

O MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS. ANÁLISE TECNOLÓGICA.

Resumo

A tecnologia fotovoltaica bifacial (BPV) apresenta-se como uma alternativa inovadora para aumentar a eficiência na geração de energia, ao aproveitar o albedo do ambiente como fonte adicional de irradiação. Esta abordagem técnica emergente permite uma maior produção de energia em comparação com os módulos fotovoltaicos convencionais. No entanto, a aplicação prática do BPV enfrenta desafios relevantes, entre eles, a sensibilidade a variáveis ambientais e exigências rigorosas no processo de instalação.

Estudos recentes e modelos de mercado demonstram um cenário promissor para a expansão dessa tecnologia, sobretudo quando integrada com sistemas complementares, como o rastreamento solar, que potencializam o aproveitamento de recursos naturais. A análise apresentada neste artigo aborda os parâmetros críticos de instalação e a otimização do ganho bifacial sob condições variadas, evidenciando a superioridade técnica dos módulos bifaciais quanto à eficiência energética.

Palavras-chave: Fotovoltaico Bifacial (BPV); Fotovoltaico Monofacial (MPV); Ganho Bifacial; Albedo; Aplicações; Otimização

1. Introdução

A tecnologia fotovoltaica bifacial representa uma inovação notável na captação de energia solar ao utilizar ambos os lados dos módulos para converter a radiação em eletricidade. Ao contrário dos sistemas monofaciais (MPV), os módulos bifaciais (BPV) aproveitam não apenas a luz direta que incide na face frontal, mas também a luz refletida - o chamado albedo - que incide na parte traseira, aumentando o potencial de produção energética.

Esta tecnologia possibilita um melhor aproveitamento da energia disponível, elevando a eficiência dos sistemas fotovoltaicos sem a necessidade de ampliar significativamente a área de painel instalada. No entanto, o desempenho dos módulos bifaciais depende de fatores ambientais favoráveis e de condições específicas de instalação, o que impõe desafios técnicos para sua ampla implementação. A integração com tecnologias complementares, como o rastreamento solar, são uma mais-valia para estes sistemas, consolidando o seu papel relevante no cenário atual das energias renováveis.

A tecnologia solar fotovoltaica passou por um crescimento exponencial, tornando-se hoje numa das principais fontes de energia renovável, com registros de uma capacidade global instalada de 1047 GW. [1] Fatih Birol, diretor executivo da agência internacional de energia (IEA) afirma que a tecnologia solar "é o novo rei dos mercados de energia" [2].

A implementação de módulos fotovoltaicos bifaciais enfrenta desafios diversos que se estendem desde os aspectos técnicos quanto às condições ambientais. Estes módulos BPV dependem fortemente do albedo do solo: a eficiência adicional obtida pela face traseira só se concretiza em locais com superfícies altamente refletivas. Em ambientes desérticos, por exemplo, a alta refletividade do solo potencializa a captação de luz pela face traseira dos módulos, gerando incrementos de até 30% na eficiência em comparação aos sistemas monofaciais tradicionais [3].

Assim, a variabilidade das condições do terreno e a necessidade de configurações precisas de instalação, incluindo ângulos ideais e suportes especializados, constituem barreiras significativas.

2. A Tecnologia BPV

Vimos anteriormente que os módulos fotovoltaicos bifaciais podem apresentar ganhos em rendimento até 30% em estruturas fotovoltaicas fixas, quando comparando com a tecnologia tradicional MPV, em igualdade de condições atmosféricas. A combinação de módulos fotovoltaicos bifaciais com sistemas de rastreamento solar (*solar tracking*) de eixo único, podem conduzir a ganhos até os 40% [4]. No entanto, estes rendimentos energéticos maiores implicam um maior investimento, tornando-se necessário o seu desenvolvimento e maturidade tecnológica. Estima-se que a tecnologia BPV terá uma predominância no mercado no futuro, prevendo-se quotas de mercado de 70% até 2030, uma rápida evolução desde 20% em 2019, Figura 1.

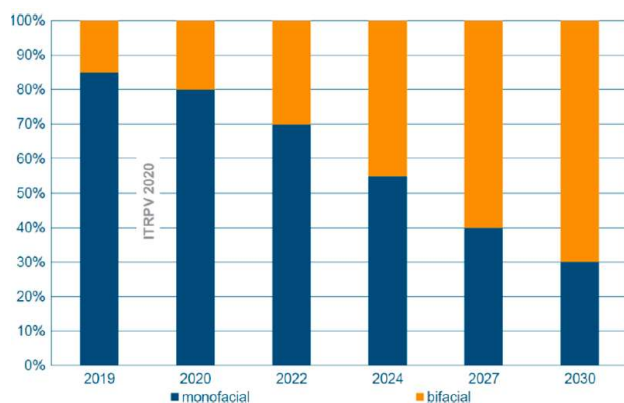


Figura 1 – Quota de mercado de BPV com previsão até 2030

[9]

A tecnologia fotovoltaica bifacial possui o mesmo princípio de funcionamento do que a monofacial, assentando no efeito fotoelétrico. Os módulos bifaciais adicionam uma camada de revestimento anti-reflexão com contactos traseiros, permitindo ao módulo absorver luz solar de ambas as faces. Quanto as células solares são expostas à luz solar, a luz é transmitida através do revestimento anti-reflexão [5]. Os fótons com energias superiores à energia *band-gap* libertam os eletrões das suas posições criando lacunas, gerando assim o fluxo de eletrões, ilustrado na Figura 2.

O mercado dos módulos fotovoltaicos bifaciais utiliza nomeadamente dois tipos de revestimento traseiro, vidro e material orgânico transparente. Para além da facilidade acrescida de instalação, estes também proporcionam um aumento na estabilidade e na durabilidade do painel, reduzindo o risco de danos causados por fatores ambientais, prolongando a vida útil do sistema [4] [5]. Existem, no entanto, limitações associadas ao uso destes módulos fotovoltaicos, sendo uma das preocupações principais o local de instalação e respetivas condições meteorológicas. Estes módulos são geralmente encapsulados em vidro em ambas as faces, permitindo absorver energia solar na face traseira, refletida através do solo. O conceito chave associado a esta tecnologia é o albedo.

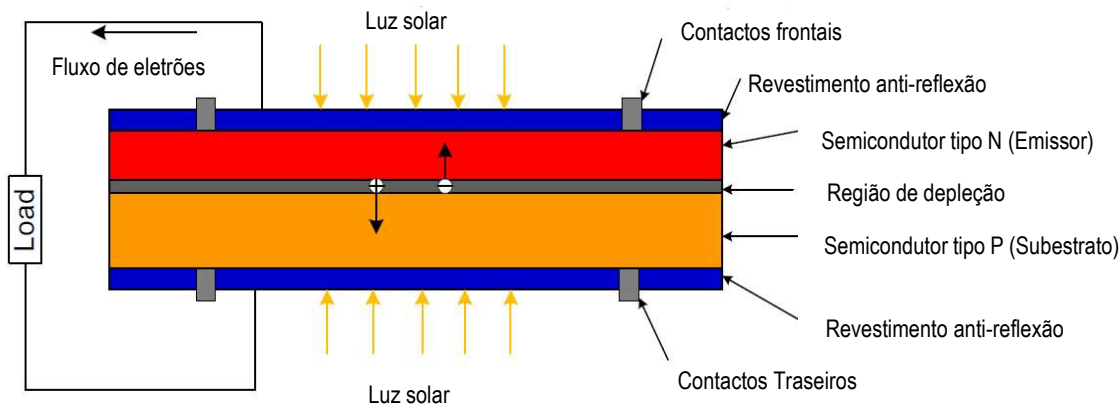


Figura 2 – Constituição de uma célula fotovoltaica bifacial [4]

O albedo de uma superfície é definido como o rácio entre a irradiância solar refletida numa superfície e irradiância solar total incidente na mesma [6]. Noutras palavras, quantifica a capacidade que uma superfície tem para refletir irradiação solar difusa refletida numa superfície, dependendo assim da localização (podendo variar normalmente entre 0.1 e 0.8). Estudos comprovam maiores ganhos bifaciais com superfícies de maior albedo. [7] Para avaliar a vantagem de um módulo BPV em comparação com um módulo MPV, o ganho bifacial, aumento relativo da produção de energia elétrica, é definido como a Eq. (1)

$$\text{Ganho bifacial (\%)} = (Y_{bi} - Y_{mono}) / Y_{mono} \times 100 \quad (1)$$

Onde, Y_{bi} e Y_{mono} são ganhos de energia elétrica BPV e MVP, respetivamente, em kWh. [8]

Para além do albedo, o rendimento dos módulos fotovoltaicos bifaciais dependerá fortemente das condições de instalação tais como a orientação do módulo, chamado de ângulo *tilt* (β), elevação do módulo em relação ao solo, e o ângulo de azimute (γ), ou seja, a orientação horizontal do módulo em relação ao norte geográfico). Para além disso, vários parâmetros meteorológicos do local tais como a irradiação global horizontal (GHI), irradiação difusa horizontal (DHI), temperatura ambiente e velocidade do vento [7] [4]. O próprio módulo fotovoltaico terá também associado um fator de bifacialidade (Φ_{bi}) que corresponde ao rácio entre a potência gerada pela parte frontal e a parte traseira do módulo, em condições normais de utilização (STC), e os resultados apresentados serão na base do ganho bifacial, a medida utilizada para comparar os módulos bifaciais e os módulos fotovoltaicos convencionais.

3. Aplicações para BPV

3.1 Instalações em estruturas fixas

Verifica-se que sistemas fotovoltaicos bifaciais poderão obter ganhos consideráveis quando instalados nas condições ótimas. Um estudo apresentado em [9] comparou produções

de sistemas bifaciais em comparação com sistemas monofaciais, usando 3 configurações diferentes, ajustando o ângulo de inclinação e elevação relativamente ao solo. Visto que o albedo se torna um dos principais fatores de influência, efetuaram-se, nesse mesmo estudo, trabalhos de otimização de albedo. Para isto, os painéis foram colocados sobre uma superfície de cimento pintada de branco para aumentar o seu grau de reflexão, com painéis orientados para este e oeste. Para além disso, aumentou-se a distância mínima ao solo (de 5 cm para 40 cm) para melhorar perdas devido ao sombreamento mútuo e melhorar o albedo. Comparou-se o ganho devido às células bifaciais, com diferentes coeficientes de bifacialidade, isto é, diferentes eficiências nominais da face traseira em relação à face frontal. Resultados deste estudo concluíram que os ganhos gerais de tecnologia BPV são 17 % para módulos orientados para este, 15 % para módulos orientados para oeste, comparando com módulos monofaciais com a mesma orientação. Porém, estes ganhos estariam reduzidos a 7 % e 5 %, respetivamente, depois de 1 ano de utilização, concluindo que a razão principal seria devido ao crescimento de musgo na superfície e consequentemente uma diminuição no albedo.

De facto, reforça-se que a tecnologia bifacial requer cuidados mais delicados para otimizar a sua produção, exigindo cuidados adicionais no seu meio ambiente para viabilizar a sua utilização comparativamente a módulos convencionais [2] [9]. Também foi efetuado um estudo do desempenho da tecnologia BPV pelos Laboratórios Nacionais Sandia, onde foram instalados lado a lado 2 pares de módulos monofaciais e bifaciais, orientados horizontalmente com um ângulo de inclinação de 35°. Os ganhos bifaciais para este sistema durante o período de ensaio variam geralmente entre cerca de 7 % e 16 % [10].

3.2 Instalações com *Solar tracking*

A coexistência de módulos bifaciais e dos sistemas de *solar tracking* oferece vantagens notáveis. De acordo com [5], os sistemas bifaciais de com rastreamento de eixo único

apresentam um aumento até 35 % no rendimento. O mesmo estudo confirma que os sistemas de rastreamento bifacial dominam atualmente o mercado fotovoltaico à escala dos serviços públicos, com mais de 60 % da quota de mercado dos sistemas fotovoltaicos que utilizam rastreamento de eixo único. Os sistemas de *solar tracking* de 2 eixos são capazes de seguir o sol durante o dia e requerem um investimento um custo mais elevado. Sistemas de 1 eixo serão capazes de seguir o sol de Este para Oeste (*EW-tracking*), numa posição fixa de Norte a Sul, sendo estes mais baratos relativamente a um sistema de 2 eixos, serão também os mais utilizados entre os dois.

Existem dois tipos de algoritmos de *tracking*: algoritmos de rastreamento solar (*sun-tracking*) que visam orientar os módulos para maximizar a luz solar direta, e algoritmos de rastreamento de potência (*power-tracking*), que orienta os módulos para maximizar a potência e energia produzida [11]. Atualmente existem várias medições publicadas de sistemas fotovoltaicos bifaciais para permitir tirar conclusões fiáveis, baseadas em provas sobre o desempenho no mundo real desta tecnologia.

O estudo apresentado em [12] conclui que os sistemas com *sun tracking* (monofaciais e bifaciais) têm um desempenho superior aos seus equivalentes sem seguidores, através de uma simulação em PVsyst, na localização de Tambuwal, no

Nordeste na Nigéria, onde a biblioteca meteorológica Meteonorm indicava uma irradiação horizontal difusa/global de 47,8 %. O sistema fotovoltaico monofacial com um seguidor solar obteve um ganho médio de 16,5% em relação ao sistema fotovoltaico monofacial com inclinação fixa, enquanto o sistema fotovoltaico bifacial com um seguidor obteve um ganho médio de 13,2%.

3.3 Sistemas Verticais

As instalações verticais são comparáveis à inclinação fixa monofacial e, nas regiões de grande exposição solar, podem ser inferiores às do sistema de referência monofacial. Em países da UE, como a Alemanha, a Next2sun mediu um ganho bifacial de 12 % [2]. Nesta configuração, os módulos beneficiam de irradiação acrescida durante a manhã e ao fim do dia, fazendo com que a curva de produção se torne numa curva de dois picos, com uma depressão no meio-dia, ilustrado na Figura 4. Estes sistemas possuem vantagens devido à sua configuração vertical visto que sua estrutura permite uma integração versátil com o seu meio ambiente, principalmente em aplicações agrícolas [1]. Devido à necessidade de um espaçamento maior entre fileiras, para evitar sombreamento entre painéis, é possível aproveitar esse espaço para agricultura. Para além disso, também se torna possível a passagem de máquinas agrícolas e há espaço para o gado.

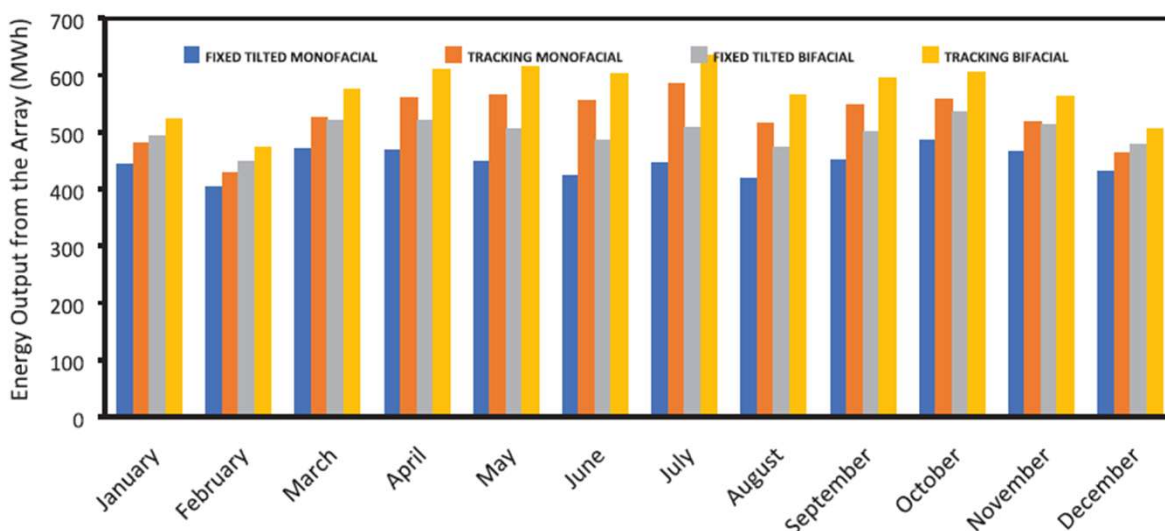


Figura 3 – Ganhos bifaciais com diferentes configurações – MPV e BPV [12]

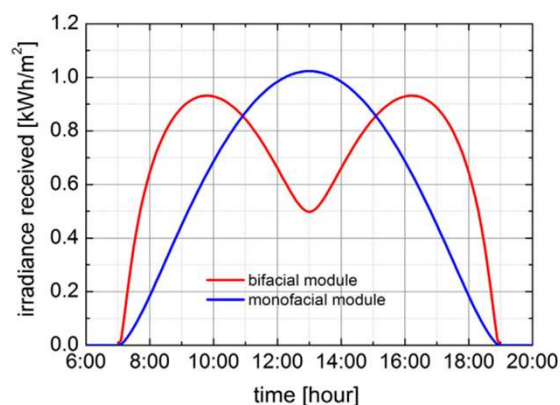


Figura 4 - Curva da irradiação captada por um sistema vertical BPV [18]

Nesse sentido, a eficiência no uso do espaço é maior, os painéis poderão proteger as plantas do excesso de radiação solar se necessário, e os agricultores poderão gerar a sua própria energia para alimentar equipamento agrícolas, sistemas de irrigação e outras infraestruturas. Esta aplicação servirá tanto para campos agrícolas como para edifícios, demonstrado na Figura 5 em telhados (*greenroofs*). Importante mencionar também a existência de edifícios integrados com BPV em fachadas, sombreamentos e vedações, funcionando como material de construção e simultaneamente permitindo a geração de energia elétrica [4]. Existem também estudos a comprovar a viabilidade da instalação de BPV em sistemas verticais aplicado a estradas. Esta aplicação oferece vantagens ambientais e energéticas e permite um uso eficiente do espaço, oferecendo simultaneamente uma barreira acústica de ruído proveniente das estradas.

O estudo apresentado em [13] propôs uma solução de uma instalação BPV, consistindo numa estrada no Bangladesh pintada de branco numa das margens, acompanhada por uma estrutura com módulos bifaciais verticalmente montados numa extensão de 200m. Utilizando as ferramentas de software PVsyst, PVSOL e SAM, foi registado um ganho bifacial de 12,26 %, com um albedo de 0,65.

3.4 BPV para sistemas flutuantes

Projetos fotovoltaicos flutuantes têm crescido em número e em escala. Desde 2015, mais de 100 centrais entraram em funcionamento em todo o mundo como reservatórios de energia hidroelétrica de topo, instalações de água industrial, lagos de aquacultura e outras massas de água. [14] [15] As vantagens que instalações fotovoltaicas flutuantes incluem o aumento do rendimento económico por unidade de terreno, um aumento de rendimento e produção de energia (devido ao arrefecimento natural da água nos painéis solares) e a redução da evaporação da água. Para além disso, podem ser integradas em centrais hidroelétricas. Existem soluções propostas na literatura que exploram a convivência entre água, alimentação e energia, consistindo na implementação de um sistema híbrido fotovoltaico-hidroelétrico, onde existe a possibilidade da criação de piscicultura [16]. O efeito da bifacialidade dos módulos pode ser explorado em instalações flutuantes, apesar do albedo de uma massa de água é muito baixo (0,1 o que é muito mais baixo do que o valor normal de 0,2 para o solo). No entanto, é possível otimizar o albedo do meio ambiente utilizando estruturas refletoras na base flutuante dos módulos bifaciais, solução estudada em [17].



Figura 5 - Aplicações para sistemas BPV verticais:

a) Aplicações em agricultura [2]; b) Aplicações em *greenroofs* [18]; c) Aplicações para barreiras acústicas [3]

Para verificar a sua viabilidade, estudos simularam a instalação flutuante com MVP e BPV, retirando o ganho bifacial. Utilizando os softwares de simulação PVsyst e SAM, foi demonstrado que é possível obter ganhos bifaciais até 13,5 % nas configurações ideais. A energia produzida no sistema bifacial aumenta proporcionalmente com o aumento da distância entre fileiras (*pitch*), representado na Tabela 1 como d_r (*distance rows*). O mesmo se verificou relativamente à altura de instalação dos módulos (considerou-se 0,9m para este estudo). Para o mesmo *pitch*, o sistema bifacial otimizado requer uma inclinação superior à do sistema monofacial, representado como $\gamma_{Mm/b}$, indo até 25°. O mesmo se verificou relativamente à altura de instalação dos módulos [14] [15].

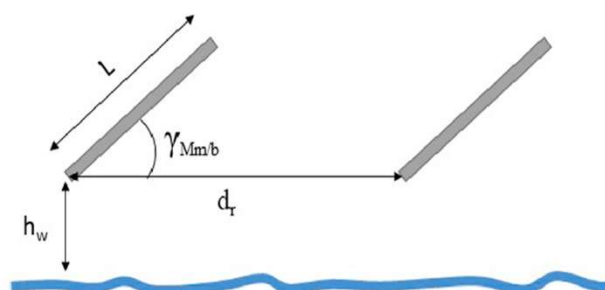


Figura 6 - Variáveis geométricas para instalações flutuantes BPV [14]



Figura 7 - Estrutura de base refletora em instalações flutuantes BPV [17]

Tabela 1 - Ganhos bifaciais obtidos em função das variáveis geométricas e albedo [14]

d_r/L	γ_{Mb}	γ_{Mm}	a (%)		
			20 BF_{fl}	10	5
1.25	10	10	9.0	6.3	5.0
1.4	15	15	10.2	7.1	5.6
1.55	20	20	11.3	7.9	6.2
1.7	25	20	12.1	8.3	6.4
1.85	25	20	12.8	8.8	6.9
2	25	20	13.5	9.3	7.2

4. Perspetivas Futuras e Conclusões

A influência da tecnologia BPV tem-se expandido de maneira significativa, com uma projeção de predominância expressiva até 2030. A viabilidade desta tecnologia foi comprovada, destacando os ganhos energéticos em diversas aplicações. Contudo, é essencial realizar mais avanços para consolidar a tecnologia BPV como uma alternativa competitiva face à MPV. Um dos desafios fundamentais é a I&D para a tecnologia BPV, para aumentar a viabilidade económica do BPV de modo a compensar os seus custos adicionais devido às condições específicas de instalação em cada aplicação, e avaliando a sua relação custo-benefício. Além disso, a avaliação do desempenho dos módulos BPV em condições reais de operação é imprescindível, considerando variáveis como flutuações na irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento.

A aplicação do BPV em sistemas de *tracking* em parques fotovoltaicos apresenta um grande potencial, pois essas instalações oferecem maior flexibilidade para otimização das condições, como o aumento da distância entre as fileiras e a elevação dos módulos. Para áreas mais industrializadas, as instalações verticais BPV mostram-se promissoras devido à sua alta versatilidade e capacidade de integração no ambiente urbano.

No entanto, destaca-se que, embora as perspetivas futuras para a aplicação do BPV sejam altamente positivas, ainda é necessário estudos mais aprofundados para garantir a consolidação da tecnologia e a sua promoção de implantação eficiente e sustentável.

5. Referências bibliográficas

- [1] M. Baricchio, M. Korevaar, P. Babal, and H. Ziar, "Modelling of bifacial photovoltaic farms to evaluate the profitability of East/West vertical configuration," *Solar Energy*, vol. 272, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112457.
- [2] R. Kopecek and J. Libal, "Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges," Apr. 02, 2021, MDPI AG. doi: 10.3390/en14082076.
- [3] SunPal, "Módulos bifaciais em várias condições climáticas: Análise de desempenho." Accessed: May 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.sunpalsolar.com/pt/analise-do-desempenho-dos-modulos-bifaciais-em-diferentes-condicoes-climaticas/>
- [4] W. Gu, T. Ma, S. Ahmed, Y. Zhang, and J. Peng, "A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology," Nov. 01, 2020, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113283.
- [5] J. Stein, PVPS Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications 2021 Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems. [Online]. Available: www.iea-pvps.org
- [6] X. Zhang et al., "Review of Land Surface Albedo: Variance Characteristics, Climate Effect and Management Strategy," Mar. 01, 2022, MDPI. doi: 10.3390/rs14061382.
- [7] G. Raina, R. Vijay, and S. Sinha, "Study on the optimum orientation of bifacial photovoltaic module," *Int J Energy Res*, vol. 46, no. 4, pp. 4247–4266, Mar. 2022, doi: 10.1002/er.7423.
- [8] W. Gu, T. Ma, M. Li, L. Shen, and Y. Zhang, "A coupled optical-electrical-thermal model of the bifacial photovoltaic module," *Appl Energy*, vol. 258, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114075.
- [9] A. Garrod and A. Ghosh, "A review of bifacial solar photovoltaic applications," Dec. 01, 2023, Higher Education Press Limited Company. doi: 10.1007/s11708-023-0903-7.
- [10] Sandia National Laboratories, "Field Example of Bifacial Gain at Sandia," 2023, Accessed: Dec. 11, 2024. [Online]. Available: <https://pvpmc.sandia.gov/pv-research/bifacial-pv-project/outdoor-bifacial-pv-performance-data/field-example-of-bifacial-gain-at-sandia/>
- [11] M. T. Patel, M. S. Ahmed, H. Imran, N. Z. Butt, M. R. Khan, and M. A. Alam, "Global analysis of next-generation utility-scale PV: Tracking bifacial solar farms," *Appl Energy*, vol. 290, May 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116478.
- [12] R. O. Yakubu, L. D. Mensah, D. A. Quansah, and M. S. Adaramola, "Improving solar photovoltaic installation energy yield using bifacial modules and tracking systems: An analytical approach," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.1177/16878132221139714.
- [13] A. Al Mehadi, M. M. Nishat, F. Faisal, A. R. H. Bhuiyan, M. Hussain, and M. A. Hoque, "Design, Simulation and Feasibility Analysis of Bifacial Solar PV System in Marine Drive Road, Cox's Bazar," in 2021 International Conference on Science and Contemporary Technologies, ICSCCT 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/ICSCCT53883.2021.9642526.
- [14] G. M. Tina, F. Bontempo Scavo, L. Merlo, and F. Bizzarri, "Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants," *Appl Energy*, vol. 281, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116084.
- [15] A. Ghigo, E. Faraggiana, M. Sirigu, G. Mattiazzo, and G. Bracco, "Design and Analysis of a Floating Photovoltaic System for Offshore Installation: The Case Study of Lampedusa," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/en15238804.
- [16] Y. Zhou et al., "An advanced complementary scheme of floating photovoltaic and hydropower generation flourishing water-food-energy nexus synergies," *Appl Energy*, vol. 275, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115389.
- [17] H. Ziar et al., "Innovative floating bifacial photovoltaic solutions for inland water areas," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 29, no. 7, pp. 725–743, Jul. 2021, doi: 10.1002/pip.3367.
- [18] S. Guo, T. M. Walsh, and M. Peters, "Vertically mounted bifacial photovoltaic modules: A global analysis," *Energy*, vol. 61, pp. 447–454, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.08.040.

