

# SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS EM EDIFÍCIOS: ASPECTOS DE INTEGRAÇÃO ARQUITETÔNICA

Giselle G. Bahiense de Lyra – giselle.lyra@fau.ufrj.br  
Sylvia Meimaridou Rola

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Arquitetura

## 5.1. Aspectos arquitetônicos do uso de instalações fotovoltaicas

**Resumo.** Os edifícios atualmente consomem cerca de 36% da energia produzida globalmente e se encontram no centro do debate sobre a transição para fontes de energia renovável, que pode permitir uma diminuição constante das emissões futuras. A energia solar fotovoltaica tem experimentado um crescimento exponencial em todo o mundo, sua aplicação no ambiente construído reduz a necessidade de grandes áreas livres e permite converter os edifícios de consumidores em produtores de energia. Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios trazem como vantagem o potencial de aproveitamento de grande parte da envoltória, se comparados aos sistemas convencionais de cobertura. Contudo, devido a sua complexidade, os sistemas oferecem desafios no âmbito do projeto, desde o seu estágio de concepção inicial, para garantir uma melhor integração fotovoltaica que compatibilize aspectos estéticos, construtivos, energéticos e econômicos. Este artigo pretende investigar os conceitos, critérios, melhores práticas e exemplos de integração arquitetônica bem-sucedidos, visando apoiar a tomada de decisão no âmbito do projeto. Conclui-se que a crescente inovação e diversidade de produtos e soluções permitem novas perspectivas de integração, que se refletem nos edifícios de referência examinados. Uma ampla difusão de referências projetuais pode contribuir para a compreensão das possibilidades, benefícios e limitações de um projeto BIPV, indicando caminhos possíveis para uma melhor integração fotovoltaica, equilibrando os conceitos do design à funcionalidade construtiva e à otimização da eficiência energética.

**Palavras-chave:** BIPV, Fotovoltaicos Integrados em Edifícios, Integração fotovoltaica na arquitetura

## 1. INTRODUÇÃO

Os setores de edifícios e construção civil combinados são responsáveis por 36% do consumo final global de energia, por mais de 55% da eletricidade global e por cerca de 42% do total de emissões diretas e indiretas de CO<sub>2</sub>, além demandar cerca de 50% de todos os materiais extraídos (UNEP, 2022). Nesse contexto, o ambiente construído constitui um campo estratégico de investigação e inovação com vistas a transição energética (Corti, Bonomo e Frontini, 2020).

Estudos de Kuo *et al.* (2016) revelam que, ao permitir a incorporação da energia ao envelope da edificação como parte dos materiais de construção, os Fotovoltaicos Integrados em Edifícios (BIPV - *Building Integrated Fotovoltaics*) oferecem grande potencial de redução das emissões relacionadas ao consumo de energia das edificações e otimização do uso de recursos naturais.

Ritzen (2017) aponta que o aproveitamento das superfícies da envoltória dos edifícios para produção de eletricidade a partir do recurso solar representa um grande potencial para a transformação do ambiente construído num produtor descentralizado de energia renovável, sem o impacto territorial associado à geração centralizada de energia.

Por definição, a sigla BIPV refere-se a sistemas em que o elemento fotovoltaico assume, além da função de produzir energia elétrica, o papel de elemento construtivo. A integração de módulos fotovoltaicos na arquitetura vem evoluindo rapidamente nos últimos anos. Os mais diversos tipos de produtos BIPV são capazes de substituir totalmente alguns componentes da construção, como elementos de cobertura, revestimentos, envidraçamento, sombreamento e outros elementos arquitetônicos necessários ao bom funcionamento do edifício (SUPSI *et al.*, 2017).

A definição do BIPV exclui instalações sobrepostas ou independentes, como os painéis fotovoltaicos convencionais montados sobre coberturas, que devem ser entendidos como BAPV – *Building Applied Photovoltaics*, onde os sistemas estão fixados em partes do edifício, porém não assumem outra função além da geração de energia solar.

Segundo Zhang, Wang e Yang (2018), a principal vantagem dos sistemas BIPV sobre os sistemas fotovoltaicos não integrados é a sua dupla função. Esta dupla funcionalidade torna possível reduzir os custos de investimento inicial, os custos de material e as despesas de mão-de-obra em comparação com as soluções não integradas, em que os módulos fotovoltaicos não substituem os elementos de construção tradicionais. Em face desses atributos, indicam que o BIPV pode potencialmente tornar-se o sistema energético mais promissor no ambiente construído.

A relação de custo benefício dos sistemas não é trivial. O estudo de Gholami e Røstvik (2020) avaliou a viabilidade econômica do sistema BIPV como material de revestimento para toda a envoltória do edifício, a partir da Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) do sistema BIPV, no contexto das capitais dos países da União Europeia (UE), da Noruega e da Suíça. Os resultados revelaram que, considerando a produção de energia, o sistema BIPV poderia reembolsar todo o investimento, mesmo nas fachadas com menor insolação, enquanto os revestimentos de fachadas

tradicionais raramente trariam benefícios adicionais após o investimento inicial. Os autores concluíram que uma envoltória totalmente revestida com BIPV poderia reembolsar não apenas todos os custos de investimento, mas também se tornar uma fonte de renda para o edifício.

Estudos de Corti; Bonomo e Frontini (2020) apontam que, nas últimas décadas, a lenta expansão do BIPV foi associada a uma imagem de sustentabilidade e inovação. A mensagem de responsabilidade ambiental e até idealismo se sobrepôs ao critério de retorno do investimento no processo de decisão para a aplicação do BIPV. Atualmente, o mercado do BIPV vive um processo de transição, diante das pressões para a descarbonização do ambiente construído, sendo adotado como estratégia para ampliar o potencial de geração de energia renovável em edifícios. Com isso, a solução de desempenho energético tornou-se o principal impulsionador da expansão do BIPV, abrindo espaço para outras abordagens que valorizam uma estética focada no desempenho. Nesse cenário, em vez do BIPV encontrar o seu valor em ser visível, destacado como símbolo de sustentabilidade, a tendência é de que a se torne cada vez mais imperceptível, permitindo sua aplicação em larga escala (Sconamiglio, 2021).

Wall, Windeleff e Lien (2008), indicam fatores arquitetônicos ou estéticos como principais barreiras à expansão do uso da energia solar em edificações, devido ao impacto significativo dessas tecnologias na sua arquitetura. Devido à grande dimensão dos sistemas solares em relação à escala da envoltória do edifício, a qualidade da sua integração formal tem um impacto importante na qualidade arquitetônica final do edifício.

A integração exigida pelo BIPV apresenta um conjunto de desafios de projeto, sendo altamente influenciada pela orientação, inclinação e pelo entorno, além de converter o edifício em produtor/consumidor de energia. Fatores que importam num aumento considerável da complexidade do projeto e da gestão de energia (Gui *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o presente artigo pretende identificar e revisar conceitos, abordagens e melhores práticas para a integração arquitetônica de sistemas BIPV, trazendo casos de referência de integrações fotovoltaicas bem sucedidas, considerando aspectos tecnológicos, formais e energéticos, abrangendo as principais alternativas de integração, que possam constituir referências qualitativas, como contribuição para compreensão das limitações e potenciais dos sistemas.

## 2. MÉTODO

Para fundamentação teórica deste artigo, foi utilizada como metodologia a revisão bibliográfica com consulta à artigos científicos, teses e dissertações, em portais de periódicos nacionais e internacionais, relatórios de programas setoriais da Agência Internacional de energia – IEA, de apoio a implementação das melhores práticas para o BIPV.

Para seleção dos edifícios de referência, foram consultados ainda portais eletrônicos mantidos por Centros de Pesquisa dedicados à investigação e disseminação das tecnologias BIPV e premiações no campo da arquitetura e inovação fotovoltaica. Foram selecionados edifícios produzidos nos últimos dez anos, ilustrando as alternativas mais usuais de integração fotovoltaica na envoltória, onde as dimensões de integração funcional, estética e energética tenham sido atendidas, considerando os critérios estabelecidos por Schoen *et al.* (2001) e Munari Probst *et al.* (2012).

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Objetivos da integração fotovoltaica

Estudos de Reijenga e Kaan (2010) revelam que é difícil formular uma definição de Integração Construtiva, uma vez que tal conceito diz respeito aos aspectos físicos da integração de um sistema fotovoltaico num edifício, mas também abrange a imagem global do sistema fotovoltaico e sua relação com a edificação. Para o arquiteto, o aspecto estético, mais do que a integração física, é a principal razão para falar de integração fotovoltaica em edifícios.

Maturi e Adami (2018) consideram a integração construtiva como uma questão técnica e estética, onde o "I" da sigla BIPV deveria significar integração considerando todas as instâncias do seu triplo significado: integração tecnológica, integração estética e integração energética. A integração funcional refere-se à função dos módulos fotovoltaicos no edifício, que se soma ao seu papel de elementos conversores de energia (IEA-SHC, 2013). Nesse aspecto, é necessário considerar que o envelope dos edifícios é normalmente articulado em diferentes partes opacas e transparentes, compostas por elementos fixos e/ou móveis, cada uma delas atendendo a um conjunto específico de funções.

As partes opacas, compostas normalmente de elementos fixos, cumprem principalmente funções de proteção contra chuva, vento, ruído, invasão, e isolamento térmico. As partes transparentes, por sua vez, são geralmente constituídas por componentes móveis, destinados a regular o contato visual com o exterior, a iluminação e ventilação natural, os ganhos solares passivos, e simultaneamente garantir todo o conjunto de funções de proteção. A integração de um novo componente no envelope do edifício, que agrega ainda a função de geração de energia, requer o entendimento de como esse elemento pode se tornar compatível com as outras partes do envelope (IEA-SHC, 2013).

A integração energética está focada prioritariamente na otimização da produção de energia solar pela envoltória, exigindo a observação de todas as fatores que potencializam ou interferem no desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Este aspecto, mais distante da realidade dos projetistas, demanda um entendimento da tecnologia fotovoltaica em si, que permita a identificação das alternativas de integração mais viáveis de acordo com as condicionantes do projeto, bem como o seu correto dimensionamento.

A integração estética, por outro lado, refere-se ao conceito arquitetônico, à solução formal, podendo ser entendida como a capacidade da solução fotovoltaica atender as regras linguísticas e morfológicas que regem os signos, a estrutura e a composição da linguagem arquitetônica do edifício (Maturi; Adami, 2018).

Os trabalhos do programa *IEA SHC Task 41 - Solar Energy and Architecture*, dedicaram a Subtarefa A especificamente aos aspectos de integração arquitetônica do BIPV, sendo a Subtarefa C dedicada a conceitos, estudos de caso e diretrizes para utilização do BIPV. Nesse contexto, foram definidos critérios de integração e melhores práticas no sentido do aprimoramento da integração estética, recomendando que os sistemas devem ser naturalmente integrados e arquitetonicamente agradáveis, completando e acrescentando características atraentes ao edifício. Em resumo, todas as características dos elementos fotovoltaicos que afetem a materialidade do edifício devem ser coerentes com o seu projeto em geral, guardando compatibilidade em termos de dimensionamento, cor, textura e modulação, buscando ainda um design aprimorado e inovador, onde a concepção formal do sistema agregue valor ao edifício (Schoen *et al.*, 2001).

O parâmetros definidos nestes estudos sugerem alguns caminhos possíveis, que podem constituir um conjunto de referências de apoio aos projetistas e proprietários de edifícios, que devem ser interpretadas ressaltando-se o caráter subjetivo de conceitos e julgamentos estéticos.

### 3.2 Conceitos e possibilidades de integração

Munari Probst *et al.* (2012) propuseram seis conceitos de integração solar, de acordo com a interferência na composição da envoltória, que seguem ilustrados na Fig. 1. A classificação, engloba critérios aplicáveis a sistemas solares térmicos e a sistemas fotovoltaicos, incluindo elementos aplicados. Em função disso, destaca-se que a categoria de elemento técnico aplicado se enquadra como BAPV, estando as demais categorias alinhadas com o conceito de BIPV:

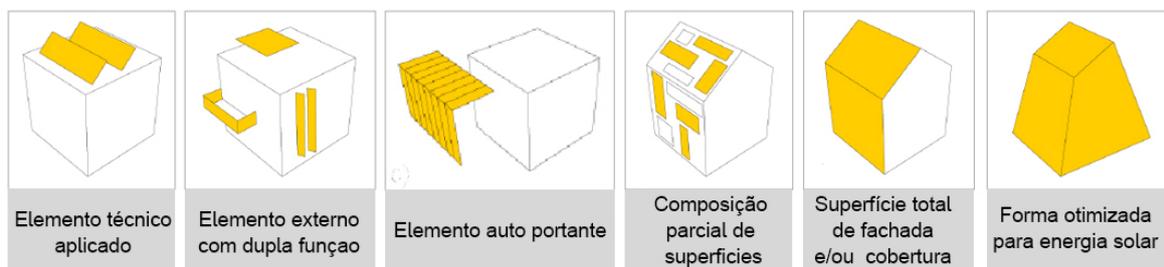


Figura 1 - Conceitos de integração solar em edifícios adotada no âmbito da IEA Task 41 – Subtask C. Fonte: adaptado de (Munari Probst *et al.*, 2012).

O programa estabeleceu três categorias principais de integração: coberturas, fachadas e dispositivos externos. Estas categorias se desdobram em 6 tipologias de integração na envoltória, que incluem diferentes formas tecnológicas de utilização do fotovoltaico no envelope, conduzindo a diferentes escolhas de componentes BIPV. As tipologias expressas no gráfico da Fig. 2, seguem sendo adotadas até o presente pelos demais autores consultados, como (Maturi; Adami, 2018); (Zanetti *et al.*, 2017); (Corti; Bonomo; Frontini, 2020), numa abordagem que considera o progresso da normatização, respeitando a segmentação de aplicações e produtos BIPV.

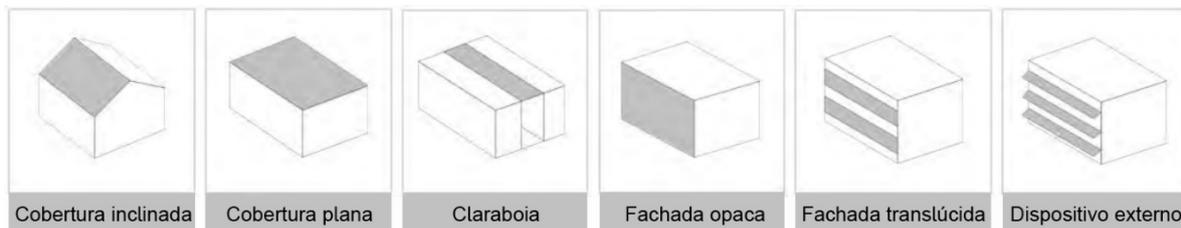


Figura 2 - Tipologias de integração na envoltória de edifícios adotada no âmbito da IEA Task 41 – Subtask A. Fonte: adaptado de (Munari Probst *et al.*, 2012).

**Integração em coberturas.** A integração em coberturas pode se dar em diferentes níveis, onde o componente fotovoltaico pode compor uma parte ou toda a camada de fechamento do sistema de cobertura, atuando como revestimento ou até substituindo completamente o sistema. Os sistemas destinados a coberturas representam 80% de todos os produtos do mercado. A integração fotovoltaica é possível em coberturas opacas inclinadas, planas ou curvas; e coberturas semitransparentes.

A cobertura inclinada é um método de construção comum em todo o mundo, onde a facilidade de instalação e a possibilidade de ajuste da inclinação para a melhor orientação solar, a tornam perfeitamente adequada para aplicações fotovoltaicas. As opções para integração em coberturas inclinadas incluem sistemas de telhado convencional com integração parcial ou total, tratando o plano de telhado como uma superfície única. As coberturas planas são, por sua vez, caracterizadas por superfícies contínuas, comumente sem função estética. Contudo, em coberturas que possuem

integração visual com o conjunto edificado, que constituam superfícies pisoteáveis ou com acesso público, a integração fotovoltaica demanda um nível de acabamento compatível com a composição arquitetônica.

Em claraboias e outros tipos de coberturas translúcidas, os BIPVs semitransparentes podem proporcionar uma iluminação natural controlada para o interior, contribuindo também para soluções de aquecimento passivo. Sistemas de isolamento com películas de baixa emissividade permitem atenuação dos ganhos térmicos, porém as variáveis de conforto devem ser consideradas criteriosamente para avaliação da aplicabilidade desse tipo de solução, dependendo do clima.

**Integração em fachadas.** Nas alternativas de integração em fachadas os componentes fotovoltaicos podem substituir a camada externa da fachada ou constituir o próprio sistema de vedação fachada. Os parâmetros relacionados com o controle de ganho solar, com o conforto térmico e visual, devem ser analisados cuidadosamente, respeitando o contexto da instalação.

A fachada em cortina, tratada no contexto do BIPV como fachada quente, é tipicamente um sistema contínuo, não estrutural, sendo instalada por montantes e travessas ou modulada, pré-fabricada industrialmente. Os fotovoltaicos podem ser incorporados nas partes opacas ou semitransparentes. Nas fachadas cortina altamente envidraçadas, o sistema de vedação produz menor isolamento em relação ao interior, sendo mais indicado em contextos em que se pretende o benefício de aquecimento passivo.

Em cortinas de vidro e janelas fotovoltaicas os módulos semitransparentes são amplamente utilizados, por razões estéticas e pela facilidade de integração, funcionando para aproveitamento da iluminação natural ou para visualização do exterior. A transparência pode ser obtida pelo espaçamento das células ou pela opacidade definida pelo método de deposição dos filmes finos. Contudo, deve ser considerado que quanto maior a transparência, menor a eficiência.

As fachadas opacas ventiladas, são identificadas como fachadas frias. Este sistema consiste tipicamente numa fachada de dupla pele, com uma subestrutura de suporte, um espaço de ar e um revestimento fotovoltaico. O calor é dissipado graças à cavidade que é naturalmente ventilada através de aberturas inferiores e superiores, permitindo o arrefecimento térmico da envoltória e melhoria da eficiência dos módulos, ao reduzir sua temperatura de operação. Muitos modelos construtivos e soluções tecnológicas estão disponíveis. Constantes inovações vêm disponibilizando diversidade de cores, texturas e acabamentos, permitindo a sua integração como um revestimento de fachada convencional.

**Dispositivos externos.** Os dispositivos podem ser integrados externamente a envoltória como elementos complementares ou autoportantes que integrem a composição do edifício, respeitando o critério de dupla função do BIPV, promovendo sombreamento, isolamento térmico, controle de ofuscamento ou com função de anteparo de segurança. Se incluem nessa categoria: brises fixos ou móveis; marquises; parapeitos e guarda-corpos.

### 3.3 Exemplos de integração fotovoltaica bem sucedida

Os casos pioneiros de utilização da energia fotovoltaica integrada em edifícios tiveram sua estética submetida prioritariamente aos parâmetros que proporcionassem maior eficiência dos módulos. Segundo SUPSI *et al.* (2017), o edifício residencial Wohnenland Richter, de Tomas Herzog e Bernard Schiling, construído em Milbersthoften, Munique, em 1982, é apontado como primeira ocorrência documentada de BIPV. A análise do edifício evidencia uma solução formal que resulta quase exclusivamente de considerações sobre a tecnologia solar passiva, adotando uma cortina de vidro inclinada a 45°, composta por 60m<sup>2</sup> de módulos de silício poli cristalino (p-Si), que promove o aquecimento do ambiente. A Fig. 3, traz como exemplos precursores do uso de BIPV os edifícios Wohnenland Richter, Edward B Bunn Intercultural Center, de Metcalf & Associates, Washington, 1982, e Doxford Solar Office, de Studio E Architects, Inglaterra, 1998.

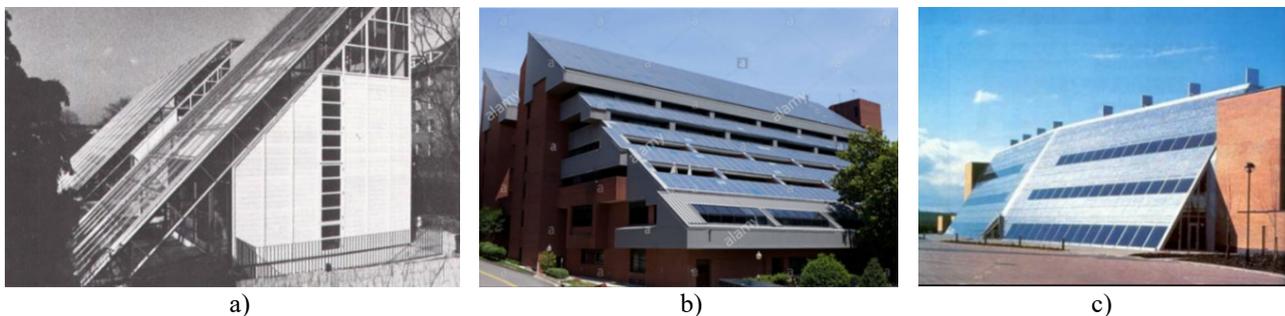


Figura 3 - Ocorrências pioneiras do BIPV. a) *Wohnenland Richter*, Munique, 1982. Fonte; <http://solarchitecture.ch>. b) Edward Bunn Intercultural Center, Washington, 1982; c) *Doxford Solar Office*, Inglaterra, 1998. Fonte: (Ruther, 2004).

É possível identificar que estes exemplos trazem um traço em comum, com soluções volumétricas focadas na disposição das superfícies fotovoltaicas de acordo com os ângulos mais favoráveis à captação solar, gerando uma produção arquitetônica de características formais similares, que perdurou até o final da década de 1990.

O surgimento de tecnologias fotovoltaicas semitransparentes, com transmissão de luz parcial, proporcionou métodos de integração que antes não eram possíveis aos módulos fotovoltaicos convencionais. Contudo, o nível de transparência

obtido apresentava desempenho inferior ao do vidro normalmente utilizado em edifícios, gerando áreas envidraçadas escurecidas ou coloridas. A partir do aprimoramento dessas tecnologias começaram a ser exploradas novas abordagens de uso do BIPV, como nos edifícios da Biblioteca Pompeu Fabra, projeto de Miguel Brullet i Tenas, em Mataró, Barcelona, 1998 e *Mont-Ceny Academy*, projeto de Jourda e Perraudin, em Hern, Alemanha, 1999, ilustrados na Fig. 4.



Figura 4 - a) Biblioteca Pompeu Fabra, Barcelona, 1998; b) *Mont-ceny Academy*, Hern, 1999. Fonte: <https://solarchitecture.ch>.

Na biblioteca Pompeu Fabra, uma pele de vidro, composta por fotovoltaicos semitransparentes, foi adotada verticalmente, tirando partido dos efeitos de semitransparência na ambiência interna. Os módulos são ventilados, para maior eficiência, e no inverno o excesso de energia térmica é utilizado para aquecimento passivo (ISAAC *et al.*, 2019).

O edifício *Mont-Ceny Academy*, rompeu paradigmas na aplicação do BIPV pela concepção estética inovadora. No projeto, com uma estrutura de madeira coberta por uma pele envidraçada, os autores lançaram mão de elementos fotovoltaicos semitransparentes em superfícies verticais e horizontais, trabalhando de forma elaborada a transparência e sombreamento, influenciando uma grande diversificação de abordagens e interpretações para a integração fotovoltaica na arquitetura. (SUPSI *et al.*, 2017).

**Integração em fachada cortina e cobertura: +e Kita Marburg, 2013.** O edifício educacional, projetado por *Opus Architekten*, abriga um jardim de infância em meio a um parque em Marburg, Alemanha. O conceito do aproveitamento solar define a forma do edifício, integrando-se naturalmente à sua linguagem arquitetônica. Os dois pavimentos com estrutura de concreto e fachadas totalmente envidraçadas, dispõem-se em cinco volumes, numa composição de múltiplas dobras que permitiram uma otimização da orientação das superfícies solares-ativas, distribuídas no piso superior da fachada sul. Na Fig. 5, imagens das fachadas fotovoltaicas que definem a identidade do edifício.



Figura 5 - Edifício +e Kita Marburg, Alemanha, 2013. Fonte: <http://opusarchitekten.com>.

O projeto foi concebido a partir do conceito de *plus energy* (+e), objetivando uma geração de energia que ultrapassasse o consumo do edifício, injetando o excedente na rede. O sistema da Ertex Solar, constituído como fachada quente, é composto por 365 m<sup>2</sup> de superfície de silício monocristalino negro, com orientação sul, que atingem uma potência total de 52,22 kWp. A produção de energia estimada é de 40.690 kWh/a, que supre integralmente o edifício e gera um excedente capaz de atender ao consumo de 13 unidades residenciais, (SUPSI *et al.*, 2017). A edificação foi certificada pelo padrão energético *Efficient House Plus Standard*, adaptado para atender as necessidades de edifícios não residenciais, e obteve as premiações *DGNB-Preis 2016* e *Heinze Architekten-Award 2017*.

**Integração em fachada ventilada semitransparente: Aktiv Energy Tower Fronius, 2013.** A Aktiv Energy Tower está localizada em um antigo distrito industrial de Wels, Austria, como parte de um conjunto edifícios construídos no início do século XX. O projeto de renovação do edifício de uso corporativo foi concebido de acordo com o padrão Aktiv Haus. Cerca de 630 m<sup>2</sup> de elementos de fachada BIPV ocupam as fachadas sul, leste e oeste do edifício, complementando a produção do sistema BAPV de cobertura (IEA-PVPS, 2021).

Os 148 painéis de vidro laminado de segurança de dupla camada receberam módulos de silício monocristalino com transparência de cerca de 63%, obtida pelo espaçamento entre as células, permitindo condições ideais de iluminação no interior do ambiente. Além do aspecto de otimização do rendimento, a fachada BIPV foi projetada tendo em mente a melhor qualidade de iluminação interior possível, trabalhando com pontos de maior permeabilidade visual no nível dos usuários. A fachada ventilada é acessível para manutenção ou saída de emergência, através de uma estrutura de passarela, seguindo os requisitos de segurança da norma construtiva local. Na Fig. 6, imagens da fachada principal, do vão de manutenção acessível, e detalhe do projeto.

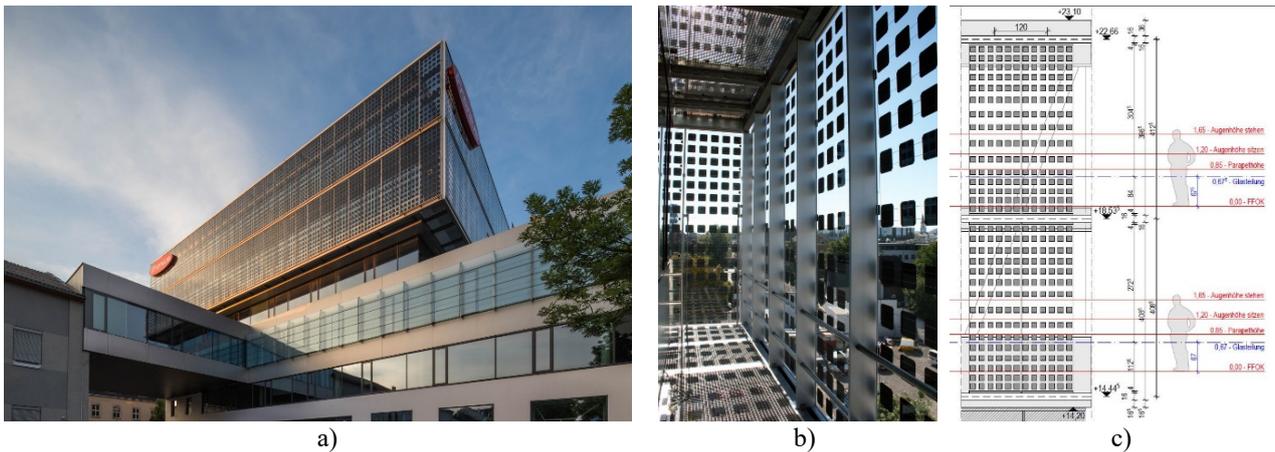


Figura 6 - Edifício *Fronius Aktiv Energy Tower*, Austria, 2013. a) Fachada principal; b) Vão de ventilação da fachada; c) Detalhe do espaçamento dos módulos, favorecendo o contato visual com o exterior. Fonte: <https://solarchitecture.ch>.

**Integração em fachada ventilada: NEW-Blauhaus, 2015.** O edifício *NEW-Blauhaus*, de autoria de Andreas Horsky, da *Kadawittfeld Architektur*, abriga o Centro de Eficiência Energética Universidade Niederrhein, em Mönchengladbach, Alemanha. O edifício de 5.800m<sup>2</sup> é um modelo de proteção climática ativa. O sistema de fachada tem função especial de isolamento térmico e utiliza ao todo 77 módulos de silício policristalinos produzidos sob medida, com 1,29 x 3,51m, totalizando 348 m<sup>2</sup>. A disposição dos elementos BIPV se dá nas superfícies opacas das fachadas, inclinadas a 84°, que se alternam com os vãos de iluminação a inclinados a 96°, ocupando as faces sul, leste e oeste da envoltória. Na fachada norte a proposta volumétrica se mantém, com vidros de mesma tonalidade no lugar do BIPV. A potência nominal do sistema é de 45,3 Kw<sub>p</sub>, que complementam o sistema BAPV de cobertura, permitindo um balanço energético zero (Kadawittfeld, 2015). A fig. 7 ilustra o jogo de volumes e detalhe do sistema modular de fachada ventilada.

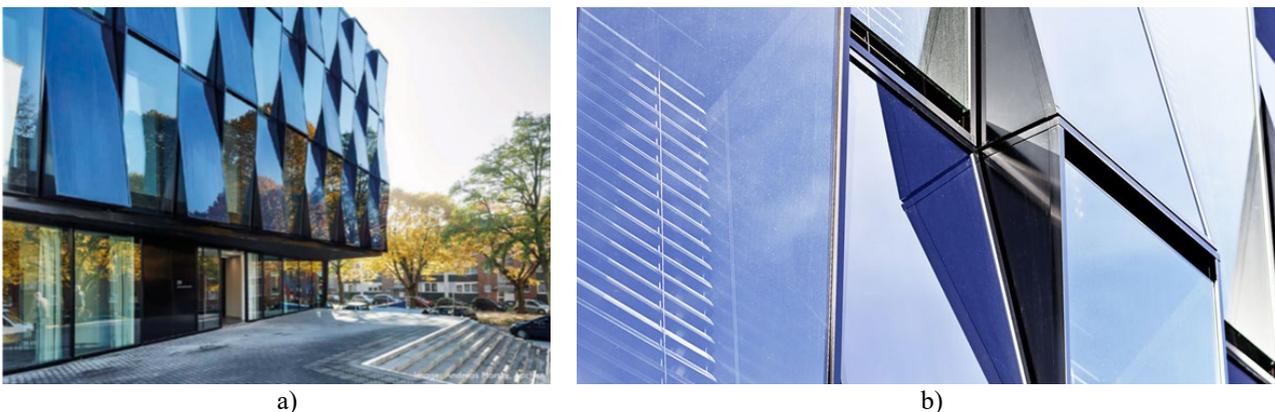


Figura 7 - Edifício *NEW-Blauhaus*, Alemanha, 2015. a) Vista do acesso principal; b) Detalhe do sistema de fachada ventilada. Fonte: [www.kadawittfeldarchitektur.de](http://www.kadawittfeldarchitektur.de).

O conceito energético, a inovação no uso do fotovoltaico e a qualidade estética do edifício foi reconhecida em inúmeros prêmios: Prêmio *Deutscher Solarpreis*, 2016; *German Design Award*, 2017 - Menção especial; Prêmio de melhor edifício do *BDA Linker Niederrhein*, 2017; e Prêmio de Inovação para a Construção Fotovoltaica Integrada, 2018 - Prêmio Especial de Design de Fachada.

**Integração em fachada ventilada: Copenhagen International School, 2017.** O edifício da *Copenhagen International School* (CIS), de autoria de CF Møller Architects, está localizado numa zona portuária em Nordhavn, Dinamarca, distribuindo-se em 5 blocos, num total de 26.000 m<sup>2</sup>, que atendem a 12.000 estudantes.

Os fotovoltaicos foram integrados às fachadas do edifício em todas as orientações, com painéis de tecnologia *Kromatik Glass*, seguindo uma modulação de 70x70cm, inclinados a 4° em relação a estrutura de suporte, e dispostos randomicamente em diferentes direções. A tonalidade dos painéis é definida pela reflexão da luz, provocando diferentes nuances de verde e azul, dependendo da incidência solar. Na Fig. 8, vista do conjunto e detalhe da disposição dos painéis.



Figura 8 - Edifício CIS, Dinamarca, 2017. a) Visão do conjunto; b) Detalhe da disposição dos painéis fotovoltaicos em *Kromatik Glass* inclinados em diferentes direções. Fonte: <https://www.cfmoller.com>.

Foram utilizados ao todo, 12.000 painéis, totalizando 6.024 m<sup>2</sup> de superfícies fotovoltaicas, com potência nominal de 720 Kw<sub>p</sub>, que atendem a 50% da demanda anual de energia (IEA-PVPS, 2021).

O edifício recebeu a certificação *Aktive Haus*, além de diversas premiações que reconheceram sua qualidade arquitetônica: *ICONIC Award* - Arquitetura, 2017; *Blueprint Award* - finalista como Melhor Edifício de Uso Público, 2017; *Årets Byggeri* – Edifício do Ano, menção honrosa, 2017; *Civic Trust Award* - Recomendação, 2017; finalista do *European Architecture Award - Urban Development 2017*; *WAN Education Award* – Vencedor Regional 2017; *Building Integrated Solar Technology* – 2° lugar, 2017; *Active House Award*, vencedor geral, 2018 e *The Architecture MasterPrize for Educational Architecture 2018*.

**Integração em dispositivos externos: Freiburg Town Hall, 2017.** O edifício *Freiburg Town Hall*, de autoria de *Ingenhoven Architects*, abriga a sede da Prefeitura de Freiburg, em Breisgau, Alemanha, com centro administrativo e creche. Inaugurado em 2017, figura como o primeiro edifício público no mundo concebido com o conceito *net-surplus-energy*, gerando mais energia do que consome e injetando o excedente na rede local.

A fachada energeticamente otimizada, dotada de armações metálicas alinhadas para o sol, sustenta 880 brises fotovoltaicos semitransparentes que totalizam 1.848m<sup>2</sup> de superfície fotovoltaica integrada. O sistema BIPV atinge uma potência total de 220 kW<sub>p</sub>, complementando o sistema fotovoltaico híbrido de cobertura, sendo responsável por 40% da eletricidade produzida (Ingenhoven, 2017).

Os módulos especiais de vidro duplo têm dimensões de 3,5m de altura por 60cm de largura e espaçamento de 7 mm entre células que cria alta transparência (Ingenhoven, 2017). Na Fig. 9, imagens do acesso principal do edifício e detalhe dos brises fotovoltaicos.



Figura 9 - Edifício *Freiburg Town Hall*, Alemanha, 2017. a) Vista do acesso principal; b) Detalhe dos brises fotovoltaicos semitransparentes. Fonte: <https://www.ingenhovenarchitects.com/>.

O edifício atende aos rigorosos critérios da norma *PassivHaus* e recebeu diversas premiações: foi ganhador dos prêmios *DGNB Climate Positive Award 2019* e *Deutscher Nachhaltigkeitspreis 2019*; indicado para o *DAM Preis 2019*; menção honrosa no *Balthasar Neumann Preis 2018*; e finalista no *Architizer A+ Awards 2018* e *WAF Awards 2018*.

### 3.4 Quadro síntese

Os dados dos sistemas BIPV presentes nos edifícios de referência analisados seguem sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Quadro síntese com dados técnicos dos sistemas analisados. Fonte: as autoras.

Edificação	Tipologia de integração	Orientação módulos	Inclinação módulos	Superfície BIPV (m <sup>2</sup> )	Tecnologia fotovoltaica	Potência nominal(kWp)	nZEB
 Aktiv Energy Tower Fronius Austria 2013	Fachada ventilada semi transparente	Sul, leste, oeste	90°	630	Silício mono cristalino	38,8	N
 +E Kita Alemanha 2013	Fachada quente opaca	Sul	90° 30°	365	Silício mono cristalino	52,22	S
 New Blawhaus Alemanha 2015	Fachada ventilada opaca	Sul, leste, oeste	86°	348	Silício poli cristalino	45,3	S
 CIS Dinamarca 2017	Fachada ventilada opaca	Sul, leste, norte, oeste	90°	6.024	Silício mono cristalino Kromatik	720	N
 Freiburg Hall Alemanha 2017	Dispositivo externo semitransparente	Sul, leste, oeste	90°	1.848	Silício mono cristalino	221	S

## 4. CONCLUSÕES

Durante boa parte das quatro décadas de desenvolvimento do BIPV, as qualidades estéticas insatisfatórias e limitada liberdade de formato dos módulos fotovoltaicos foram um obstáculo à sua utilização como elementos de composição arquitetônica, em função de um impacto significativo, nem sempre positivo, para a aparência geral da edificação.

Nos últimos dez anos assistimos ao surgimento de toda uma gama de produtos personalizáveis em termos de dimensões, formas, cores, textura e opacidade, permitindo que os elementos fotovoltaicos se tornem aplicáveis a quase toda a envoltória do edifício. A diversificação de produtos, soluções de integração e configurações adequadas a várias tipologias e demandas projetuais, traz o potencial de uma maior difusão do BIPV como alternativa de geração local de energia renovável no ambiente construído, podendo contribuir para as metas de NZEB.

Neste cenário, vem se inserindo progressivamente no repertório da arquitetura e dos arquitetos contemporâneos, à semelhança de qualquer outro material de construção. Diversos exemplos internacionais estão disponíveis como referências e já é possível delinear uma primeira avaliação da qualidade arquitetônica do BIPV.

Os exemplos objeto de estudo demonstram um significativo aprimoramento das abordagens de integração, conciliando os aspectos tecnológicos e de design, e agregando valor ao projeto pela inovação e sustentabilidade. Na maioria dos projetos analisados as soluções BIPV isoladamente não suprem as necessidades totais do edifício, porém ampliam a capacidade geração complementando sistemas BAPV, permitindo alcançar as metas de autossuficiência energética em alguns casos.

A presença da tecnologia de silício monocristalino, adotada na maioria dos edifícios analisados, em diferentes apresentações, reflete sua predominância no mercado fotovoltaico global. Contudo, esta tecnologia é a que agrega maior impacto ambiental e tem o maior nível de emissões dentre as tecnologias fotovoltaicas comercializadas na atualidade. Um maior conhecimento por parte dos projetistas acerca das demais tecnologias disponíveis, poderia permitir a aplicação de sistemas com rendimentos equivalentes e menor pegada de CO<sub>2</sub>.

Os sistemas de fachada opacos apresentaram um desempenho energético muito superior aos sistemas semi transparentes analisados, em função da maior eficiência dos módulos, mesmo se comparado a soluções com customização de cor. As soluções opacas também mostram maior potencial para integração em sistemas que contribuem para o arrefecimento térmico da envoltória.

A barreira de desconhecimento dos sistemas pelos arquitetos evidencia a necessidade de melhor disseminação de conhecimento e desenvolvimento nesse campo. É necessário compreender e considerar as possibilidades, os benefícios e

as desvantagens de um projeto BIPV. Se o BIPV for devidamente considerado na fase inicial de concepção, o projeto arquitetônico pode se tornar o caminho para garantir uma melhor integração fotovoltaica, considerando estética, funcionalidade construtiva e a perspectiva de eficiência energética.

### **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

### **REFERÊNCIAS**

- Corti, P.; Bonomo, P.; Frontini, F., 2020. Building Integrated Photovoltaics: A practical handbook for solar buildings' stakeholders. Disponível online: [https://solararchitecture.ch/wp-content/uploads/2021/02/BIPV\\_Status\\_Report.pdf](https://solararchitecture.ch/wp-content/uploads/2021/02/BIPV_Status_Report.pdf). Acessado em: 17/11/2023.
- Gholami, H.; Røstvik, H. N., 2020. Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe. *Energy*, vol. 204, 117931, pp. 1-17.
- Gui, N., Cemesova, A., Hopfe, C. J., Rezugui, Y., Sweet, T., 2017. An integrated design platform for BIPV system considering building information. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Beijing.
- Ingenhoven, 2022. Freiburg Town Hall. World's first public net-surplus-energy building. Disponível online: <https://www.ingenhovenarchitects.com/projects/more-projects/town-hall-freiburg/>. Acesso em: 15/10/2023.
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme - IEA-PVPS, 2021. Successful Building Integration of Photovoltaics - A Collection of International Projects. Disponível online: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/03/IEA-PVPS-Task-15-book-executive-summary.pdf>. Acesso em: 08/10/2023.
- International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme - IEA SHC, 2013. Designing Photovoltaic Systems for Architectural Integration: Criteria and guidelines for product and system developers. Disponível online: <https://task41.iea-shc.org/publications/>. Acesso em: 17/11/2023.
- Kadawittfeld Architektur, [s.d.]. NEW-Blauhaus. Disponível online: <https://www.kadawittfeldarchitektur.de/en/projekt/new-blauhaus>. Acesso em: 05/05/2023.
- Kuo, H. J., Hsieh, S.H., Guo, R.C, Chan, C.C, 2016. A verification study for energy analysis of BIPV buildings with BIM. *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 676–691.
- Maturi, L.; Adami, J., 2018. Building Integrated Photovoltaic (BIPV) in Trentino Alto Adige, Springer Cham.
- Munari Probst, M. C., Roecker, C., Frontini, F., Sconamiglio, Farkar, K., Maturi, L. Zanetti, I., 2012. IEA SHC Task 41 Solar energy and Architecture: integration criteria and guidelines. Disponível online: <https://task41.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture-28March2013.pdf>. Acesso em: 09/11/2023.
- Reijenga, T. H.; Kaan, H., 2010. PV in architecture. In: Luque, L.; Hegedus, S. (Orgs.). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, pp. 1005–1042, John Wiley & Sons.
- Ritzen, M., 2017. Environmental impact assessment of Building Integrated Photovoltaics: numerical and experimental carrying capacity based approach. Tese de Doutorado em Ciências Aplicadas. Eindhoven University of Technology Library. Eindhoven.
- Rüther, R., 2004. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Editora UFSC.
- Schoen, T.; Prasad, D.; Ruoss, D.; Eiffert, P.; Sørensen, H., 2001. Task 7 of the IEA PV power systems program - achievements and outlook. In: 17th European Photovoltaic Solar Conference, Munich.
- Sconamiglio, A., 2021. A Trans-Disciplinary Vocabulary for Assessing the Visual Performance of BIPV. *Sustainability*, vol. 13, n. 5500, pp. 1-38.
- United Nations Environment Programme – UNEP, 2022. Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Disponível online: [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2022%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction\\_3.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2022%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction_3.pdf). Acesso em: 19/10/2023.
- University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland – SUPSI, Institute for Applied Sustainability to the Built Environment - ISAAC, ETH Zurich University, Swissolar, Swiss Energy, Sounding Board, 2017. *Solararchitecture: Sun as a building material*. Disponível online: <http://www.solararchitecture.ch>. Acessado em 05/05/2023.
- Wall, M.; Windeleff, J.; Lien, A. G., 2008. IEA-SHC Task 41 Solar Energy and Architecture: Annex Plan. In: *Solar Energy*. Disponível em: <http://task41.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/task41-Annex.pdf>. Acesso em: 19/10/2023.
- Zhang, T.; Wang, M.; Yang, H., 2018. A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. *Energies*, vol. 11, n. 11, pp. 1-34.

## **BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: ASPECTS OF ARCHITECTURAL INTEGRATION**

**Abstract.** Buildings currently consume 40% of the energy produced globally and are at the center of the discussion on the transition to renewable energy sources, which can enable a steady reduction in future emissions. Photovoltaics have experienced exponential growth worldwide, their application in the built environment reduces the need for large open areas and allows buildings to be converted from consumers into energy producers. In this context, the potential advantage of building-integrated photovoltaic systems is that they take advantage of a large part of the building envelope compared to conventional roof systems. However, due to their complexity, these systems offer challenges in terms of design, right from the initial conception stage, in order to guarantee the best photovoltaic integration that makes aesthetic, construction, energy and economic aspects compatible. This article aims to investigate the concepts, criteria, best practices and examples of successful architectural integration, in order to support decision-making within the project. It concludes that the growing innovation and diversity of products and solutions allow for new perspectives on integration, which are reflected in the reference buildings examined. A wide dissemination of design references can contribute to understanding the possibilities, benefits and limitations of a BIPV project, indicating possible paths for better photovoltaic integration, balancing design concepts with constructive functionality and energy efficiency optimization.

**Keywords:** BIPV, Building Integrated Fotovoltaics, Fotovoltaic Arquitectural Integration.