

DESAFIOS E SOLUÇÕES DE PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO SOLAR NO BRASIL

Giulia Pimentel Cia Koike – giu.pckoike@gmail.com

Isadora Pauli Custódio

Ricardo Rütther

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Departamento de Engenharia Civil

Resumo. O artigo aborda a implementação de sistemas de energia solar fotovoltaica (FV) em edificações, com foco no Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, localizado em Florianópolis/SC, assim como aponta o cenário promissor da energia solar no Brasil, com capacidade instalada de 35 GWp, principalmente em geração distribuída. O texto destaca a eficiência e redução de custos dos sistemas FV, incentivados por regulamentações como a ANEEL REN 1000/2021 e a Lei nº 14300/2022, e ainda mais destaca a complexidade da integração Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) em comparação com o Building-Applied Photovoltaics (BAPV), especialmente no contexto brasileiro, onde a oferta de produtos BIPV é ainda limitada. O Bloco C é apresentado como um projeto inovador de arquitetura solar, superando desafios desde a concepção de projeto até as fases de construção e de manutenção. São discutidos desafios específicos enfrentados durante a construção do Bloco C, em que o tratamento da estanqueidade e a adequação das estruturas de fixação dos módulos FV na cobertura do prédio exigiram soluções sob medida (juntas em borracha e poliuretano, reforços estruturais e fabricação de módulos e de condutores de água especiais) e geraram atrasos durante a construção. A busca por empresas especializadas ambas em construção e em energia solar, mostra-se essencial para orientar futuros projetos e impulsionar a evolução da tecnologia de aplicação da energia solar em edificações do mercado brasileiro. No encerramento, o artigo ressalta preocupações futuras, como limpeza e manutenção extensiva dos módulos FV e destaca a necessidade contínua de inovação para facilitar a integração bem-sucedida de sistemas FV em edificações no país. O trabalho do Laboratório Fotovoltaica/UFSC é apresentado como um catalisador para a transformação do setor, incentivando uma abordagem mais abrangente e eficiente na implementação de projetos BIPV no Brasil.

Palavras-chave: Arquitetura Solar, BIPV, Construção civil

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica (FV) é dita renovável porque, em comparação a combustíveis fósseis, os efeitos negativos de poluição sonora e atmosférica são reduzidos. O Brasil possui condições ideais de radiação solar durante o ano inteiro para geração de energia elétrica. A média anual de irradiação global horizontal é bastante homogênea em todo o território do país, com o valor máximo de 6,25 kWh/m².dia em pontos específicos do sertão nordestino (Pereira *et al.*, 2017). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil atingiu 35 GWp de capacidade instalada em sistemas FV em novembro de 2023, sendo 70% deste valor em sistemas de geração distribuída (ANEEL, 2023). A fonte solar FV é responsável por quase 99% de toda a geração distribuída no país, com 24 GWp de capacidade instalada (ANEEL, 2023; EPE, 2023). Além do incentivo proporcionado pela ação regulatória da ANEEL REN 1000/2021 e pela Lei nº 14300/2022 (ANEEL, 2021; BRASIL, 2022), essa alta contribuição se deve às possibilidades construtivas de integração da energia solar em edificações, ou seja, onde a geração e o consumo ocorrem no mesmo local e com otimização do uso do espaço. Além disso, o constante aperfeiçoamento da eficiência da tecnologia FV (ISE, 2023) e a redução de preço dos componentes dos sistemas FV no país (GREENER, 2023) também contribuem para um crescimento de edificações com módulos FV em suas superfícies.

A integração de módulos FV em edificações se mostra como uma estratégia ativa de produção de energia solar que pode acontecer por meio de duas abordagens. Na primeira, conhecida como BAPV (*Building-Applied Photovoltaics*), os módulos são instalados com orientações e inclinações que podem ou não ser diferentes dos planos já existentes nas edificações. É a aplicação dos módulos FV sobre edificações existentes e/ou sem projeto de integração arquitetônica. Na outra abordagem, denominada BIPV (*Building-Integrated Photovoltaics*) ou arquitetura solar, os módulos seguem o desenho arquitetônico da edificação e podem atuar como substitutos de materiais convencionais da construção civil. O BIPV permite a adoção de módulos FV como elementos de sombreamento (brises), de revestimento, de vedação e até de proteção, como parapeitos. Simultaneamente à diminuição de gastos decorrente da substituição de materiais tradicionais na construção civil, é crucial considerar a incorporação de módulos FV com o objetivo de alcançar um desempenho adequado dentro de parâmetros de conforto (térmico, lumínico e acústico), eficiência energética e, também garantindo aspectos de segurança, estanqueidade, durabilidade e facilidade de manutenção. Portanto, quando utilizados em edificações, os módulos assumem qualidades construtivas, funcionais e estéticas da forma arquitetônica. Além disso, o BIPV, do ponto de vista arquitetônico e construtivo, permite a criação de novos conceitos estéticos.

Na realidade europeia, planos para reestruturar o setor de construção foram delineados pela *Energy Performance of Buildings Directive*, visando a implementação de edifícios de energia zero, conhecidos como *Zero Energy Buildings* (ZEBs) (The European Parliament and the Council of the European Union, 2018). A adoção de geradores FV é crucial para atingir a meta de neutralizar o consumo de energia proveniente da rede elétrica pública (Scognamiglio e Garde, 2016). Assim, é inegável que a capacidade global acumulada de sistemas FV integrados em edificações tem experimentado um aumento significativo. Em 2018, aproximadamente 2% da capacidade FV global acumulada correspondia a BIPVs (Becquerel Institute, 2019), o que equivale a cerca de 9,7 GW (IRENA, 2021), sendo que 6,7 GW estão concentrados exclusivamente na região europeia (SUPSI e Becquerel Institute, 2020).

Ainda no contexto europeu, as primeiras soluções de geração FV em edificações surgiram na década de 1970. Atualmente, já é possível visualizar integrações em edificações das mais variadas maneiras, desde instalações em telhados e fachadas com módulos convencionais, até instalações com módulos em diferentes formatos, texturas e cores, até imitando materiais construtivos convencionais. Até mesmo a restauração de edificações antigas já conta com a integração de módulos FV, seguindo diretrizes de conservação da arquitetura. A literatura internacional inclusive conta com diversos estudos sobre as influências dos sistemas FV no ambiente construído, demonstrando diferentes abordagens para descrever e/ou avaliar a qualidade da integração desses sistemas em relação aos aspectos estéticos, técnicos e construtivos (Hagemann, 1996; IEA PVPS, 1997; Schoen *et al.*, 2000; Kaan e Reijenga, 2004; Hagemann, 2004; Bahaj, James e Jentsch, 2007; Scognamiglio e Privato, 2008; Torres-Sibille *et al.*, 2009; Kosoric, Wittkopf, Huang, 2011; Munari Probst e Roecker, 2011; Peng, Huang e Wu, 2011; De Berardinis e Bonomo, 2012; IEA SHC, 2012; Scognamiglio e Røstvik, 2012; Bonomo, De Berardinis e Frontini, 2013; Cronemberger *et al.*, 2014; Polo Lopez *et al.*, 2014; Florio, Roecker e Munari Probst, 2015; Munari Probst e Roecker, 2015; Xu e Wittkopf, 2015; Scognamiglio, 2016; Scognamiglio e Garde, 2016; Xu, Wittkopf e Roeske, 2017; Becker *et al.*, 2018; IEA SHC, 2018; Sánchez-Pantoja, Vidal e Pastor, 2018; Lobaccaro *et al.*, 2019; Munari Probst e Roecker, 2019; Celadyn e Filipek, 2020; Devetaković *et al.*, 2020; Tablada *et al.*, 2020; Scognamiglio, 2021).

Apesar de todas as vantagens dos BIPVs, a grande quantidade de instalações junto ao ambiente construído no Brasil ainda é de BAPVs. No contexto brasileiro, as implementações de BIPVs ainda suscitam dúvidas acerca de sua eficácia. Pela baixa demanda, o mercado de arquitetura solar é ainda bastante primitivo quanto à disponibilidade de produtos BIPV, como perfis de fixação dos módulos FV específicos para edificações e módulos FV flexíveis, semitransparentes e com diferentes cores e texturas, até imitando materiais construtivos convencionais. Para impulsionar a arquitetura solar no país, é necessário que haja uma transformação de paradigmas do setor de energia solar, instigando os profissionais a compreenderem que o módulo FV desempenha um papel multifuncional quando integrado a edificações. Em outras palavras, é fundamental explorar de maneira mais aprofundada questões como as perdas de geração causadas por sombreamento e as integrações com orientação e inclinação que podem não ser ideais para a produção de energia. Afinal, isso se justifica diante das diversas utilidades que o módulo FV oferece em termos funcionais e estéticos no âmbito da construção civil.

Com o intuito de demonstrar as possibilidades e vantagens da arquitetura solar no Brasil e auxiliar nessa mudança de paradigmas para impulsionar o mercado de BIPVs, o Laboratório Fotovoltaica/UFSC vem investindo em estudos e aplicações de arquitetura solar no país. Em 1997 o Laboratório instalou o primeiro gerador FV conectado à rede elétrica pública no país, que permanece em atividade após 26 anos de operação contínua, confirmando a resistência e confiabilidade dessa tecnologia. Desde então seus pesquisadores têm estudado e aplicado a tecnologia FV em edificações através da integração em construções novas e em *retrofits*. Inclusive a sede do Laboratório, localizada no Sapiens Parque (parque de inovação tecnológica controlado pelo Governo do Estado de Santa Catarina), na cidade de Florianópolis/SC (48° N, 27° S), possui três prédios principais: os dois primeiros prédios (Blocos A e B) foram inaugurados em 2015 e possuem integrações do tipo BAPV e o terceiro prédio (Bloco C), inaugurado em 2023, possui integrações do tipo BIPV. Como o Bloco C foi um projeto pioneiro no país em termos de integração FV, muitos desafios foram enfrentados nas fases de projeto e de construção do prédio.

O objetivo deste artigo é diagnosticar os desafios encontrados nas fases de projeto e de construção do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC e discutir sobre como esses desafios podem ser solucionados para que futuras edificações solares sejam projetadas e construídas de maneira mais eficiente. O compartilhamento desses desafios com o setor de energia solar é de extrema importância para que novos projetos de arquitetura solar busquem soluções já em suas fases iniciais, evitando passar pelas mesmas dificuldades encontradas neste projeto pioneiro. Desta maneira, é também possível direcionar o crescimento do mercado e a capacitação de profissionais com base nas demandas corretas para impulsionar a utilização de módulos FV como materiais construtivos no país. A ideia é auxiliar na mudança de paradigmas no setor de energia solar no Brasil e impulsionar o número de edificações com integração de energia solar no Brasil. A segunda seção deste artigo apresenta a metodologia, a terceira seção apresenta os resultados e, por fim, a quarta seção apresenta a conclusão.

2. ESTUDO DE CASO

O Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, objeto de estudo deste artigo, fica localizado na cidade de Florianópolis/SC (48° N, 27° S). O prédio surgiu da necessidade de expansão do Laboratório, dentro do projeto de P&D “Produção de hidrogênio verde para aplicações produtivas, mobilidade elétrica e descarbonização da Amazônia”. É um projeto de pesquisa firmado entre o Laboratório Fotovoltaica/UFSC, a Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU) e a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) – empresa do governo alemão voltada ao desenvolvimento sustentável em cooperações internacionais. O prédio foi financiado pela GIZ através do projeto mencionado, mas também pela BYD Energy do Brasil através do projeto de P&D “Um revestimento, múltiplas funções: Análise de desempenho e degradação de células fotovoltaicas encapsuladas e interconectadas em série integradas à edificação civil (BIPV)” e pela SHELL Brasil através do projeto de P&D “Melhoria da eficiência energética solar”.

O Bloco C foi concebido como um equipamento, funcionando como um instrumento de pesquisa e demonstração das aplicações e operações da tecnologia solar FV. Nesse contexto, a abordagem arquitetônica fundamenta-se na ideia de enxergar o edifício como uma espécie de máquina, onde todas as instalações são expostas, proporcionando uma visão clara de seu funcionamento. Os sistemas integrados à estrutura seguem o conceito arquitetônico de “FV por toda a parte”, sendo visíveis em todos os espaços do prédio. A disposição das integrações FV não é determinada apenas pelo desempenho energético, mas também pelas funções construtivas e pela influência estética da integração entre esses sistemas e a arquitetura. Além disso, o projeto arquitetônico incorpora medidas sustentáveis e de eficiência energética, como um sistema para coleta e reutilização de água pluvial, espaços com vistas internas e externas, pé-direito alto e duplo para facilitar a circulação de ar por meio de ventilação natural e maximizar o aproveitamento da iluminação natural. Outros elementos incluem o uso de iluminação zenital, lâmpadas de LED, e a adoção de uma linguagem arquitetônica local, juntamente com materiais regionais para minimizar custos. Assim sendo, o Bloco C opera de maneira autossuficiente na produção de hidrogênio verde (H₂V), obtendo toda a energia limpa necessária das coberturas e fachadas FV, enquanto a água da chuva é captada e armazenada em cisternas para reutilização. A Fig. 1 apresenta fotos aéreas do prédio e indica os seus sistemas FV.

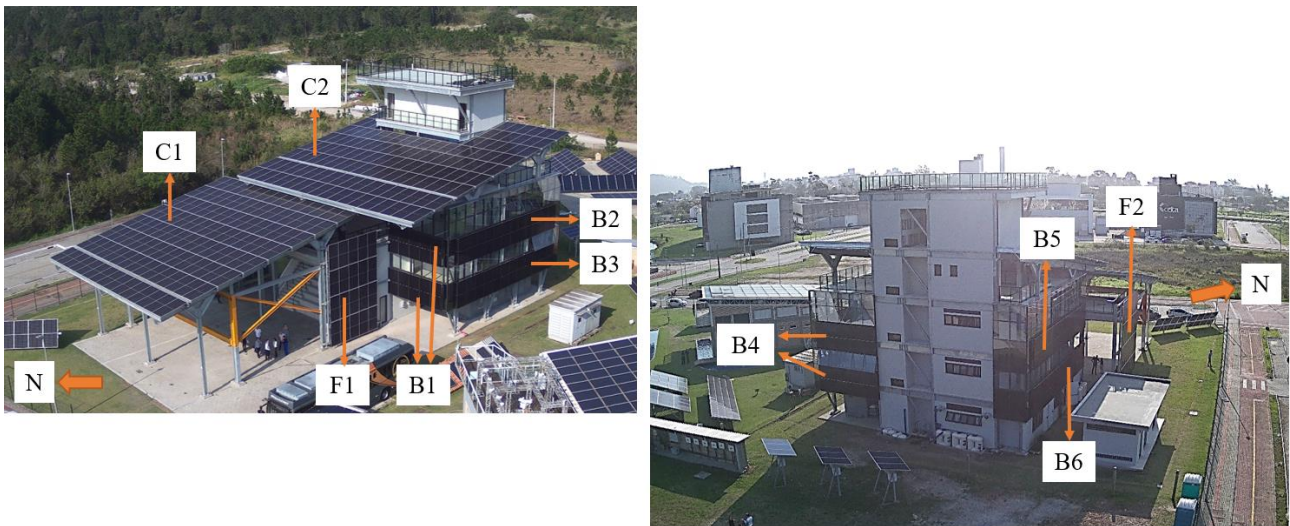


Figura 1 – Fotos aéreas do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC e indicação de seus sistemas FV.

Os sistemas FV não apenas produzem eletricidade, mas também desempenham um papel fundamental no conforto ambiental da edificação. As coberturas, identificadas como C1 e C2, consistem em módulos *single-glass* de silício monocristalino (mono-Si) com *backsheet* transparente e moldura. Além de atuarem como geradores de energia, esses módulos também funcionam como vedação estanque para as coberturas, causando sombreamento sobre as lajes de concreto. Esse sombreamento contribui para a redução da radiação incidente sobre as lajes, resultando na diminuição do consumo de ar-condicionado na edificação. As fachadas, identificadas como F1 e F2, são compostas por módulos *double-glass* mono-Si com moldura, que, além de gerar energia, parcialmente vedam o auditório semiaberto, oferecendo proteção contra intempéries e sombreamento para melhorar os confortos térmico, lumínico e visual do espaço. Os brises, identificados como B1 a B6, consistem em módulos *double-glass* mono-Si, sem moldura, instalados sobre a fachada *glazing* de vidro. Além de funcionarem como geradores de energia, esses módulos proporcionam sombreamento estratégico dentro da edificação, contribuindo para os confortos térmico, lumínico e visual nos ambientes internos e reduzindo a necessidade de ar-condicionado e iluminação artificial.

Os módulos FV nas coberturas são instalados em posição retrato e encaixados em perfis metálicos H, que também servem como calhas para captação de água da chuva. Essas calhas direcionam a água captada para cisternas, permitindo seu reuso no prédio. A vedação entre as arestas laterais dos módulos é garantida por perfis de borracha e cola de silicone, assegurando a estanqueidade das coberturas. Nas fachadas, os módulos FV são fixados em cantoneiras metálicas, parafusadas nos pilares metálicos I da edificação. Não há vedação entre os módulos, tornando essa fachada não estanque.

Para os módulos nos brises, frames metálicos são colados na parte de trás dos módulos, mantendo o aspecto *double-glass* do material. Esses frames são parafusados em uma peça metálica, garantindo um afastamento de 20 cm dos módulos em relação à fachada *glazing* de vidro, permitindo ventilação adequada e assegurando a eficiência do sistema FV. Essa peça metálica é então parafusada no perfil da esquadria do *glazing* para fixar os brises na edificação. A Fig. 2 apresenta fotos dos sistemas de fixação dos sistemas FV do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

Nas coberturas, os inversores *string* foram utilizados para dividir os módulos, minimizando as perdas por sombreamento. O sombreamento no sistema C1 é causado pela cobertura C2, enquanto o sistema C2 é sombreado pela torre de serviços e caixa d'água da edificação. As fachadas possuem inversores distintos para cada orientação, reduzindo as perdas devido à orientação não ideal dos sistemas. Tanto os sistemas de fachadas (F1 e F2) quanto os de brises (B1-B6) enfrentam perdas por sombreamento causadas pela própria edificação e elementos do entorno. Até o momento, não há dados de geração dos sistemas FV do Bloco C, no entanto, a Tab. 1 apresenta informações técnicas dos sistemas FV, revelando que nenhum deles está posicionado idealmente para a geração de energia na cidade de Florianópolis/SC, onde a orientação e inclinação ótimas seriam Norte e 27°, respectivamente.



Figura 2 – Fixação dos sistemas de cobertura C1 e C2 (superior esquerda), de fachadas F1 e F2 (superior direita) e de brises B1-B6 (inferior) do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

Tabela 1 – Características dos sistemas FV do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

| SISTEMA | C1 | C2 | F1 | F2 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| MORFOLOGIA | Cobertura | | Fachada | | Brise | | | | | |
| POTÊNCIA INSTALADA (kW _p) | 63,90 | 69,72 | 9,10 | 10,92 | 4,20 | 6,36 | 6,36 | 4,77 | 6,42 | 6,36 |
| NÚMERO DE INVERSORES | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| POTÊNCIA DO INVERSOR (kW) | 75 | 75 | 12 | 12 | 3 | 12 | 12 | 3 | 12 | 12 |
| ORIENTAÇÃO / INCLINAÇÃO | 40° O / 10° | 40° O / 10° | 130° O / 90° | 50° L / 90° | 40° O / 90° | 130° O / 90° | 130° O / 90° | 140° L / 90° | 50° L / 90° | 50° L / 90° |

3. DESAFIOS E SOLUÇÕES DE PROJETO E CONSTRUÇÃO DO ESTUDO DE CASO

3.1 Projeto

O desenvolvimento do projeto para a integração de módulos FV no contexto da construção do Bloco C envolveu uma análise abrangente de perspectivas técnicas, financeiras e organizacionais. Foi conduzido um processo seletivo para escolher profissionais qualificados, incluindo arquitetos, engenheiros civis e engenheiros eletricitas. Essa equipe assumiu a responsabilidade pela definição dos custos e das especificações técnicas do projeto, garantindo que atendesse aos requisitos de desempenho da edificação.

Vale ressaltar que, no início do projeto, todos os especialistas escolhidos já contavam com pelo menos dois anos de experiência em atividades ligadas à energia solar, envolvendo o planejamento, implementação e manutenção de infraestruturas fotovoltaicas.

O Bloco C foi concebido de forma a cobrir toda a estrutura com módulos FV, buscando otimizar a eficiência energética e substituir adequadamente elementos construtivos convencionais, respeitando critérios construtivos, funcionais e estéticos. Dado o caráter pioneiro do projeto no Brasil, mesmo com uma equipe experiente em construção civil e em energia solar, diversos desafios foram enfrentados durante a fase de concepção do projeto.

O primeiro obstáculo foi a modelagem dos sistemas FV no Revit, um software BIM utilizado para projetar, construir e gerenciar edifícios. Dado que os módulos FV não são convencionalmente considerados materiais construtivos, não existem blocos específicos para esses componentes no Revit. A solução foi criar uma família tratando o módulo FV como um equipamento elétrico. Contudo, essa abordagem não permitiu a consideração de todas as características construtivas e elétricas dos módulos, sendo recomendável investir na criação de famílias especializadas no Revit para projetos futuros.

Outro desafio envolveu a garantia da estanqueidade e captação de água de chuva pelas coberturas FV. Os módulos foram instalados em posição retrato, e para vedação entre módulos nas arestas mais longas, foi utilizado um perfil de borracha com silicone líquido. Nas arestas mais curtas, um sistema de calhas foi criado, não apenas capturando água da chuva, mas também servindo como perfil de fixação na estrutura da cobertura, direcionando a água para calhas maiores, abastecendo a cisterna de água pluvial. A Fig. 3 mostra o sistema de estanqueidade das coberturas FV.



Figura 3 – Sistema de vedação estanque das coberturas FV C1 e C2 do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

A obtenção de informações sobre o desempenho do módulo FV como parede foi desafiadora, tanto em termos de transferência de calor e som, quanto em resistência mecânica e segurança contra incêndios. Na concepção original do

projeto arquitetônico havia uma solução de fachada FV estanque que precisou ser abolida devido a essas questões sobre a utilização do módulo FV como material de vedação em edificações. Assim, foram criadas apenas fachadas não estanque, com o intuito de responder a algumas dessas perguntas futuramente através de trabalhos de pesquisa em cima dessa edificação equipamento.

Por fim, a definição do sistema de fixação dos brises FV também representou um desafio, devido à pouca variedade de soluções para fixação de módulos FV em fachadas disponíveis no mercado. Uma parceria com uma empresa de esquadrias e perfis de alumínio resultou na criação de um sistema de fixação, agora disponível no mercado.

3.2 Construção

A equipe do Fotovoltaica/UFSC envolvida com a gestão da construção do Bloco C foi dividida em: gestão administrativa, supervisão da construção, supervisão dos projetos executivos e gestão de contratações. Foi importante em todo o processo que os integrantes da equipe estivessem familiarizados com a concepção do projeto, para que durante as etapas de gerenciamento da construção a equipe pudesse encontrar maneiras de contornar impeditivos técnicos, esperados em virtude do grau de complexidade da obra e das poucas alternativas de integração de tecnologias FV disponíveis no mercado brasileiro. Devido à inexistência de regulamentações e de variedade suficiente de técnicas construtivas em BIPV no mercado brasileiro, a equipe do Laboratório Fotovoltaica/UFSC encontrou diversas dificuldades de adequação das estruturas FV à edificação no momento da construção.

O processo de contratações foi estruturado de forma que a aprovação de cada solicitação, previamente determinada e formalizada pela equipe do laboratório, ocorresse por intermédio da GIZ (avaliação técnica) e da FAPEU (avaliação de mercado). O cronograma de gerenciamento da construção do Bloco C pautou-se, então, na elaboração dos documentos técnicos necessários para contratação dos serviços especificados em projetos executivos, na contratação dos serviços e na execução e supervisão da construção.

Dessa maneira, o sistema FV foi integrado ao cronograma de execução do Bloco C, de forma a respeitar a construção não somente da elevação da estrutura metálica das coberturas do prédio como também dos perfis de fixação das fachadas e dos brises para complemento dos *glazings*. Assim como foram previstas ainda em fase de projeto, houve dificuldades de encontrar soluções e empresas especializadas nos serviços de fixação dos módulos à edificação, tão como de integração de sistemas de calhas para reaproveitamento das águas de chuva, o que mostrou essencial a presença da equipe do Laboratório Fotovoltaica/UFSC no controle do processo de integração, já que algumas das equipes envolvidas na construção não tinham experiência prévia com energia solar.

Foi necessário, então, o acompanhamento de todas as etapas de instalação dos sistemas FV, devido aos cuidados com a movimentação e com o armazenamento dos módulos FV. Como são muito frágeis, encurvamentos ou choques causados durante o transporte e a fixação poderiam comprometer seu funcionamento, o que seria um custo adicional de tempo e de recursos financeiros para reposição do material, podendo paralisar a obra em andamento – lembrando que, no cenário do BIPV, a instalação dos módulos é tida como elemento sequencial na construção, e problemas em fase de execução do sistema FV podem também ocasionar atrasos ao restante das instalações prediais e de eventuais vedações e acabamentos previstos à edificação.

Por outro lado, o sistema FV também pode ser um elemento limitante. Durante a construção do Bloco C, uma das vigas da cobertura apresentou deflexão excessiva que impossibilitou a instalação dos módulos FV, fato identificado durante a etapa de instalação dos perfis de fixação sobre a estrutura metálica. Na existência de pequenos defeitos ou deformações nas estruturas de fixação, os módulos FV não devem ser instalados (diferente de outros materiais mais convencionais de vedação que não sofrem com essa questão), pois possuem limitações de resistência mecânica devido à fragilidade das células FV, que podem sofrer microfissuras e perder eficiência. Isso veio a desencadear atrasos na obra, até que a estrutura fosse reforçada.

Adicionalmente, mesmo que a estrutura das calhas pluviais estivesse previamente planejada, o projeto específico para a captação de águas pluviais, direcionando a água dos módulos FV para as cisternas do edifício, ainda não havia sido elaborado. Isso ocorreu devido à incompatibilidade do sistema de calhas com as soluções convencionalmente disponíveis no mercado, uma vez que a distância entre as calhas de fixação dos módulos era significativamente ampla. A nova instalação teve que ser concebida para consolidar a água proveniente dessas pequenas calhas em um único ponto, as cisternas. Ao longo da fase de contratações, a equipe do Fotovoltaica/UFSC contactou diversas empresas, dado que se tornou imperativo buscar soluções de fixação para o sistema de abastecimento pluvial e condutores que se adequassem à peculiaridade do cenário do Bloco C, onde os módulos FV desempenham o papel de vedação das coberturas. No desfecho desse processo, uma empresa aceitou o desafio e desenvolveu um projeto exclusivo de calhas para o prédio. Foram emendados perfis metálicos sob medida para a construção dos condutores, assim como vedações em borracha e poliuretano entre os módulos FV. Logo, foram definidos dois sistemas de condutores horizontais, fixados na viga inferior de cada cobertura, que recebem a água proveniente das estruturas de fixação dos módulos FV e que estão direcionados à fachada leste do prédio, no sentido das cisternas; o condutor horizontal da cobertura superior leva a água às cisternas, enquanto na cobertura inferior a água é direcionada à rede pluvial do terreno.

As dificuldades encontradas pela equipe do laboratório responsável pela execução da obra, influenciaram a obra do ponto de vista construtivo: o processo de encontrar empresas especializadas em construção juntamente com energia solar, a escolha das melhores alternativas de implantação dos projetos, o tempo de execução, e o impacto nos preços dos serviços devido à complexidade da obra mostraram que é necessário treinar e capacitar empresas de diferentes especialidades necessárias nas construções na integração de sistemas FV.

Por fim, houve um desafio causado por um erro de implantação da estrutura metálica do prédio. Como a estrutura havia sido toda modulada em projeto de acordo com as dimensões dos módulos FV, ao implantá-la erroneamente em relação às paredes de vedação, não foi possível instalar o número de módulos previsto em projeto para vedação da cobertura, já que agora as dimensões da estrutura não batiam com as dos módulos FV. Neste caso, para manter a estética da tecnologia FV por toda a cobertura, foram fabricados módulos FV com medidas personalizadas para fechar totalmente a área de cobertura prevista.

3.3 Manutenção

A gestão da limpeza e manutenção, especialmente nos sistemas de cobertura, representará um desafio significativo no futuro. No que diz respeito à limpeza, ainda não foi concebida uma alternativa viável para a vasta extensão dos módulos FV, os quais não podem ser acessados para limpeza manual. A única solução até o momento são robôs automatizados desenvolvidos especificamente para essa tarefa.

Além disso, a manutenção dos módulos nas coberturas apresenta outro desafio. Os módulos FV são encaixados nas calhas metálicas para fixação e vedados com perfis de borracha e silicone líquido. A remoção de um módulo do centro do sistema exige que todos os módulos da mesma fileira tenham suas vedações desfeitas e sejam retirados da cobertura até alcançar o módulo desejado. Nesse sentido, torna-se imperativo desenvolver soluções mais práticas para fixação e vedação, a fim de facilitar a manutenção e viabilizar a remoção dos módulos com maior eficiência.

Paralelamente, é crucial realizar uma investigação sobre as influências do movimento das estruturas, especialmente os impactos de eventos climáticos como chuvas, ventos fortes e granizo, nos módulos FV. Isso permitirá estabelecer quando será tecnicamente necessário e economicamente viável realizar manutenção, considerando as dificuldades de acesso associadas a esses eventos.

4. CONCLUSÃO

A presente pesquisa evidenciou a ascensão significativa da energia solar FV no Brasil, destacando seu papel preponderante na matriz energética, com 35 GWp de capacidade instalada em novembro de 2023. A adoção expressiva da geração distribuída, impulsionada por regulamentações como a ANEEL REN 1000/2021 e a Lei nº 14300/2022, reflete não apenas incentivos regulatórios, mas também a viabilidade proporcionada pelas construções com integração de módulos FV.

Os incentivos fiscais da ANEEL deveriam servir como um estímulo para crescimento da tecnologia FV no mercado brasileiro, especialmente porque os módulos FV vêm apresentando-se cada vez mais acessíveis. No entanto, o BIPV não depende apenas dos incentivos fiscais: o mercado carece de soluções para integração dos módulos no envelope das edificações, tanto do ponto de vista da fixação estrutural quanto da comunicação com outras instalações construtivas, e carece também de profissionais da construção civil capacitados para lidar com tais necessidades.

A arquitetura solar, em particular as abordagens BAPV e BIPV, emerge como uma estratégia fundamental para a produção eficiente de energia. No entanto, no contexto brasileiro, o predomínio das instalações BAPV revela desafios e lacunas no mercado de BIPV. A superação desses obstáculos exige uma mudança de paradigmas, incentivando profissionais do setor a compreenderem a multifuncionalidade dos módulos FV quando integrados a edificações.

O estudo de caso do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC destaca a importância de compartilhar desafios enfrentados nas fases de projeto e construção. Desde obstáculos na modelagem em softwares BIM até questões de estanqueidade e captação de água pluvial, a experiência desse projeto pioneiro serve como base para orientar futuras iniciativas de arquitetura solar no país.

Os desafios encontrados, desde a concepção até a execução do Bloco C, revelam a necessidade de capacitação de profissionais e empresas, além de reforçar a importância do acompanhamento detalhado durante a instalação dos sistemas FV. Os módulos FV no BIPV são elementos construtivos e devem ser inseridos no planejamento de obra de maneira integrada à execução, em que os procedimentos técnicos sejam precisamente ordenados para evitar atrasos e garantir a eficiência operacional.

Diante do cenário brasileiro, onde as instalações BAPV ainda predominam, a pesquisa destaca a relevância de explorar a fundo questões como sombreamento, e inclinação e orientação não ideais, garantindo que o potencial dos módulos FV seja plenamente aproveitado em termos funcionais e estéticos.

Em conclusão, a arquitetura solar no Brasil representa um campo promissor, mas demanda esforços coordenados para superar desafios técnicos, regulatórios e de mercado. O compartilhamento de experiências, como a do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, é crucial para orientar o crescimento sustentável desse setor e impulsionar a transição para edificações mais eficientes e sustentáveis.

Agradecimentos

Esta publicação foi possibilitada pelo projeto em parceria da UFSC com o projeto H2Brasil. O projeto H2Brasil integra a Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável e é implementado pela *Deutsche Gesellschaft*

für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e financiado pelo Ministério Federal da Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha. Os autores também agradecem a BYD Energy do Brasil e a SHELL Brasil pelo financiamento da edificação utilizada como estudo de caso deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2021. Resolução Homologatória nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021.
- ANEEL, 2023. SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL. URL <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>.
- Bahaj, A. S.; James, P. A. B.; Jentsch, M. F. Photovoltaics: added value of architectural integration. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, [S. l.], v. 160, n. 2, p. 59–69, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/ener.2007.160.2.59>
- Becker, G. *et al.* High Quality Solutions of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) – Results of the World Wide Competition in 2017. In: 2018, Brussels. 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Brussels: [s. n.], 2018. p. 1828–1832. Disponível em: <https://doi.org/10.4229/35thEUPVSEC20182018-6BV.1.42>
- Becquerel Institute. BIPV market and stakeholder analysis 2019. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://bipvboost.eu/public-reports/>>.
- Bonomo, P.; DE BERARDINIS, P.; FRONTINI, F. Analysis of BIPV case-studies through a multicriteria evaluation tool. In: 2013, Paris, France. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Paris, France: [s. n.], 2013. p. 4373–4379. Disponível em: <https://doi.org/10.4229/28thEUPVSEC2013-5CV.7.12>
- Brasil. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2022.
- Celadyn, W.; Filipek, P. Investigation of the Effective Use of Photovoltaic Modules in Architecture. Buildings, [S. l.], v. 10, n. 145, p. 20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings10090145>
- Cronemberger, J. *et al.* BIPV technology application: Highlighting advances, tendencies and solutions through Solar Decathlon Europe houses. Energy and Buildings, [S. l.], v. 83, p. 44–56, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.079>
- De Berardinis, P.; Bonomo, P. Towards a system for evaluation of the project of PV integration in buildings. BIPV.tool. In: 2012, Frankfurt, Germany. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Frankfurt, Germany: [s. n.], 2012. p. 4183–4187. Disponível em: <https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012-5BV.1.5>
- Devetaković, M. *et al.* Photovoltaics on landmark buildings with distinctive geometries. Applied Sciences, [S. l.], v. 10, n. 19, p. 22, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10196696>
- EPE, 2023. Balanço Energético Nacional 2023: Relatório síntese, ano base 2022.
- Florio, P.; Roecker, C.; MUNARI PROBST, M. C. Urban acceptability of solar installations: LESO-QSV GRID, a software tool to support municipalities. In: 2015, Lausanne, Switzerland. CISBAT 2015 International Conference “Future Buildings and Districts - Sustainability from Nano to Urban Scale”. Lausanne, Switzerland: [s. n.], 2015. p. 981–986. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2017.0728>
- GREENER, 2023. Estudo Estratégico: Geração Distribuída 2023 | Dados do 1º semestre 2023 / Setembro 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-setembro-2023-dados-do-1o-semester-2023/>
- Hagemann, I. Architectural considerations for building-integrated photovoltaics. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, [S. l.], v. 4, p. 247–258, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(199607/08\)4:4<247::AIDPIP135>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(199607/08)4:4<247::AIDPIP135>3.0.CO;2-E)
- Hagemann, I. Examples of successful architectural integration of PV: Germany. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 461–470, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.561>
<https://doi.org/10.1080/00038628.2011.590052>
- IEA PVPS. Task 7 - Photovoltaic power systems in the built environment. [S. l.: s.n.].
- IEA SHC. Task 41 A.2 - Solar Energy Systems in Architecture: integration criteria and guidelines. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://task41.ieashc.org/Data/Sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture28March2013.pdf>.
- IEA SHC. Task 51 C.3 - Lessons Learnt from Case Studies of Solar Energy in Urban Planning. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.18777/ieashc-task51-2018-0003>.
- IRENA. Renewable Energy Statistics 2022. Abu Dhabi: [s.n.]. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf?rev=460f190dea15442eba8373d9625341ae>.
- ISE, 2023. Photovoltaics Report.
- Kaan, H.; Reijenga, T. Photovoltaics in an architectural context. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 395–408, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.554>

- Kosoric, V.; Wittkopf, S.; Huang, Y. Testing a design methodology for building integration of photovoltaics (PV) using a PV demonstration site in Singapore. *Architectural Science Review*, [S. l.], v. 54, n. 3, p. 192–205, 2011. Disponível em:
- Lobaccaro, G. *et al.* A cross-country perspective on solar energy in urban planning: Lessons learned from international case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 108, p. 209–237, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.041>
- Munari Probst, M. C.; Roecker, C. Criteria and policies to master the visual impact of solar systems in urban environments: The LESO-QSV method. *Solar Energy*, [S. l.], v. 184, n. September 2018, p. 672–687, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.031>
- Munari Probst, M. C.; Roecker, C. Solar Energy Promotion & Urban Context Protection: Leso-QSV (Quality-Site-Visibility) Method. In: 2015, Bologna, Italy. *Plea 2015: Architecture in (R)evolution*. Bologna, Italy: [s. n.], 2015.
- Munari Probst, M. C.; Roecker, C. Urban acceptability of building integrated solar systems: LESO-QSV approach. In: 2011, Kassel, Germany. *30th ISES Biennial Solar World Congress 2011, SWC 2011*. Kassel, Germany: [s. n.], 2011. p. 4359–4367. Disponível em: <https://doi.org/10.18086/swc.2011.27.10>
- Peng, C.; Huang, Y.; Wu, Z. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. *Energy and Buildings*, [S. l.], v. 43, n. 12, p. 3592–3598, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.032>
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.J.L., Rütther, R., Abreu, S.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., Souza, J.G. de, 2017. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos - Brasil.
- Polo Lopez, C. *et al.* PV and façade systems for the building skin. Analysis of design effectiveness and technological features. In: 2014, Amsterdam, Netherlands. *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Amsterdam, Netherlands: [s. n.], 2014. p. 3613–3618. Disponível em: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20142014-6DO.7.3>
- Sánchez-Pantoja, N.; Vidal, R.; Pastor, M. C. Aesthetic perception of photovoltaic integration within new proposals for ecological architecture. *Sustainable Cities and Society*, [S. l.], v. 39, p. 203–214, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.027>
- Schoen, T. *et al.* Status Report of Task 7 of the EIA PV Power Systems Program. In: 2000, Glasgow. *18th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Glasgow: [s. n.], 2000. p. 1–4.
- Scognamiglio, A. “Photovoltaic landscapes”: Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 55, p. 629–661, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.072>
- Scognamiglio, A. A trans-disciplinary vocabulary for assessing the visual performance of BIPV. *Sustainability*, [S. l.], v. 13, n. 10, p. 38, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13105500>
- Scognamiglio, A., Garde, F. (2016). Photovoltaics’ architectural and landscape design options for Net Zero Energy Buildings, towards Net Zero Energy Communities: spatial features and outdoor thermal comfort related considerations. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 24, 477–495. <https://doi.org/10.1002/pip.2563>
- Scognamiglio, A.; Garde, F. Photovoltaics’ architectural and landscape design options for Net Zero Energy Buildings, towards Net Zero Energy Communities: spatial features and outdoor thermal comfort related considerations. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, [S. l.], v. 24, p. 477–495, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.2563>
- Scognamiglio, A.; Privato, C. Starting points for a new cultural vision of BIPV. In: 2008, Valencia, Spain. *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Valencia, Spain: [s. n.], 2008. p. 3222–3233. Disponível em: <https://doi.org/10.4229/23rdEUPVSEC2008-5BP.1.5>
- Scognamiglio, A.; Røstvik, H. N. Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, [S. l.], v. 21, n. 6, p. 1319–1336, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.2286>
- Supsi; Becquerel Institute. *Building Integrated Photovoltaics: A practical handbook for solar buildings’ stakeholders*. Status Report 2020. [s.l: s.n.].
- Tablada, A. *Et al.* Architectural quality of the productive façades integrating photovoltaic and vertical farming systems: Survey among experts in Singapore. *Frontiers of Architectural Research*, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 301–318, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.005>
- The European Parliament and the Council of the European Union. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32018L0844>>.
- Torres-Sibille, A. del C. *et al.* Aesthetic impact assessment of solar power plants: An objective and a subjective approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 986–999, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.012>
- Xu, R.; Wittkopf, S. Visual assessment of BIPV retrofit design proposals for selected historical buildings using the saliency map method. *Journal of Facade Design and Engineering*, [S. l.], v. 2, n. 3–4, p. 235–254, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3233/fde150022>
- Xu, R.; Wittkopf, S.; Roeske, C. Quantitative evaluation of BIPV visual impact in building retrofits using saliency models. *Energies*, [S. l.], v. 10, n. 5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10050668>

CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SOLAR BUILDING IN BRAZIL

Abstract. *The article addresses the implementation of photovoltaic (PV) solar energy systems in buildings, focusing on Building C of the Laboratório Fotovoltaica/UFSC, located in Florianópolis/SC, as it highlights the promising scenario of solar energy in Brazil, with an installed capacity of 35 GWp, mainly in distributed generation. The text emphasizes the efficiency and cost reduction of PV systems, encouraged by regulations such as ANEEL REN 1000/2021 and Law No. 14300/2022. The article underscores the complexity of implementing Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) compared to Building-Applied Photovoltaics (BAPV), especially in the Brazilian context, where the availability of BIPV products is still limited. Building C is presented as an innovative solar architecture project, overcoming challenges from the design phase to the construction phase and even maintenance. Specific challenges faced during the construction of Building C are discussed, in which the treatment of waterproofing and the adequacy of the PV modules' fixing structures on the building's roof required tailor-made solutions (rubber and polyurethane joints, structural reinforcements and manufacturing of modules and special water conductors) and generated delays during construction. The search for companies specialized in both construction and solar energy is essential to guide future projects and drive the evolution of solar energy application technology in buildings in the Brazilian market. In conclusion, the article highlights future concerns, such as extensive cleaning and maintenance of PV modules, and emphasizes the ongoing need for innovation to facilitate the successful integration of PV systems into buildings in the country. The work of the Laboratório Fotovoltaica/UFSC is presented as a catalyst for transforming the sector, encouraging a more comprehensive and efficient approach to implementing BIPV projects in Brazil.*

Keywords: *Solar Architecture, BIPV, Construction*