



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

Tiago Emanuel Maia Freire

Sistema Fotovoltaico Integrado (BIPV) na construção civil: uma visão geral

PAU DOS FERROS
2025

Tiago Emanuel Maia Freire

Sistema Fotovoltaico Integrado (BIPV) na construção civil: uma visão geral

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Adelson Menezes Lima, Prof. Dr.

© Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do autor, sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu respectivo autor seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

F866s Freire, Tiago Emanuel Maia.
Sistema Fotovoltaico Integrado (BIPV) na
construção civil: uma visão geral / Tiago Emanuel
Maia Freire. - 2025.
51 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Adelson Menezes Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. BIPV. 2. Energia fotovoltaica. 3. Fachada
predial. 4. Construção civil. I. Lima, Prof. Dr.
Adelson Menezes, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA). O sistema foi customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC), sob orientação dos bibliotecários da instituição, para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Tiago Emanuel Maia Freire

Sistema Fotovoltaico Integrado (BIPV) na construção civil: uma visão geral

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, *Campus* de Pau dos Ferros, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 13/06/2025

BANCA EXAMINADORA

Adelson Menezes Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Paulo César Linhares da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

José Henrique Maciel de Queiroz, Eng. Me. (UFPB)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço Àquele que é, que era e que há de vir, o Alfa e o Ômega, o Princípio e o Fim.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Adelson Menezes Lima pela paciência, ensinamentos e preciosa ajuda.

Agradeço aos demais membros da banca, Eng. Me. José Henrique Maciel de Queiroz e Prof. Dr. Paulo César Linhares da Silva, pela atenção e valiosas contribuições concedidas para o enriquecimento do presente trabalho.

Deus escolheu coisas que o mundo despreza, acha insignificante e diz que não tem valor, para reduzir a nada aquilo que o mundo considera importante. (1 Coríntios 1:28)

RESUMO

O crescente consenso entre diversos países sobre a urgência de combater o aquecimento global, impulsiona a busca por fontes de energia mais limpas e renováveis, com destaque para a energia solar. Nesse contexto, a implementação de sistemas fotovoltaicos (FV) tem recebido significativos investimentos e impulsionado pesquisas inovadoras. A busca por uma maior amplitude na integração desses sistemas em edificações resultou no surgimento do Sistema Fotovoltaico Integrado à Construção (BIPV), uma tecnologia vanguardista que amplia a produção de energia renovável ao mesmo tempo em que oferece novas possibilidades arquitetônicas e substitui componentes construtivos convencionais, a exemplo do revestimento externo. Este trabalho realizou uma revisão da literatura científica atual sobre BIPV, abordando aspectos como técnicas de implementação, aplicabilidade na construção civil, considerações arquitetônicas e os desafios existentes. Os resultados da pesquisa revelaram uma ampla abordagem dos sistemas fotovoltaicos integrados, com ênfase em aspectos como: segurança (riscos de incêndio e métodos de fixação), desempenho energético (análise da conversão de energia em condições de sombreamento), estética (técnicas de coloração das células solares) e durabilidade (resistência dos painéis ao substituir revestimentos tradicionais de fachadas). Concluiu-se que muitos aspectos da aplicação do BIPV, especialmente em fachadas, ainda demandam aprofundamento em pesquisas e aprimoramentos. A múltipla função esperada desses painéis fotovoltaicos, que atuam como geradores de energia e componentes construtivos, exige o cumprimento rigoroso dos requisitos de desempenho, visando não apenas os pontos supracitados, mas também um melhor retorno econômico e a ampliação de sua variabilidade estética e arquitetônica.

Palavras-Chave: BIPV; energia fotovoltaica; fachada predial; construção civil.

ABSTRACT

The growing consensus among various countries on the urgency of combating global warming is driving the search for cleaner and renewable energy sources, with solar energy standing out in particular. In this context, the implementation of photovoltaic (PV) systems has received significant investments and has spurred innovative research. The pursuit of broader integration of these systems into buildings has led to the emergence of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV), a cutting-edge technology that expands renewable energy production while offering new architectural possibilities and replacing conventional building components, such as exterior cladding. This study conducted a review of the current scientific literature on BIPV, addressing aspects such as implementation techniques, applicability in the construction sector, architectural considerations, and existing challenges. The research findings revealed a broad approach to integrated photovoltaic systems, with emphasis on aspects such as: safety (fire risks and fastening methods), energy performance (analysis of energy conversion under shading conditions), aesthetics (solar cell coloring techniques), and durability (panel resistance when replacing traditional façade cladding). It was concluded that many aspects of BIPV application, particularly in façades, still require further research and development. The multifunctional nature expected of these photovoltaic panels, which serve both as energy generators and construction components, demands strict compliance with performance requirements, aiming not only at the aforementioned factors but also at better economic return and greater aesthetic and architectural variability.

Keywords: BIPV; photovoltaic energy; building facades; civil construction.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivos gerais	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 O crescente consumo de energia e a busca por soluções sustentáveis no setor da construção civil	12
3.2 A regulamentação europeia e os edifícios de energia quase zero	13
3.3 O potencial do sistema fotovoltaico integrado à construção	14
3.4 Desafios e avanços nas pesquisas de BIPV	15
4 METODOLOGIA	15
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E IMPLICAÇÕES	16
5.1 Aplicabilidade e impacto energético do BIPV.....	16
5.2 Aspectos estéticos e arquitetônicos do BIPV	27
5.3 Durabilidade e aspectos de segurança do BIPV	37
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

O cenário global caracteristicamente é marcado por um elevado consumo energético oriundo de combustíveis fósseis, especialmente no setor da construção civil, o que, em conjunto com as alterações climáticas, intensifica a necessidade de adotar práticas construtivas mais sustentáveis. Projeções indicam um crescimento contínuo do consumo global de energia: entre 1990 e 2005, o aumento foi de 23%, com expectativas de atingir 68% até 2025 e mais de 90% até 2035, conforme Azam e Sevinç (2021); Italos *et al.* 2022. Esse aumento acentua a necessidade de maior atenção ao uso dos recursos naturais e aos ecossistemas, tornando imperativa a transição para modelos energéticos mais limpos e eficientes.

Nas últimas décadas, a sustentabilidade ascendeu como ponto fundamental nas discussões entre engenheiros, construtores e pesquisadores, promovendo uma maior conscientização sobre a capacidade do setor da construção em mitigar seus impactos no consumo de energia e nas mudanças climáticas, Italos *et al.* (2022). A busca por Edificações de Energia Quase Zero (NZEB) e Edifício com Balanço de Energia Positivo (PEB), esse último, caracterizado por produzir mais energia renovável do que consome ao longo de um ano, tornou-se uma meta global, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias que insiram a geração de energia renovável diretamente à infraestrutura urbana, especialmente aos grandes empreendimentos.

Diante desse cenário, o sistema fotovoltaico integrado à construção (BIPV), do inglês *Building Integrated Photovoltaics*, surge como uma solução multifuncional. Este sistema, de caráter substitutivo, é aplicado como revestimento ou envoltória arquitetônica em fachadas, telhados, claraboias e outras superfícies, ao mesmo tempo em que gera energia elétrica de forma mais limpa e sustentável. A integração de caráter especialmente estético e funcional do BIPV não apenas melhora o desempenho energético dos edifícios, mas também contribui para o valor arquitetônico, e principalmente na redução da pegada de carbono ao se reduzir a quantidade de gases do efeito estufa emitida por meio de atividades humanas.

No contexto, é importante diferenciar o BIPV do Sistema Fotovoltaico Aplicado à Construção (BAPV), do inglês *Building Applied Photovoltaics*. O BAPV consiste na sobreposição de módulos solares em estruturas já existentes, como a instalação de

painéis sobre fachadas pré-existentes, sem que estes assumam uma dupla funcionalidade de componente construtivo. Contudo, a terminologia BIPV tem sido empregada com uma abrangência maior em trabalhos científicos, englobando alguns contextos que anteriormente seriam classificados como BAPV, conforme Shukla, Sudhakar e Baredar (2017); Siddique *et al.* (2023). Essa abrangência terminológica reflete a crescente amplitude dos produtos BIPV, que cada vez mais, de forma inédita e inovadora, são projetados para substituir integralmente diferentes materiais de construção convencionais.

Diante do exposto, o BIPV destaca-se como uma tecnologia promissora e multifuncional, proporcionando uma produção de energia mais limpa, agregando valor às edificações e promovendo economia de materiais, visto que os painéis substituem revestimentos tradicionais em fachadas, telhados e claraboias, entre outros. A versatilidade do BIPV permite sua aplicação em diversos tipos de edificações, desde residências unifamiliares até grandes complexos, e em diferentes climas, adaptando-se às necessidades específicas de cada projeto.

A integração fotovoltaica em diferentes partes dos edifícios representa um avanço significativo rumo a construções energeticamente mais eficientes e sustentáveis. Embora o setor da construção civil enfrente alguns desafios de implementação por se tratar de produtos relativamente novos no mercado e em constante evolução tecnológica, os benefícios energéticos e ambientais já são tangíveis.

Para edificações de grande porte, as áreas das fachadas verticais são consideravelmente maiores que as dos telhados e, em geral, oferecem algumas vantagens para a instalação de painéis fotovoltaicos, uma vez que acumulam menos poeira e oferecem maior capacidade de painéis instalados. O BIPV, portanto, possui um grande potencial para utilizar as áreas verticais disponíveis para a geração de energia elétrica, sobretudo em ambientes urbanos onde o espaço horizontal é limitado, Chen *et al.* (2021).

Portanto, este estudo propõe uma investigação estruturada sobre o BIPV no âmbito da construção civil, selecionando aspectos que promovam uma compreensão abrangente da temática. Serão abordados pontos essenciais, incluindo novas opções de cores e texturas para os painéis fotovoltaicos, que expandem as possibilidades estéticas e arquitetônicas, bem como os requisitos elétricos, de segurança (como resistência ao fogo e proteção contra sobretensão) e de desempenho (eficiência em

diferentes condições climáticas e de sombreamento) associados a essa tecnologia. De tal modo, a análise visa proporcionar um panorama detalhado sobre os avanços e desafios do BIPV, contribuindo para a sua difusão e aprimoramento no cenário da construção sustentável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Explorar e destacar os aspectos relevantes para o desenvolvimento e a aplicação de sistemas fotovoltaicos integrados à construção (BIPV) no setor da construção civil, expondo a temática e as principais subtemáticas identificadas durante a pesquisa, de forma organizada a fim de favorecer o seu entendimento.

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, este estudo propõe os seguintes objetivos específicos:

1. Investigar a literatura científica que aborda a temática BIPV, identificando os fatores cruciais relacionados à sua aplicabilidade, funcionalidade, eficiência, segurança, desempenho e aspectos estéticos.
2. Analisar as limitações atuais da tecnologia BIPV e as necessidades de aprimoramento existentes.
3. Apresentar os produtos BIPV mais recentes e inovadores disponíveis no mercado, destacando suas características e as tendências impulsionadas pela indústria do segmento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O crescente consumo de energia e a busca por soluções sustentáveis no setor da construção civil

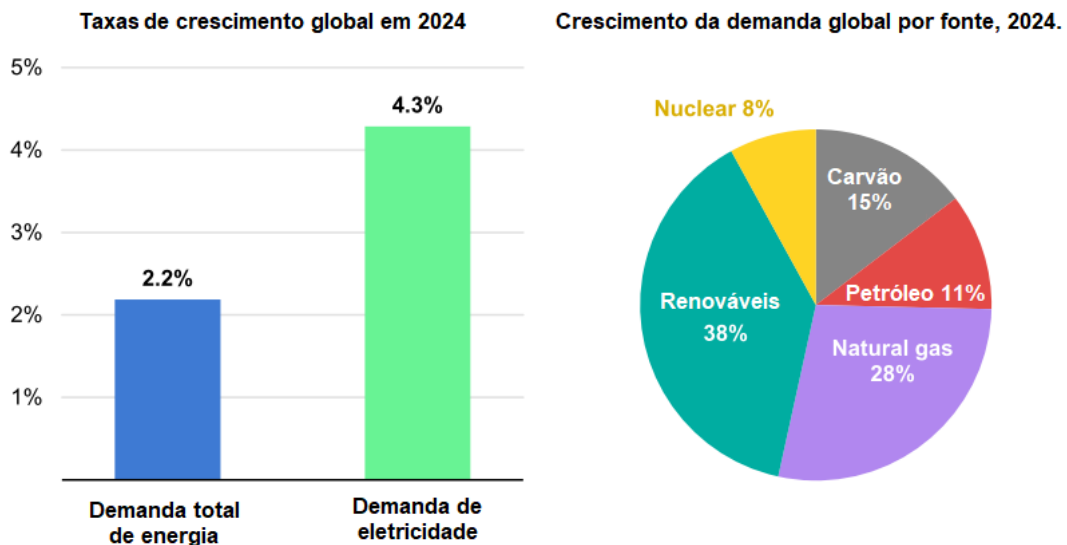
Estima-se que o consumo global de energia aumente de 1,5 a 3 vezes até 2050, impulsionado, maiormente, pelo rápido crescimento populacional e melhorias dos padrões de vida. Os edifícios, em todo o mundo, são responsáveis por 40% do consumo de energia e consequentes emissões de carbono, sobretudo ao visarem garantir o conforto térmico, conforme Azami e Sevinç (2021); Chivelet *et al.* (2022); Siddique *et al.* (2023).

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2025), do inglês *International Energy Agency* (IEA), uma organização internacional sediada em Paris que orienta políticas energéticas para 30 países membros, indicam que a demanda global de energia cresceu 2,2% em 2024. Essa taxa supera significativamente a média de crescimento anual de 1,3% observada entre 2013 e 2023, sendo tal aumento, deliberadamente atribuído aos eventos climáticos extremos ocorridos em várias partes do mundo em 2024.

A demanda por eletricidade, por sua vez, demonstrou um crescimento ainda mais acentuado, atingindo 4,3% em 2024. Este cenário reflete tendências estruturais como o crescente acesso a aparelhos de alto consumo elétrico, como o ar-condicionado; o aumento da demanda energética para a construção e manutenção de grandes data centers, ecossistemas da inteligência artificial (IA) e outras tecnologias disruptivas que consomem grandes volumes de eletricidade.

Conforme Azami e Sevinç (2021); Siddique *et al.* (2023), a IEA estima que, caso não sejam implementadas medidas adequadas, o consumo de energia no setor imobiliário poderá aumentar em 50% até 2050. Dessa forma, será um desafio atender à demanda global de energia usando recursos energéticos convencionais devido à escassez de combustíveis fósseis, sem mencionar os negativos impactos ambientais intrínsecos. A Figura 1 ilustra as taxas de crescimento das demandas de energia em nível mundial de 2024.

Figura 1 – Taxas de crescimento global e parcelas do crescimento da demanda por fonte



Fonte: Adaptado de IEA (2025).

Alternativamente, uma promissora iniciativa reside na construção de edifícios de energia zero, do inglês *Net Zero Energy Buildings* (NZEB), bem como na requalificação de edificações existentes para esse padrão, mediante a utilização de tecnologias para produção de energia renovável e maior eficiência geral das edificações. Essa abordagem pode suprir a demanda energética do setor da construção, contribuindo para a redução do consumo global de energia proveniente de fontes convencionais.

3.2 A regulamentação europeia e os edifícios de energia quase zero

Alguns países europeus têm intensificado as políticas de incentivo ao uso de fontes de energia mais limpas. A Diretiva 2010/31/UE, relativa ao desempenho energético dos edifícios, do Parlamento Europeu, visa aprimorar a eficiência energética das edificações na União Europeia (UE), considerando as diversas condições climáticas e locais.

A referida diretiva destaca que edifícios eficientes em termos energéticos podem melhorar a qualidade de vida, diminuir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e minimizar as necessidades de energia primária para aquecimento, arrefecimento e iluminação, a diretiva também estabelece que novos edifícios se

enquadrem na categoria de edificações de energia quase zero (NZEB), ou seja, edifícios autossuficientes ou de alta eficiência energética que fazem uso extensivo de fontes de energia renováveis.

Além disso, a diretiva obriga legalmente os países da UE a promovê-la, incentivando o uso de Sistemas Solares Térmicos (STS) e fotovoltaicos (FV), que por sua vez, contribuem para a minimização das cargas de aquecimento e resfriamento, ao mesmo tempo em que produzem eletricidade, Theokli *et al.* (2021).

3.3 O potencial do sistema fotovoltaico integrado à construção

No contexto apresentado, a multifuncionalidade do BIPV pode contribuir amplamente, substituindo materiais de construção convencionais e, simultaneamente, produzindo energia limpa para suprir a demanda energética das edificações. Os painéis solares fotovoltaicos utilizados no BIPV podem apresentar características específicas em comparação com os módulos fotovoltaicos convencionais, a fim de melhor atender aos requisitos arquitetônicos e construtivos.

Uma das configurações mais simples consiste na célula solar fotovoltaica encapsulada, usualmente com acetato-vinilo de etileno (EVA) e polivinil butiral (PVB) inseridos entre duas camadas de vidro. Todavia, dependendo da aplicação, a camada frontal/externa do painel pode ser dupla para melhorar o isolamento térmico do componente envidraçado; na camada traseira, o vidro pode ser substituído por uma variedade de outros materiais, como polímeros, metais ou cerâmicas; dessa forma, os painéis BIPV podem substituir materiais comumente empregados na construção, como vidro, alumínio, concreto, polímero ou cerâmica, Chivelet *et al.* (2022).

A energia solar fotovoltaica é a melhor solução de energia renovável baseada em edifícios. A energia solar fotovoltaica em edifícios pode ser instalada de duas maneiras: fotovoltaica aplicada por edifícios (BAPV) ou fotovoltaica integrada a edifícios (BIPV). [...] o BIPV tem potencial econômico global que pode ajudar na criação de energia zero e edifícios de emissão líquida-zero. O material fotovoltaico para envelopamento de construções elimina os custos estruturais e fornece eletricidade no local, considerando benefícios estéticos e ambientais (Siddique, *et al.* 2023, p. 01).

Portanto, o BIPV surge como uma solução para construções que carecem de espaço para a instalação de usinas solares nos modelos tradicionais, como, por

exemplo, em telhados ou pequenos terraços. Além disso, oferece contribuições significativas para a arquitetura e estética predial, uma vez que se busca produzir painéis fotovoltaicos com amplas opções de cores e texturas, sem comprometer a eficiência na geração de eletricidade.

3.4 Desafios e avanços nas pesquisas de BIPV

Diversas inovações vêm sendo continuamente desenvolvidas mediante pesquisas constantes e pautadas no objetivo de aprimorar a aplicabilidade dos sistemas fotovoltaicos no setor da construção civil, com ênfase especial na integração às fachadas de edificações. Embora haja um considerável número de pesquisas na literatura científica sobre o tema BIPV, ainda existem aspectos importantes que demandam maior análise e aprofundamento de suas propriedades, sobretudo no que concerne à eficiência energética, às cores externas e à segurança, especialmente quando se almeja que tais pontos sejam desempenhados conjuntamente e com alto grau de sucesso.

O setor privado, por meio de empresas que desenvolvem e comercializam equipamentos fotovoltaicos, tem apresentado uma crescente oferta de produtos inovadores. Destacam-se, em particular, as inovações em técnicas de coloração de células solares fotovoltaicas, que oferecem um portfólio diversificado com inúmeras opções de cores e otimizações, especialmente no que se refere à eficiência na conversão energética.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho, no que tange aos procedimentos técnicos, caracteriza-se fundamentalmente como uma pesquisa bibliográfica e documental do tipo exploratório com base numa análise de dados qualitativa. Essa abordagem sistematicamente baseou-se na coleta, triagem e seleção criteriosa de diversos documentos.

Foram consultados artigos científicos publicados em periódicos de impacto, teses e dissertações de programas de pós-graduação, e anais de congressos e conferências nacionais e internacionais, com o objetivo de capturar as informações e discussões mais recentes, bem como os avanços técnicos e conceituais sobre o tema.

Com intuito de condensar o conhecimento existente ao se identificar, avaliar e sintetizar o arcabouço existente de documentos em geral sobre o tema BIPV, *strings* de busca foram definidas mediante amplas combinações de estratégicas palavras-chave, sendo padronizadas e executadas em busca automática nas bases de dados: *Scopus*, *Compendex*, *Web of Science*, *IEEE Xplore* e *American Society of Civil Engineers* – ASCE.

Adicionalmente, a pesquisa documental incluiu a análise de documentos técnicos da indústria, como catálogos de produtos, relatórios de desempenho e especificações técnicas de fabricantes de produtos BIPV. Na ocasião, também foram analisados normativos técnicos de organizações independentes e órgãos reguladores, tanto nacionais quanto internacionais, que estabelecem diretrizes para a aplicação, segurança e certificação desses sistemas.

A combinação dessas fontes permitiu obter uma compreensão aprofundada dos aspectos teóricos, práticos e mercadológicos dos sistemas fotovoltaicos integrados à construção, garantindo a robustez e a atualidade das informações coletadas para a análise proposta.

Também foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão, considerando alguns pontos a serem atendidos em análise sumária. Dessa forma, citando os critérios de inclusão, aplicou-se: documentos que apresentem com clareza os experimentos e a metodologia aplicada; documentos que apresentem coerência com o tema técnico proposto; documentos desenvolvidos entre os anos de 2017 e 2025. E a respeito dos critérios de exclusão, aplicou-se: documentos com digressão do tema técnico proposto; documentos incompletos ou inconclusivos.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E IMPLICAÇÕES

5.1 Aplicabilidade e impacto energético do BIPV

Além da função inerente de geração de energia, o BIPV também pode ser benéfico na substituição de alguns dos componentes do edifício, por exemplo, fachadas, janelas, claraboias, dispositivos de sombreamento, entre outros. Soma-se a isso, a notória demanda simultânea por conforto ambiental e pela necessidade de melhorar a eficiência energética para edifícios novos e existentes. Isso culminou numa motivação para que pesquisas encontrem soluções para maior aproveitamento da radiação solar recebida, bem como garantir o conforto térmico e visual dos ocupantes ao gerar energia no local. Diante do exposto, as janelas como componentes de construção oferecem a oportunidade de abordar essas questões em edifícios, conforme observância a Peng *et al.* (2019) e Castillo *et al.* (2022).

Janelas fotovoltaicas semitransparentes, para Castillo *et al.* (2022), apresentam-se como uma opção excelente para fornecer simultaneamente geração de eletricidade e iluminação natural, bem como aquecimento oriundo da penetração de luz natural, mas para isso é imperativo que essas janelas fotovoltaicas tenham bom desempenho elétrico, níveis de transparência e cores adequados para satisfazer as necessidades visuais e de conforto. É importante ressaltar que há uma vasta variedade de componentes usados na fabricação de células solares, tais como silício, CdTe, perovskita, células solares orgânicas, entre outras. Todavia as células fotovoltaicas de silício policristalino são agora uma tecnologia bem estabelecida, com uma tendência emergente como sistemas FV semitransparentes substituindo o envidraçamento em edifícios.

O estudo observou que, apesar de as células FV semitransparentes apresentarem uma menor eficiência em comparação às células opacas convencionais, sua capacidade de maior transmissão de irradiância ao interior dos ambientes proporciona um efeito de economia de energia devido aos ganhos de calor solar, e consequente redução de gastos de energia para aquecimento em situações climáticas com baixas temperaturas.

Outro ponto destacado é o fato de a conformação convencional das células FV de silício projetar sombras no interior do edifício, limitando a visualização de dentro para fora devido ao acréscimo de vidros. Não obstante, pesquisadores chineses desenvolveram uma nova construção para células FV, denominada BIPV *Insulated Glass Unit* (BIPV IGU), que numa tradução livre significa BIPV Unidade de Vidro Isolado. Nessa formatação, as células solares de silício cristalino são produzidas em tiras estreitas e, em seguida, as tiras são soldadas e conectadas em cordas contínuas

para laminação entre duas camadas de vidro, sem afetar a eficiência de conversão de energia, conforme Castillo *et al.* (2022). Na Figura 2, observa-se em uma janela a aplicação BIPV IGU, bem como o registro do seu respectivo sombreamento no interior do ambiente, onde uma baixa projeção é evidenciada.

Figura 2 – Células fotovoltaicas BIPV IGU

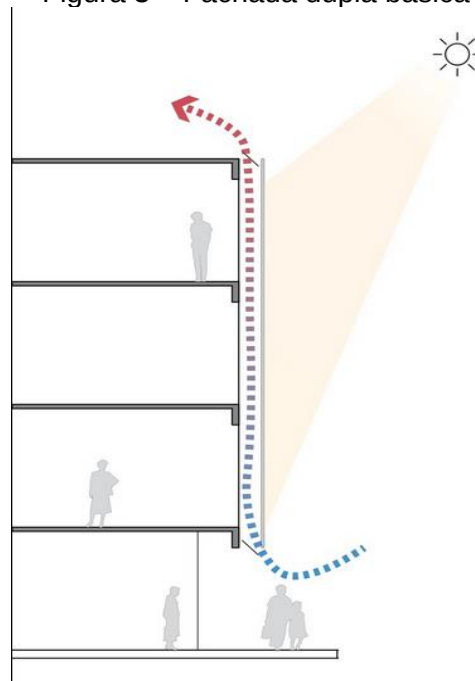


Fonte: Adaptado de Castillo *et al.* (2022).

Em análise a Theokli *et al.* (2021), foi proposto para estudo, através de simulações digitais, a instalação de um sistema fotovoltaico integrado à construção, tendo como base um sistema de fachada dupla. Assim, as simulações visaram analisar se o sistema conseguiria atender às necessidades energéticas do edifício, concentrando-se no cálculo do potencial de produção de eletricidade da fachada.

Logo, um sistema do tipo BIPV combinado com uma fachada dupla foi projetado, ressaltando que uma fachada dupla convencional é composta por duas camadas separadas por um espaço para circulação de ar; a primeira camada, exterior e contendo os painéis solares, controla a entrada do vento e recebe a incidência dos raios solares; a segunda camada é comumente isolada para minimizar as perdas de temperatura. A Figura 3, ilustra um pouco da dinâmica que envolve a fluidez do ar em fachadas duplas.

Figura 3 – Fachada dupla básica

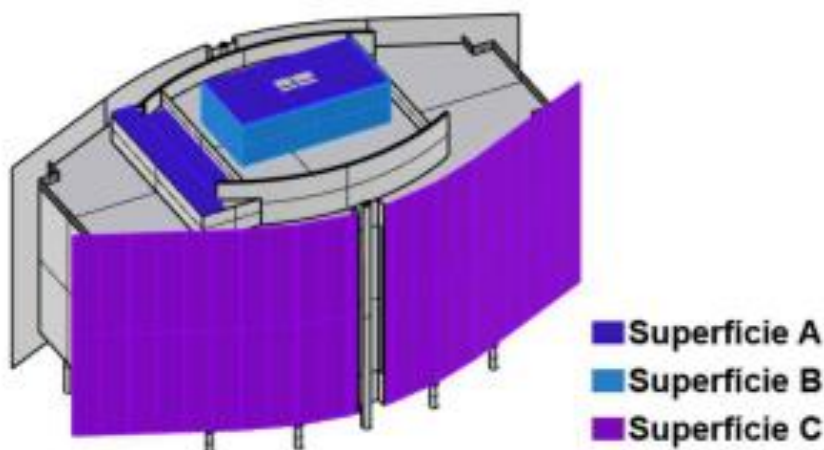


Fonte: Adaptado de Archdaily (2024).

Localizado no Chipre, país no Médio Oriente, o edifício utilizado para as simulações, teve as fachadas com BIPV instaladas nas suas quatro faces prediais, e com potência instalada similar para ambas as faces. Contudo, o sudeste e o sudoeste são as orientações ideais para maior irradiância solar daquela região do globo; também, um segundo sistema fotovoltaico foi instalado no telhado do edifício. Por fim, as simulações mostraram que as intervenções propostas para o edifício diminuíram em 75% o consumo anual de energia. E com relação às indicações de viabilidade econômica, tendo em mente a vida útil dos sistemas e do edifício, a implementação desse sistema também se mostrou matematicamente viável, conforme Theokli *et al.* (2021).

Avaliando o desempenho do BIPV em diferentes formas de integração arquitetônica a fim de identificar as melhores condições de aplicabilidade dessa tecnologia, tendo como objeto de estudo um edifício de alto padrão localizado no Município de São Paulo (SP), Lyra e Rola (2022), em simulação digital, adotaram BAPV para cobertura e BIPV para o revestimento do edifício, como, por exemplo, na vedação, usando painéis FV semitransparentes e transparentes, para compor uma segunda pele na cortina de vidro existente. Na Figura 4, foi realizada uma simulação do edifício com suas três áreas de aplicação de painéis solares.

Figura 4 – Superfícies do edifício receptoras de painéis FV



Fonte: Adaptado de Lyra e Rola (2022).

Consequente, conforme Lyra e Rola (2022), o desempenho energético do sistema foi considerado satisfatório, o BIPV contribuiu para 68% do total da energia gerada, que supriria 5,3% das demandas do edifício, já a produção total anual foi de apenas 7,8% da demanda energética total do edifício, o que representa também 30% do consumo de ar condicionado no período de um ano. É importante enfatizar a baixa eficiência dos módulos comerciais semitransparentes aplicados nas fachadas; o edifício não alcançou o objetivo de autossuficiência, todavia, a adoção de painéis FV mais eficientes duplicaria a potência total do sistema.

No âmbito das análises financeiras, ainda em Lyra e Rola (2022), mesmo diante de incertezas quanto aos custos do sistema e aplicabilidade dos critérios de compensação, estimou-se em 13 anos o tempo médio para retorno do investimento (*payback*) através da economia de energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos; também ficou certo que essa implementação traria benefícios concretos ao edifício, sem mencionar o impacto ambiental positivo.

Em Tina *et al.* (2020), é abordado que as células fotovoltaicas bifaciais, uma tecnologia relativamente nova, atraíram interesse devido ao seu potencial para aumentar a produção de energia dos módulos fotovoltaicos, podendo assim proporcionar prerrogativas interessantes para a construção civil devido à sua versátil aplicabilidade em fachadas de edifícios, entre outros pontos.

A pesquisa também aborda o uso de fachadas ventiladas, pertinentes em países de verões quentes e invernos amenos; a fachada ventilada é composta por uma parede interna e externa com uma caixa de ar entre elas, por onde o ar externo flui, onde tal fluxo pode ser gerado por meio natural ou meios mecânicos. O

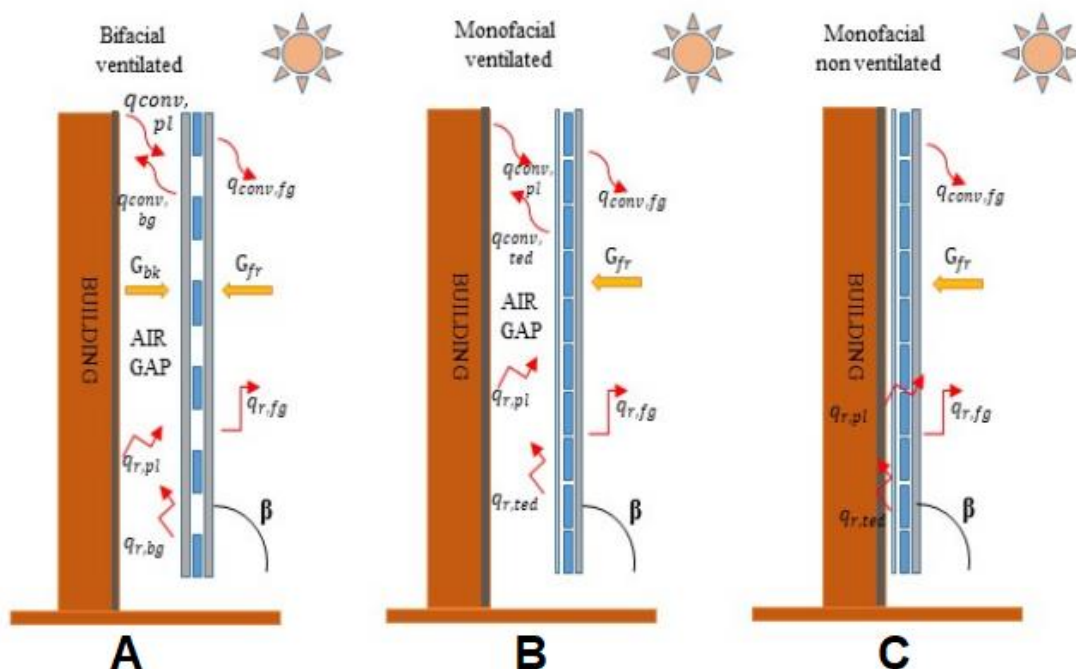
aquecimento da parede interna é limitado pela fluidez do ar e por características do revestimento da parede externa, como, por exemplo, se é opaco ou com considerável grau de transparência; os painéis fotovoltaicos opacos podem contribuir para um sombreamento, enquanto que os semitransparentes podem aumentar a iluminação natural.

Os painéis FV bifaciais, por sua vez, tecnologicamente mais eficientes, podem coletar a radiação de albedo, ou seja, a fração de radiação refletida por objetos e superfícies; além de mais duráveis, pois ambos os lados são resistentes a UV, são orientados pela pesquisa a serem instalados na parede externa, e com a sugestão para instalação de superfícies de parede interna altamente refletivas para refletir o máximo de radiação solar possível na face traseira do módulo com bifacialidade.

Os sistemas fotovoltaicos bifaciais conquistaram um interesse considerável como uma tecnologia inovadora que pode potencialmente aumentar a produção de energia, reduzindo os requisitos de área de superfície e os custos gerais em comparação com o modelo fotovoltaico convencional. No entanto, avaliar com precisão seu desempenho e estimar a produção de energia pode ser um desafio devido a interações complexas entre os componentes do sistema e o ambiente. Os módulos fotovoltaicos bifaciais fornecem uma solução econômica para gerar a mesma quantidade de energia elétrica que os módulos monofaciais, oferecendo múltiplas vantagens, como materiais resistentes aos raios UV em ambos os lados para proteger contra a degradação causada pela exposição à luz solar e outros fatores ambientais. **Eles também são robustos e melhor equipados para suportar potenciais degradações induzidas e podem ajudar a reduzir as despesas do sistema, aumentando ainda mais sua viabilidade econômica** (Sahu; Roy; Chakraborty, 2023, p. 01, grifo nosso).

Os pesquisadores, em Tina *et al.* (2020), explanam a principal diferença entre uma fachada ativa ventilada e uma não ventilada, a qual manifesta-se na caixa de ar; na fachada ativa ventilada, o ar pode circular livremente, conforme item A e B da Figura 5, pois o espaço intermediário está em contato com o exterior por meio de uma abertura; na fachada ativa não ventilada, não há livre circulação de ar, conforme o item C da Figura 5. Contudo, foi considerado o painel solar sendo instalado em adesão à parede do edifício, hermeticamente, com o ar presente encontrando-se preso dentro da estrutura do painel fotovoltaico.

Figura 5 – Esquematização de fachada ventiladas e não ventiladas



Fonte: Adaptado de Tina *et al.* (2020).

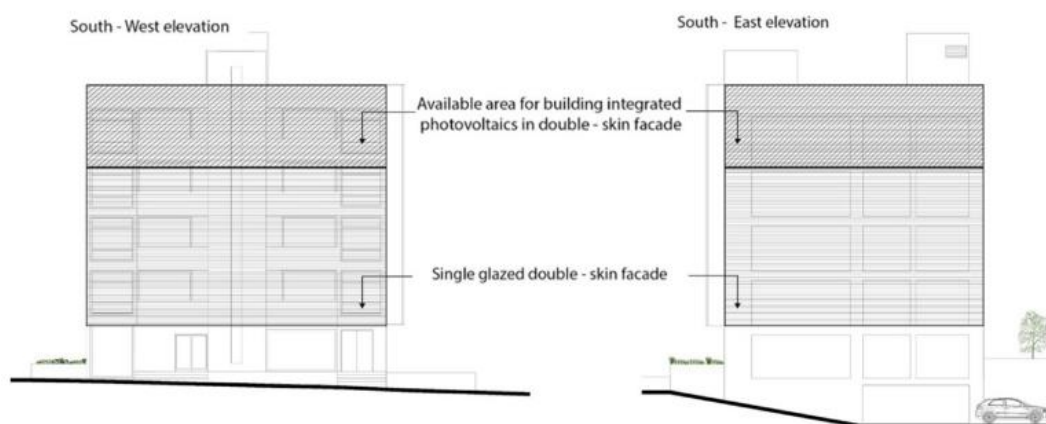
Por fim, análises realizadas através do desenvolvimento de modelos numéricos com o *software Matlab* mostraram, em suas simulações conduzidas considerando o clima na cidade de Catânia, Itália, que em fachadas ventiladas, as temperaturas das células fotovoltaicas podem atingir até 5 °C a menos, tornando-as mais frias e consequentemente mais eficientes na conversão de energia. Também se concluiu que módulos fotovoltaicos bifaciais podem produzir um rendimento energético de cerca de 5% a mais do que o módulo fotovoltaico monofacial; e considerando a aplicação de material refletivo na superfície da parede interna, o aumento pode atingir até 7,4% para módulos bifaciais, conforme Tina *et al.* (2020).

No estudo de Italos *et al.* (2022), uma comparação do desempenho energético proposto a um edifício foi realizada por meio de uma análise de simulação por *software*. A comparação consiste no antes e depois da implementação BIPV.

Dessa forma, painéis FV foram instalados na forma de fachada dupla, que por sua vez, foram montados por meio de uma estrutura metálica em formato de diamante, atuando como um invólucro sobre o edifício. Foi usado como objeto da simulação um edifício localizado na cidade de Limassol, Chipre, construído na década de 1980, contendo 6 andares e de uso residencial. Na referida região, a melhor orientação para a produção de energia fotovoltaica é o sul, assim os painéis solares foram instalados nas fachadas sudoeste e sudeste.

É importante ressaltar que o BIPV foi instalado apenas na parte superior da estrutura metálica, conforme mostra a Figura 6, e somente nas fachadas sudeste e sudoeste. Essa área conta com a implementação de painéis medindo 200 mm x 600 mm x 6,8 mm, transparência de 50%, potência de 40 Watts e eficiência elétrica de 11%. O sistema está integrado a uma área de 63 metros quadrados, e com ângulo de inclinação de 65°, inclinação próxima da ideal, inclinação esta que, quando não atendida, pode causar uma diminuição na produção de energia de até 40%, conforme Italos *et al.* (2022).

Figura 6 – Esquematisação da fachada BIPV



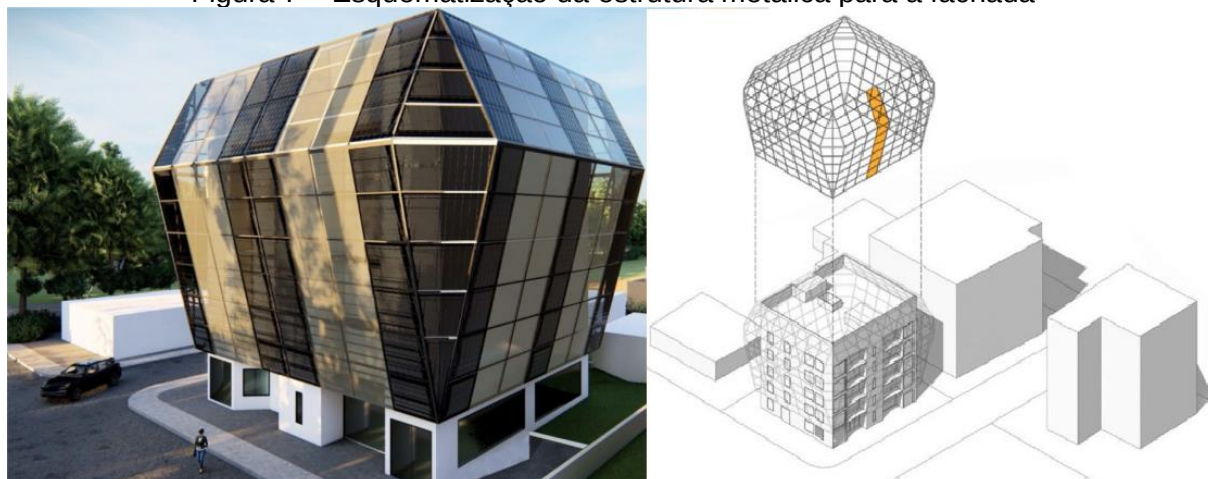
Fonte: Adaptado de Italos *et al.* (2022).

A estrutura metálica portadora do BIPV também tem um papel fundamental na redução do consumo de energia, ao contribuir positivamente no isolamento térmico do edifício, assim reduzindo a necessidade de consumo de energia para aquecimento. A área de cor escura representa os painéis solares, a área mais clara representa, em parte, vidro simples com revestimento para menor visibilidade.

Um material de isolamento térmico foi proposto em combinação com a atualização dos sistemas de refrigeração e aquecimento mais eficientes, então, juntamente com a fachada dupla, reduziram as perdas térmicas e aumentaram o desempenho energético do edifício mediante simulação. Diante disso, segundo Italos *et al.* (2022), a produção do BIPV chegou a suprir formidáveis 63% do reformulado consumo anual do edifício.

Na Figura 7, contempla-se à esquerda, um desenho da fachada instalado em volta do edifício, e à direita, uma simulação da estrutura metálica, análoga a uma gaiola.

Figura 7 – Esquemática da estrutura metálica para a fachada



Fonte: Adaptado de Italos *et al.* (2022).

O estudo também analisou a viabilidade econômica de instalação de toda a estrutura envolvida, incluindo o BIPV e demais melhorias. O custo anual de operação e manutenção também foi considerado, entre outros aspectos. Por fim, conforme Italos *et al.* (2022), chegou-se a um período de retorno de 13 anos, dada a economia de energia, além de um ponto bastante positivo, do tempo de retorno ser inferior à vida útil prevista para a estrutura. Benefícios do âmbito ambiental, incomensuráveis, também endossam o aspecto positivo desse tipo de intervenção arquitetônica.

Ao perscrutar o trabalho de Chen *et al.* (2021), observa-se a importância da avaliação da irradiação solar em fachadas de edifícios diante do contexto de sombreamento causado pelos edifícios ao redor. Esse fator é de suma importância para o desenvolvimento e aplicabilidade do BIPV em grandes espaços urbanos onde as fachadas dos edifícios são comumente obscurecidas, tornando a determinação da irradiação solar difusa do céu bem complexa.

Os cânions urbanos longos são as principais características do horizonte da maioria dos ambientes urbanos, assim, as características de radiação solar em um determinado ponto na fachada seriam relativamente muito diferentes devido aos padrões desse horizonte irregular, causador de uma complexa série de irregulares obstruções.

Ainda em Chen *et al.* (2021), os autores ressaltam que há algumas ferramentas de simulação de computador que podem ser uma maneira eficiente e precisa de obter dados de irradiação solar, usando-se de poderosos algoritmos de rastreamento de raios solares e da capacidade de modelar um contexto físico e espacial detalhado.

Assim sendo, muitas ferramentas de simulação podem gerar resultados relativamente realistas.

Por meio computacional, várias combinações de ângulos de obstrução superiores foram simuladas. Então, percebeu-se que a posição solar tem um grande impacto nas distribuições de radiância e luminância, também sendo extremamente necessário considerar datas e horários diferentes para todas as configurações das obstruções irregulares para garantir que os modelos desenvolvidos possam ser aplicados às posições solares durante todo o ano.

Em uma abordagem exemplificativa, tem-se a empresa suíça *Swiss Solar Solutions* (3S), especializada em soluções fotovoltaicas e que oferece a tecnologia BIPV com uma gama de opções estéticas e arquitetônicas, especialmente painéis fotovoltaicos com diversas opções de cores. Uma de suas soluções e aplicabilidade é um aperfeiçoado painel bifacial utilizado como parapeito solar. Atendendo aos critérios de durabilidade e segurança, o parapeito pode produzir energia renovável através da tecnologia fotovoltaica bifacial de forma eficiente em todas as direções. A Figura 8, ilustra a aplicação supramencionada; e no projeto em questão, uma considerável necessidade energética da residência foi suprida.

Figura 8 – Parapeito solar BIPV



Fonte: Adaptado de Siwss Solar Solutions (2024).

Na Figura 9, capta-se uma fachada solar concebida com uso de materiais produzidos pela referida indústria suíça 3S. Os painéis FV são confeccionados com um *design* sem moldura, conferindo-lhes propriedades autolimpantes.

Figura 9 – Fachada solar BIPV



Fonte: Adaptado de Siwss Solar Solutions (2024).

Construídos para uma otimizada eficiência energética, além de um alto grau de resistência mecânica, os painéis solares são instalados com uso de uma estrutura de alumínio que é fixada sobre a parede, vide Figura 10, proporcionando mais resistência, facilidade de instalação e manutenção.

Figura 10 – Fachada solar BIPV



Fonte: Adaptado de Siwss Solar Solutions (2024).

5.2 Aspectos estéticos e arquitetônicos do BIPV

Ao servir simultaneamente como material de envoltório do edifício e gerador de energia, o BIPV necessita oferecer constantes atualizações e assim apresentar características arquitetonicamente sempre atraentes. Seu principal produto, os painéis fotovoltaicos e suas intrínsecas células solares, precisa oferecer, a princípio, maiores opções de cores e até mesmo texturas. Para Attoye, Aoul e Hassan (2017); Ballif *et al.* (2018), a falta de maiores características estéticas, aliada ao alto custo na implementação de BIPV, foi identificada como a principal barreira para um uso mais generalizado de energia fotovoltaica em edifícios.

O avanço tecnológico em *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) converteu a fachada do edifício em um gerador baseado em energia renovável. A fachada BIPV é projetada para fornecer geração de energia junto com objetivos de design convencionais, como estética e controle ambiental. O desafio, no entanto, é que os objetivos do design arquitetônico às vezes entram em conflito com o desempenho energético, como o fornecimento de estética e luz natural versus saída máxima de energia. Em casos inovadores, as características das fachadas BIPV convencionais foram modificadas por pesquisadores para abordar tais conflitos por meio da personalização, como uma tendência emergente no *design* de fachada BIPV (Attoye; Aoul; Hassan, 2017, p. 01).

Em Trattnig *et al.* (2021), o estudo ressalta que o vidro, tipicamente encontrado na face superior do painel FV, recobrindo todas as células solares que o compõem, causa um comportamento de espelhamento, o que pode vir a ser, em alguns casos subjetivos, algo negativo do ponto de vista puramente arquitetônico para as fachadas prediais que recebem o BIPV. Nesse sentido, foi pesquisada uma inovadora forma de reduzir o brilho dos módulos BIPV através da aplicação de revestimentos superficiais no vidro frontal dos módulos fotovoltaicos.

Três tecnologias de revestimento para o vidro foram investigadas, sendo elas a impressão a jato de tinta, serigrafia e revestimento por spray sol-gel. A durabilidade, estabilidade e desempenho, bem como a interferência na eficiência das células solares, foram analisadas.

O método de jato de tinta é bastante utilizado na indústria de envidraçamento automotivo, onde a tinta aquecida é injetada sobre a superfície; o método por serigrafia, onde a tinta é fundida à superfície do vidro por meio de alta temperatura

quando o vidro é temperado, esse método tem uma prerrogativa que permite que o grau de transparência possa ser ajustado; no revestimento por pulverização de solução sol-gel, a tecnologia de revestimento permite o amplo ajuste de cores e texturas nos vidros.

Na Figura 11, observa-se inicialmente da esquerda para a direita, um exemplo de painel fotovoltaico sem qualquer cobertura, como referência, nas medidas 40x40cm; no segundo, temos um idêntico painel FV, porém com coloração obtida por meio de jato de tinta; no terceiro, coloração por meio de serigrafia; e por fim, em tom marrom, painel FV com coloração gerada pelo método de revestimento por *spray* sol-gel.

Figura 11 – Colorações obtidas por cada método supramencionado



Fonte: Adaptado de Trattnig *et al.* (2021).

Contudo, segundo Trattnig *et al.* (2021), todos os métodos apresentaram, de forma geral, uma boa durabilidade, desempenhando uma alta estabilidade dos revestimentos contra várias condições climáticas. Com relação ao brilho, uma considerável diminuição foi atingida, resultando em uma reflexão direta espetacularmente abaixo de 0,1%. Quanto à eficiência elétrica de conversão, o método por serigrafia foi o mais promissor, com uma redução geral de aproximadamente 10% no desempenho elétrico quando comparado ao módulo de referência não revestido.

Block *et al.* (2024), em sua pesquisa, destacam que arquitetos e proprietários de edifícios podem preferir módulos BIPV personalizáveis que possam ser obtidos em termos de diferentes formas, tamanhos e, especialmente, cores. O estudo pontuou a impressão cerâmica digital, cuja sigla em inglês é DCP, que faz uso de grandes máquinas impressoras por meio da conhecida e já mencionada tecnologia jato de tinta, contudo com o uso de tintas cerâmicas inorgânicas que consistem em uma mistura de pigmentos e partículas de vidro muito finas, geralmente compostas por

óxidos de metal inorgânico, tais como óxido de cromo, ferro e outros; após o processo de impressão, podendo ser na superfície interna ou externa do vidro frontal, o revestimento é fundido durante as etapas de têmpera do vidro em temperaturas típicas de 640 a 700 °C.

A Figura 12 ilustra painéis fotovoltaicos coloridos através dessa técnica. Diversas cores foram obtidas e os respectivos painéis espalhados pela extensão da fachada.

Figura 12 – Cores obtidas por método DCP



Fonte: Adaptado de Block *et al.* (2024).

Ao abordar o método de serigrafia, Block *et al.* (2024), destacam que é possível obter uma alta qualidade de impressão com alta resistência à abrasão, agentes químicos e radiação UV, podendo essa técnica ser usada em vidros dianteiros ou traseiros de painéis solares e combinada a células solares coloridas para alcançar diferentes aspectos visuais.

A tecnologia vem sendo aperfeiçoada especificamente para a coloração de vidro fotovoltaico, onde pigmentos são baseados em flocos de mica revestidos por uma fina camada de dióxido de titânio, podendo conter também camadas de óxido de ferro, titanatos de ferro, óxido de cromo e outros. Essas camadas transmitem cor e reduzem as perdas de desempenho, sendo a coloração controlada pela espessura da camada de dióxido de titânio, que permite uma grande variedade de cores.

Conhecido pelo termo inglês *Mass-coloured glass*, esse notório método de coloração do vidro inerente ao seu processo de fabricação, amplamente aplicado em utensílios residenciais, vem sendo utilizado pela indústria fotovoltaica. Um vidro plano

com baixo teor de ferro é empregado, no entanto, são introduzidos agentes corantes no vidro durante o seu processo de produção, resultando no que é conhecido como vidro colorido na massa.

Ao contrário do vidro impresso, para o qual a cor é aplicada a uma superfície, o vidro colorido na massa passa por uma transformação em todo o seu volume, permitindo a criação de cores com optativos equilíbrios entre transparência e saturação. As cores no vidro podem ser adaptadas adicionando óxido em pó, sulfeto ou outro composto de metal ao vidro enquanto ele está em estágio fundido. Um exemplo disso é a aplicação de sulfeto de cádmio, cloreto de ouro e óxido de cobalto para se obter as cores amarela, vermelha e azul-violeta, respectivamente, conforme Block *et al.* (2024).

Na Figura 13, observa-se um exemplo como resultado da aplicação do método supramencionado.

Figura 13 – Cor obtida por vidro colorido em massa



Fonte: Adaptado de Gruppostg (2024).

Em outro procedimento, folhas poliméricas produzidas com a adição de pigmentos orgânicos ou inorgânicos de cores, com a sua translucidez podendo ser ajustada por meio da espessura dos filmes ou da concentração do material de coloração, se configuram num método onde tais filmes, por sua vez, são instalados acima das células solares, ou seja, logo abaixo do vidro frontal e traseiro. As perdas de desempenho são registradas abaixo de 20%, e com alta resistência à radiação UV, conforme Block *et al.* (2024).

Na Figura 14, telhas solares que, em seu processo de fabricação, utilizaram-se de folhas poliméricas para uma conformação visual específica, com o intuito de proporcionar aplicações BIPV esteticamente críveis. Nesse sentido, as colorações aplicadas visam reproduzir visualmente, a longa distância, telhas convencionais.

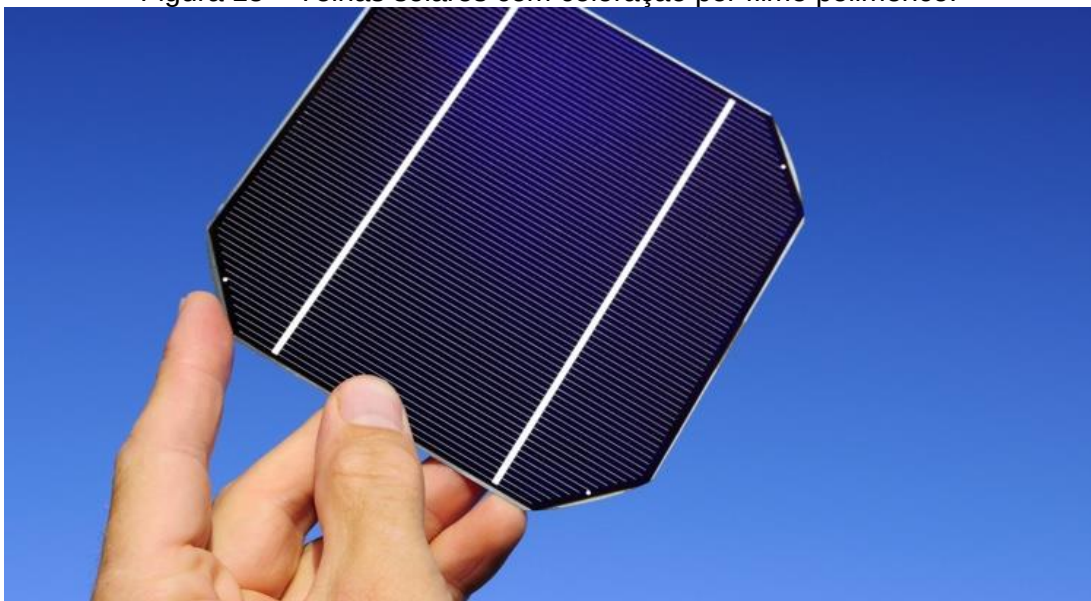
Figura 14 – Telhas solares com coloração por filme polimérico



Fonte: Adaptado de Freesuns (2024).

Outra forma de coloração é direcionada às células solares fotovoltaicas que compõem os painéis. Na Figura 15, tem-se uma célula solar confeccionada em silício, e tendo dimensões semelhantes às usadas na maioria dos painéis fotovoltaicos comercializados atualmente.

Figura 15 – Telhas solares com coloração por filme polimérico.



Fonte: Adaptado de Iberdrola (2025).

Permanecendo em Block *et al.* (2024), averigua-se outra opção de coloração, desta vez, para células solares. Tendo como cores típicas o azul-escuro ou preto, as células de silício, por sua vez, majoritariamente aplicadas pela indústria fotovoltaica na confecção de painéis, são equipadas com um revestimento antirreflexo de camada superior, geralmente composto por nitreto de silício, para permitir uma maior eficiência. Contudo, ao se alterar a espessura desse revestimento, pode-se alterar a cor da célula solar, mas dependendo da cor, causará uma perda de eficiência que varia entre 15 a 30%; nessa técnica, cores como marrom, dourado, prata, vermelho, verde e laranja já são obtidas e vendidas por alguns fabricantes.

A empresa *Lofsolar*, de Taiwan, tem como base de seu portfólio, células solares coloridas com a técnica que altera a espessura do revestimento. A Figura 16 ilustra toda a ampla gama de cores desenvolvidas.

Figura 16 – Painéis fotovoltaicos com coloração das células solares



Fonte: Adaptado de Lofsolar (2025).

Serviços de personalização são oferecidos por algumas empresas, permitindo que seus painéis para aplicação BIPV incluam opcionais de formato, cor, tamanho, grau de transparência, entre outros. Na Figura 17, observa-se a aplicação desses painéis solares personalizados, instalados e dispostos com teor artístico, recobrindo parcialmente grande área em um muro.

Figura 17 – Painéis solares coloridos recobrimo muro



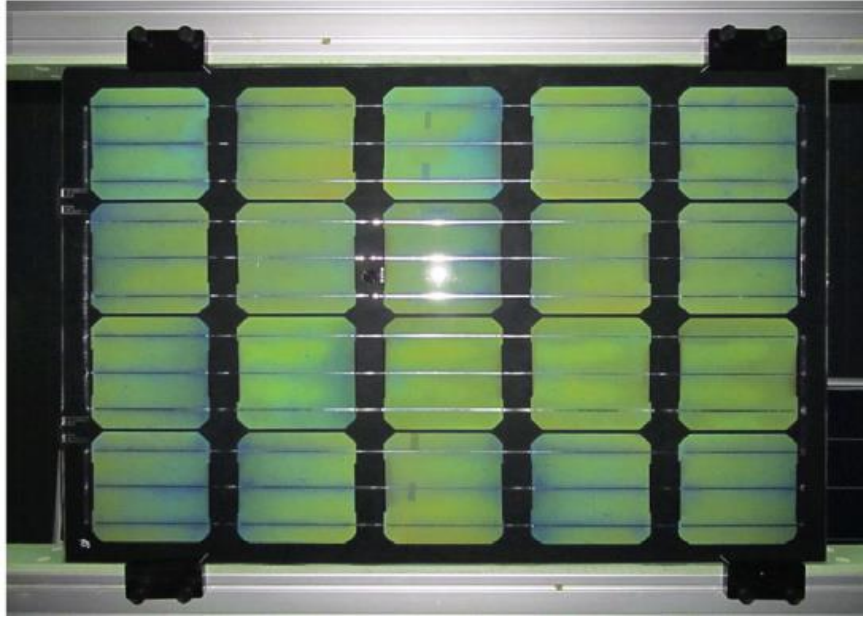
Fonte: Adaptado de Lofsolar (2025).

Outra possibilidade de modificar a cor das células solares convencionais após a sua fabricação, segundo Block *et al.* (2024), é através da aplicação de um revestimento de fina camada de vidro sobre a célula solar, usando microesferas de sulfeto de zinco com um diâmetro de 0,2, 0,25 ou 0,3 micrômetros (μm), que apresentam alto índice de refração. Assim, a cor é gerada devido a uma reflexão seletiva da luz visível após interagir com o vidro, e controlada pelo diâmetro das esferas, porém as cores podem oscilar conforme o ângulo de observação. Essa técnica ocasiona uma baixa perda de eficiência na conversão de energia, em geral, será inferior a 15%.

A coloração plasmônica é outra opção para alterar o aspecto visual das células solares após a sua fabricação, que faz uso de nanopartículas metálicas à base de prata com diâmetros compreendidos entre 50 a 150 nanômetros (nm), contudo, não se tem uma grande variedade de cores. Em contrapartida, as cores sofrem menos com relação ao ângulo de observação, e as perdas de eficiência ficam abaixo de 10%, Peharz *et al.* (2017); Block *et al.* (2024).

Para as células fotovoltaicas orgânicas, cuja sigla em inglês é OPV, podem ser mais facilmente coloridas por meio de corantes. No entanto, uma desvantagem comum para a tecnologia OPV é uma eficiência menor em relação aos módulos de silício cristalino, além de uma vida útil mais curta, conforme Peharz *et al.* (2017); Block *et al.* (2024). Observa-se na Figura 18, um exemplo de painel colorido usando a técnica de coloração plasmônica, atingindo uma tonalidade verde.

Figura 18 – Célula solar colorido através da coloração plasmônica



Fonte: Adaptado de Peharz (2017).

Røyset *et al.* (2023), abordam o uso de Revestimentos de Interferência Óptica para criar novas cores quando aplicados na parte inferior do vidro frontal, aproveitando assim a usual sobreposição das células solares em painéis fotovoltaicos baseados em silício cristalino. Esta tecnologia de coloração pode, portanto, ser muito atraente do ponto de vista estético e arquitetônico para a implementação do BIPV.

Resultados indicam que esses revestimentos podem ser projetados para obter propriedades visuais desejadas, enquanto proporcionam uma pequena perda de eficiência na conversão de energia solar para energia elétrica por parte dos painéis solares. Várias tecnologias diferentes foram aplicadas para adicionar cor aos módulos fotovoltaicos, todavia, técnicas revestimentos de interferência usados acima da face externa das células solares, e baseados em finos filmes simples ou multicamadas, absorvem pouquíssimos fótons, enquanto proporcionam uma reflectância seletiva espectralmente, fazendo assim surgir algumas cores, em suma, os fótons refletidos contribuem para a aparência das cores, e os que transpassam, são convertidos em energia elétrica.

Na Figura 19, constata-se uma esquematização das camadas constituintes de um painel solar em conformação padrão, contudo, com o vidro superior frontal colorido através do uso de revestimentos de interferência óptica.

Figura 19 – Painel solar com vidro frontal colorido



Fonte: Adaptado de Kromatix (2025).

Um importante desafio de implantação dessa técnica de coloração é o fato característico de que as células solares convencionais de silício cristalino normalmente têm uma superfície frontal texturizada e adotam geometrias que proporcionam uma maior contenção dos fótons, ou seja, resultam em uma baixa reflexão óptica. Essa característica implica que cores com alta luminosidade e saturação são difíceis de obter, bem como torna mais complexa a adesão dos filmes, além de exigir processos complexos e otimizados para garantir um alto desempenho elétrico, conforme Røyset *et al.* (2023).

A empresa suíça *Kromatix* oferece um vasto portfólio de cores para seus painéis solares, onde os mesmos fazem uso dessa técnica de coloração. Na Figura 20, capta-se um exemplo de edificação onde uma parede solar BIPV foi montada fazendo uso de quatro cores distintas: azul-esverdeado, latão, azul e cinza. Combinados com módulos fotovoltaicos monocristalinos usados no telhado e nas demais fachadas, o sistema supriu aproximadamente 40% das necessidades totais de energia do edifício.

Figura 20 – Painéis solares com revestimento de interferência óptica



Fonte: Adaptado de Kromatix (2025).

Ainda em Røyset *et al.* (2023), revestimentos de interferência foram confeccionados basicamente com uso de óxido de silício hidrogenado amorfo e com uma mistura gasosa de silano, óxido nitroso e nitrogênio. As características de reflectância dos revestimentos de interferência óptica dependem de vários parâmetros de design, como o número de camadas, comprimento de onda, espessuras da camada e índices refrativos das camadas.

De forma resumida, na Figura 21, constata-se nove cores obtidas por meio da variação na diferença das espessuras dos filmes, tanto quanto nos diferentes números de camadas.

Figura 21 – Revestimentos sobre silício cristalino



Fonte: Adaptado de Røyset *et al.* (2023).

A fotografia contida na Figura 21 foi tirada considerando um ângulo de aproximadamente 10° sob incidência normal em luz, em dia nublado ao meio-dia, com os revestimentos sobrepostos aos laminados de silício cristalino, os mesmos usados para construção de células solares.

Os pesquisadores, em Røyset *et al.* (2023), ainda ressaltam que os revestimentos de interferência óptica normalmente fornecem cores que dependem do ângulo de observação. Pequenas discrepâncias na perda de eficiência devido à coloração também foram observadas. Os resultados mostraram que as porcentagens das perdas de eficiência para as cores desenvolvidas no estudo ficaram abaixo de 5%, sendo as menores perdas proporcionadas pelas cores mais escuras.

Por fim, novos estudos são discutidos para que se desenvolvam futuras diretrizes que proporcionem alcançar com ampla capacidade: alta claridade de cor, baixa perda de eficiência, alto índice de desempenho de cor e baixa dependência angular de cores.

5.3 Durabilidade e aspectos de segurança do BIPV

O sistema fotovoltaico integrado à construção, por combinar a produção de energia renovável com o desempenho exigido ao substituir alguns componentes essenciais de uma construção, requer, concomitantemente, a necessidade de atingir fatores de segurança aceitáveis de acordo com as características da sua aplicação e atuação.

Stølen *et al.* (2024), destacam que, devido ao significativo aumento da aplicação de módulos fotovoltaicos nas superfícies das grandes construções verticais, é de suma importância pesquisar sobre esse tipo de revestimento de superfície, pautando a essencialidade em observar como incêndios podem se propagar através desse peculiar material.

Dessa forma, um experimento em escala real foi realizado usando painéis solares convencionais com frente de vidro e parte traseira de polímero. A dinâmica do fogo e as falhas da construção da fachada testada foram observadas. Testes adicionais em pequena escala nos painéis do BIPV foram observados para quantificar a facilidade com que os mesmos se inflamam e quanto calor é liberado dos materiais combustíveis envolvidos. Ressaltando que o teste de fachada em larga escala foi

referenciado nos regulamentos de construção dos países da Suécia, Noruega e Dinamarca, e incluiu alguns materiais de construção comumente usados.

O principal teste realizado expôs os painéis FV a chamas; os painéis apresentam maior parte de sua massa composta por vidro e alumínio, com aproximadamente 12% de diferentes materiais plásticos, sendo esses últimos notoriamente mais inflamáveis. A construção testada foi composta por um BIPV em fachada, instalado em uma parede de estrutura de madeira, com isolamento de fibra de madeira coberto com placas de gesso. A instalação BIPV foi feita com módulos PV retangulares montados em trilhos de alumínio. Os módulos tinham de 603 a 735 mm de largura e de 560 a 1460 mm de altura. Um total de 26 módulos foram feitos sob medida para cobrir a fachada, que media 4,0 m de largura por 6,0 m de altura, conforme Stølen *et al.* (2024).

Na Figura 22, observa-se a fachada construída no laboratório de testes, também chamada de sala de incêndio, onde os painéis solares estão numerados, e na qual é possível perceber que a fachada possui janelas fictícias.

Figura 22 – Fachada BIPV construída em laboratório



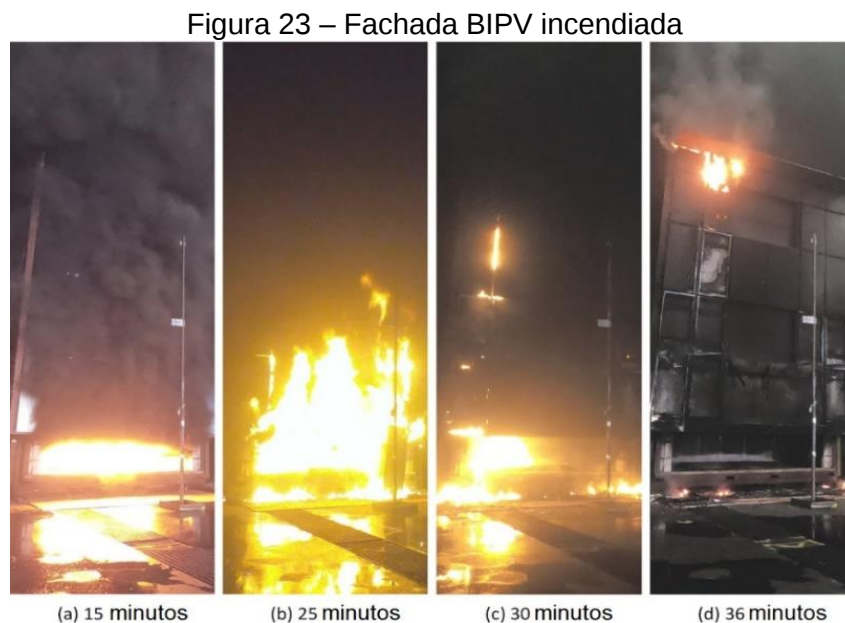
Fonte: Adaptado de Stølen *et al.* (2024).

Nos testes realizados, as temperaturas mais altas medidas atingiram 850 °C; percebeu-se uma rápida propagação vertical das chamas, apesar da pequena

quantidade de material combustível. O teste durou aproximadamente 30 minutos, porém levou 47 minutos para as chamas se extinguirem por completo, mais precisamente na parte superior do topo da fachada, visto que as chamas tiveram sua deliberada ignição deflagrada na parte inferior.

O incêndio caracterizou-se por apresentar 3 fases básicas: os primeiros 15 minutos após a ignição, quando as chamas começaram a emergir da sala de incêndio; aos 25 minutos, quando as chamas atingiram sua extensão máxima, alcançando grandes dimensões; culminando com as chamas atingindo o topo da fachada aos 36 minutos, contudo, tendo nessa fase, as chamas parcialmente dissipadas.

Assim, na Figura 23, têm-se os registros dos principais estágios de propagação, sendo possível observar a dinâmica temporal de alastramento das chamas conforme os relatos supramencionados.



Fonte: Adaptado de Stølen *et al.* (2024).

Por fim, o teste apresenta importantes falhas críticas, a principal delas é a queda de objetos provenientes de partes constituintes dos painéis fotovoltaicos. Portanto, os autores enfatizam que o engenheiro de segurança contra incêndio deve avaliar se essas questões são relevantes para o projeto com uma fachada BIPV, sobretudo em um hipotético ambiente externo onde pode haver grande fluxo de pedestres próximo ao raio de alcance dessas partes mencionadas.

A resistência ao vento é outro fator importante na segurança e operação de sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios. Segundo Min *et al.* (2024), esse fator se faz especialmente importante para telhados de grande extensão, pois a resistência ao vento dos sistemas de telhado de metal é um fator importante que afeta a operação normal do BIPV, principalmente para estruturas extensas, onde a falha na estabilidade do telhado devido a ventos fortes pode causar perdas econômicas significativas ou incidentes graves.

Um teste laboratorial foi realizado para simular o padrão de falha dos sistemas de telhados de metal ao se aplicar diferentes pressões do vento, não obstante, o teste não pôde refletir com precisão o padrão de falha do telhado de metal de longo vão devido à limitação do tamanho do laboratório. Testes de tração de alguns materiais usados na confecção dos telhados também foram realizados. Outrossim, analisaram-se tipos de fixadores e forma de conexão das telhas, tanto quanto os fixadores usados para conexão dos painéis fotovoltaicos ao telhado de metal.

Entretanto, além de testes internos, por meio de auxílio computacional, simulações numéricas foram realizadas e os dados foram analisados conjuntamente a fim de se obter maior confiabilidade. Para isso, uma fórmula matemática foi desenvolvida para sumarizar a capacidade de resistência eólica do teste laboratorial BIPV para estruturas de telhado de metal de tamanho longo, correlacionando os dados do teste de laboratório com os dados das simulações numéricas. Portanto, constatou-se que o sistema de telhado de metal BIPV obteve uma capacidade de resistência ao vento de 4,50 kPa em laboratório, enquanto o sistema de telhado de metal BIPV de longo vão para as simulações numéricas, apresentou uma capacidade deduzida de resistência ao vento de 1,77 kPa, conforme Min *et al.* (2024).

É importante ressaltar que o teste de laboratório, ao utilizar um telhado BIPV de tamanho limitado, confere à estrutura, em geral, maior resistência mecânica às ações do vento, porém, sendo seus dados imprescindíveis para se chegar às projeções do telhado longo. Contudo, o estudo afirma que a margem de erro entre o modelo de telhado de metal laboratorial e o modelo de telhado de longo vão previsto em simulação é de 0,29 a 1,27‰, indicando alta eficiência computacional e precisão na simulação numérica do telhado de metal, segundo Min *et al.* (2024).

Por fim, os autores abordam que mais pesquisas são necessárias para investigar a otimização estrutural do suporte interno para melhorar a capacidade de resistência ao vento do sistema de telhado metálico BIPV de longo vão.

Em outro estudo, Bonomo *et al.* (2023), destacam que os principais desafios do BIPV estão relacionados principalmente à melhoria da relação custo-eficácia e da confiabilidade do produto. Na Europa existem normas que já regulamentam o uso de BIPV. Contudo, os produtos multifuncionais BIPV continuam enquadrados em processos complexos de qualificação e às vezes pouco claros, pois há várias normas do âmbito elétrico da construção que ainda não estão harmonizadas para a BIPV e implicam amplas margens de interpretação.

Utilizando o Regulamento Europeu dos Produtos de Construção (CPR) como uma de suas referências normativas, consideraram-se na avaliação do BIPV: a resistência à carga de vento, a resistência à carga de ventos horizontais, a resistência mecânica do revestimento e os padrões de fixação. É importante destacar que, ao examinar as características, condições de funcionamento e requisitos essenciais a serem atendidos pelos sistemas de BIPV, mesmo em consonância com o regulamento supramencionado, essa abordagem nem sempre é válida, assim, esforços para definir novos procedimentos de teste são necessários para cobrir algumas especificações técnicas de BIPV.

Destarte, no estudo, foi abordada a resistência ao impacto dos produtos BIPV, com intuito de avaliar o desempenho multifuncional, visto que, durante a vida útil pretendida, tais produtos estejam aptos e seguros para uso em trabalhos de construção civil com graus de confiabilidade adequados e de fator econômico favorável. Portanto, o sistema tem que sustentar todas as ações e influências que possam ocorrer durante a execução e o uso, e não apresentar riscos inaceitáveis de acidentes ou danos no serviço, ou operação, considerando manutenção prevista, mas sem reparação significativa.

Testes em laboratórios foram desenvolvidos com a utilização de células solares revestidas com seu típico vidro, onde uma esfera metálica foi aplicada para proporcionar três pesos de impacto: 0,5; 1; e 3kg, sendo denominada de corpo duro para impacto; também se usou no teste de impacto uma esfera proporcionando um impacto de 50kg, a qual foi revestida com uma manta, sendo denominada de corpo macio grande para impacto, conforme Bonomo *et al.* (2023).

Os testes com a variedade de impactos supramencionados, por sua vez, foram divididos em três distintos cenários de temperatura infligidos às células FV por meio de uma câmara climática: temperatura ambiente do laboratório, com aproximadamente 20 °C; baixa temperatura, com aproximadamente -20 °C; e alta temperatura, com 90 °C, conforme Bonomo *et al.* (2023).

Na Figura 24, observam-se as células solares montadas em laboratório numa conformação exclusiva para os testes, contudo, dentro dos padrões técnicos e normativos dos painéis FV convencionais, outrossim, evidenciam-se as esferas utilizadas para gerar diferentes impactos.

Figura 24 – Pêndulo e esferas utilizadas para os testes



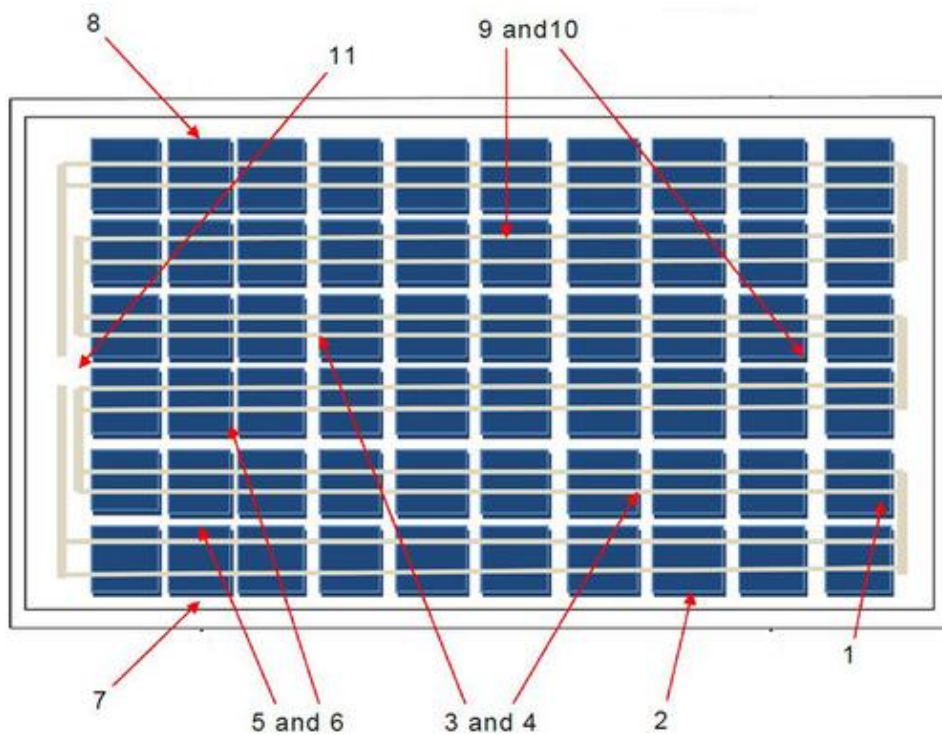
Fonte: Adaptado de Bonomo *et al.* (2023).

Os ensaios de resistência ao impacto visaram à segurança mecânica e estrutural de vidros laminados fotovoltaicos, portanto foram realizados em harmonização com normas correlatas da União Europeia (EU) para produtos de construção civil à base de vidro e vidros laminados fotovoltaicos. O estudo também ressalta que esse tipo de teste é de suma importância ao BIPV, visto que, dentre alguns pontos importantes, sabe-se que rachaduras nos módulos fotovoltaicos, comumente causadas pela influência do impacto do granizo, algo muito comum em

alguns países de invernos rigorosos, reduzem a eficiência de geração de energia e comprometem o desempenho elétrico.

Para maior confiabilidade dos resultados, uma ampla seleção de pontos de impacto foi considerada no procedimento, seguindo uma orientação da IEC 61215-2, norma mundialmente aplicada para se testar a durabilidade, desempenho e segurança necessária para se comercializar painéis fotovoltaicos na Europa, Japão, China, EUA e outros. Na Figura 25, constata-se os pontos de impactos previamente definidos para as esferas metálicas, totalizando 10 pontos específicos.

Figura 25 – Pontos de impactos para testes conforme a IEC 61215-2

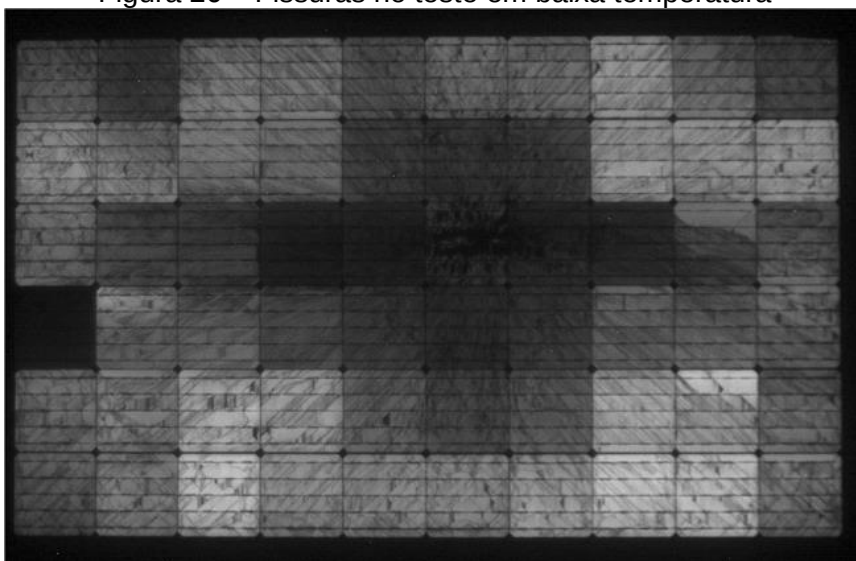


Fonte: Adaptado de Bonomo *et al.* (2023).

Os testes com temperatura ambiente definida entre 20 a 25 °C para os diferentes impactos já mencionados mostraram que não houve danos sérios, sem comprometimento da integridade das células solares e desempenho elétrico. Em consequência, o teste concluiu que, em altas temperaturas, a 90 °C, os vidros dos painéis FV fraturaram com mais facilidade quando comparados com os painéis em temperatura ambiente, sendo necessária uma carga de impacto ligeiramente inferior, e revelou um tipo diferente de fratura, mostrando rachaduras diagonais, mas sem comprometer a integridade das células solares, conforme Bonomo *et al.* (2023).

Para as baixas temperaturas, entre -30 a -20 °C, todos os testes mostraram que a quebra do vidro ocorre mediante cargas maiores às registrados em todas as amostras testadas, porém sem afetar as células solares de silício policristalino, e mostrou uma propagação bastante difusa das fraturas, conforme a Figura 26, onde uma imagem de mapeamento das fissuras foi obtida através do método de eletroluminescência, segundo Bonomo *et al.* (2023).

Figura 26 – Fissuras no teste em baixa temperatura



Fonte: Adaptado de Bonomo *et al.* (2023).

Por fim, não foi detectada uma redução na eficiência dos painéis em todas as situações em que houve quebra do vidro. É de suma importância enfatizar que há uma fraqueza indetectável na vidraçaria por meio dos testes, residindo nos intervalos onde não há células solares. Isso ocorre devido ao adesivo depositado, durante a fabricação, apenas atrás das células solares por razões estéticas.

Conforme Kim *et al.* (2024), a incorporação de um BIPV requer um alto nível de especialização e coordenação entre construtores, eletricitas e especialistas em energia solar, tornando o processo de instalação mais complexo que o dos materiais de construção tradicionais.

O estudo destaca a aplicação de chapa de aço para compor uma das camadas finais que constituem o painel fotovoltaico padrão com o intuito de alcançar melhor trabalhabilidade, durabilidade e menor manutenção. A chapa de aço é projetada para ficar entre o material encapsulante inferior da célula solar, comumente de Acetato-vinilo de etileno (EVA), e a caixa de junção, substituindo assim o tradicional fundo

protetor, denominado também pela palavra inglesa, *backsheet*. Na Figura 27, observa-se a esquematização das camadas fundamentais que compõem um painel FV.

Atualmente, EVA e POE são os materiais de encapsulamento mais comumente usados para células solares. As vantagens do EVA incluem seu baixo custo, facilidade de processamento e alta adesão a substratos, no entanto, as desvantagens geralmente envolvem fácil hidrólise, amarelamento e o ácido acético resultante frequentemente causa migração de íons de sódio (Na^+) e degradação induzida por potencial (PID). O POE, por outro lado, tem alta resistividade, boa resistência a PID, baixa transmissão de vapor e boa resistência às intempéries, mas é propenso à separação aditiva e degomagem (Yang *et al.*, 2023, p. 01).

Figura 27 – Camadas constituintes de um painel solar padrão



Fonte: Adaptado de Portal Solar (2019).

Para Kim *et al.* (2024), o uso de chapas de aço como material de apoio para painéis solares, em vez de *backsheets* tradicionais, tem potenciais vantagens, pois, comparativamente, o aço possui durabilidade e resistência superiores à umidade e radiação UV, sendo esses dois últimos fatores, os principais responsáveis pela degradação e redução da vida útil dos tradicionais do *backsheet* em painéis fotovoltaicos; outro ponto plausível é que o aço é reciclável e tem uma vida útil mais longa do que os *backsheets* tradicionais, reduzindo assim o impacto ambiental da fabricação com relação ao descarte de painéis solares.

Enfatizando que, o *backsheet* é mais comumente constituído por um combinado de materiais denominado TPT, sigla esta que reúne as letras iniciais de três compostos químicos: fluoreto de polivinila (PVF), um polímero de grande resistência, conhecido comercialmente como Tedlar; polietileno tereftalato (PET), e por fim, novamente uma camada de Tedlar. Também é usual a indústria adotar na

última camada do fundo protetor o polímero EVA, dessa forma tem-se o combinado de materiais denominado de TPE, conforme Vinayagamoorthi *et al.* (2024) e Padhamnath *et al.* (2025).

Além disso, placas de aço são materiais de ampla aplicação no setor da construção civil, portanto, arquitetos, designers e engenheiros já estão familiarizados com elas, e as diretrizes de instalação estão bem estabelecidas. Outra grande contribuição que a placa de aço pode proporcionar é otimizar as propriedades de resistência ao fogo, especialmente para painéis solares, diminuindo a quantidade de materiais combustíveis nos mesmos.

No estudo de Kim *et al.* (2024), avaliou-se, por meio de experimentos laboratoriais, a adesão entre chapas de aço e encapsulantes, concluindo que, tanto para o encapsulante EVA quanto para o POE, notáveis níveis de adesão foram apresentados, tornando preliminarmente viável o uso de chapas de aço como *backsheet*. Todavia, para uma verificação mais precisa sobre o efeito de adesão entre a placa de aço e o encapsulante, é necessário fazer um módulo fotovoltaico real e realizar avaliações de confiabilidade

Contudo, é importante ressaltar que o estudo não faz menção ao possível aquecimento intensificado dos painéis solares devido à aplicação de chapa de aço como fundo protetor. Porquanto é notório no meio científico que o calor atenua a eficiência de conversão de energia nas células solares, além de diminuir a sua vida útil, Amélia *et al.* (2016).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo, pautado em uma extensa revisão informacional, proporcionou uma diversificada abordagem sobre o emprego de sistemas fotovoltaicos integrados às construções (BIPV), destacando aspectos cruciais como segurança, desempenho energético, campo estético e durabilidade.

Evidenciou-se que os sistemas BIPV oferecem a dupla vantagem de impulsionar a geração de energia renovável no ambiente construído, ao mesmo tempo em que proporcionam economia de materiais e tempo de construção por substituírem elementos convencionais de edificação, Tina *et al.* (2020). Essa dualidade funcional é um dos pilares da sua crescente relevância no cenário da construção sustentável.

A viabilidade econômica do BIPV foi um ponto importante na análise. Embora fatores como as condições geográficas, urbanas e climáticas, além dos aspectos técnicos dos produtos fotovoltaicos, devam ser cuidadosamente considerados para uma projeção precisa da capacidade produtiva e do retorno financeiro, as projeções matemáticas encontradas nos artigos investigados indicam um tempo de retorno do investimento para a implementação do BIPV de aproximadamente 13 anos.

É crucial ressaltar que a vida útil dos painéis solares, conforme dados dos maiores fabricantes do segmento, pode variar de 25 a 30 anos. Isso significa que o BIPV oferece um tempo de vida útil que pode atingir o dobro do período de retorno econômico, configurando um cenário financeiramente muito atraente e sustentável a longo prazo, com geração de energia teoricamente sem custos financeiros após o *payback*.

A respeito de seu vasto potencial, a temática BIPV enquanto produto tecnológico, tanto no âmbito industrial quanto na produção científica e nas políticas de sustentabilidade, ainda se encontra em uma fase de desenvolvimento e aprimoramentos ininterruptos. Há um manifesto interesse em pesquisas que visam desenvolver produtos fotovoltaicos cada vez mais adequados e otimizados para as multifunções propostas, em contraste com a abordagem tradicional que se concentrava apenas em instalações em telhados ou usinas solares convencionais em solo. Esse movimento reflete uma mudança de paradigma, buscando integrar a geração de energia de forma harmoniosa à arquitetura e ao design urbano.

Muitos pontos e desdobramentos da aplicação de sistemas fotovoltaicos, especialmente em fachadas, ainda carecem de maiores aperfeiçoamentos. A maioria

dos artigos examinados aponta para a necessidade de pesquisas futuras e a continuidade das abordagens atuais para superar esses desafios.

Os aspectos estéticos são um exemplo paradigmático: além de representar um desafio técnico na produção de painéis com variedade de cores, texturas e transparências, o fator arquitetônico e a dupla funcionalidade que envolvem o arquétipo BIPV são um campo amplíssimo e valioso a ser explorado pela indústria do segmento fotovoltaico e da construção civil. A integração visual e a capacidade de personalização são fundamentais para a aceitação e popularização do BIPV em projetos de alto valor estético, além do inquestionável benefício ambiental que proporciona.

Este estudo observou que a fachada predial é o local de maior aplicação do BIPV, superando com amplo predomínio a instalação em outros pontos da construção. No entanto, é fundamental salientar que, por se tratar de uma tecnologia em uma fase inicial de expansão e desenvolvimento, dada a sua especificidade de integração arquitetônica, esse cenário pode mudar futuramente.

Por fim, novos produtos e conceitos estão sendo continuamente idealizados, mesmo que ainda demandem maior desenvolvimento. Um exemplo promissor são os pisos solares, onde cerâmicas e materiais análogos com tecnologia fotovoltaica intrínseca são almejados para o futuro da construção civil e do BIPV, abrindo novas fronteiras para a geração distribuída de energia em ambientes urbanos.

REFERÊNCIAS

- AMELIA, A. R. *et al.* Investigation of the effect temperature on photovoltaic (PV) panel output performance. *IJASEIT*. [s. l.], v. 6, n. 5, p. 682-688, 2016. ISSN: 2088-5334. DOI: <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.6.5.938>. Disponível em: http://insightsociety.org/ojaseit/index.php/ijaseit/article/download/938/pdf_240. Acesso em: 29 dez. 2024.
- ARCHDAILY. **Como funcionam as fachadas duplas ventiladas?** [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/922852/como-funcionam-as-fachadas-ventiladas>. Acesso em: 7 jun. 2024.
- ATTOYE D. E.; AOUL K. A. T.; HASSAN A. A. Review on Building Integrated Photovoltaic Façade Customization Potentials. **Sustainability**. [s. l.], v. 9, dez. 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/12/2287>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- AZAMI, Ahadollah; SEVINÇ, Harun. The energy performance of building integrated photovoltaics (BIPV) by determination of optimal building envelope. **Building and Environment**. [s. l.], v. 199, jul. 2021, ISSN 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107856>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321002626>. Acesso em: 7 jun. 2024.
- BALLIF, C. *et al.* Integrated thinking for photovoltaics in buildings. **Nat Energy**, [s. l.], v. 3, jun. 2018, p. 438–442, ISSN 2058-7546. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0176-2#citeas>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- BLOCK, A. B. Colouring solutions for building integrated photovoltaic modules: a review. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 314, 2024, ISSN 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114253>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824003694>. Acesso em: 22 dez. 2024.
- BONOMO, P. *et al.* Impact resistance of BIPV systems: New testing procedure for performance assessment of multifunctional products. **Energy Science & Engineering**. [s. l.], v. 11, jan. 2023, p. 22-47, ISSN 2050-0505 (online). Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.1364>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- CASTILLO, M. S. *et al.* Intelligent windows for electricity generation: a technologies review. **Building Simulation**. [s. l.], v. 15, p. 1747–1773, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0895-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12273-022-0895-y>. Acesso em: 01 nov. 2024.

CHEN, Wenqiang *et al.* Predicting diffuse solar irradiance on obstructed building façades under irregular skyline patterns for various ISO/CIE standard skies. **Journal of Building Engineering**. [s. l.], v. 40, nov. 2021, ISSN 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102370>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221002266>. Acesso em: 28 ago. 2024.

CHIVELET, Nuria M. *et al.* Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) products and systems: A review of energy-related behavior. **Energy and Buildings**. [s. l.], v. 262, maio 2022. ISSN: ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822001694>. Acesso em: 10 nov. 2024.

GRUPPOSTG. **Colored modules**. Valdengo. 2024. Disponível em: <https://vgs.gruppostg.com/en/>. Acesso em: 22 dez. 2024.

IBERDROLA. **Células fotovoltaicas**: conheça sua evolução, seus diferentes tipos e as últimas inovações. [s. l.], 2025. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/celulas-fotovoltaicas-fotoeletricas>. Acesso em: 11 mar. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Energy Review 2025**. Paris: 2025. 41 p. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>. Acesso em: 7 abr. 2025.

ITALOS, Christos *et al.* Use of double skin façade with building integrated solar systems for an energy renovation of an existing building in Limassol, Cyprus: Energy performance analysis. **Energy Reports**. [s. l.], v. 8, nov. 2022, p. 15144-15161, ISSN 2352-4847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.088>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472202474X>. Acesso em: 15 nov. 2024.

KIM, Young-Su. *et al.* Analysis of adhesion characteristics of steel back plates and encapsulants for fire-proof BIPV modules. **Results in engineering**. [s. l.], v. 21, 2024, ISSN 2590-1230. DOI: Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>. Acesso em: 26 dez. 2024.

KROMATIX. **References selection**. Romont, 2025. Disponível em: <https://kromatix.com/references>. Acesso em: 05 mar. 2025.

LOFSOLAR. **Color solar cell**. Hsinchu, 2025. Disponível em: <http://www.lofsolar.com/>. Acesso em: 22 fev. 2025.

LYRA, Giselle G. B. de.; ROLA, Sylvia M. **Modelagem e avaliação de envoltórias fotovoltaicas: estudo de caso edifício arquiteto Carlos Bratke**. In: Congresso de Escolas e Faculdades Públicas de Arquitetura da América do Sul (ARQUISUR), 25., 2022, Porto Alegre, **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 2022. Disponível em: <https://www.sisgeenco.com.br/anais/arquisur/2022/trabalhos.html>. Acesso em: 14 nov. 2024.

MIN, Qiaoling *et al.* Wind resistance performance analysis of metal roof system of the long-span integrated photovoltaic building. **Journal of Building Engineering**. [s. l.], v. 86, jun. 2024. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224005540>. Acesso em: 14 dez. 2024.

PADHAMNATH, Pradeep. *et al.* Development of PV panel recycling process enabling complete recyclability of end-of-life silicon photovoltaic panels. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. [s. l.], v. 286, jul. 2025, ISSN 0927-0248. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024825001722>. Acesso em: 18 abr. 2025.

PENG, Jinqing *et al.* Study on the overall energy performance of a novel c-Si based semitransparent solar photovoltaic window, **Applied Energy**, [s. l.], v. 242, 2019, p. 854-872, ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191930515X>. Acesso em: 26 nov. 2024.

PEHARZ, Gerhard. *et al.* Application of plasmonic coloring for making building integrated PV modules comprising of green solar cells. **Renewable Energy**. [s. l.], v. 109, mar. 2017, p. 542-550, ISSN 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117302598>. Acesso em: 05 mar. 2025.

PORTAL SOLAR. **Como funciona o painel solar fotovoltaico: placas fotovoltaicas**. 2019. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/>. Acesso em: 26 dez. 2024.

RØYSET, Arne *et al.* Optical interference coatings for coloured building integrated photovoltaic modules: Predicting and optimising visual properties and efficiency. **Energy and Buildings**. [s. l.], v. 298, nov. 2023, ISSN 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113517>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823007478>. Acesso em: 7 jun. 2024.

STØLEN, Reidar *et al.* Large and small scale fire test of a building integrated photovoltaic (BIPV) façade system. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 144, mar. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03>. Acesso em: 14 maio 2024.

SAHU, P. K.; ROY, J. N.; CHAKRABORTY, C. Performance assessment of a bifacial PV system using a new energy estimation model. **Solar Energy**, [s. l.], v. 262, 2023, ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23004437>. Acesso em: 02 dez. 2024.

SHUKLA A. K.; SUDHAKAR K.; BAREDAR P. Recent advancement in BIPV product technologies: A review. **Energy Build**. [s.n.], v. 140, p. 188-195, abr. 2017. ISSN: ISSN 0378-7788. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816316528>. Acesso em: 09 nov. 2024.

SIDDIQUE, Muhammad *et al.* Performance assessment of Trombe wall and south façade as applications of building integrated photovoltaic systems. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**. [s. l.], v. 57, jun. 2023. ISSN 2213-1388. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138823001340>. Acesso em: 7 nov. 2024.

SWISS SOLAR SOLUTIONS. **Parapetto solare 3S**. Gwatt, 2024. Disponível em: <https://www.3s-solar.swiss/it/referenze>. Acesso em: 22 dez. 2024.

THEOKLI, Constantina *et al.* Energy renovation of an existing building in Nicosia Cyprus and investigation of the passive contribution of a BIPV/T double façade system: A case-study. **Energy Reports**. [s. l.], v. 7, nov. 2021, p. 8522-8533, ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721001943>. Acesso em: 02 nov. 2024.

TINA, Giuseppe M. *et al.* A novel building ventilated façade with integrated bifacial photovoltaic modules: analysis of the electrical and thermal performances. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART AND SUSTAINABLE TECHNOLOGIES (SpliTech), 5., 2020, Split, Croatia, **Anais** [...]. Split, 2020. DOI: <https://doi.org/10.23919/SpliTech49282.2020.9243810>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9243810>. Acesso em: 15 out. 2024.

TRATTNIG, Roman *et al.* Smart glass coatings for innovative BIPV solutions. **Sustainability**. [s. l.], v. 13, n. 22. nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132212775>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/22/12775>. Acesso em: 20 jun. 2024.

VINAYAGAMOORTHY, R. *et al.* Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: a comprehensive review and experimental validation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. [s. l.], v. 12, fev. 2024, ISSN 2213-3437. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723024545>. Acesso em: 18 abr. 2025.