

MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: CONTEXTUALIZAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA E CARACTERIZAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS

Data de submissão: 30/11/2023

Data de aceite: 02/01/2024

Renato Grethe Negri

Universidade Federal de Santa Maria,
Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<<http://lattes.cnpq.br/9607795757047650>>

Marcelo Bruno Capeletti

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<<http://lattes.cnpq.br/1922799731958383>>

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<<http://lattes.cnpq.br/8009856508464151>>

Aizenira da Rosa Abaide

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<<http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>>

Bruno Knevitzz Hammerschmitt

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<<http://lattes.cnpq.br/4865207592578956>>

RESUMO: O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por ser um sistema de larga escala com majoritariedade de usinas hidrelétricas. 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. Diante disto, este estudo tem por objetivo em esclarecer as perspectivas das diferentes fontes de energia que compõem a matriz elétrica, dando destaque para as usinas hidrelétricas. Também serão elucidadas as principais caracterizações das hidrelétricas. Por fim, ressalta-se a importância da geração hídrica no sistema elétrico brasileiro, que por sua vez, proporciona uma matriz energética mais sustentável e eficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Usinas hidrelétricas; geração hídrica; sistema elétrico brasileiro; energias renováveis.

BRAZILIAN ELECTRIC MATRIX: CONTEXTUALIZATION OF ENERGY SOURCES AND CHARACTERIZATION OF HYDROPOWER PLANTS

ABSTRACT: The Brazilian electrical system is characterized by being a large-scale system with a majority of hydropower plants. The electrical energy production in hydropower plants is influenced by the reservoir level, which can vary due to natural and human factors. Hydro scarcity caused by the deregularization of rainy periods is an impactful factor in reducing hydraulic potentials. However, using hydro resources when considering cascade hydropower plants maximizes electricity production. Therefore, this study aims to clarify the perspectives of the different energy sources that make up the electrical matrix, highlighting hydropower plants. The main characteristics of hydropower will also be elucidated. Finally, the importance of hydro generation in the Brazilian electrical system is stressed, which in turn provides a more sustainable and efficient energy matrix.

KEYWORDS: Hydropower plants; hydro generation; Brazilian electrical system; renewable energy.

1 | INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é caracterizado por ser um sistema de larga escala, com diferentes fontes de energia centralizada para atendimento das demandas do Sistema Interligado Nacional (SIN), gerido e coordenado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). O SEB conta com uma matriz elétrica predominante de base renovável, onde as Usinas Hidrelétricas (UHEs) de grande proporção possuem destaque.

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

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

Para contornar essas limitações e maximizar a produção de eletricidade, tem-se buscado o aproveitamento dos recursos hídricos por meio da 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 adequada 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.

Diante disto, o presente trabalho tem por objetivo em introduzir as perspectivas das principais fontes de geração no Brasil, e aprofundar os conhecimentos sobre a geração

hídrica. Para isso são elucidadas as principais atribuições da geração hidrelétrica no SEB, também serão realizadas as caracterizações relacionadas as UHEs. Em conclusão, além de contribuir para uma matriz energética mais sustentável, as UHEs possuem papel fundamental na robustez do SEB, fato que define o SEB como um exemplo para o mundo.

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 Empresa de Pesquisa Energética (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 1, ilustra a comparação da matriz de energia elétrica no Brasil e no mundo.

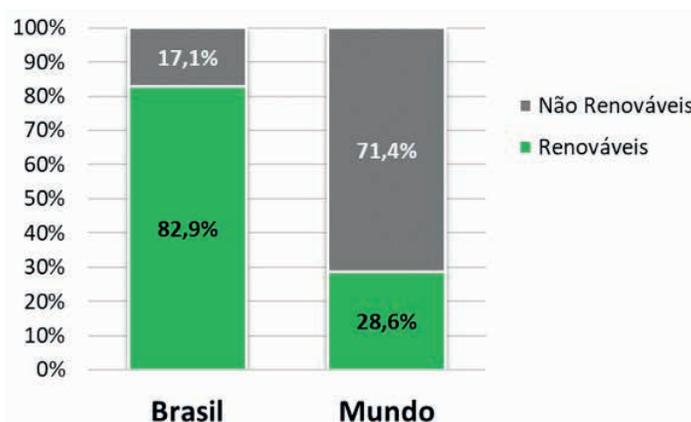


Figura 1 - Comparação da matriz de energia elétrica no Brasil e no mundo.

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). Além disso, as perspectivas de expansão das energias renováveis na matriz elétrica brasileira são ainda mais promissoras, o que trará maior sustentabilidade ao SEB.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (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 2, com base nos dados do sistema em números do ONS.

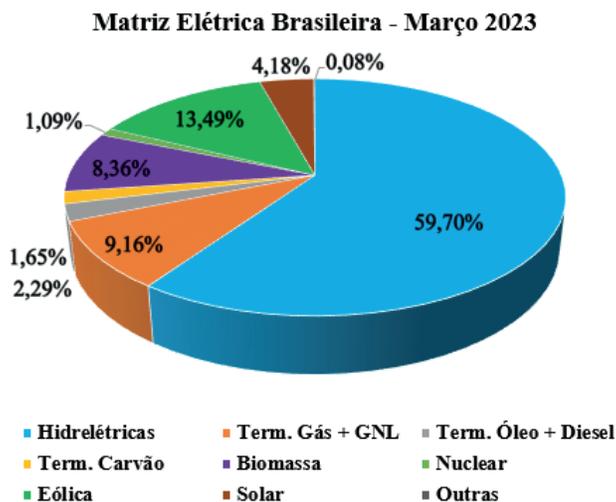


Figura 2 – Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica

Fonte: Adaptado de (ONS, 2022).

Com os dados da Figura 2, 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 Sistema Integrado Nacional (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. Essas questões justificam 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 UHEs 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.

2.1 Termelétricas

As usinas termelétricas são as instalações onde ocorre a geração da energia termoelétrica 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 *mix* 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 no SIN, como a eólica e a solar, as usinas termelétricas podem desempenhar um papel importante na estabilização da variação de geração dessas fontes em curto prazo (EPE, 2023).

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 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 de Efeito Estufa (GEE) 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 GEE, 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 44,78 GW 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, 2023).

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 Ministério de Minas e Energia (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).

2.4 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 GEE, apresenta a vantagem adicional de ser uma fonte renovável de geração (TOLMASQUIM, 2016). Em suma, as UHEs são fontes de energia limpa e renovável que desempenham um papel fundamental na matriz energética do planeta, onde 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 do manutenção da operação do SIN.

2.4.1 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 o potencial inventariado. Contudo, 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. Seguido 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. Seguindo nesta mesma linha de raciocínio, 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).

2.4.2 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 as 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 tão atraente, 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 e 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 869 MW (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 Luíz 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 hídrica 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).

2.4.3 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 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 hidrelétricas a fio d'água. Consequentemente, 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 ou 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.

2.4.4 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 | CONCLUSÃO

Diante da necessidade de mitigação dos GEE, o SEB se mostra como referência mundial no uso sustentável dos recursos energéticos para a geração de energia. O SEB apresenta uma matriz elétrica com diferente *mix* de fontes de energia, onde há predominância das UHEs para produção de eletricidade. No entanto, a produção de energia elétrica em hidrelétricas é um processo complexo e altamente dependente do nível do reservatório, que por sua vez é afetado por fatores naturais e atividades humanas.

Desta forma, este estudo teve como princípios em esclarecer as perspectivas das principais fontes da matriz elétrica brasileira, e suas atribuições frente ao atendimento da demanda do SIN. Devido a predominância da geração hídrica no SEB, foram expostas as principais definições sobre as hidrelétricas, no que diz respeito ao potencial hidrológico,

diferentes tipos de hidrelétricas, definições de usinas com e sem reservatório (fio d'água), e a operação em cascata de sistemas hidrelétricos.

Embora as hidrelétricas enfrentem uma série de desafios para sua instalação e operação, sua soberania na matriz elétrica brasileira associada as demais fontes de energia renováveis, justifica o fato de o SEB ser referência no uso sustentável dos recursos energéticos para geração de energia elétrica. Em conclusão, este estudo tem como fundamentação em servir de base teórica para trabalhos acadêmicos acerca da geração hídrica e no uso de recursos energéticos renováveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS, e Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Instituições Brasileiras.

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=eyJrjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCl6ljQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 10 nov. 2023a.

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%C04,capacidade%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20este%20ano.>>. Acesso em: 8 mar. 2023b.

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, Brazil IEEE, , 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 Reviews Elsevier Ltd, , 1 jul. 2021.

BOU-FAKHREDDINE, B. et al. **Short-term hydro generation scheduling of cascade plants operating on Litani River project-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**. Disponível em: <<https://www.projetouhr.com.br/asel/CIEEMAT2016-UHRS.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2023.

DIAS, V. DE S. et al. **An 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. **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.

EPE; MME. **PNE 2050 - PLANO NACIONAL DE ENERGIA**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

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

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...** Istabnu, 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

SILVA, R. D. DE S.; DISET. **CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E O PLANEJAMENTO DA INFRAESTRUTURA NO LONGO PRAZO**. 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**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2023.