, para expansão em sua utilização. Ademais, o tema permite explorar do ponto de vista acadêmico a integração de conceitos estudados durante a graduação, como sustentabilidade, operação do SIN, políticas energéticas e planejamento de oferta e demanda.

Em razão de sua característica renovável e capacidade de regularização de carga, a produção de energia através dos recursos hídricos desempenha papel estratégico também na integração de fontes intermitentes como a solar e eólica. Nesse sentido, o presente estudo tem o objetivo de investigar como essa fonte de energia foi abordada para o planejamento energético nacional para a próxima década e sua importância para uma matriz elétrica mais segura, eficiente e sustentável.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o papel das fontes renováveis no planejamento energético nacional com ênfase na hidrogeração, destacando sua importância estratégica para a segurança energética, sustentabilidade ambiental e evolução da matriz elétrica brasileira.

Além disso, o trabalho apresenta como objetivos específicos:

- Investigar a evolução histórica do planejamento energético no Brasil, com foco na hidroeletricidade.
- Apresentar os principais marcos regulatórios e planos de expansão do setor, especialmente o Plano Nacional de Energia e o Plano Decenal de Expansão de Energia.
- Avaliar a participação atual e futura da energia hidráulica, também em comparativo com as fontes renováveis, no contexto da transição energética.
- Discutir os desafios enfrentados pelo setor hidrelétrico diante de questões climáticas, ambientais e regulatórias.
- Propor reflexões sobre possíveis caminhos para uma matriz elétrica mais flexível, sustentável e diversificada.

1.4 ESTRUTURA

O trabalho é estruturado em 5 capítulos, incluindo este como capítulo introdutório, que contextualiza o tema e traz aspectos históricos quanto a geração hidrelétrica e criação de órgãos voltados para o planejamento. O capítulo 2 aborda conhecimentos e conceitos de planejamento estratégico no âmbito da energia, que foram utilizados para confecção de documentos oficiais de acesso público como o Plano de Expansão de Energia 2034 e o Plano Nacional de Energia 2050. Ainda na mesma seção, são abordados aspectos técnicos sobre a geração hidrelétrica, servindo como referencial teórico para o leitor. Tipos de usinas, eficiência de máquinas e sua classificação também são temas abordados. No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada no desenvolvimento deste estudo. Já no capítulo 4, são mostrados os resultados apresentados pelo PDE 2034, bem como suas discussões. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS E MÉTODOS DE PLANEJAMENTO

Como já citado no estudo, o planejamento energético é uma fase fundamental para o fornecimento de energia elétrica, garantindo segurança, eficiência, economia e sustentabilidade ao seu produto. Seu conceito considera cenários e projeções para demandas futuras de energia, estratégias a serem utilizadas para que os investimentos necessários sejam capazes de supri-las, levando em conta aspectos como recursos disponíveis, tecnologias, políticas públicas e regulações atuais. No Brasil, esse processo teve destaque necessário com a expansão do setor elétrico e a medida que esse se diversificou devido a crises hídricas, fortes discussões sobre sustentabilidade e cenários econômicos (MERCEDES; RICO; POZZO, 2015).

Estudos apresentados por da Silva et al. (2023) mostraram que, em uma análise feita sobre os impactos de mudanças climáticas em relação a geração de energia da Usina de Três Marias, situada em Minas Gerais, os estudos e modelos

hidrológicos, junto com dados de simulações climáticas, resultaram na sensibilidade para confiabilidade de produção de energia devido a disponibilidade hídrica. Esse detalhe reforça a utilização de abordagens mais precisas, incluindo riscos e estratégias de adaptação.

A partir da década de 1960, com a criação da Eletrobras, o planejamento do setor energético começou a ganhar forma, só que dessa vez institucionalmente, adotando um modelo mais centralizado. Entretanto, por volta dos anos 1990, ocorreram reformas que culminaram em sua descentralização, considerando dessa vez um modelo de planejamento indicativo que viesse a ser coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e aplicado pela Empresa de Pesquisa Energética (MERCEDES; RICO; POZZO, 2015). O Plano Decenal de Expansão de Energia surge como uma dessas ferramentas fundamentais para o planejamento, prevendo cenários em um horizonte de uma década para investimentos e demandas, diferente do Plano Nacional de Energia, englobando estudos para medições a longos períodos de tempo, considerando o prazo de 30 anos.

Um dos pilares centrais do planejamento moderno para a área energética é o uso de modelos de otimização, especialmente para o contexto de geração hidrelétrica. Alguns conceitos como análises de cenários determinísticos e estocásticos, programação linear e não linear, além de métodos multicritério surgem como ferramentas para a estruturação estratégica para o setor e auxiliam na tomada de decisões. Esses modelos permitem englobar parâmetros diversos como técnicos, econômicos e ambientais na formulação de políticas operacionais e de expansão (MERCEDES; RICO; POZZO, 2015). O avanço dos mesmos no Brasil tem apresentado resultados e influências diretas na operação do sistema interligado nacional, principalmente para as usinas hidrelétricas, cujo funcionamento é beneficiado pela capacidade de armazenamento e regulação das vazões de água.

A exemplo desses conceitos, a aplicação de Programação Dinâmica Estocástica (SDP/SDDP) para a operação de usinas hidrelétricas minimizam custos de operação junto com otimizações em relação ao aproveitamento de recursos hídricos, fazendo com que vertimentos desnecessários sejam evitados (LOCATELLI, 2016). Para Matos (2023), a inclusão de cenários de extrema escassez hídrica em simulações de planejamento energético, são importantes para evidenciar a fragilidade do setor hídrico em meios a períodos de pouca estiagem.

A Programação Dinâmica Dual Estocástica (*Stochastic Dual Dynamic Programming* – SDDP) é um modelo de otimização tipicamente utilizado para o setor elétrico, especialmente para operação de usinas hidrelétricas, para resolução de problemas sequenciais sob incertezas. No contexto de planejamento elétrico brasileiro, seu uso ocorre com grande frequência pela sua facilidade de tratar grandes problemas, modelando cenários e estágios com o objetivo de minimização de custos planejados (GANDELMAN, 2015). Além disso, ela é capaz de calcular políticas operacionais e realizar uma avaliação de alternativas para expansão analisando cenários de riscos hidrológicos e econômicos (LOCATELLI, 2016; EPE, 2024).

As análises de cenários críticos e implementação de técnicas para otimização mencionadas por Mercedes, Rico e Pozzo (2015) se materializam nas diretrizes do Plano Decenal de Expansão Energética (PDE 2034). Metodologias avançadas, como a Programação Dinâmica Estocástica (SDDP) e a programação linear intertemporal já citadas, estão incorporadas ao PDE, sendo fundamentais para ótimos portfólios de investimentos, combinando menor custo, segurança de abastecimento e minimização de impactos ambientais (GANDELMAN, 2015). As análises multicritério e métodos de otimização discutidos por Locatelli (2016) também inspiraram o PNE para a adoção de políticas operacionais englobando incertezas como custo, risco e confiabilidade do sistema hídrico.

Aplicar modelos computacionais ao planejamento elétrico, a exemplo de DESELP, modelado em programação linear para análises a longo prazo, também chamado de programação linear intertemporal, e OPTGEN, focado na otimização de várias iterações com o foco em expansão são cruciais para o sucesso do mesmo (PINHEIRO e TRINKENREICH, 2021). Ambos modelos têm sido amplamente utilizados pela EPE considerando distintos horizontes de planejamento. Gandelman (2015) também desenvolve seu modelo baseado em uma metodologia robusta formulada em incertezas, unindo cenários aleatórios com tomadas de decisões sob risco, fortalecendo a base de dados dos PDEs e do PNE.

Atualmente, o modelo metodológico mais utilizado no processo de planejamento da expansão da matriz elétrica brasileira é o Modelo de Decisão de Investimento (MDI), adotado pela EPE a partir do Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 (EPE, 2024). O MDI foi desenvolvido a partir da Programação Dinâmica Estocástica (SDDP), trabalhando múltiplos cenários hidroclimáticos

simulando condições para operação e padrões de afluência ao longo do programa decenal. Cada situação é analisada conforme a sua probabilidade de ocorrência, trazendo resultados que consistem em um conjunto de escolhas referente aos investimentos na área voltadas a diminuir os custos programados ao longo desse período (GANDELMAN, 2015).

Duas etapas englobam o MDI:

- Seleção de investimentos: escolhas que apresentam os empreendimentos que deverão ser adotados e seu momento ideal, considerando viabilidade econômica, capacidade técnica e restrições ambientais;
- Simulação da operação do sistema: modelos contínuos que otimizam o despacho hidrelétrico, determinando custos operacionais associados, levando em conta a intermitência de fontes renováveis e os limites dos reservatórios.

Ainda são considerados pelo MDI parâmetros como patamares de carga, tetos de expansão para cada mercado estudado e políticas de intercâmbio através de soluções encontradas com o auxílio de solvers de Programação Inteira Mista, capazes de processar milhares de simulações em ciclos iterativos (PINHEIRO e TRINKENREICH, 2021).

A utilização desses modelos estocásticos são capazes de fornecer uma visualização mais realista do panorama atual do sistema elétrico brasileiro, ainda mais quando se é levado em conta fatores como variações climáticas e à complexidade da operação hidrotérmica em cascata (GANDELMAN, 2015). O autor ainda traz a ideia de que para grandes decisões são necessárias incertezas e interações espaciais e temporais, otimizando o modelo diante da imprevisibilidade dos recursos hídricos. Dessa forma, o MDI configura-se como uma metodologia avançada capaz de auxiliar em escolhas para o setor elétrico, tornando seu planejamento mais eficiente e alinhado com as diretrizes do Plano Nacional de Energia (PNE 2050) e no PDE 2034 (MME, 2020; EPE, 2024).

Por fim, a utilização dessas ferramentas traz uma abordagem cada vez mais integrada e resiliente, tendo a capacidade de analisar eventos climáticos, oscilações no mercado econômico e introdução de fontes renováveis intermitentes. A evolução institucional nesse setor estratégico é refletida pelos estudos realizados e

modelagem utilizadas, alinhando tanto desenvolvimento em infraestrutura quanto objetivos para descarbonização.

2.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Usinas hidrelétricas sempre apresentaram altos padrões de eficiência em seu funcionamento, sendo eles muitas vezes superiores a 90%, convertendo a energia potencial proveniente dos recursos hídricos em energia elétrica segura e controlada. Elas são compostas por conjuntos sofisticados de equipamentos, como turbinas dos tipos Francis, Kaplan e Pelton, máquinas girantes geradoras, linhas de transmissão, transformadores, sistemas de barramento e controle para reservatórios de água, e sistemas de supervisão e controles automatizados (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*), fazendo dessa forma possam ser ligadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) (DA SILVA et al., 2023; DA SILVA et al., 2022). Toda essa organização permite sua operação, garantindo geração de energia confiável e desempenhando papel extremamente importante para regulação de carga e servir como suporte para fontes intermitentes, como eólica e solar, trazendo confiabilidade ao sistema elétrico brasileiro.

São caracterizadas tecnicamente por transformar a energia potencial gravitacional da água em energia elétrica, sendo convertidas por meio do conjunto turbina-gerador. As principais vantagens em sua utilização são a alta eficiência apresentada, como já discutida anteriormente, longos períodos de operação em sua vida útil e ser capaz de regular cargas, funcionando como uma bateria para a matriz elétrica. Essa capacidade de regulação surge como uma solução para o funcionamento e estabilidade do SIN (DA SILVA et al., 2023). Projetos de hidrelétricas possuem grandes estruturas e precisam de estudos complexos de engenharia civil, mecânica, hidráulica, elétrica e ambiental.

Ainda no campo da eficiência energética, B. C. da Silva et al. (2022) ressalta a importância de tecnologias como forma de otimizar a operação e potência fornecida de usinas hidrelétricas já existentes. Segundo o autor, a implementação de melhorias e sistemas auxiliares mais modernos como uso de ventiladores, bombas e sistema de resfriamento de geradores podem acarretar em ganhos perceptíveis em eficiência energética, com possibilidade de economia em determinadas instalações de até 2.910 MWh/ano, energia capaz de alimentar milhares de residências durante

um mês, além de trazer benefícios como vida útil prolongada e redução de custos de operação.

Outras aplicações como controle automático de geração, sistemas SCADA, utilização de inteligências artificiais para prevenção de falhas estão entre inovações tecnológicas com grande potencial de modernização e expansão do setor hidrelétrico brasileiro.

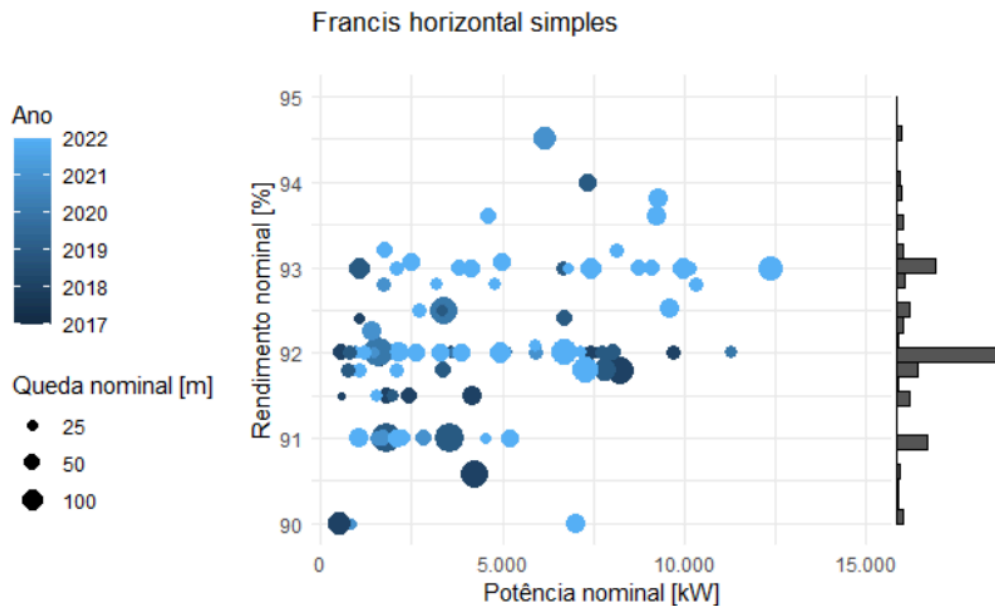
A repotencialização de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) surge como uma alternativa facilitada para aumentar a oferta por demanda sem apresentar grandes impactos socioambientais às usinas. Muitas dessas PCHs que foram construídas entres as décadas de 1960 e 1980 contam com máquinas obsoletas, podendo ter sua capacidade de operação aumentada em até 50% com a realização de serviços de otimização em turbinas e melhorias estruturais (ANTÔNIO e MATTA, 2022). Essa repotencialização contribuiria para o aumento de eficiência global do Sistema Interligado Nacional, incentivando o desenvolvimento regional com baixos impactos ambientais.

Brandão et al. (2024) realizaram uma investigação sobre a utilização de hidrelétricas para servir como suporte e favorecer a incorporação de fontes intermitentes no Brasil. O estudo demonstrou que as usinas hidrelétricas, quando operadas de forma eficiente, possuem a capacidade de servir como regulação de carga e absorver os picos de produção de energia, proveniente das usinas solares e eólicas, não suportadas devido a intermitência de suas fontes. Isso reafirma o papel das hídricas quando analisado nos documentos oficiais de planejamento, como o PDE 2034.

A eficiência desse tipo de equipamentos utilizados para geração de energia a partir de hidrelétricas, especialmente para PCHs e CGHs, é um detalhe técnico que deve ser considerado para garantir o melhor aproveitamento dos potenciais hídricos e operação do empreendimento. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), turbinas do tipo Francis e Kaplan, utilizadas com frequência nessas usinas, possuem eficiência superior a 90%, considerando faixas otimizadas de operação. Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentados os rendimentos nominais das turbinas mais utilizadas nos projetos de CGHs e PCHs cadastrados a partir de 2017, sendo possível observar valores entre 90% e 94% (EPE, 2023). Essa alta eficiência demonstrada explica a procura pela implantação desse tipo de empreendimento de

pequeno porte, onde o maior aproveitamento dos recursos é peça chave para a viabilidade comercial e técnica do projeto.

Figura 1 – Rendimentos nominais das turbinas Francis Horizontal Simples



Fonte: EPE (2023)

Conforme pode ser verificado na Figura 1, para os rendimentos das turbinas Francis horizontais simples, há uma frequência de valores iguais a 92%, mas com projetos mais recentes considerando o valor de 93%. Esses dados representam PCHs e CGHs cadastradas entre os anos de 2017 e 2022. Já para turbinas Kaplan, apresentadas nas figuras 2 e 3, há frequência de valores entre 92% e 93%, não ocorrendo tanta variação conforme o ano em que o projeto foi cadastrado.

Figura 2 – Rendimentos nominais das turbinas Kaplan com gerador a jusante

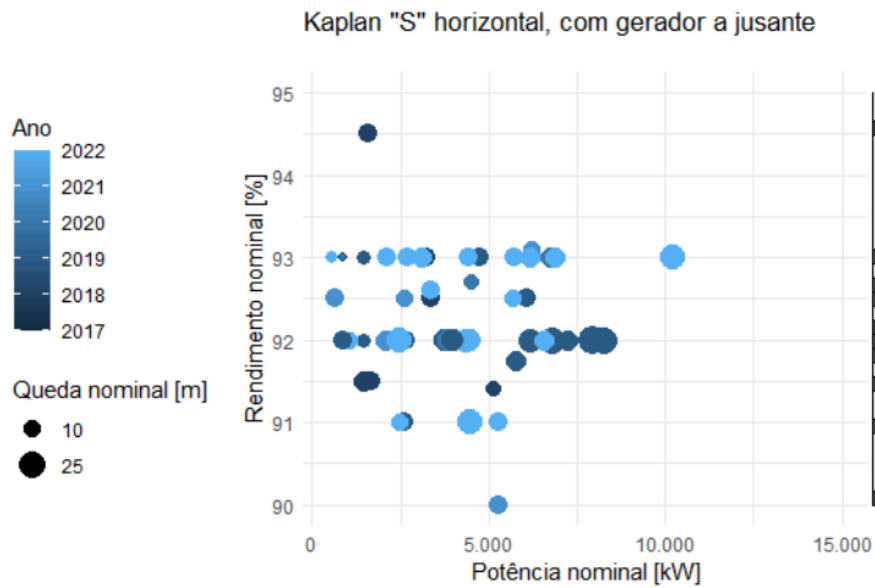
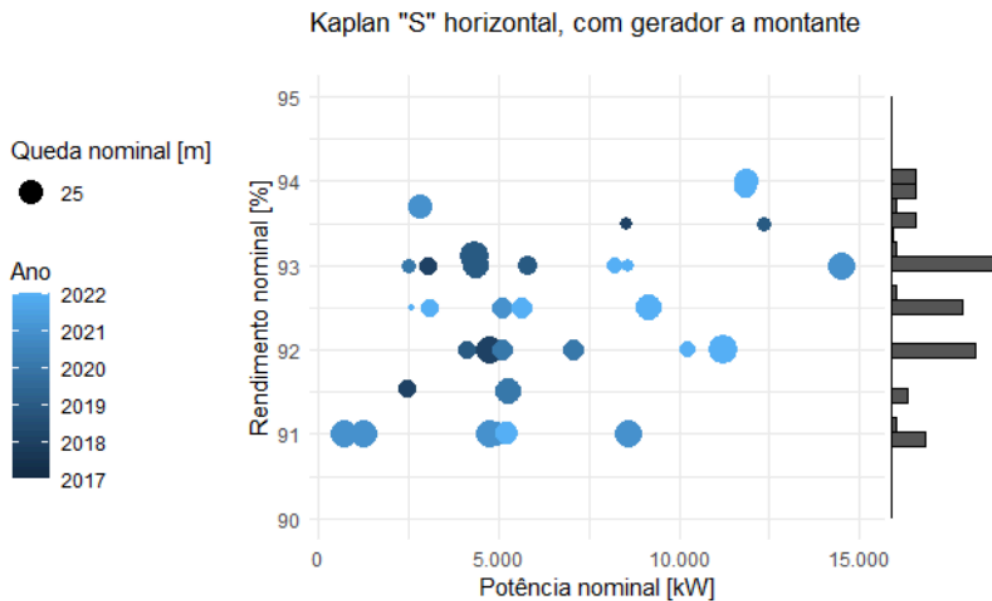


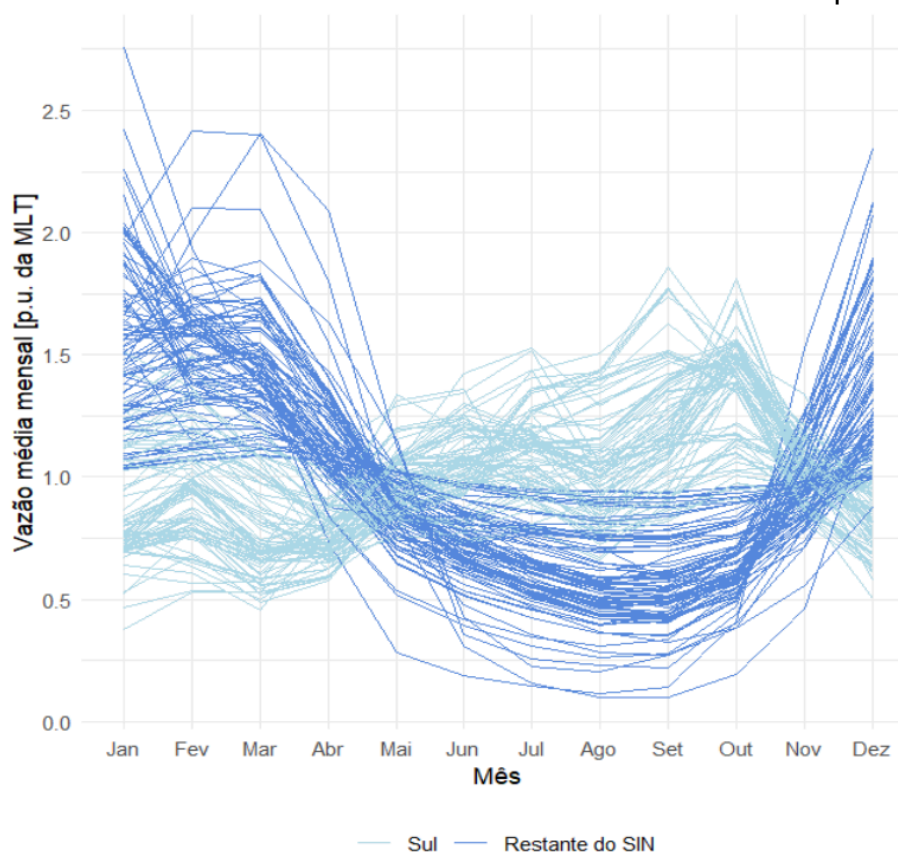
Figura 3 – Rendimentos nominais das turbinas Kaplan com gerador a montante



Por outro lado, a sazonalidade das vazões médias mensais dessas usinas também merecem destaque para a análise pois as mesmas impactam diretamente a performance de suas operações. PCHs e CGHs possuem padrões de geração influenciados diretamente com a variação climática local, principalmente em empreendimentos localizados nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, regiões onde as vazões dos rios possuem um aumento significativo nos meses de verão (dezembro a março), caracterizados por períodos com alta frequência de chuvas. Já nos meses

de inverno (junho a setembro) a mesma diminui devido aos períodos de seca (EPE, 2023). Esse demonstrativo e dados de vazões são possíveis de observar através da Figura 4, onde estão ilustradas as vazões médias mensais das PCHs e CGHs cadastradas a partir de 2018. O contrário ocorre para a região Sul, caracterizada pelos períodos chuvosos nos meses de inverno. Portanto, estratégias operacionais devem ser adotadas devido ao impacto que essas variações refletem no planejamento de geração de energia elétrica e compensar os eventos climáticos sazonais.

Figura 4 – Vazões médias mensais das PCH/CGH cadastradas a partir de 2018



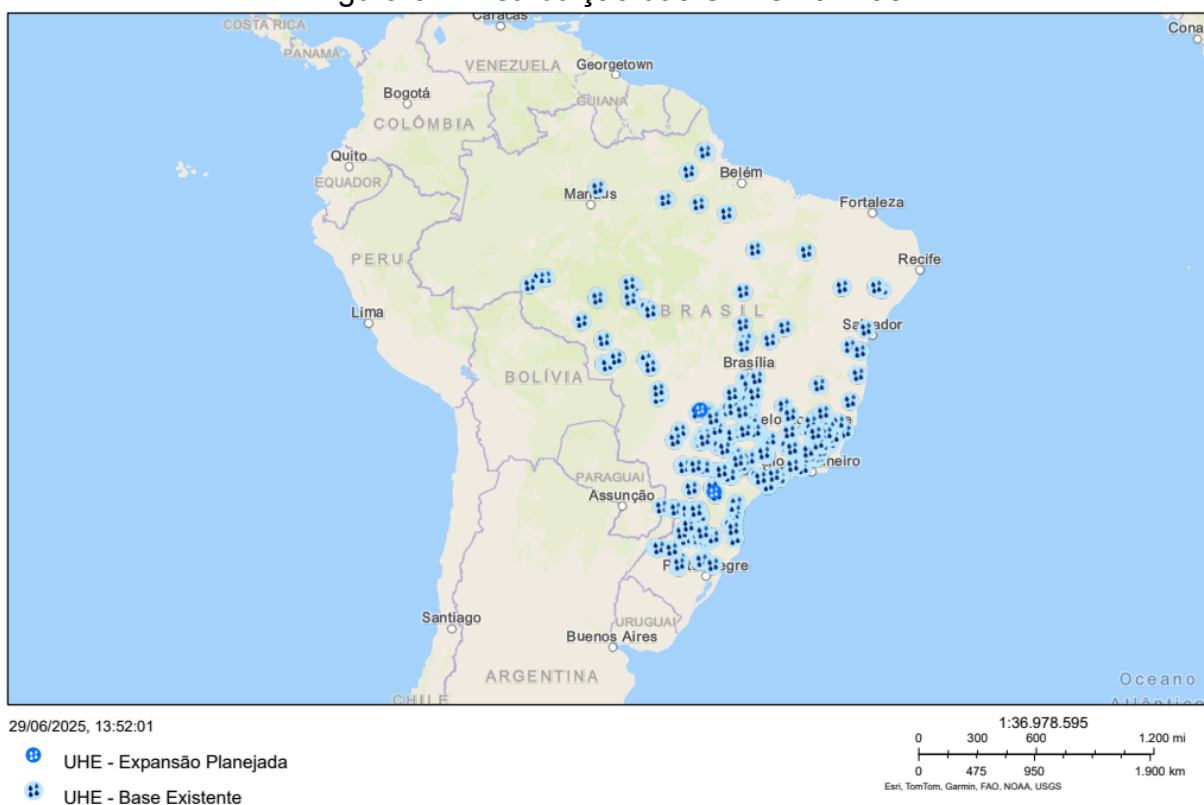
Fonte: EPE (2023)

Por meio da análise de dados estatísticos das vazões médias mensais ao longo do ano, nota-se que em grande parte dos empreendimentos hidrelétricos de pequeno porte, o fator de capacidade pode vir a apresentar uma variação superior a 30% entre os meses de maior afluência e os menores (EPE, 2023). Portanto, é tácito que os estudos hidrológicos antes da implantação e dimensionamento de usinas são indispensáveis para sua aplicação, considerando também políticas operacionais que procuram maximizar a geração de energia sem esgotar os recursos naturais

disponíveis durante o ano. Entender o cenário sazonal para as hídricas deve ser igualmente discutido no aspecto de planejamento energético nacional, pois reflete na forma como PCHs e CGHs serão apresentadas em leilões de energia e para a formulação do portfólio de geração regionalizada.

No Brasil, usinas hidrelétricas são classificadas pela sua potência instalada para geração e por suas características de infraestrutura. As UHEs (Usinas Hidrelétricas) são empreendimentos de grande porte, com capacidades maiores que 30 MW. Os projetos de UHEs contam com grandes reservatórios capazes de regularização de vazões devido a sua capacidade. Até 2018, o Brasil possuía 218 UHEs, responsáveis por 60,5% da capacidade total instalada para geração de energia, equivalente a 95.619.468 kW (DIAS et al., 2018). Na Figura 5, observa-se a distribuição dessas no território nacional, apresentando grande concentração na bacia do Paraná. Nota-se na imagem a presença de duas UHEs planejadas para os próximos anos, sendo essas a UHE Estrela e a UHE Telêmaco Borba. A maior UHE do país é a Hidrelétrica de Itaipu, com 14.000 MW de potência instalada, sendo a segunda maior do mundo. Logo após vem usina de Belo Monte com potência instalada de 11.233 MW, sendo a terceira maior do mundo, localizada na bacia amazônica (DIAS et al., 2018). Essas representam a espinha dorsal do sistema elétrico brasileiro, pois são capazes de fornecer grande parte da energia firme do país ligando-se ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Contudo, sua implantação encontra diversos obstáculos que devem ser analisados ao planejar esse tipo de empreendimento. Entre eles estão o impacto socioambiental, principalmente pelas grandes áreas alagadas pelos reservatórios, além de rigorosos licenciamentos ambientais (MACHADO et al., 2022).

Figura 5 – Distribuição das UHEs no Brasil



Fonte: EPE (2025)

Essas usinas utilizam do conceito chamado garantia física para sua comercialização de energia. A garantia física (GF) de uma usina se refere à quantidade máxima que uma usina hidrelétrica consegue assegurar para a rede de forma contínua e confiável, independente das condições hidrológicas apresentadas, medida em megawatt médio (MW med), sendo seu valor determinado conforme estudos hidrológicos a longo prazo (ANEEL, 2020). São utilizadas para planejamento e expansão da matriz elétrica e em leilões de contratação. A GF é a base para a venda de energia no mercado regulado ou livre. Usinas só podem vender contratos de energia até o limite de sua GF.

As PCHs (Pequenas Centrais Hidrelétricas) são caracterizadas por possuírem potências instaladas entre 5 MW e 30 MW em uma área restrita a 13 km² para seu reservatório, conforme estabelecido pela ANEEL. Seu tipo de implantação possui algumas vantagens, como a procura devido a possibilidade de construção em locais de difícil acesso ao SIN, permitindo a oferta de energia em regiões remotas. Todavia, desafios regulatórios e econômicos para viabilidade do projeto são desafios

encarados, assim como exigências ambientais e logística dificultadas (MACHADO et al., 2022).

Por fim, CGHs (Centrais Geradoras Hidrelétricas) são caracterizadas por serem empreendimentos de menor porte dentre as conceituadas anteriormente. Essas possuem potência inferior a 5 MW e infraestrutura simplificada. Sua operação muitas vezes se dá sem a presença de reservatórios significativos, apenas utilizando a vazão natural dos rios. Em razão de serem usinas de menor escala e complexidade, apresentam custos de implantação reduzidos, com maiores facilidades para licenciamento e impactos ambientais reduzidos. São relevantes para o cenário da geração distribuída e diversificação local da matriz elétrica. Todavia, acabam ficando sujeitas a variações sazonais de vazão, prejudicando sua operação contínua, diminuindo seu papel de atuação para a manutenção da segurança energética em escala nacional (ANTÔNIO; MATTA, 2022).

A combinação desses tipos de empreendimentos permite ao Brasil conciliar a segurança em fornecimento de energia com a expansão da capacidade instalada seguindo métodos sustentáveis.

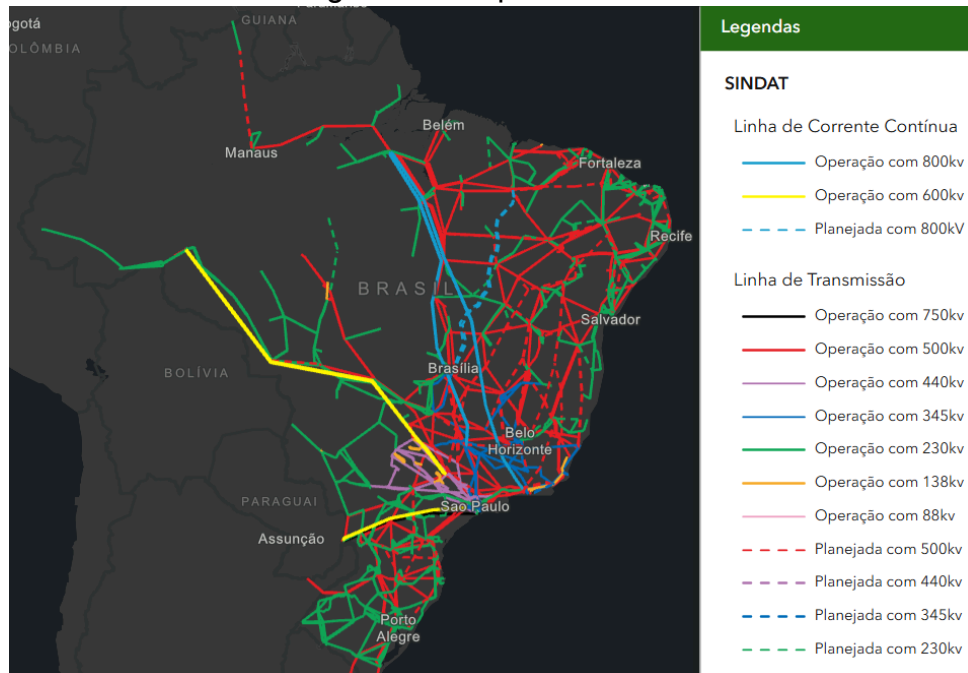
2.3 O SIN E DESPACHO DE USINAS HIDRELÉTRICAS

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é a entidade responsável pelo controle e operação da geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), a partir das diretrizes instituídas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Ele foi formado a partir da Lei nº 9.648/1998, o ONS é uma pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, que atua em todo o território nacional, sendo financiado por empresas voltadas para o cenário. Seu principal objetivo é garantir a energia elétrica contínua, de qualidade do fornecimento de energia elétrica, buscando otimizações em seus custos de operação, através da integração de recursos energéticos disponíveis e infraestrutura disponível, da forma mais eficiente possível (ONS, 2025).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é formado por todos os componentes e instalações do sistema elétrico voltados para geração e transmissão de energia elétrica, operando de forma coordenada e simultânea em território nacional, englobando quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Norte e Nordeste. Na Figura 6 é possível observar sua composição e configuração de suas linhas de

transmissão ao longo dessas 4 regiões, sendo aproximadamente 98% de toda carga total do país ligada ao SIN. Esse arranjo permite, de forma eficiente, a transmissão de energia entre as localidades, o que traz credibilidade, confiança e segurança para sua operação e fornecimento, especialmente quando levados em conta cenários de variações climáticas que influenciam nas fontes hídricas (ONS, 2025).

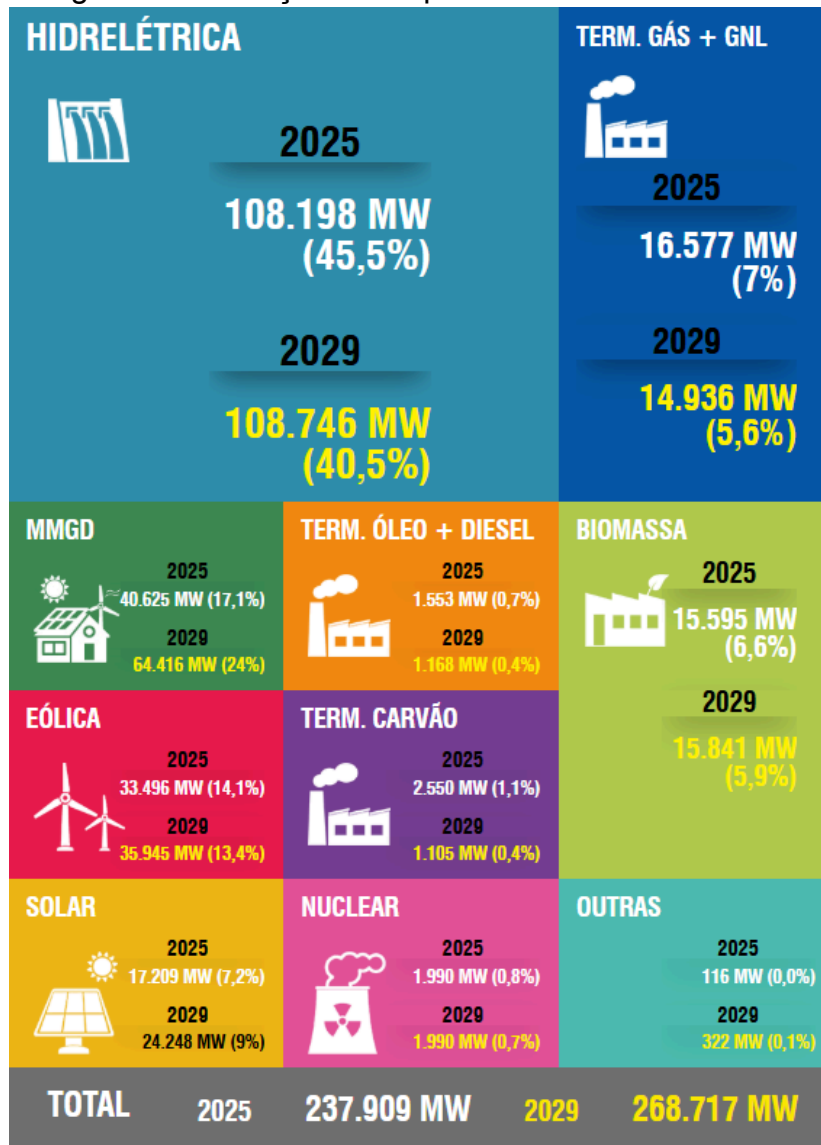
Figura 6 – Mapa do SINDAT



Fonte: ONS (2025)

Atualmente, segundo à ONS (2025), a capacidade instalada no SIN ao longo de todo território nacional é de 237.909 MW, desconsiderando os Sistemas Isolados da rede. Na Figura 7 é ilustrada como estão divididas as fontes de fornecimento de energia para o sistema. Nela, nota-se a importância do papel desempenhado pelas hidrelétricas, sendo responsável pela capacidade de 108.198 MW, correspondendo a 45,5%, a maior parcela dentre as outras fontes demonstradas. A figura também traz uma previsão de evolução para o SIN até 2029, alcançando uma capacidade instalada de 268.717 MW. Para as hídricas, sua potência aumentaria para 108.746 MW, porém seu percentual em relação a toda a matriz diminuiria para 40,5% (ONS, 2025). Isso se deve, como já citado ao longo deste estudo, a procura de diversificação da matriz elétrica brasileira, diminuindo a dependência das fontes hídricas, fazendo com que em épocas de secas, o SIN sofra menos com sua ausência.

Figura 7 – Evolução da Capacidade instalada no SIN



Fonte: ONS (2025)

O ONS, através do SIN, é responsável pelo despacho de usinas hidrelétricas. O despacho é o processo de seleção de quais usinas devem ser ativadas para geração de energia, em qual quantidade e o momento em que essa produção deve ocorrer, para suprir a demanda exigida pela rede do SIN com a menor utilização de recursos possíveis (custos). Para usinas hidrelétricas, representante da maior parcela da capacidade instalada no SIN, o despacho é feito através de uma análise de variáveis como recursos hídricos disponíveis dos reservatórios, custos marginais de operação (CMO), riscos hidrológicos e aproveitamento de afluência (MACHADO, 2023). O CMO sinaliza economicamente qual fonte de energia deve ser acionada, minimizando os custos operacionais através de modelos computacionais. Ele

representa o custo incremental para atender mais 1 megawatt-hora (MWh) de demanda no sistema elétrico considerando todas as restrições operativas (como geração, transmissão e armazenamento de energia).

O planejamento dessa operação é feito semanalmente é realizado em tempo real, sendo considerados diversos cenários para funcionamento conforme oferta e demanda do momento. A utilização de energia armazenada é equilibrada com o despacho de outras fontes para geração, como térmicas e renováveis intermitentes. O instrumento regulatório que coordena esse planejamento são os Procedimentos de Rede (PdRs), implementados pela ONS (ONS, 2025). Os documentos referidos são periodicamente revisados conforme as condições do setor elétrico e as diretrizes da ANEEL (ONS, 2025).

O despacho centralizado da fonte hídrica é feito somente utilizando usinas com grandes capacidades instaladas, com foco em UHEs, e que sejam ligadas ao SIN. Os outros tipos de hidrelétricas, PCHs e CGHs, em raras exceções, operam de forma independente, sem serem despachadas, a menos que participem voluntariamente do mercado de energia ou de projetos relacionados à regulação e apoio a rede (AITA; DETZEL; BESSA, 2022). Essas usinas devem obedecer certos padrões de operação e controle definidos pelo ONS, incluindo a implantação do sistema de supervisão SCADA. As instruções para o despacho são comunicadas aos centros de operações das usinas geradoras, sendo exigida a resposta imediata, dentro dos limites do empreendimento e respeitando os recursos hídricos fornecidos.

Ademais, o procedimento de despacho também baseiam-se nos modelos computacionais, a exemplo do NEWAVE e o DECOM, aplicados para simulações de operações hidrotérmicas e redução de custos, aproveitando os recursos naturais disponíveis da forma mais eficiente possível (MACHADO, 2023). O NEWAVE utiliza de Programação Dinâmica Estocástica (SDP) para realizar o planejamento e operação energética em horizonte de médio prazo, determinando políticas de otimização para utilização dos reservatórios, analisando cenários incertos de afluências. Já os modelos DECOM, e também DESSEM, realizam análises a curto prazo para definir o ótimo despacho e garantir a sua eficiência, através de programação linear e não linear, com minimização de custos.

Dessa forma, a participação das fontes hídricas para produção de energia traz grande impacto ao mercado na formação do preço em que a mesma será negociada a curto prazo, modelando o comportamento de comercializadores,

distribuidores e consumidores livres. Portanto, análises profundas são requeridas para garantir a eficiência desse processo crucial para a sustentabilidade econômica e ambiental do setor elétrico brasileiro.

Como exemplo de usinas despachadas temos a UHE Itaipu, que possui potência instalada para 14 GW através do 20 conjuntos turbina-gerador Francis com 700 MW cada, sendo binacional. Além dela, outras como UHE Tucuruí, com potência de 8.370 MW, e UHE Sobradinho, com 1.050 MW, são usinas despachadas, destacando-se devido a seus extensos reservatórios e localização estratégica.

No Anexo A, presente ao final deste estudo, encontra-se o diagrama esquemático das usinas hidrelétricas pertencentes ao SIN. Neste anexo, estão presentes as UHEs participantes do sistema de despacho pela ONS na otimização da operação eletroenergética do Sistema Interligado Nacional.

3 METODOLOGIA

O presente estudo é caracterizado como qualitativo, exploratório e descritivo, cujo objetivo principal é compreender a evolução e papel atual da geração de energia a partir de hidrelétricas no horizonte do planejamento estratégico brasileiro. A análise qualitativa possibilitou uma abordagem interpretativa de documentos técnicos, não apenas levando em conta dados quantitativos, mas também marcos regulatórios, planos estratégicos e medida institucionais que impactam nas decisões que irão guiar a expansão do setor elétrico.

A abordagem exploratória ainda foi utilizada para investigação e aperfeiçoamento dos conhecimentos relativos aos planos decenais de expansão energética, juntamente com a aplicação de modelos que formularam todo o planejamento estratégico da matriz elétrica brasileira para os próximos anos. Conceitos quanto à participação de empreendimentos hidrelétricos também foram alvo desta análise, quanto ao seu comparativo de outras fontes geradoras, como solar, eólica e térmica.

Quanto a metodologia descritiva, a mesma possibilitou a descrição detalhada de abordagens técnicas e perspectivas de operação e despacho de usinas hidrelétricas.

O trabalho foi realizado através da análise de documentos oficiais, com foco em relatórios realizados por órgãos reguladores e planejadores do sistema elétrico. Dentre os mencionados pode-se destacar os seguintes materiais:

- Planos Decenais de Expansão de Energia elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (PDE 2034);
- Relatórios, mapas, dados operacionais e metodológicos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS);
- Documentos normativos, resoluções e bases estatísticas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Ademais, a pesquisa realizou o comparativo através da coleta de dados de capacidade instalada, geração efetiva e participação percentual entre cada uma das fontes geradoras, sendo elas: hídrica, eólica, solar e térmica, baseadas em informações atualizadas de arquivos públicos de EPE, ONS e ANEEL. A análise ao longo do horizonte analisado permitiu identificar padrões de tendências de diversificação da matriz elétrica e a relação notável entre impactos de variáveis climáticas e políticas públicas em relação à oferta de energia.

A análise de todos esses materiais obedeceu uma abordagem, com foco temático em:

- Características técnicas e operacionais das usinas hidrelétricas (UHEs, PCHs e CGHs);
- Metodologias de planejamento aplicadas aos PDEs, incluindo modelos computacionais como NEWAVE, DECOMP e DESSEM;
- Papel das usinas hidrelétricas como fontes despacháveis e sua integração ao Sistema Interligado Nacional (SIN);
- Indicadores de eficiência, capacidade de regulação, sazonalidade hídrica e sustentabilidade;
- Evolução da participação hidrelétrica em relação às fontes renováveis variáveis (solar e eólica) e térmicas.

Os dados foram organizados em tabelas e gráficos comparativos com o objetivo de oferecer uma visão clara sobre a transformação da matriz elétrica brasileira e o espaço que a geração hidrelétrica ainda ocupa, tanto em termos quantitativos quanto estratégicos.

Os materiais analisados e seus dados foram estruturados em tabelas e gráficos comparativos com intuito de visualizar a transformação com que a matriz

elétrica brasileira está passando e seu papel programado para hidrogenação, não só quantitativo mas também quanto aos planos estratégicos reservados a mesma.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DEMANDA DE ENERGIA

Segundo o PDE 2034, a demanda energética no Brasil apresenta uma tendência de crescimento motivada, mesmo que ainda sem tanta intensidade, a fatores como retomada da economia, modernização tecnológica, eletrificação de vários setores e incentivo à eficiência energética motivadas por políticas públicas para uma matriz energética mais limpa.

Ainda conforme o Plano Decenal brasileiro, sua projeção mostra que o consumo final de energia equivalente a milhões toneladas de petróleo (Mtep) no Brasil aumentara de 288 Mtep em 2024 para 353 Mtep em 2034, apresentando um crescimento equivalente acumulado de 22,5% durante esse período, com uma taxa média anual de 2,1% (EPE, 2024).

Em uma análise feita com setores de gastos em energia, o setor industrial irá permanecer como um dos vetores principais em relação ao consumo, passando dos 88 Mtep em 2024 para 111 Mtep em 2034, com um aumento apresentado de 26,1%, com índice anual de crescimento de 2,7% (EPE, 2024).

A energia elétrica ganha seu destaque como a forma de energia que possui maior índices de crescimento no horizonte do período analisado para o Plano Decenal de Expansão de Energia 2034. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2024), prevê-se que o consumo total de energia no Brasil, incluindo consumo da rede, micro e minigeração distribuída e autoprodução, aumente de 626 TWh em 2024 para 870 TWh em 2034, apresentando uma taxa média anual de 3,4% de crescimento no período. Dados como esse e outras informações são possíveis de serem observados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo de eletricidade

Indicadores	2024	2029	2034	2024-2029	2029-2034	2024-2034
				Crescimento médio (% a.a.)		
População (milhões de habitantes)	218	224	229	0,5%	0,5%	0,5%
Consumo Total (TWh)	626	746	870	3,6%	3,1%	3,4%
Autoprodução não injetada ¹ (TWh)	73	90	92	4,3%	0,4%	2,4%
Consumo Total per capita (kWh/hab/ano)	2.867	3.326	3.805	3,1%	2,6%	2,8%
Consumo por Consumidor Residencial (kWh/mês)	172	188	206	1,8%	1,9%	1,8%
Número de Consumidores Residenciais (Milhão, base 31/dez)	81,5	86,9	91,2	1,3%	1,0%	1,1%
Percentual de Perdas Totais no SIN	19,1%	18,9%	17,9%	-	-	-
Intensidade Elétrica da Economia (MWh/10 ⁹ R\$ [2010])	0,149	0,156	0,157	-	-	-
Elasticidade-renda do consumo de eletricidade	-	-	-	1,38	1,04	1,20

Fonte: EPE (2024)

Esses números são superiores ao crescimento econômico médio para o Brasil (2,8% ao ano), resultando em uma elasticidade-renda da eletricidade de 1,20. Isso confirma a expansão no setor de eletrificação de setores comerciais, industriais e residenciais (EPE, 2024).

Quanto a carga conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), conforme é possível observar na Tabela 2, é projetado um aumento de sua demanda de 77.242 MW médio em 2024 para 107.053 MW médio em 2034, apresentando um crescimento esperado de 3,3% ao ano. Tais resultados dependerão de grandes investimentos em geração, transmissão e recursos para suprir a demanda esperada (EPE, 2024).

Tabela 2 – SIN e subsistemas: carga de energia

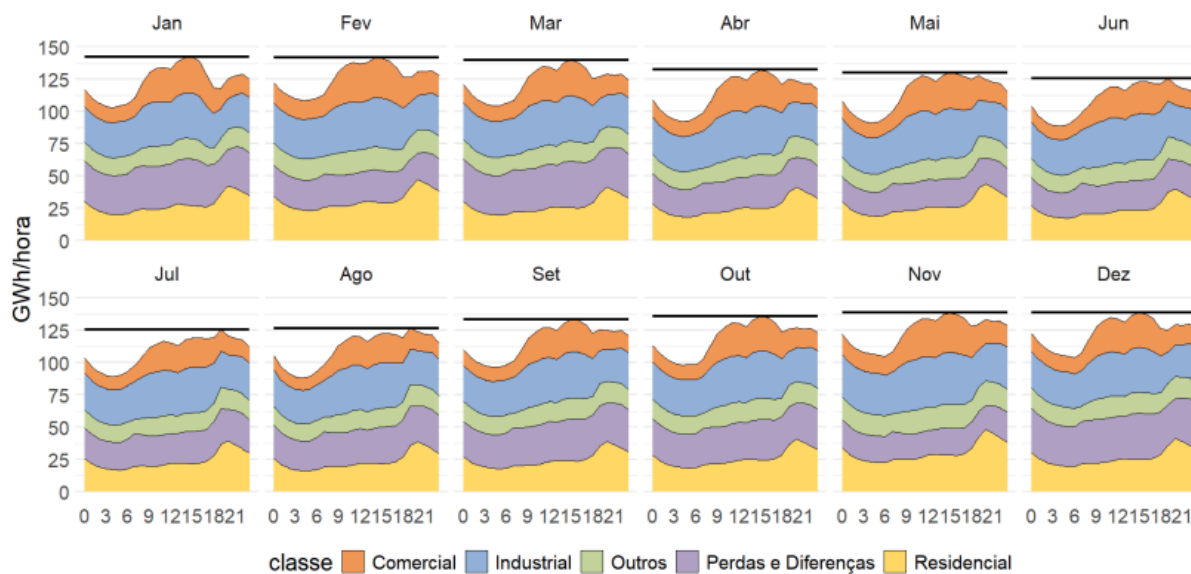
Ano	Subsistema				SIN
	Norte	Nordeste	Sudeste/CO	Sul	
MWmédio					
2024	7.539	12.715	43.604	13.384	77.242
2029	9.093	15.593	50.821	15.816	91.323
2034	10.533	18.606	59.150	18.763	107.053
Período	Variação (% a.a.)				
2024-2029	3,8%	4,2%	3,1%	3,4%	3,4%
2029-2034	3,0%	3,6%	3,1%	3,5%	3,2%
2024-2034	3,4%	3,9%	3,1%	3,4%	3,3%

Fonte: EPE (2024)

Na Figura 8 é possível observar as curvas de cargas horárias previstas para o ano de 2034 (GWh/h) em dias de ponta. Nela ganha-se destaque o setor residencial por seu maior índice de crescimento proporcional, resultado do processo de urbanização e aumento da renda média. Prevê-se que a popularização de sistemas fotovoltaicos acabará diminuindo a carga necessária em horários com alto potencial para geração, porém, também devido a intensificação pela procura de sistemas de refrigeração/climatização, nos meses de verão provoca demanda muito alta um pouco antes da ocorrência da máxima à noite (EPE, 2024).

A indústria, mesmo apresentando crescimento moderado, continua sendo o maior consumidor de energia elétrica quando analisado em valores absolutos. Com a digitalização e expansão do setor terciário, o comércio também ganha ênfase com índices superiores à taxa nacional (EPE, 2024).

Figura 8 – Curvas de Carga Horária nos dias de ponta por mês em 2034 (GWh/h)

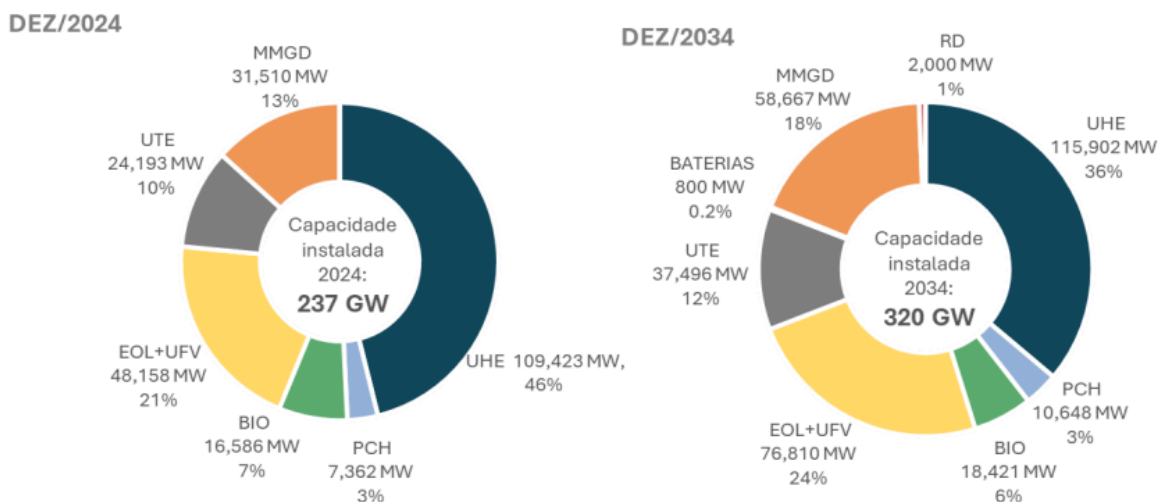


Fonte: EPE (2024)

4.2 CENÁRIO HIDRELÉTRICO

As usinas hidrelétricas continuam sendo o principal agente para geração de energia elétrica no Brasil, com importância estratégica para garantir a segurança energética e operação de todo sistema elétrico nacional. Através do estudo realizado segundo a Empresa de Planejamento Energético (2024) referente a esse horizonte decenal, atualmente as hidrelétricas (UHE e PCHs) representam aproximadamente 50% da capacidade instalada, com 116.785 MW, valores próximos aos fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico demonstrados nesse estudo. Porém, através da Figura 9, retirada do PDE 2034, nota-se que mesmo com o aumento em sua capacidade, sua porcentagem relativa correspondente diminuiu, evidenciando a procura de órgãos públicos em diversificar a matriz energética. Isso faz com que haja menos dependência do sistema elétrico para as hídricas, algo que em épocas de estiagem traria grandes riscos e dificuldades para atender e suprir a demanda exigida pelo SIN.

Figura 9 – Configuração do Cenário de Referência do PDE 2034 em 2024 e 2034

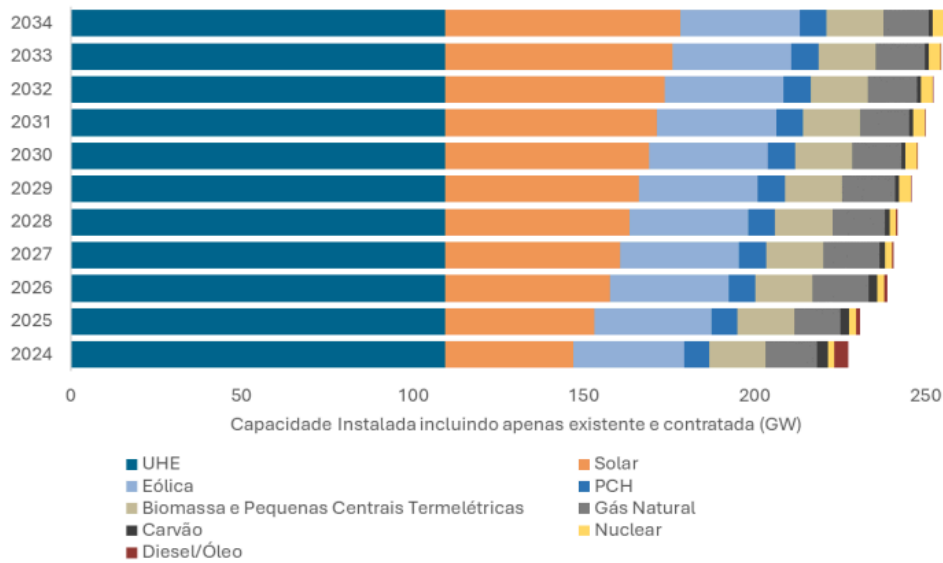


Fonte: EPE (2024)

Analisando as projeções do PDE 2034 demonstradas na Figura 9, a capacidade instalada total do Brasil deverá atingir 320 GW até 2034, sendo 115.902 MW referentes a UHEs, apresentando uma parcela de 36% (EPE, 2024). PCHs, apesar de apresentarem aumento em sua capacidade, continuaram com o índice de 3% comparado a todo o cenário.

Mesmo com sua diminuição em relação a participação percentual, as hidrelétricas ainda ocupam o primeiro posto de fornecimento de energia para o sistema brasileiro. Essa redução se deve ao crescimento das usinas solares e eólicas junto com aumento pela procura pela geração distribuída, possíveis de serem observadas na Figura 9 (EPE, 2024). Essas duas fatias juntas, em 2034, irão corresponder a 42% da capacidade total do sistema, com potência instalada de 137.477 MW. Já na Figura 10, observa-se o histórico ao longo dos próximos anos da oferta existente e contratada ao longo do período decenal, ainda sem considerar expansão indicativa conforme sua fonte de geração, diferente do demonstrado na Figura 9. Essa é chamada de Cenário Base do PDE 2034, sendo utilizada para quantificação dos requisitos do sistema (EPE, 2024). Nela é possível notar a pouca variabilidade da capacidade das hídricas (UHEs, PCHs e CGHs juntas), enquanto outras fontes apresentam tendências de crescimento e justificam os resultados explicados até aqui.

Figura 10 – Evolução da Capacidade Instalada Existente e Contratada do SIN

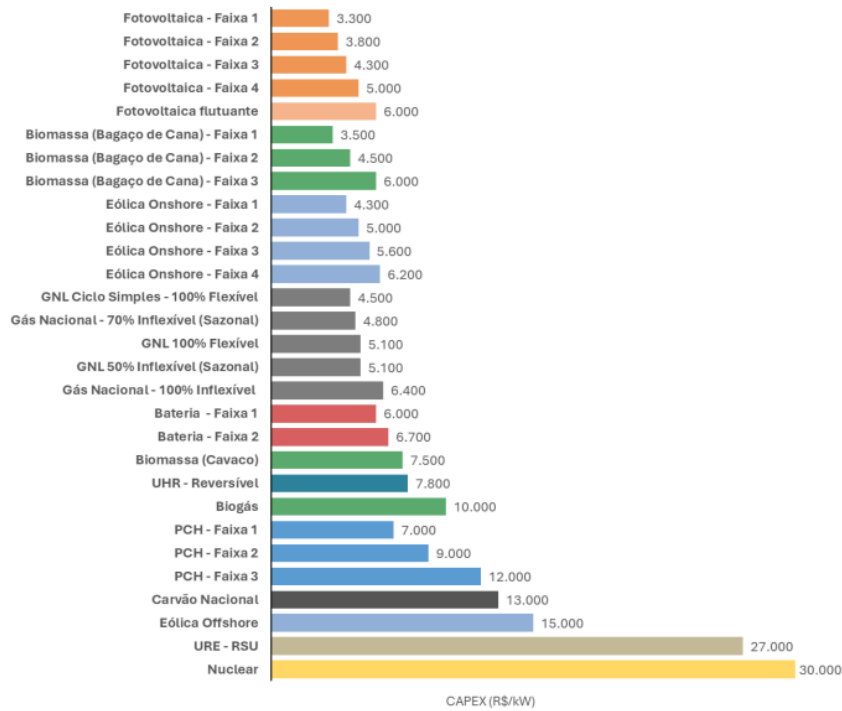


Fonte: EPE (2024)

A procura por essas fontes, além do objetivo de diversificar a matriz energética, é explicada pelos custos de investimentos para cada um dos casos. A Figura 11 mostra o CAPEX (Capital Expendurite) indicando diferentes faixas de implantação relacionadas ao custo de investimento de cada usina por quilowatt (R\$/kW). Na imagem é possível observar que fontes como a solar e a eólica possuem os menores índices de investimentos para implantação de suas usinas. As hidrelétricas, representadas pelas PCHs e UHR (Usinas Hidrelétricas Reversíveis que utilizam sistemas de bombeamento para encher reservatórios em horários de baixo custo energético) no gráfico, ocupam a posição de fontes com maiores custos comparadas as outras apresentadas.

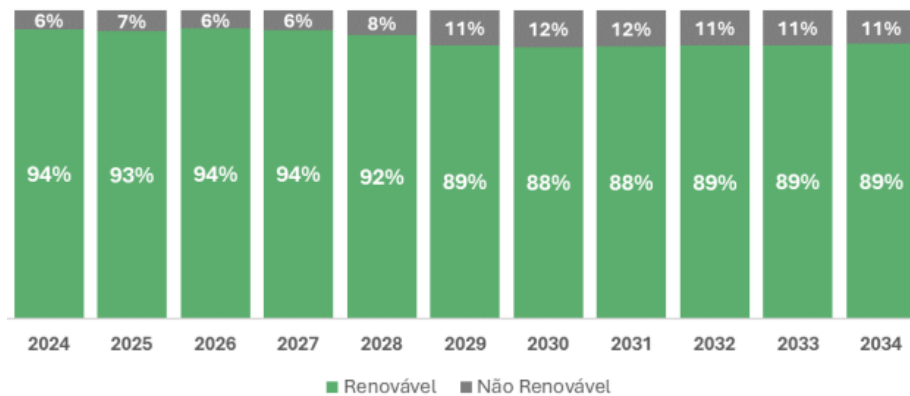
Ainda que as termelétricas apresentem um grande crescimento quanto a sua expansão na capacidade instalada, conforme foi possível na Figura 9, explicada devido a variabilidade da matriz energética e segurança de fornecimento, a matriz ainda conta com geração de energia elétrica com forte renovabilidade para os anos seguintes. Isso está demonstrado na Figura 12, que utiliza o cenário de referência. Apesar de apresentar um aumento em seu percentual relativo, às fontes limpas ainda são responsáveis por cerca de 90% da oferta de produção de eletricidade (EPE, 2024).

Figura 11 – Valores de Investimento (CAPEX), em R\$/kW, por fonte de geração



Fonte: EPE (2024)

Figura 12 – Percentual de renovabilidade da geração de energia elétrica do SIN – Cenário de Referência



Fonte: EPE (2024)

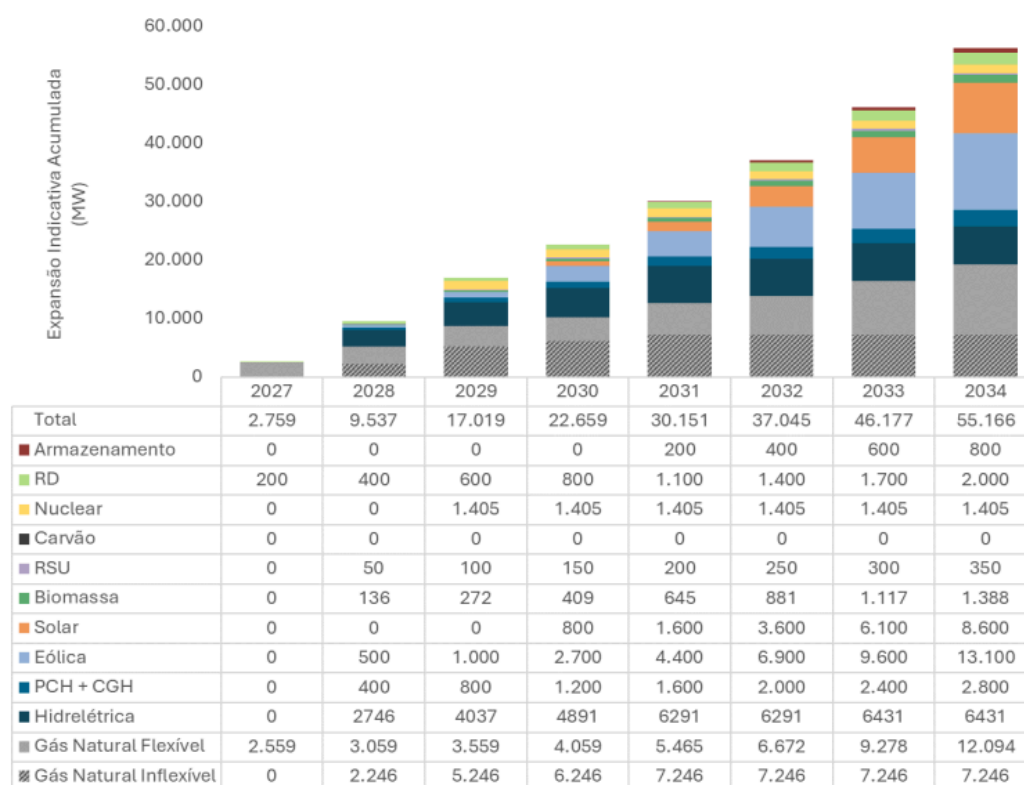
O PDE 2034 também explica a perda de espaço de crescimento da geração hidrelétrica em função das restrições socioambientais, regulatórias e territoriais cada vez mais rigorosas, limitando a implantação de novos grandes empreendimentos. Por esse motivo, a expansão para o setor no plano contempla apenas três novas usinas hidrelétricas de grande porte, podendo entrar em operação até 2034. Essas incluem: Telêmaco Borba (118 MW), Bem Querer (650 MW) e Tabajara (400 MW),

localizadas em regiões favoráveis quanto aos obstáculos regulatórios e ambientais citados (EPE, 2024).

Ainda para as fontes hídricas, existe um grande foco na modernização de parques hidrelétricos já existentes, capazes de aumentar a sua capacidade instalada, com previsão de investimentos e repotencialização de usinas, aumentando sua eficiência de operação sem que seja preciso grandes obras ou novos reservatórios. Outro fator importante para ser levado em conta é a contribuição para flexibilidade que essas usinas fornecem, sendo responsáveis pelo despacho em horários de ponta, regulação de frequência e reserva de potência, especialmente em cenários hidrológicos críticos. Por esses motivos, essas ainda merecem atenção e enfoque devido a importância histórica que sempre demonstraram e continuam ocupando o posto de principal produtor de eletricidade do país.

Na Figura 13 estão representadas todas as expansões indicativas considerando o cenário base no horizonte decenal. Este cenário traz um acréscimo total, para o período até 2034, de aproximadamente 55.000 MW, dos quais cerca de 45% da capacidade instalada é composta por fontes renováveis, como PCH, biomassa (incluindo a possibilidade de biocombustíveis líquidos), eólica e solar, nesse caso, considerando-se apenas a parcela centralizada. O Cenário de Referência é composto pela modernização e ampliação de usinas hidrelétricas, que também fazem o importante papel de atendimento do requisito de potência (EPE, 2024).

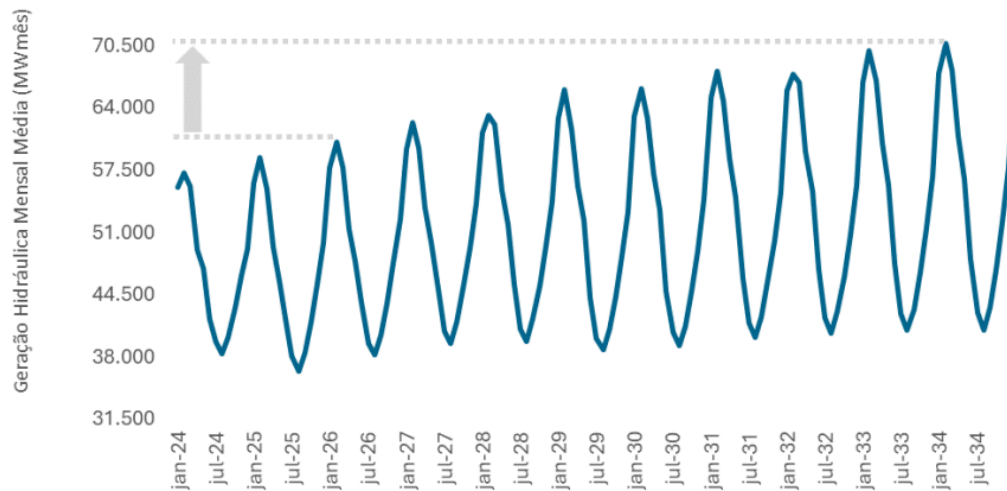
Figura 13 – Expansão Indicativa acumulada para o Cenário de Referência



Fonte: EPE (2024)

Considerando o horizonte decenal do PDE 2034 para as usinas hidrelétricas, mesmo com todos os dados indicados ao longo do estudo referente a procura por diversificação da matriz energética, obstáculos socioambientais e regulatórios e custos para implementação, as projeções de operação e armazenamento de energia em reservatórios ainda assim apresentam crescimento contínuo da geração hidrelétrica total média do SIN, como possível analisar na Figura 14. A expansão do setor deve-se majoritariamente às ampliações nas usinas existentes, as quais não acrescentam montantes relevantes de garantia física. Apenas três usinas novas de grande porte, como já citadas, participaram da análise pela Empresa de Pesquisa Energética e foram incorporadas quanto à evolução em sua capacidade de produção de energia. Tais dados mostram a evolução da geração média mensal para essas usinas, crescendo aproximadamente 10.000 MWmês e alcançando no início de 2034, a capacidade média mensal de produção de 70.500 MW, sendo fornecidas ao Sistema Interligado Nacional (EPE, 2024).

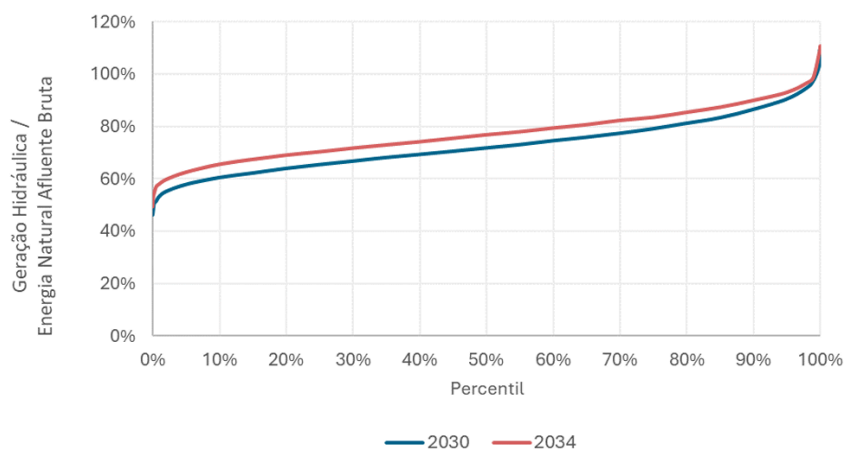
Figura 14 – Geração Hidrelétrica total média do SIN



Fonte: EPE (2024)

A partir da Figura 15 pode-se notar que a projeção de expansão planejada para 2034 também conta com o melhor aproveitamento da Energia Natural Afluente Bruta resultante dos avanços tecnológicos, quando comparado ao de 2030. Na imagem, a pequena fração acima de 100% em relação à geração hídrica do SIN e da Energia Natural Afluente estão relacionadas aos meses em que há o esvaziamento de recursos hídricos acumulados nos reservatórios para geração (EPE, 2024).

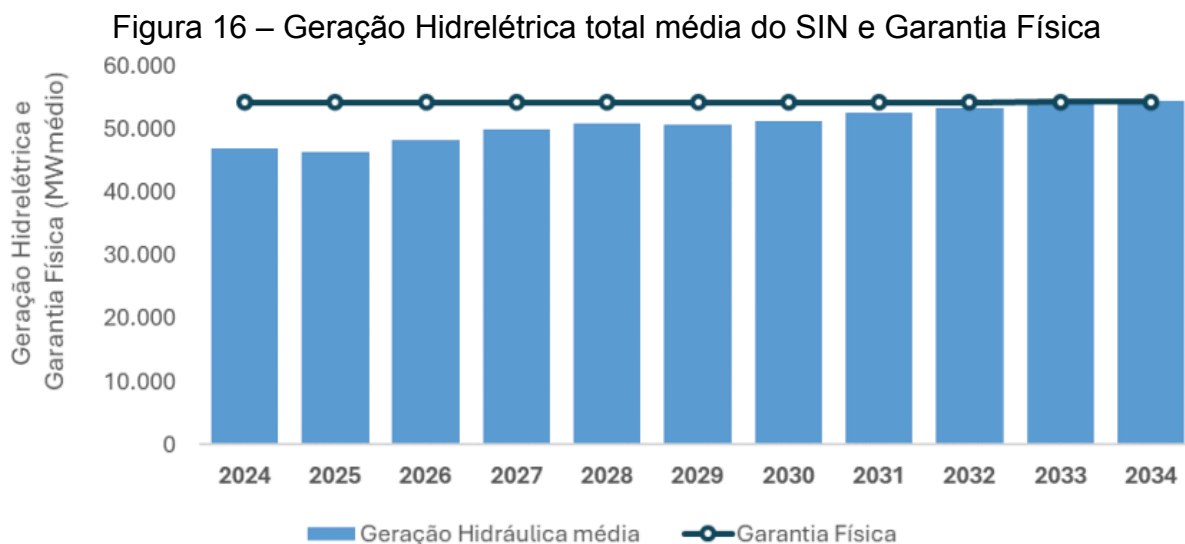
Figura 15 – Taxa de conversão da Energia Afluente Bruta em geração hidráulica



Fonte: EPE (2024)

Por fim, na Figura 16 tem-se geração hidrelétrica total média do SIN no horizonte decenal, comparando os valores médios anuais de produção com a

garantia física vigente das usinas existentes. Note que, ao longo de todo esse horizonte, a projeção para geração das UHEs não chega a Garantia Física total do SIN, mesmo com o aumento de geração vislumbrado neste cenário.



Fonte: EPE (2024)

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo trazer uma análise sobre a importância que geração hidrelétrica é considerada no Plano Decenal de Expansão de Energia de 2034, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética e sua relevância para o planejamento para o horizonte decenal dos próximos anos.

A análise do PDE 2034 permitiu mergulhar a fundo no tema e compreender qual o papel estratégico reservado para as usinas hidrelétricas na matriz elétrica brasileira. Apesar de projeções que indicam o forte crescimento de fontes renováveis como solar e eólica, as hidrelétricas continuam sendo o principal agente do Sistema Interligado Nacional, seja por sua expressiva capacidade instalada quanto sua característica de fornecer confiabilidade à rede e flexibilidade operativa.

O PDE 2034 ainda prevê que, ao final do horizonte decenal, o país possuirá uma capacidade instalada total de cerca de 320 GW, sendo aproximadamente 115 GW referente às usinas hidrelétricas (UHE). Mesmo que o planejamento energético para o período possua o objetivo de diversificação da matriz elétrica, e com isso redução em sua participação percentual, e expansão de novas tecnologias, as hidrelétricas continuam liderando frentes como potência instalada entre as fontes

individuais. Ademais, são essenciais para manter o equilíbrio entre oferta e demanda da rede elétrica, atuando no atendimento a ponta de consumo, controle de frequência e compensação de déficits de geração em fontes intermitentes.

A expansão para essa fonte nos próximos anos se vê em um cenário modesto, com limitados projetos novos de grande complexidade contemplados, resultados de rígidas restrições socioambientais, regulatórias e territoriais. Entretanto, o PDE valoriza e cita a importância de modernização de usinas já existentes, através da repotencialização de parques existentes e tecnologias voltadas a melhorar sua eficiência, conseguindo assim uma maior tendência de aproveitamento racional dos recursos hídricos já em utilização. Essa estratégia adotada permitiu aumentar a capacidade instalada sem grandes obras necessárias ou aumento de reservatórios, que poderiam trazer impactos ambientais.

Outro ponto analisado foi a integração de usinas hidrelétricas com outras fontes renováveis, em especial usinas solares e eólicas. Levando em conta o contexto de transição energética justa e sustentável, o complemento entre essas diferentes fontes de geração de eletricidade permite o despacho hidrelétrico eficiente, sendo uma vantagem importante para o sistema elétrico nacional. Isso garante a continuidade do suprimento de energia com qualidade, modicidade tarifária e redução de emissões.

Dessa forma, a análise contempla que as usinas seguem sendo uma tendência para o planejamento energético nacional das próximas décadas, ocupando papel fundamental para sua operação. Isso se deve não só a sua versatilidade, mas também ao seu papel de estruturar todo o setor. O PDE confirma que o futuro passa fundamentalmente pela integração estratégica de UHEs com novas fontes e modelos de expansão mais diversificados.

Como trabalhos futuros, o autor sugere alguns assuntos que irão complementar a análise feita ao longo do mesmo e trazer novas discussões sobre o tema. Eles são:

- A modernização e digitalização das UHEs existentes, avaliando os impactos em desempenho operacional e economia de escala.
- Modelos de integração entre hidrelétricas e baterias de armazenamento, com simulações em cenários de alta penetração de geração solar e eólica.

- Análises regionais de viabilidade socioambiental para futuras UHEs, considerando critérios atualizados de licenciamento e governança territorial.
- Comparativos de custos atualizados entre fontes renováveis (hidráulica, solar, eólica, biomassa), considerando externalidades ambientais e sociais.
- Avaliações dos impactos climáticos na hidrologia nacional, com implicações para a operação de reservatórios e expansão do parque hidrelétrico.

Estudos como esse trariam ao leitor conhecimentos complementares para seu entendimento referente ao papel das UHEs na transição energética e sua importância para o planejamento nacional.

REFERÊNCIAS

AITA, R. A.; DETZEL, D. H. M.; BESSA, M. Estudo do impacto de geração das usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional por meio da análise de componentes principais. *Revista Brasileira de Energia*, Curitiba, v. 28, n. 4, p. 136–155, 2022. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/769/543>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Manual de Garantia Física de Energia de Empreendimentos de Geração*. Brasília: ANEEL, 2020. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221051_2_4.pdf. Acesso em: 29 jun. 2025.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 1.059, de 30 de outubro de 2023. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeradores ao sistema de distribuição. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA). Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ANTÔNIO, F. F.; MATTA, E. S. Sustainability as a perspective for the repowering of small hydroelectric plants in Brazil: estimation method. *Ambiente & Sociedade*, Campinas, v. 25, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/B9rmgFzCZkKjyf5WP8R8HZB/?lang=en>. Acesso em: 4 jun. 2025. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20200069r1vu2022L3OA.

ANTÔNIO, R.; MATTA, C. Energia renovável e desenvolvimento socioeconômico: impactos sobre o mercado de trabalho no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, v. 30, n. 1, p. 57-74, 2024.

BRANDÃO, S. Q.; REGO, E. E.; PILLAR, R. V.; DE CARVALHO, R. N. F. *Hydropower Enhancing the Future of Variable Renewable Energy Integration: A Regional Analysis of Capacity Availability in Brazil*. *Energies*, Basel, v. 17, n. 13, p. 3339, jul. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/13/3339/pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025. DOI: 10.3390/en17133339.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2034*. Brasília: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia>. Acesso em: 4 jun. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: MME, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/planejamento/plano-nacional-de-energia/pne-2050>. Acesso em: 4 jun. 2025.

DA SILVA, B. C. et al. Assessment of Climate Change Impact on Hydropower Generation: A Case Study for Três Marias Power Plant in Brazil. *Climate*, [s.l.], v. 11, n. 10, p. 201, 2023.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/11/10/201>. Acesso em: 4 jun. 2025. DOI: 10.3390/cli11100201.

DA SILVA, B. C. et al. Energy efficiency technologies for hydroelectric power plants: a case study in Brazil. *Journal of Power and Energy Engineering*, v. 10, p. 90–115, 2022. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=117613>. Acesso em: 4 jun. 2025. DOI: 10.4236/jpee.2022.105007.

DIAS, N. L. et al. An overview of hydropower reservoirs in Brazil: current situation, future perspectives and impacts of climate change. *Water*, Basel, v. 10, n. 5, p. 592, maio 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/5/592>. DOI: 10.3390/w10050592. Acesso em: 18 jun. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Caderno de Tecnologias de Geração 2023*. Rio de Janeiro: EPE, maio 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-745/Caderno%20de%20Tecnologias%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%2023.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2034*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 2 jun. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *WebMap EPE: Sistema de Informações Geográficas dos Estudos do Planejamento Energético Brasileiro*. Versão contínua. Rio de Janeiro: EPE, 2021–2025. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

FERREIRA, L. R. et al. Transição energética e os desafios regulatórios da nova configuração do setor elétrico brasileiro. *Revista de Políticas Públicas em Energia*, v. 9, n. 2, p. 45-62, 2024.

GANDELMAN, Dan Abensur. *Uma metodologia para o planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro considerando incertezas*. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7970/1/876197.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em: 3 jun. 2025.

LOCATELLI, Fabiano Ari. Otimização da operação de usinas hidrelétricas com aplicação de programação dinâmica estocástica em linguagem vetorial. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/46237>. Acesso em: 4 jun. 2025.

MACHADO, A. C. C. S.; MENEZES, M. A. C.; ABREU, T. M.; FILHO, G. L. T. Os desafios para implantação das Pequenas Centrais Hidrelétricas no Brasil. *Revista Brasileira de*

Energia, v. 28, n. 4, p. 190–204, 2022. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/762>. Acesso em: 17 jun. 2025.

MACHADO, J. C. Partidas e paradas em usinas hidrelétricas: atendimento ao ONS e custos operacionais. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/16505/1/Dissertacao_PartidasParadasUsinas.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

MATOS, Vítor Luiz de. Um modelo para o planejamento anual da operação energética considerando técnicas avançadas de otimização estocástica. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/100588>. Acesso em: 4 jun. 2025.

MERCEDES, Sonia Seger Pereira; RICO, Julieta Andrea Puerto; POZZO, Liliana de Ysasa. Uma revisão histórica do planejamento do setor elétrico brasileiro. *Revista USP*, São Paulo, n. 104, p. 13–36, jan.–mar. 2015. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i104p13-36. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i104p13-36>. Acesso em: 4 jun. 2025.

MORAIS, D. S. et al. Papel do Estado na transição energética: perspectivas e estratégias para um setor elétrico mais democrático. *Cadernos de Energia e Sustentabilidade*, v. 5, n. 1, p. 90-108, 2024.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Mapas — SINMAPS: Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN*. Página institucional. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *O que é o ONS?* Página institucional. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *O que são — Procedimentos de Rede.* Página institucional. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/o-que-sao>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *O Sistema em Números.* Página institucional. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 20 jun. 2025.

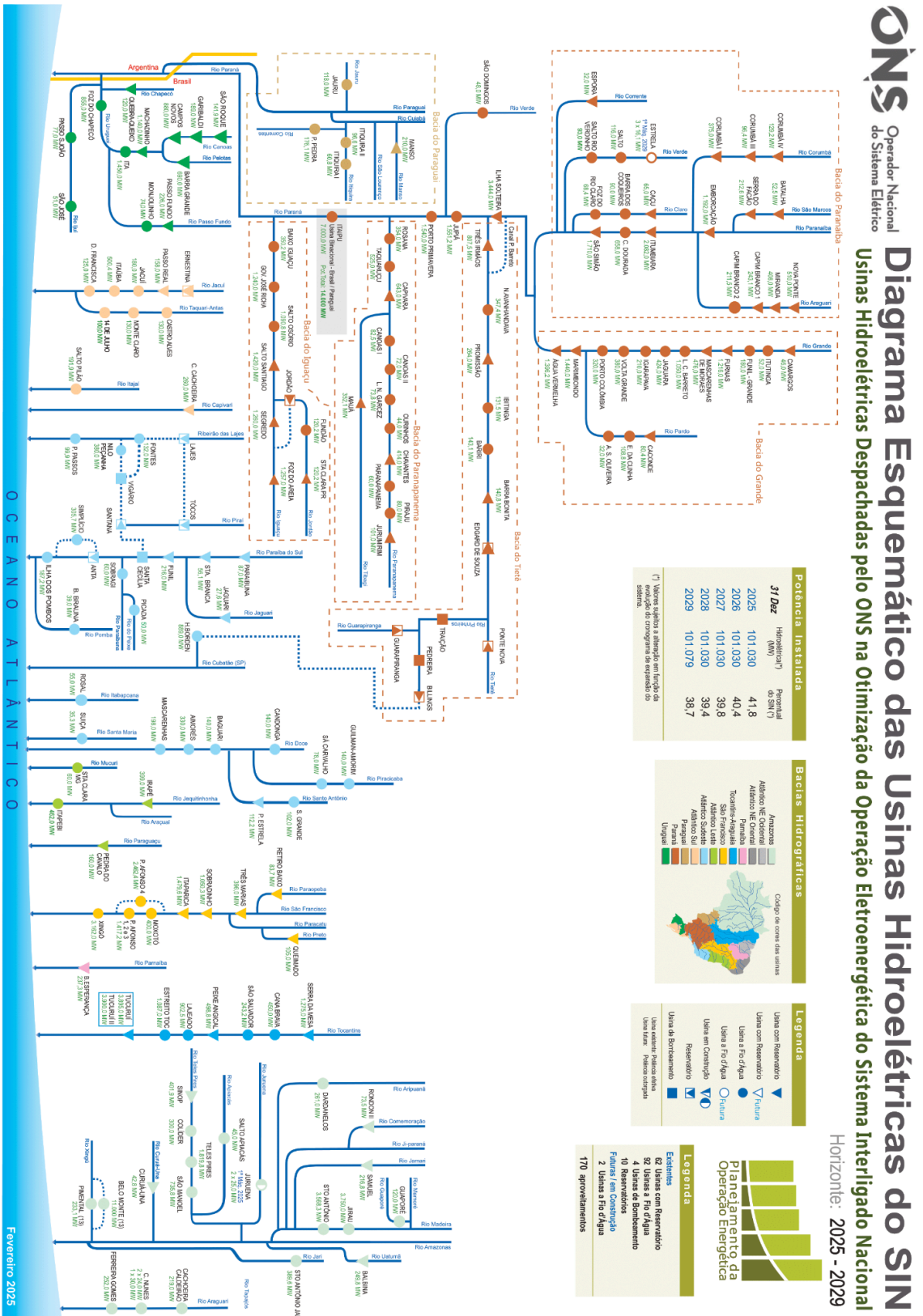
PINHEIRO, Luis; TRINKENREICH, Janaina. *Modelagem do planejamento de expansão do sistema elétrico brasileiro: análise comparativa do DESELP e OPTGEN*. Revista de Energia & Desenvolvimento Sustentável, 2021.

SANTANA, T. S.; MONASTÉRIO, L. M.; CALDEIRA, A. O novo marco regulatório da micro e minigeração distribuída no Brasil: desafios e perspectivas. *Revista de Direito da Energia*, v. 6, n. 1, p. 25-40, 2023.

SILVA, J. C.; LIMA, R. S. Hidrelétricas no Brasil: evolução histórica, desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Planejamento Energético*, v. 12, n. 3, p. 103-121, 2022.

SOARES, Marcos de Abreu; COSTA, Hirdan K. de M. *Análise regulatória das crises hídricas enfrentadas em 2001 e 2021 no setor elétrico brasileiro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106133/tde-03022025-205351/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ANEXO A – Diagrama Esquemático das Usinas Hidrelétricas do SIN



Fonte: ONS (2025)