MULTIFUNCIONALIDADE, ESTÉTICA E BELEZA DE UMA EDIFICAÇÃO SOLAR AUTOSSUFICIENTE NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE E NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Isadora Pauli Custódio – isadora.custodio@posgrad.ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Ísis Portolan dos Santos
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Ricardo Rüther
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Resumo. *Este artigo aborda a integração de módulos solares fotovoltaicos (FV) em edificações como uma estratégia para gerar energia e compor a edificação de maneira funcional e estética. O conceito de Building Integrated Photovoltaics (BIPV) ou arquitetura solar é explorado, destacando a multifuncionalidade dos módulos FV. A multifuncionalidade é analisada em função de geração de eletricidade, de desempenho arquitetônico e da composição geométrica dos sistemas FV. A estética arquitetônica é avaliada com base nos princípios de ordem e composição formal, considerando ritmo, proporção, equilíbrio, variedade e unidade. O conflito entre ciência e arte, especialmente na junção da forma e da função, é discutido com base na estética kantiana. O estudo de caso concentra-se no Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, projetado como um laboratório vivo para demonstrar a aplicação da tecnologia FV em edificações. Os sistemas FV no Bloco C possuem diversas funções: gerar energia, servir como material construtivo, e contribuir para o conforto ambiental e para a estética. A metodologia de avaliação inclui duas matrizes: uma para analisar a função de geração de eletricidade e de desempenho arquitetônico, e outra para avaliar a composição geométrica da edificação. Embora os sistemas possuam perdas na geração de eletricidade principalmente por sombreamento e por não estarem idealmente posicionados, a multifuncionalidade e a estética arquitetônica compensam essas perdas. A análise estética revela que o Bloco C faz uso de todos os elementos de composição na busca da beleza arquitetônica, destacando a eficácia da integração dos sistemas FV na estética da edificação. O estudo propõe uma metodologia prática e objetiva para argumentar que as perdas na geração de eletricidade pela integração arquitetônica são compensadas pela multifunção e pela estética dos sistemas FV, contribuindo para uma mudança de paradigma no setor de energia solar no Brasil.*

Palavras-chave: *Arquitetura Solar, Multifuncionalidade, Estética*

1. INTRODUÇÃO

O movimento global em direção a um futuro livre de combustíveis fósseis exige a utilização da energia de maneira mais eficiente. Nas edificações, a eficiência energética pode ser atingida através do emprego de estratégias arquitetônicas para redução do consumo de energia elétrica. Neste contexto, a utilização de módulos fotovoltaicos (FV) se torna atrativa quando estes componentes são integrados de maneira multifuncional na arquitetura. No uso multifuncional, os elementos arquitetônicos cumprem duas funções ou mais, neste caso os módulos FV podem gerar energia (elemento de geração de eletricidade) e ao mesmo tempo compor o envelope da edificação (elemento de vedação/revestimento de fachadas ou coberturas), substituindo outros materiais ou componentes da construção civil e ainda atuando como elementos estreitamente relacionados à estética e beleza destes edifícios. Quando atuam como material construtivo, os módulos FV podem ter também uma terceira função se utilizados como estratégia passiva para redução do consumo energético da edificação. A busca por uma solução adequada para todas as funções requeridas do edifício, é papel do arquiteto (Mitchell, 2008). Essa aplicação da tecnologia FV, ou a integração de módulos FV em edificações, é conhecida como *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) ou arquitetura solar.

No contexto internacional, as primeiras soluções de geração FV em edificações surgiram na década de 1970, com o objetivo apenas de gerar energia. A primeira construção conhecida que considerou princípios estéticos na integração FV é a residência *Wohnanlage Richter*, localizada na Alemanha. É uma edificação construída em 1982 que utilizou a modularidade de seu envelope envidraçado para compor a integração FV. A partir da década de 2000 houve um aumento do interesse na utilização de módulos FV convencionais como elementos construtivos e da criação de Edifícios de Energia Zero (*Zero Energy Buildings* - ZEBs), onde a integração FV se fez de extrema importância. Em 2010 foi estabelecida para a União Europeia a primeira versão da *Energy Performance of Buildings Directive*, com o objetivo de incentivar a utilização de fontes renováveis para produção de energia em edificações. Também a partir de 2010 começaram a ser fabricados módulos FV com novos formatos, texturas e cores, até imitando materiais construtivos convencionais. Com o desenvolvimento da tecnologia FV, a partir de 2015 na Europa iniciaram-se estudos para viabilizar a integração FV na restauração de edificações antigas. Isso é de extrema importância para o contexto europeu, devido à necessidade de preservação das construções históricas e de uma transição e complementação energética ao mesmo tempo. Por fim, em

2022 foi instituída a Revisão da *Energy Performance of Buildings Directive*, onde todas as edificações novas deverão ser edifícios com emissões zero a partir de 2030, e as edificações existentes devem ser transformadas em edifícios de emissão zero até 2050 (The European Parliament and the Council of the European Union, 2018).

A capacidade instalada de BIPVs no mundo é difícil de ser quantificada, já que os dados de sistemas FV em edificações não são necessariamente contabilizados de maneira separada das usinas, e ainda a definição de BIPV se diferencia entre países. Estimou-se em 2018 que cerca de 2% da capacidade FV mundial correspondia a BIPVs (Becquerel Institute, 2019), ou seja, cerca de 9,7 GW (IRENA, 2022), sendo 6,7 GW apenas na Europa (SUPSI; Becquerel Institute, 2020). No Brasil, não há dados quantitativos de BIPVs, mas sabe-se que pouquíssimos são os exemplos de arquitetura solar no país. A grande quantidade de instalações junto ao ambiente construído ainda é de B*uilding Applied Photovotaics* (BAPV), ou seja, a aplicação dos módulos FV sobre edificações existentes e/ou sem projeto de integração arquitetônica.

O primeiro BIPV brasileiro conectado à rede elétrica pública foi construído em 1997 na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo Laboratório Fotovoltaica/UFSC. O sistema possui 2 kWp de potência instalada e continua em operação depois de 26 anos de funcionamento ininterrupto, atestando a robustez e confiabilidade desta tecnologia. O Laboratório desde então tem investido no desenvolvimento da aplicação da tecnologia FV em edificações através da integração em construções novas e em *retrofits*. Esses estudos foram em sua maioria realizados no campus principal da universidade e na sede do Laboratório, que fica afastada do campus principal. Os dois primeiros prédios da sede (Blocos A e B) foram inaugurados em 2015 e em 2023 foi inaugurado o terceiro prédio (Bloco C), todos com integração FV. Apesar de todo o esforço do Laboratório em demonstrar as vantagens da arquitetura solar, no Brasil as integrações FV em edificações são ainda muito questionadas quanto à sua eficiência. É necessária uma mudança de paradigmas do setor de energia solar no país, onde os profissionais devem buscar entender que na arquitetura solar o módulo FV é um componente multifuncional. Ou seja, questões como pequenas perdas de geração por sombreamento e integrações com orientação e inclinação não ideais para a geração de eletricidade devem ser mais exploradas, vistas as demais utilidades que o módulo FV possui em termos funcionais e estéticos na construção civil.

No contexto urgente da necessidade de redução das emissões de gás carbônico (CO_2), a arquitetura solar apresenta uma série de vantagens significativas. Isso inclui a redução das perdas de energia que ocorrem quando a eletricidade é transmitida de grandes centrais geradoras para edifícios, e a capacidade de se conectar diretamente à rede elétrica pública, eliminando a necessidade de bancos de baterias. Além disso, a energia solar não requer espaço exclusivo à geração de eletricidade, o que ajuda a preservar áreas naturais e a evitar a poluição visual das paisagens. A arquitetura solar também desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de ZEBs, que são altamente eficientes em termos energéticos e produzem toda a energia que consomem. Por fim, a integração de energia solar em edificações contribui para a otimização da rede elétrica, especialmente em edifícios comerciais, onde a produção de energia frequentemente coincide com os horários de maior consumo, resultando em maior eficiência e redução de picos de demanda.

Além das características funcionais, a visualização dos módulos FV altera a percepção da edificação e, portanto, da sua estética. A característica modular da tecnologia possibilita diversas morfologias de integração em edificações, como: revestimento e vedação de coberturas, composição de fachadas (dos tipos *glazing*, cortina ou ventilada), esquadrias, clarabóias, guarda-corpos, elementos de sombreamento (brises), além de mobiliários urbanos, como em coberturas de praças ou de espaços de convivência e em estacionamentos ou pontos de ônibus. Além disso, já estão disponíveis no mercado mundial e nacional, módulos FV semitransparentes, flexíveis, e até coloridos e com texturas que imitam materiais construtivos convencionais (alvenarias, metais, mármores, granitos, concreto, madeiras, entre outros). Com o avanço da tecnologia FV e sua constante redução de custos, a tendência é que os módulos FV sejam integrados em cada vez mais edificações, tanto em fase de projeto quanto em construções já existentes (em *retrofits*). Tornando-se visíveis com mais frequência, esses sistemas irão alterar as formas dos ambientes construídos e das paisagens. Ao mesmo tempo em que há redução de custos com a substituição de materiais convencionais da construção civil, a integração de módulos FV deve ser pensada para atingir desempenho suficiente dentro de critérios de conforto (térmico, lumínico e acústico), de eficiência energética, mas também de segurança, estanqueidade, durabilidade e manutenção. Por isso, estudos de funcionalidade construtiva e de influência estética da integração desses sistemas em edificações são necessários para preservação dos nossos contextos arquitetônicos e urbanos.

A estética arquitetônica pode ser avaliada a partir da estética kantiana, no que tange à questão do belo e sua relação entre a arte e a natureza. Segundo Mitchell (2008), a arquitetura pode ser classificada como uma arte visual, junto com a pintura e a escultura, que é comprometida com as diferenças de luz, cor e superfície. Ainda sobre Kant, este também apresenta uma separação entre arte e ciência: ciência é o exato que se produz, com exatidão de parâmetros, certo e errado; já a arte é livre, e o que a analisa é a percepção do sujeito, que gera no mais tangível de dualidade, a sensação de prazer ou desprazer (Leal, 2015). Estes termos apresentam a complexidade de design dos BIPVs, edificações que devem seguir a ciência da construção civil, da geração de eletricidade, e de uma arquitetura que seja percebida pelos seus usuários em um esforço de suscitar a percepção do belo nas paisagens urbanas. Neste conflito entre a ciência (única posição para o máximo aproveitamento da radiação) e a arte (estética do belo), Kant apresenta um direcionamento: ele distingue a beleza livre (pura) da beleza dependente (aderente). A beleza livre seria uma beleza encontrada na natureza em seus padrões de organização, enquanto a beleza dependente está relacionada ao conhecimento sobre a finalidade do objeto (Mitchell, 2008). Como bem apresenta Mitchell (2008, p. 48), "de acordo com Kant, um edifício bem projetado seria aquele que possui beleza pura, mas que ao mesmo tempo se apresenta conveniente e adaptado a seus objetivos práticos". A partir destas definições teóricas, este trabalho busca avaliar os BIPVs de uma forma mais ampla: enquanto elementos de geração de eletricidade; enquanto elementos da construção civil; e, também como elementos que contribuem para a estética em busca da beleza nas edificações.

O objetivo deste artigo é analisar o Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC em termos de multifuncionalidade dos sistemas FV e de sua estética. A ideia é auxiliar na mudança de paradigmas no setor de energia solar no Brasil, demonstrando que as perdas por sombreamento e por orientações e inclinações não ideais para a geração de eletricidade na edificação são compensadas quando se atinge um compromisso com a função (beleza dependente) e a estética da construção (beleza livre). O ineditismo desse artigo constitui de uma análise de funcionalidade construtiva e estética de uma edificação com integração FV no Brasil, onde a metodologia apresentada poderá ser utilizada para incentivar e facilitar a criação de futuros projetos de arquitetura solar no país. O segundo capítulo deste artigo apresenta a metodologia, o terceiro capítulo apresenta os resultados e, por fim, o quarto capítulo apresenta a conclusão.

2. METODOLOGIA

2.1 Apresentação do 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 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 planejado para ser um laboratório vivo, ou seja, um equipamento de estudo e demonstração da aplicação e funcionamento da tecnologia solar FV. Portanto, o conceito arquitetônico segue a ideia de que o edifício é uma máquina, onde todas as instalações são visíveis para tornar evidente seu funcionamento. Os sistemas integrados à arquitetura são também parte do conceito arquitetônico de "FV por toda a parte", já que são visíveis em todos os ambientes da edificação. A configuração das integrações FV foi determinada não apenas pelo desempenho energético dos sistemas, mas também pelo resultado estético da integração entre os sistemas FV e a arquitetura. Além disso, o projeto arquitetônico é baseado no uso de medidas de sustentabilidade e eficiência energética. Há um sistema para captação e reuso da água pluvial; ambientes com vistas para o interior e exterior da edificação e pés direitos altos e duplos, proporcionando circulação de ar por ventilação natural e melhor utilização de iluminação natural; uso de iluminação zenital; lâmpadas de LED; e uso de linguagem arquitetônica local e materiais da região para minimizar custos. Portanto, o Bloco C é um prédio autossuficiente na produção de hidrogênio verde (H_2V), já que toda a energia limpa e a água necessárias para produção de H_2V são fornecidas pelo próprio prédio: a energia é gerada pelas coberturas e fachadas FV, e a água da chuva é captada nas calhas das coberturas FV e armazenada em cisternas para reuso. A Fig. 1 exibe a maquete eletrônica do prédio e indica os seus sistemas FV.

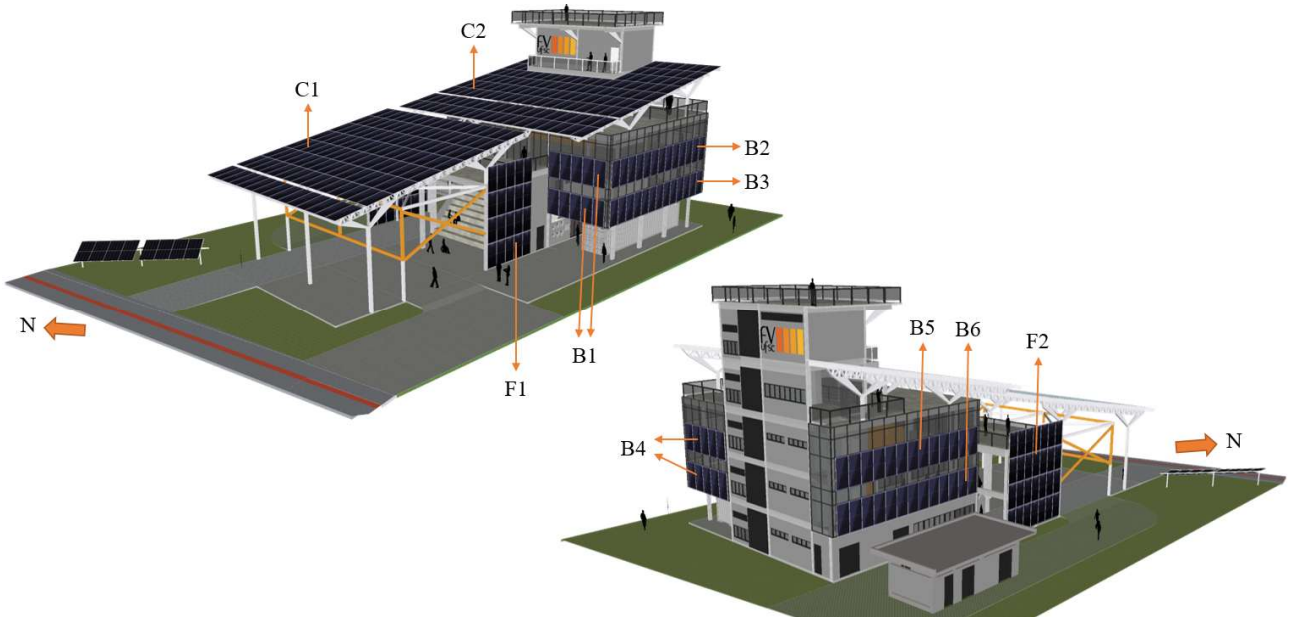


Figura 1 – Maquete eletrônica do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC e indicação de seus sistemas FV.

Os sistemas FV geram energia, mas também contribuem para o conforto ambiental da edificação. Os sistemas das coberturas (C1 e C2) são compostos por módulos *single-glass* de silício monocristalino (mono-Si), com *backsheet* transparente e com moldura. Os módulos do C1 não possuem grid, já os do C2 possuem. Portanto, os módulos do C1

possuem maior transparência na região entre células FV do que os do C2. Além de geradores de energia, os módulos são também a própria vedação estanque das coberturas e causam sombreamento sobre as lajes de concreto. Isso contribui para a redução da radiação incidente sobre essas lajes e consequente redução do consumo de ar-condicionado na edificação. Os sistemas das fachadas (F1 e F2) são compostos por módulos *double-glass* mono-Si, com moldura. Além de geradores de energia, os módulos vedam parcialmente o auditório semiaberto da edificação, protegendo os usuários de intempéries e causando um sombreamento que contribui para os confortos térmico, lumínico e visual do local. Por fim, os sistemas dos brises (B1, B2, B3, B4, B5 e B6) são compostos por módulos *double-glass* mono-Si, sem moldura, instalados sobre a fachada *glazing* de vidro. Além de geradores de energia, os módulos causam um sombreamento estratégico dentro da edificação e consequentemente contribuem para os confortos térmico, lumínico e visual desses ambientes internos, reduzindo a necessidade de ar-condicionado e de iluminação artificial.

Os módulos FV das coberturas são instalados em posição retrato e encaixados em perfis metálicos que constituem também calhas de captação de água da chuva, nas arestas superiores e inferiores dos módulos. Essas calhas por sua vez se conectam a outras maiores que levam a água captada para as cisternas para reuso no prédio. A vedação entre as arestas laterais dos módulos foi feita com perfis de borracha e cola de silicone. Esse sistema de calhas, borracha e cola garante uma perfeita estanqueidade dessas coberturas. Já os módulos FV das fachadas são parafusados em cantoneiras metálicas que são, por sua vez, parafusadas nos pilares metálicos I da edificação. Não há vedação entre módulos e, por isso, essa fachada não é estanque. Por fim, para os módulos FV dos brises, *frames* metálicos foram colados na parte de trás dos módulos, a fim de manter o aspecto *double-glass* do material. Esses *frames*, por sua vez, são parafusados em uma peça metálica que garante o afastamento de 20 cm dos módulos em relação à fachada *glazing* de vidro, proporcionando ventilação adequada por trás dos módulos para garantir uma boa eficiência do sistema FV. Essa peça metálica é então parafusada no perfil da esquadria do *glazing* para fixação dos brises na edificação em si.

Nas coberturas, os inversores *string* contribuíram para uma divisão dos módulos, a fim de minimizar as perdas por sombreamento. O sombreamento no sistema C1 é causado pela cobertura C2 que se estende sobre o sistema C1 e o sombreamento do sistema C2 é causado pela torre de serviços e caixa d'água da edificação. Já as fachadas possuem inversores diferentes para cada orientação para minimizar as perdas pela orientação não ideal dos sistemas. Os sistemas de fachadas (F1 e F2) e de brises (B1-B6) também possuem perdas por sombreamento causado pela própria edificação e por elementos do entorno. A Tab. 1 apresenta algumas informações técnicas dos sistemas FV, onde é possível visualizar que nenhum deles está posicionado idealmente para geração de eletricidade na cidade de Florianópolis/SC. Neste caso, a orientação e inclinação ótimas seriam Norte e 27°, respectivamente.

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

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

2.2 **Análise da multifuncionalidade, estética e beleza**

Para esta análise foram consideradas as duas premissas de forma e função na arquitetura solar escolhida. A multifuncionalidade dos módulos FV enquanto função de geração de eletricidade e material construtivo, e a estética da composição arquitetônica enquanto forma resultante. A beleza, como citado anteriormente, é tratada como juízo de valor estético, onde tem maior probabilidade de ocorrer quando os objetivos práticos de sua função são atendidos, juntamente com a expressão pura da composição formal. Foram propostas duas matrizes de avaliação das características de desempenho da tecnologia FV juntamente com suas características formais. A Fig. 2 apresenta um organograma da metodologia.

A primeira matriz apresenta características sobre a função de geração de eletricidade e sobre a função de desempenho arquitetônico dos sistemas FV. A função de geração de eletricidade foi avaliada por critérios tradicionais de desempenho, ou seja, em relação à posição ótima para geração de eletricidade no local e pela configuração das *strings* elétricas. A função de desempenho arquitetônico foi avaliada a partir da multifuncionalidade dos elementos construídos, classificando, por exemplo, se os módulos possuem função de vedação, de revestimento, de sombreamento, se auxiliam nos desempenhos térmico e lumínico do edifício, e até mesmo se poderiam ter substituído algum outro material da construção civil em termos de função de desempenho arquitetônico.

A segunda matriz apresenta características em função da composição geométrica. Neste tipo de análise a arquitetura estudada precisa ser considerada por inteiro. A análise estética utilizou como base os princípios de ordem e composição

formal, que são: ritmo, proporção, equilíbrio, variedade e unidade. Quando utilizados de maneira eficaz, esses princípios podem tornar uma edificação ou um espaço mais atraente à percepção humana e visualmente interessante, contribuindo para a experiência arquitetônica de maneira positiva. A definição dos princípios de ordem e composição formal utilizados neste trabalho são apresentadas a seguir.

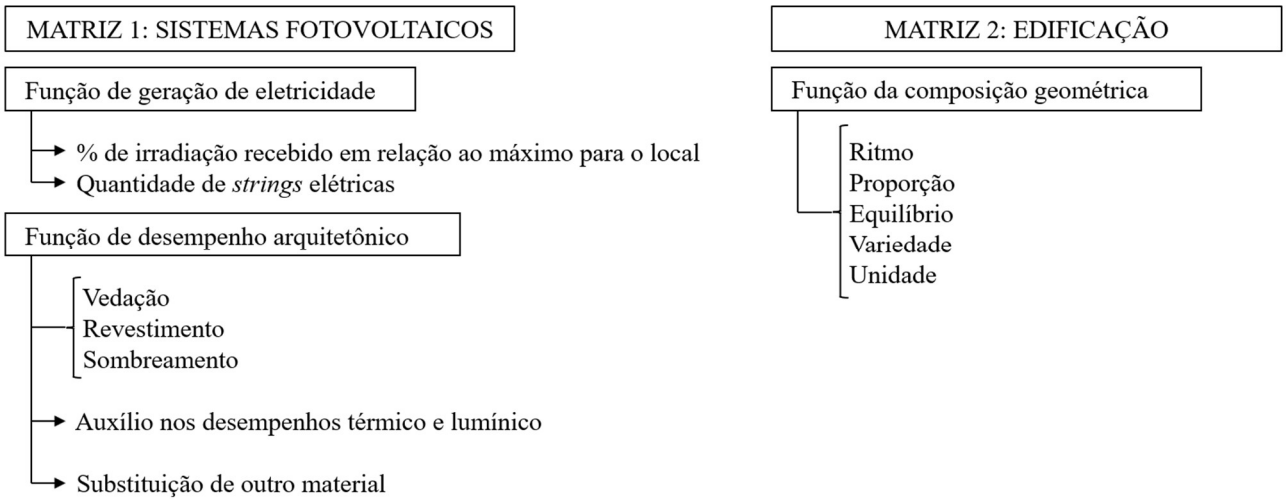


Figura 2 – Organograma de avaliação das características de desempenho da tecnologia FV e das características formais.

Ritmo é a repetição e variação de elementos visuais dentro de um edifício para criar uma sensação de movimento, continuidade e interesse visual. O ritmo pode ser obtido através da repetição e variação de elementos arquitetônicos, mas também através da progressão, onde os elementos mudam gradualmente de forma sequencial; da criação de um fluxo visual, guiando o olhar do observador, conduzindo-o através de espaços e até enfatizando determinadas áreas ou funções da edificação; e até da utilização do ritmo temporal, considerando a experiência do tempo dentro de um edifício, onde os elementos mudam ao longo do tempo.

A proporção considera a relação entre as diferentes partes de um elemento arquitetônico ou entre vários elementos em um edifício e também em relação ao tamanho do ser humano. Essa relação é utilizada para criar uma estética visualmente agradável e equilibrada em uma edificação. Muitas vezes a proporção na arquitetura é baseada em princípios matemáticos e geométricos, como por exemplo a Razão Áurea (número de ouro). A proporção pode ser aplicada em diferentes escalas, desde o *layout* geral de um edifício até os detalhes arquitetônicos que compõem suas partes.

Equilíbrio é a distribuição ou disposição de elementos visuais de uma edificação de maneira a criar uma sensação de pesos iguais em relação a um eixo. Essa disposição pode ser feita de maneira simétrica, mais utilizada em estilos tradicionais ou clássicos, ou assimétrica, frequentemente associado a estilos arquitetônicos mais modernos e contemporâneos. No equilíbrio simétrico os elementos de um lado de um eixo central imaginário são espelhados ou repetidos do outro lado. Já no equilíbrio assimétrico, os elementos são distribuídos de maneira desigual de cada lado, mas mantendo o mesmo peso. Este conceito envolve o uso de elementos com diferentes pesos visuais e proporções para criar uma composição equilibrada diante de um eixo imaginário que pode ou não ser central.

Variedade é a utilização de diferentes elementos, materiais, cores, formas, *layouts*, estilos e até elementos paisagísticos em um edifício. É uma estratégia de projeto para agregar diversidade, complexidade e riqueza nas composições arquitetônicas.

Unidade é a utilização de estratégias para criar harmonia e identidade estética a um projeto. Isso envolve a repetição ou pequenas variações de unidades arquitetônicas para estabelecer uma linguagem visual consistente. Essas unidades podem ser elementos arquitetônicos, como colunas, portas, janelas e ornamentos, ou características de *design* mais abstratas, como padrões geométricos ou cores. A repetição dessas unidades pode criar um senso de ordem e organização, enquanto as variações podem adicionar interesse visual. Uma arquitetura é considerada bela quando há unidade na variedade, pois um edifício com variedade sem unidade é considerado caótico, e um edifício sem variedade e apenas unidade, é monótono (Mitchell, 2008).

3. RESULTADOS

3.1 Análises e discussões da multifuncionalidade, estética e beleza do estudo de caso

A Tab. 2 apresenta a matriz 1 de análise do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, com análises da função de geração de eletricidade e da função de desempenho arquitetônico.

Em relação à função de geração de eletricidade, os sistemas C1 e C2 apresentam apenas 2% de perdas de irradiação anual recebida em relação ao máximo para o local (para a cidade de Florianópolis/SC, um sistema com orientação Norte e inclinação de 27° seria um sistema idealmente posicionado para geração FV). Já os sistemas verticais de fachadas e

brises apresentaram uma perda maior. Estes sistemas recebem entre 51% e 63% da irradiação anual máxima para o local. Devido à multifuncionalidade desses sistemas, demonstrada já na Matriz 1 pela função de desempenho arquitetônico, esses percentuais tornam-se aceitáveis. A utilização dos módulos FV nas fachadas ainda se mostra vantajosa em relação a outros materiais construtivos, já que estes podem ter a mesma função de desempenho arquitetônico que os materiais mais convencionais e possuem ainda um retorno de investimento inicial menor que a sua vida útil de 25-30 anos. Além disso, a quantidade de *strings* elétricas em cada sistema contribui para reduzir as perdas por sombreamento em todos os sistemas FV e pela diferença de orientações e inclinações dos sistemas de fachadas (F1 e F2) e de brises (B1-B6).

Em relação à função de desempenho arquitetônico, os sistemas C1, C2, F1 e F2 possuem função de vedação e todos os sistemas possuem função de sombreamento e consequente melhoria dos desempenhos térmico e lumínico da edificação. Portanto, os sistemas contribuem não apenas para a geração de eletricidade, mas antes disso ajudam na redução do consumo energético de ar-condicionado e iluminação natural. Ou seja, os sistemas FV contribuem para a melhoria da eficiência energética da edificação. Considerando apenas a função de desempenho arquitetônico, os módulos FV poderiam ser substituídos por outros materiais construtivos. Os módulos das coberturas poderiam ser substituídos por outros elementos de vedação de cobertura como chapas metálicas, telhas de concreto, telhas cerâmicas, telhas de fibrocimento, e até por vidro. Esses materiais possuem um investimento inicial ainda menor do que o investimento em uma cobertura BIPV (SUPSI, 2020). No entanto, eles não possuem função de geração de eletricidade e por isso o módulo FV se torna mais atrativo, já que há um retorno do investimento inicial dentro do período de sua vida útil. Já os módulos das fachadas poderiam ser substituídos por outros elementos de vedação e de sombreamento de fachadas, como chapas metálicas, madeiras, pedras, placas cerâmicas, placas de fibrocimento, e até por vidro. Neste caso, as fachadas BIPV já possuem valores de investimento inicial competitivos com alguns materiais mais nobres como alguns tipos de chapas metálicas e de placas cerâmicas (SUPSI, 2020). Quanto aos materiais de fachadas de investimento inicial mais baixo, novamente os módulos FV possuem vantagem devido à função de geração de eletricidade e consequente retorno do investimento inicial dentro do período de sua vida útil.

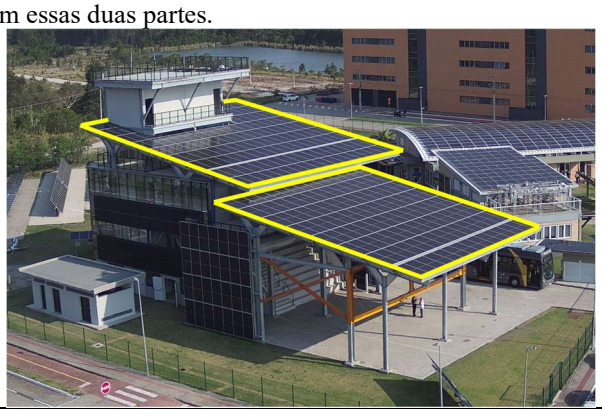
Tabela 2 – Matriz 1 de análise do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

SISTEMA	FUNÇÃO DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE		FUNÇÃO DE DESEMPENHO ARQUITETÔNICO			
	% de irradiação recebido em relação ao máximo para o local	Quantidade de *string*s elétricas	Vedação	Sombreamento	Melhora do desempenho térmico e lumínico	Substituição de outros materiais
C1	98	8	X	X	X	Chapas metálicas, telhas de concreto, telhas cerâmicas, telhas de fibrocimento, vidro.
C2	98	8	X	X	X	
F1	52	4	X	X	X	Chapas metálicas, madeiras, pedras, placas cerâmicas, placas de fibrocimento, vidro.
F2	63	4	X	X	X	
B1	63	1		X	X	
B2	52	2		X	X	
B3	52	2		X	X	
B4	51	2		X	X	
B5	63	2		X	X	
B6	63	1		X	X	

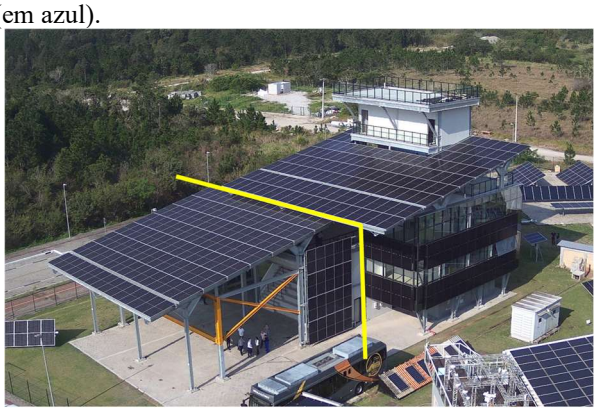
A Tab. 3 apresenta a matriz 2 de análise do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, com análises da função da composição geométrica da edificação.

Pela análise da função da composição geométrica é possível afirmar que o Bloco C é uma edificação com presença dos diversos elementos que compõem o belo na arquitetura, já que apresenta ritmo, proporção, equilíbrio, e principalmente uma unidade com variedade. É interessante notar que os sistemas e módulos FV são elementos responsáveis por vários desses princípios de ordem e composição formal. No conflito entre ciência e arte, os sistemas FV nesta edificação do estudo de caso mostraram eficiência quanto aos padrões de organização estética e quanto às finalidades de geração de eletricidade e de material construtivo. Portanto, nesta edificação os sistemas FV foram realmente integrados à arquitetura, ou seja, não são apenas geradores de energia com desempenho arquitetônico, mas também possuem grande influência na composição geométrica da edificação e contribuem para a beleza da arquitetura. É um edifício que faz uso de todos os elementos de composição na busca da beleza arquitetônica, já que ela só poderia ser julgada pelos usuários, mas que ao mesmo tempo se apresenta conveniente e adaptado a seus objetivos práticos.

Tabela 3 – Matriz 2 de análise do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO GEOMÉTRICA
RITMO As fotos mostram que o ritmo é dado pela repetição dos pilares metálicos em formato de Y (em vermelho) sempre no início e no final das coberturas FV. As alturas das duas coberturas FV e da laje de cobertura da torre de serviços (em amarelo), que aumentam progressivamente, também conferem ritmo à edificação. Os sistemas FV B1-B6 também proporcionam ritmo, já que se repetem por todas as fachadas de maneira linear (em verde). Por fim, a última foto mostra que a forma retangular aparece repetidamente pelo prédio, tanto nos próprios módulos FV e suas células, quanto nos *glazings* que respeitam a paginação dos módulos FV e nos guarda-corpos envidraçados.
PROPORÇÃO As fotos mostram que a proporção da parte de trás do prédio pode ser entendida quando a edificação é cortada em 3 fatias horizontais (em vermelho), sendo a primeira o andar térreo com o container de baterias, a segunda todo o volume do *glazing*, e a terceira a cobertura FV com a torre de serviços e caixa d'água. Essas três partes possuem dimensões e pesos visuais semelhantes. Cada fatia, representada pelo pavimento, tem altura usual de pavimento (3 m) ou múltiplo dele, próximo da escala humana. Já a proporção entre a parte frontal semiaberta e a parte de trás é definida pelas coberturas FV de áreas similares (em amarelo) que delimitam essas duas partes. 
EQUILÍBRIO As fotos mostram que quando a edificação é vista de frente, é possível identificar um equilíbrio simétrico, onde um dos lados do eixo central imaginário (em vermelho) é exatamente igual ao outro. Já quando vista de lado, um eixo define um equilíbrio assimétrico (em amarelo) na edificação, já que a robustez de sua estrutura metálica na parte frontal semiaberta é competitiva em termos de peso visual com a parte de trás mais fechada. Isso ocorre principalmente pois a vedação da parte de trás é em grande parte feita com vidro transparente. Além disso, a parte de trás se faz mais leve em termos de peso visual no térreo pela permeabilidade visual da vista container de baterias - jardim de inverno

- laboratório de H_2, proporcionada pela área aberta e coberta do container e pelas aberturas envidraçadas tanto na parede externa quanto na parede interna dessa perspectiva (em azul).

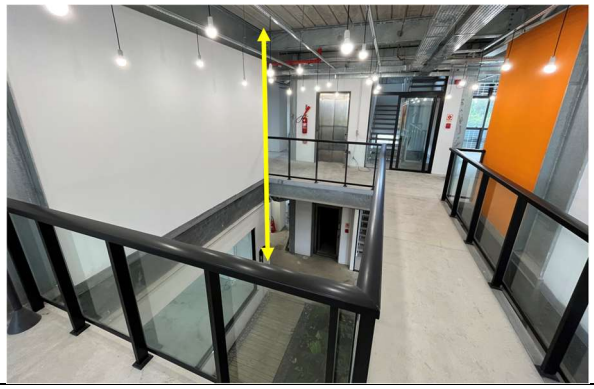


VARIEDADE

A variedade é dada pelos volumes cheios e vazios presentes na edificação e também pelas diferentes cores (cinza, azul e laranja) e os diferentes materiais e texturas (metal, concreto, vidro, paredes com pinturas branca e laranja, células FV). Nas fotos a seguir, os vazios estão delimitados por linhas amarelas, sendo os cheios as partes da edificação que não foram delimitadas por linhas. Também é possível visualizar as diferentes cores, materiais e texturas.

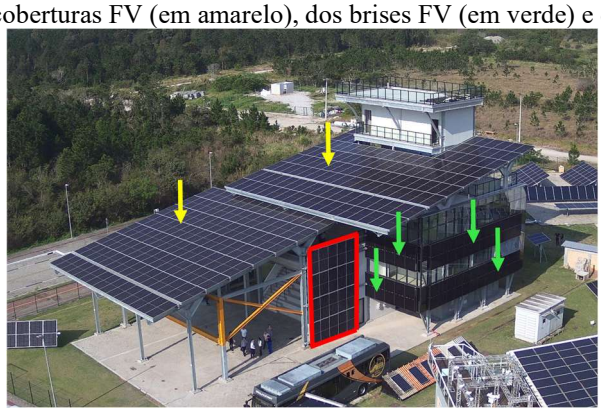
Além disso, o contraste entre elementos verticais (pilares metálicos) e elementos horizontais (sistemas FV B1-B6, estrutura metálica frontal e guarda-corpos) também trazem variedade. A própria torre de serviços pode ser considerada um elemento vertical quando comparada com a horizontalidade da edificação como um todo, já que essa torre cinza se destaca no meio dos *glazings* de vidro, dos módulos FV e dos vazios que compõem o restante da edificação. Nas fotos a seguir é possível visualizar os elementos verticais destacados em vermelho e os horizontais em amarelo.

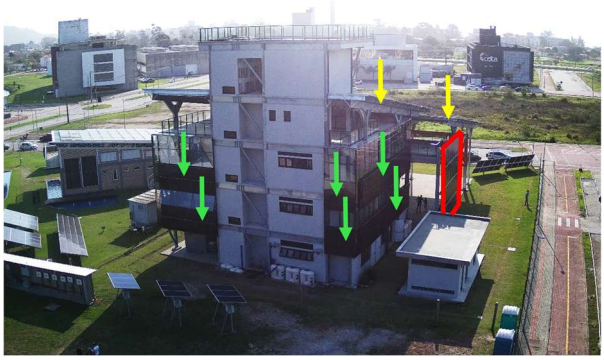
Internamente, a horizontalidade dos degraus da arquibancada também contrasta com a verticalidade do pé direito duplo no topo da arquibancada, conforme mostrado nas fotos a seguir, onde a horizontalidade e a verticalidade dos elementos são apontadas por setas amarelas.



UNIDADE

A unidade é dada pela presença de módulos FV como material de fachada e cobertura por toda a edificação, pela estrutura metálica aparente, pelas coberturas FV sobrepostas e que se projetam por cima da edificação (C1 e C2), pelos brises FV que abraçam a parte posterior do prédio (B1-B6) e pela presença de dois sistemas FV semelhantes (F1 e F2) em fachadas opostas do prédio. Ao repetir o uso do mesmo elemento, o módulo FV, cria-se também uma modulação em todas fachadas. As fotos mostram os módulos FV por toda a edificação e a estrutura metálica aparente, além das coberturas FV (em amarelo), dos brises FV (em verde) e das fachadas FV em orientações opostas (em vermelho).





A unidade também é dada pelo fato de a tecnologia FV ser vista de todos os ambientes internos da edificação, já que os módulos são bifaciais. A foto mostra a visualização dos módulos FV bifaciais por dentro de um dos ambientes.

4. CONCLUSÕES

Este artigo abordou a integração de módulos FV em edificações, destacando a sua importância no contexto da transição global para um futuro livre de combustíveis fósseis. A utilização multifuncional dos módulos FV, além de sua função primária de geração de eletricidade, como elementos de construção e componentes esteticamente relevantes, é ressaltada como uma estratégia eficaz para promover a utilização da tecnologia FV em edificações.

A metodologia proposta considerou aspectos de geração de eletricidade, desempenho arquitetônico e composição geométrica, oferecendo uma abordagem prática para avaliar edificações com arquitetura solar. A análise estética, fundamentada nos princípios kantianos, destaca a complexidade do design dos sistemas BIPV. A dualidade entre a beleza livre e a beleza dependente é explorada, enfatizando a importância de atender aos objetivos práticos da função, ao mesmo tempo em que se busca a expressão pura na composição formal.

A análise do Bloco C do Laboratório Fotovoltaica/UFSC mostrou que as perdas energéticas causadas pela integração de sistemas FV são compensadas pela multifuncionalidade dos critérios de desempenho arquitetônico e de estética, onde os módulos FV contribuem significativamente na busca pela beleza na arquitetura.

Neste artigo, as perdas de geração de eletricidade devido à integração dos módulos FV em edificações não foram quantificadas e não se estabeleceu um limite aceitável para essas perdas. O objetivo do estudo não é estabelecer/limitar perdas, mas sim enfatizar a multifuncionalidade dos módulos FV na arquitetura com a substituição de outros materiais com custos semelhantes, e ainda gerar energia. A quantidade aceitável de perdas irá variar de acordo com cada projeto, e cabe ao projetista definir o que é aceitável diante de outros ganhos.

Este artigo fornece uma base para o desenvolvimento de projetos de arquitetura solar na busca por soluções sustentáveis e visualmente atraentes, contribuindo para uma mudança de paradigma no setor de energia solar no Brasil.

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

Becquerel Institute. BIPV market and stakeholder analysis 2019. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://bipvboost.eu/public-reports/>.

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>.

Leal, J. C. D. A estética Kantiana: o belo, o sublime e a arte. Intuitio, 8 (2). 146-158. 2015 - DOI: https://doi.org/10.15448/1983-4012.2015.2.18840

Mitchell, W. J. A lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição. Tradução de CELANI, G. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

SUPSI; Becquerel Institute. Building Integrated Photovoltaics: A practical handbook for solar buildings' stakeholders. Status Report 2020. [s.l: s.n.].

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>.

MULTIFUNCTIONALITY, AESTHETICS AND BEAUTY OF A BUILDING THAT IS SELF-SUFFICIENT IN ELECTRICITY GENERATION AND IN THE PRODUCTION OF GREEN HYDROGEN

Abstract. *This article addresses the integration of photovoltaic (PV) modules into buildings as a strategy to generate energy and compose the structure in functional and aesthetic manners. The concept of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) or solar architecture is explored, emphasizing the multifunctionality of PV modules. Multifunctionality is analyzed in terms of electricity generation, architectural performance, and the geometric composition of PV systems. Architectural aesthetics is evaluated based on the principles of order and formal composition, considering rhythm, proportion, balance, variety, and unity. The conflict between science and art, especially in the intersection between form and function, is discussed based on Kantian aesthetics. The case study focuses on Building C of the Laboratório Fotovoltaica/UFSC, designed as a living laboratory to demonstrate the application of the PV technology in buildings. The PV systems in Building C serve multiple functions: generating energy, serving as a construction material, and contributing to the environmental comfort and aesthetics. The evaluation methodology includes two matrices: one for analyzing the function of electricity generation and architectural performance, and another for assessing the geometric composition of the building. Although the systems experience electricity generation losses, primarily due to shading and non-optimal positioning, the multifunctionality and architectural aesthetics compensate for these losses. The aesthetic analysis reveals that Building C uses all composition elements in the pursuit of architectural beauty, highlighting the effectiveness of integrating PV systems into the building's aesthetics. The study proposes a practical and objective methodology to argue that electricity generation losses due to architectural integration are offset by the multifunction and aesthetics of PV systems, contributing to a paradigm shift in the solar energy sector in Brazil.*

Keywords: *Solar Architecture, Multifunctionality, Aesthetics*