



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS DE FILMES FINOS EM CONDIÇÕES REAIS DE RADIAÇÃO SOLAR

Autores: Olavo Cardozo¹, Ignacio Sánchez-Gendriz²

¹Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste, Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação – olavo.cardozo@cetene.gov.br;

²Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste, Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação – ignacio.gendriz@cetene.gov.br

RESUMO

A utilização de fontes renováveis de energia é fundamental para a transição energética, que visa uma matriz energética mais limpa e com fontes de energia que não emitam CO₂. Dispositivos fotovoltaicos de terceira geração, como dispositivos orgânicos e de perovskita, apresentam como grande vantagem, o fato de serem fabricados com infraestrutura mais simples, em relação aos dispositivos convencionais de silício, além de outras vantagens como a relação peso/energia gerada (Kg/Wh) e o fato de serem flexíveis. Neste trabalho, é avaliado o funcionamento de dispositivos orgânicos em condições reais de uso (*outdoor*). A partir da análise contínua da operação do dispositivo, foi possível verificar que tais dispositivos (feitos com filmes finos), apresentam melhor eficiência sob condições de radiação difusa. Os resultados da conversão fotovoltaica foram utilizados para calcular a diferença no desempenho da geração de H₂V a partir de eletrólise.

Palavras-chave: Dispositivos Fotovoltaicos; Radiação Solar; Hidrogênio Verde.

ABSTRACT

The use of renewable energy sources is fundamental for the energy transition, which aims at developing a cleaner energy matrix with sources that do not emit CO₂. Third-generation photovoltaic devices, such as organic and perovskite devices, present a major advantage in being manufactured with simpler infrastructure compared to conventional silicon devices, in addition to other benefits such as the power-to-weight ratio (kg/Wh) and their mechanical flexibility. In this work, the performance of organic devices under real operating conditions (*outdoor*) is evaluated. Continuous monitoring of device operation revealed that such devices (based on thin films) exhibit improved efficiency under diffuse radiation conditions. The photovoltaic conversion results were further used to assess differences in the performance of green hydrogen (H₂V) generation via electrolysis.

Keywords: Photovoltaic Devices; Solar Radiation; Green Hydrogen.

1 INTRODUÇÃO

Desde o trabalho de Arrhenius, em 1896, ficou estabelecida a correlação entre os níveis de CO₂ na atmosfera e o aumento da temperatura na superfície terrestre (ARRHENIUS, 1896). Cerca de 75% das emissões de CO₂ são decorrentes da utilização de energia em setores como indústria, transporte e comércio (MINX et al. 2021). Nesse sentido, a utilização de fontes renováveis de energia, como solar e eólica, tem papel fundamental no processo de redução das emissões de CO₂. Neste trabalho são discutidos resultados da geração de energia a partir de módulos fotovoltaicos de tecnologias emergentes, que apresentam grande potencial de crescimento no mercado fotovoltaico, a variação da geração em função das diferentes condições ambientais e a decorrente variação na geração de hidrogênio verde, que é um vetor energético importante para armazenar energias renováveis no contexto da transição energética. O hidrogênio verde é considerado um importante vetor energético e pode ser utilizado para



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

armazenar energia por longos períodos. Tal potencial é de grande importância no contexto da transição energética no Brasil e na região nordeste.

Tais esforços no sentido de desenvolver formas sustentáveis de geração e armazenamento de energia renovável estão diretamente ligadas a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável definidos pelas Nações Unidas.

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas. Fonte: Nações Unidas Brasil. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.



Com o desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos, eletrolisadores e processos eficientes para a geração e armazenamento de energias renováveis, é possível contribuir diretamente com 6 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável definidos pela ONU, sendo eles os objetivos 7, 8, 9, 11, 12 e 13.

2 METODOLOGIA

A partir da análise de dados experimentais contínuos (durante 10 dias) do funcionamento de um módulo fotovoltaico orgânico, contendo seis células em série, de camada ativa P3HT:PCBM, operando em tensão contínua, escolhida a partir da análise de curvas de tensão versus corrente (I-V) para diferentes níveis de radiação e temperatura, foram obtidas as eficiências de conversão fotovoltaica do módulo em diferentes condições de operação. Foi identificado, a partir da análise dos testes contínuos, que havia uma dispersão no gráfico de eficiência em função da irradiância (Figura 3) e que o módulo apresentava maior eficiência em condições de radiação difusa. Os testes foram realizados em Recife (latitude 8° 04' 03'' s e longitude 34° 55' 00'' w).



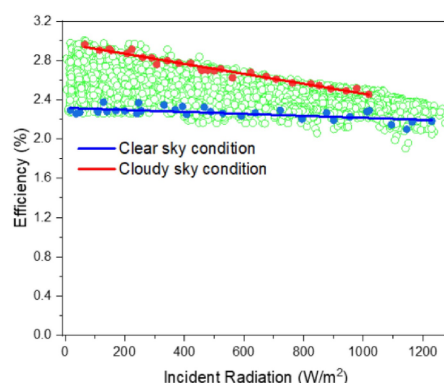
Figura 2 - Estrutura utilizada para ensaios outdoor.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da Figura 3, pode ser observado que há uma dispersão para os valores de eficiência na conversão fotovoltaica em função das condições ambientais. Ao realizar a análise dos dados foi possível inferir que, sistematicamente, o sistema apresentou melhor eficiência de conversão fotovoltaica em condições de radiação difusa, ou seja, em horários onde a radiação deveria ser alta (em torno do meio dia solar), porém, por condições de céu nublado o valor de irradiância era mais baixo. Se o valor de irradiância em Recife (latitude $8^{\circ} 04' 03''$ s e longitude $34^{\circ} 55' 00''$ w), em torno d meio dia solar é abaixo de 600 W/m^2 , isso indica que há nuvens entre o sol e o módulo, o que leva à uma predominância de radiação difusa.

Figura 3 - Eficiência da operação de módulos solares orgânicos em diferentes níveis de radiação incidente e condições climáticas (céu nublado e céu claro).



A partir da análise dos resultados de eficiência de conversão fotovoltaica foi possível perceber que o módulo apresentou até 25% de aumento em sua eficiência para condições de radiação difusa. Essas condições podem ser predominantes, sobretudo em aplicações onde o dispositivo não está posicionado diretamente no sol, como em fachadas de prédios, por exemplo.

Atualmente, os dispositivos fotovoltaicos de terceira geração baseados em filmes finos apresentam conversão fotovoltaica da energia solar com eficiências em torno de 20% (MA et al. 2025). A partir da conclusão extraída do resultado da Figura 3, pode-se estimar que haveria uma variação na eficiência de conversão fotovoltaica de 25%, ou seja, a eficiência poderia ser de



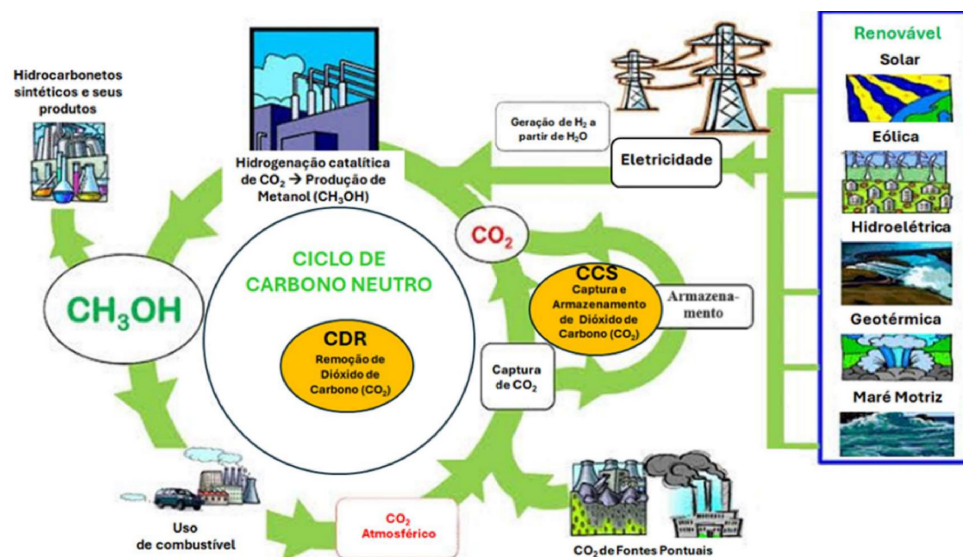
INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

20% em condições de radiação direta, ou até de 25% em condições de radiação difusa. Considerando-se os sistemas de eletrólise com eletrolisadores alcalinos, apresentam eficiência energética entre 60 e 70% na produção de hidrogênio (HU et al. 2022), é possível estimar que haveria uma variação na eficiência energética entre 12% e 15% na conversão de energia solar em energia química, na forma de hidrogênio verde (H2V). Estes valores demonstram a viabilidade do processo e tornam esses sistemas atraentes para implementação em larga escala.

Uma alternativa promissora, para o armazenamento e transporte de hidrogênio é a produção de combustíveis sintéticos, como o e-metanol, a partir de H2V e CO₂ oriundo de sistemas de captura de carbono (*Carbon Capture and Utilization - CCU*) (THIEDEMANN; WARK, 2025). A pesquisa na direção de obter dispositivos fotovoltaicos eficientes é essencial no contexto da transição energética, pois ao longo da cadeia de processamento, armazenamento e utilização da energia, o sistema perde eficiência em cada etapa, de forma que a primeira etapa de conversão, que é a conversão da energia solar em energia elétrica, funciona como um limitador. Com o desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos eficientes, eletrolisadores eficientes e formas sustentáveis de armazenar o hidrogênio, como a fotossíntese artificial a partir de H2V e CO₂ obtido a partir de sistemas CCU, para a produção de combustíveis líquidos e sustentáveis como e-metanol, o Brasil e o nordeste podem se consolidar como um importante centro de desenvolvimento econômico e tecnológico.

Figura 4 - Ciclo de Carbono Neutro, envolvendo a remoção, captura e utilização de dióxido de carbono (CO₂) para geração de energia limpa, na forma de etanol (CH₃OH) através de fontes renováveis. (Adaptado de Olah, G. A., Goeppert, A., & Prakash, G. S. (2011). *Beyond oil and gas: the methanol economy*. John Wiley & Sons).





4 CONCLUSÕES

A partir deste estudo, foi possível demonstrar que dispositivos fotovoltaicos de terceira geração baseados em filmes finos (módulos fotovoltaicos orgânicos, nesse caso) apresentaram melhor rendimento em condições de radiação difusa, sendo caracterizadas a partir de operação contínua e em condições reais de radiação e temperatura. Tal constatação é importante, pois mostra um ganho na eficiência para um padrão de radiação difusa. Tal condição de radiação difusa pode ser predominante em aplicações como fachadas e outras onde o dispositivo não está voltado diretamente ao sol, ou ainda em condições de muita nuvem. A eficiência dos módulos fotovoltaicos é essencial, visto que é a primeira etapa de conversão energética, que será seguida pela eletrólise da água para a geração de H_2 e, posteriormente, pelo processo de fotossíntese artificial para a produção de outros combustíveis a partir do H_2 gerado e de CO_2 , oriundo de sistemas de captura de carbono (CCU) (. A partir do desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos, eletrolisadores e catalisadores eficientes o processo de conversão de energia solar, primeiramente em H_2 e posteriormente em outros combustíveis como metanol, por exemplo, tem potencial para gerar desenvolvimento econômico e social de forma sustentável no Brasil e na região nordeste.

REFERÊNCIAS

ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, v. 41, n. 251, p. 237-276, 1896.

HU, S et al. A comprehensive review of alkaline water electrolysis mathematical modeling. Applied Energy, v. 327, p. 120099, 2022.

MA, M et al. Efficient and stable perovskite solar cells and modules enabled by tailoring additive distribution according to the film growth dynamics. Nano-Micro Letters, v. 17, n. 1, p. 39, 2025.

MINX, J. C. et al. A comprehensive dataset for global, regional and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2019. Earth System Science Data Discussions, v. 2021, p. 1-63, 2021.

OLAH, G. A.; GOEPPERT, A.; PRAKASH, G. K. S. Beyond oil and gas: the methanol economy. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

THIEDEMANN, T. M.; WARK, M. A compact review of current technologies for carbon capture as well as storing and utilizing the captured CO_2 . Processes, v. 13, n. 1, p. 283, 2025.