

TECNOLOGIAS EMERGENTES DE ENERGIA RENOVÁVEL OFFSHORE.

Resumo

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes, instalados em reservatórios de centrais hidroelétricas, representam uma inovação estratégica na transição energética. Esta tecnologia combina a geração de energia solar com a infraestrutura hidroelétrica existente, maximizando o uso do espaço e otimizando a eficiência energética.

Os módulos fotovoltaicos flutuantes proporcionam vantagens significativas, como a redução da temperatura operacional dos painéis, melhorando consideravelmente o seu desempenho e eficiência energética. Por outro lado, minimiza a evaporação dos reservatórios e reduz custos de aquisição de terrenos. Estes sistemas permitem uma abordagem sinérgica para ampliar a produção de energia renovável sem comprometer áreas terrestres. Contudo, apresenta desafios técnicos que necessitam ser superados, como a sua resistência a condições climáticas adversas.

Este artigo caracteriza os sistemas fotovoltaicos flutuantes, uma tecnologia que se tem consolidado como uma alternativa promissora para a descarbonização do setor elétrico, aumentando a contribuição da produção renovável e otimizando o aproveitamento simultâneo de recursos hídricos e solares de forma eficiente e sustentável.

Palavras-chave: Neutralidade Carbónica, Energias Renováveis, Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes, Descarbonização, Irradiação Solar

1. Introdução

Os painéis fotovoltaicos flutuantes (*Floating Photovoltaics* – FPV) representam uma solução promissora para a produção de energia renovável, especialmente quando instalados em albufeiras de centrais hidroelétricas. Esta tecnologia combina a instalação de painéis fotovoltaicos sobre a água

dos reservatórios artificiais das albufeiras, otimizando o uso do espaço e aproveitando sinergias técnicas e operacionais. Em países como Portugal, onde o solo disponível para grandes centrais solares é limitado, a utilização de superfícies aquáticas das albufeiras oferece uma alternativa eficiente e sustentável.

A tecnologia FPV flutuante baseia-se em plataformas ancoradas de forma segura e ligadas ao sistema elétrico da central, podendo partilhar a infraestrutura elétrica existente, como linhas de transmissão e subestações. Além da geração conjunta de energia hidroelétrica e solar (hibridização), o sistema FPV pode trazer benefícios adicionais, como a redução da evaporação da água e a melhoria da eficiência dos painéis, graças ao efeito de arrefecimento natural proporcionado pela proximidade da água [1].

A união dos dois sistemas de produção na mesma subestação, diminui a volatilidade da geração de um sistema fotovoltaico simples. Tal coordenação é garantida pela proximidade física entre as duas fontes, garantida pela infraestrutura do reservatório da barragem da hidroelétrica [2].

A produção fotovoltaica não sendo uma fonte despachável, traz intrinsecamente a dependência das condições climáticas, porém quando combinado ao reservatório de uma central hidrelétrica, durante o período de alta irradiação, é preferível a utilização da energia fotovoltaica como fonte para a injeção no sistema elétrico, tornando o reservatório uma espécie de “bateria virtual” acumulando água, e consequentemente energia na forma de energia potencial gravitacional [1].

Esta sinergia entre tecnologias renováveis posiciona-se como uma estratégia prioritária para países com recursos hídricos e solares abundantes, embora exija ajustes normativos e investimentos em pesquisa operacional.

A hibridização enfrenta obstáculos regulatórios que, no curto prazo, limitam a sua aplicabilidade. A Tabela 1 apresenta alguns aspetos e desafios desta hibridização.

2. Visão Geral dos Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes na Neutralidade Carbónica em Portugal

Portugal sendo um estado membro da União Europeia, firmou um acordo de neutralidade carbónica até 2050, em que garante uma redução de 99% nas emissões, em relação a 2005. Conforme se pode verificar na Tabela 2, são ilustradas as metas para de redução na quantidade de carbono emitido de alguns setores. Conforme previsto no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050), será necessária substituição de combustíveis fósseis por eletricidade, e há a perspetiva da entrada do hidrogénio verde como um importante vetor energético produzido essencialmente por eletrólise através de fontes renováveis [3].

Segundo a RNC2050, até o fim do acordo, toda a produção de energia elétrica será proveniente de fontes renováveis, com uma significativa expansão da tecnologia solar fotovoltaica, para a qual é prevista uma potência instalada de 13 GW centralizados e 13 GW descentralizados.

A utilização de grandes áreas em que ocorre o subaproveitamento do espaço como no caso de reservatórios de centrais hidrelétricas, pode ser uma boa alternativa de inserção de centrais fotovoltaicas flutuantes [3].

Portugal possui um dos mais altos níveis de irradiação solar anual quando comparado aos demais países da Europa, o que o torna vantajoso para a instalação de sistemas fotovoltaicos, podendo ter um custo de energia mais baixo que os demais países. A irradiação no país aumenta de norte em direção sul, devido a influência da latitude [4]. As centrais fotovoltaicas flutuantes, são constituídas principalmente por quatro componentes, definidos como, os módulos fotovoltaicos, a estrutura flutuante, a amarração ou ancoragem e a ligação à rede [5], [6].

Os módulos fotovoltaicos podem variar sua tecnologia, sendo rígidos ou flexíveis (tecnologia filme fino), porém devido aos custos envolvidos na utilização da solução com filme fino e sua menor eficiência, não há implementação em larga escala. Dessa maneira a maior utilização segue sendo com painéis rígidos de silício, podendo ser policristalino ou monocristalino, variando sua implementação de acordo com

Tabela 1. Hibridização e seus desafios

Aspeto	Hidroelétrica	FV Flutuante
Capacidade de ajuste	Rápida resposta à procura	Variável com irradiação
Eficiência sazonal	Maior no inverno	Maior no verão
Infraestrutura	Requer grandes investimentos	Aproveita estruturas existentes

Tabela 2. Metas de redução da emissão de carbono até 2050

Total Sistema Energético	2005	2015	2020	2030	2040	2050	$\Delta 2050/2005$
	71,44	52,94	49,73	28,24 28,15	14,15	7,11	-90%
Eletroprodutor	23,04	16,01	12,94	1,18 2,2	0,36	0,17	-99%
Refinação	2,47	2,37	2,22	1,87 1,33	0,76 0,8	0,18 0,19	-93% -92%
Indústria	18,34	12,73	12,45	9,48 8,72	7,34 7,6	4,99 5,11	-73% -72%
Transportes	19,59	16,19	16,27	10,61 11,18	3,19 2,91	0,47 0,42	-98%
Residencial	2,72	2,08	2,43	2 2,01	0,73 0,71	0,09 0,11	-97% -96%
Serviços	3,17	1,14	1,18	1,07 0,89	0,32 0,3	0,00	-100%
Agricultura	1,45	1,14	1,16	1,12 1,15	1,09 1,08	1,08 0,97	-26% -33%
Emissões Fugitivas	0,66	1,27	1,08	0,91 0,65	0,37 0,39	0,13 0,14	-81% -79%

Fonte: Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)

sua viabilidade econômica. As estruturas que sustentam os painéis flutuantes são geralmente produzidos em materiais plásticos resistentes, visando suportar as condições que estão imersos [5], [6].

O sistema de amarração é organizado para que a instalação fique imóvel, variando de acordo com as características do ambiente em que será implantado. Em áreas rasas normalmente o sistema é ancorado nas margens do reservatório, enquanto em locais com grande variação do nível de água, é ancorado no fundo.

3. Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes

3.1 Tecnologias e estruturas

Os módulos fotovoltaicos flutuantes são compostos por materiais cuidadosamente selecionados para garantir eficiência, durabilidade e segurança em ambientes aquáticos. Os próprios painéis solares, geralmente semelhantes aos utilizados em instalações terrestres, costumam ser fabricados com tecnologia de vidro duplo (dual glass) e células de silício, proporcionando maior resistência à humidade, à corrosão e aos efeitos prolongados da exposição solar. Em muitos casos, opta-se por módulos bifaciais, capazes de captar a luz refletida pela superfície da água, o que aumenta a produção de energia e exige ainda mais robustez no encapsulamento dos componentes elétricos.

A sustentação dos painéis é feita por estruturas flutuantes, cuja matéria-prima mais comum é o polietileno de alta densidade (HDPE). Este polímero apresenta excelente resistência à água, aos raios ultravioleta e ao envelhecimento, além de ser leve e suficientemente forte para suportar múltiplas vezes o seu próprio peso. O HDPE é preferido por sua durabilidade e pelo baixo custo de manutenção, sendo submetido a rigorosos testes de absorção de água e resistência ao desgaste. Em alguns projetos, especialmente aqueles que buscam maior robustez e estabilidade, são utilizadas ligas metálicas, como o aço ou o

magnésio, principalmente nas estruturas de suporte que conectam os flutuadores aos painéis. Essas ligas são tratadas para resistir à corrosão, já que o ambiente aquático pode ser agressivo para metais convencionais.

Recentemente, há também uma tendência de incorporar materiais mais sustentáveis e inovadores, como a cortiça, especialmente em projetos-piloto em Portugal. A cortiça, além de ser um recurso renovável, apresenta excelente fluabilidade natural e reduz o impacto ambiental da instalação. Em alguns casos, são empregadas membranas sintéticas resistentes ao estresse mecânico e à radiação solar, como base para os painéis, agregando flexibilidade ao sistema.

A fixação dos sistemas flutuantes é realizada por meio de ancoragens com cabos, blocos de cimento ou estacas, projetadas para acomodar as variações do nível da água e resistir às forças do vento e das ondas. Todos esses materiais e soluções são escolhidos para garantir que o sistema fotovoltaico flutuante opere com segurança e eficiência por pelo menos 25 anos, mesmo sob condições ambientais adversas. Assim, a seleção criteriosa dos materiais é fundamental para o sucesso e a longevidade dessas instalações de produção de energia inovadoras.

Um dos pontos chave para manter uma central fotovoltaica flutuante, é a maneira como se mantém todos os módulos flutuando. Existem diversas tecnologias de flutuadores, a Figura 1 ilustra os principais elementos estruturais, sendo eles citados a seguir [7]:

- Plataforma Flutuante: garante a flutuação e estabilidade, sendo fabricado normalmente em Polietileno de Alta Densidade, devido a sua resistência a radiação ultravioleta;
- Estrutura de Suporte do Módulo Fotovoltaico: estrutura metálica que deve ser capaz de suportar o peso dos módulos e resistir a força dos ventos, transmitindo a força aerodinâmica a qual o sistema está submetido para o sistema de ancoragem;
- Acoplamentos metálicos que mantêm as plataformas flutuantes unidas;

- Acoplamento flexível: dispositivos de borracha que permitem o movimento entre as plataformas flutuante, fazendo que exista a possibilidade de adaptação a diferentes níveis de água;
- Cordas: material o qual é utilizado para amarrar os flutuadores mais externos, tanto nas bordas quanto ao fundo do reservatório e;
- Sistema de ancoragem rígido: constituídos de estacas de concreto armado, que ancora a central flutuante e transmite as forças horizontais para as laterais do reservatório.

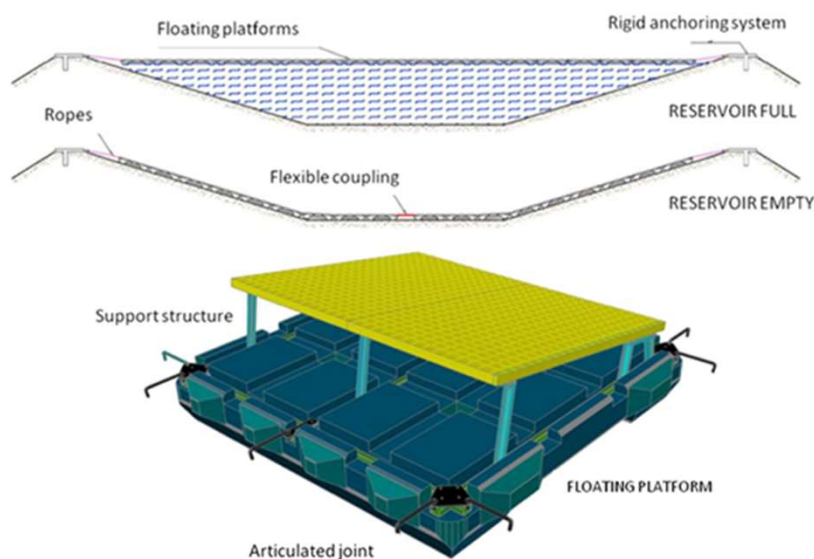


Figura 1 - Componentes de uma estrutura flutuante [7]

Em sistemas FV flutuantes, os flutuadores são ligados em série, fornecendo suporte estrutural aos módulos e cobrindo a superfície da água. A instalação destes sistemas deve considerar fatores como a variação do nível da água, o layout do reservatório, a estrutura da plataforma flutuante e o trabalho no local para construção e operação. Uma das principais dificuldades em projetar uma estrutura flutuante padrão universal, é devido a imensa variedade na geometria interna dos reservatórios [8].

Os três mais utilizados e principais tipos de estruturas flutuantes, são as seguintes:

1. Tubos flutuantes de polietileno de alta densidade (HDPE), combinado com balsas de aço ou alumínio
2. Estrutura de flutuadores integralmente em HDPE
3. Plataformas flutuantes conectadas formando uma grande plataforma, sustentando os módulos.

Estes três tipos possuem algumas semelhanças que serão descritas a seguir. Os métodos de avaliação dos benefícios se dão referente aos seguintes aspectos: custo, menor impacto ambiental, simplicidade na instalação, ancoragem e robustez [8].

A estrutura flutuante do tipo 1, é muito difundida entre os desenvolvedores de sistemas fotovoltaicos flutuantes, sendo um exemplo dessa tecnologia, a central de 200 kWp instalada na Itália em 2011, que mesmo após anos de operação, demonstra grande estabilidade. A estrutura, que pode ser verificada na Figura 2, possui uma simples instalação, oferecendo alta flutuabilidade, transitabilidade sendo que sua parte metálica mantém os módulos fotovoltaicos em uma inclinação vantajosa para o aproveitamento da radiação. A cobertura dessa estrutura em relação a superfície da água não apresenta grandes benefícios na redução da evaporação, pois ela cobre apenas 20% de toda a central fotovoltaica [8].



Figura 2. Estrutura Flutuante (Tipo 1)

A estrutura flutuante do tipo 2, conforme ilustrado na Figura 3, é projetada para instalar diretamente os módulos fotovoltaicos, sendo constituídas inteiramente em HDPE. O sistema é composto por dois flutuadores, sendo o primário para instalação do painel e secundário para aumentar a flutuabilidade e servir como caminho para a operação. O benefício principal dessa tecnologia está em seu baixo custo, porém está mais suscetível a influências dos ventos devido a seu baixo peso [8].



Figura 3. Estrutura Flutuante (Tipo 2)

A estrutura tipo 3 baseia-se na tecnologia utilizada em plataformas de petróleo, como pode ser visto na Figura 4, em que são criadas plataformas de grandes dimensões robustas o suficiente para suportar vários módulos fotovoltaicos. Devido a sua robustez, são indicadas para instalação em locais que possuem condições adversas [8].



Figura 4. Estrutura Flutuante (Tipo 3)

3.2 Rendimento

O rendimento de sistemas FV flutuantes supera os sistemas terrestres em condições climáticas idênticas, segundo uma abrangente revisão entre os anos de 2013 a 2022. A combinação do arrefecimento dos módulos através da água,

complementada com os ventos, traz um ótimo resultado de arrefecimento da água. Foi constatado através de simulações que a eficiência das células possui um aumento de 0,24% e uma diferença de temperatura de operação na célula de 3,5 °C, considerando todos os fatores, a eficiência de geração de um sistema fotovoltaico flutuante pode superar de 1,5 a 2,0% a geração de centrais fotovoltaicas terrestres em condições semelhantes [9]. A inclinação dos módulos fotovoltaicos a 0° otimiza a dissipação de calor de forma mais uniforme em todo o módulo. Contudo, isso impacta negativamente a geração de energia, já que, para uma geração ideal, o sistema deve estar direcionado e inclinado para absorver o máximo de radiação solar, sendo a inclinação ideal próxima à latitude do local [10].

4. Discussão: Vantagens e Desafios

A utilização de locais aquáticos para a instalação de centrais fotovoltaicas, pode ser considerado como uma tecnologia recente que segue em estudos para validação de todos seus benefícios e limitações quanto ao tipo de instalação.

Há algumas razões que podem ser listadas, que diferenciam essa tecnologia do convencional, conforme pode ser visto:

1. Tratando-se de um local aquático, as interferências na exposição solar são mínimas [11];
2. Os painéis fotovoltaicos são arrefecidos pela água do reservatório, trazendo com isso um aumento na produção de energia;
3. A radiação difusa pode ser aumentada devido a refletividade da água;
4. Menor taxa de evaporação da água, devido a obstrução através dos módulos [11];
5. Economia de água do reservatório quando operado em conjunto com uma central hidrelétrica, otimizando a geração durante o dia;
6. Menores custos com aquisição do local de instalação da central fotovoltaica [12]
7. Menor sujidade de poeira sobre os módulos, mantendo a radiação que chega nas células de silício [13].

Apesar dos benefícios citados acima, também há desvantagens, podendo ser citado como exemplo a alta humidade que tanto os módulos quanto todo o sistema de flutuadores e amarração estarão expostos, podendo afetar em sua vida útil. A instalação flutuante é altamente exposta a condições climáticas adversas, como fortes ventos e cheias nos reservatórios das hidroelétricas [5].

5. Conclusões

A aceleração da transição energética em Portugal é uma oportunidade estratégica para posicionar o país na vanguarda das energias renováveis na Europa, respondendo de forma eficaz ao desafio da neutralidade carbónica. Num território de dimensão limitada, a aposta em soluções inovadoras e integradas, como os sistemas fotovoltaicos flutuantes em albufeiras hidroelétricas, revela-se não apenas viável, mas determinante para maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis. A hibridização das centrais hidroelétricas com tecnologia solar flutuante permite potenciar a infraestrutura já existente, aumentar a produção de energia limpa e reduzir perdas associadas à evaporação da água, ao mesmo tempo que se elevam os índices de eficiência energética e se minimizam custos operacionais.

O impacto positivo desta solução é amplificado pela complementaridade entre a produção hidroelétrica e solar, garantindo maior estabilidade ao sistema elétrico nacional e contribuindo para a segurança do abastecimento. Apesar de persistirem desafios técnicos, como a necessidade de materiais mais robustos para resistir à exposição prolongada à humidade e às condições climáticas adversas, a rápida evolução tecnológica e o dinamismo do setor apontam para uma superação progressiva destes obstáculos.

Num contexto europeu em que a liderança na transição energética se traduz em competitividade, criação de emprego e sustentabilidade, Portugal tem aqui uma oportunidade de afirmar-se como referência, impulsionando o crescimento económico e a coesão social através da aposta em energias limpas.

A implementação alargada de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios hidroelétricos não é apenas uma resposta às metas climáticas, mas uma estratégia previsível e de elevado impacto para garantir um futuro energético mais seguro, resiliente e sustentável para o país.

Referências Bibliográficas

- [1] J. Farfan e C. Breyer, "Combining Floating Solar Photovoltaic Power Plants and Hydropower Reservoirs: A Virtual Battery of Great Global Potential," *Energy Procedia*, pp. 403-411, November 2018.
- [2] H. M. Pouran, M. P. C. Lopes, T. Nogueira, D. A. C. Branco e Y. Sheng, "Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology," *iScience*, 18 Nov. 2022.
- [3] República Portuguesa, "Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)," Portugal, 2019.
- [4] J. Baptista, P. Vargas e J. R. Ferreira, "A techno-economic analysis of floating photovoltaic systems, for " *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, July 2021.
- [5] S. G. e. Costa, "Impactes ambientais de sistemas fotovoltaicos flutuantes," Lisboa, 2017.
- [6] M. R. R. Sobral, "Avaliação do potencial fotovoltaico flutuante em Portugal," Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Dep. de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Lisboa, 2018.
- [7] M. R. Santafé, J. B. T. Soler, F. J. S. Romero, P. S. F. Gisbert, J. J. F. Gozálviz e C. M. F. Gisbert, "Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs," *nergy*, pp. 246-255, 1 April 2014.
- [8] M. Kumar, H. M. Niyaz e R. Gupta, "Challenges and opportunities towards the development of floating," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29 September 2021.
- [9] L. Liua, Q. Wanga, H. Lina, H. Lib, Q. Suna e R. wannersten, "Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems," *Energy Procedia*, 2017.
- [10] R. C.J., K. H. L. J. C. Kurniaa, S. Roya, B. J. Borad e B. J. Medhie, "Towards sustainable power generation: Recent advancements in floating photovoltaic technologies," *RenewableandSustainableEnergyReviews*, 14 February 2024.
- [11] J. Baptista e P. Vargas, "Portuguese national potential for floating," em *International Conference on Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe*, Madrid, Spain, 2020.
- [12] B. U. T. F. Valadares, Uma metodologia sobre estratégias de estratégias de gerenciamento de energia para usinas fotovoltaicas flutuantes instaladas sobre reservatórios de usinas hidrelétricas, Belo Horizonte, MG, 2017.
- [13] R. A. R. Rebelo, "Estudo do Potencial de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Massas de Água Doce e Marinhas," Évora, 2021.