ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Sistema Fotovoltaico em Fachadas: Estudo de Desempenho e Retorno Financeiro para um Edifício Público

Photovoltaic System on Facades: Performance and Financial Return Study for a Public Building

Ayrton Lucas Lisboa do Nascimento
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | ayrton.nascimento@itec.ufpa.br
Midori Ueoka Carvalho
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | midori.carvalho@itec.ufpa.br
Bruno Santana de Albuquerque
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | bsalbuquerque@live.com
Carminda Célia Moura de Moura Carvalho
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | Carminda@ufpa.br

Resumo

Muitas cidades brasileiras vêm sofrendo um forte crescimento vertical, que impacta diretamente na adoção de Sistemas Fotovoltaicos em regiões urbanas. Há uma grande carência de soluções que atendam as unidades consumidoras quando não há área de cobertura disponível, seja para edificações residenciais, comerciais ou públicas. Nesse contexto, vem ganhando espaço a técnica de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações, que visam contornar a problemática da falta de espaço útil para instalações fotovoltaicas. No Brasil, a técnica não é muito explorada devido à ausência de tecnologias disponíveis no mercado e ao aparato profissional para a instalação desses sistemas. Esse estudo busca visualizar o desempenho e o retorno financeiro de um mesmo sistema fotovoltaico instalado em diversas orientações da fachada de uma edificação pública localizada na cidade de Belém-PA. Para a realização do estudo serão adotados programas de simulação de edificações tridimensionais e avaliação de sistemas fotovoltaicos. Os resultados demonstraram os cenários que possuem mais eficiência da geração de energia elétrica considerando a degradação dos SF, implicando no retorno financeiro de cada sistema.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos Integrados à Edificação (BIPV). Integração de fachada em edifício. Viabilidade econômica de BIPV.

Abstract

Many cities have been experiencing strong vertical growth, which directly impacts the adoption of Photovoltaic Systems in urban areas. There is a great need for solutions that meet consumer units when there is no available roof area, whether for residential, commercial, or public buildings. In this context, the technique of building-integrated photovoltaic systems is gaining ground, which aims to solving the problem of the lack of useful space for installation. In Brazil, the technique is not widely explored due to the lack of available technologies in the market and the professional apparatus for installing these systems. This study aims to present the

performance and financial return of the same photovoltaic system installed in different orientations of the facade of a public building located in the city of Belem, state of Pará, Brazil. To carry out the study, three-dimensional building simulation and photovoltaic system evaluation programs will be adopted. The results demonstrated the scenarios that have the most efficiency of electricity generation considering the degradation of the PV system, impacting the financial return of each system.

Keywords: Building-integrated photovoltaic systems (BIPV). Building facade integration. Economic viability of BIPV.

INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais provocados pelo processo de urbanização intensa nas últimas décadas geraram transformações e mudanças climáticas. Diante dessas preocupações, a utilização de fontes renováveis de energia é uma alternativa viável no sentido de reduzir ou evitar maiores prejuízos à natureza e assegurar a qualidade de vida das populações.

No sistema fotovoltaico (SFV) as células fotovoltaicas convertem a luz solar em energia elétrica de forma silenciosa e com um impacto mínimo ao meio ambiente. Os módulos podem ser sobrepostos ao sistema de vedação da edificação, sendo denominados de BAPV (*Building Applied Photovoltaics*), mais comuns em coberturas e seguindo a orientação e inclinação da edificação ou substituir elementos construtivos e/ou revestimentos da edificação, chamados de BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*), que são a integração de módulos fotovoltaicos em elementos construtivos, como telhados ou fachadas, de modo que mantenha a harmonia com a arquitetura daquele ambiente.

Nos últimos anos tem havido um crescente interesse na construção de BIPV como alternativa para suprir a demanda energética de áreas urbanas, pois essa tecnologia aproveita a área disponível das fachadas contribuindo para a geração de energia, além de apresentar propriedades dos materiais de construção convencionais, como proteção contra intempéries e ruídos, privacidade e isolamento térmico [1][2].

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de desempenho e de retorno financeiro associado a utilização de um SFV integrado a edificação (BIPV) em diferentes orientações. A metodologia considera a instalação de módulos fotovoltaicos orientados para os quatro pontos cardeais e os resultados obtidos durante o tempo de funcionamento, que é de 30 anos, sendo possível determinar qual cenário é o mais adequado para o estudo de caso. Os resultados também indicam os valores que podem ser economizados ao longo do tempo, contribuindo para a escolha da orientação do sistema.

ESTADO DA ARTE

Estudos como os realizados por [3] em 78 cidades brasileiras cujas latitudes variam de 0° a 30° forneceram ferramentas para avaliar as possibilidades de adequação dos módulos fotovoltaicos 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 instalação com uma inclinação ótima, porém foi verificado 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).

Em [4] houve uma abordagem inovadora para a análise do custo do ciclo de vida dos sistemas BIPV nas regiões da Itália, Brasil, China e Bahrein. Além dos estudos econômicos e das variáveis políticas, os autores quantificaram ou monetizaram o impacto dos sistemas nos meios social e ambiental. Os fatores sociais e ambientais considerados nesse estudo foram o custo social do carbono, a perda da linha de transmissão, o custo da linha de transmissão e o custo do material equivalente. A análise econômica mostrou que com os benefícios sociais e ambientais do sistema implementado, a substituição de fachadas convencionais e materiais de construção de telhado por módulos BIPV seria uma opção economicamente viável para todas as regiões, com exceção de Bahrein, devido à baixa tarifa de eletricidade e ao alto custo inicial do sistema BIPV.

No estudo apresentado em [5] foi analisada a carga de resfriamento em edifícios comerciais de 3 andares nos Emirados Árabes Unidos usando o sistema integrado em janela fotovoltaica na fachada, para minimizar a carga de resfriamento e maximizar a produção de energia elétrica. O estudo apresenta diferentes cenários, sendo que o primeiro é o caso base, onde é utilizado um vidro duplo, enquanto no segundo cenário é usado um vidro produzido a partir de módulos fotovoltaicos. Os resultados mostraram que o uso dos SFV aumentou a economia de energia em 27,7% considerando o uso de aparelhos de refrigeração eficientes.

O estudo realizado por [6] sobre a influência da morfologia urbana na geração de energia fotovoltaica no bairro do Marco, na cidade de Belém-PA, cuja tipologia arquitetônica local é formada por residências verticais de até quatro pavimentos e edificações térreas, identificou parâmetros como os padrões urbanísticos, juntamente com fatores de radiação solar, que maximizam ou minimizam o aproveitamento do recurso solar para a geração de energia fotovoltaica em casos de utilização do sistema na vertical, para um maior aproveitamento de geração.

Para a fachada oeste foi possível alcançar até 54% de eficiência, com 1.001 horas de sol pleno em relação ao caso ótimo, equivalente em termos de 100% geração a 1.851 horas de sol pleno. Para alcançar este nível de aproveitamento foram verificadas as melhores possibilidades de geração nas superfícies considerando o sombreamento e áreas de janelas. Os resultados obtidos demonstraram que mesmo com as perdas por orientação e inclinação, em todas as superfícies instaladas a energia gerada supria a necessidade das edificações estudadas.

No estudo [7] são revisadas e analisadas as diferentes opções disponíveis de *design* tecnológico dos sistemas BIPV e seus componentes de incorporação, como materiais de cobertura frontal e traseira, de camadas intermediárias adicionais e de *layout* do

módulo elétrico, para projetos de integração na envoltória de edificações na Alemanha. Os autores concluíram que as opções de *design* tecnológico dos sistemas BIPV podem ser adaptadas a uma grande variedade de projetos de construção e contribuir significativamente para os sistemas de energia renovável, com destaque para as células solares que utilizam o silício cristalino, que apresentaram as maiores vantagens para aplicações BIPV devido à sua longa vida útil, melhor preço de mercado, disponibilidade e rápidos avanços tecnológicos.

OBJETO DE ESTUDO: CEAMAZON

O estudo apresentado neste trabalho foi realizado no prédio do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), Figura 1, edificação localizada na cidade de Belém, no estado do Pará, mais especificamente no Campus da Universidade Federal do Pará (UFPA). O CEAMAZON atua no desenvolvimento de pesquisas e projetos com soluções em eficiência energética que passam pelos âmbitos das energias renováveis, qualidade da energia elétrica, mobilidade elétrica e outros.

A edificação do CEAMAZON comporta em sua estrutura principalmente laboratórios, salas de aulas, salas de professores e um auditório, com horário de funcionamento das 8 às 18h.

Figura 1: Fachada do CEAMAZON



Fonte: Os autores.

ASPECTOS CLIMÁTICOS DE BELÉM

A cidade de Belém, na região norte do Brasil, com latitude -1.45502° e longitude -48.5024°, possui clima equatorial úmido, típico da região amazônica, estando sob influência da Zona de Convergência Intertropical. A cidade registra precipitação acima de 60 mm em todos os 12 meses do ano e possui altos índices de irradiação solar durante o ano todo, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1: Características climáticas de Belém

Data	Temperatura média (°C)	Precipitação média (mm)	Irradiação (kWh/m²)
Janeiro	25,9	304,8	4,5
Fevereiro	26,7	275,6	4,43
Março	26,2	528,8	4,24
Abril	25,9	501,0	4,26
Maio	26,2	452,6	4,29
Junho	26,7	452,8	4,53
Julho	27,4	113,0	4,79
Agosto	27,8	157,0	4,88
Setembro	27,8	182,0	5,09
Outubro	27,7	248,4	5,23
Novembro	27,2	368,0	5,13
Dezembro	26,9	333,8	5,04

Fonte: Adaptado INMET e CRESCESB, 2023.

METODOLOGIA

SIMULAÇÃO – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A aplicação deste estudo leva em consideração a modelagem tridimensional da edificação, o dimensionamento do sistema fotovoltaico e a simulação do SFV aplicado às diferentes fachadas do prédio em estudo. Desse modo, os SFV são de mesma quantidade em termos de módulo e potência, com a finalidade de avaliar as respostas de geração de energia do sistema para cada orientação simulada. A representação esquemática em 3D da edificação é apresentada na Figura 2.

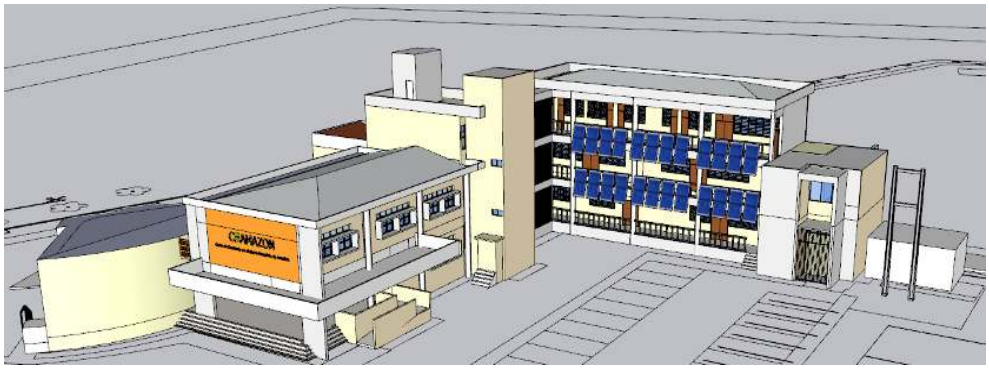
Figura 2: Representação tridimensional do CEAMAZON



Fonte: Os autores.

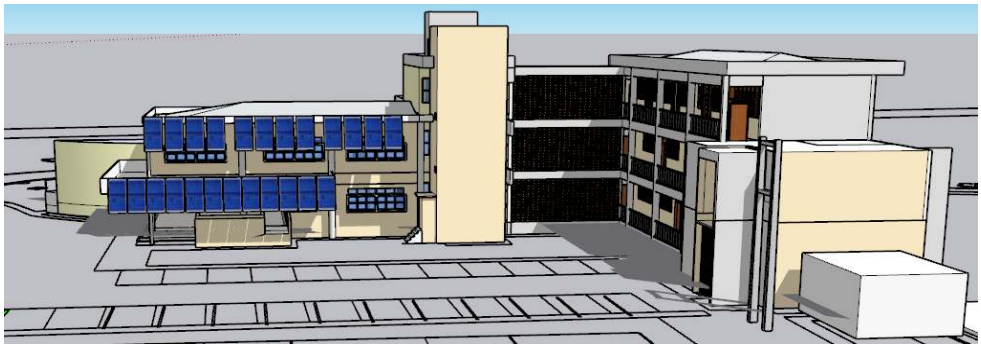
Em todos os cenários considerados, os módulos fotovoltaicos foram posicionados com uma inclinação de 30° em relação à superfície do prédio. A instalação dos módulos fotovoltaicos na fachada sul, ilustrado na Figura 3, apresenta um ângulo azimutal de 0°; o posicionamento dos módulos fotovoltaicos na fachada leste, mostrado na Figura 4, apresenta um ângulo azimutal de -90°; para os módulos fotovoltaicos localizados na fachada oeste, o ângulo azimutal é de 180°, Figura 5, e por fim, com os módulos fotovoltaicos instalados na fachada norte, Figura 6, o ângulo azimutal é de 90°.

Figura 3: Modelagem com instalação dos módulos FV na fachada sul do CEAMAZON



Fonte: Os autores.

Figura 4: Modelagem com instalação dos módulos FV na fachada leste do CEAMAZON



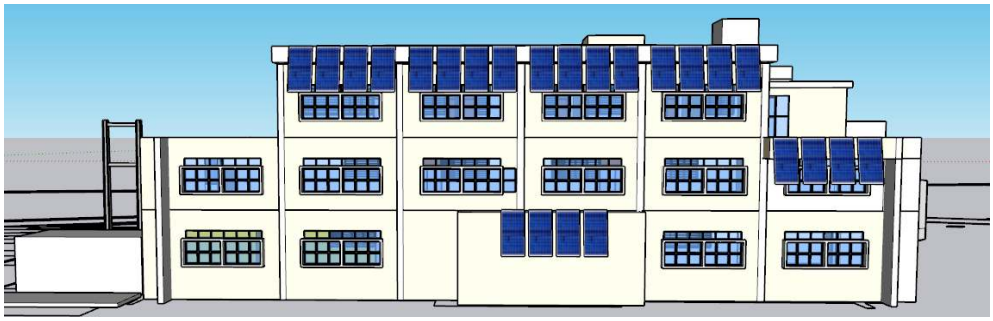
Fonte: Os autores.

Figura 5: Modelagem com instalação dos módulos FV na fachada oeste do CEAMAZON



Fonte: Os autores.

Figura 6: Modelagem com instalação dos módulos FV na fachada norte do CEAMAZON



Fonte: Os autores.

Os equipamentos considerados no projeto do SFV são apresentados na Tabela 2, e apresentam um custo estimado para a implantação desse sistema em aproximadamente R$ 47.000,00.

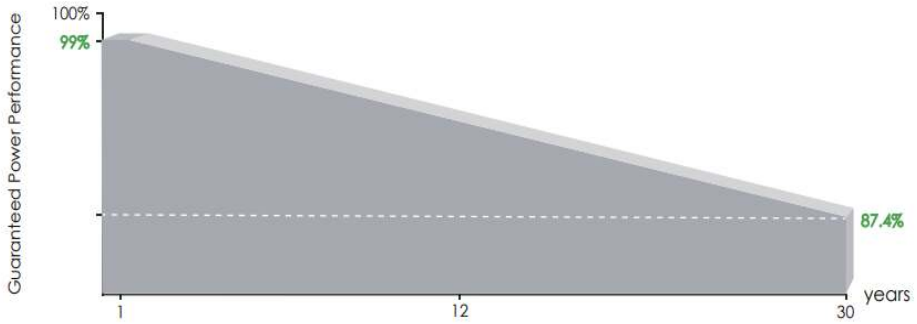
Tabela 2: Equipamentos considerados no projeto do sistema fotovoltaico

Componente	Marca	Quantidade	Potência Unitária (W)
Módulo Fotovoltaico	JinkoSolar	24	565
Inversor Fotovoltaico	CanadianSolar	1	2.000

Fonte: Autores.

Os SFV possuem indicadores que determinam a eficiência de geração de energia elétrica ao longo da sua vida útil. A Figura 7 apresenta a eficiência de geração disponibilizada pela fabricante dos módulos fotovoltaicos.

Figura 7: Curva de Eficiência de Geração



Fonte: Fabricante JinkoSolar.

ANÁLISE DE RETORNO FINANCEIRO

A análise de retorno financeiro avalia o fluxo de caixa, conforme apresentado em [8], sendo possível estipular em quanto tempo o sistema irá trazer um retorno financeiro considerando as características do sistema em análise.

A Universidade Federal do Pará é atendida em alta tensão, no subgrupo A4, com modalidade tarifária horosazonal verde. A Tabela 3 apresenta os horários de ponta e fora de ponta definidos pela concessionária local de energia elétrica, para atendimento dessa modalidade tarifária.

Tabela 3: Classificação e Horário – Tarifa Horosazonal Verde

Classificação	Horário
Fora Ponta	21:30:01 até 18:29:59
Ponta	18:30:00 até 21:30:00

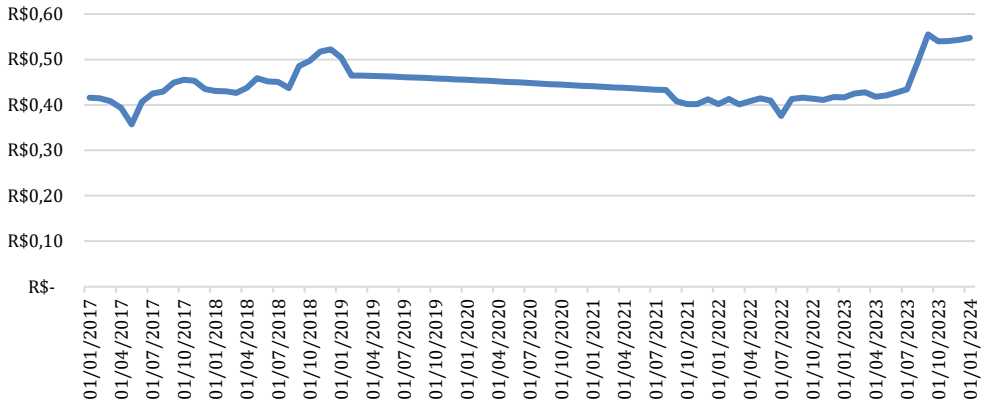
Fonte: Autores.

Neste trabalho foi definida uma metodologia para estimar o valor da tarifa para os próximos 30 anos a partir dos valores históricos da tarifa de energia elétrica na

classificação fora da ponta, que corresponde ao horário de funcionamento do CEAMAZON.

Na Figura 8 estão representados os valores da tarifa de energia elétrica para os anos de 2017 até o ano de 2024, que foram obtidos através das faturas de energia da unidade consumidora da Universidade Federal do Pará, Campus Guamá.

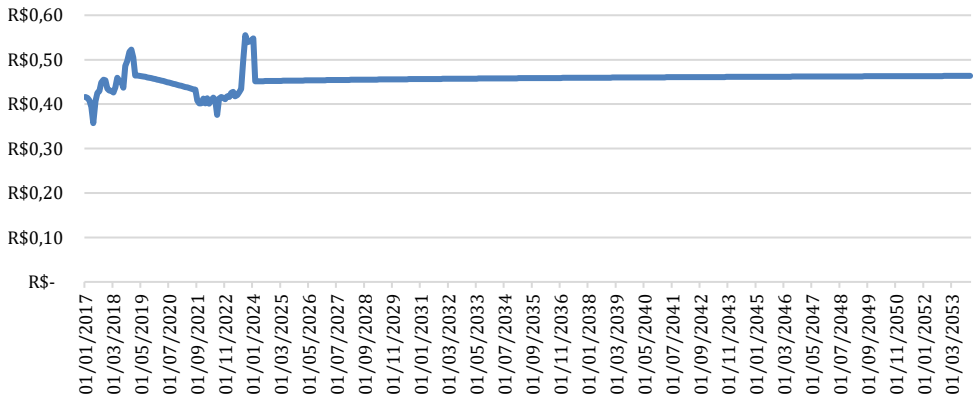
Figura 8: Valores históricos da tarifa de energia elétrica no horário de fora da ponta



Fonte: Adaptado Equatorial Energia – Pará, 2024.

Para estimar o valor da tarifa de energia elétrica para os próximos 30 anos foi aplicada uma equação obtida a partir da curva de tendência apresentada na Figura 8, resultando na curva da Figura 9, com valores estimados de tarifa até 2053.

Figura 9: Curva de tendência do valor da tarifa de energia elétrica para o horário fora da ponta.



Fonte: Os autores.

RESULTADOS

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Os valores de geração de energia do SFV nas respectivas fachadas foram obtidos via *software* de simulação. A partir da geração é calculada uma série temporal considerando a queda da eficiência dos módulos fotovoltaicos. Os valores de energia gerada em combinação com a eficiência dos módulos são apresentados na Tabela 4, para as fachadas nas quais foi considerada a instalação dos módulos.

Tabela 4: Geração de energia elétrica do SFV nas fachadas

Ano	Sul (kWh)	Leste (kWh)	Oeste (kWh)	Norte (kWh)
1	7.285,00	13.720,00	13.478,00	11.809,00
2	7.283,40	13.717,00	13.475,05	11.806,41
.	.	.	.	.
29	7.240,46	13.636,12	13.395,60	11.736,80
30	7.238,87	13.633,13	13.392,66	11.734,23
Total	217.857,41	410.295,63	403.058,64	353.147,31

Fonte: Autores.

A partir dos valores de geração de energia obtidos em cada fachada apresentados na Tabela 4, é possível fazer comparativos em termos de custos evitados com a energia elétrica previstos ao longo da vida útil dos sistemas. Sendo assim é possível obter a economia estipulada dos sistemas fotovoltaicos com os valores de tarifa anual (T_{an}) através da curva de tendência da Figura 9. Além disso, os valores de geração de energia anual são expressos por (G_{an}), que são determinados através da queda de eficiência de geração dos módulos fotovoltaicos e apresentados na Tabela 4. A partir da Equação 1 são encontrados os resultados apresentados na Tabela 5.

$$Economia = T_{an} \cdot G_{an} \quad (1)$$

Tabela 5: Economia nos gastos com energia elétrica com os sistemas fotovoltaicos

Ano	Sul (kWh)	Leste (kWh)	Oeste (kWh)	Norte (kWh)
1	R$ 3.291,19	R$ 6.198,37	R$ 6.089,04	R$ 5.335,02
2	R$ 3.297,15	R$ 6.209,59	R$ 6.100,07	R$ 5.344,69
.	.	.	.	.
29	R$ 3.353,93	R$ 6.316,52	R$ 6.205,11	R$ 5.436,72
30	R$ 3.354,68	R$ 6.317,94	R$ 6.206,50	R$ 5.437,94
Total	R$ 99.999,21	R$ 188.330,70	R$ 185.008,83	R$ 162.098,92

Fonte: Autores.

Nos cenários apresentados, a fachada Sul apresentou menor retorno na geração de energia elétrica e posteriormente na economia simulada, que foi de aproximadamente R$100.000,00 em 30 anos.

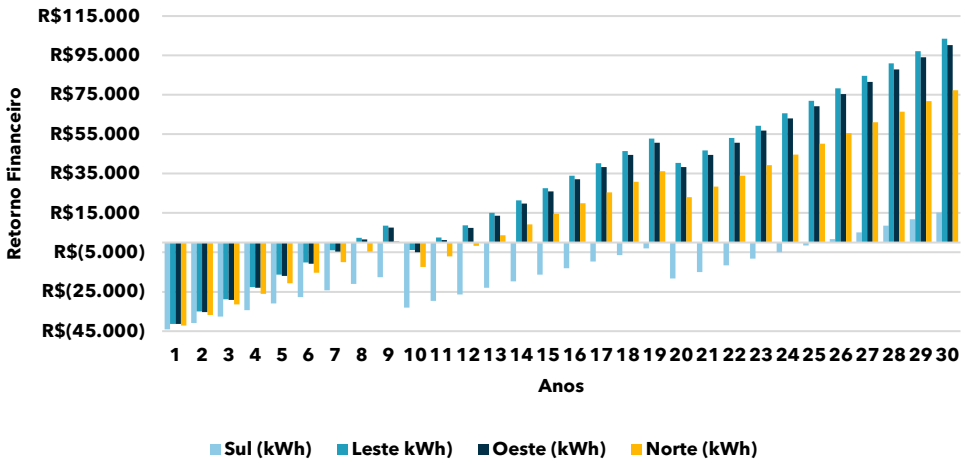
Para a fachada Norte, o valor economizado de energia elétrica ao longo da vida útil do SFV é intermediário, mas houve um incremento de 62,1% em relação ao resultado encontrado para a fachada Sul.

Para as fachadas Leste e Oeste houve um ganho expressivo em relação a fachada Sul, sendo os incrementos de 88,33% e 85,01%, totalizando R$ 188.330,70 e R$ 185.008,83 de economia nos 30 anos considerados, respectivamente.

ANÁLISE DE RETORNO FINANCEIRO

A comparação apresentada na Figura 10 demonstra o retorno financeiro através da economia promovida pelo SFV em 30 anos, em comparação com o valor gasto para a sua aquisição, sendo possível analisar a rentabilidade do SFV aplicado em diferentes situações.

Figura 10: Retorno financeiro dos cenários: Sul, Leste, Oeste e Norte



Fonte: Os autores.

Para o SFV instalado na fachada Sul, em azul, o retorno financeiro foi efetivado a partir do 25º ano, sendo um sistema fotovoltaico inadequado para a aplicação. Esse resultado, de certa, já era esperado, visto que a fachada Sul é a que menos recebe irradiação solar.

Para o SFV instalado nas fachadas Leste e Oeste, em laranja e cinza, respectivamente, não houve retorno financeiro até o 7º ano de funcionamento, ficando positivo no 8º e 9º anos de operação, voltando a ter valores negativos no 10º ano pelo incremento monetário referente a troca de inversores. Após esse período, a aplicação do SFV apresenta retorno financeiro positivo.

Por fim, para o SFV instalado na fachada Norte, em amarelo, não existe compensação financeira até o 8º ano de funcionamento, voltando a ter valores negativos nos anos 10, 11 e 12 de operação, com o incremento do inversor fotovoltaico no preço total do sistema. A partir do 13º ano inicia-se a compensação financeira pela aplicação do sistema fotovoltaico até o fim do período de vida útil do cenário em estudo.

CONCLUSÃO

O sistema fotovoltaico simulado neste trabalho apresentou resultados expressivos para o contexto de diferentes orientações aplicadas na fachada de uma edificação, como foi evidenciado na Tabela 5. Também foi calculada a economia gerada por esse sistema ao longo da sua vida útil.

Por outro lado, a variação da tarifa ao longo de 30 anos, conforme apresentado na Figura 9, indica uma tendência de aumento, uma vez que sempre há ajustes tarifários relacionados ao incremento dos tributos e do valor base da tarifa de energia elétrica, o que reforça a relevância de busca por fontes alternativas de energia.

No entanto, é importante ressaltar que o retorno financeiro varia dependendo do cenário. Para a fachada Sul, por exemplo, os resultados indicaram que não é viável a aplicação do SFV. A instalação do SFV na fachada Norte apresentou *superávit* a partir do 9º ano de operação do sistema, enquanto as fachadas Leste e Oeste se mostraram

ainda mais rentáveis, com o retorno financeiro sendo efetivado a partir do 7º ano de funcionamento do SFV.

Embora existam diversos enfoques para análise do retorno financeiro, visto que depende do cenário escolhido, da tarifa adotada e do sistema instalado, a economia promovida pelo SFV apresentou resultados promissores a longo prazo, além da contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa, tornando o SFV uma opção atraente e sustentável para a geração de energia e para a matriz elétrica brasileira, que caminha em passos largos na transição energética.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) e ao Sistema de Gestão de Energia Elétrica (SISGEE) da Universidade Federal do Pará pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] 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.

[2] ZHANG, X., LAU, S.K., LAU, S.S.Y., ZHAO, Y**.,** 2018. **Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs)**: A review. Sol. Energy 170, 947–968. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.067.

[3] 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.

[4] GHOLAMI, HASSAN; ROSTVIK, HARALD NILS; MÜLLER-EIE DANIELA. **Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: Case studies evaluation**. Energy and Buildings. Volume 203, 2019.

[5] 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.

[6] MAIA, ANA LÍDIA ARAGÃO; BLASQUES, LUIS CARLOS MACEDO; MONTEIRO, MARCELA MARÇAL MACIEL. **Analysis of urban morphology to generation of photovoltaic energy in Belém-PA**. The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC**,** Volume. 07 N. 01 (2021) journal homepage: https://periodicos.ufv.br/ojs/jcec.

[7] TILMANN E. KUHN, CHRISTOF ERBAN, MARTIN HEINRICH, JOHANNES EISENLOHR, FRANK ENSSLEN, DIRK HOLGER NEUHAUS, **Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV).** Energy and Buildings, Volume 231, 2021. Disponível em https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110381.

[8] NASCIMENTO, Ayrton Lucas Lisboa do et al. Estimativa de payback de um sistema fotovoltaico híbrido para um prédio público educacional. In: ANAIS DA XV CONFERêNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2023, São Luís. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2023. Disponível em: https://proceedings.science/cbqee/cbqee-2023/trabalhos/estimativa-de-payback-de-um-sistema-fotovoltaico-hibrido-para-um-predio-publico?lang=pt-br Acesso em: 19 Abr. 2024.