

ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL DA INTEGRAÇÃO FOTOVOLTAICA NA FACHADA DE UMA EDIFICAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA

Midori Ueoka Carvalho – midoriueoka@hotmail.com

Programa de Pós Graduação de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, Brasil

Carminda Célia Moura de Moura Carvalho

Filipe Menezes de Vasconcelos

Jackqueline Cristina do Nascimento Azevedo

Ayrton Lucas Lisboa do Nascimento

Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, Brasil

Resumo. O estudo de novas ações e estratégias de integração fotovoltaica (FV) além das coberturas pode contribuir para a ampliação da geração de energia FV, mesmo que o sistema não seja capaz de gerar a máxima energia, a integração é vantagem pois apresenta o cumprimento de requisitos estéticos e o conforto ambiental para a edificação. Desse modo, o módulo FV pode substituir materiais tradicionais e ainda gerar energia para o consumo. O objetivo deste trabalho é apresentar a análise técnica com relação ao desempenho energético e térmico, e a análise ambiental de um sistema fotovoltaico (SFV) integrado na fachada desempenhando dupla função: de geração de energia e de fachada ventilada, em uma edificação universitária localizada na cidade de Belém-PA-Brasil. Para o desempenho energético foram realizadas simulações utilizando o software PVSyst com 04 tecnologias de módulos FV: de silício monocristalino (m-Si), de telureto de cádmio (CdTe), de silício amorfo (a-Si) e de disseleneto de cobre, índio e gálio (CISG), obtendo valores para a taxa de desempenho (PR) muito próximos do valor de referência adotada para a elaboração do mapa do potencial de geração solar FV do Atlas Brasileiro de Energia Solar; para o desempenho térmico utilizou-se o software Energyplus e constatou-se que com a integração da fachada FV ventilada na edificação, apresentou uma redução média na temperatura interna entre 1 °C e 1,80 °C nos horários entre 14:00h e 18:00h; na análise ambiental foi calculada a redução de emissão de gases do efeito estufa (GEE) considerando a utilização da energia FV em substituição às fontes de geração de energia utilizadas na matriz energética brasileira. Os resultados desse estudo para integração de fachadas FV na Amazônia corroboraram com os realizados em outras regiões do Brasil com características climáticas diferentes e em países onde a tecnologia já se encontra em estágio mais avançado.

Palavras-chave: Fachada Fotovoltaica Ventilada, Desempenho Energético e Térmico, Análise Ambiental.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as fontes de energia renovável a energia solar fotovoltaica é a que mais apresenta possibilidades de integração com a envoltória das edificações (Dávi, 2013). Essa é uma realidade mundialmente considerada, em razão de seu avanço tecnológico e facilidade de instalação em edificações, principalmente em centros urbanos.

As edificações consomem, globalmente, mais de um terço do consumo final de energia e respondem por aproximadamente um quinto das emissões totais de gases de efeito estufa (WBCSD, 2020). Além disso, é importante ressaltar que, acompanhando as tendências mundiais, os custos de produção, transmissão e distribuição, bem como as tarifas pelo serviço de fornecimento de energia aos consumidores finais, vêm aumentando significativamente (Dirk e Fouquet, 2017; White Paper, 2020; Fioravante, 2022 e Guan *et. al*, 2023), enquanto os custos de instalação de equipamentos solares FV estão diminuindo rapidamente (Echegaray, 2014).

Os módulos podem ser sobrepostos ao sistema de vedação da edificação, sendo denominados de BAPV (Building Applied Photovoltaics), mais comuns em lajes ou telhados, seguindo a orientação e inclinação da edificação, ou substituir elementos construtivos e/ou revestimentos da edificação, chamados de BIPV (Building Integrated Photovoltaics), integrados de forma mais harmônica com a arquitetura. Nos últimos anos tem havido um crescente interesse na construção de sistemas fotovoltaicos integrados (BIPV) como alternativa para suprir a demanda energética de áreas urbanas, pois essa tecnologia apresenta além da vantagem da contribuição com a geração de energia, propriedades dos materiais de construção convencionais, como proteção contra intempéries e ruídos, privacidade e isolamento térmico (Jelle, *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2018).

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Sistemas fotovoltaicos em fachadas

Estudos como os realizados por Cronemberger, *et al.*, (2012) em 78 cidades brasileiras cujas latitudes variam de 0° a 30°, forneceram ferramentas para avaliar as possibilidades de adequação dos módulos FV nos envelopes dos edifícios, para diferentes ângulos de inclinação e orientação. Os resultados indicaram que para a cidade de Belém quanto ao uso do recurso solar nas fachadas leste/oeste apenas 56,3% da irradiação global pôde ser obtida com relação a uma superfície inclinada orientada otimamente, porém verificou-se que esse percentual correspondeu a 1.039 kWh/m², uma quantidade consideravelmente alta de recurso solar em termos absolutos, 13% menor que a irradiação solar anual esperada em uma fachada sul em Madri na Espanha (1.194 kWh/m²) e 14% a mais que em uma fachada sul em Munique, na Alemanha (891 kWh/m²).

Salameh *et al.* (2020) analisaram a carga de resfriamento em edifícios comerciais de 3 andares nos Emirados Árabes Unidos usando o sistema integrado em janela FV na fachada, para minimizar a carga de resfriamento e maximizar a produção de energia elétrica. O primeiro cenário é o caso base, onde é utilizado um vidro duplo, enquanto no segundo cenário é usado um vidro produzido a partir de módulos FV. Os resultados mostraram que com o uso do sistema, aumentou a economia de energia em 27,7% considerando o uso de aparelhos de refrigeração eficientes.

No ano de 2021, módulos fotovoltaicos foram instalados na fachada do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (2022). O sistema é capaz de produzir 148,2 MWh/ano utilizando 430 módulos de silício monocristalino (m-S com a potência nominal de 400 W e três inversores fotovoltaicos com a potência de 50 kW, gerando economia financeira e aumentando a eficiência energética como um todo para a edificação (HUCFF, 2022).

2.2 Análise ambiental

Chukwuemeka e Okoroh (2015), avaliaram e quantificaram o impacto ambiental com a integração da tecnologia FV em escritórios comerciais no Reino Unido, para justificar um investimento em projeto de energia FV durante um período de um ano, através da quantificação do dióxido de carbono (CO₂) evitado. Foram gerados gráficos com valores aproximados da quantidade em kg de CO₂ evitado pelo uso da tecnologia FV em comparação com os combustíveis fósseis na geração de eletricidade da rede. Em termos de proteção ambiental, o SFV integrado apresentou desempenho máximo no período do verão com uma capacidade de redução total de até 12,88 tCO₂/ano.

Lira *et al.* (2019) analisaram a contribuição da geração distribuída (GD) dos SFV conectados à rede elétrica, que proporcionam a redução das emissões de CO₂ no estado do Ceará, utilizando informações de potência instalada da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), dados de energia gerada estimados e as emissões de CO₂ evitadas, a partir do uso de GD por fonte solar FV considerando a localização e a distribuição, além do perfil do consumidor, incluindo classe, modalidade, dentre outros, no período de 2013 à 2017. De acordo com os dados obtidos verificou-se um aumento expressivo de 682% das emissões de CO₂ por ano evitado, no período de 2015 à 2016, assim como o aumento de energia gerada através de SFV conectados à rede elétrica no estado do Ceará, reflexo da elevação absoluta da população e do maior consumo *per capita* desse tipo de matriz energética ao longo dos anos.

É importante salientar que a utilização de SFV em fachadas não é a melhor opção de implantação para o Brasil em virtude de as latitudes serem baixas, variando de 0° (ao norte) até 32° (ao sul do Brasil). Porém no caso de áreas urbanas, nem sempre é possível integrar os módulos FV com os melhores ângulos de inclinação e orientação, pois há muitos outros fatores que arquitetos e engenheiros devem considerar quando se permite a utilização de um SFV, como o contexto em que a edificação está inserida, os entornos, regulamentos urbanos, forma e função do edifício, sistemas construtivos ou materiais acessíveis, sombreamentos, ventilação passiva e outros.

Diante do exposto, apresenta-se neste trabalho um estudo considerando a aplicação de geração de energia FV em uma edificação localizada na cidade de Belém-PA, cujas coordenadas geográficas são de latitude 1°28'16.61"S e de longitude 48°26'59.19"O, localizada na região amazônica, caracterizada predominantemente pelo clima equatorial úmido, com temperaturas elevadas durante todo o ano e marcadas pelos altos índices de chuva. Para a análise do desempenho energético foram simulados a integração FV nas fachadas oeste e norte utilizando quatro tecnologias de módulos FV, e para a análise térmica foi simulada a integração FV desempenhando a função de uma fachada ventilada. A análise ambiental calculou a efetividade dos benefícios ao meio ambiente com a redução da emissão de GEE, quando substituídas as fontes de energia comumente utilizadas na matriz energética brasileira pelo SFV.

3. MÉTODO

Este trabalho foi dividido conforme metodologia proposta na Fig.1.

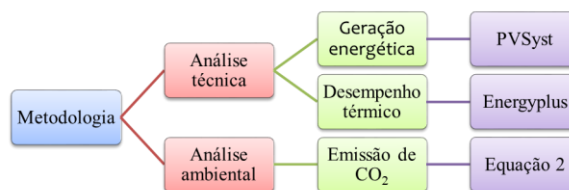


Figura 1 - Fluxograma da metodologia proposta

O estudo foi realizado em uma unidade acadêmica de formação superior em graduação e pós-graduação, o Instituto de Ciências Jurídicas (ICJ), localizada no campus profissional de uma cidade universitária. O partido arquitetônico da edificação é formado por dois blocos medindo 854,10 m² (direita) e 693,93 m² (esquerda), totalizando uma área de 1.548,03 m², com pé direito total de 9,60 m. Para esse estudo, foi considerada a integração FV nas fachadas oeste e norte do bloco à direita, conforme apresentado na Fig. 2.

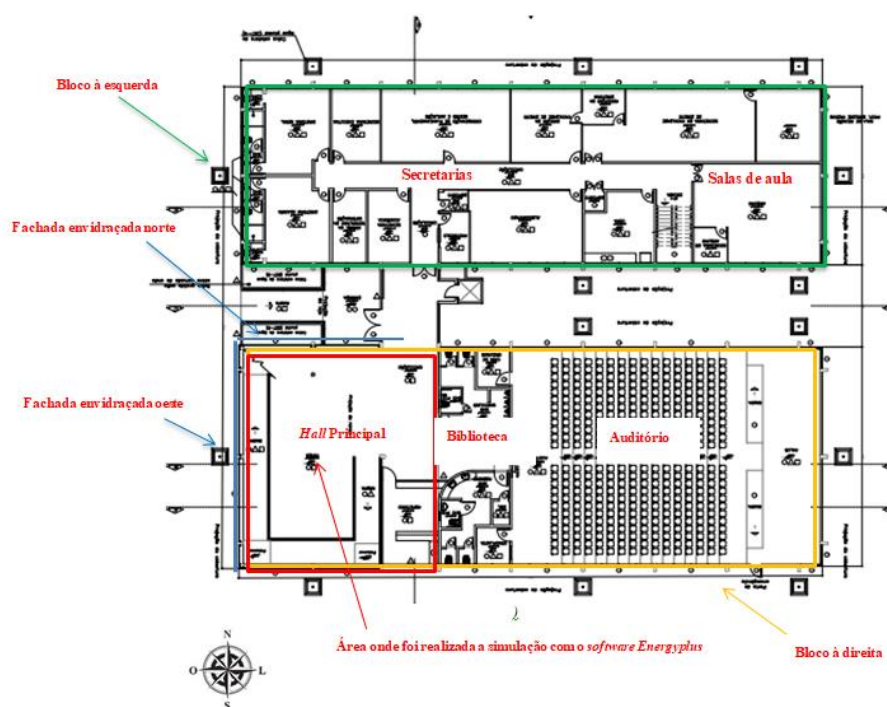


Figura 2 - Planta baixa do pavimento térreo.

A fachada oeste do bloco à direita é envidraçada ao longo de toda a sua extensão, assim como parte de sua lateral adjacente à direita e à esquerda, com janelas fixas de vidro comum incolor de 6 mm e fator solar de 0,823 voltadas para as orientações de maior incidência de irradiação solar direta, não permitindo a circulação do vento e comprometendo o conforto térmico interno do ambiente, contribuindo para o aumento do consumo de ar-condicionado. Dessa maneira, se faz necessária uma alteração na arquitetura convencional existente, direcionada a um possível projeto de readequação, propiciando a melhoria do desempenho térmico e da eficiência energética. No estudo em questão será considerada a integração FV nas fachadas oeste e norte do bloco à direita, desempenhando a função de fachadas ventiladas, reduzindo a incidência de radiação solar direta nas superfícies da edificação.

3.1 Análise para simulação da geração e desempenho energético

Para a realização das simulações da geração FV foram utilizados dois softwares, sendo o Sketchup 2021 para a simulação em 3D e o PVSyst 7.2 para o dimensionamento do SFV e obtenção de parâmetros de geração e dos sombreamentos na localidade.

Para o início da simulação foram selecionados os dados de latitude e longitude da edificação, que são 1°28'16,61"S e 48°26'59,19"O, respectivamente. Em seguida, foram considerando a representação geográfica utilizando o Google Maps e a planta baixa do edifício, desconsiderando-se as vegetações e os postes de energia elétrica nos arredores.

Para as análises da simulação do bloco à direita foram utilizadas as dimensões de 16,11 m x 10,79 m na fachada oeste e 4,48 m x 10,79 m na fachada norte, formando com o nível da superfície horizontal o ângulo de 90°. O *software* PVSyst fornece informações sobre a energia gerada pelos módulos nas fachadas, o quantitativo do SFV e suas devidas distribuições em cada superfície foram dimensionados pelo *plugin* Skelion, conforme a variação dos tamanhos dos módulos FV e de acordo com a tecnologia adotada.

Para avaliar o funcionamento destes sistemas é relevante calcular a taxa de desempenho (PR) calculado a partir da Eq. (1) que expressa o rendimento global do sistema considerando perdas ópticas, isto é, os sombreamentos e sujidades; além de considerar perdas do conjunto, tal como as perdas pela conversão fotovoltaica, envelhecimento do sistema e a qualidade dos módulos fotovoltaicos; e considera as perdas do sistema, tal como a eficiência do inversor fotovoltaico como também as perdas ôhmicas e de temperatura. A partir disso, realizou-se possíveis implementações apresentadas em quatro cenários, conforme a Fig. 3.

$$PR = \frac{Energia_{injetada}}{(GlobInc \times P_{nomPV})} \quad (1)$$

Onde:

Energia_{injetada}: Trata-se da energia produzida utilizada;

GlobInc: É a irradiação incidente aos módulos fotovoltaicos;

P_{nomPV}: É o valor de identificação dos módulos fotovoltaicos.

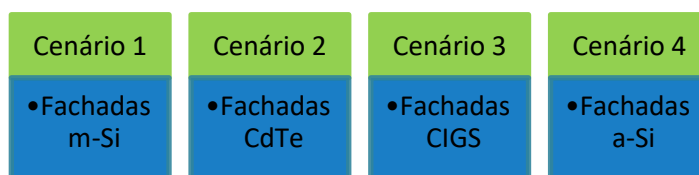


Figura 3 - Cenários para simulações do desempenho energético, utilizando 4 tecnologias de módulos FV.

Onde:

m-Si: silício monocristalino;

CdTe: telureto de cádmio;

a-Si: silício amorfo;

CIGS: disseleneto de cobre, índio e gálio.

A Fig. 4. representa a simulação da integração dos módulos FV como fachada dupla a oeste e norte no bloco à direita, utilizando a tecnologia de m-Si.



Figura 4 - Vista da simulação da integração dos módulos FV no bloco à direita como fachada dupla à oeste (frontal) e norte (lateral esquerda), utilizando a tecnologia de m-Si.

Os detalhes dos SFV simulados para os cenários 1, 2, 3 e 4, são apresentados nas Tab. 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Tabela 1 - Dados referentes à simulação com o PVSyst para o Cenário 1 com a tecnologia de m-Si.

Cenário 1	Fachada oeste	Fachada norte	Total
Modelo do módulo fotovoltaico	JKM550M	JKM550M	
Tecnologia do módulo FV	m-Si	m-Si	
Quantidade de módulos	42	12	54
Inclinação (em graus)	90°	90°	
Orientação (em graus)	96°	6°	
Eficiência nominal do módulo	21,33%	21,33%	
Pot. Nominal Fotovoltaica	23,10	6,60	29,70
Modelo do inversor	Huawei SUN2000	Huawei SUN2000L	
Quantidade de inversores	1	1	
Pot. Nominal do inversor	23	5	28
Módulos em série	7	3	
Arranjos Fotovoltaicos	6	4	
Energia produzida (MWh/ano)	19,18		
Taxa de desempenho (PR)	66,90%		

Tabela 2 - Dados referentes à simulação com o PVSyst para o Cenário 2 com a tecnologia de CdTe.

Cenário 2	Fachada oeste	Fachada norte	Total
Modelo do módulo	First Solar - FS-641	First Solar - FS-6415	
Tecnologia do módulo FV	CdTe	CdTe	
Quantidade de módulos	39	9	48
Inclinação (em graus)	90°	90°	
Orientação (em graus)	96°	6°	
Eficiência nominal do módulo	16,8%	16,8%	
Pot. Nominal Fotovoltaica	16,19	3,73	19,92
Modelo do inversor	ST15000TL	Platinum 3801 TLD	
Quantidade de inversores	1	1	
Pot. Nominal do inversor	15	3,30	18,30
Módulos em série	3	3	
Arranjos Fotovoltaicos	13	3	
Energia produzida (MWh/ano)	14,06		
Taxa de desempenho (PR)	72,65%		

Tabela 3 - Dados referentes a simulação com o PVSyst para o Cenário 3 com a tecnologia de CIGS.

Cenário 3	Fachada oeste	Fachada norte	Total
Modelo do módulo fotovoltaico	CIGS-2850A1	CIGS-2850A1	
Tecnologia do módulo FV	CIGS	CIGS	
Quantidade de módulos	39	24	63
Inclinação (em graus)	90°	90°	
Orientação (em graus)	96°	-174°	
Eficiência nominal do módulo	15,3%	15,3%	
Pot. Nominal Fotovoltaica (kWp)	11,12	6,84	17,96
Modelo do inversor	SUN2000- 10KTL-M0	SUN2000- 10KTL-M0	
Quantidade de inversores	1	1	
Pot. Nominal do inversor (kWca)	10	4	
Módulos em série	13	12	
Arranjos Fotovoltaicos	3	2	
Energia produzida (MWh/ano)	13,16		
Taxa de desempenho (PR)	82,62%		

Tabela 4 - Dados referentes a simulação com o PVSyst para o Cenário 4 com a tecnologia de a-Si.

Cenário 4	Fachada	Fachada norte	Total
Modelo do módulo fotovoltaico	Full Size	Full Size MBTF 400	
Tecnologia do módulo FV	a-Si	a-Si	
Quantidade de módulos	14	10	24
Inclinação (em graus)	90°	90°	
Orientação (em graus)	96°	174°	
Pot. Nominal Fotovoltaica (kWp)	5,6	4	9,6
Modelo do inversor	SUN2000L-	SUN2000L-5KTL	SUN2000L-
Quantidade de inversores	1	1	
Pot. Nominal do inversor (kWca)	5	5	
Módulos em série	2	2	
Arranjos Fotovoltaicos	7	7	
Energia produzida (MWh/ano)	6,3		
Taxa de desempenho (PR)	74,87%		

3.2 Análise para simulação do desempenho térmico

Para o estudo das fachadas ventiladas considerou-se apenas o *hall* principal do ICJ condicionado e dividido em duas zonas térmicas. A simulação do desempenho térmico com a integração FV nas fachadas ventiladas foi obtida por meio de dados de saída do *software* EnergyPlus, adotando-se como critério de avaliação as diretrizes da nova Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C, 2022), conforme os anexos A e C, no que diz respeito a valores de densidade de ocupação, de equipamentos elétricos e de iluminação artificial, considerando a temperatura de condicionamento de ar de 24°C. Esses dados são apresentados na Tab.5, de acordo com as características físicas dos materiais encontrados na NBR 15220:2 (ABNT, 2023).

Tabela 5 - Parâmetros da INI-C presentes nas tabelas do Anexo A e C, conforme a tipologia para edifícios educacionais de nível superior.

Envoltória		
Sistemas Construtivos	Transmitância	Absortância
Forro de gesso de 3 cm	2,82	0,3
Forro de grelha metálica	3,71	0,6
Parede de alvenaria de 15cm com tijolo de 6 furos 9x14x19 cm e	2,014	0,5
Parede de alvenaria de 20cm com tijolo de 6 furos 9x14x19 cm e	1,82	0,7
Parede de alvenaria com pastilhas cerâmicas 15.5cm internas e	1,95	0,7
Parede de alvenaria com pastilhas cerâmicas 20.5cm internas e	1,82	0,7
Parede de drywall em light steel frame. 7 cm	2,23	0,7
Piso acarpetado de 15cm	2,89	0,7
Piso com porcelanato sobre laje de concreto e contrapiso. 10cm	3,92	0,7
Telha termoacústica sanduiche	4,03	0,5
Fenestracões		
Nome	Transmitância	Fator Solar
Vidro	5,68	0,823
Materiais de esquadrias		
	Transmitância Térmica	
Alumínio	4,17	
Madeira	1,32	
Modelagem do Solo		
Método:	Finite Difference	
Condutividade térmica	1	
Densidade	1250	
Calor específico	1200	
Moisture Content Volume Fraction	30	
Moisture Content Volume Fraction at saturation	50	
Sistema de Condicionamento de Ar		
Condicionamento de ar Split	COP = 2,6	
Quantidade de máquinas	3 unid.	
Agenda de operação	Op: 8:00 - 20:00	
Minimum Outdoor Air Flow Rate	0,031	
Supply fan Maximum Flow Rate	0,611	
Pressão da ventilação	100 pa	
Eficiência da Ventilação	65%	
Capacidade da Evaporadora	58000 BTU	
Potência Elétrica	6047,69 W	
Ganhos da Edificação		
Densidade de Ocupação	1,5 m ² /pessoa	
Renovações de ar	1/h	

A modelagem 3D e as configurações dos valores de condutividade, espessura e densidade dos materiais construtivos como paredes, esquadrias, telhado, elementos fotovoltaicos, sistemas de iluminação, ar-condicionado e equipamentos foram realizadas com o *software* Open Studio 1.1.0, em interface com o SketchUp.

As informações referentes aos horários de utilização dos equipamentos elétricos, à iluminação, às atividades desenvolvidas na edificação, às horas de ocupação do edifício e ao sistema de condicionamento de ar foram obtidas a partir de levantamento in-loco. Para o cálculo do fluxo de ar, ou seja, da infiltração que transita através das frestas no ambiente, foram consideradas as aberturas das janelas e portas e a definição do arquivo climático de acordo com os parâmetros da INI-C presentes nas tabelas do Anexo A, conforme a tipologia para edifícios educacionais de nível superior (PBE Edifica, 2022). A modelagem do solo foi obtida a partir de um documento-manual disponibilizado pelo LABEEE (UFSC, 2019).

3.3 Análise ambiental de emissão de gases de efeito estufa (GEE)

A análise ambiental também deve ser considerada, pois a substituição das fontes de energia comumente utilizadas na matriz energética brasileira pelo SFV, contribui para a mitigação dos índices de poluição e da emissão dos GEE, impactando no bem-estar social e ambiental. Segundo IRENA (2017a), estima-se que a geração de energia FV já reduziu globalmente entre 200 e 300 milhões de toneladas anuais de CO₂. Em 2021 a energia solar ajudou o Brasil a reduzir suas emissões de GEE em 19,6 milhões de toneladas (National Geographic, 2022).

Esse impacto é mensurado por meio do cálculo do fator de emissão de CO₂ conforme a Eq. (2), ou seja, o quanto o Sistema Interligado Nacional (SIN) deixa de emitir os GEE com a instalação dos SFV (IPCC, 2023), obtidos através dos seguintes fatores: eletricidade produzida (kW/h), nesse caso considerou-se a implementação para cada cenário e o fator de emissão de 0,0426 tCO₂/MWh para o ano base de 2022 obtido através do relatório mensal do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCTI, 2023), cujo objetivo é estimar a quantidade de CO₂ associada a uma determinada fonte de geração de energia elétrica.

$$V.CO_2Evi.(kg) = \text{Energia Elétrica Gerada pelo SFV (kWh)} \times 0,0426 \text{ tCO}_2/\text{MWh} \quad (2)$$

Onde:

$V.CO_2Evi.(kg)$ é o valor de gás carbônico evitado em kg.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise realizada pelo software PVSyst fornece a informação de quanto cada sistema produzirá de energia em MWh/ano. Dessa forma, será realizada uma análise comparativa para cada cenário proposto no capítulo anterior, considerando um consumo médio para o edifício de 193,45 MWh/ano, obtido a partir dos dados de consumo do período de julho de 2018 a junho de 2019 fornecidos pelo Sistema de Gestão de Energia Elétrica da Universidade Federal do Pará (SISGEE, 2023), apresentados na Fig. 5.

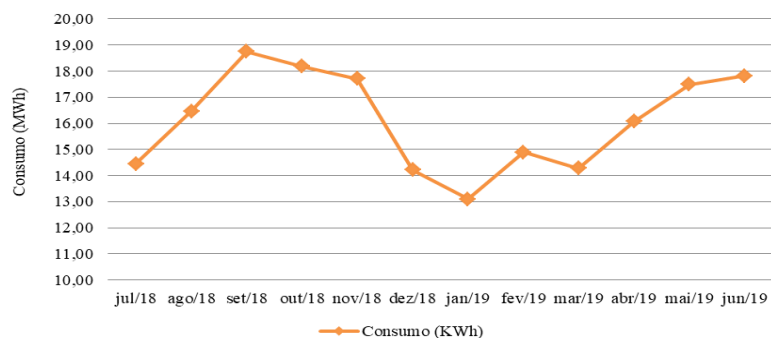


Figura 5 - Dados de consumo da edificação durante o período de julho de 2018 a junho de 2019 obtidos por meio do SISGEE.

A energia em MWh/ano que o sistema FV da fachada norte e oeste é capaz de gerar e a taxa de desempenho (PR) que determina o potencial da geração FV utilizando as tecnologias de m-Si, CdTe, a-Si e CIGS respectivamente, são apresentados nas Fig. 6 e 7. Conforme os dados de consumo durante o período de julho de 2018 a junho de 2019, obtidos por meio do Software do Sistema de Gestão de Energia Elétrica (SISGEE, 2023), fornecidos pelo Projeto de Gestão de Energia e Eficiência Energética (PGEEE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), o edifício demanda em média 193,45 MWh/ano, dessa maneira o sistema FV das fachadas norte e oeste juntas são capazes de atender a 9,91%, 7,27%, 3,25% e 6,80% da demanda energética da edificação.

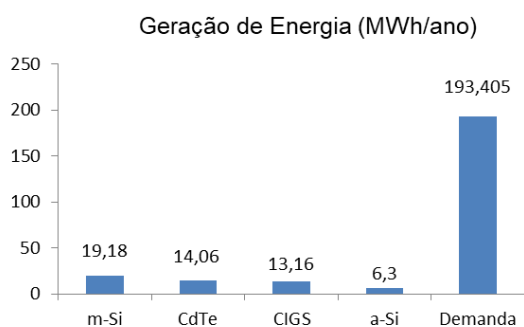


Figura 6 - Energia gerada com o sistema FV.

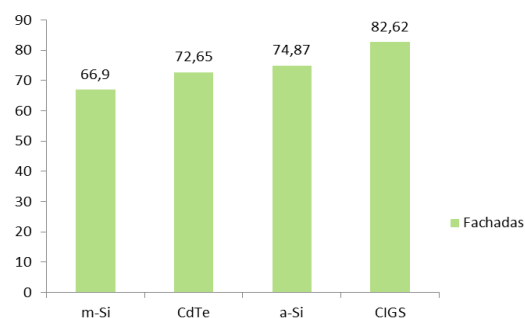


Figura 7 - Taxa de desempenho (PR) do sistema FV.

Com a simulação foi obtido em um período anual a temperatura por hora de bulbo seco (TBS) e a temperatura média interna no hall com e sem o SFV. De acordo com os dados de saída da simulação utilizando o software EnergyPlus, a temperatura média interna no hall nos horários entre 14:00h e 18:00h sem a fachada FV variou entre 29,83 °C e 36,99 °C; por outro lado, com a integração da fachada FV ventilada, a variação média da temperatura ficou entre 28,82 °C e 35,68 °C, atingindo uma redução média diária de temperatura entre 1°C e 1,80°C no ambiente interno, conforme demonstrado na Fig. 8. Dessa maneira, a integração da fachada FV ventilada pode contribuir para a melhora do conforto térmico e consequentemente uma redução funcional e econômica dos aparelhos de ar-condicionado.

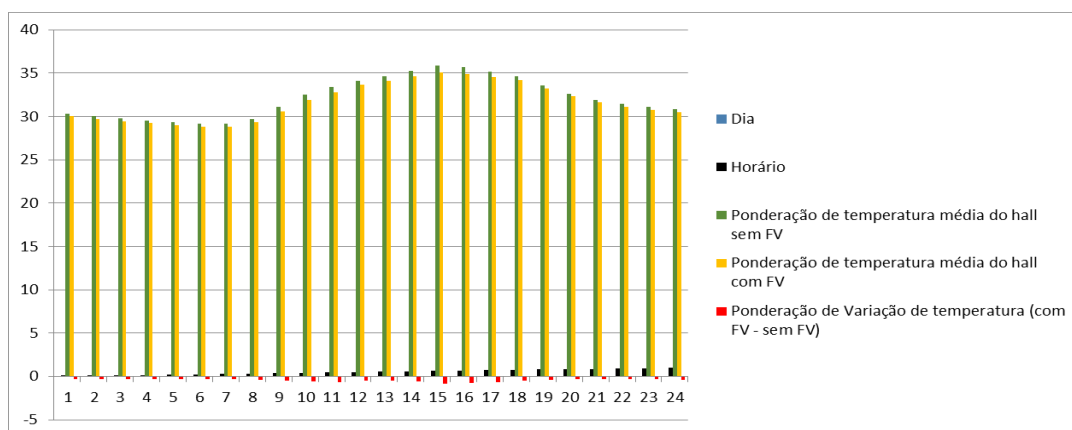


Figura 8 - Gráfico da temperatura interna e da variação média diária com e sem a fachada FV ventilada.

Os resultados do $V.CO_2Evi.(kg)$ obtidos para cada tecnologia FV estudada, conforme a Eq. 2 (IPCC, 2023), são apresentados na Tab. 6.

Tabela 6- Cálculo do valor de carbono evitado em (kg) por tecnologia FV.

Tecnologia FV	Energia Elétrica Gerada pelo SFCR (kWh/mês)	Fator de Emissão (tCO ₂ /MWh)	V.CO ₂ Evi(kgCO ₂ /mês)
m-Si	1598,33	0,0426	68,08
CdTe	1171,66	0,0426	49,91
a-Si	525	0,0426	22,36
CIGS	1094,16	0,0426	46,61

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de SFV integrados nas fachadas, desempenhando a função de fachadas ventiladas, em uma edificação pública educacional localizada na região Norte do Brasil, cujo clima é o equatorial, com alta incidência de irradiação solar durante todo o ano e marcada pelos altos índices de chuva. Os resultados simulados

na análise para obtenção de dados de geração de energia FV utilizando o *software* PVSyst com a tecnologia de a-Si apresentou uma taxa de PR solar nas fachadas de 74,87%, enquanto a tecnologia de m-Si obteve o menor PR de 66,90% de radiação nas fachadas. A fachada de CdTe apresentou PR de 72,65% e a fachada com CIGS apresentou o melhor PR com 82,62%. Dependendo da tecnologia utilizada poderá obter um PR próximo ou acima da referência de 80% adotada para a elaboração do mapa do potencial de geração solar FV do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017) possibilitando a viabilidade energética para a integração em fachadas na região. É importante salientar que deve ser considerada uma análise do valor de mercado e disponibilidade comercial das tecnologias de módulos FV.

O método de modelagem com fachada ventilada FV utilizando o *software* EnergyPlus avaliou os ganhos térmicos relativos à transmissão da radiação solar através das superfícies com e sem o SFV nas fachadas oeste e norte. Os resultados demonstraram uma redução média diária por hora na temperatura interna de 1,0°C a 1,8°C. A integração do SFV nas fachadas oeste e norte envidraçadas desempenhando a função de fachadas ventiladas, criou uma barreira para a radiação solar direta, reduzindo a transmissão de calor para o ambiente interno, formando uma cavidade intermediária por onde o ar circula, nesse caso, com 15 cm de afastamento. Essa camada envolve fenômenos físicos, através do processo de convecção, principalmente nos horários de maior incidência solar (14:00h às 18:00h), melhorando o conforto ambiental, além de influenciar na redução da carga térmica necessária a ser vencida com a utilização dos aparelhos de ar-condicionado.

Por fim, neste trabalho verificou-se também a análise ambiental através da contribuição dos SFV para a mitigação das emissões de CO₂, através da equação do valor do carbono evitado, resultando em uma redução de 68,08 kgCO₂/mês, 49,91 kgCO₂/mês, 22,36 kgCO₂/mês e 46,61 kgCO₂/mês correspondentes as tecnologias de m-Si, CdTe, a-Si e CIGS, demonstrando que a integração com o SFV é uma importante aliada para a mitigação da emissão dos índices de poluição e gases do efeito estufa (GEE), impactando no bem-estar social e ambiental global.

Dessa maneira, o estudo realizado com a integração da geração de energia FV nas fachadas ventiladas, poderá servir de base para outros estudos, potencializando a contribuição para a mitigação dos impactos ambientais com a ampliação da capacidade de geração de energia FV nas fachadas, assim como os estudos realizados em regiões de clima quente e de grande incidência solar que obtiveram com a geração de energia FV nas fachadas, uma quantidade consideravelmente alta do recurso solar, a redução da temperatura interna, além da redução de emissão de gases do efeito estufa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)-Brasil, pela concessão de uma bolsa de mestrado, ao Sistema de Gestão de Energia Elétrica (SISGEE) e ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) pelo apoio de toda a equipe e estrutura laboratorial concedida para elaboração das simulações computacionais.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Desempenho térmico de edificações: Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. (NBR 15220-2). 2008.
- Chukwumeka, Uchenna Ikedi, Okoroh, Michael I. Monitoring results of CO₂ avoidance with an 8.5kWh solar electric generator integrated in a high rise commercial building in UK. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Volume 4, Issue 2, pages 189-201. 2015.
- Cronemberger, Joara, Caamaño-Martín, Estefanía, Sánchez, Sergio Vega. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil, *Energy and Buildings*, Volume 55, 2012, Pages 264-272.
- Dávi, G. A. Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR). Florianópolis, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- Dirk, Jan Van De Ven, Fouquet, Roger. Historical energy price shocks and their changing effects on the economy, *Energy Economics*, Volume 62, 2017, Pages 204-216.
- Echegaray, F. Understanding stakeholders' views and support for solar energy in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 63, p. 125-133, 2014.
- Fioravante, Dea (2022). O preço da energia: O descontrole do abuso de controle. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11423>. Acesso em fevereiro de 2023.
- Guan, Y.; Yan, J.; Shan, Y.; Zhou, Y.; Hang, Y.; LI, R.; Liu, Y.; Liu, B.; Nie, Q.; Bruckner, B.; Feng, K.; Hubacek, K (2023). Burden of the global energy price crisis on households. *Nature Energy*, 8, 304-316. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01209-8>. Acesso em abril de 2023.
- Hospital Universitário Clementino Fraga Filho. Disponível em: <https://www.hucff.ufrj.br/sistema-de-energia-sustentavel/>. Acesso em março de 2023.
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>. Acesso em fevereiro de 2023.

- IRENA. International Renewable Energy Agency. Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017a. Disponível em: < https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REthinking_Energy_2017.pdf >. Acesso em fevereiro de 2023.
- Jelle, B.P., Breivik, C., Rokenes, H.D. Building integrated photovoltaic products: a state-of-the-art review and future research opportunities, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 100 (2012) 69–96.
- Lira, Marcos Antônio Tavares; Melo Marina Larisse Da Silva; Rodrigues, Larissa Mendes; De Souza, Tatiana Ribeiro Militão. "contribuição dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica para a redução de CO₂ no estado do Ceará." *Revista brasileira de meteorologia*, 34.3 (2019): 389. Web.
- MCT. Ministério de ciência, tecnologia e inovações. Fator Médio Mensal (tCO₂/MWh). Disponível em: < <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/index.html> >. Acesso em fevereiro de 2023.
- National geographic, 2021. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/#showNewsletter=true>. Acesso em fevereiro de 2023.
- PBE edifica, disponível em <https://www.pbeedifica.com.br/nova-ini>. Acesso em dezembro de 2022.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Rüther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. (2017). Atlas brasileiro de energia solar – 2ª Edição, São José dos Campos, INPE.
- Salameh, Tareq; Assad Mamdouh El Haj; Tawalbeh, Muhammad; Ghenai, Chaouki; Merabet, Adel; Öztop, Hakan F. Analysis of cooling load on commercial building in UAE climate using building integrated photovoltaic façade system. *Solar Energy* 199, 617-629. 2020.
- SISGEE. Software sistema de gestão de energia elétrica, disponível em: <https://proceedings.science/sbai-2019/trabalhos/modelagem-e-validacao-de-um-sistema-multiplataforma-para-gerenciamento-de-energi?lang=pt-br>. Acesso em janeiro de 2023.
- UFSC, Universidade federal de Santa Catarina, disponível em: [https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Manual_GroundDmain_E%2Bversao9.0.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Manual_GroundDomain_E%2Bversao9.0.pdf). Acesso em abril de 2023.
- WBCSD, World business council for sustainable development. Energy efficiency in buildings. Disponível em: <https://www.wbcd.org/>. Acesso em agosto de 2023.
- White paper, Instituto acende Brasil, Edição 22/ janeiro de 2020. Disponível em: <http://www.acendebrasil.com.br/>. Acesso em abril de 2023.

ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC INTEGRATION IN FACADE IN A BUILDING IN THE AMAZON REGION

Abstract. *The study of new actions and strategies for photovoltaic (PV) integration in addition to roofs can contribute to the expansion of PV energy generation, even if the system is not capable of generating maximum energy, integration is an advantage as it meets requirements aesthetics and environmental comfort for the building. In this way, the PV module can replace traditional materials and still generate energy for consumption. The objective of this work is to present the technical analysis in relation to energy and thermal performance, and the environmental analysis of a photovoltaic system (SFV) integrated into the facade performing dual functions: energy generation and ventilated facade, in a university building located in city of Belém-PA-Brazil. For energy performance, simulations were carried out using the PVSyst software with 04 PV module technologies: monocrystalline silicon (m-Si), cadmium telluride (CdTe), amorphous silicon (a-Si) and copper indium diselenide and gallium (CISG), obtaining values for the performance rate (PR) very close to the reference value adopted for preparing the map of solar PV generation potential from the Brazilian Solar Energy Atlas; for thermal performance, the Energyplus software was used and it was found that with the integration of the ventilated PV facade in the building, there was an average reduction in internal temperature between 1°C and 1,80°C at times between 2:00 pm and 6:00 pm ; In the environmental analysis, the reduction in greenhouse gas (GHG) emissions was calculated considering the use of PV energy to replace the energy generation sources used in the Brazilian energy matrix. The results of this study for the integration of PV facades in the Amazon corroborate those carried out in other regions of Brazil with different climatic characteristics and in countries where the technology is already at a more advanced stage.*

Keywords: *Ventilated Photovoltaic Facade, Energy and Thermal Performance, Environmental Analysis.*