



A Importância da Energia Solar para o Desenvolvimento Sustentável

**Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)**

Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)

A Importância da Energia Solar para o Desenvolvimento Sustentável

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Lorena Prestes
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
134	<p>A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-616-4 DOI 10.22533/at.ed.003190309</p> <p>1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia solar. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Oliveira, Jaqueline Rezende.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.47</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A matéria-prima para a geração de energia elétrica, no cenário mundial, ainda é constituída predominantemente pelos combustíveis fósseis, os quais são compostos pelo gás natural, carvão mineral e petróleo. Segundo a Agência Internacional de Energia, em 2016, esses combustíveis foram responsáveis por 65,1% da matriz energética mundial. O emprego desses é notoriamente preocupante, pois são fontes finitas e causam elevados impactos ambientais, como a chuva ácida e a destruição da camada de ozônio, devido liberarem para a atmosfera gás carbônico durante seu processo de queima.

Dessa forma, a energia solar apresenta como principais características a utilização de uma matéria-prima inesgotável, o sol, e não causa impactos ao meio ambiente durante a conversão da energia solar em energia elétrica. Portanto, sendo o desenvolvimento sustentável caracterizado pela utilização dos recursos naturais necessários para o desenvolvimento de diversos setores, como o social, energético e econômico, sem comprometer esses recursos para atender as próximas gerações, a energia solar tem se consolidado como uma fonte de energia alternativa e renovável que contribuí para atender a demanda de eletricidade de modo sustentável.

Nesse contexto, esse *e-book* apresenta artigos que discorrem sobre as principais características da energia solar, destacando suas vantagens e desvantagens, aplicações e desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil. Também são descritos estudos sobre a implementação de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica e análise de um sistema em operação.

Em seguida, esse exemplar contempla estudos sobre a influência da associação de módulos fotovoltaicos e o sombreamento sobre esses sistemas, é apresentado uma pesquisa sobre um sistema fotovoltaico híbrido e são discutidos os fundamentos e validação de um sistema arrefecedor para usinas fotovoltaicas.

Além disso, são apresentados trabalhos que relatam as características da sujidade acumulada sobre módulos fotovoltaicos, o desenvolvimento de um *software* para projeto e simulação de sistemas solares e a geração de dados de irradiação solar nas condições brasileiras, imprescindíveis nos estudos sobre energia solar fotovoltaica.

Jaqueline Oliveira Rezende

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÕES	
Frank Wesley Rodrigues Kaique Rhuan de Azevedo Albuquerque Joel Adelaide Medeiros Jonathan Jefferson Pereira Moura Diego Henrique da Silva Cavalcanti Rafael Pereira de Medeiros Hugo Rojas Espinoza	
DOI 10.22533/at.ed.0031903091	
CAPÍTULO 2	10
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO CENTRO DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL DA ARCELOR MITTAL TUBARÃO	
Bruna Machado Christ Stefanie Lievore Cruz Warley Teixeira Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.0031903092	
CAPÍTULO 3	22
ANÁLISE DE MERCADO DE TECNOLOGIA SOLAR FOTOTÉRMICA E PROPOSTA DE MODELO DE NEGÓCIO	
Ricardo Alberto Rodríguez-Carvajal Rafael García Gutierrez Paula C. Isiordia-Lachica Martín Picón Nuñez Jesús Hernández Ruíz German Eduardo Devora-Isiordia	
DOI 10.22533/at.ed.0031903093	
CAPÍTULO 4	36
ANÁLISES DE EFEITOS EXTERNOS SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TAIS COMO ASSOCIAÇÃO E SOMBREAMENTO POR MEIO DO ATP	
Leonardo Rosenthal Caetano Silva Jaqueline Oliveira Rezende Geraldo Caixeta Guimarães Raul Vitor Arantes Monteiro	
DOI 10.22533/at.ed.0031903094	
CAPÍTULO 5	50
ANÁLISE 2E DE UM SISTEMA SOLAR PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO ÓPTICA ANIDÓLICA	
Eduardo González-Mora Eduardo Armando Rincón-Mejía	
DOI 10.22533/at.ed.0031903095	
CAPÍTULO 6	64
DISEÑO DE SISTEMAS HIBRIDOS FV-H ₂	
Fernando Gutiérrez-Martín	
DOI 10.22533/at.ed.0031903096	

CAPÍTULO 7	74
FUNDAMENTOS E MEIOS DE UNIDADE FOTOVOLTAICA ARREFECIDA CONTENDO ASPECTOS TÉCNICOS E GEOGRÁFICOS	
<ul style="list-style-type: none"> André Luiz Veiga Gimenes Pascoal Henrique da Costa Rigolin Angélica Luana Linhares Vinícius Oliveira da Silva Stefania Gomes Relva Miguel Edgar Morales Udaeta 	
DOI 10.22533/at.ed.0031903097	
CAPÍTULO 8	91
ACEPÇÃO E VALIDAÇÃO PROCEDIMENTAL DE SISTEMA ARREFECEDOR MODULAR PARA USINA FOTOVOLTAICA	
<ul style="list-style-type: none"> André Luiz Veiga Gimenes Pascoal Henrique da Costa Rigolin Angélica Luana Linhares Vinícius Oliveira da Silva Diego Biaseto Bernhard Miguel Edgar Morales Udaeta 	
DOI 10.22533/at.ed.0031903098	
CAPÍTULO 9	105
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM ZONAS CLIMÁTICAS DE MINAS GERAIS	
<ul style="list-style-type: none"> Suellen Caroline Silva Costa Amanda Mello Faria Veloso Abreu Marcelo Machado Viana Pedro Paiva Brito Cristiana Brasil Maia Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz Lawrence Lee Kazmerski 	
DOI 10.22533/at.ed.0031903099	
CAPÍTULO 10	119
SIMVR-SOLAR: FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE REALIDADE VIRTUAL PARA PROJETO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	
<ul style="list-style-type: none"> Cleber Onofre Inácio Hugo Tavares Vieira Gouveia Ismael Humberto Ferreira dos Santos Luiz Fernando Almeida Fontenele Paulo Henrique Fernandes Ferreira Rodrigo Guido Araújo 	
DOI 10.22533/at.ed.00319030910	
CAPÍTULO 11	133
GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE IRRADIAÇÃO DIÁRIA PARA AS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS BRASILEIRAS	
<ul style="list-style-type: none"> Cleber Onofre Inácio Hugo Tavares Vieira Gouveia Luiz Fernando Almeida Fontenele Paulo Henrique Fernandes Ferreira 	
DOI 10.22533/at.ed.00319030911	

CAPÍTULO 12 147

GERENCIAMENTO DE REDES DE ENERGIA INTELIGENTES (REI) EMPREGANDO ANÁLISE POR MODELO PREDITIVO ATRAVÉS DE REDES MODULARES EXPANSÍVEIS DE INSTRUMENTAÇÃO

Elói Fonseca

José Francisco Resende da Silva

Victor Hugo Paezane dos Anjos

Diego Henrique do Amaral

Gabriel de Souza Cordeiro

Naiara de Souza Lima

Bruna Malaguti

Felipe Emanuel Sales

DOI 10.22533/at.ed.00319030912

SOBRE A ORGANIZADORA 154

ÍNDICE REMISSIVO 155

DISEÑO DE SISTEMAS HÍBRIDOS FV-H₂

Fernando Gutiérrez-Martín

Universidad Politécnica de
Madrid (UPM), ETSIDI*
Madrid, España

DESIGN OF PV-H₂ HYBRID SYSTEMS

RESUMEN: Los sistemas integrados FV-H₂ pueden desempeñar un papel efectivo para el suministro de energía distribuida en aplicaciones que requieren almacenamiento estacional con dispositivos compactos y estables. Su principal ventaja es la posibilidad de almacenar la energía excedente vía electrolisis (H₂) para su uso en pilas de combustible. Se presenta un método de diseño de sistemas híbridos FV-H₂ que considera los datos climatológicos y las variables eléctricas de los componentes para realizar balances de energía y evaluar el sistema en términos de requisitos de demanda, niveles de energía almacenada y costes resultantes. La energía suministrada por estos sistemas costaría aprox. lo mismo que los precios pagados por clientes domésticos, pero tienen el mérito de ser autónomos y el H₂ la capacidad de almacenamiento estacional evitando restricciones de electrificación y limitaciones de otros almacenamientos a corto plazo.

PALABRAS-CLAVE: Sistemas Híbridos, Energía Solar, Hidrógeno, Electrolisis

ABSTRACT: The integrated systems built with PV and H₂ could play an effective role in implementing a distributed energy supply in applications that require seasonal storage with compact, long life and low maintenance devices. The main advantage is the possibility of surplus energy storage by means of an electrolyzer which transforms electricity into H₂ that can be used in fuel-cells. This work concerns a methodology to design PV-H₂ hybrid systems that considers the weather data and the electrical variables of the components to perform energy balances and assess the system in terms of the load requirements, the levels of energy stored and the resulting costs. The energy supplied by these systems costs roughly the same as power prices paid by domestic customers, but they have the merit of being autonomous and H₂ has the capacity for seasonal energy storage avoiding electrification constraints and limitations of short-term storages.

KEYWORDS: Hybrid Power Systems, Solar Energy, Hydrogen, Electrolysis

* El estudio fue realizado en el seno del Máster propio Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA) de la UPM, al que el autor quiere agradecer el apoyo y ayuda prestados.

1 | INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas eficientes integrados por fuentes de energía renovable y tecnologías del hidrógeno puede desempeñar un papel importante en la reducción del uso de combustibles fósiles y las emisiones ambientales. Por su parte, la estructura difusa de la demanda de energía doméstica resulta favorable para implementar sistemas de generación distribuidos a partir de energías renovables, donde el sol es uno de los recursos preferidos por su fácil disponibilidad. Sin embargo, el carácter intermitente de la radiación solar hace que sea difícil producir energía fiable con módulos fotovoltaicos (FV) aislados; por ello, el suministro continuo de electricidad sin conexión a la red depende del almacenamiento, donde portadores como el hidrógeno (H_2) tienen la ventaja significativa de mantener su contenido energético cuando no están en uso.

La configuración de un sistema híbrido FV- H_2 para una vivienda autónoma se muestra en la Fig. 1. La principal característica del sistema es la posibilidad de utilizar la energía excedente transformándola en H_2 que se puede usar en una pila de combustible (FC): si la potencia del sistema primario (FV) es superior al consumo, el exceso se usa en un electrolizador (EL) para producir H_2 ; cuando no es suficiente, la energía proviene de la FC gracias al H_2 almacenado.

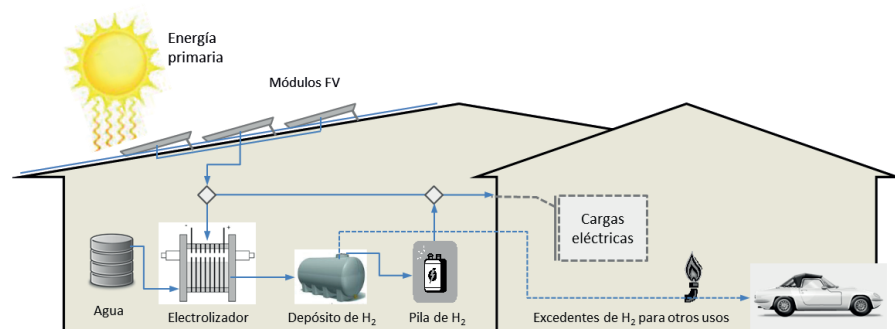


Fig. 1. Sistema híbrido autónomo basado en energía solar FV y almacenamiento de H_2

Por tanto, el sistema híbrido consta de módulos FV acoplados a un EL, con un depósito de H_2 y una FC, que deben cumplir ciertos requisitos:

- El sistema primario de energía debe suministrar un voltaje mínimo al EL para llevar a cabo la electrolisis del agua (teóricamente 1.23 V y en la práctica alrededor de 1.4 - 2 V).
- Cada subsistema (FV y EL) debería operar cerca de los puntos de máxima potencia (MPP) para maximizar la eficiencia en función de la radiación solar y temperatura.
- Las capacidades de cada subsistema deben seleccionarse cuidadosamente para satisfacer las demandas de electricidad, pero sin sobredimensionar el sistema.
- El sistema debería contener el mínimo de dispositivos auxiliares (e.g., acondicionamiento de energía, baterías y otros) para optimizar la eficiencia y los

costes totales.

Se han estudiado previamente sistemas híbridos basados en energías renovables e hidrógeno, incluyendo el recurso solar y las dinámicas de cargas, el acoplamiento FV-EL sin seguidores de potencia (MPPTs), la operación y eficiencia de los EL, así como las reducciones de costes requeridas para competir con los sistemas de energía convencionales (Alanne y Cao, 2017; Barbir, 2005; Deshmukh y Boehm, 2008; Erdinc y Uzunoglu, 2012; Yunez-Cano et al. 2016). De forma más específica, se han llevado a cabo estudios para encontrar el tamaño y operación de sistemas FV-EL acoplados de una forma directa para optimizar la transferencia de energía (Atlam et al. 2011; Khalilnejad et al. 2016, Migoni et al. 2016).

El presente trabajo se refiere a un nuevo modelo para el análisis y diseño de sistemas FV-H2, que considera los datos climáticos y las variables eléctricas de los componentes para realizar balances de energía y calcular la eficacia del sistema en términos de los requisitos de cargas. En la medida que en otros estudios el análisis se limita a sistemas más simples en los que la producción FV alimenta al EL en todo momento, en nuestro caso buscamos una disposición más deseable como la que muestra la Fig. 1, donde no hay conceptos definitivos para guiar el método de conexión FV-EL sin el uso de MPPTs. Debe señalarse que el objetivo del estudio no es una descripción detallada de la topología eléctrica del sistema, sino un modelo basado en el acoplamiento directo FV-EL. Por ello, el análisis no considera dispositivos electrónicos de potencia complejos ni baterías, mostrando simplemente como un conocimiento preciso de los subsistemas FV y EL permite optimizar sistemas autónomos de energía para satisfacer los consumos de electricidad a lo largo del tiempo; tanto los dispositivos electrónicos como las baterías suelen ser los elementos más frágiles de un sistema híbrido, por lo que la conexión directa FV-EL puede evitar estos problemas al tiempo que reduce el coste total del sistema. Este incluye una FC como dispositivo de energía auxiliar, lo que significa que no está siempre en funcionamiento; cuando esta se apaga, una batería sencilla podría proporcionar la energía mínima del bus eléctrico y responder a cambios rápidos en los dispositivos y cargas.

2 | RADIACION Y CARACTERIZACION DE LOS MODULOS SOLARES

Esta sección trata de la energía primaria (i.e., radiación solar) y las células FV que se simulan por medio de curvas de potencia a distintos niveles de radiación y temperatura en los módulos.

Energía Primaria

La fuente de energía primaria es la radiación solar que se convierte en eléctrica por medio de un conjunto de células FV, donde la generación de energía depende del nivel de insolación, la temperatura y las propiedades de las células.

Los perfiles de radiación (G) y temperatura (T) en los módulos FV pueden modelarse con las siguientes expresiones para fines de simulación:

$$G = \frac{1}{2} G_m [1 - \cos(2\pi t/\Delta t)] \quad (1a) \quad T = T_a + G(\text{NOCT} - 20)/800 \quad (1b)$$

donde G_m (W/m^2) es la densidad máxima de radiación solar, t es el tiempo entre la salida (t_1) y puesta del sol (t_2) ($\Delta t = t_2 - t_1$) y NOCT un parámetro característico de las celdas FV.

Este perfil depende de las condiciones climáticas, la latitud geográfica, la estación del año y la inclinación de los módulos, pero puede considerarse un día base para propósitos de cálculo preliminar de las instalaciones: e.g., $G_m = 1000 \text{ W/m}^2$, el amanecer y el ocaso a las 8 y 18 h, NOCT 47°C y temperatura ambiente: $T_a = 5 + 15 \cdot G/103$; de un modo paralelo, los cálculos se extenderían a períodos de tiempo más amplios con datos promedio de años-tipo o mediciones reales de estaciones meteorológicas locales.

Células Fotovoltaicas (FV)

La generación de energía de los módulos solares está determinada por las curvas características corriente-voltaje de las células FV. Estas curvas dependen de los niveles de radiación (G), de la temperatura (T) y de parámetros de modelo como los de Duffie y Beckmann (2006), uno de los más citados en la bibliografía, que ha sido seleccionado para caracterizar los módulos FV en este estudio (Ec. 2), junto con las relaciones para calcular los parámetros de la Tabla 1 y la hoja de especificaciones mostrada en la Fig. 2 (García-Valverde et al. 2011).

$$V = \alpha \cdot \ln [(I_{sc} - I)/I_o + 1] - I \cdot R_{s,r} \quad (2)$$

Para nuestro caso, los datos precisos son la corriente de cortocircuito ($I_{sc,r}$, μ_{isc}), la tensión en circuito abierto ($V_{oc,r}$, μ_{voc}), la intensidad y el voltaje para la máxima potencia ($I_{MPP,r}$, $V_{MPP,r}$), la banda de energía (E_g) y el n° de células en serie/paralelo (N_s , N_p).

<u>Parámetros en condiciones estándar (STC)</u>	<u>Variación respecto a STC</u>
$\alpha_r = (\mu_{voc} \cdot T_r - V_{oc,r} + E_g N_s) / (\mu_{isc} T_r / I_{sc,r} - 3)$	$\alpha = \alpha_r \cdot T / T_r$
$I_{o,r} = I_{sc,r} \exp [-V_{oc,r} / \alpha_r]$	$I_o = I_{o,r} (T/T_r)^3 \exp [(1 - T_r/T) \cdot E_g N_s / \alpha]$
$R_{s,r} = [\alpha_r \ln (1 - I_{MPP,r} / I_{sc,r}) - V_{MPP,r} + V_{oc,r}] / I_{MPP,r}$	$I_{sc} = G/G_r \cdot [I_{sc,r} + \mu_{isc}(T - T_r)]$

Tabla 1. Relaciones y variaciones del modelo respecto a las condiciones estándar

Las curvas corriente-voltaje (I-V) se muestran en la Fig. 2 junto con las estimaciones

de MPP para distintos valores de radiación solar y temperaturas que corresponderían a un perfil diario típico como el propuesto en la subsección anterior.

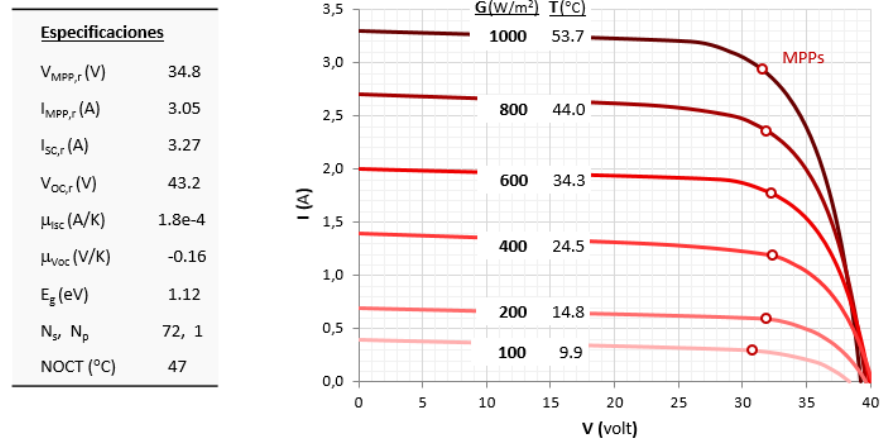


Fig. 2. Curvas I-V correspondientes a la tabla de especificaciones para los módulos FV en condiciones estándar (G_r : 1000 W/m^2 , T_r : 25°C); NOCT a 800 W/m^2 , 20°C y viento 1 m/s

3 I MODELADO Y SIMULACION DEL SISTEMA HÍBRIDO

El subsistema de almacenamiento y regeneración con hidrógeno consiste en un electrolizador de membrana protónica (PEM), un depósito de gas (H_2) y una pila de combustible (PEMFC). En un sistema híbrido conectado directamente, el EL opera en los puntos de intersección con las curvas de potencia de los módulos FV para diferentes niveles de radiación solar incidente.

El electrolizador recibe la energía de los módulos FV de acuerdo a sus características I-V de modo que estén acoplados lo más cerca posible a los MPPs. Para ello, tomamos la curva de un EL (PEM) que se ajusta a un modelo conciso de tres parámetros (E_c 3) (Shen et al. 2011), donde la densidad de corriente es la intensidad por unidad de área del electrodo (J , A/m^2).

$$V = [J + 2K(J \cdot R + E_0) + (J^2 + 4K \cdot E_0 \cdot J)^{1/2}] / 2K \quad (3)$$

Las características del EL se basan en investigaciones con celdas tipo PEM de baja resistencia y alta densidad de corriente, con electrodos de Pt/Ir a 90°C ; en estas condiciones, el potencial $E_0 = 1,40 \text{ V}$, la resistencia $R = 0,15 \text{ W}\cdot\text{cm}^2$ y la cinética $K = 27,8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Millet et al. 2010).

La posición y la forma de la curva del EL viene determinada por el número y el área de celdas conectadas en serie; e.g., la Fig. 3 muestra el acoplamiento del EL al MPP en el momento de máxima insolación: $NEL = 18$ y $SEL = 3,41 \text{ cm}^2$ por módulo (PV1), junto con las curvas del módulo FV para otros niveles de radiación solar.

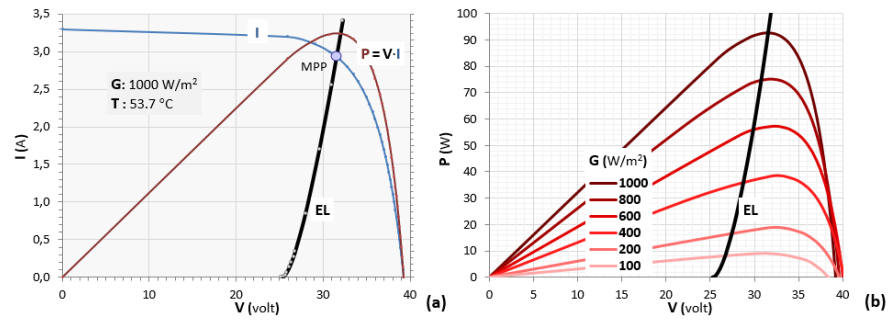


Fig. 3. Acoplamiento FV-EL al MPP (G_{\max}) (a) y para otros niveles de radiación (b)

Esta elección inicial del número y la superficie de los electrodos permite seguir el siguiente procedimiento para optimizar el diseño del sistema híbrido FV-EL por acoplamiento directo:

1. La intensidad de corriente del módulo FV se obtiene resolviendo de forma simultánea las Ec. 2-3, de acuerdo a los perfiles de radiación y temperatura (Ec. 1a y 1b):

$$I_{FV,t}(G_t, T_t) = 0 \quad (4)$$

2. Se agrega la generación de energía diaria y se compara con el consumo (C , kWh/día) para estimar el número de módulos con un factor de dimensionamiento adecuado (f):

$$P_{FV1} = \sum (I \cdot V)_{PV1,t} \quad (5a) \quad N_{FV} = f \cdot C / P_{FV1} \quad (5b)$$

3. De la generación total se resta el consumo en las horas con luz solar para imputar el exceso de energía horaria al electrolizador:

$$P_{FV} = \sum N_{FV} \cdot P_{FV1,t} \quad (6a) \quad P_{EL} = \sum |P_{FV,t} - C_t| \quad (6b)$$

4. La corriente total de los módulos FV conectados al EL se halla con $P_{ELt} = (I \cdot V)_{ELt}$ (Ec. 3), junto con el área de celda para la potencia máxima (nominal):

$$I_{EL,t} = f(P_{EL,t}) \quad (7a) \quad S_{CEL} = S_{EL} \cdot (P_{EL} / P_{FV1})_{\max} \quad (7b)$$

5. La producción de hidrógeno se estima con la ley de Faraday ($\mathfrak{F} = 96.5 \text{ kC/g}_{H_2}$), usando una eficiencia de corriente neta ($\eta_{EL} = 0,90$) para tener en cuenta las pequeñas pérdidas farádicas y el consumo de energía adicional fuera del electrolizador (BOP):

$$Q_H = S N_{EL} 3,6 \cdot \eta_{EL} I_{ELt} / \mathfrak{S} \quad (8)$$

6. Finalmente, se tiene en cuenta el hidrógeno utilizado por la pila de combustible (FC) para cubrir los déficits de potencia, con un rendimiento $\eta_{FC} = 0,60$ (PCI), así como la disponibilidad de H_2 en términos de diferencias de potencia (SOC):

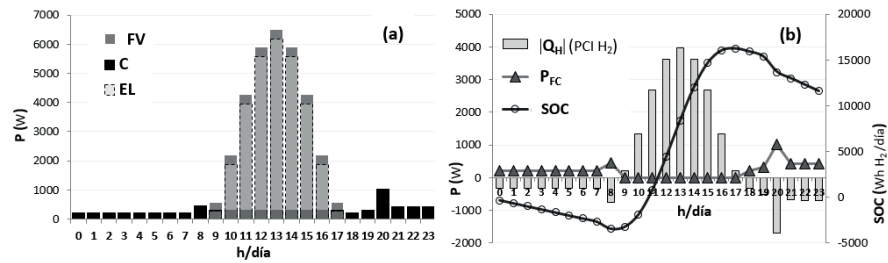
$$P_{FC} = \sum |C_t - P_{FVt}| \quad (9a)$$

$$SOC = \sum |Q_{H,t} - P_{FC,t} / \eta_{FC}| \quad (9b)$$

El procedimiento anterior se realiza con una hoja de cálculo que permite apreciar el conjunto de datos, las variables simuladas y los resultados obtenidos, tales como las salidas de potencia de los módulos (P_{FV}), los consumos de la vivienda (P_C), las entradas al electrolizador (P_{EL}), el hidrógeno producido (Q_H), la salida de la pila de combustible (P_{FC}) y el estado acumulativo de carga del sistema de almacenamiento a lo largo del día (SOC) (Fig. 4).

Al igual que con el perfil de radiación solar y temperatura, se ha tomado un perfil diario típico de consumos de la vivienda para propósitos de simulación, sobre la base de distintos aparatos eléctricos representativos, con sus potencias y horas de operación, que suman 7,635 kWh/día. Estas cargas ocurren sobre todo en la mañana y la tarde cuando hay poca disponibilidad solar, mientras en las horas centrales del día gran parte de la generación FV no se utiliza, cubriendo directamente solo el 36,5% de los consumos eléctricos; el resto (4,845 kWh) requiere por tanto los dispositivos de almacenamiento: i.e., el H_2 producido por el electrolizador se utiliza en la pila de combustible para cumplir con la dinámica de cargas que se muestra en las Fig. 4 a-b.

El programa permite simular el diseño del EL con distinto número y superficie de electrodos con objeto de optimizar el sistema híbrido (i.e., el tamaño y configuración del campo solar y el electrolizador que minimizan los costes totales y aseguran la cobertura de la demanda): los resultados indican que a medida que mejora el acoplamiento FV-EL, la dimensión requerida del campo solar disminuye pero el electrolizador se hace mucho más grande; i.e., en términos económicos, no sería ventajoso operar cerca de los MPPs (con menor densidad de corriente), incluso si ello da lugar a un consumo de energía más favorable; puede así concluirse que el criterio más importante para la optimización del sistema es la reducción del tamaño del EL en contraposición a la transferencia de energía de los módulos FV, debido tanto a los costes actuales de los componentes como a las características de tensión del EL.



Energía generada por módulo fotovoltaico, $P_{FV1} = \sum P_{FV1,t}(G_t)$	461,5 Wh/d
Número de módulos fotovoltaicos ($f=4,2$), $N_{FV} = f \cdot C / P_{FV1}$	70
Energía total del campo solar, $P_{FV} = \sum N_{FV} \cdot P_{FV1,t}$	32305 Wh/d
Energía al electrolizador, $P_{EL} = \sum P_{FV1,t} - C_t $	29515 Wh/d
Intensidad de corriente, $I_{EL} = \sum f(P_{EL,t})$	3490,4 kC/d
Superficie electródica, $S_{NEL} = N_{EL} \cdot S_{CEL}$	0,4095 m ²
Densidad de corriente (min-max), $J_m = I_{EL,m} / S_{CEL}$	0,43-8,60 kA/m ²
Hidrógeno producido, $Q_H = \sum N_{EL} \cdot 3,6 \cdot \eta_{EL} I_{EL,t} / 96,5$	586,0 g/d
Consumo energético unitario, $C_u = P_{EL} / Q_H$	50,4 kWh/kgH ₂
Energía de la pila de combustible, $P_{FC} = \sum C_t - P_{FV1,t} $	4845,0 Wh/d
Energía acumulada, SOC	11586 Wh _{H₂,PCI}

Fig. 4. Resultados de simulación del Sistema Híbrido

Por último, se realiza un estudio económico del sistema basado en el tamaño de los equipos, sus costes de inversión específicos, parámetros de vida útil y costes de operación (Tabla 2). Con ello, quizás el análisis más interesante es anticipar los valores de las variables operativas y los costes de los componentes, para asegurar que su hibridación con una fuente solar (FV) sea rentable en comparación a otras soluciones energéticas. La configuración anterior (Fig. 4) se considera óptima teniendo en cuenta la dinámica de operación, la eficiencia de conversión de energía, el tamaño de los equipos y los costes resultantes, donde los elementos críticos son los módulos fotovoltaicos y el electrolizador ya que la pila y depósito de hidrógeno tienen en la práctica las mismas dimensiones. La electricidad suministrada por el sistema híbrido cuesta 0,28 €/kWh, tras de deducir las ventas de H₂ (4 €/kg), i.e., aprox. igual al precio actual de la electricidad para consumidores domésticos en España, que incluye impuestos, gravámenes y otros costos regulados debido a la conexión a la red; sin embargo, el sistema híbrido tiene el mérito de ser autónomo y el H₂ la capacidad de almacenamiento estacional, evitando así las restricciones de electrificación en ubicaciones aisladas de la red, además de las limitaciones de las baterías que solo son capaces de almacenar energía a corto plazo.

Componentes	Tamaño (u)	Precio (€/u)	Inversión (€)	Costes (€/año)
Módulos FV	6481,5 W _p	1,29	8354,9	501,3 (39%)
Electrolizador	0,4095 m ² _{NEL}	10072	5391,1	323,5 (25%)
Pila de combustible	1,015 kW	3000	3045,0	380,6 (29%)
Depósito de H ₂	40,4 Nm ³	38	1535,4	84,4 (7%)
Total			18326	1290

Tabla 2. Análisis de costes del Sistema Híbrido

4 | CONCLUSIONES

La integración de tecnologías de hidrógeno y energía solar mediante la hibridación de paneles fotovoltaicos acoplados a un electrolizador es una opción viable, con costes operativos y de capital razonables, para satisfacer los consumos en una ubicación aislada de la red eléctrica.

El estudio presenta un modelo novedoso que considera el recurso solar, las características de los subsistemas y los requisitos de carga, para evaluar el sistema FV-H₂ según el tamaño de los componentes, los niveles de energía almacenados y los costes resultantes.

Los resultados muestran que a medida que mejora el acoplamiento directo (FV-EL), el campo solar se reduce pero el tamaño del EL se hace mucho mayor; por lo que no es particularmente ventajoso operar demasiado cerca de los puntos de máxima potencia con los sistemas actuales.

En todo caso, el coste neto de la energía suministrada por estos sistemas se aproxima al precio real de la factura en el mercado ibérico de electricidad para clientes abonados a la red eléctrica, con el mérito de su independencia y garantía de suministro a largo plazo; el uso de H₂ elimina la necesidad de gran número de placas solares y baterías, aunque puede haber una unidad de almacenamiento adicional como buffer de pequeño tamaño para variaciones rápidas de carga; cabe añadir que los elementos más frágiles en los sistemas híbridos FV suelen ser las baterías y los dispositivos electrónicos, por lo que el acoplamiento directo del EL y los módulos FV permite evitar estos problemas al tiempo que reduce los costes globales.

REFERENCIAS

Alanne K. and Cao S. (2017) Zero-energy hydrogen economy (ZEH2E) for buildings and communities including personal mobility. *Renew. Sust. Ener. Rev.* 71, 697-711.

Atlam O., Barbir F. and Bezmalinovic D. (2011) Method for optimal sizing of an electrolyzer directly

connected to a PV module. *Int. J. Hydrogen Energy* 36, 7012-18.

Barbir F. (2005) PEM electrolysis for production of H₂ from RES. *Solar Energy* 78, 661-69.

Deshmukh S.S. and Boehm R.F. (2008) Review of modeling details related to renewably powered hydrogen systems. *Renew. Sust. Ener. Rev.* 12, 2301-30.

Duffie J.A. and Beckman W.A. (2006) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3rd edn. Wiley Interscience, New York.

Erdinc O. and Uzunoglu M. (2012) Optimum design of hybrid renewable energy systems: overview of different approaches. *Renew. Sust. Ener. Rev.* 16, 1412-25.

García-Valverde R., Espinosa N. and Urbina A. (2011) Optimized method for photovoltaic-water electrolyser direct coupling. *Int. J. Hydrogen Energy* 36, 10574-86.

Khalilnejad A., Abbaspour A. and Sarwat A.I. (2016) Multi-level optimization approach for directly coupled photovoltaic-electrolyser system. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 11884-94.

Migoni G., Rullo P., Bergero F. and Kofman E. (2016) Efficient simulation of hybrid RES. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 13934-49.

Millet P. et al. (2010) PEM water electrolyzers: from electrocatalysis to stack development. *Int. J. Hydrogen Energy* 35, 5043-52.

Shen M., Bennett N., Ding Y. and Scott K. (2011) A concise model for evaluating water electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 36, 14335-41.

Yunez-Cano A., González R.G., Tufiño M., Barbosa R. and Escobar B. (2016) Solar-H₂ hybrid system integrated to a sustainable house in Mexico. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 19539-45.

SOBRE A ORGANIZADORA

JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aplicações 1, 2, 20, 32, 49, 79, 83, 121, 122, 150

Armazenamento de energia 147, 148, 149

Associação de módulos 5, 36

ATP 36, 43, 44, 48

C

Caracterização da sujidade 105

Células Fotovoltaicas 36, 41, 42, 78, 148

Condições Meteorológicas 105, 107, 109, 111

CPC 50, 51, 53, 54, 55, 56, 61, 62

D

Desenvolvimento 1, 8, 12, 23, 24, 28, 31, 32, 33, 34, 74, 75, 76, 86, 88, 89, 91, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 102, 103, 104, 119, 121, 122, 123, 131, 133, 147, 148, 150, 151, 153

E

Efeitos externos 36, 37

Electrolisis 64, 65

Energia 2, 5, 8, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 40, 49, 50, 74, 75, 78, 79, 83, 86, 88, 89, 91, 92, 93, 95, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 110, 118, 120, 121, 122, 130, 133, 134, 135, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 154

Energia Fotovoltaica 4, 6, 7, 10, 36, 121

Energia Solar 2, 5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 19, 20, 22, 24, 25, 28, 32, 33, 34, 37, 38, 49, 74, 79, 88, 89, 91, 104, 134, 145, 146, 154

Energia Solar Fotovoltaica 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 19, 20, 24, 37, 49, 154

F

Fotovoltaico/Térmico 75, 86, 91

G

Geração distribuída 9, 36, 134, 148, 153

H

Hidrógeno 64, 65, 66, 68, 69, 70, 71, 72

I

Inovação Industrial 22

M

Matrizes de Markov 133

Modelo Preditivo 8, 147, 148, 149

P

Projeto de Sistema Fotovoltaico 119

Propriedade Intelectual 22, 31

R

Radiação Solar 2, 10, 11, 50, 75, 79, 83, 84, 92, 106, 112, 133, 134, 135, 137, 145

Realidade Virtual 119, 121, 132

Redes Inteligentes 147, 148

S

Séries Sintéticas 133, 135, 137, 138, 141, 142, 143, 144

SFV 74

Simulação computacional 44, 45, 119, 154

Sistema de arrefecimento de FV 91

Sistemas Fotovoltaicos 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 19, 20, 36, 37, 79, 105, 106, 108, 109, 111, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 131, 133, 135, 136

Sistemas Híbridos 64, 66, 72

Sombreamento 6, 10, 13, 15, 16, 19, 36, 41, 42, 46, 47, 119, 120, 122, 125, 126, 127, 128, 129

T

Tolokatsin 50, 51

Tratamento de águas residuais 50

U

UFV 74, 75, 76, 84, 85, 86, 91, 92, 93, 95, 100, 101, 102, 103

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-616-4



9 788572 476164