XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8403

Forma urbana e potencial fotovoltaico em clima tropical úmido: análise de cenários urbanos em Salvador (BA)

Urban form and photovoltaic potential in a humid tropical climate: analysis of urban scenarios in Salvador, Brazil

Andrea Verri Bastian
Universidade Federal da Bahia | Salvador| Brasil | andrea.bastian@ufba.br

Resumo

O crescimento da urbanização e a necessidade de transição energética reforçam o papel das cidades na geração distribuída de energia. Este estudo analisa a influência da morfologia urbana no potencial de geração fotovoltaica em Salvador (BA), cidade inserida em clima tropical úmido. A pesquisa baseia-se em simulação computacional de cenários urbanos representativos dos padrões de ocupação da cidade, parametrizados por diferentes combinações de densidade construtiva, altura das edificações e Índice de Ocupação da Quadra (IOQ). A partir da modelagem tridimensional e de simulações de incidência de radiação solar, foi avaliada a irradiância média anual incidente nas superfícies edificadas. Os resultados demonstram que a verticalização associada ao elevado adensamento reduz significativamente a disponibilidade de radiação solar, enquanto configurações morfológicas intermediárias apresentam desempenho energético mais favorável. Os resultados fornecem subsídios para a incorporação de critérios energéticos ao planejamento urbano em cidades tropicais.

Palavras-chave: Morfologia urbana. Energia solar fotovoltaica. Forma urbana. Radiação solar. Clima tropical úmido

Abstract

The growth of urbanization and the need for energy transition reinforce the role of cities in distributed energy generation. This study analyzes the influence of urban morphology on photovoltaic potential in Salvador, Brazil, located in a humid tropical climate. The methodology is based on the development of representative urban scenarios derived from the city's occupation patterns, defined by different combinations of building density, building height, and site coverage ratio. Through three-dimensional modeling and solar radiation simulations, the annual average irradiance on building surfaces was assessed. The results indicate that highly verticalized and dense areas present lower solar incidence due to increased shading, while intermediate configurations show more balanced performance. Spatial variation of solar incidence within urban blocks was also observed.

Keywords: Urban morphology. Photovoltaic energy. Urban form. Solar radiation. Humid tropical climate

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8403

INTRODUÇÃO

O crescimento da urbanização e a intensificação das mudanças climáticas reforçam o papel das cidades na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis. Estima-se que cerca de 68% da população mundial residirá em áreas urbanas até 2050 [1], consolidando os centros urbanos como protagonistas nesse processo, uma vez que concentram aproximadamente 70% das emissões globais de carbono [2].

A crescente demanda por sistemas energéticos de baixa emissão de carbono tem impulsionado a adoção de estratégias de geração distribuída, especialmente no ambiente construído [3]. Nesse contexto, os Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Edificação (Building Integrated Photovoltaics – BIPV) destacam-se por incorporar a geração de energia às superfícies arquitetônicas, reduzindo a dependência de fontes convencionais e contribuindo para o desenvolvimento de edifícios de energia quase zero (nearly Zero-Energy Buildings – nZEB) [4, 5].

Ainda, conforme [5], o desempenho desses sistemas no contexto urbano não depende exclusivamente de parâmetros tecnológicos, mas é fortemente condicionado pela morfologia urbana. Aspectos como densidade construtiva, altura das edificações, orientação dos volumes e configuração espacial dos quarteirões influenciam diretamente a disponibilidade de radiação solar nas superfícies edificadas [6] [1]. A geometria urbana atua como um mediador da radiação incidente, podendo potencializar ou restringir significativamente a captação solar devido a fenômenos de sombreamento mútuo [7]. Estudos recentes demonstram que variações na forma urbana podem resultar em diferenças expressivas no potencial de geração fotovoltaica, evidenciando a necessidade de incorporar parâmetros morfológicos como variáveis centrais no planejamento energético urbano [3].

Em climas tropicais úmidos, como o de Salvador (BA), essa relação torna-se ainda mais complexa. Apesar da elevada disponibilidade de radiação solar ao longo do ano, as características da urbanização — frequentemente marcadas por alta densidade e heterogeneidade morfológica — interferem tanto no desempenho energético quanto nas condições microclimáticas, influenciando variáveis como ventilação urbana, retenção de calor e fator de visão do céu[1] (Sky View Factor – SVF). Estudos baseados em mapeamentos urbanos, como os Padrões de Ocupação do Solo, evidenciam a relevância de indicadores morfológicos na caracterização do desempenho ambiental urbano [8]. No entanto, observa-se que a maior parte da literatura internacional ainda se concentra em contextos de clima temperado, havendo uma lacuna significativa na produção de conhecimento aplicada a cidades tropicais, especialmente no que se refere à integração entre forma urbana e geração de energia solar [6].

[1] O Fator de Visão do Céu (SVF) quantifica a visibilidade do céu em áreas urbanas em uma escala de 0 a 1. Ele regula o balanço energético local, apresentando forte correlação com índices de conforto térmico. Valores altos de SVF amplificam radiações e o desconforto térmico, agravando o fenômeno de ilha de calor urbana [9].

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo analisar a influência de parâmetros morfológicos urbanos no potencial de geração fotovoltaica em diferentes configurações de ocupação na cidade de Salvador (BA), inserida em clima tropical úmido. A partir de simulações computacionais em ambiente urbano, busca-se quantificar como diferentes padrões de ocupação urbana influenciam a disponibilidade de radiação solar incidente nas superfícies edificadas, subsidiando discussões sobre planejamento urbano orientado à geração distribuída de energia. Como contribuição, o estudo busca compreender de que forma diferentes configurações morfológicas influenciam o potencial de geração fotovoltaica, oferecendo subsídios ao planejamento urbano voltado à transição energética em cidades tropicais.

ASPECTOS METODOLOGICOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e caráter exploratório, fundamentada em simulação computacional para analisar a influência da morfologia urbana no potencial de geração fotovoltaica em clima tropical úmido. O delineamento metodológico compreendeu a definição de cenários urbanos representativos dos padrões de ocupação de Salvador, a modelagem tridimensional desses cenários, a simulação da incidência de radiação solar e a comparação da irradiância média anual incidente nas superfícies edificadas. A utilização de cenários paramétricos permitiu isolar a influência dos principais parâmetros morfológicos urbanos, possibilitando avaliar como diferentes configurações de ocupação interferem na disponibilidade de radiação solar para geração fotovoltaica.

A definição dos cenários urbanos baseou-se na sistematização dos padrões de ocupação de Salvador proposta por [10], elaborada a partir da caracterização quantitativa da forma urbana por meio de indicadores geométricos e urbanísticos, como o Índice de Ocupação da Quadra (IOQ), a altura média das edificações e a densidade do volume construído. Esses parâmetros permitiram representar diferentes configurações morfológicas da cidade, sintetizadas nos padrões de ocupação apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Padrão de Ocupação de Salvador

Padrão	Características	Exemplo bairro
P1	maior verticalização com altura média das edificações da quadra[2] (23,85 m) e alta densidade construtiva IOQ[3] (74,48%)	Comércio
PX1	Diferencia-se no padrão P1 somente pela altura das edificações (7,5 m)	Orla da Pituba, Amaralina.
P2	Apresenta considerável verticalização, com altura média das edificações da quadra (21,97 m) e média de densidade construtiva de menor IOQ (37,72%)	Pituba, Alphaville, Jardim Apipema
P3	Caracteriza-se por uma ocupação de edificações baixas (12,00 m), quadras de média densidade (37,19%)	Conj. Habitacionais Jardim das Margaridas.
P4	considerado o mais expressivo da cidade, com edificações baixas (7,38 m) e quadras de alta densidade (70,12%)	Nordeste de Amaralina.
PX4	Derivação de P4 com altura média das edificações de 8,03 m e ocupação de 72,79%	Uruguai
P5	Configuração de edificações baixas (6,46 m) e quadras de média densidade (IOQ = 45,30%)	Stela Maria, Itaigara
P6	configuração não considerada nessa pesquisa, uma vez que se trata de uma região intermediária entre espaços urbanos e rurais	Cassange

Fonte: adaptado de [10],

A modelagem tridimensional foi realizada adotando-se a quadra urbana como unidade de análise, mantendo-se constantes suas dimensões, o número de edificações e a orientação da implantação em todos os cenários, de modo a garantir a comparabilidade dos resultados. Cada cenário foi representado por dez edificações distribuídas regularmente na quadra, variando-se apenas a projeção horizontal e a altura das edificações, definidas de acordo com os valores médios de cada padrão de ocupação (Tabela 1).

Tabela 1: Especificações das edificações para a simulação

Padrão de Ocupação	IOQ (%)	H (alt. edific.)	Área construída Quadra	Área construída Quadra/edificação	Dimensões da área projetada da edificação	
					C(m)	L(m)
P1	74,48	23,85	5.958,40	595,84	37,24	16
PX1	56,90	7,50	4.552,00	455,20	28,45	16
P2	37,72	21,97	3.017,60	301,76	18,86	16
P3	37,19	12,00	2.975,20	297,52	18,59	16
P4	70,12	7,38	5.609,60	560,96	35,06	16
PX4	72,79	8,03	5.823,20	582,32	36,39	16
P5	45,30	6,46	3.624,00	362,40	22,65	16

Fonte: Adaptado de [11].

Os modelos tridimensionais foram desenvolvidos no software Rhinoceros, enquanto as simulações de incidência de radiação solar foram realizadas no plug-in ClimateStudio[4] (versão 1.9.8389.22035), utilizando o arquivo climático de Salvador no formato EPW[5]. Em todas as simulações foram mantidos constantes o arquivo

[2] A altura das edificações foi calculada como média da altura das edificações da quadra considerando cada pavimento com três metros.

[3] Índice de Ocupação da Quadra (IOQ) é um indicador que reflete a densidade das quadras urbanas e corresponde à relação entre a área ocupada pelas edificações (m²) e a área total da quadra (m²).

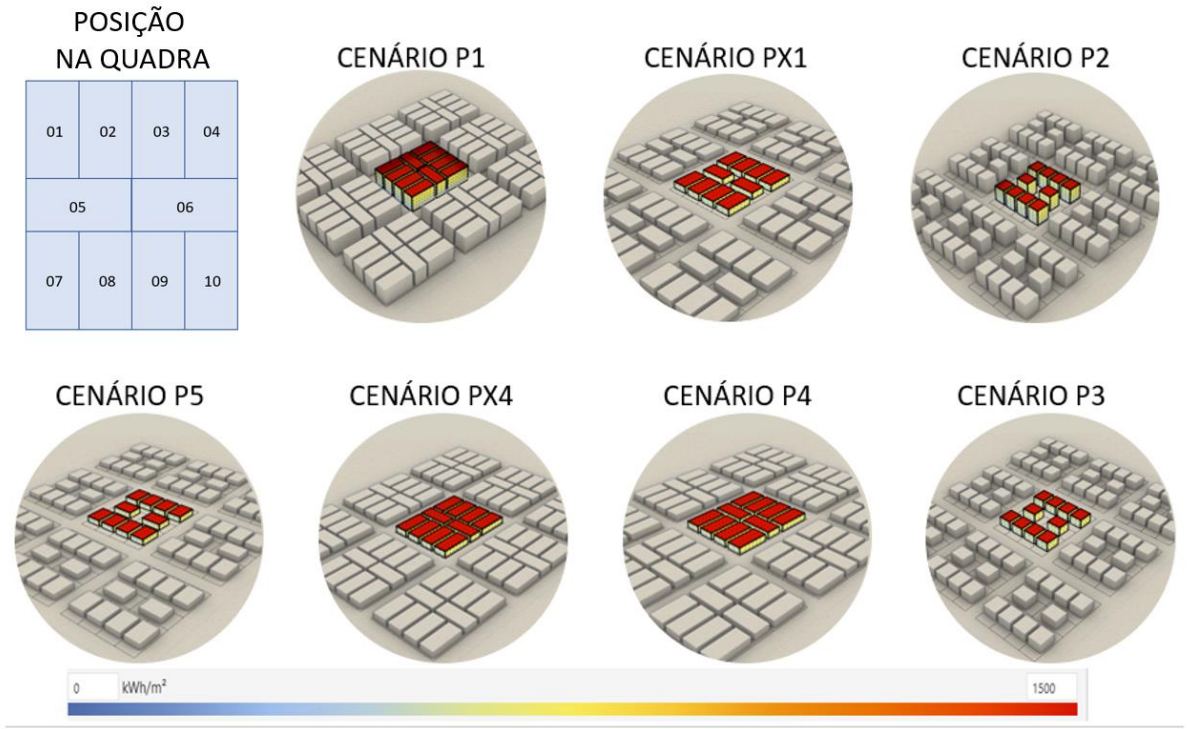
[4] Maiores detalhes podem ser vistos em [11].

[5] Esse arquivo encontra-se disponibilizado por meio do endereço: http://pbeedifica.com.br/arquivos-climaticos.

climático, os parâmetros de cálculo e as configurações do software, variando apenas os parâmetros morfológicos associados aos diferentes padrões de ocupação urbana.

O desempenho energético dos diferentes cenários foi avaliado por meio da irradiância média anual incidente nas superfícies edificadas (kWh/m².ano). Para cada padrão de ocupação foram analisadas diferentes posições no interior da quadra, permitindo avaliar a influência da morfologia urbana sobre a distribuição espacial da radiação solar (Figura 1).

Figura 1: Configuração dos cenários urbanos simulados



Nota: adaptado de [11]

Os valores de irradiância obtidos para cada superfície edificada foram organizados em planilhas eletrônicas, calculando-se a irradiância média anual por edificação e por padrão de ocupação. Posteriormente, realizou-se análise comparativa entre os cenários, buscando identificar tendências associadas às variações dos parâmetros morfológicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas simulações demonstram que a morfologia urbana é o fator determinante na modulação da radiação solar disponível em Salvador. A análise comparativa dos sete cenários (Tabela 2) demonstra que variações nos parâmetros de densidade construtiva, altura das edificações e taxa de ocupação do solo resultam em diferenças significativas nos níveis de irradiância média anual, confirmando que o adensamento urbano, se não planejado sob a ótica do desempenho energético, restringe severamente o potencial de geração local.

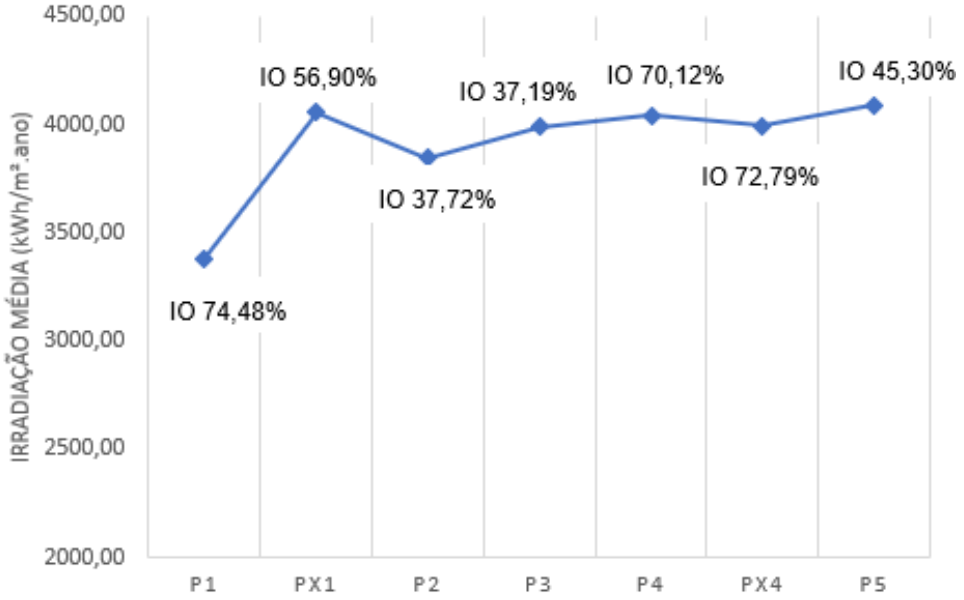
Tabela 2: Irradiação média incidente (kWh/m².ano) por posição no lote e padrão de ocupação

Posição no quarteirão	Irradiação média incidente (kWh/m².ano)						
	P1	**PX1**	**P2**	**P3**	**P4**	**PX4**	**P5**
01	3.646,61	4.095,75	3.915,24	4.032,03	4.116,36	4.094,71	4.101,29
02	3.306,38	4.031,69	3.710,37	3.906,62	4.050,33	4.014,90	4.072,92
03	3.297,64	4.042,61	3.702,50	3.907,71	4.045,00	4.010,21	4.090,49
04	3.632,66	4.077,80	3.897,93	4.010,21	4.094,47	4.069,68	4.098,40
05	3.251,88	4.121,63	4.062,06	4.122,51	4.078,73	3.996,01	4.129,50
06	3.226,26	4.117,12	4.060,85	4.123,18	4.055,59	3.974,19	4.125,02
07	3.526,79	4.060,48	3.884,55	4.010,55	4.027,98	3.997,23	4.103,47
08	3.195,04	3.991,99	3.678,91	3.903,33	3.959,58	3.906,26	4.060,04
09	3.197,53	3.999,66	3.671,39	3.882,63	3.960,19	3.906,64	4.061,71
10	3.508,02	4.035,86	3.853,66	3.981,56	4.014,62	3.981,01	4.060,37
Média	3.378,88	4.057,46	3.843,75	3.988,03	4.040,28	3.995,08	4.090,32
IO(%)	74,48%	56,90%	37,72%	37,19%	70,12%	72,79%	45,30%

Fonte: adaptado de [11].

Conforme ilustrado no Gráfico 1, observa-se que cenários caracterizados por maior verticalização e elevada densidade construtiva apresentam os menores valores de radiação incidente. O padrão P1 (Comércio), com a maior altura média (23,85 m) e alto Índice de Ocupação da Quadra (IOQ = 74,48%), apresentou o pior desempenho energético, com uma irradiância média de 3.378,88 kWh/m². ano. Esse valor representa uma redução de aproximadamente 17,4% na captação solar em comparação ao padrão P5 (Stella Maris), que obteve a maior média do estudo (4.090,32 kWh/m².ano). A baixa performance de P1 deve-se à elevada compacidade urbana, que intensifica os fenômenos de sombreamento mútuo e a obstrução do céu, limitando a exposição das superfícies edificadas à radiação direta.

Gráfico 1: Valor médio de irradiação no quarteirão/padrão de ocupação



Nota: Adaptado de [11].

Ainda, a influência isolada da altura torna-se evidente ao comparar os cenários derivados (PX1 e PX4) que evidenciam a influência isolada da altura das edificações, cumprindo o objetivo de quantificar o impacto de variáveis morfológicas sobre a disponibilidade de radiação. A análise empírica revela que a redução drástica da altura média no padrão PX1 (7,50 m) em relação ao seu par original P1 (23,85 m) resultou em um incremento de 20% na irradiância média anual, que passou de 3.378,88 para 4.057,46 kWh/m².ano.

De forma complementar, a comparação entre P4 e PX4 demonstra que mesmo variações sutis na altura (7,38 m para 8,03 m), quando combinadas com o aumento do IOQ (70,12% para 72,79%), são suficientes para reduzir a captação de 4.040,28 para 3.995,08 kWh/m².ano. Esses dados confirmam que a verticalização excessiva atua como o principal fator de restrição ao acesso solar em ambientes densos, validando a teoria de que a geometria urbana é a mediadora crítica da radiação incidente devido ao sombreamento

Por outro lado, diferente da tendência linear de queda observada nos extremos, os padrões P2 e P3 demonstram um desempenho mais equilibrado. Embora apresentem alturas distintas 21,97 m e 12,00 m, respectivamente, ambos mantêm taxas de ocupação similares, próximas a 37%. Esses cenários mostraram-se os mais favoráveis ao aproveitamento solar por garantirem uma irradiância média anual robusta, superior a 3.840 kWh/m².ano, combinando níveis satisfatórios de exposição solar com uma ocupação urbana mais eficiente em termos de uso do solo.

Adicionalmente, A análise espacial intraquadra (Tabela 2) revela que a incidência de radiação não ocorre de forma homogênea. Enquanto as áreas periféricas (posições 01 e 05) mantêm altos índices de captação, atingindo o máximo de 4.129,50 kWh/m².ano no padrão P5, as regiões centrais (posições 08 e 09) sofrem perdas acentuadas, registrando apenas 3.195,04 kWh/m². ano no padrão P1. Esse comportamento reforça

a importância de considerar o SVF no processo de projeto. A obstrução do céu em áreas centrais de quadras adensadas não apenas limita a viabilidade de sistemas BIPV, mas também agrava o fenômeno de ilha de calor urbana e o desconforto térmico local.

Os resultados corroboram estudos internacionais que apontam a morfologia urbana como fator determinante no desempenho energético. No entanto, ao considerar o clima tropical úmido de Salvador, este estudo evidencia que a elevada disponibilidade de radiação solar zenital permite que configurações com densidade moderada apresentem potenciais de geração superiores aos observados em latitudes elevadas, onde o sombreamento de inverno é mais restritivo.

A partir desses resultados, destaca-se que estratégias de planejamento urbano orientadas à eficiência energética em cidades tropicais devem priorizar configurações morfológicas intermediárias. Tal constatação sugere a necessidade de revisão de parâmetros urbanísticos em Salvador para evitar que a verticalização desordenada inviabilize a transição para edifícios de energia quase zero (nZEB) e comprometa a sustentabilidade do ambiente construído.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou a influência da morfologia urbana no potencial de geração de energia solar em superfícies edificadas, a partir da construção e simulação de cenários representativos de diferentes padrões de ocupação urbana na cidade de Salvador (BA). Os resultados evidenciam que a configuração do tecido urbano exerce papel determinante na modulação da radiação solar disponível, impactando diretamente a viabilidade de estratégias de geração distribuída de energia.

Observou-se que parâmetros como densidade construtiva e altura das edificações influenciam significativamente os níveis de irradiância incidente, sendo que cenários com elevada verticalização tendem a reduzir o potencial de captação solar devido ao aumento dos sombreamentos mútuos. Por outro lado, configurações intermediárias demonstraram desempenho mais equilibrado, indicando que a relação entre forma urbana e aproveitamento energético não é linear e pode ser otimizada por meio de ajustes nos parâmetros urbanísticos.

A análise também evidenciou a importância da distribuição espacial da radiação solar no interior das quadras, destacando a heterogeneidade da incidência e a necessidade de considerar tais variações no processo de projeto arquitetônico e urbano. Nesse sentido, a adoção de abordagens paramétricas e simulações computacionais mostrou-se fundamental para a compreensão das interações entre forma urbana e desempenho energético.

Como contribuição, o estudo avança na sistematização da relação entre morfologia urbana e potencial fotovoltaico em contexto de clima tropical úmido, ampliando o debate ainda predominantemente centrado em cidades de clima temperado. Os resultados indicam que o planejamento urbano pode atuar como instrumento estratégico na promoção da eficiência energética, desde que incorpore parâmetros morfológicos como variáveis de projeto.

Por fim, destaca-se a necessidade de aprofundamento das análises por meio da incorporação de outros indicadores urbanos, como fator de visão do céu, orientação das vias e ventilação urbana, bem como da ampliação das simulações para diferentes tipologias urbanas e escalas territoriais. Tais desdobramentos podem contribuir para o desenvolvimento de diretrizes mais robustas para o planejamento urbano orientado à transição energética.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, a autora utilizou a ferramenta chatGPT plus para revisão gramatical do texto. Após a utilização da ferramenta, a autora revisou e editou o conteúdo conforme necessário e assume total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] FANG, Y. *et al.* Impact of urban block morphology on solar availability in severe cold high-density cities: A case study of residential blocks in Harbin. **Land**, [S. l.], v. 14, n. 3, 581, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land14030581

[2] ZHAO, Keming; GOU, Zhonghua. Influence of urban morphology on facade solar potential in mixed-use neighborhoods: Block prototypes and design benchmark. **Energy and Buildings**, v. 297, 113446, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113446

[3] LI, G. *et al*. The comprehensive impact of urban morphology on the photovoltaic power generation potential of block-scale office buildings: Real blocks and design benchmarks. **Solar Energy** [S. l.], v. 287, 113248, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113248

[4] AZAMI, Abdollah; SEVINC, Harun. The energy performance of building integrated photovoltaics (BIPV) by determination of optimal building envelope. **Building and Environment**, [S. l.], v. 197, 107856, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107856

[5] GIOSTRA, S.; MASERA, G.; MONTEIRO, R. Solar typologies: A comparative analysis of urban form and solar potential. **Sustainability**, v. 14, n. 15, 9023, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su14159023

[6] MEROLLARI, J.; DERVISHI, S. Analyzing the impact of urban morphology on solar potential for photovoltaic panels: A comparative study across various European climates. **Sustainable Cities and Society**, v. 115, 105854, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105854

[7] GHELLERE, M.; BELUSSI, L.; ROMANENGO, C.; SORGENTE, T.; CABIDDU, D.; SALAMONE, F.; MORTARA, M.; BELLAZZI, A.; DANZA, L. *Assessment of urban-scale building photovoltaic potential: a case study in Matera, Italy*. **Journal of Physics: Conference Series**, [S. l.], v. 3140, 032010, 2025. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/3140/3/032010

[8] ROCHA, H. M. *et al*. Mapeando padrões de ocupação de Salvador, BA. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC), 11., 2019, João Pessoa. **Anais [...]** João Pessoa: ANTAC, 2019.

[9] MEHARE, N. P.; KAUR, R. Sky View Factor at Street Canyons and its application in urban heat island. **Educational Administration: Theory and Practice**, v. 30, n. 4, p. 8294-8301, 2024. DOI: https://doi.org/10.53555/kuey.v30i4.2722

[10] VIEIRA, C. N. **Padrões de ocupação em Salvador para efeito no mapa de clima urbano da cidade:** relatório de atividades de pós-doutorado. Salvador: Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, 2020.

[11] BASTIAN, Andrea Verri. **Morfologia urbana e a geração de energia solar fotovoltaica em Salvador**. 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2023.