

A ARTE E A CIÊNCIA DA INTEGRAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – PARTE 2: ESTUDO DE CASO

Isadora Pauli Custódio – isadora.custodio@posgrad.ufsc.br

Universidade Federal da Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFSC), Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar (Laboratório Fotovoltaica/UFSC)

Ísis Portolan dos Santos

Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo (PPGAUP/UFSC)

Ricardo Rütther

Universidade Federal da Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFSC), Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar (Laboratório Fotovoltaica/UFSC)

5.1. Aspectos arquitetônicos do uso de instalações fotovoltaicas

Resumo. Para explorar o máximo potencial de qualidade de integração fotovoltaica no ambiente construído, características técnicas e não-técnicas devem ser consideradas. Em relação às questões não-técnicas, é necessário que arquitetos e engenheiros saibam como a utilização de módulos fotovoltaicos em edificações pode ser interpretada a partir de teorias de percepção arquitetônica. A tradição da crítica da arquitetura fotovoltaica é objetiva e explora as características visuais das construções. Entretanto, a essência da arquitetura é o vazio do espaço o qual pessoas experimentam. Este estudo é dividido em dois artigos: Parte 1: investigação teórica e Parte 2: estudo de caso. A Parte 1 definiu as interpretações tradicionais da arquitetura fotovoltaica e propôs um método para identificar como a percepção dos sistemas fotovoltaicos influencia a experiência espacial arquitetônica. Esta é a Parte 2 do trabalho, a qual demonstra a aplicação do método a um estudo de caso, as edificações do Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Laboratório Fotovoltaica/UFSC). Os resultados pretendem servir de inspiração, contribuindo para a ampliação do uso de módulos fotovoltaicos como forma de expressão arquitetônica e para a redução da lacuna que existe entre cientistas e arquitetos.

Palavras-chave: Integração fotovoltaica no ambiente construído, Avaliação estética, Interpretações da arquitetura.

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização da tecnologia FV integrada a edifícios vem modificando a forma dos ambientes construídos. Diante disso, a fim de alcançar o potencial máximo de qualidade de integração da tecnologia, é necessário que arquitetos e engenheiros considerem questões técnicas, mas também as não-técnicas, como a possibilidade dos módulos FV serem interpretados a partir de teorias de percepção arquitetônica. Na literatura, são encontrados métodos objetivos e práticos que dizem respeito aos aspectos visuais das construções e dos sistemas FV para avaliar a estética arquitetônica. No presente trabalho, estes estudos são considerados como a tradição da crítica da arquitetura FV. No entanto, a essência da arquitetura é o vazio do espaço o qual as pessoas experimentam. Uma vez que a arquitetura é composta tanto por construções quanto por espaços que dependem um do outro para existir, a crítica arquitetônica deve considerar ambos, a fim de fornecer uma compreensão plena da arquitetura. A Parte 1 deste trabalho definiu as interpretações tradicionais da arquitetura FV e um método para identificar como a percepção dos sistemas FV influencia a experiência espacial. Esta é a Parte 2 do trabalho, a qual demonstra a aplicação do método da Parte 1 a um estudo de caso, as edificações do Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Laboratório Fotovoltaica/UFSC). Os resultados devem servir de inspiração para o uso de módulos FV como forma de expressão arquitetônica, melhorando a aceitação de arquitetos sobre o uso da tecnologia, além de dar aos engenheiros e arquitetos uma visão melhor de como a integração FV pode ser interpretada a partir de teorias de percepção arquitetônica, reunindo as diferentes profissões.

2. METODOLOGIA

A metodologia apresentada na Parte 1 deste trabalho considera a avaliação de sistemas FV em ambientes construídos. Inicialmente, a metodologia considera as interpretações tradicionais da arquitetura FV: (i) interpretações políticas, (ii) filosófico-religiosas, (iii) científicas, (iv) socioeconômicas, (v) materialistas, (vi) técnica, (vii) fisiopsicológica e (viii) formalista. As cinco primeiras devem apresentar descrições necessárias para entender o propósito das edificações e/ou dos seus sistemas FV integrados. A interpretação técnica considera a tecnologia FV, a capacidade instalada, o desvio azimutal, o ângulo de inclinação e a estratégia de produção de energia e de integração FV. A estratégia de produção de energia e de integração FV é descrita conforme em Cronemberger et al. (2014). A interpretação fisiopsicológica utiliza o

método de percepção “Manequim de Autoavaliação” (do inglês *Self-Assessment Manikin* – SAM), conforme apresentado por Sánchez-Pantoja et al. (2018). Por fim, a interpretação formalista considera o método LESO-QSV (*Laboratoire d’Energie SOLaire – Qualité-Sensibilité-Visibilité*) definido por Munari Probst & Roecker (2019) com complementos de Custódio et al. (2020), além de uma lista de características gerais (Cronemberger et al., 2014; Santos, 2013) e a descrição das integrações e dos módulos FV com base no vocabulário transdisciplinar definido por Scognamiglio (2021). Depois, a metodologia diz respeito à interpretação espacial da arquitetura FV, que estabelece que o espaço deve ser experimentado presencialmente; não há uma lista fixa de categorias a serem avaliadas; os espaços analisados devem ser de experiência (calçadas, quadras e lotes); devem ser consideradas distâncias de 25-7 m e de 7-0 m do sujeito crítico até os sistemas FV avaliados; e o observador deve estar parado ou caminhando (0-5 km/h) ao experimentar os espaços. No presente trabalho, a metodologia foi ilustrada a partir da interpretação de um estudo de caso em termos tradicionais e espaciais.

3. RESULTADOS

O Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Laboratório Fotovoltaica/UFSC, www.fotovoltaica.ufsc.br) foi escolhido como estudo de caso para ilustrar a metodologia. O laboratório está localizado no parque de tecnologia e inovação Sapiens Parque (www.sapiensparque.sc.gov.br) na cidade de Florianópolis (27°S, 48°W), no Brasil. O laboratório possui dois edifícios (bloco A e bloco B), um edifício em construção (bloco C), um *carport* solar, e uma estação de carregamento e ponto de ônibus para um ônibus elétrico movido a energia solar - eBus (www.fotovoltaica.ufsc.br). Todas essas construções possuem integrações FV que foram analisadas considerando as interpretações tradicionais e espacial da arquitetura. A Figura 1 mostra uma vista aérea dos edifícios e seus sistemas FV, além de uma imagem do modelo 3D que ilustra como será o bloco C. O laboratório também possui sistemas instalados em solo que não foram incluídos na análise, já que não compõem espaços de vivência.

3.1 Interpretações tradicionais das edificações do Laboratório Fotovoltaica/UFSC

As interpretações políticas, filosófico-religiosas, científicas, socioeconômicas e materialistas podem ser avaliadas pela história das construções do laboratório. O bloco A, o bloco B e o *carport* solar foram inaugurados em 2015. Em 2017, a estação de carregamento e ponto de ônibus do eBus foi construída, e o bloco C está atualmente em construção. As primeiras edificações foram concebidas principalmente com o apoio do Ministério da Ciência e Tecnologia (atual MCTIC) e do projeto de P&D da ANEEL PE-0403-0027/2011, contando também com doações e assistência técnica de outras instituições e empresas. O bloco C (em construção) é objeto de estudo do projeto de P&D da ANEEL PD-0403-0042/2016 e de um recente Contrato de Bolsa de Pesquisa proposto pela Agência Alemã de Cooperação Técnica GIZ. O bloco C abrigará um grande banco de baterias eletroquímicas de íon-lítio e produção de H₂ verde para o armazenamento de energia FV. Um tour virtual pelas edificações pode ser encontrado em www.fotovoltaica.ufsc.br. O laboratório tem como objetivo disseminar conhecimento sobre o uso da tecnologia FV em áreas urbanas, por meio do desenvolvimento de programas de pesquisa e ensino, e conta com uma equipe de acadêmicos e de alunos de graduação/pós-graduação em arquitetura, engenharia civil, engenharia elétrica e engenharia mecânica. Os pesquisadores trabalham pela ampla adoção e pesquisa de energias renováveis, principalmente a solar FV, tornando o local um centro de referência no Brasil. Os sistemas FV do laboratório possuem capacidade para suprir totalmente o consumo de energia dos edifícios e recarregar o eBus após cada uma de suas cinco viagens diárias de ida e volta ao campus principal da universidade (Zomer, Custódio, Antonioli, et al., 2020; Zomer, Custódio, Goulart, et al., 2020). O laboratório é um edifício de energia positiva (do inglês *Positive Energy Building* - PEB), portanto, em meses com excedente de geração de energia, o crédito é alimentado para a rede da concessionária e consumido pelo campus principal da universidade. Além disso, o conceito arquitetônico dos edifícios foi focado na forma e orientação das coberturas FV e no uso de materiais sustentáveis, estratégias bioclimáticas e medidas de eficiência energética. As edificações são constituídas por paredes de tijolos à vista, pilares e vigas metálicas, esquadrias de PVC, e decks e pergolados em madeira reflorestada. Os módulos FV atuam como elementos de sombreamento de coberturas/fachadas ou como material de vedação, favorecendo o conforto térmico interno das edificações. Outras estratégias de sustentabilidade empregadas são ventilação cruzada, telhados verdes, telhas metálicas duplas de cor branca, espelhos d'água, pavimentação permeável em piso-grama, vegetação nativa, uso de iluminação natural e iluminação artificial em LED, entre outros materiais locais, renováveis e de baixo impacto ambiental.

A interpretação técnica dos sistemas FV é demonstrada no Quadro 1. O laboratório possui uma variedade de tecnologias FV: filme fino de telureto de cádmio (CdTe), silício multicristalino (p-Si), filme fino de silício microcristalino ($\mu\text{c-Si}$), silício monocristalino (m-Si) e filme fino de disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). Atualmente, a p-Si é a que possui a maior capacidade instalada (68,6 kWp), mas os telhados do bloco C adicionarão cerca de 100 kWp de m-Si. Os sistemas A2, B1, B2, C3, C4 e E1 são instalados acima das superfícies das construções, e os sistemas A1, C1, C2 e D1 atuam como materiais de vedação, portanto todos eles contribuem para a redução das cargas térmicas dos edifícios. Além disso, todos os sistemas possuem inclinações e/ou orientações não-ótimas para geração de energia FV (em Florianópolis a inclinação e o desvio azimutal ótimos são de 27° e 0°, respectivamente), e nenhum sistema é híbrido.



Figura 1 – Figura superior (a) sistemas FV integrados ao Laboratório Fotovoltaica/UFSC; e figura inferior (b) duas vistas do modelo 3D do laboratório, incluindo os sistemas FV integrados ao bloco C, que está em construção.

Quadro 1 - Interpretação técnica do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

SISTEMA FV	A1	A2	B1	B2	C1	C2	C3	C4	D1	E1
TECNOLOGIA	CdTe	p-Si	p-Si	μc-Si	m-Si	m-Si	m-Si	m-Si	CIGS	CdTe
CAPACIDADE INSTALADA (kWp)	4,4	66,1	2,5	13,5	A ser instalado ±50	A ser instalado ±50	A ser instalado ±5	A ser instalado ±3	13,4	2,4
DESVIO AZIMUTAL (°)	90	0/0/180	90	0	320	320	50	230	270	36
ÂNGULO DE INCLINAÇÃO (°)	0	17/5/4	90	6	10	10	90	90	5	3
ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA E DE INTEGRAÇÃO FV										
Os módulos FV são também utilizados como estratégia de conforto térmico, acústico e/ou lumínico da edificação										
Os módulos FV utilizam inclinações e orientações não-ótimas para geração energética										

A Figura 2 apresenta a interpretação fisiopsicológica dos sistemas FV pelo método de percepção SAM, conforme apresentado por Sánchez-Pantoja et al. (2018). A avaliação foi feita por um sujeito crítico que conhece os edifícios e trabalha há muitos anos com integração FV a edificações. A avaliação da valência hedônica teve menos variação do que

o grau de excitação, pois a ideia de utilizar sistemas FV respeitando as formas arquitetônicas por si só já agrada ao observador. Os sistemas A1 e B1 não cobrem superfícies inteiras e são instalados assimetricamente sobre elas; portanto, são menos agradáveis do que os sistemas A2, B2, C1, C2, D1 e E1, que envolvem superfícies inteiras e/ou são instalados simetricamente sobre elas. O sistema E1 não segue a inclinação do edifício, por isso é menos agradável do que os que seguem (A2, B2, C1, C2, C3, C4 e D1). Por fim, os sistemas C3 e C4 são instalados aleatoriamente sobre as superfícies, mas combinam com o material e com o padrão modular do edifício; portanto, eles são bastante agradáveis. Apesar de todos os sistemas serem satisfatórios, nem todos causam excitação. Sistemas aplicados sobre coberturas inclinadas (B2) e sobre lajes horizontais (E1) são mais comuns, por isso não são tão empolgantes quanto módulos FV instalados em fachadas (B1, C3 e C4), em coberturas curvas (A2) ou usados como materiais de vedação (A1, C1, C2 e D1). Os sistemas C3 e C4 são mais interessantes do que o B1, mesmo que todos eles sejam instalados em fachadas, porque C3 e C4 são compostos por módulos semitransparentes, que são menos comuns que os opacos. Por fim, sistemas que atuam como material de vedação (A1, C1, C2 e D1) também são menos comuns e mais excitantes do que os instalados sobre outras superfícies (A2, B1, B2 e E1).

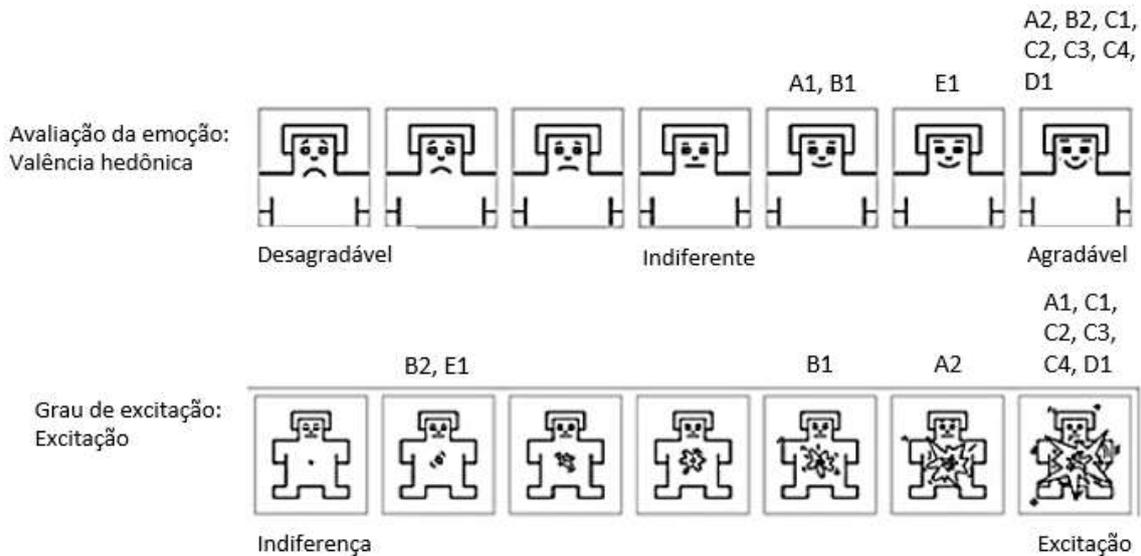


Figura 2 - Interpretação fisiopsicológica do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.
Fonte: adaptado de Sánchez-Pantoja et al. (2018).

Quanto à interpretação formalista, o Quadro 2 apresenta a aplicação do método LESO-QSV. No que diz respeito à qualidade de integração, a geometria dos sistemas C1/C2 e D1 é totalmente coerente com as edificações, já que os sistemas foram projetados desde a fase de projeto e atuam também como materiais de vedação; o sistema A1 é parcialmente coerente, pois tem o mesmo comprimento, orientação e inclinação que o pergolado onde está instalado, porém não possui a mesma largura; os sistemas A2 e B2 são parcialmente coerentes, pois não cobrem toda a superfície dos telhados, mas estão afastados de todos os seus limites em distâncias equivalentes; o sistema B1 é parcialmente coerente, pois respeita a orientação e inclinação do edifício, mas não segue suas dimensões; os sistemas C3/C4 são parcialmente coerentes, pois seguem a orientação e a inclinação da parede onde estão instalados, mas os módulos são posicionados aleatoriamente; e o sistema E1 é parcialmente coerente, pois não tem as mesmas dimensões do telhado nem o mesmo ângulo de inclinação, mas segue sua orientação e é afastado de seus limites em distâncias equivalentes. A materialidade dos sistemas C1/C2 e D1 é totalmente coerente, pois eles atuam como materiais de vedação e suas molduras metálicas combinam com a estrutura de montagem; os sistemas C3/C4 são totalmente coerentes, pois seu vidro transparente combina com as janelas onde estão instalados; o sistema A1 é parcialmente coerente, pois apesar de atuar como material de vedação, a cor dos módulos não combina com a estrutura de madeira; e os sistemas A2, B1, B2 e E1 não são coerentes, pois não possuem as mesmas cores ou texturas das superfícies onde são aplicados. Por fim, o padrão modular dos sistemas C1/C2 e D1 é totalmente coerente, pois segue a modularidade da estrutura de montagem já os módulos atuam como material de vedação; o sistema A2 é parcialmente coerente, pois cria uma modularidade para o telhado curvo onde está aplicado; os sistemas C3/C4 são parcialmente coerentes, pois a forma retangular dos módulos coincide com a das janelas onde estão instalados, mas a posição dos módulos não coincide com a das janelas; e os sistemas A1, B1, B2 e E1 não são coerentes, pois sua modularidade não corresponde às superfícies onde estão instalados. Em relação à “criticidade”, a sensibilidade do contexto foi classificada como “média”, pois os edifícios possuem um valor tecnológico, mas o contexto não tem qualidades arquitetônicas/urbanas específicas. A visibilidade dos sistemas A1, C1/C2 e D1 é alta, pois eles são materiais de vedação, portanto visíveis tanto de fora quanto de dentro das estruturas; a visibilidade dos sistemas B1 ($\beta = 90^\circ$) e C3/C4 ($\beta = 90^\circ/90^\circ$) também é alta por serem instalados em fachadas; a visibilidade do sistema A2 ($\beta = 15^\circ$) é média, pois ele é parcialmente visível do nível do solo; e a visibilidade dos sistemas B2 ($\beta = -15^\circ$) e E1 ($\beta = -5^\circ$) é baixa, pois são dificilmente visíveis do nível do solo. Portanto, a “criticidade” dos sistemas A1, B1, C1/C2, C3/C4 e D1 é alta, do sistema A2 é moderada, e dos sistemas B2 e E1 é baixa.

Quadro 2 - Aplicação do método LESO-QSV para a interpretação formalista do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

SISTEMA FV	A1	A2	B1	B2	C1/C2	C3/C4	D1	E1
QUALIDADE DE INTEGRAÇÃO								
- Geometria do sistema	 parcialmente coerente	 parcialmente coerente	 parcialmente coerente	 parcialmente coerente	 totalmente coerente	 parcialmente coerente	 totalmente coerente	 parcialmente coerente
- Materialidade do sistema	 parcialmente coerente	 não coerente	 não coerente	 não coerente	 totalmente coerente	 totalmente coerente	 totalmente coerente	 não coerente
- Padrão modular	 não coerente	 parcialmente coerente	 não coerente	 não coerente	 totalmente coerente	 parcialmente coerente	 totalmente coerente	 não coerente
“CRITICIDADE”	Alta	Moderada	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa
- Sensibilidade do contexto	 média	 média	 média	 média	 média	 média	 média	 média
- Visibilidade do sistema	 alta	 média	 alta	 baixa	 alta	 alta	 alta	 baixa

A definição das características gerais para a interpretação formalista mostrou que todos os sistemas estão localizados no Laboratório Fotovoltaica/UFSC, que é um edifício público institucional de característica arquitetônica convencional. Além disso, o sistema A1 é uma integração *retrofit* adicionada que veda um pergolado de madeira. Ele está integrado em parte de uma estrutura de cobertura visível e plana, e seus módulos FV são opacos, rígidos, com uma moldura inferior que não é visível na parte frontal da superfície de vidro de aparência escura do material semicondutor ativo CdTe. O sistema A2 é uma integração influente a uma nova edificação. Ele é instalado em parte de uma cobertura metálica, visível e curva, e seus módulos são opacos, rígidos e com moldura. O sistema B1 é uma integração *retrofit* destacada. Está instalado em parte de uma fachada de tijolos cerâmicos, plana e visível, e seus módulos são opacos, rígidos e sem moldura. O sistema B2 é uma integração influente a uma nova edificação. Ele é instalado em parte de uma cobertura metálica, visível e plana, e seus módulos também são opacos, rígidos e com moldura. Os sistemas C1/C2 são integrações influentes em uma nova edificação, que atuam como material de vedação. Eles são instalados na superfície inteira de coberturas planas e visíveis, sobre estruturas metálicas, e seus módulos são opacos, rígidos e com moldura. Os sistemas C3/C4 são integrações destacadas em uma nova edificação. Eles estão integrados como brises, em parte de fachadas planas de vidro visíveis, e seus módulos são semitransparentes, rígidos e sem moldura. O sistema D1 é uma integração influente a uma nova edificação; é o material de vedação do *carport*. Está integrado em uma cobertura inteira, plana e visível, sobre estruturas metálicas, e seus módulos são opacos, rígidos e com moldura. Por fim, o sistema E1 é uma integração invisível a uma nova edificação, já que é dificilmente visto do nível do solo. Ele é instalado em parte de uma cobertura plana de concreto aparente e visível, e seus módulos são opacos, rígidos e sem moldura.

Por fim, o vocabulário transdisciplinar foi aplicado para a interpretação formalista. A descrição na escala grande define que os sistemas A1, A2, B2, C1, C2, D1 e E1 são integrados em coberturas contínuas; B1 em uma fachada dupla; e C3 e C4 em brises. O tipo de mosaico do sistema FV A1 é de borda; de A2 e B2 é de núcleo; de B1, C3 e C4 é aleatório; e de C1, C2, D1 e E1 é contínuo. Os sistemas A1, A2, B2, C1, C2, D1 e E1 têm padrões compactos com distanciamento uniforme, no entanto, enquanto o sistema A1 tem um padrão baseado em grade, os outros têm padrões baseados em faixas paralelas. O sistema B1 tem um padrão poroso baseado em faixas paralelas com distanciamento uniforme; a matriz é opaca e de cor laranja. Os sistemas C3 e C4 têm padrões porosos baseados em grade com distanciamento não uniforme; e matriz transparente. O tamanho do *patch* (o sistema inteiro) de A1, B1, C3, C4 e E1 é pequeno (28 m², 16 m², 42 m², 28 m² e 18 m², respectivamente); de B2 e de D1 é médio (ambos 150 m²); e de A2, C1 e C2 é grande (450 m², 312 m² e 306 m², respectivamente). Os sistemas A1, C2 e E1 têm formas retangulares de superfície plana unitária; A2 tem forma retangular de superfície curva unitária; B1 tem forma quadrada de polissuperfície plana; B2, C1 e D1 têm formas poligonais irregulares de superfície plana unitária; e C3 e C4 têm formas retangulares de polissuperfície plana. A cor dos sistemas A1, B2, D1 e E1 é uniforme, preta; de A2, B1, C1 e C2 é uniforme, azul; e de C3 e C4 é uniforme, transparente e azul. Finalmente, as bordas do sistema A1 são visíveis; de A2, B2, C1, C2 e D1 são pouco visíveis; de B1 é muito visível; e de C3, C4 e E1 não é visível. Os sistemas A1, A2, B1, B2, C1 e C2 têm bordas de cor cinza clara, enquanto D1 tem bordas de cor preta. Sob a descrição nas escalas média e fina, o vocabulário transdisciplinar define que todos os sistemas possuem *patches* (módulos) retangulares, rígidos e planos, com efeito de superfície brilhante e camadas frontais compostas por vidro. Os módulos dos sistemas A1, A2, B1, C1/C2, C3/C4 e D1 são grandes (2,4 m², 1,6 m², 2,0 m², 3,1 m², 1,8 m² e 1,1 m², respectivamente), e do B2 e do E1 são médios (1,5 m² e 0,72 m², respectivamente). A posição dos módulos do sistema A1 é uniforme, horizontal (inclinação 0°; azimute 90°); do A2 é não uniforme, inclinado em relação ao eixo horizontal (inclinações 17°, 5° e 4°; azimutes 0°, 0° e 180°); do B1 é uniforme, vertical (inclinação 90°; azimute 90°); e do B2, C1, C2, C3, C4, D1 e E1 é uniforme, inclinado em relação ao eixo horizontal (inclinações 6°, 10°, 10°, 90°, 90°, 5° e 6°; azimutes 0°, 320°, 320°, 50°, 230°, 270° e 36°, respectivamente). As bordas dos módulos dos sistemas A1, A2, B2, C1 e C2 são combinadas (moldura + intervalo), muito visíveis, de 6 cm de espessura e cor cinza clara; do

B1, C3, C4 e E1 são intervalos simples, finos, de 2 cm de espessura e cor laranja, transparente, transparente e cinza clara, respectivamente; e do D1 é combinada (moldura + intervalo), pouco visível, de 6 cm de espessura e cor preta. A textura dos módulos dos sistemas A1, B2, D1 e E1 são opacas, orgânicas, contínuas, com tecnologias de filme fino CdTe, $\mu\text{-Si}$, CIGS e CdTe, respectivamente; do A2, B1, C1 e C2 são opacas, orgânicas, padronizadas, com tecnologias p-Si, p-Si, m-Si e m-Si, respectivamente; e do C3 e do C4 é semitransparente, orgânica, padronizada, com tecnologia m-Si. O padrão dos módulos dos sistemas A2 e B1 é baseado em grade com distanciamento uniforme, compacto e de granulação grossa; do C1 e do C2 é baseado em grade com distanciamento não uniforme, compacto e de granulação grossa; e do C3 e do C4 é baseado em grade com distanciamento uniforme, poroso e de granulação grossa. Por fim, a cor dos módulos dos sistemas A1, B2, D1 e E1 é preta; de A2, B1, C1 e C2 é azul; e C3 e C4 possuem módulos transparentes e azuis.

A partir da análise deste estudo de caso, foi possível demonstrar que a tradição da crítica arquitetônica FV é prática. Ao conhecer as características concretas dos edifícios e dos seus sistemas FV, é possível descrevê-los e avaliá-los através dos métodos tradicionais.

3.2 Interpretação espacial das edificações do Laboratório Fotovoltaica/UFSC

A interpretação espacial dos prédios do Laboratório Fotovoltaica/UFSC foi escrita por um sujeito crítico que já frequentou as edificações diariamente e participou dos projetos arquitetônicos e das construções das edificações. A Figura 3 apresenta a área compreendida pelas distâncias de 25-7 m (em azul) e de 7-0 m (em vermelho) do observador em relação aos edifícios do laboratório. A primeira análise (25-7 m) considera as ruas adjacentes, de onde também pode ser visto um prédio vizinho (uma empresa de *software* chamada Softplan), enquanto a segunda análise (7-0 m) diz respeito ao terreno do laboratório e suas calçadas.



Figura 3 – Área correspondente às distâncias de 25-7 m (em azul) e de 7-0 m (em vermelho) do observador em relação ao Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

A Figura 4 apresenta a interpretação espacial do observador há 25-7 m do laboratório. Quem passa pela rua principal do Sapiens Parque (seta preta tracejada) vê os prédios do laboratório e da Softplan. No entanto, enquanto o prédio da Softplan é enorme e sua entrada é elevada em relação ao nível da rua, as dimensões dos edifícios do laboratório estão de acordo com a escala humana e o prédio está no nível da rua. Além disso, o laboratório tem paredes de tijolos à vista, decks e pergolados em madeira, e seu terreno é coberto por grama e palmeiras em crescimento, os quais são todos materiais familiares e aconchegantes, enquanto a Softplan possui principalmente materiais frios e mais industrializados como concreto, metal e vidro, sem vegetação em seu entorno. Essas características tornam o laboratório mais atraente que a Softplan e levam os pedestres a seguirem em direção à entrada principal do laboratório (seta vermelha). Além deste acesso, também haverá uma entrada de pedestres no bloco C (seta azul), que será uma área aberta com duas grandes coberturas FV (C1 e C2). A tendência será que as pessoas se desloquem em direção ao prédio, pois seus grandes sistemas de cobertura causam excitação e curiosidade. Os módulos serão orientados para a rua, portanto, quem estiver na seta preta tracejada poderá ver os geradores FV desde a entrada do parque tecnológico. Além disso, a forma côncava da entrada do bloco C é acolhedora e, já que os sistemas C1 e C2 possuem módulos bifaciais que atuam como material de vedação, uma pessoa será capaz de apreciá-los tanto de dentro quanto de fora da edificação. De dentro desta concavidade também será

possível apreciar os sistemas C3 e C4, que serão instalados sobre janelas e, portanto, visíveis também do interior do edifício. O desejo de entrar na concavidade será enfatizado pelas vegetações vizinhas que compõem um grande plano verde, desmotivam as pessoas de irem adiante na rua. Por fim, o acesso de veículos (seta verde) também está localizado em um local estratégico, de onde as pessoas conseguem ver o sistema D1, que se destaca pela sua orientação. As visualizações dessas quatro setas são ilustradas no Quadro 3.



Figura 4 - Interpretação espacial do Laboratório Fotovoltaica/UFSC na distância de 25-7 m.

A Figura 5 apresenta a interpretação espacial de um pedestre há 7-0 m das edificações. O laboratório possui quatro espelhos d'água azuis convexos que contornam os blocos A e B. Enquanto formas côncavas são acolhedoras, formas convexas levam a movimentos repulsivos. Esses movimentos, ilustrados pelas setas vermelhas na Figura 5, levam as pessoas aos pontos P1, P2 e P3, de onde os sistemas FV podem ser naturalmente mais bem percebidos, ou seja, de onde a limitação da visão humana do campo superior é reduzida. A Figura 5 mostra através de setas amarelas que, a partir de P1 é possível ver os sistemas A2, C1, C2 e C4; de P2 é possível ver os sistemas A1, A2 e B1; e de P3 é possível ver o sistema D1. Todas as visualizações são enfatizadas pela orientação dos módulos para os pontos estratégicos. Além disso, os espelhos d'água azuis são elementos que predominam visualmente no nível dos pedestres. A cor azul contrasta com a laranja das paredes de tijolos à vista, já que são cores complementares. Portanto, quando um observador se afasta dos edifícios para os pontos de vista estratégicos P1, P2 e P3, tudo em azul fica destacado, de forma que tanto os espelhos d'água quanto os sistemas FV azuis ficam mais evidentes. Isso é enfatizado em dias de céu claro. Além disso, um dos espelhos d'água possui um chafariz, representado por um círculo laranja na Figura 5. Este é um elemento que chama atenção tanto pelo seu som quanto pela aparência, e, desse ponto de vista, é possível visualizar melhor os sistemas B1 e A2. O Quadro 4 ilustra as vistas dos pontos P1, P2, P3 e do chafariz. Além disso, os sistemas C1 e C2 no bloco C (em construção) causarão entusiasmo e serão destacados do resto dos edifícios devido às suas dimensões. Isso tende a gerar curiosidade e levar os pedestres até as estruturas. Além disso, já que os sistemas C3 e C4 serão compostos por módulos semitransparentes e instalados sobre janelas, os observadores serão persuadidos a olhar entre as células FV (a matriz) dos módulos c-Si para verificar o que está por trás delas, ou seja, a concavidade do bloco C, de onde será possível contemplar novamente os sistemas C1 e C2. Por fim, como o laboratório é um marco para o país e para a cidade de Florianópolis, pode-se afirmar que quem o conhece é capaz de vivenciar seu espaço em sua mente ao passar pelo eBus em uma de suas viagens, pois este possui um design customizado muito reconhecido na cidade. Portanto, é possível dizer que o espaço do laboratório se expande para além do parque tecnológico. Isso também se refere ao conceito de imaginário social.

A interpretação espacial pode ser infinita, pois todas as características das interpretações tradicionais podem influenciar os caminhos das pessoas que vivenciam os espaços. Este trabalho descreveu as principais características da experiência espacial das edificações do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, que possui como principal objetivo ser uma vitrine para a disseminação da integração FV a edificações. Portanto, sua experiência espacial, ou o movimento proporcionado por suas características arquitetônicas, conduz os pedestres a locais onde a visualização das integrações é mais evidente. O convite para entrar na área externa do laboratório é proporcionado pelas características do seu entorno, mas conforme o espectador chega, ele é convidado a se afastar, de forma que a limitação do campo de visão superior não seja um obstáculo para contemplar os sistemas FV. Portanto, os sistemas FV são os protagonistas da experiência espacial, já que controlam os fluxos das pessoas no espaço arquitetônico.

Quadro 3 – Ilustração da interpretação espacial do Laboratório Fotovoltaica/UFSC na distância de 25-7 m.

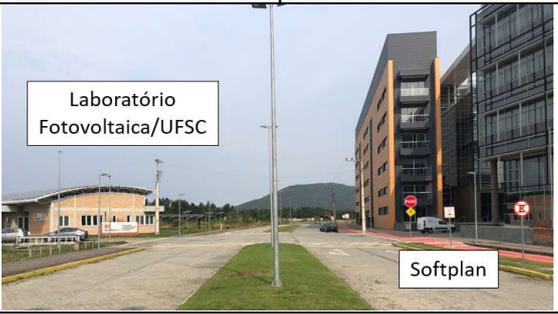
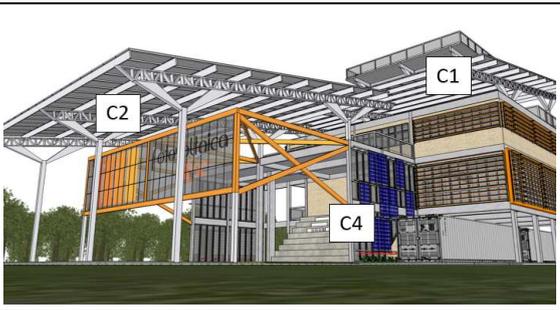
DIREÇÃO	Seta preta	Seta preta
FOTO/IMAGEM		
DIREÇÃO	Seta preta	Seta vermelha
FOTO/IMAGEM		
DIREÇÃO	Seta azul	Seta verde
FOTO/IMAGEM		



Figura 5 - Interpretação espacial do Laboratório Fotovoltaica/UFSC na distância de 7-0 m.

Quadro 4 - Ilustração da interpretação espacial do Laboratório Fotovoltaica/UFSC na distância de 7-0 m.

DIREÇÃO	P1	P1
FOTO/IMAGEM		
DIREÇÃO	P2	P2
FOTO/IMAGEM		
DIREÇÃO	P2	P3
FOTO/IMAGEM		
DIREÇÃO	Chafariz	Chafariz
FOTO/IMAGEM		

4. CONCLUSÕES

Este estudo foi dividido em dois artigos: Parte 1: investigação teórica e Parte 2: estudo de caso. A Parte 1 definiu as interpretações tradicionais da arquitetura FV e propôs um método para identificar como a percepção dos sistemas FV influencia a experiência espacial, ou seja, como eles afetam o movimento das pessoas nos espaços arquitetônicos. Esta é a Parte 2 do trabalho, a qual ilustrou o método estabelecido pela Parte 1 através da interpretação de um estudo de caso, as edificações do Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Laboratório Fotovoltaica/UFSC), em termos tradicionais e espaciais. A interpretação espacial do laboratório se relacionou com as interpretações tradicionais, e demonstrou que os sistemas FV são os protagonistas da experiência espacial, pois as características arquitetônicas das construções conduzem o pedestre a locais onde a visualização dos sistemas é mais evidente. Os resultados devem servir de inspiração para o uso de módulos FV como forma de expressão arquitetônica, melhorando a aceitação de arquitetos sobre o uso da tecnologia em edificações, além de dar aos engenheiros e arquitetos uma visão melhor de como a integração FV pode ser interpretada a partir de teorias de percepção arquitetônica, estreitando a lacuna que existe entre as diferentes profissões.

Agradecimentos

O trabalho contou com o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Os autores também agradecem o apoio financeiro do Ministério da Ciência e Tecnologia - MCTIC, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL por meio de seu programa de P&D, que viabilizou as construções do Laboratório Fotovoltaica/UFSC e equipamentos de pesquisa que deram origem a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Cronemberger, J., Corpas, M. A., Cerón, I., Caamaño-Martín, E., & Sánchez, S. V. (2014). BIPV technology application: Highlighting advances, tendencies and solutions through Solar Decathlon Europe houses. *Energy and Buildings*, 83, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.079>
- Custódio, I., Zomer, C., & Rüther, R. (2020). A worldwide approach to the LESO-QSV method for assessing the visual impacts of solar systems in urban environments. *Solar Energy*, 212(July), 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.067>
- Munari Probst, M. C., & Roecker, C. (2019). Criteria and policies to master the visual impact of solar systems in urban environments: The LESO-QSV method. *Solar Energy*, 184(September 2018), 672–687. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.031>
- Sánchez-Pantoja, N., Vidal, R., & Pastor, M. C. (2018). Aesthetic perception of photovoltaic integration within new proposals for ecological architecture. *Sustainable Cities and Society*, 39, 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.027>
- Santos, I. P. dos. (2013). *Desenvolvimento de Ferramenta de Apoio à Decisão em Projetos de Integração Solar Fotovoltaica à Arquitetura* [Federal University of Santa Catarina]. https://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Isis_Portolan_dos_Santos.pdf
- Scognamiglio, A. (2021). A trans-disciplinary vocabulary for assessing the visual performance of BIPV. *Sustainability*, 13(10), 38. <https://doi.org/10.3390/su13105500>
- Zomer, C., Custódio, I., Antonioli, A., & Rüther, R. (2020). Performance assessment of partially shaded building-integrated photovoltaic (BIPV) systems in a positive-energy solar energy laboratory building: Architecture perspectives. *Solar Energy*, 211(September), 879–896. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.026>
- Zomer, C., Custódio, I., Goulart, S., Mantelli, S., Martins, G., Campos, R., Pinto, G., & Rüther, R. (2020). Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre. *Solar Energy*, 212(November), 258–274. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.080>

THE ART AND SCIENCE OF INTEGRATING PHOTOVOLTAICS IN THE BUILT ENVIRONMENT – PART 2: CASE STUDY

Abstract. *To explore the maximum potential of integrating photovoltaics in the built environment, technical and non-technical characteristics must be considered. Regarding non-technical issues, it is necessary that architects and engineers know how the use of photovoltaic modules in buildings can be interpreted from theories of architectural perception. The tradition of photovoltaic architectural criticism is objective and explores the visual characteristics of the buildings. However, the essence of architecture is the void of space which people experience. This study is divided into two articles: Part 1: theoretical investigation and Part 2: case study. Part 1 has defined the traditional interpretations of photovoltaic architecture and proposed a method to identify how the perception of photovoltaic systems influences the spatial experience. This is the Part 2 of the work, which demonstrates the application of the method to a case study, the buildings of the The Solar Energy Research Laboratory at Universidade Federal de Santa Catarina (Fotovoltaica/UFSC Laboratory). The results intend to serve as inspiration, contributing for the expansion of the use of photovoltaic modules as a way of architectural expression and for the reduction of the gap that exists between scientists and architects.*

Key words: *Photovoltaic integration in the built environment, Aesthetics evaluation, Interpretations of architecture.*