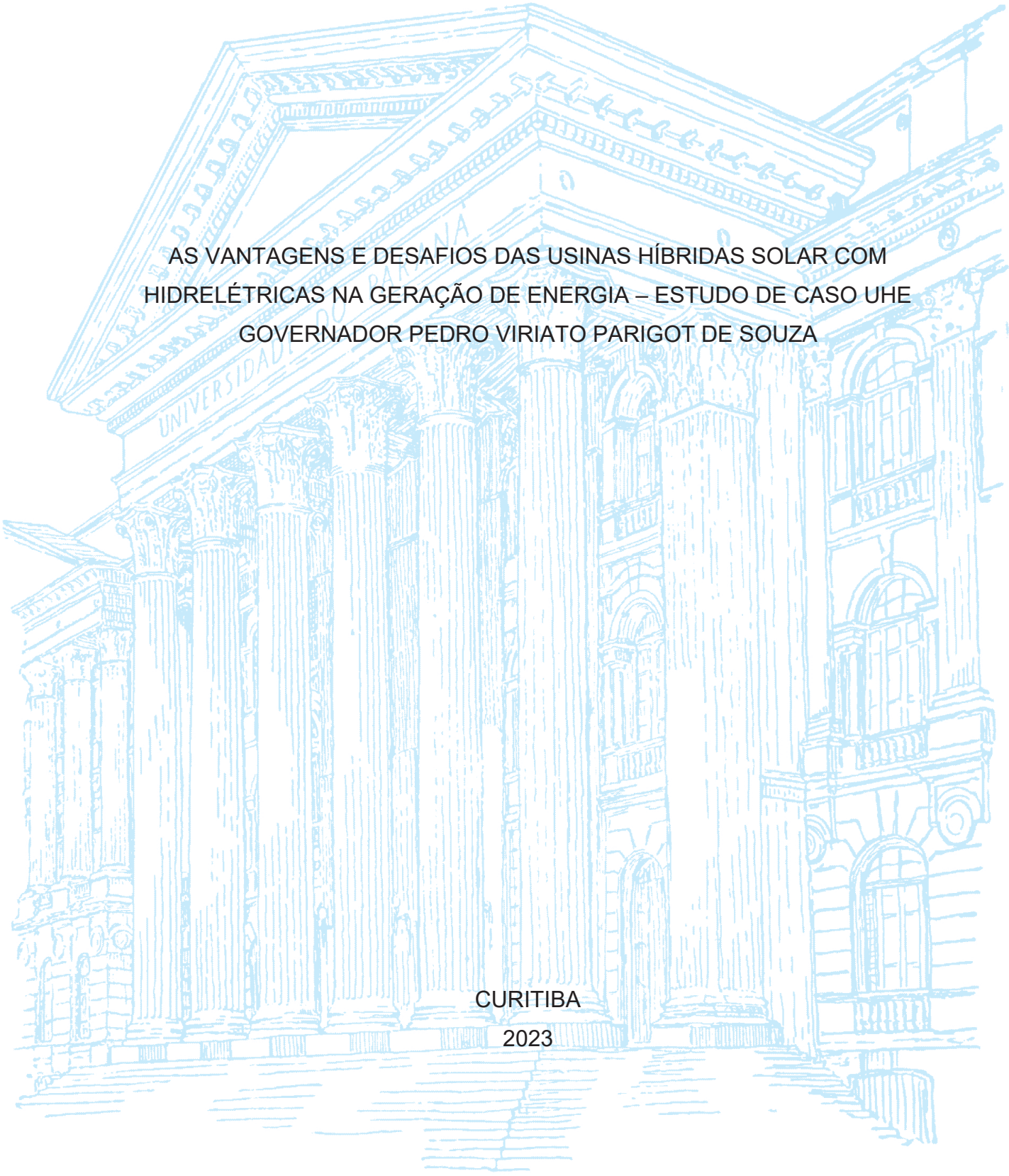
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO AMARANTE SANTANA



AS VANTAGENS E DESAFIOS DAS USINAS HÍBRIDAS SOLAR COM HIDRELÉTRICAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA – ESTUDO DE CASO UHE GOVERNADOR PEDRO VIRIATO PARIGOT DE SOUZA

CURITIBA

2023

RODRIGO AMARANTE SANTANA

AS VANTAGENS E DESAFIOS DAS USINAS HÍBRIDAS SOLAR COM HIDRELÉTRICAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA – ESTUDO DE CASO UHE GOVERNADOR PEDRO VIRIATO PARIGOT DE SOUZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Pós-Graduação MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Naturais Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Luiz Patyk

CURITIBA

2023

Dedico este trabalho de conclusão de curso à minha família, em particular a minha esposa Izabela, pelo apoio e incentivo de sempre. Também dedico ao meu orientador o professor Rodolfo Luiz Patyk, por sua paciência, confiança e comprometimento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela sua infinita sabedoria, bondade e amor eterno.

A minha família que sempre me apoiou e me incentiva nesta caminhada da vida. Exemplo de determinação, comprometimento e confiança em Deus.

Ao professor Rodolfo Luiz Patyk pela oportunidade de trabalharmos juntos neste projeto, com parceria e comprometimento.

“Não tente achar um atalho, porque não há atalhos. O mundo é uma luta, é árduo, é uma tarefa penosa, mas é assim que a pessoa chega ao pico.” OSHO

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo de usinas híbridas com solar e hidrelétricas, cujo objetivo é apresentar as vantagens e desafios associados à tecnologia visando a contribuição da matriz elétrica brasileira, considerando a importância dos acordos mundiais e das mudanças climáticas para o desenvolvimento de novos projetos de energia. Uma das alternativas é a combinação das fontes solar e hidráulica dado o potencial disponível de hidrelétricas no país, associado ao crescimento das energias renováveis, em especial solar e eólicas. O Estudo de caso proposto no reservatório da UHE Governador Pedro Viriato Parigot de Souza demonstrou que é possível a geração de energia de 52,6 GWh/ano, o equivalente a 8,4% de incremento de energia à hidrelétrica, cuja configuração da usina representa 2% do cobrimento do reservatório. Além disso, foi observada a possibilidade de contribuição da geração solar para os períodos em que os reservatórios operam com níveis mínimos, podendo ser estratégico para garantir o abastecimento de água da região metropolitana de Curitiba, bem como os outros usos da bacia hidrográfica (geração de energia, lazer, turismo, vazão ecológica etc.).

Palavras-chave: Usinas Híbridas. Fontes Renováveis. Usinas Flutuantes. Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza.

ABSTRACT

This work approaches the study of solar-hydroelectric hybrid power plants, whose objective is to present the advantages and challenges associated with the technology aiming the contribution of the Brazilian Electric Matrix, considering the importance of global agreements and climate change for the development of new energy projects. One of the alternatives is the combination of solar and hydraulic sources given the available potential of hydroelectric plants in the country, associated with the growth of renewable energies, solar and wind. The proposed case study in the reservoir of the UHE Governador Pedro Viriato Parigot de Souza demonstrated that it is possible to generate energy of 52.6 GWh/year, equivalent to 8,4% increase in energy to the hydroelectric plant, whose configuration of the plant represents 2% of the reservoir cover. In addition, the possibility of solar generation contributing to the periods in which the reservoirs operate at minimum levels was observed, which could be strategic to guarantee the water supply in the metropolitan region of Curitiba, as well as other uses of the hydrographic basin (generation of energy, leisure, tourism, ecological flow, etc.).

Hybrid Power Plants. Renewable Sources. Floating Photovoltaic Systems. Power Plant Governador Pedro Viriato Parigot de Souza.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA E RENOVABILIDADE DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA 16
FIGURA 2 – TIPOLOGIAS DE COMBINAÇÕES DE USINAS 21
FIGURA 3 – POTENCIAL REGIONAL DE GERAÇÃO 25
FIGURA 4 – CAPACIDADE INSTALADA NO MUNDO 26
FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DA UHE GOVERNADOR PEDRO PARIGOT DE SOUZA 32
FIGURA 6 – VOLUME ÚTIL DO RESERVATÓRIO (UHE GPS) 35
FIGURA 7 – PRODUÇÃO DA ENERGIA GERADA NO ANO DE 2020 - UHE GPS 37
FIGURA 8 – COMPARAÇÃO DO VOLUME ÚTIL COM A IRRADIAÇÃO SOLAR LOCAL 38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS EMPREENDIMENTOS.....24
TABELA 2 – ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DA EVAPORAÇÃO COM USINAS SOLARES FLUTUANTES.....28
TABELA 3 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO PROJETO.....33
TABELA 4 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NO RESERVATÓRIO DA UHE GPS 38

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	- Autoprodução
BEN	- Balanço Energético Nacional
CEMIG	- Companhia Elétrica de Minas Gerais
CHESF	- Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CUSD	- Contrato de Uso do Sistema de Distribuição
CUST	- Contrato de Uso do Sistema de Transmissão
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
GD	- Geração Distribuída
GEE	- Gases de Efeito Estufa
MME	- Ministério de Minas e Energia
MRE	- Mecanismo de Realocação de Empreendimentos
MUST	- Montante de Uso do Sistema de Transmissão
PDE	- Plano Decenal de Energia
REN	- Resolução Normativa
SAIC	- Sistema Integrado de Abastecimento de Curitiba
SANEPAR	- Companhia de Saneamento do Paraná
SERIS	- Solar Energy Research Institute of Singapore
SIN	- Sistema Interligado Nacional
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro
UGH	- Central Geradora Híbrida
UHE GPS	- Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza
UHE	- Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

°C Graus Célsius

% Porcentagem

GW Giga watt

GWh Giga watt-hora

kW Quilowatt

kWh Quilowatt-hora

m² Metro quadrado

W Watt

Wh Watt-hora

W/m² Watt por metro quadrado

Wh/m² Watt-hora por metro quadrado

Wp Watt-pico

SUMÁRIO

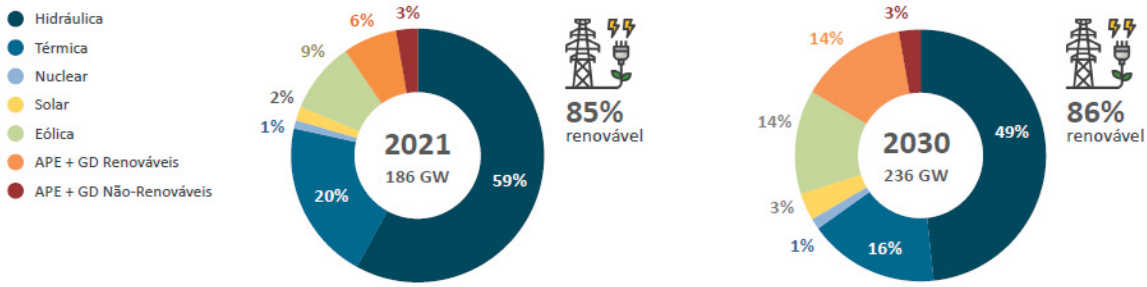
1 INTRODUÇÃO 16
1.1 JUSTIFICATIVA 18
1.2 OBJETIVOS 19
1.2.1 Objetivo geral 19
1.2.2 Objetivos específicos 19
1.3 METODOLOGIA 19
2 REVISÃO DE LITERATURA 20
2.1 PANORAMA BRASILEIRO 20
2.1.1 Usinas Fotovoltaicas Flutuantes 23
2.2 PANORAMA MUNDIAL 25
2.3 VANTAGENS E DESAFIOS DAS USINAS HÍBRIDAS COM HIDRELÉTRICAS 27
2.3.1 Vantagens 27
2.3.2 Desafios 30
3 ESTUDO DE CASO – UHE GOVERNADOR PEDRO VIRIATO PARIGOT DE SOUZA 32
3.1 DADOS DA UHE GPS 33
3.2 CRISE HÍDRICA NO PARANÁ 33
3.3 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA DA USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NO RESERVATÓRIO DA UHE GPS 34
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 37
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 39
REFERÊNCIAS 41

1 INTRODUÇÃO

A Matriz Elétrica Brasileira é composta predominantemente por usinas hidrelétricas, no entanto, segundo a estimativa do Plano Decenal de Energia (PDE, 2030), este cenário está sendo modificado pela maior participação de outras fontes renováveis como a eólica e solar, enquanto as hidrelétricas que têm sua participação considerável (60%) ficarão estagnadas, em virtude das dificuldades de viabilizar novos projetos, principalmente, por questões ambientais.

Além do surgimento e crescimento de novas fontes para geração de energia, destaca-se o crescimento das modalidades de autoprodução e geração distribuída, como indicado no gráfico da FIGURA 1, em que se observa que a capacidade instalada da matriz elétrica brasileira deve atingir nível de renovabilidade de 86% em 2030.

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA E RENOVABILIDADE DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA



FONTE: (PDE, 2030).

Diante da urgência dos países para redução de emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE), associada às discussões de mudanças climáticas, o debate sobre o papel da transição energética ganha destaque, na corrida da descarbonização das matrizes energéticas e nas formas de inovar os processos de geração, distribuição e consumo da energia. Hoje, as matrizes energéticas mundiais são compostas por 86% de fontes não renováveis, cujas fontes são dominadas pelo uso do carvão e o petróleo, e apenas 14% de fontes renováveis (IEA, 2022). Em um cenário promissor, estima-se que em 2030 a matriz energética mundial será composta por 30% de renováveis (IEA, 2021). No Brasil, apesar do contexto ser mais favorável, apresentando 44,8% de sua matriz energética e de 83% de sua

matriz elétrica compostas por fontes renováveis (BEN, 2022), é necessário aumentar a participação de outras fontes como forma de garantir a segurança energética do país. Isto se explica, pelo fato de as Usinas Hidrelétricas estarem perdendo espaço na matriz energética brasileira, influenciadas por questões como:

a) o **potencial para exploração** de grandes usinas hidrelétricas já foi majoritariamente explorado, sendo a região Amazônica, a que apresenta o maior potencial inventariado. No entanto, é onde se concentra as terras indígenas e áreas de conservação, que por lei não é permitido a construção de hidrelétricas (Delgado e Filgueiras, 2022);
b) **questões ambientais**, a implantação das usinas hidrelétricas gera grandes áreas de alagamento, que levam a desapropriação da população ribeirinha, o desmatamento, perda da biodiversidade da fauna e flora local e alterações do regime hidrológico;
c) influência das **mudanças climáticas** nos regimes hidrológicos, por conta dos grandes períodos de seca que diminuem os níveis dos reservatórios e as chuvas intensas que podem provocar desligamentos em linhas de transmissão, influenciam diretamente no montante de geração de energia (Delgado e Filgueiras, 2022).

Por outro lado, as eólicas e solares têm crescido bastante, seguindo a tendência mundial, o país registrou expansão de mais de 50% na energia solar e eólica em 2021 (BEN, 2022). Embora esse crescimento seja importante para a expansão da geração, as fontes eólica e solar por serem influenciadas pelo clima são caracterizadas por uma variabilidade espacial e temporal significativa, o que impõe ao setor elétrico desafios no âmbito da segurança energética, sobrecarga no sistema de transmissão e custos com subsídios prolongados (Barros, 2022). Nesse contexto, as termelétricas têm papel importante para garantir a estabilidade do suprimento, uma vez que sua operação não está diretamente ligada aos fatores climáticos (chuva, sol e vento).

Face ao exposto e, levando em consideração a transição das matrizes energéticas de fontes fósseis para renováveis, a combinação de diferentes fontes como solar, eólica, hidráulica e biomassa podem trazer benefícios para o sistema elétrico brasileiro, contribuir para a descarbonização da matriz, descentralização da geração de energia, alternativa para a segurança do sistema e, no caso da

combinação da fonte solar com hidráulica a possibilidade compensar as hidrelétricas nos períodos de níveis mínimos do reservatório por meio do estoque de água nos reservatórios.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em função da projeção de crescimento das fontes renováveis principalmente das usinas eólicas e solares, é também de suma importância aproveitar as oportunidades de ganhos com a combinação das fontes de energia para fins de produção de energia ou de potência, contribuindo para a expansão da geração, e inclusive, trazer redução de custos para o sistema e consumidores, já que contribuem para menores investimentos na expansão das redes de transmissão e distribuição. Assim, o conceito de Usinas Híbridas ou Associadas, se torna oportuno para o desenvolvimento de projetos, visando:

- Segurança energética – com a incorporação das fontes (solar/hidráulica) à matriz energética, reduz a dependência das fontes não renováveis de energia;
- Eficiência energética – os diferentes perfis de produção das fontes possibilitam a otimização e utilização da capacidade ociosa do sistema de transmissão, garantindo uma geração de energia fotovoltaica mais estável e confiável; outro ponto interessante são os ganhos operativos devido as baixas temperaturas dos painéis fotovoltaicos sobre a água;
- Redução dos custos de energia – a possibilidade de compartilhamento da mesma área (terreno/reservatório), divisão dos custos de operação e manutenção, e ganhos na logística e da infraestrutura conjunta;
- Redução da evaporação do reservatório – em virtude da redução da incidência solar sobre o reservatório (cobertura do espelho);
- Ganhos de armazenamento de água, principalmente, nos períodos críticos de estiagem que a geração deve priorizar outros usos da bacia hidrográfica: abastecimento público, agricultura, dessedentação de animais, lazer e turismo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar os benefícios e desafios do conceito de Usinas Híbridas na geração de energia elétrica em reservatórios de usinas hidrelétricas existentes. Como estudo de caso será apresentado a UHE Governador Pedro Viriato Parigot de Souza (UHE GPS).

1.2.2 Objetivos específicos

Verificar hipoteticamente quais seriam os ganhos energéticos e estratégicos de uma Usina Hidrelétrica com a incorporação de uma planta solar flutuante no reservatório existente.

O objeto do estudo será o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Governador Pedro Viriato Parigot de Souza, no estado do Paraná. E além da avaliação sob o aspecto da implantação de uma usina híbrida, serão considerados os outros usos da água, como abastecimento humano, vazão residual e lazer para determinação do potencial solar.

1.3 METODOLOGIA

O trabalho propõe a realização de uma pesquisa bibliográfica baseada em documentos governamentais, estudos técnicos, artigos, revistas e dissertações a fim de apresentar os benefícios e desafios de usinas híbridas solar com hidrelétricas. Para o estudo de caso foi realizada uma análise das instalações e do projeto da Usina Hidrelétrica e o uso do banco de dados disponível no site do Operador Nacional do Sistema (ONS).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PANORAMA BRASILEIRO

As primeiras discussões sobre o tema, no Brasil, vêm desde 2016, sob a coordenação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que na época, instituiu Grupos de Trabalhos para desenvolver propostas de modernização do setor elétrico, tratando de diversos temas, entre eles, a integração de novas tecnologias.

O primeiro trabalho, referente às usinas híbridas, foi publicado pela EPE através da Nota Técnica Nº EPE-DEE-NT-025/2017-r0, na qual apresentava proposta metodológica e estudos de caso para avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaica. Na sequência, visando ampliar e aprofundar o tema das usinas híbridas, foi apresentado estudo complementar com a Nota Técnica Nº EPE-DEE-NT-011/2018-r0, abordando os impactos e benefícios das combinações entre as fontes energéticas, sob o enfoque regulatório e comercial, definições para os diversos tipos de arranjos e configurações, oportunidades e desafios dessas soluções tecnológicas.

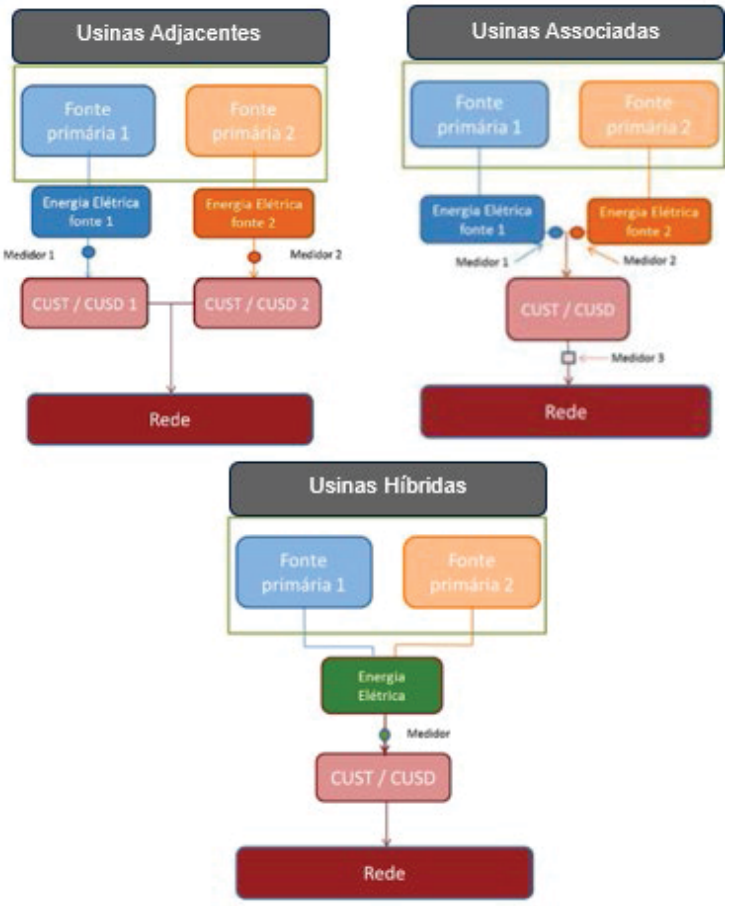
Com base nestes estudos foi apresentado os conceitos de usinas adjacentes, associadas e híbridas, conforme apresentado na FIGURA 2, a fim de diferenciar as usinas efetivamente híbridas e aquelas que simplesmente compartilham infraestrutura ou contratos (EPE, 2018).

a) **Usinas Adjacentes –** são aquelas usinas construídas próximas entre si, podendo dividir o mesmo terreno e compartilhar instalações de interesses restritos, cujas características podem acarretar redução dos custos. Outra característica, nesta modalidade, é que cada usina contrata seu montante de uso da rede de transmissão (MUST) ou de distribuição (MUSD) igual ou maior que a potência instalada, que sob a ótica do sistema, as usinas são consideradas distintas porque não há compartilhamento de equipamentos de geração.
b) **Usinas Associadas –** estas tratam de duas ou mais usinas de fontes energéticas distintas, que apresentam produção complementar e que, diferentemente das usinas adjacentes, dividem a mesma infraestrutura de conexão e de acesso da rede elétrica (Básica ou de Distribuição). Nesta configuração, encontra-se maior complexidade devido a questão

das perdas associadas à limitação da geração, o chamado *Curtailment*, que é quando a energia gerada não é aproveitada por limitações do sistema elétrico para escoamento dessa energia.

c) **Usinas Híbridas –** A principal característica dessas usinas é a impossibilidade de distinguir as fontes de energia pela geração de energia, ou seja, as distintas fontes se associam ainda no processo de produção de energia elétrica.

FIGURA 2 – TIPOLOGIAS DE COMBINAÇÕES DE USINAS



FONTE: EPE (2018).

Em 2019, a pauta sobre a regulamentação das usinas híbridas e associadas entrou na agenda regulatória da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Visando a criação de um ambiente regulatório favorável aos investimentos e à competitividade entre as fontes de energia, foram estabelecidas consultas públicas, para coleta de informações e contribuições dos agentes do setor e da sociedade civil. A medida culminou com a Resolução Normativa ANEEL Nº 954/2021 que

estabeleceu o tratamento regulatório para a implantação de Central Geradora Híbrida (UGH) e Centrais Geradoras Associadas (Cescon Barrieu, 2021). A regulamentação é um marco importante para impulsionar novos projetos envolvendo a hibridização ou associação das fontes de energia. A seguir apresentamos alguns pontos importantes dessa regulamentação:

- De acordo com o Artigo 3º, incisos V e VI da REN Nº 876/2020, foi estabelecido as seguintes definições:
    - *V – Central Geradora Híbrida (UGH) – instalação de produção de energia elétrica a partir da combinação de diferentes tecnologias de geração, com medições distintas por tecnologia de geração ou não, objeto de outorga única;*
    - *VI – Centrais geradoras associadas: duas ou mais instalações, com a finalidade de produção de energia elétrica com diferentes tecnologias de geração, com outorgas e medições distintas, que compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e uso do sistema de transmissão.*
- Conforme Artigo 16, dos parágrafos 1º-A, 2º-A, da REN Nº 666/2015, fica estabelecido que:
    - *§ 1º-A O MUST contratado da Central Geradora Híbrida ou das centrais geradoras associadas deve ser, no mínimo, igual à soma dos MUST contratados das centrais geradoras com CUST vigentes no momento da associação ou da hibridização.*
    - *§ 2º-A Para fins de cálculo tarifário, as centrais geradoras associadas devem declarar no CUST as parcelas do MUSTg referentes a cada central de geração, de modo que o somatório dessas parcelas seja igual ao MUST contratado pela associação, sendo que a parcela referente à central de geração existente antes da associação deve ser no mínimo o MUST já contratado.*
- As usinas participantes do Mecanismo de Realocação de Empreendimentos (MRE) tem o objetivo de compartilhar os riscos hidrológicos no Sistema Interligado Nacional (SIN), nestes casos elas poderão fazer parte da hibridização e associação, conforme Artigo 1º do parágrafo 3º dos incisos I, II e III da REN Nº 876/2020:
    - *I – Deverão ter medições distintas por tecnologia de geração;*

- *II – A energia proveniente das demais tecnologias não poderá ser destinada ao MRE;*
- *III – Garantia Física de tecnologia não participante do MRE não poderá ser considerada para este fim.*

- Ambiente Regulado – Fica estabelecida a permissão tanto da hibridização quanto da associação de usinas contratadas no ambiente regulado, desde que não prejudiquem o atendimento de seus contratos.

2.1.1 Usinas Fotovoltaicas Flutuantes

O Brasil lançou em 2016 o primeiro protótipo, no mundo, de exploração de energia solar em reservatórios de geração de energia. O projeto piloto, que tem recursos provenientes de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da ANEEL (P&D+I), consistiu na instalação de flutuadores solares em reservatórios de energia existentes, sendo escolhido as UHE Balbina e Sobradinho, para iniciar os primeiros estudos de pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia, visando questões diversas, desde a viabilidade econômica para expansão em larga escala até possíveis impactos ambientais ligados à fauna e flora em ambientes aquáticos (Canal Energia, 2016). De acordo com o CRESP – Centro de Referência em Energia Solar em Petrolina (2019), o sistema fotovoltaico flutuante, no reservatório da UHE Sobradinho contribuirá para geração de energia da usina hidrelétrica, através de fonte de energia complementar, controle da vazão de água do reservatório, face o maior desempenho de produção de energia solar e, otimização de custos. Além disso, os estudos focam fatores técnicos de implantação e operação das plantas solares como produção e transporte de energia, já que aproveitarão as mesmas subestações e linhas de transmissão da UHE Sobradinho, instalação e fixação dos flutuadores, complementariedade da energia gerada e baixo nível de impacto ambiental.

O projeto conta com o apoio das universidades do Amazonas e de Pernambuco e, empresas contratadas como a WEG e SUNLUTION (MME, 2016). O sistema consistirá no uso de flutuadores com placas solares, cuja capacidade instalada é de 1,0 MWp de potência, na primeira etapa, e na segunda etapa, conclusão dos empreendimentos (Sobradinho/Balbina) com capacidade de 2,5 MW na UHE Sobradinho e 5,0 MW na UHE Balbina. Vale ressaltar, que a primeira etapa,

da usina fotovoltaica flutuante na UHE Sobradinho foi concluída em agosto de 2019. Além desse projeto no reservatório de Sobradinho, a CHESF – Companhia Hidrelétrica do São Francisco, também, prevê a implantação de 1,25 MWp de fotovoltaica flutuante no reservatório da usina de Boa Esperança, no estado do Piauí.

Nos estados de Minas Gerais e Pernambuco, também, há previsão de implantação e operação de usinas flutuantes de geração solar. Em Minas Gerais, foi concluída a construção da usina solar flutuante (UFV Veredas Sol e Lares) sobre o reservatório da PCH Santa Marta, em Grão Mogol/MG, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). A usina tem potência instalada de 1,2 MWp, já está em operação e, pretende atender 1.250 famílias em 21 municípios mineiros das regiões dos Vales do Jequitinhonha e de Rio Pardo. A construção da usina foi iniciada em setembro de 2022, com recursos do programa de P&D Aneel da CEMIG (FOTOVOLT, 2023).

Já em Pernambuco, o sistema de geração será implantado no Açude do Xaréu, em Fernando de Noronha/PE, com potência de 630 kWp (IBERDROLA, 2023). Assim como UFV Veredas Sol e Lares, o projeto do Açude Xaréu, também, é financiado pelo Programa de Eficiência Energética (P&D Aneel da Neoenergia) e, tem como objetivo melhorar o abastecimento de água na Ilha, cuja previsão para entrada em operação é em julho/2023.

Na TABELA 1 são apresentadas as principais características das usinas solares flutuantes no Brasil.

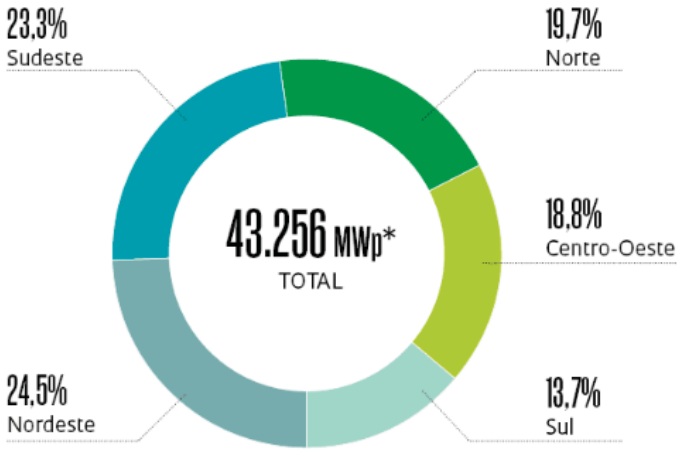
TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS EMPREENDIMENTOS

Usina flutuante	Potência (MWp)	Área (m²)	Quantidade de Painéis Solares	Município
UHE Sobradinho	1ª Etapa: 1,0	11.000	3.792	Sobradinho e Casa Nova/BA
	2ª Etapa: 2,5	Não disponível	Não disponível	
UHE Balbina	1ª Etapa: 1,0	11.000	2.712	Presidente Figueiredo/AM
	2ª Etapa: 5,0	50.000	Não disponível	
PCH Santa Marta	1,2	11.000	3.050	Grão Mogol/MG
Açude Xaréu	0,63	4.400	949	Fernando de Noronha/PE

FONTE: Autor (2023).

Diante deste cenário, observa-se que os projetos implantados no Brasil estão apoiados em recursos de pesquisa e desenvolvimento, demonstrando que a tecnologia ainda não é considerada atraente para os investidores. No entanto, um estudo realizado no semiárido brasileiro, realizado pela pesquisadora Mariana Padilha Campos Lopes, cujo estudo analisou 618 açudes no Rio Grande do Norte, mostra que a instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes apenas sobre a área ocupada pelo volume morto dos açudes seria suficiente para suprir a demanda de energia elétrica de 1,33 milhão de residências, o equivalente a demanda de energia do estado do Rio Grande do Norte. Já em outro estudo, coordenado pela equipe de Planejamento Energético (PPE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe-UFRJ), apontou que ao considerar uma área de cobertura de apenas 1% dos reservatórios de águas superficiais seria suficiente para atender 16% do consumo de eletricidade do país, ou seja, aproximadamente o valor equivalente a geração de energia de Itaipu, conforme ilustrado na FIGURA 3.

FIGURA 3 – POTENCIAL REGIONAL DE GERAÇÃO
(Considerando 1% de cobertura dos reservatórios artificiais)



FONTE: Lopes (2022).

2.2 PANORAMA MUNDIAL

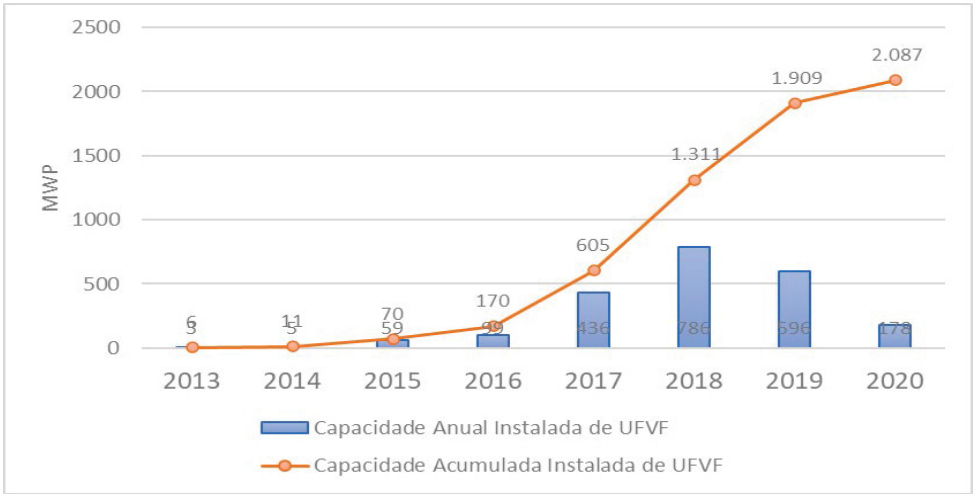
De acordo com a Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS, 2020), em setembro de 2020, a capacidade global instalada acumulada de usinas solares flutuantes já ultrapassava os 2 GW, conforme a FIGURA 4. As usinas

solares flutuantes oferecem grandes oportunidades para países que possuem restrições de terreno, mas que possuem corpos d´água disponíveis. Dentro desse espectro estão os países asiáticos, que possuem o maior número de projetos e potência instalada. O Japão, um dos países pioneiros na implantação dessa tecnologia, se destaca pela implantação da primeira usina flutuante de 20 kW em 2007, na província de Aichi e, em 2013, com a implantação da primeira usina em escala de MW, com potência de 1,18 MW na província de Saitama.

Outros dois países que também, se destacam, são a China e Singapura. No caso da China, a maioria das grandes instalações recentes estão em áreas alagadas de mineração (EPE, 2020). Já Singapura, em 2021, apresentou uma das maiores usinas flutuantes, cuja estrutura representa uma área de quase 45 campos de futebol, 122 mil painéis solares no reservatório de Tengeh, e poderá produzir 60 MWp de eletricidade. A energia produzida tem como objetivo suprir a demanda das 5 estações de tratamento de água do país (Ciclo Vivo, 2021).

Outros países como Austrália, Espanha, Índia, Irã, Jordânia, Chile e Estados Unidos, tem privilegiado as regiões áridas e semiáridas visando reduzir a perda de água por evaporação e, consequentemente, contribuindo para a segurança hídrica (Lopes, 2022).

FIGURA 4 – CAPACIDADE INSTALADA NO MUNDO



FONTE: Adaptado SERIS (2021)

2.3 VANTAGENS E DESAFIOS DAS USINAS HÍBRIDAS COM HIDRELÉTRICAS

Como exposto anteriormente, os projetos envolvendo usinas híbridas ou associadas, a partir das fontes solar em reservatórios de hidrelétricas, são bem recentes e pouco estudadas no ambiente privado, no entanto, é possível observar diversas vantagens para empreendedores, assim como para o sistema elétrico brasileiro. Assim, foram levantadas algumas vantagens e desafios associados a esta nova modalidade de geração de energia.

2.3.1 Vantagens

Segurança e Eficiência Energética – A geração de energia proveniente da combinação de fontes distintas, neste caso solar e hidráulica, pode contribuir para a segurança e eficiência do sistema elétrico. Do ponto de vista energético, a geração integrada das fontes, faz com que eventuais interrupções de energia de uma determinada fonte, seja compensada pela outra fonte complementar, ou seja, a fonte hidráulica poderia compensar a fonte solar no período noturno, em que não se observa geração de energia. Assim, a configuração do sistema demonstra um perfil de produção de cada fonte de maneira otimizada e integrada. Essa configuração híbrida faz com que os sistemas de transmissão/distribuição operem de forma mais estável devido essa produção conjunta evitar ociosidades na rede, que em geral são provocadas pelas variabilidades instantâneas na disponibilidade de potência de cada usina, em especial as usinas eólicas e solares (EPE, 2019).

Já do ponto de vista de diversificação das fontes, a tecnologia se apresenta como uma oportunidade de contribuir para inserção de fontes renováveis à matriz energética, considerando que a tecnologia busca atingir pontos estratégicos da Segurança Energética como, oferta de energia com suprimento constante, seguro e sustentável, capacidade do sistema lidar com intercorrências, transição para uma economia de baixo carbono, além de contribuir para a redução da dependência por fontes não renováveis.

Outro fator importante, envolvendo os sistemas flutuantes, são os benefícios energéticos decorrentes da operação dos módulos fotovoltaicos sobre a água. De acordo com EPE (2020) a perda por eficiência está diretamente associada ao aumento de temperatura do módulo fotovoltaico, que para tecnologias de silício é da

ordem de (0,4% a 0,5%) / ºC. No caso das usinas fotovoltaicas flutuantes, a proximidade com a água, faz com que a temperatura dos módulos seja mais baixa quando comparado com os sistemas em solo. Segundo (REC. 2018), a temperatura sobre as instalações flutuantes pode apresentar temperaturas entre 5% até 20% inferiores, a depender da localização, clima e da estrutura de flutuadores. Diante disso, é possível associar que os sistemas fotovoltaicos flutuantes tendem a possuir melhor desempenho e, consequentemente, ganhos na geração de energia. Apesar desse ganho de eficiência não ser consenso entre os pesquisadores, estudos experimentais, apontam desde ganhos inexpressivos até resultados superiores a 20% de eficiência energética (EPE, 2020).

Redução da Evaporação – o sombreamento provocado pelos módulos solares contribui para diminuir o calor sobre a água, podendo interferir diretamente nas variáveis que influenciam no processo de evaporação (velocidade dos ventos e temperatura do ambiente). Estudo realizado no semiárido brasileiro demonstrou que a maior cobertura sobre o reservatório proporcionou maior redução da evaporação, conforme os cenários de cobrimento apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 – ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DA EVAPORAÇÃO COM USINAS SOLARES FLUTUANTES

Cenário	Cobrimento do Açude (usinas solares flutuantes)	Redução da Evaporação
1	Volume morto	13,5%
2	50%	37,0%
3	60%	55,0%

Fonte: Adaptado Lopes (2022)

Segundo Farfan e Breyer (2018), a utilização de sistemas flutuantes em reservatórios de hidrelétricas demonstrou que com a cobertura de 25% da superfície do reservatório, poderia evitar a perda por evaporação em torno de 6,3%, contribuindo para o aumento da disponibilidade de água no reservatório, tendo em vista o uso múltiplo e racional dos recursos hídricos no entorno dos reservatórios

das usinas como, geração, abastecimento público, lazer, turismo, vazão ecológica, operações de manutenção das comportas de fundo etc.

Redução dos Custos de Energia – a configuração híbrida com hidrelétricas faz com que os flutuadores sejam instalados em áreas do reservatório das usinas, eliminando os custos de aquisição ou de arrendamentos de terras. Outro fator importante é o compartilhamento das estruturas das redes de transmissão/distribuição das hidrelétricas, otimização dos custos de operação e manutenção, bem como de logística e infraestrutura existente.

Outra vantagem, seria o armazenamento de água nos períodos em que a geração solar está disponível, permitindo a economia de água. Nesse aspecto, vale ressaltar que a ausência de chuvas tem como consequência a redução da geração hidráulica, devido a redução dos níveis de água nos reservatórios. No Brasil, quando isto acontece, já que a matriz elétrica brasileira é predominantemente de fonte hidráulica, são acionadas de forma emergencial as termelétricas para suprir a demanda por energia. O uso das termelétricas, além de serem poluentes, geram energias mais caras que acabam sendo repassadas ao consumidor final através da cobrança das bandeiras tarifárias (verde, amarela e vermelha). Assim, torna-se essencial a contribuição solar para a finalidade de poupar água dos reservatórios, amenizando operação do sistema e reduzindo os custos da energia para o consumidor final.

Complementariedade energética sazonal – possibilidade de aproveitar o desempenho máximo de cada fonte (hidráulica/solar), levando em consideração a sazonalidade das fontes, podendo ser utilizadas de maneira sistêmica para suprir o consumo de energia.

Uso das terras – a disponibilidade de reservatórios artificiais contribui para evitar os conflitos por terras, evitando o uso das terras que poderiam ser utilizadas, por exemplo, para agricultura, cuja representatividade no Brasil é relevante para economia e para a sobrevivência dos pequenos produtores (valor social), ou para outros fins de ocupação (pecuária, construção civil etc.). Apesar disso, e diferentemente, de outros países, o Brasil não tem escassez de terras e, segundo a

EPE (2018), o potencial estimado é de 28.500 GW para instalação de sistemas fotovoltaicos em terras.

Outros pontos importantes são: ausência de custos com aquisição ou arrendamentos de terras, já que os reservatórios são ativos das usinas hidrelétricas, redução dos impactos socioambientais associados à alteração do uso dos solos (supressão da vegetação, interferência da fauna, processos erosivos).

Limpeza dos Painéis – devido os painéis estarem sobre a água, contribui para o sistema de limpeza dos módulos, reduzindo os custos associados a esta atividade. Vale ressaltar, que estes custos podem ser mais representativos quando comparados com usinas fotovoltaicas em solo localizadas em regiões de pouca disponibilidade hídrica, como observado pela EPE (2020). Por outro lado, a implantação dos módulos sobre a água, conforme Costa (2017), pode se tornar um local propício para o pouso de aves e de acúmulo de dejetos dos pássaros nos módulos flutuantes, cuja frequência tem se mostrado maior neste ambiente do que em sistemas convencionais em solo. Como consequências, podemos apontar perda de geração de energia, já que os dejetos impedem que a luz do sol chegue até a células fotovoltaicas, interferência na qualidade da água por conta do aumento de nutrientes na água, principalmente nitrogênio e fósforo (DESSBORN, HESSEL e ELMBERG, 2016), ou pelo uso de produtos químicos na limpeza dos módulos (Costa, 2017).

2.3.2 Desafios

Custos – conforme já exposto, essa tecnologia é recente e está em ritmo de crescimento, levando em consideração o conhecimento técnico e científico ao redor do mundo, cujas primeiras instalações datam de 2007. No entanto, uma das suas desvantagens são os custos associados a Implantação, Operação e Manutenção das usinas, principalmente, quando comparados com os sistemas convencionais em terras. Por se tratar de uma tecnologia nova, as estruturas de flutuadores, ainda estão sendo testadas e aprimoradas, são caras e representam grande parte dos custos do investimento inicial. A estrutura dos flutuadores precisa ser projetada para que se mantenha flutuante, uso de materiais resistentes aos altos índices de umidade, que resista às variações do nível d´água dos reservatórios, correntezas e

ventos (Sahu, Yadav e Sudhakar, 2016), cujas adversidades impactam na performance e vida útil das usinas. Outros pontos importantes a serem observados são os critérios técnicos e de segurança necessários para implantação e operação dessas usinas, tendo em vista estruturas elétricas submersas e tipos de materiais de fácil propagação de fogo, exigindo formação de mão de obra qualificada.

3 ESTUDO DE CASO – UHE GOVERNADOR PEDRO VIRIATO PARIGOT DE SOUZA

A UHE Governador Pedro Parigot de Souza (GPS), também conhecida como Capivari-Cachoeira, está localizada no estado do Paraná, a 50 km de Curitiba, conforme FIGURA 5. A Casa de Máquinas está instalada no município de Antonina/PR, enquanto o reservatório está situado no município de Campina Grande do Sul/PR, no rio Capivari.

FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DA UHE GOVERNADOR PEDRO PARIGOT DE SOUZA

FONTE: Imagens Google Earth (2022)

A usina possui uma potência instalada de 260 MW, cujo arranjo é composto por uma barragem de terra de 58 metros de altura e 370 metros de comprimento. A partir desse barramento, as águas são desviadas para o rio Cachoeira, que atravessa a serra do mar por estruturas hidráulicas (túnel e conduto subterrâneo), gerando um desnível de aproximadamente 750 metros. A área de drenagem é de 945 km², sendo o reservatório de 14,3 km². A casa de máquinas abriga 4 turbinas pelton, cuja potência nominal é de 65 MW.

3.1 DADOS DA UHE GPS

A TABELA 3 apresenta as informações técnicas da UHE GPS, cujos dados foram utilizados neste estudo de caso.

TABELA 3 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO PROJETO

Localização	*Rios Capivari e Cachoeira*
Bacia Hidrográfica	Atlântico - Trecho Sudeste
Sub-Bacia Hidrográfica	Ribeira
Município margem direita	Campina Grande do Sul/PR
Município margem esquerda	Bocaiúva do Sul/PR
Tipo	Regularização
Coordenadas geográficas da usina	25º08'18" S 48º52'28" W
Potência Instalada (MW)	260,0
Queda Bruta média (m)	746,8
Número de Turbinas	4 (Pelton)
Vazão normal unitária (m³/s)	10,0
Vazão de estiagem absoluta (m³/s)	4,0
Entrada em Operação	1970
Área de Drenagem total até a barragem (km²)	945,0
N.A Máximo Normal	845,0
N.A Mínimo Operacional	822,0
Volume N.A Máximo Normal (x106 m³)	225,67
Volume N.A Mínimo Operacional (x106 m³)	25,75
Área no N.A Máximo Normal (km²)	14,23

FONTE: Jakobsson (2019)

3.2 CRISE HÍDRICA NO PARANÁ

Em 2020 a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) implantava o rodízio de abastecimento de água na região metropolitana de Curitiba, quando o nível dos reservatórios chegou a estar abaixo de 30%. Os primeiros cinco meses deste ano acumulavam 188 mm de chuva, conforme dados da estação do Inmet de Curitiba. A média histórica para o período é de 665 mm, o que significa que em 2020 choveu, nos cinco primeiros meses do ano, 71,7% menos do que a média. De acordo com o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), apenas em duas ocasiões Curitiba apresentou índices mais baixos do que estes, sendo em 1980, quando de janeiro a maio, foram registradas precipitações acumuladas de 115,4 mm e, 1981, com 27,7 mm (KOWALSKI, 2020).

De acordo com ONS (2021), o período de setembro de 2020 a junho de 2021, foi verificada a pior sequência hidrológica de vazões de todo o período histórico compreendido entre os anos de 1931 até 2021.

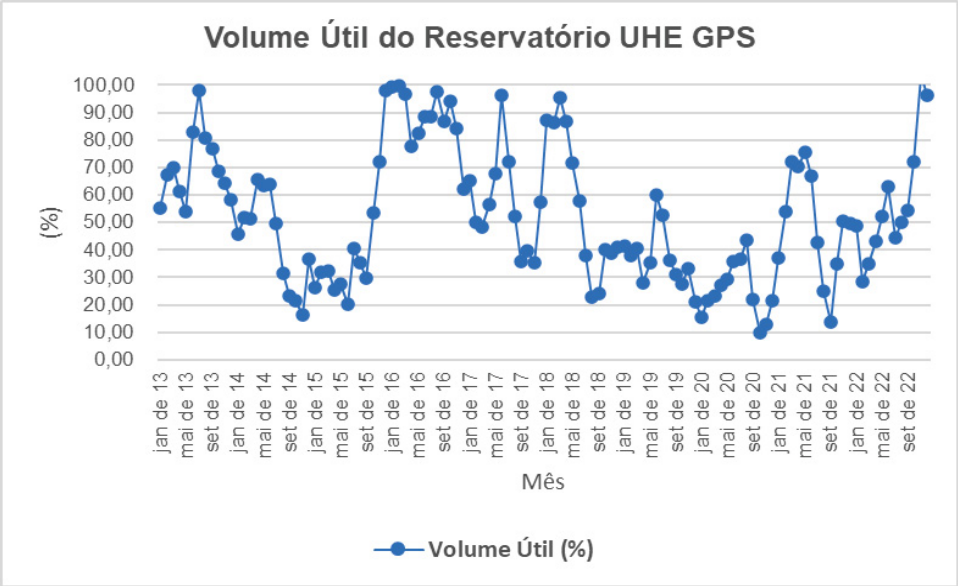
Diante deste cenário, foram várias as ações tomadas pela SANEPAR, além da implantação do rodízio, foram realizadas diversas campanhas de conscientização para a população a fim de demonstrar a gravidade da crise de estiagem e de abastecimento. E outras ações em paralelo, que também contribuíram para amenizar a crise de abastecimento, os sistemas de transposições de rios para as represas de abastecimento. Dada a importância, desse conjunto de medidas tomadas, foi inaugurado em outubro de 2021 a transposição do rio Capivari para a represa do Iraí, em Colombo/PR. A obra estava prevista inicialmente para 2025 e foi antecipada pela SANEPAR para minimizar os impactos da crise hídrica. A obra que tem caráter emergencial busca atender a demanda da região do Sistema Integrado de Abastecimento de Curitiba (SAIC) durante a estiagem com a vazão de cerca de 700 l/s.

Diante do exposto, a UHE GPS foi escolhida para o estudo de caso devido a sua localização e relevância para contribuição no sistema de abastecimento de água de Curitiba e região metropolitana e garantir outros usos da bacia do rio Capivari a jusante do reservatório, além dos fatores de potência instalada, área alagada e usina cujo reservatório possui regularização de vazões.

3.3 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA DA USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NO RESERVATÓRIO DA UHE GPS

Conforme exposto anteriormente, sobre a crise hídrica no Brasil e o racionamento de água na região metropolitana de Curitiba, o ano de 2020 contribuiu para os baixos níveis de água dos reservatórios, na FIGURA 6 é apresentado o histórico de operação dos últimos 10 anos, compreendido o período de janeiro 2013 a dezembro de 2022, relativo ao volume útil do reservatório da UHE GPS. É possível observar que em outubro de 2020 o reservatório operou com apenas 10% do volume útil do reservatório, sendo o nível mais baixo atingido para o período analisado. Os dados foram obtidos do banco de dados do site do ONS, disponível em: - https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx

FIGURA 6 – VOLUME ÚTIL DO RESERVATÓRIO (UHE GPS)



FONTE: Adaptado ONS (2023)

O estudo de caso propõe avaliar os benefícios energéticos e estratégicos com a implantação de usinas fotovoltaicas flutuantes no reservatório da UHE GPS. Para determinação da planta solar no reservatório inicialmente foi utilizado como critério o somatório das vazões de estiagens da UHE GPS e da obra de transposição do rio Capivari, tendo como principal objetivo a garantia e preservação do sistema de abastecimento de água e outros usos da bacia, nos períodos de estiagem extrema da região, e contribuir para uma melhor gestão e planejamento das águas do reservatório para geração de energia, já que durante o dia com a geração solar a geração hidráulica poderia ser preservada.

Assim, considerando o somatório dessas duas variáveis e, considerando as características do arranjo da UHE GPS (queda, rendimento da turbina, indisponibilidades e perdas hidráulicas) a vazão de 4,7 m³/s (4,0 + 0,7) seria suficiente para gerar uma potência instalada de aproximadamente 30,0 MW. Assim, o próximo passo foi estabelecer os parâmetros para determinar a área de cobertura do reservatório para atender a potência instalada de 30,0 MW. Para isto, foram estabelecidas as seguintes premissas:

Irradiação solar – com base no banco de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) foi determinada como referência a irradiação solar diária média mensal, em kWh/m².dia;

Plano Horizontal – adotado como valor base para inclinação dos módulos em todos os casos 0º, orientados pelo plano horizontal.

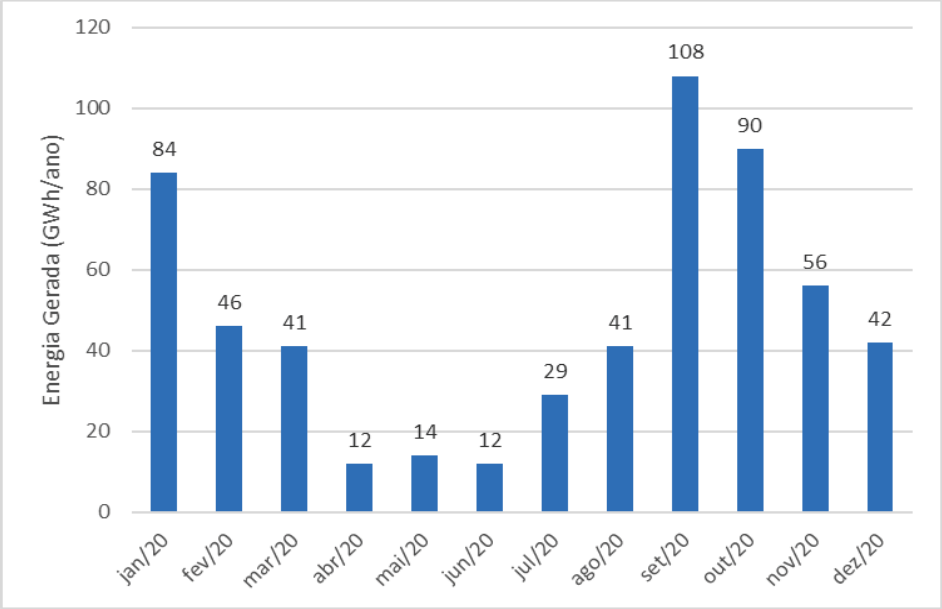
Painéis solares – adotado potência dos painéis solares de 550 W, cujas dimensões são: 2279 x 1134 x 35 mm;

Fator de capacidade – Foi adotado um Fator de Capacidade médio considerando todas as usinas solares contempladas no SIN (operação em teste);

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Estabelecidas as considerações e análises realizadas, a estimativa do potencial de geração da usina fotovoltaica, com base nos critérios de vazões de estiagem, mostrou que é possível gerar uma energia de 52,6 GWh/ano, cujo montante poderia atender o somatório das energias geradas entre os meses de maio/2020 e julho/2020, período que corresponde aos menores níveis de água do reservatório, ou um incremento de aproximadamente 8,4% da energia gerada na UHE GPS. Para esta configuração, o reservatório receberia a instalação de 54.646 módulos fotovoltaicos, o equivalente a 2% da cobertura do reservatório. A FIGURA 7 ilustra o histórico de produção de energia da UHE GPS e a TABELA 4 apresenta as principais características da usina fotovoltaica flutuante.

FIGURA 7 – PRODUÇÃO DA ENERGIA GERADA NO ANO DE 2020 - UHE GPS



FONTE: Autor (2023)

TABELA 4 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NO RESERVATÓRIO DA UHE GPS

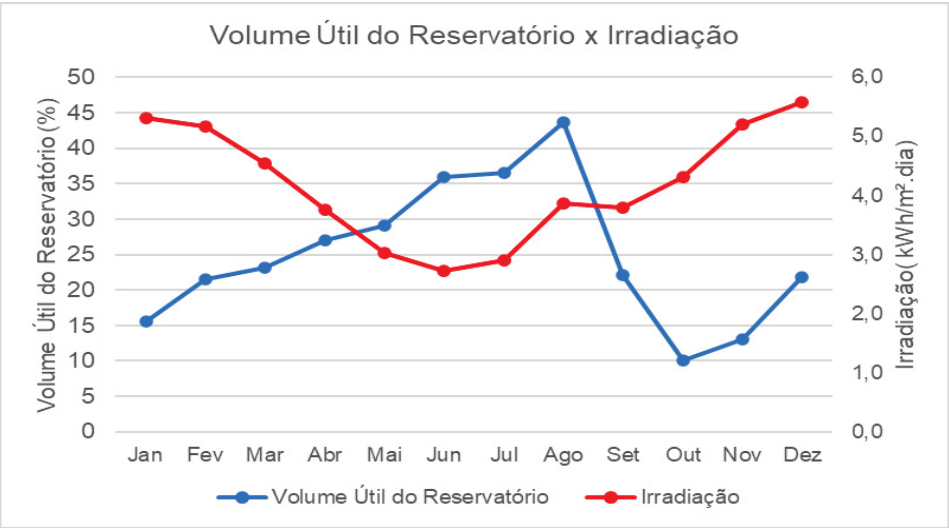
UHE	***Pot. Instalada (MW)***	***Energia produzida (GWh/ano)***	***Área do Reservatório (km²)***		
Governador Parigot de Souza	260,0	575,0*	14,3		
Potência estimada UFF (MWp)	Irradiação no Plano Horizontal (kWh/m².dia)	Área do Reservatório utilizada (km²)	Quant. Painéis solares	Estimativa da Energia produzida pela UFF (GWh/ano)	Incremento de Energia
30,0	4,1	0,3	54.646	52,6	8,38%

FONTE: Autor (2023)

LEGENDA:* Energia Gerada (GWh/ano): Considerando a geração UHE GPS no ano de 2020.

Outro ponto relevante foi a constatação de que a usina flutuante poderia contribuir para armazenar água nos períodos em que a operação do reservatório se mostra com os menores níveis de água, conforme apresentado na FIGURA 8, criando uma importante alternativa para garantir que os outros usos da água na bacia sejam priorizados, além da geração de energia.

FIGURA 8 – COMPARAÇÃO DO VOLUME ÚTIL COM A IRRADIAÇÃO SOLAR LOCAL



FONTE: Autor (2023)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de usinas híbridas com solar e hidrelétricas se apresenta como uma importante alternativa de acréscimo de energia e potência para a matriz elétrica brasileira, tendo em vista o potencial das hidrelétricas no Brasil. Dada a importância dos acordos mundiais sobre as mudanças climáticas e redução dos gases de efeito estufa, o país se mostra alinhado com as tendências mundiais, cujas projeções são de crescimento para as energias renováveis, em especial a solar e eólicas. Diante desse contexto, a combinação das fontes solar e hidráulica podem apresentar diversos benefícios com esta operação conjunta, dentre elas podemos destacar:

Segurança e Eficiência Energética – contribuição para operação mais estável do sistema elétrico, devido a geração conjunta evitar ociosidades nas redes de transmissão/distribuição. O fato de os módulos operarem em temperaturas mais baixas sobre a água, permitem maior desempenho e eficiência de até 20% em relação aos sistemas fotovoltaicos em solos. Ademais, a diversificação das fontes, contribuindo para inserção de fontes renováveis, buscando diminuir a dependência por fontes não renováveis.

Redução da Evaporação – o cobrimento do reservatório contribui para diminuir o calor sobre a superfície da água, interferindo diretamente sobre evaporação. Estudos mostram que quanto mais significativa é a cobertura sobre o reservatório, melhores são os resultados da redução da evaporação, no entanto devem ser considerados os impactos ambientais sobre essa cobertura. A literatura mostra que o cobrimento de 25% da superfície do reservatório, poderia evitar a perda por evaporação em torno de 6,3%, contribuindo para o aumento da disponibilidade de água no reservatório.

Redução dos Custos de Energia – a configuração híbrida com hidrelétricas elimina os custos de aquisição ou de arrendamentos de terras. Outros fatores importantes são: o aproveitamento da infraestrutura já existente (estruturas de conexão da rede), otimização dos custos de operação e manutenção, logística e infraestrutura existente.

Outra vantagem, seria o armazenamento de água nos períodos em que a geração solar está disponível, permitindo a economia de água. Sob essa ótica, teríamos a oportunidade de amenizar as cobranças das bandeiras tarifárias.

No caso específico do estudo de caso da UHE GPS, demonstrou que a geração de energia de 52,6 GWh/ano representa 8,4% de incremento de energia à hidrelétrica, cuja configuração da usina representa 2% do cobrimento do reservatório. Além disso, observou-se que há a possibilidade de contribuição da geração solar para os períodos em que os reservatórios operam com níveis mínimos, podendo ser estratégico para garantir o abastecimento de água da região metropolitana de Curitiba, bem como os outros usos da bacia hidrográfica (geração de energia, lazer, turismo, vazão ecológica etc.)

No entanto, apesar dessas vantagens, a tecnologia é recente e está em ritmo de crescimento. Dessa forma, a tecnologia ainda se mostra com custos elevados quando comparados com os sistemas convencionais em solo, devido as complexidades associadas a implantação, operação e manutenção do empreendimento. Assim, conclui-se que os benefícios associados à tecnologia são interessantes, dado o potencial disponível e as vantagens provenientes da combinação das fontes solar e hidráulica, e que se tornarão competitivas à medida que a tecnologia seja cada vez mais difundida no mercado.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL Nº 954, de 30 de novembro de 2021**. Estabelece tratamento regulatório para implantação de Central Geradora Híbrida (UGH) e Centrais Geradoras Associadas. Disponível em:<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021954.html>. Acesso em 05/03/2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL Nº 876, de 10 de março de 2020**. Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização para exploração e à alteração da capacidade instalada de centrais geradoras Eólicas, Fotovoltaicas, Termelétricas, Híbridas e outras fontes alternativas, bem como para centrais geradoras associadas que contemplem essas tecnologias de geração, e à comunicação de implantação de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020876.pdf. Acesso em 07/05/2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL Nº 666, de 23 de junho de 2015**. Regulamenta a contratação do uso do sistema de transmissão em caráter permanente, flexível, temporário e de reserva de capacidade, as formas de estabelecimento dos encargos correspondentes e dá outras providências. Disponível em: https://www.traderenergia.com.br/imagens/site_merdaco_livre_legislacao/ren2015.666.pdf. Acesso em 07/05/2023.

BARROS, Rafaella. **Intermitente, Energia Renovável sobrecarrega rede Elétrica.** PODER 360, 2022. Disponível: https://www.poder360.com.br/brasil/intermitente-energia-renovavel-sobrecarrega-rede-eletrica/. Acesso: 20/03/2023.

BEN. Balanço Energético Nacional 2022 – **Relatório Síntese**. Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética: MME/EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Consolidação%20dos%20Resultados.pdf. Acesso em: 06/02/2023.

CANAL ENERGIA. **MME lança programa de Energia Solar sobre flutuadores em Sobradinho, 2016.** Disponível em: https://www.canalenergia.com.br/noticias/4927280/mme-lanca-programa-de-energia-solar-sobre-flutuadores-em-sobradinho. Acesso em: 07/03/2023.

CESCON BARRIEU. **Novas Regras para Implantação de Usinas de Energias Híbridas**. 2021. Disponível: https://www.cesconbarrieu.com.br/cesconbarrieuinsights/novas-regras-para-a-implantacao-de-usinas-hibridas-. Acesso: 15/03/2023.

COSTA, S. G. **Impactos ambientais de sistemas fotovoltaicos flutuantes, 2017**. p.146. Tese (Mestrado integrado em Engenharia de Energia e Ambiente) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.

CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata. Acesso: 15/03/2023.

CRESP. Centro de Referência em Energia Solar em Petrolina. **Usina Solar Flutuante de Sobradinho** - 2019. Disponível em: https://www.chesf.com.br/pdi/Documents/Usina%20Solar%20Flutuante.pdf. Acesso: 18/03/2023.

DELGADO, Fernanda; FILGUEIRAS, Raquel. Energia – **A Crise do setor de óleo e gás e os desafios da transição energética. 2022**. Disponível em: https://ibre.fgv.br/sites/ibre.fgv.br/files/arquivos/u65/04ce2022_fernanda_delgado.pdf . Acesso: 05/02/2023.

DESSBORN, L.; HESSEL, R.; ELMBERG, J. **Geese as vectors of nitrogen and phosphorus to freshwater systems**. Inland Waters, v. 6, n. 1, p. 111-122, 2016.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Avaliação da Geração de Eólico-Fotovoltaicas – Proposta metodológica e estudo de caso - 2017**. Nota Técnica, 2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-214/Metodologia%20para%20avaliação%20de%20usinas%20híbridas%20eólico-fotovoltaicas.pdf. Acesso: 06/03/2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2022** (BEN, 2022) – RELATÓRIO SÍNTESE. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_Síntese_2022_PT.pdf. Acesso em 05/02/2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050 - 2018**. Nota Técnica, 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/03.%20Potencial%20de%20Recursos%20Energéticos%20no%20Horizonte%202050%20(NT%20PR%2004-18).pdf. Acesso em 05/04/2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Solar Fotovoltaica Flutuante – Aspectos Tecnológicos e Ambientais Relevantes ao Planejamento - 2020**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-466/NT%20Solar%20Fotovoltaica%20Flutuante.pdf. Acesso em 28/02/2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Usinas Híbridas - Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento - 2018**. Nota Técnica, 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/NT%20EPE-DEE-NT-011-2018-r0%20%28Usinas%20híbridas%29.pdf. Acesso: 06/03/2023.

FARFAN, J.; BREYER, C. **Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: a virtual battery of great global potential**. Energy Procedia, v.155, p.403-411, 2018.

FOTOVOLT. **UFV flutuante entra em operação na PCH Santa Marta**, 2023. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/fotovolt/noticia/6260-UFV-flutuante-entra-em-operacao-na-PCH-Santa-Marta. Acesso: 27/03/2023.

IBERDROLA. **Instalaremos no Brasil nossa primeira usina solar fotovoltaica flutuante, 2023**. Disponível em: https://www.iberdrola.com/sala-comunicacao/noticia/detalhe/instalaremos-no-brasil-nossa-primeira-usina-solar-fotovoltaica-flutuante. Acesso: 27/03/2023.

IEA – International Energy Agency. **Energy Statistics Data Browser**. 2022. Disponível em:https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource. Acesso: 12/04/2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net Zero by 2050: **a roadmap for the global energy sector**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050. Acesso em: 12/04/2023.

JAKOBSSON, T.V.F. **Projeto conceitual do sistema hidráulico de uma Usina Hidrelétrica. 2019**. 93p. Projeto de Graduação - Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

KOWALSKI, Rodolfo Luis. **Crise Hídrica em Curitiba é uma das mais graves em 60 anos.** Bem Paraná, Curitiba, 09/06/2020. Disponível em: https://www.bemparana.com.br/noticias/parana/crise-hidrica-em-curitiba-e-uma-das-mais-graves-em-60-anos/. Acesso: 20/04/2022.

LOPES, M. P. C. et al. **Technical potential of floating photovoltaic systems on artificial water bodies in Brazil**. Renewable Energy, v.181, p.1023-1033, 2022.

MME – Ministério de Minas e Energia**. Hidrelétrica Balbina inicia projeto com flutuadores para gerar energia solar, 2017**. Disponível: https://www.cesconbarrieu.com.br/cesconbarrieuinsights/novas-regras-para-a-implantacao-de-usinas-hibridas-. Acesso: 15/03/2023.

ONS. Operador Nacional do Sistema: **Banco de Dados**. Disponível: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso: 10/03/2023.

PDE. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. **Consolidação dos Resultados**. Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética: MME/EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Consolidação%20dos%20Resultados.pdf. Acesso em: 06/02/2023.

REC. Riding the wave of solar energy: **Why floating solar installations are a positive step for energy generation**., p. NE-18-27, Rev D.2018, 2018. Disponível em: www.recgroup.com/sites/default/files/documents/wp_-_floating_pv_rev_d_web.pdf. Acesso em: 06/04/2023.

SAHU, A.; YADAV, N.; SUDHAKAR, K. **Floating photovoltaic power plant: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 66, p. 815-824, 2016.