

ERNANE ROSA MARTINS
(ORGANIZADOR)

SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO APLICADA

Atena
Editora
Ano 2022

ERNANE ROSA MARTINS
(ORGANIZADOR)

SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO APLICADA

Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Sistemas de energia elétrica e computação aplicada

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Yaidy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Ernane Rosa Martins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S623 Sistemas de energia elétrica e computação aplicada /
Organizador Ernane Rosa Martins. – Ponta Grossa - PR:
Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0661-7

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.617222209>

1. Energia elétrica. 2. Computação. I. Martins, Ernane
Rosa (Organizador). II. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) são compostos por complexos equipamentos e instalações, distribuídos ao longo de extensas regiões geográficas, que tem por objetivos a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica. A Computação Aplicada, por sua vez, é o campo de estudo voltado para a análise e resolução de problemas utilizando como ferramenta o computador.

Dentro deste contexto, esta obra aborda diversos assuntos relevantes, tais como: A avaliação da viabilidade técnica e econômica de uso do sistema PV-BESS por meio de índices financeiros como o Payback e ROI (Return of Investment); A múltipla finalidade do Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM), a partir do desenvolvimento de um software voltado a criação de relatórios e sua validação; os conceitos do Growth Hacking, as estratégias e ferramentas utilizadas, a construção de um projeto de software base (template) com as referidas técnicas e avaliar estatisticamente qual impacto que uma boa página de vendas, projetada para alto desempenho, conversão e lucratividade poderá ter para o sucesso de uma organização no meio online; O papel de um sistema de armazenamento de energia elétrica (SAEE) sob a forma de hidrogênio na integração entre a geração solar fotovoltaica e a geração hidrelétrica; As principais características dos sistemas SCADA e os critérios para sua proteção em um ambiente de crescente interconectividade.

Sendo assim, os trabalhos que compõe esta obra permitem aos seus leitores, analisar e discutir os diversos assuntos interessantes abordados. Por fim, desejamos a cada autor, nossos mais sinceros agradecimentos por suas contribuições, e aos leitores, desejamos uma excelente leitura com excelentes e novas reflexões.

Ernane Rosa Martins

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE PV + BESS EM UMA UNIDADE RESIDENCIAL EM TOLEDO-PR

Vitor Finger Tureta
Joylan Nunes Maciel
Marco Roberto Cavallari
Jorge Javier Gimenez Ledesma
Oswaldo Hideo Ando Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6172222091>

CAPÍTULO 2..... 21

CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO URBANO: UM ESTUDO DE CASO A PARTIR DE RELATÓRIOS GERADOS UTILIZANDO UM BANCO DE DADOS CADASTRAIS

Alexandre Rabello Ordakowski
Jonata S. Rodrigues
Marcelo Leandro Holzschuh

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6172222092>

CAPÍTULO 3..... 30

CONSTRUINDO LANDING PAGES DE VENDAS DE ALTO DESEMPENHO, CONVERSÃO E LUCRATIVIDADE

Igor Brown Ramos
Marco Antônio Pereira Araújo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6172222093>

CAPÍTULO 4..... 48

INTEGRAÇÃO DA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA E SOLAR FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A HIDROGÊNIO JUNTO À UHE ITUMBIARA

Juarez Corrêa Furtado Júnior
Ennio Peres da Silva
Vitor Feitosa Riedel
Ana Beatriz Barros Souza
Hélio Nunes de Souza Filho
Demóstenes Barbosa da Silva
Diogo Hernandez de Oliveira Barbosa
Jacinto Maio Pimentel

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6172222094>

CAPÍTULO 5..... 67

SUGESTÕES PARA CRITÉRIOS DE SEGURANÇA PARA SISTEMAS SCADA EM REDE CORPORATIVA - POR QUE E COMO PROTEGER

Lucas Becker
Alexandre Acácio de Andrade
Júlio Francisco Blumetti Facó

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6172222095>

SOBRE O ORGANIZADOR.....	82
ÍNDICE REMISSIVO.....	83

CAPÍTULO 4

INTEGRAÇÃO DA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA E SOLAR FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A HIDROGÊNIO JUNTO À UHE ITUMBIARA

Data de aceite: 01/09/2022

Juarez Corrêa Furtado Júnior

Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético-Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade Estadual de Campinas
<http://lattes.cnpq.br/5992535506918773>

Ennio Peres da Silva

Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético-Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade Estadual de Campinas
<http://lattes.cnpq.br/7253800571271613>

Vitor Feitosa Riedel

Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético-Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade Estadual de Campinas
<http://lattes.cnpq.br/6161320131814638>

Ana Beatriz Barros Souza

Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético-Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade Estadual de Campinas
<http://lattes.cnpq.br/4180199978485278>

Hélio Nunes de Souza Filho

Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético-Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade Estadual de Campinas
<http://lattes.cnpq.br/1515829599674249>

Demóstenes Barbosa da Silva

Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético-Universidade Estadual de Campinas
<http://lattes.cnpq.br/0483053621333179>

Diogo Hernandez de Oliveira Barbosa

Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético-Universidade Estadual de Campinas

Jacinto Maio Pimentel

Furnas Centrais Elétricas S.A.

RESUMO: Dado o crescimento da participação das fontes renováveis junto a matriz elétrica brasileira, faz-se necessariamente a análise da integração entre as diferentes fontes de geração de energia elétrica, avaliando a necessidade de inserção de novas tecnologias. Dessa forma, tendo em vista a magnitude do parque gerador hidrelétrico brasileiro, tem-se a possibilidade entre a integração hidro-solar, aproveitando parte da infraestrutura disponível decorrente da redução do regime de precipitações, bem como aproveitar as áreas dos reservatórios que podem ser utilizadas para inserção de plantas solar fotovoltaicas flutuantes (FVF). Dado esse contexto, neste capítulo é apresentado o papel de um sistema de armazenamento de energia elétrica (SAEE) sob a forma de hidrogênio na integração entre a geração solar fotovoltaica e a geração hidrelétrica. Essa integração é um dos objetos de estudo do projeto de pesquisa e desenvolvimento PD 00394-1606/2016, conduzido por Furnas Centrais Elétricas S.A., no âmbito da Chamada Estratégia número 21 da ANEEL. Também é apresentada uma simulação do modo de operação do conjunto hidráulico/solar fotovoltaico na usina hidrelétrica (UHE) de Itumbiara, considerando o dimensionamento da planta FVF e SAEE para 3 estudos de caso.

PALAVRAS-CHAVE: Armazenamento de Energia Elétrica. Geração Solar. Hidrogênio. Integração Hidráulico/Solar. Planta Solares Flutuantes.

ABSTRACT: Given the growth in the share of renewable sources in the Brazilian electrical matrix, it is necessary to analyze the integration between the different sources of electricity generation, evaluating the need to introduce new technologies. In this way, in view of the magnitude of the Brazilian hydroelectric generating park, there is a possibility between hydro-solar integration, taking advantage of part of the available infrastructure resulting from the reduction of the rainfall regime, as well as taking advantage of the areas of the reservoirs that can be used for the insertion of floating photovoltaic solar plants (PVF). Given this context, this chapter presents the role of an electric energy storage system (ESS) in the form of hydrogen in the integration between photovoltaic solar generation and hydroelectric generation. This integration is one of the objects of study of the research and development project PD 00394-1606/2016, conducted by Furnas Centrais Elétricas S.A., within the scope of ANEEL's Call for Strategy number 21. A simulation of the operation mode of the photovoltaic hydraulic/solar set in the hydroelectric power plant (HPP) of Itumbiara is also presented, considering the sizing of the FVF and SAEE plant for 3 case studies.

KEYWORDS: Solar generation; Hydraulic/Solar Integration, Floating Photovoltaic Plants, Energy Storage, Hydrogen.

1 | INTRODUÇÃO

O setor elétrico Brasileiro atravessa uma transformação no que diz respeito a composição das suas fontes de produção de energia elétrica. A partir de dados do ONS (Operação Nacional do Sistema Elétrico), no ano 2000 é composto pela produção de 360,2 TWh de energia elétrica, dos quais 94,1 % eram oriundos da fonte hidráulica, com as fontes de geração térmica e nuclear sendo responsáveis pelo restante da geração, com as fontes renováveis não tendo participação na matriz energética. Já em 2021, a quantidade de energia produzida que aumentou para 603,2 TWh, de modo que a geração hidráulica contribuiu com 62,6% da geração de energia elétrica, as fontes térmicas e nuclear com 24,1%, e as fontes renováveis, representadas pela geração eólica e solar fotovoltaica, foram responsáveis por 13,3% da geração de energia elétrica no Brasil (1). A Figura 1, apresenta a geração de energia anual para cada fonte de energia em 2000 e em 2021.

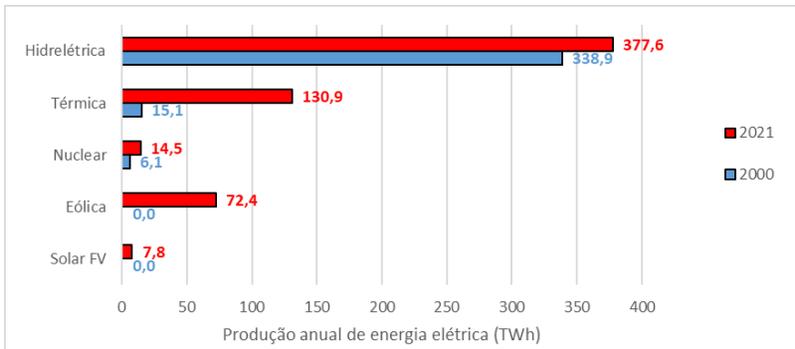


Figura 1: Geração de energia anual para cada fonte de energia em 2000 e 2021 (1)

Conforme a Figura 1, embora a dependência da fonte hidrelétrica esteja diminuindo, essa fonte ainda é a principal fonte utilizada no suprimento de energia elétrica no país. Assim, instabilidades no regime hídrico, principalmente períodos de estiagem mais intensos, decorrentes de fatores naturais e/ou das mudanças climáticas, impactaram negativamente na geração de energia elétrica no Brasil. Como consequência, a tendência de redução da capacidade de armazenamento do parque gerador hidrelétrico interligado tem ocasionado uma diminuição da capacidade de resposta do sistema a essas instabilidades (2). As fontes renováveis, que em 2000 eram irrelevantes no que concerne a matriz elétrica, tem desempenhado um papel de protagonismo na expansão da produção de energia elétrica, de modo que geração eólica e solar fotovoltaica (FV) contribuíram com 12,0% e 1,3% da produção de energia elétrica respectivamente em 2021 (1). Há projeções de que essa participação aumente nos próximos anos, de modo que em 2029 forneçam cerca de 20% do consumo energético no Brasil (3). Destaca-se a geração solar FV, que deve aumentar a sua capacidade instalada em cerca de 6 vezes até 2029, e têm apresentado quedas consistentes nos preços de contratação de energia desde 2015, com preços inferiores a R\$ 100/MWh (4). Nesse contexto, a associação da geração hidráulica com outras fontes renováveis, notadamente solar e eólica, pode contribuir para diversificar a capacidade de geração elétrica nacional.

Dado a previsão de um aumento relevante da participação da geração solar FV na matriz energética nacional, faz-se necessário prever alternativas que minimizem alguns efeitos indesejáveis inerentes a essa fonte, tais como: intermitências e sazonalidades; variações de frequência; entrada e saída de grandes blocos de energia em intervalos de tempo reduzidos (<1 minuto); e recomposição do sistema a partir de desligamentos parciais ou total. Essas características comprometem a qualidade da energia elétrica produzida e a confiabilidade do suprimento através dessa fonte solar (2). O uso de tecnologias de armazenamento de energia elétrica pode contribuir para a mitigar os efeitos inerentes à intermitência e à sazonalidade, podendo ser vistas como solução para o enfrentamento dos

desafios técnicos oriundos de uma maior participação das fontes renováveis no suprimento de energia. Os SAAE podem ser associados ao armazenamento hidráulico, contribuindo para a operação desses sistemas, além de auxiliar na integração da geração hidro/solar (5). As tecnologias que utilizam o H_2 , em particular, têm a capacidade de armazenar grandes quantidades de energia, por elevados períodos, sem que ocorram grandes perdas (6).

Dessa forma, o armazenamento permite maximizar o aproveitamento da energia renovável, de modo que nos períodos de elevada oferta dessas fontes, a parcela que excede a demanda é armazenada. O montante armazenado pode ser utilizado nos períodos de elevada demanda, contribuindo para uma maior estabilidade do sistema, além de maior penetração das fontes renováveis (4). A Figura 2, que apresenta um sistema de armazenamento de energia na forma de hidrogênio, operando conforme a oferta e a demanda de energia.

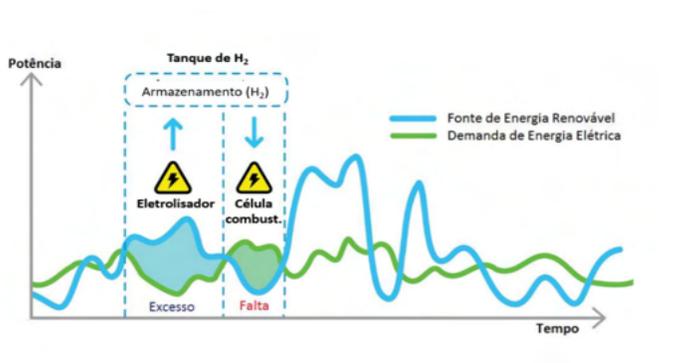


Figura 2 – Esquema de oferta e demanda de energia e atuação de um SAAE de H_2 .

Ainda com custos relativamente elevados, os sistemas de armazenamento são tecnologias com potencial de ser amplamente empregados junto ao sistema elétrico, para promover o aumento da penetração das fontes renováveis de energia, auxiliando a penetração do sistema como um todo (2). No Brasil, visando a promoção da área de armazenamento de energia, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) fez uma chamada pública de projetos que atendam à temática do armazenamento, Chamada ANEEL N.º 021/2016 - Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”. Trata-se de uma iniciativa para dar início às abordagens experimentais do tema no contexto nacional (1), que totalizou investimentos de R\$406 milhões (valores de 2019) (7). No âmbito da Chamada n.º 21, publicada pela ANEEL em 2016, as Centrais Elétricas FURNAS estão desenvolvendo um projeto de pesquisa e desenvolvimento que visa avaliar a aplicabilidade de novas tecnologias de armazenamento de energia, em suporte à sinergia entre as fontes solar fotovoltaica e hidrelétrica. Esse projeto está sendo realizado junto à Usina Hidrelétrica

de Itumbiara, localizada no rio Paranaíba, entre os municípios de Itumbiara, em Goiás, e Araporã, em Minas Gerais. Foi instalada uma planta fotovoltaica com 1 MW_p de potência instalada, sendo que 800 kW_p foram montados solo, e os 200 kW_p restantes foram instalados em estruturas flutuantes no lago do reservatório da usina.

A partir da planta solar FV é possível armazenar uma quantidade de eletricidade equivalente à energia gerada a partir da irradiação solar, sob a forma de energia potencial no reservatório da usina hidrelétrica, através da redução do turbinamento, o que constitui um instrumento de controle do nível do reservatório. Além da utilização do reservatório como sistema de armazenamento de sazonalidades, as intermitências da fonte solar são compensadas com a utilização dos SAEE com hidrogênio e baterias, a médio prazo, no horizonte de meses, e a curto prazo, no horizonte de minutos, horas ou alguns dias. Essa operação conjunta das duas fontes primárias de energia permite um melhor aproveitamento de ambas, resultando em uma eficiência maior do conjunto, com potenciais benefícios para a confiabilidade do sistema, para a redução de riscos de déficit hidrológicos e para a redução do custo de geração de energia, além de benefícios ambientais, pelo deslocamento de fontes termelétricas e consequente redução de consumo de combustíveis fósseis.

Dentre as vantagens da utilização de sistemas de geração solar fotovoltaicos junto a usinas hidrelétricas, tem-se a utilização da infraestrutura já existente, como as subestações e linhas de transmissão, para escoar a energia produzida. Além disso, há um melhor desempenho dos painéis fotovoltaicos devido ao efeito de refrigeração da água em sistemas flutuantes, e também uma redução dos trâmites relacionados ao licenciamento ambiental. Uma das etapas desse projeto consiste na avaliação dos aspectos energéticos relacionados à integração hidro-solar, operando em conjunto com um sistema de armazenamento a hidrogênio. Essa integração permite tanto aumentar a capacidade de geração, como uma melhor gestão do reservatório, economizando água nos momentos de abundância solar e utilizando o montante economizado nos momentos de menor geração renovável. Neste trabalho são mostrados os aspectos energéticos acerca da integração das fontes hidráulica e solar, operando em conjunto com o sistema de armazenamento a hidrogênio, composto por um eletrolisador, um tanque pressurizado e uma célula a combustível (CaC). Para isso, foram utilizados os dados de geração elétrica de Itumbiara compreendidos entre 2000 e 2021, apontando os dimensionamentos dos sistemas fotovoltaicos que incrementam as capacidades de geração do conjunto das duas fontes demarcando o que pode ser gerado com o sistema de armazenamento.

2 | HISTÓRICO DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM ITUMBIARA

A usina hidrelétrica (UHE) de Itumbiara, operada por Furnas Centrais Elétricas S.A., localizada no rio Paranaíba, instalada no município de Araporã–MG, fronteira com o município de Itumbiara–GO. Essa UHE possui potência fiscalizada de 2.082 MW e possui grande

importância te estratégica para o SIN, em virtude da sua capacidade de armazenamento do seu reservatório, capaz de estocar cerca de 8 % do volume represável pelos reservatórios do Sistema Sudeste/Centro Oeste (1). Conforme dados do ONS, disponíveis em (1) desde 2000 houve uma tendência de redução das precipitações na bacia que contempla a área do reservatório da UHE de Itumbiara. Essa redução no regime hídrico devido a instabilidades e estiagens mais severas, tem como consequência a redução do volume útil do reservatório da usina de Itumbiara. Essa tendência de redução da vazão natural da usina, bem como do nível do reservatório, o que acarretam na redução da quantidade de energia elétrica produzida pela usina. A Figura 3 apresenta graficamente o histórico das médias mensais do nível do reservatório, e do percentual de potência fiscalizada gerada entre 2000 a 2021.

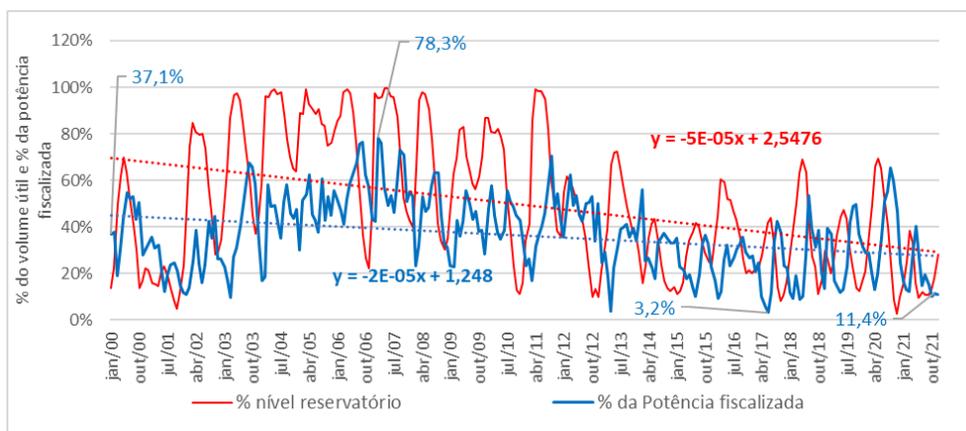


Figura 3: Histórico do nível do reservatório e da potência fiscalizada da gerada pela UHE de Itumbiara entre 2000 a 2021 (1).

Conforme a Figura 3, no período observado tem-se uma tendência da redução tanto do nível do reservatório, como da potência fiscalizada da UHE, com ambas apresentando linhas de tendência com coeficiente angular negativo. A média mensal de geração em janeiro de 2000 foi equivalente a 37,1% da potência fiscalizada, e em dezembro de 2021 esse valor foi de 11,4%. O maior valor de média mensal de geração elétrica foi observado em março de 2007, com a mediana das medias mensais geração hidrelétrica sendo de $744,9 \text{ MW}_{\text{med}}$, valor que corresponde a 35,8% da potência fiscalizada da UHE de Itumbiara.

Para compensar o déficit na geração hidráulica de Itumbiara, deve-se considerar o investimento na expansão da capacidade de geração, seja através de outras hidrelétricas, ou outras fontes. Um agravante a essa situação seria o uso de fontes fósseis de energia, tendo em vista os efeitos danosos ao ambiente e os maiores custos de geração de geração inerentes ao emprego dessa alternativa. Além disso, tem-se parte da infraestrutura da usina, como a subestação as linhas de transmissão sendo subutilizadas. Dessa forma, tendo em vista a ociosidade dessas infraestruturas, junto a disponibilidade de área do reservatório,

esse trabalho propõe-se a instalação de uma planta solar fotovoltaica flutuante, de modo que a energia solar complemente a geração hidráulica.

3 | GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM ITUMBIARA

As coordenadas geográficas da localização da UHE de Itumbiara são dadas 18°24'24"S e 49°5'40"W. De acordo com os dados do programa SunData que se destina ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional, fornecido pelo CRESESB existem 3 estações próximas a UHE de Itumbiara. Os dados utilizados foram da estação solarimétrica de Tupaciguara, devido ao fato de esta estação ser a mais próxima do reservatório da UHE, distando 4,8 km. Considerando um ângulo de inclinação igual a latitude de Itumbiara, o valor da média diária da irradiação solar corresponde a 5,47 kWh.m²dia⁻¹. Esses dados podem ser consultados na base de dados do CRESESB (8).

Para avaliar a operação da geração hidráulica integrada a geração solar fotovoltaica é necessário conhecer a distribuição da irradiação solar ao longo de um dia. A distribuição teórica da irradiação solar incidente no plano horizontal ao longo do dia, considerando um dia de céu claro, é apresentada na Figura 4, juntamente com a distribuição da irradiação solar incidente no plano com mesma inclinação da latitude de Itumbiara (9).

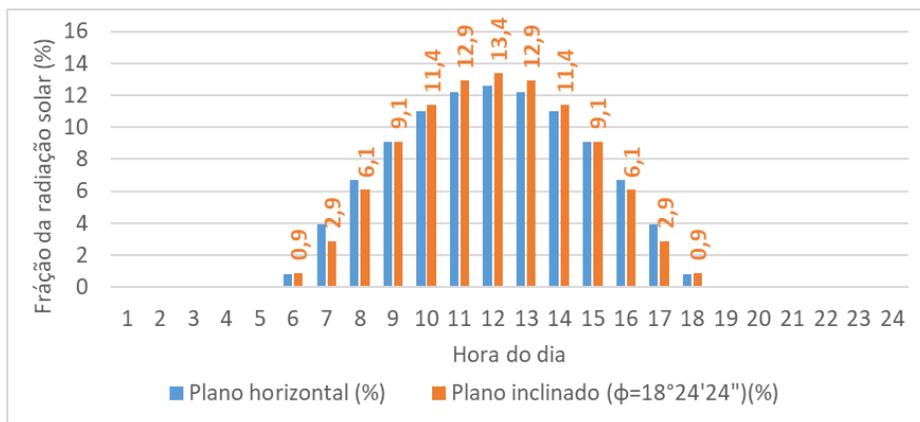


Figura 4 – Distribuição teórica da irradiação solar ao longo de um dia de céu claro no plano horizontal, e no plano com mesma inclinação da latitude de Itumbiara.

Após a definição dos dados solarimétricos da UHE de Itumbiara, é necessário selecionar o modelo do painel fotovoltaico a ser utilizado. No projeto de P&D de Itumbiara foram utilizados tanto na planta FV instalada em solo, como na planta FV flutuante, painéis do fabricante chinês Trina, modelo DE14H, com 390 W_p cada um, eficiência de 19,7 %, com área de 1,98 m² e possuem células solares monocristalinas. Em ambas instalações os

painéis fotovoltaicos foram instalados com uma inclinação de 20° com ângulo de azimute 0°. Os inversores de frequência selecionados para essa planta são do fabricante SMA, com 75 kW e tensão de 380 V. Para a planta de 800 kW_p instalada em solo, foram utilizados 2.052 painéis solares e 8 inversores. De modo análogo, para a planta flutuante de 200 kW_p foram utilizados 513 painéis com 2 inversores de frequência (9). Dessa forma, a potência do módulo selecionado corresponde a 390 W_p, de modo que produção diária média de cada painel fotovoltaico corresponde a 2,13 kWh (390 W_p x 5,47 kWh.m⁻².dia⁻¹).

4 | O SAAE NA FORMA DE HIDROGÊNIO INSTALADO

O SAAE a hidrogênio é composto essencialmente por um eletrolisador, um tanque de estocagem de hidrogênio e uma CaC. O eletrolisador é o equipamento responsável pela produção de H₂ gasoso através da eletrólise da água, a qual se processa por meio do fornecimento de energia elétrica em corrente contínua. O gás produzido fica armazenado nos tanques de estocagem até o momento oportuno para a sua utilização. Por fim, a CaC converte o H₂ gasoso em eletricidade, por um processo reverso ao da eletrólise, a qual pode ser despachada para a rede (4). A Figura 5 apresenta esquematicamente um sistema de armazenamento de energia sob a forma de hidrogênio.

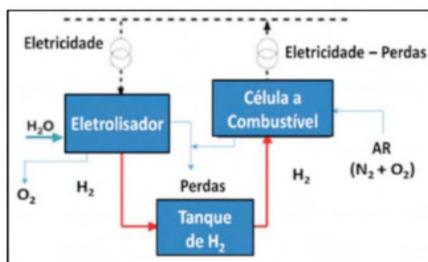


Figura 5 – Esquema de um SAAE sob a forma de hidrogênio.

O eletrolisador selecionado no projeto de P&D é do tipo alcalino, sendo fabricado pela empresa Belgo-Canadense *Hydrogenics*, cujo modelo HySTAT-50 tem capacidade máxima de produção de 50 Nm³/h, com potência instalada de 270 kW, produzindo H₂ com grau de pureza 99,995 %, a uma pressão de 27,5 bar. O tanque pressurizado foi produzido pelo fabricante brasileiro NITROTEC, que utilizou para a fabricação aço ASTM A 516 G70 com espessura de parede de 1". O volume físico para esse reservatório corresponde a 30 m³ com uma pressão de trabalho considerada de 30 bar, resultando em uma capacidade de armazenamento de 900 Nm³ o equivalente a 81 kg de H₂. A CaC selecionada utiliza a tecnologia PEM, também fabricada pela *Hydrogenics*. O modelo do equipamento utilizado é o HyPM-300, que tem capacidade máxima de 300 kW de eletricidade, a um consumo de 215 Nm³/h. Também serão instalados um banco de baterias de 500 kWh, para absorver

pequenas flutuações de carga (9).

Em plena carga, quando inicialmente vazio, são necessárias 18 horas para que o eletrolisador garanta a capacidade máxima do tanque de 900 Nm³ seja atingida, consumido 4.860 kWh de energia elétrica. Quando operando em capacidade máxima, a CaC demora 12,86 horas para consumir todo o hidrogênio do tanque, produzindo 1.255,8 kWh. É importante mencionar que o SAE permite que cargas com perfis variáveis (Normalização da carga, Horário de ponta, etc), possam ser atendidas a partir da fonte solar FV. Nesse caso o SAEE opera como um anexo a UHE, não interferindo na operação da UHE, injetando na rede elétrica energia renovável, substituindo fósseis em horários de maior demanda por fontes fósseis.

5 | INTEGRAÇÃO HIDRO-SOLAR NA UHE DE ITUMBIARA

O despacho de energia a partir das usinas hidrelétricas (UHE) é feito pelo ONS, tendo como critérios a avaliação de diversas variáveis que influenciam no preço da energia elétrica, como regime de precipitações, incidência de ventos, e de irradiação solar, dentre outras. Tais variáveis, que conferem ao despacho de energia a partir das UHE's um caráter imprevisível. Sendo assim, admite-se nas simulações de operação conjuntada UHE com a geração FV que a produção de energia elétrica a partir da UHE de Itumbiara seja constante ao longo do dia. Além disso, considera-se que tanto a geração de energia elétrica na planta FVF, como a injeção de dessa energia na rede elétrica não tenha influencia na geração hidráulica.

Assim, tendo em vista que a mediana da médias mensais de geração hidrelétrica em Itumbiara foi equivalente a 35,8% da capacidade mais de escoamento de energia através da subestação (valor que corresponde a 744,9 MW_{med}), admite-se que plantas FVF serão associadas da geração hidrelétrica de modo a operar de forma híbrida, de modo a aproveitar as instalações, equipamentos elétricos da UHE (transformadores, subestação, linhas de transmissão, etc), bem como a área disponível nos reservatórios, considerando 3 casos:

- **Caso 1:** Instalação de uma planta FV que permita uso total da capacidade disponível da UHE de Itumbiara, sem a instalação de um SAEE.
- **Caso 2:** Instalação de um conjunto composto por planta solar FV e SAEE que permita a injeção de energia elétrica de modo a maximizar a utilização da infraestrutura da UHE no horário de ponta.
- **Caso 3:** Instalação de um conjunto composto por planta solar FV, e SAEE que permita a injeção de energia elétrica de modo maximizar o aproveitamento da energia elétrica ao longo do dia.

5.1 Caso 1

Para aproveitar a capacidade máxima disponível na UHE de Itumbiara, foi dimensionada uma planta solar FVF que em seu pico de produção, gera um montante de energia que somado a geração hidráulica, equivale a capacidade máxima da UHE (2.082 MW_{med}). Tendo em vista que a geração hidrelétrica equivalente a 744,9 MWh, ao meio dia produção de energia elétrica pela planta FVF deve ser de 1.337,1 MWh. Esse valor equivale a 13,4% da energia total produzida ao longo de um dia de céu claro, conforme apresentado na distribuição das frações da irradiação solar ao longo do dia. Assim, a produção diária dessa planta FV deve ser 9.978,0 MWh.

Tendo em vista que os painéis selecionados para a planta solar FVF do projeto de P&D produzem 2,13 kWh por dia, são necessários 4.677.278 de painéis. A área de cada modulo selecionado é de 1,98 m², o que implica que a área ocupada por todos os painéis equivale a 9,26 km², valor que representa 1,20% da área total do reservatório da UHE de Itumbiara. Nesse caso, a área total ocupada pela planta fotovoltaica flutuante deveria considerar espaçamentos entre os painéis de modo a facilitar a movimentação, manutenção entre outros, e admite-se um aumento na área de planta FV de 50% (10). Sendo assim, a área total da planta FV corresponde a 1,78% da área do reservatório da UHE de Itumbiara (12). A Tabela 1 apresenta os valores da geração de energia ao longo do dia para a fontes solar e hidráulica.

Hora	Fração (%)	Geração FV (MWh)	Geração Hidr. (MWh)	Geração FV Injet. na rede (MWh)	Energia injet. rede (MWh)
1	0	0,0	744,9	0,0	744,9
2	0	0,0	744,9	0,0	744,9
3	0	0,0	744,9	0,0	744,9
4	0	0,0	744,9	0,0	744,9
5	0	0,0	744,9	0,0	744,9
6	0,9	89,8	744,9	89,8	834,7
7	2,9	289,4	744,9	289,4	1034,3
8	6,1	608,7	744,9	608,7	1353,6
9	9,1	908,0	744,9	908,0	1652,9
10	11,4	1137,5	744,9	1137,5	1882,4
11	12,9	1287,2	744,9	1287,2	2032,1
12	13,4	1337,1	744,9	1337,1	2082,0
13	12,9	1287,2	744,9	1287,2	2032,1
14	11,4	1137,5	744,9	1137,5	1882,4
15	9,1	908,0	744,9	908,0	1652,9
16	6,1	608,7	744,9	608,7	1353,6
17	2,9	289,4	744,9	289,4	1034,3

18	0,9	89,8	744,9	89,8	834,7
19	0	0,0	744,9	0,0	744,9
20	0	0,0	744,9	0,0	744,9
21	0	0,0	744,9	0,0	744,9
22	0	0,0	744,9	0,0	744,9
23	0	0,0	744,9	0,0	744,9
24	0	0,0	744,9	0,0	744,9
Total	100,0	9.978,0	17.878,6	9.978,0	27.856,7

Tabela 1– Geração de energia ao longo do dia para a fontes solar e hidráulica e SAEE.

Conforme a Tabela 1, a planta solar FV produz diariamente 9.978,0 MWh, o que leva a uma planta FVF com capacidade instalada de 415,7 MW_{med} (1.824,1 MW_p). O incremento de energia elétrica injetado na rede elétrica pela planta FVF corresponde a 55,8% da energia elétrica produzida a partir da geração hidráulica, o que aumenta a utilização da capacidade da subestação de 35,8% para 55,7%. Além disso, tendo em vista que o valor de referência para o dimensionamento da planta solar FV corresponde a mediana da geração hidráulica, tem-se que a soma da produção hidrelétrica com a geração solar supera a capacidade de escoamento de energia da subestação em 50% do tempo, uma vez que em metade do tempo a geração hidráulica é maior que a mediana (744,9 MW_{med}). Nos 50% restantes do tempo, a geração hidrelétrica é inferior a mediana, e dessa forma tem-se disponibilidade na infraestrutura da UHE. Nesse caso, para minimizar eventuais perdas de energia, faz-se necessária a instalação de um SAEE, ou ampliar a infraestrutura existente. A operação dessa planta FV é apresentada na Figura 6, na qual tem-se geração de energia através das diferentes fontes ao longo do dia.

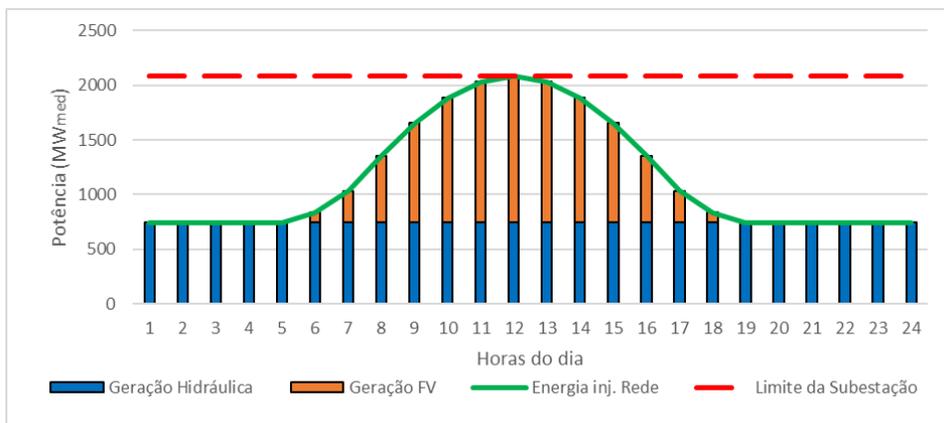


Figura 6: Operação diária média da UHE de Itumbiara com planta FV - Caso 1

Conforme a Figura 5, conforme premissa assumida no dimensionamento da planta FV, ao meio dia a produção da UHE atinge o limite da subestação. A diferença entre a área compreendida pela linha do limite da subestação e a energia injetada na rede representa o montante da infraestrutura disponível.

5.2 Caso 2

Este estudo de caso visa dimensionar a planta FVF que associada a um SAEE, permite que a máxima injeção de energia elétrica na rede durante o horário de ponta. Considera-se que o horário de ponta está compreendido entre às 17:00h e às 22:00 h. Dessa forma, a planta solar FVF que produzirá energia ao longo do dia para alimentar um SAEE na forma de hidrogênio. Às 17:00 h, quando o horário de ponta tem início, a energia elétrica produzida pela planta FVF é direcionada para a rede elétrica, sendo complementada pela produção de energia na CaC, de modo a maximizar a geração elétrica no horário de ponta.

Verificou-se que para produzir o montante de energia necessário para ser armazenado por um SAEE na forma de hidrogênio com a mesma configuração do sistema contemplado no projeto de P&D de FURNAS, é necessário a instalação de uma planta FV que produza um total de 23.327,1 MWh. Para produzir essa energia, essa planta FVF requer 10.935.129 de painéis, tendo capacidade instalada de 972,0 MW_{med} (4.263,7 MW_p). Essa planta FV, teria uma grande capacidade, e considerando os 50% adicionais de área para manutenção e serviços gerais, ocuparia uma área de 32,48 km², que representa 4,17% da área do reservatório da hidrelétrica. A operação da planta FVF e SAEE em conjunto com a geração hidrelétrica é apresentada na Tabela 2. Nesse caso, observa-se que toda a energia produzida é utilizada para a máxima produção de energia no horário de ponta, de modo que antes das 17:00h toda energia FV é utilizada para a produção de hidrogênio. Após o início do horário de ponta, a energia FV é destinada diretamente para a rede elétrica, e com a complementação da produção da energia oriunda da CaC e da energia hidrelétrica, tem-se a produção máxima.

Hora	Fração (%)	Geração FV (MWh)	Geração Hidr. (MWh)	Geração FV rede (MWh)	Eletrolíse (MWh)	Prod. H ₂ (10 ³ Nm ³)	Prod. CaC. (MWh)	Energia injet. rede (MWh)
1	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
2	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
3	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
4	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
5	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
6	0,9	210,0	744,9	0,0	210,0	38,9		744,9
7	2,9	676,5	744,9	0,0	676,5	125,3		744,9
8	6,1	1.423,0	744,9	0,0	1.423,0	263,5		744,9
9	9,1	2.122,8	744,9	0,0	2.122,8	393,1		744,9
10	11,4	2.659,4	744,9	0,0	2.659,4	492,5		744,9
11	12,9	3.009,3	744,9	0,0	3.009,3	557,3		744,9
12	13,4	3.125,9	744,9	0,0	3.125,9	578,9		744,9
13	12,9	3.009,3	744,9	0,0	3.009,3	557,3		744,9
14	11,4	2.659,4	744,9	0,0	2.659,4	492,5		744,9
15	9,1	2.122,8	744,9	0,0	2.122,8	393,1		744,9
16	6,1	1.423,0	744,9	0,0	1.423,0	263,5		744,9
17	2,9	676,5	744,9	676,5	0,0	0,0	660,5	2.082,0
18	0,9	210,0	744,9	210,0	0,0	0,0	1.127,1	2.082,0
19	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
20	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
21	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
22	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
23	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
24	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0		744,9
Total		23.327,9	17.133,7	886,5	22.441,4	4.155,8	5.798,8	23.819,0

Tabela 2 – Geração de energia ao longo do dia para a fontes solar e hidráulica e SAEE.

A planta solar FV produz o equivalente a $972,0 \text{ MW}_{\text{med}}$, valor que corresponde a 1,36 vezes a produção da UHE, sendo que a energia injetada na rede pela planta FV e SAEE corresponde a $278,6 \text{ MW}_{\text{med}}$. Esse valor de energia injetado na rede no horário de ponta, aumenta a utilização da capacidade da UHE de 35,8% para 49,7%. A Figura 7, apresenta a operação da planta FV e do SAEE para o caso 2.

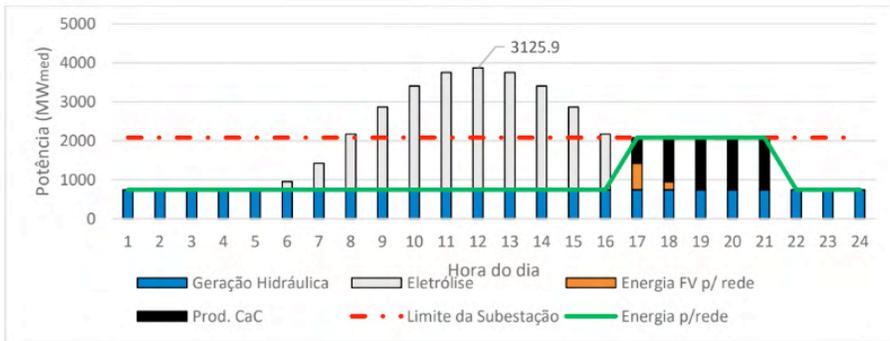


Figura 7: Operação diária média da UHE de Itumbiara com planta FVF e SAEE - Caso 2.

Conforme a Figura 6, observa-se que a contribuição de cada fonte de energia para maximizar a produção de energia elétrica durante o horário de ponta. Nota-se graficamente a magnitude da produção de energia necessária para que o SAEE possa atender a carga durante o horário de ponta, de modo que no pico de produção da planta FV são produzidos 3.125,9 MWh que somados aos 744,9 MW_{med} da geração hidrelétrica totalizam 3.870,9 MWh, valor 86% superior a capacidade de escoamento da subestação.

5.3 Caso 3

No estudo de caso 3, visa dimensionar uma planta solar FV associada ao SAEE que combinada a hidrelétrica produza energia suficiente para utilizar a capacidade máxima da subestação ao longo do dia. Verificou-se nesse caso que a energia a ser produzida pela planta FVF necessária para que a totalidade da infraestrutura seja utilizada corresponde a 73,0 GWh durante o dia. Dessa forma, a capacidade solar fotovoltaica instalada corresponde a 3.043,8 MW_{med} (13.350,6 MW_p), sendo necessários 34.232.428 de painéis solares fotovoltaicos similares aos utilizados no projeto de P&D desenvolvido por FURNAS. Nesse caso, a área ocupada pela planta solar FVF, seguindo os mesmos critérios mencionados nos casos anteriores corresponde a 67,78 km², o que equivale a utilização de 8,71% da área do reservatório da UHE de Itumbiara. De modo análogo ao anterior, a Tabela 3 apresenta a operação do caso 3.

Hora	Fração (%)	Geração FV (MWh)	Geração Hidr. (MWh)	Geração FV rede (MWh)	Eletrolíse (MWh)	Prod. H ₂ (10 ³ Nm ³)	Prod. CaC. (MWh)	Energia injet. rede (MWh)
1	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
2	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
3	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
4	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
5	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1.337,1	2.082,0
6	0,9	657,3	744,9	657,3	0,0	0,0	679,8	2.082,0
7	2,9	2.117,8	744,9	1.337,1	780,8	144,6	0,0	2.082,0
8	6,1	4.454,7	744,9	1.337,1	3.117,7	577,3	0,0	2.082,0
9	9,1	6.645,6	744,9	1.337,1	5.308,5	983,1	0,0	2.082,0
10	11,4	8.325,2	744,9	1.337,1	6.988,1	1.294,1	0,0	2.082,0
11	12,9	9.420,6	744,9	1.337,1	8.083,6	1.497,0	0,0	2.082,0
12	13,4	9.785,8	744,9	1.337,1	8.448,7	1.564,6	0,0	2.082,0
13	12,9	9.420,6	744,9	1.337,1	8.083,6	1.497,0	0,0	2.082,0
14	11,4	8.325,2	744,9	1.337,1	6.988,1	1.294,1	0,0	2.082,0
15	9,1	6.645,6	744,9	1.337,1	5.308,5	983,1	0,0	2.082,0
16	6,1	4.454,7	744,9	1.337,1	3.117,7	577,3	0,0	2.082,0
17	2,9	2.117,8	744,9	1.337,1	780,8	144,6	0,0	2.082,0
18	0,9	657,3	744,9	657,3	0,0	0,0	679,8	2.082,0
19	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1337,1	2.082,0
20	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1337,1	2.082,0
21	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1337,1	2.082,0
22	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1337,1	2.082,0
23	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1337,1	2.082,0
24	0	0,0	744,9	0,0	0,0	0,0	1337,1	2.082,0
Total		73.028,0	17.133,7	16.022,1	57.005,9	10.556,6	14.730,2	49.968,0

Tabela 3 – Geração de energia ao longo do dia para a fontes solar e hidráulica e SAEE.

Conforme a Tabela 3, tem-se que a produção de energia elétrica pela planta solar FVF é 4,26 vezes superior à geração hidráulica, com 21,9% da energia elétrica oriunda da geração solar sendo injetada diretamente na rede, e os 78,1% restantes sendo destinados para a produção de hidrogênio a partir do processo de eletrolíse. A produção de energia na CaC corresponde a 14,7 GWh, valor que corresponde a 20,2% dos 73,0 GWh produzidos pela planta FV. Dessa forma, a 32,9 GWh complementam a geração hidráulica de modo a utiliza a totalidade da infraestrutura da UHE, contribuindo para o aumento da energia renovável junto ao SIN. De modo análogo aos anteriores, a Figura 8 apresenta a operação da planta FVF em conjunto com o SAEE para o caso 2.

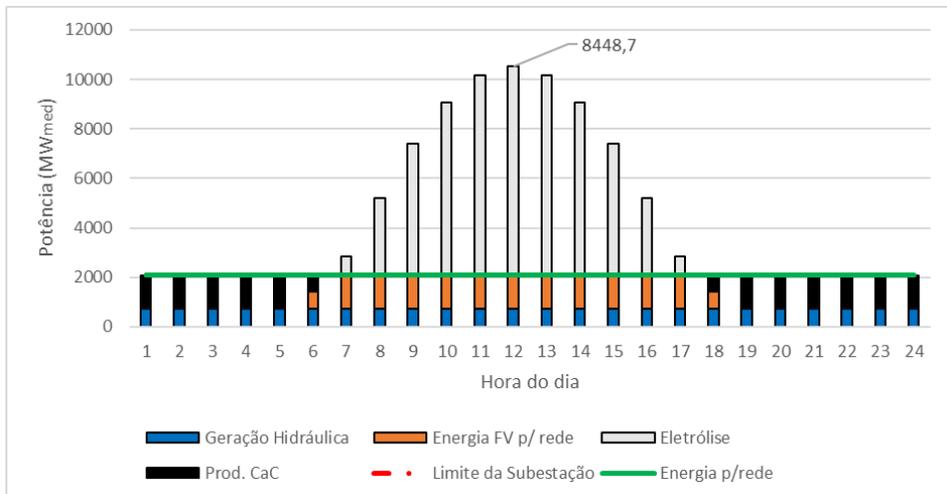


Figura 8: Operação diária média da UHE de Itumbiara com planta FVF e SAEE - Caso 3.

Nesse caso, tem-se a operação da geração a partir das fontes hidráulica, solar FV e a participação do SAEE para o atendimento da carga. Nesse caso observa-se a magnitude da energia produzida em excesso, para alimentar o eletrolisador e produzir hidrogênio, para posterior reconversão em energia elétrica. Os 3.043,8 MW_{med} de capacidade instalada da planta solar FV, são 48,7% superior aos 2.047,0 MW_{med} de capacidade instalada em 2021 (ONS, 2022) no Brasil, o que mostra ilustra a dimensão da instalação necessária para que a capacidade máxima da UHE seja utilizada. No pico de produção de energia solar FV, a produção total de energia (hidrelétrica e FV) corresponde a 10,5 GWh, que representa cerca de 5 vezes a capacidade máxima da subestação.

6 | ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO HIDRO-SOLAR NA UHE DE ITUMBIARA

Para o dimensionamento das plantas FVF, foi utilizado o valor da mediana das medias mensais de geração hidrelétrica no período compreendido entre 2000 e 2021. Nesse caso, a soma da produção hidrelétrica com a geração solar supera a capacidade de escoamento de energia da subestação em 50% do tempo, uma vez que em metade do tempo a geração hidráulica é maior que a mediana (744,9 MW_{med}). Nos 50% restantes do tempo, a geração hidráulica é inferior a mediana, e dessa forma tem-se disponibilidade na infraestrutura da UHE.

Para o Caso 1, que não considera a instalação de um SAEE, há maior chance de que se tenha perda de parte da energia elétrica produzida planta FVF, pois basta que a geração hidrelétrica seja maior que a mediana, e que se tenha um dia de céu claro para que o montante de eletricidade produzido supere a capacidade da UHE de Itumbiara. Considerando essa situação em que a produção de energia elétrica a partir da UHE

geração superior a mediana com um dia de céu claro. Considerando essa situação, em que a geração de energia na UHE é superior a mediana, com dia de céu claro para os casos 2 e 3, o SAEE pode absorver maiores quantidades da energia solar FV que não seriam aproveitadas em virtude da limitação do escoamento de energia na subestação.

Além disso, na situação em que a geração hidrelétrica supera a mediana, com dia de céu claro, uma alternativa para evitar perdas de energia solar FV seria reduzir a produção de energia hidráulica, armazenando a vazão que seria turbinada no reservatório da UHE, e permitindo uma maior produção de energia solar FV. No entanto, essa questão ainda necessita de uma regulação por parte dos órgãos competentes, uma vez que a vazão não turbinada pode afetar a produção de energia nas usinas hidrelétrica a jusante. Com relação os dimensionamentos das plantas FVF e do SAEE, a Tabela 4 apresenta os principais resultados obtidos nos estudos de caso avaliados.

Item	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Planta solar FV	415,7 MW _{med} -1,82 GW _p	972,0 MW _{med} -4,26 GW _p	3.043,8 MW _{med} -13,3 GW _p
Área ocupada	9,26 km ²	32,48 km ²	67,78 km ²
% da área reservatório	1,78%	4,17%	8,71%
% energia FV p/ SAEE	-	96,20%	78,1%
Capacidade eletrólise	-	3.125,9 MW	8.448,7 MW
Capacidade tanque H₂	-	4.155,8 10 ³ Nm ³	10.556,6 10 ³ Nm ³
Capacidade da CaC	-	1.337,1 MW	1.337,1 MW
% utilização da subestação	55,7%	49,7%	100%

Tabela 4: Principais resultados dos estudos de caso avaliados

Observa-se que nos 3 estudos de caso, que a infraestrutura da UHE pode ser melhor aproveitada a partir da instalação de plantas FVF que ocupam áreas relativamente pequenas do reservatório da UHE Itumbiara. De fato, há no Brasil um grande potencial de aproveitamento da área sobre a lâmina d'água a partir de planta FVF (10). Por outro lado, tendo em vista que uma parcela mínima das áreas dos reservatórios foi utilizada, para que esse potencial seja explorado é necessário implementar infraestruturas adicionais, como aumento da subestação, linhas de transmissão, bem como a obtenção de outorgas e licenças junto aos órgãos competentes.

Para permitir a geração solar FV em larga escala, é necessário que as capacidades dos equipamentos da planta FVF e o SAEE sejam consideravelmente elevadas. Tendo em vista que a capacidade instalada para a geração solar fotovoltaica em 2021 correspondia a 2.047 MW_{med} (ONS, 2022), as plantas FVF dimensionadas nos casos 2 e 3 possuem respectivamente cerca de 50% e 150% da capacidade solar fotovoltaica instalada no Brasil.

No caso do SAEE, tendo como referência o projeto piloto de FURNAS, para o Caso 2 o eletrolisador tem potência tem potência 11.578 vezes superior ao equipamento selecionado, com o tanque de estocagem e CaC devendo ser aumentados em 4618 vezes e 4.460 vezes em relação aos equipamentos do projeto piloto. De modo análogo, para o caso 3, eletrolisador, tanque de armazenamento e CaC devem ser aumentados em 31.292, 1730 e 4.460 vezes em relação ao projeto piloto.

Em termos de operação, a planta solar fotovoltaica flutuante opera de modo híbrido a usina hidrelétrica, aproveitando a parcela disponível da infraestrutura disponível, tais como equipamentos elétricos subutilizados. Em termos gerais, para permitir que esses sistemas operem em larga escala, é necessário a instalação de plantas FVF bem como SAEE de energia de larga escala, o que representa um desafio para ser implementado no curto e médio prazo.

REFERÊNCIAS

(1) - **ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico** (2022). Resultado Histórico da operação. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Brasília DF, 2021. Disponível em http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx

(2) - **ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica** (2016). Chamada nº 021/2016. Projeto Estratégico “Arranjos Técnicos e Comerciais Para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro” Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília –DF. 2016.

(3) - **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. 393p, 2020a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE_2029.pdf.

(4) - **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**. 2019. Leilões de Energia Elétrica de 2019. Rio de Janeiro - RJ 9p, 2019a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-451/Informe%20Leil%C3%B5es%202019_v3.pdf

(5) - **IEA – International Energy Agency**. (2017). Tracking Clean Energy Progress. International Energy Agency. Paris – France, June, 2017.

(6) - **Silva, E.P.** Fontes Renováveis de Energia, 1ª Edição. Livraria da Física, São Paulo, 2014

(7) - **ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica**. Aneel fomenta o investimento em inovação no setor elétrico brasileiro. Disponível em https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-fomenta-o-investimento-em-inovacao-no-setor-eletrico-brasileiro/656877/pop_up?_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_viewMode=print&_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_languageld=pt_BR

(8) - **CRSESSEB (2019)** Potencial Solar – Sun Data v 3.0. Centro de referência para as energias Solar e Eólica Sergio Brito. CEPEL. Rio de Janeiro –RJ. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>.

(9) – Furtado Jr, J. C. 2021. Análise da Integração Hidro-Solar Auxiliada por Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica na Forma de Hidrogênio junto a Usinas Hidrelétricas. 2021. 176p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas

(10) - Strangueto, K. M. 2016. Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica através de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Reservatórios de Hidroelétricas. 2016. 146p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Armazenamento 1, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 18, 19, 48, 50, 51, 52, 53, 55, 65, 66

C

Cadastro 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29

E

Energia 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 18, 19, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 75

Ethernet 67, 69, 73, 76, 77, 78, 80, 81

F

Fotovoltaica 1, 2, 4, 5, 10, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 57, 61, 64, 65

G

Geração 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 21, 25, 30, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64

H

Hacking 30, 34, 46

Hidrogênio 48, 49, 51, 52, 55, 56, 59, 62, 63, 66

I

Informações 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 32, 71, 72, 76

Integração 1, 48, 49, 51, 52, 56, 63, 66

Internet 30, 32, 38, 67, 70, 71, 72, 73, 76, 77, 79

L

Landing-page 30, 33, 34, 42, 47

M

Marketing 30, 31, 32, 33, 35, 41, 46, 47

Multifinalitário 21, 22, 23, 25, 28, 29

P

Payback 1, 2, 8, 11, 17, 18

Protocolos 67, 69, 75, 76, 77

R

Relatórios 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28

S

Scada 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 81

Segurança 7, 23, 40, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80

Sistemas 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 15, 17, 18, 23, 24, 28, 29, 51, 52, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 82

Software 4, 21, 22, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 34, 42, 46, 68, 70, 73, 75, 78, 79, 82

Solar 3, 4, 5, 6, 13, 15, 18, 19, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66

T

Tecnologia 1, 8, 17, 18, 19, 46, 55, 67, 69, 70, 82

V

Vendas 30, 31, 34, 35, 36, 38, 42, 43, 46

Viabilidade 1, 4, 11, 12

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO APLICADA

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO APLICADA