

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

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

Daphynny Pamplona

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-NãoDerivativos 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



Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0400-2

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.002221708>

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. 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



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

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de subáreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

APLICAÇÃO DO NÍOBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Claudinei Guilherme Hoffmann

Luciana Paro Scarin Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217081>

CAPÍTULO 2..... 14

FORECAST METHOD FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES: A CASE STUDY OF THE ONTARIO'S ELECTRICAL SYSTEM

Bruno Knevitz Hammerschmitt

Felipe Cirolini Lucchese

Marcelo Bruno Capeletti

Renato Grethe Negri

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva

Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217082>

CAPÍTULO 3..... 28

IDENTIFICADOR DE FALHAS PARA MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO BASEADO EM SUPPORT VECTOR MACHINE IMPLEMENTADO EM CLOUD

Jacyeude de Moraes Passos Araujo Segundo

Carlos Vinicius Alves Coimbra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217083>

CAPÍTULO 4..... 41

DETECÇÃO DE AVARIAS EM ISOLADORES DE POTÊNCIA: UMA PESQUISA DA LITERATURA CORRELATA À UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES

Ivan Nunes da Silva

Beatriz de Lima Tavares

Sofia Moreira de Andrade Lopes

Danilo Hernane Spatti

Rogério Andrade Flauzino

Victor Hideki Yoshizumi

Ana Cláudia Carvalho Barquete

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217084>

CAPÍTULO 5..... 56

LEITURA DE PARÂMENTOS DE MOVIMENTO DE UM PÊNDULO RÍGIDO CONTÍNUO UTILIZANDO SENSOR DE EFEITO HALL

Getúlio Teruo Tateoki

Jackson Tsukada

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217085>

CAPÍTULO 6	65
PANELES FOTOVOLTAICOS ADICIONALES A COLECTORES PARABÓLICOS PARA UN SISTEMA AUTÓNOMO DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR EN ZONAS TROPICALES	
Rosenberg J Romero	
Yuridiana Rocio Galindo Luna	
Jesús Cerezo Román	
Moisés Montiel González	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217086	
CAPÍTULO 7	94
UM MODELO HÍBRIDO DE BUSCA HARMÔNICA E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADO NO PROJETO DO CONTROLADOR LQR	
Luis B. P. Nascimento	
Vandilberto P. Pinto	
Márcio A. B. Amora	
Rômulo N. C. Almeida	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217087	
CAPÍTULO 8	108
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS FABRICANTE EPSON	
Bruno Suracci de Lima	
Flávio Luiz Rossini	
João Henrique Dias Corrêa	
João Marcos Pericaró Lopes	
Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa	
Yuri Ruzzene Barroso	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217088	
CAPÍTULO 9	126
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA SOB A FORMA DE HIDROGÊNIO (SAEEH ₂) INSTALADO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA UTILIZANDO O SOFTWARE HOMER	
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	
Thiago Dias Alencar Ferreira	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217089	
SOBRE OS ORGANIZADORES	138
ÍNDICE REMISSIVO	139

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA SOB A FORMA DE HIDROGÊNIO (SAEEH₂) INSTALADO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA UTILIZANDO O SOFTWARE HOMER

Data de aceite: 01/08/2022

Juarez Corrêa Furtado Júnior
Universidade Estadual de Campinas

Ennio Peres da Silva
Universidade Estadual de Campinas

Vitor Feitosa Riedel
Universidade Estadual de Campinas

Ana Beatriz Barros Souza
Universidade Estadual de Campinas

Hélio Nunes de Souza Filho
Universidade Estadual de Campinas

Demóstenes Barbosa da Silva
BASE Energia Sustentável

Diogo Hernandez de Oliveira Barbosa
BASE Energia Sustentável

Thiago Dias Alencar Ferreira
Companhia Energética de São Paulo

RESUMO: O hidrogênio proveniente de fontes renováveis tem o potencial técnico de canalizar grandes quantidades de eletricidade renovável para setores onde a descarbonização é difícil. Neste sentido, o hidrogênio vem sendo aplicado em diversos projetos no mundo. No Brasil, projetos de P&D vem sendo desenvolvidos utilizando a tecnologia do hidrogênio associado às fontes renováveis, como o projeto de armazenamento de energia elétrica desenvolvido pela CESP na UHE de Porto Primavera, no escopo da Chamada

Estratégica n° 21, proposta pela ANEEL em 2016. Diante desta discussão, o enfoque deste estudo foi de apresentar uma simulação do SAEH₂ através do software HOMER, com o objetivo de estimar uma carga que pode ser atendida, bem como visualizar a operação do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Armazenamento de energia. Excedente de energia. Fontes renováveis. Hidrogênio.

ABSTRACT: Hydrogen from renewable sources has the technical potential of channeling large amounts of electricity to industries where renewable decarbonization is difficult. In this sense, hydrogen has been applied in several projects around the world. In Brazil, R&D projects have been developed using resource technology associated with renewable sources, such as the electric energy storage project developed by CESP at the Porto Primavera Plant, within the scope of strategic n° 21, proposed by ANEEL in 2016. From this discussion, the focus of this study was to present a simulation of the SAEH₂ through the HOMER software, with the objective of estimating a load that can be met, as well as visualizing the operation of the system.

KEYWORDS: Energy management. Energy surplus. Renewable sources. Hydrogen.

1 | INTRODUÇÃO

Na última década, o aumento da demanda de energia e a busca por alternativas que promovam a garantia e a segurança no suprimento se tornaram essenciais por

instituições governamentais em todo o mundo. A expansão da participação de fontes renováveis de energia como a solar e eólica, com a utilização adequada de suas capacidades de geração de energia, tornou-se imprescindível para se atingir um futuro energético sustentável (1).

No entanto, as fontes renováveis estão sujeitas a efeitos de sazonalidade e intermitência. Logo, o uso intensivo dessas fontes expõe a geração de eletricidade a efeitos adversos tais como instabilidade no regime de chuvas, incidência solar, e de ventos, dentre outros. Estes fatores podem influenciar negativamente a segurança, a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Uma alternativa que pode contribuir para reduzir esses problemas, são os sistemas de armazenamento de energia, que oferecem a possibilidade de prover melhor qualidade da energia elétrica e aumentar a confiabilidade, a segurança e a disponibilidade do suprimento energético (2).

A adoção das tecnologias de 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 (2), (3).

Existem diversas formas de armazenar a energia elétrica produzida a partir das fontes renováveis, com destaque para o armazenamento na forma de hidrogênio. Hidrogênio e energia têm uma longa história compartilhada – alimentando os primeiros motores de combustão interna há mais de 200 anos para se tornar parte integrante da indústria de refino moderna. É leve, armazenador, energético e não produz emissões diretas de poluentes ou gases de efeito estufa. O número de países com políticas que apoiam diretamente o investimento em tecnologias de hidrogênio está aumentando, juntamente com o número de setores que eles visam. Até 2018, existiam cerca de 50 metas e incentivos políticos em vigor que apoiam diretamente o hidrogênio, com a maioria focada no transporte (4).

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°. 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 (3). No âmbito da Chamada N° 21, a Companhia Energética de São Paulo, CESP, desenvolveu o Projeto de P&D “Análise da Eficiência do Armazenamento Complementar de Energia Junto a Usinas Hidrelétricas, Utilizando Tecnologias de Armazenamento Eletroquímico e em Hidrogênio”, sob Código ANEEL PD-00061-0054/2016, utilizando, além do armazenamento de eletricidade na forma de hidrogênio, baterias avançadas.

Nesse projeto, o Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica (SAEE) desenvolvido é composto, basicamente, por um eletrolisador de água, um tanque

pressurizado para estocagem de hidrogênio, uma célula a combustível, além de um sistema auxiliar de armazenamento eletroquímico composto por um banco de baterias. Esse sistema será instalado junto a UHE Eng. Sérgio Mota (Porto Primavera), local no qual a CESP desenvolve outros projetos relacionados à geração de eletricidade através de fontes renováveis. Dentre esses projetos, tem-se um total de 1.050 kW_p de geração solar fotovoltaica, com uma produção média correspondente a 5.070 kWh de eletricidade, a um fator de capacidade de 20%.

O Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica com Hidrogênio (SAEEH₂) é composto, basicamente, por um eletrolisador de água com 107 kW, reservatório pressurizado para estocagem de hidrogênio com capacidade de 600 Nm³ (CNTP), uma célula a combustível (CaC) de 100 kW, além de um sistema auxiliar de armazenamento eletroquímico composto por um banco de baterias. Embora o projeto inicial contemplasse equipamentos de maior capacidade, os valores anteriormente mencionados foram determinados de modo a atender tanto o orçamento previsto no projeto, como para permitir uma maior participação da indústria nacional, fator desejável em um projeto de pesquisa e desenvolvimento e fortemente incentivado na Chamada N° 21 da ANEEL. A escolha dos fornecedores foi feita segundo critérios que avaliaram a experiência no fornecimento dos equipamentos, o tipo de tecnologia empregada, assistência técnica, cumprimento aos prazos de entrega e grau de nacionalização (5).

Diante desta discussão, o enfoque deste estudo foi de apresentar uma simulação do SAEEH₂ através do software HOMER, com o objetivo de estimar uma carga que pode ser atendida, bem como visualizar a operação do sistema.

2 | PROJETO DE P&D DESENVOLVIDO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA

A usina hidrelétrica Eng. Sérgio Mota (Porto Primavera) localiza-se no Rio Paraná, possui potência fiscalizada de 1.540 MW, e está localizada no município de Rosana no estado de São Paulo (8). Junto a essa hidrelétrica, a CESP desenvolve diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento relacionados a geração de energia elétrica através de fontes renováveis, possuindo plantas fotovoltaicas que utilizam diversos tipos de tecnologias (5).

O projeto tratado neste capítulo, intitulado “Análise da Eficiência do Armazenamento Complementar de Energia junto a Usinas Hidrelétricas, utilizando Tecnologias Eletroquímicas e de Armazenamento de Hidrogênio” é um dos 23 projetos aprovados na Chamada Estratégica n° 21 da ANEEL de 2016.

O sistema de armazenamento de energia elétrica instalado na UHE Porto Primavera é composto por um eletrolisador capaz de produzir até 20 Nm³.h⁻¹ de hidrogênio, um reservatório pressurizado com capacidade de armazenamento de até 600 Nm³ (2.124 kWh), a uma pressão de até 25 bar e uma célula a combustível que entrega até 100 kW de potência elétrica para a rede. Inclui também um banco de baterias de íon-lítio com uma

potência de até 250 kW e capacidade de até 1.800 MJ (500 kWh) de armazenamento. Os dois sistemas armazenam e despacham a eletricidade proveniente de uma planta solar fotovoltaica de 400 kWp (6). Na Figura 1 é possível visualizar os equipamentos instalados na usina.



Figura 1 – Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica na forma de hidrogênio instalado na UHE de Porto Primavera (6)

A partir da Figura 1, tem-se os componentes do SAEE, juntamente com seus fabricantes e principal característica de operação. Para integrar as plantas solares com o SAEEH₂ desse projeto, é importante conhecer o seu comportamento quando operando em conjunto, bem como a carga que esse sistema pode atender, que justifica a simulação da operação desse sistema. A primeira etapa para a avaliação do sistema consiste em determinar a produção de energia nessas plantas, sendo necessário a obtenção dos dados solarimétricos no local de instalação dessas plantas.

2.1 Dados Solarimétricos de Rosana-SP

As coordenadas geográficas da UHE de Porto Primavera, no ponto em que as plantas fotovoltaicas serão construídas são 22°28'31"S; 52°57'30"W. De acordo com dados do CRESESB (Centro de Referência Para as Energias Solar e Eólica Sergio Brito), órgão vinculado ao centro de pesquisas da ELETROBRAS, a estação solarimétrica de Rosana-SP é a mais próxima do local de instalação das plantas fotovoltaicas, localizada a 2,9 km da mesma.

Na Tabela 1, são apresentadas as médias de irradiação de acordo com o CRESESB, e estão disponíveis em (7). Embora o software utilizado nesse estudo, o HOMER, utilize a

base de dados da NASA, optou-se por utilizar os dados fornecidos pelo CRESESB, visto que essa base de dados leva em consideração medidas reais de uma estação solarimétrica próxima a UHE de Porto Primavera. A Tabela 1 apresenta os dados solarimétricos segundo o CRESESB e da base de dados do HOMER.

Estação	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]													
	Distância (km)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Rosana (SP)	2,9	6	6,11	5,52	4,69	3,73	3,36	3,54	4,46	4,74	5,47	6,12	6,55	5,02
Anaurilandia (MS)	8,3	5,97	5,98	5,49	4,72	3,77	3,4	3,58	4,5	4,76	5,42	6,13	6,5	5,02
Bataypora (MS)	9,7	6,01	6,01	5,5	4,73	3,72	3,39	3,57	4,52	4,74	5,45	6,14	6,49	5,02
Dados solarimétricos da estação de Rosana - Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]														
Ângulo	Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano horizontal	0° N	5,97	5,98	5,49	4,72	3,77	3,4	3,58	4,5	4,76	5,42	6,13	6,5	5,02
Ângulo igual a latitude	18° N	5,42	5,71	5,66	5,35	4,62	4,35	4,49	5,29	5,06	5,3	5,63	5,79	5,22
Dados solarimétricos do HOMER [kWh/m ² .dia]														
Ângulo igual a latitude (HOMER)	18° N	5,85	5,66	5,33	4,74	3,79	3,58	3,97	4,60	4,77	5,61	6,20	6,13	5,85

Tabela 1 – Dados solarimétricos de Itumbiara segundo CRESESB (7)

Conforme a Tabela 1, a irradiação média diária para o ângulo de inclinação igual a latitude de Rosana-SP corresponde a 5,22 kWh.m⁻².dia⁻¹, valor que será considerado para o cálculo da produção de energia na planta solar fotovoltaica.

2.2 Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica na UHE Porto Primavera

Nesses sistemas é importante levar em consideração as eficiências dos equipamentos como inversores de frequência e transformadores. Nesse estudo, para os transformadores a eficiência considerada corresponde a 98%, e para os inversores de frequência a eficiência corresponde a 95% (8). A Figura 2 apresenta esquematicamente o sistema de armazenamento a ser instalado na UHE de Porto Primavera.

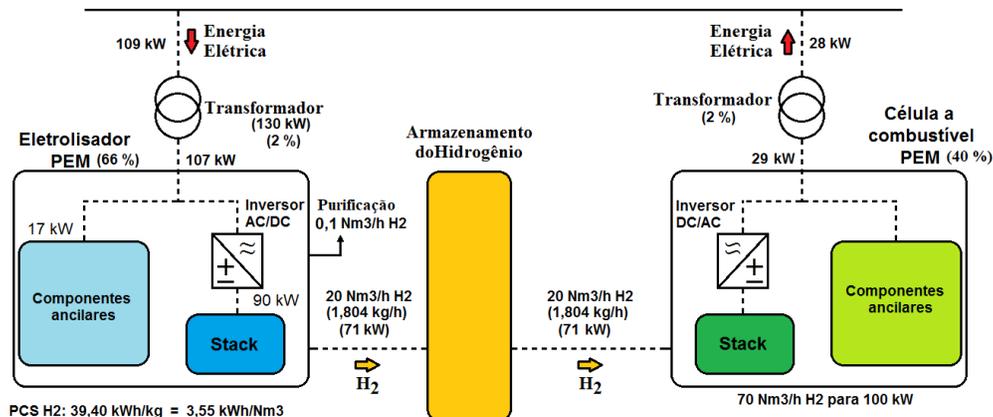


Figura 2 – SAEH₂ instalado na UHE de Porto Primavera (5)

O cálculo prévio do sistema de armazenamento a hidrogênio, descrito em detalhe nesse estudo, apontou que, após a complementação desse sistema com os dispositivos elétricos necessários, como transformadores, pode-se esperar uma eficiência global correspondente a 26 %.

Embora esse valor seja relativamente baixo, deve-se levar em consideração que o sistema de estocagem de energia permite o consumo posterior de uma parcela da eletricidade que em grande parte não seria aproveitada, o que significa uma melhor utilização dos recursos disponíveis.

Além disso, tem-se a possibilidade de fornecer energia renovável nos horários de ponta, melhorando o retorno financeiro da planta e produzindo créditos ambientais, por reduzir a geração térmica por combustíveis fósseis. Nesse estudo, considera-se que o sistema de armazenamento foi utilizado para normalizar a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, ou seja, a carga atendida pelo sistema é constante ao longo do dia.

2.3 Simulação da integração das plantas fotovoltaicas com o SAEH₂

Existem diversos softwares utilizados para a simulação de sistemas energéticos com fontes renováveis de energia. O software *Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables* (HOMER), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) foi escolhido para a simulação desse sistema. Essa escolha se deve ao fato de que esse software é a ferramenta de simulação mais utilizada para a análise de sistemas de armazenamento de energia, e permite a utilização da base de dados da NASA. Além disso, o HOMER possui em sua biblioteca modelos de painéis fotovoltaicos, aerogeradores, eletrolisadores, e células a combustível, que facilitam a modelagem do sistema a ser simulado (9).

Nas simulações não foram inseridos os bancos de baterias, visto que o objetivo

desse estudo é a simulação apenas do sistema de armazenamento de energia na forma de hidrogênio. Além disso, considerou-se que a carga a ser atendida é constante ao longo do dia, com os parâmetros utilizados nessa simulação sendo:

- **Eletrolisador:** 107 kW; Produção de 20 Nm³/h de H₂; Consumo elétrico de 5,76 kWh/Nm³
- **Tanque:** Volume equivalente de 600 Nm³ (54 kg); pressão máxima de 24 bar e volume inicial correspondente a 70% do total. O volume final deve ser igual ou superior ao inicial.
- **Célula a Combustível:** 100 kW, Produção de 1,42 kWh/Nm³; Consumo de 70Nm³/h de H₂; η=40%.
- **Inversores de frequência e retificadores:** Eficiência de 95%

Em um primeiro momento, foi realizada a simulação, considerando a capacidade instalada de todas as plantas fotovoltaicas, a qual corresponde a 1.050 kW_p. No entanto, a simulação mostrou que essa capacidade é elevada para as dimensões do sistema de armazenamento de energia elétrica, de modo que a maior parte da energia solar fotovoltaica produzida não é aproveitada conforme apresentado na Figura 3.

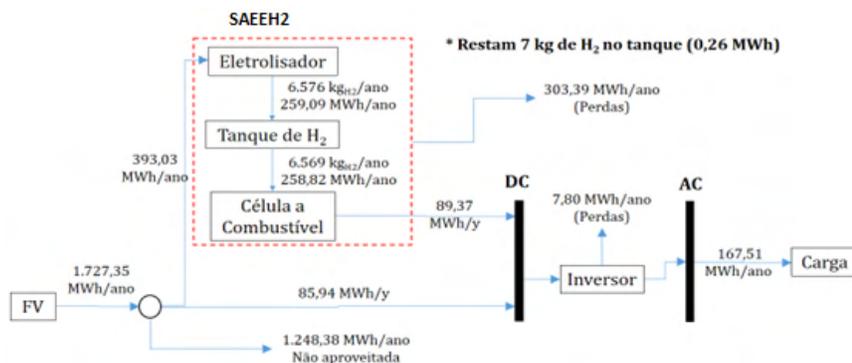


Figura 3 - Balanço de energia para a planta de 1.050 kW_p

Em virtude da maior parte da energia produzida não ser aproveitada devido a diferença entre a capacidade da planta solar e do SAEEH₂, optou-se por considerar apenas a simulação do sistema com a planta de 400 kW_p a ser construída. Nesse caso, embora também haja uma parcela relevante da energia solar fotovoltaica não aproveitada pelo SAEEH₂, essa parcela é consideravelmente inferior ao caso da planta de 1.050 kW_p, que leva em consideração todas as plantas fotovoltaicas existentes. De modo análogo, a Figura 4 apresenta o balanço de energia para o caso com a planta solar fotovoltaica de 400 kW_p.

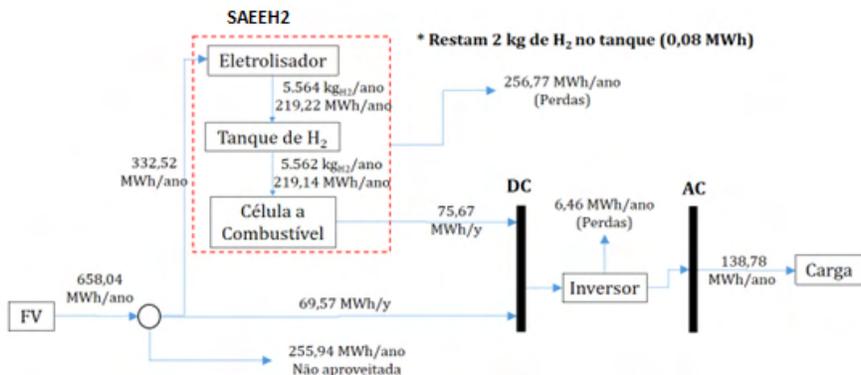


Figura 4 - Balanço de energia para a planta de 400 kW_p

Nesse caso, verificou-se que a carga máxima que pode ser atendida através desse sistema corresponde a 138,78 MWh, ao passo que 255,94 MWh não são aproveitados pelo sistema. Isso se deve a diferença entre a capacidade componentes do sistema de armazenamento (eletrolisador e célula a combustível), e a planta solar fotovoltaica de 400 kW_p. De fato, as capacidades dos equipamentos do SAEH₂ são inferiores aos originalmente projetados, e as alterações feitas foram motivadas por fatores de natureza econômica, além de outros aspectos que visam atender as exigências de um de projeto de pesquisa e desenvolvimento.

Conforme mencionado anteriormente, a carga do sistema é constante ao longo do dia, de modo que a energia para atender a carga simulada corresponde a 380,5 kWh/dia, equivalente ao fornecimento contínuo de 18,85 kW. Em termos gerais a eficiência global do sistema corresponde a 21,10%, ao passo que a eficiência do SAEH₂ (eficiência *round-trip*) corresponde a 22,75%. O esquema do SAEH₂ com a planta solar modelado no software é apresentado na Figura 5.

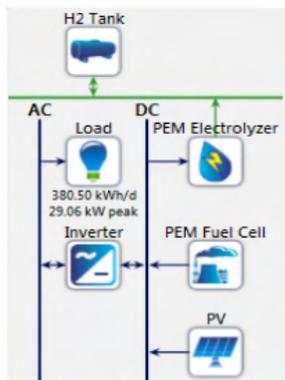


Figura 5 - Interface do SAEH₂ com a planta solar modelado no HOMER

3 | ASPECTOS OPERACIONAIS

Aspectos operacionais como o comportamento ao longo do ano para cada hora do dia da geração solar fotovoltaica, consumo do eletrolisador e a geração de eletricidade através da célula a combustível são de grande importância e estão apresentados na Figura 6.

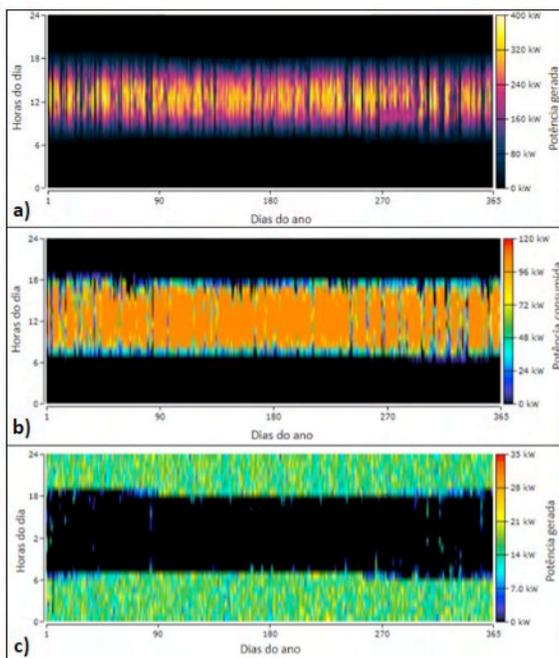


Figura 6 - Comportamento dos elementos do sistema ao longo do ano para cada hora do dia. a) geração solar fotovoltaica; b) potência consumida pelo eletrolisador; c) Geração através da célula a combustível

Na Figura 6a, observa-se a que geração solar fotovoltaica tem sua produção concentrada entre as 8 e as 18 horas, com o pico de geração ocorrendo ao meio-dia, como já conhecido. Além disso, entre o dia 270 até próximo ao dia 330 (meses de setembro e outubro), tem-se uma redução na geração solar fotovoltaica, podendo ser observado um maior grau de intermitência na geração. Um comportamento similar, porém, de menor intensidade pode ser observado entre dezembro e fevereiro, o que pode ser atribuído ao período de chuva, e embora esse seja o período de maiores valores de irradiação, tem-se a geração de energia elétrica reduzida. Isso tem efeito na quantidade de hidrogênio produzido, visto que o excesso de energia é destinado ao eletrolisador.

Nota-se na Figura 6b que nos períodos compreendidos entre às 8 e as 18 horas, nos quais ocorreram redução da geração solar fotovoltaica, existem lacunas na potência

consumida pelo eletrolisador, indicando redução da produção de H_2 . Além disso, na Figura 6c tem-se a geração de energia através da célula a combustível, e observa-se que a operação da célula é responsável pela geração em períodos tais como o compreendido entre as 8 e às 18 horas, atuando para suprir as lacunas da geração solar, e alimentando a carga.

A célula a combustível, também fornece energia para o sistema quando não há geração solar disponível. Nota-se que as Figuras 6a e 6c são complementares, de modo que a carga de 18,85 kW, valor próximo ao indicado pela escala de cor, sempre é atendida pelos painéis fotovoltaicos ou pela célula a combustível. Em relação a energia destinada ao eletrolisador, de acordo com a escala de cores, na maior parte do tempo os valores são próximos a potência máxima do eletrolisador de 107 kW.

Já em relação a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, nos períodos de pico (meio-dia) são gerados cerca de 350 kW, ao passo que a carga do sistema somado ao consumo do eletrolisador corresponde a cerca de 128 kW.

Outro aspecto importante a ser observado é o nível do tanque conforme apresentados na Figura 7.

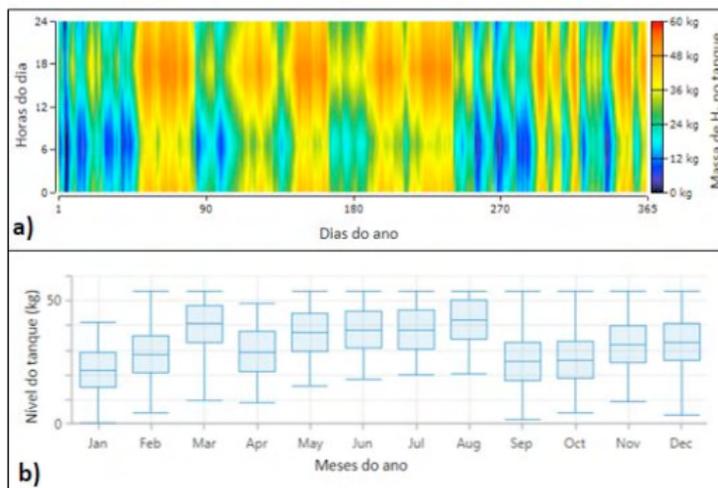


Figura 7 - a) Massa de H_2 contida no tanque ao longo do ano para cada hora do dia; b) Variação do nível do tanque de H_2 ao longo do ano

A Figura 7a, mostra que durante diversos períodos do ano o tanque opera com a sua capacidade máxima, tal como nos meses de março, maio e agosto. Nesses períodos, caso houvesse tanques adicionais, uma quantidade maior de hidrogênio poderia ser produzida e armazenada, visto que quando há uma parcela relevante da energia solar fotovoltaica que não é aproveitada, o que contribuiria para um maior aproveitamento da energia disponível.

Além disso, o nível do tanque acompanha a geração fotovoltaica, de modo que a

redução da geração implica em menores níveis. Em termos da amplitude da variação do nível do tanque entre os meses de janeiro, fevereiro junto a setembro e dezembro os níveis do tanque atingem níveis próximos a zero, conforme pode ser observado na Figura 6b. Por outro lado, somente nos meses de janeiro e abril o tanque não atinge a sua capacidade máxima, o que reforça o fato de que caso o volume de armazenamento fosse ampliado, uma quantidade maior de hidrogênio poderia de produzido.

4 | CONCLUSÃO

Esse estudo teve como objetivo apresentar os aspectos do projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D-0061-0054/2016, bem como a carga que pode ser atendida com o mesmo. Para uma planta de solar fotovoltaica de 400 kW_p, a carga contínua que pode ser atendida ao longo de um dia corresponde a apenas 18,85 kW_p. Esse valor é consideravelmente baixo, devido principalmente a baixa eficiência do sistema de armazenamento. No entanto, embora o SAEEH₂ possua eficiência relativamente baixa (22,75%), deve-se observar que esse sistema permite suprir uma carga durante todo o dia, através de painéis fotovoltaicos.

Além disso, observou-se uma quantidade considerável de energia que não é aproveitada em virtude da diferença entre a capacidade da planta solar fotovoltaica, e a capacidade do SAEEH₂. Isso ocorre devido a questões relacionadas a adequação do orçamento do projeto, ajuste de preços, além da necessidade de seleção de equipamento aptos a atender a indústria nacional. Questões como essas embora influenciem no desempenho do sistema, podem ocorrer em projetos de P&D.

REFERÊNCIAS

- (1) Kouchachvili, L.; Entchev, E. Power to gas and H₂ /NG blend in SMART energy networks concept. Renewable Energy, 2018.
- (2) IEA Tracking Clean Energy Progress 2017, June, 2017.
- (3) ANEEL (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.
- (4) IEA Tracking Clean Energy Progress 2017, June, 2017.
- (5) CESP (2018). O projeto de armazenamento de energia elétrica da CESP: motivação, arranjo e equipamentos. Seminário: Estado da Arte do Armazenamento de Energia e Inserção de Fontes Renováveis. Universidade de São Paulo, 19 e 20 de Março, 2018. São Paulo, Brasil. Disponível em http://www.iee.usp.br/sites/default/files/5-Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20IEEUSP_19-03-2018.pdf.

- (6) Riedel, V. F. Análise técnica de um sistema de armazenamento de energia elétrica produzida por fontes renováveis utilizando sistemas de baterias e células a combustível a hidrogênio. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP: [s.n], 2019.
- (7) CRESSES (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>.
- (8) Shahzad, M. K., Zahid, A., Rashid, T., Rehan, M. A., Ali, M., & Ahmad, M. (2017). Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software. *Renewable Energy*, 106, 264–273.
- (9) Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), 1059–1082.

SOBRE OS ORGANIZADORES

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE.

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Âodos 1, 5, 7, 8

Aprendizado de máquina 28

Aprendizagem de máquinas 41, 45

Armazenamento de energia 2, 6, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 136, 137

B

Bateria 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Busca harmônica 94, 95, 96, 99, 100, 101, 102, 105, 107

C

Cátodos 1, 3, 4, 5, 9, 10, 12

Computação na nuvem 28, 36

Controle inteligente 95

Controle ótimo 95, 98

E

Electric system 14, 15, 16, 17, 25

Excedente de energia 126

F

Fontes renováveis 126, 127, 128, 131, 136, 137

H

Hidrogênio 126, 127, 128, 129, 131, 132, 134, 135, 136, 137

I

IBM Cloud 28, 29, 30, 39

Isoladores de potência 41, 42, 52

M

Máquinas de vetores de suporte 28, 31, 40, 45

Modelagem cinemática 108

Modelagem dinâmica 108, 119

Motor de indução trifásico 28, 29, 35

N

Nióbio 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

O

Otimização por enxame de partículas 45, 94, 95, 97, 100, 105

P

Photovoltaic solar power 15

Power generation forecasting 15

R

Regulador linear quadrático 94, 95, 96, 98, 105, 107

Renewable energy 14, 15, 16, 20, 25, 26, 27, 92, 131, 136, 137

Robô Scara T3 401SS 108

S

Sistema de controle não linear 108

Sistemas de transmissão de energia elétrica 41

Sistemas inteligentes 29, 41, 43, 44, 46, 48, 50, 51, 52

SPSS Modeler 28, 29, 30, 31, 37, 38

W

Wind power 14, 15, 17, 20, 21, 22, 24, 26

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](#) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](#) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 