



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

NATÁLIA AMORIM MAGALHÃES SANDRIN

MORFOLOGIA URBANA E A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA
EM CUIABÁ-MT

CUIABÁ - MT
2025

NATÁLIA AMORIM MAGALHÃES SANDRIN

**MORFOLOGIA URBANA E A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA
EM CUIABÁ-MT**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação
em Física Ambiental do Instituto de Física da
Universidade Federal de Mato Grosso como
requisito parcial para a obtenção do título de
doutor 2025.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marta Cristina de
Jesus Albuquerque Nogueira

**CUIABÁ-MT
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S219m Sandrin, Natália Amorim Magalhães.

Morfologia urbana e a geração de energia solar fotovoltaica em Cuiabá-MT [recurso eletrônico] / Natália Amorim Magalhães Sandrin. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 81 f., il. color., pdf). -- 2025.

Orientadora: Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2025.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Morfologia urbana. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. Planejamento urbano sustentável. 4. Eficiência energética. 5. Simulação computacional. I. Nogueira, Marta Cristina de Jesus Albuquerque, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: MORFOLOGIA URBANA E A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA
EM CUIABÁ - MT**

AUTORA: DOUTORANDA NATÁLIA AMORIM MAGALHÃES SANDRIN

Tese defendida e aprovada em **30 de ABRIL de 2025.**

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROFA. DRA. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA [Presidente Banca / Orientadora]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. PROFA. DRA. FLAVIA MARIA DE MOURA SANTOS [Examinadora Interna]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. PROF. DR. JOÃO BASSO MARQUES [Examinador Interno]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

4. PROFA. DRA. DIANA CAROLINA DE JESUS DE PAULA [Examinadora Interna]

INSTITUIÇÃO: CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE

5. PROFA. DRA. ALBÉRIA CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE [Examinadora Externa]

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO FEDERAL DE MATO GROSSO

CUIABÁ, 30/04/2025.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 09/05/2025, às 12:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/05/2025, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diana Carolina Jesus de Paula**, **Usuário Externo**, em 09/05/2025, às 13:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALBERIA ACAVALCANTI DE ALBUQUERQUE**, **Usuário Externo**, em 09/05/2025, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIA MARIA DE MOURA SANTOS**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/05/2025, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 12/06/2025, às 18:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7829343** e o código CRC **01EC67FF**.

Dedico este trabalho à Deus pela vida e oportunidade, aos queridos familiares, e ao meu marido, pelo amor, apoio e compreensão nas horas difíceis

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus pelo privilégio de poder realizar este sonho e ter me fortalecido, para não desanimar no meio do caminho.
- À Prof.^a Dr.^a Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, pela orientação e principalmente pelo incentivo, apoio, pela confiança e grande amizade, ingredientes que possibilitaram a realização deste trabalho.
- Aos membros da banca examinadora, Prof.^a Dr.^a Flávia Maria de Moura Santos, Prof.^a Dr.^a Diana Carolina Jesus de Paula, Prof.^a Dr.^a Albéria Cavalcanti de Albuquerque e Prof. Dr. João Basso Marques pelas importantes contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho;
- A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental/IF, Universidade Federal de Mato Grosso, que compartilharam seus conhecimentos;
- A todos os colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, pelos momentos de alegria e trocas de experiências;
- À Soilce pelo auxílio técnico na secretaria da Pós-Graduação em Física Ambiental (UFMT);

RESUMO

Este estudo analisa a influência da morfologia urbana no potencial de geração de energia solar fotovoltaica em bairros da cidade de Cuiabá, Mato Grosso. Utilizando modelos numéricos tridimensionais e simulações computacionais, foram examinados parâmetros urbanísticos como compacidade, largura das vias, espaçamentos, orientação e altura das edificações. A pesquisa adota a metodologia Design Science Research (DSR), visando propor soluções práticas para maximizar a eficiência na captação de energia solar. Os resultados indicam que bairros com menores coeficientes de ocupação e maiores afastamentos entre edificações, como o Jardim das Américas, apresentam maior incidência solar em comparação com áreas densamente edificadas, como o Centro. Foram simulados 15 cenários distintos, com variações nos parâmetros de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO), para identificar configurações urbanísticas que otimizam a radiação solar disponível. A análise revelou que configurações com Potencial Construtivo de 0,50 e Coeficiente de Ocupação entre 30% e 50% alcançam os melhores resultados de incidência solar, destacando a importância de planejamentos urbanos que conciliem densidade habitacional e eficiência energética. A pesquisa também ressalta a necessidade de políticas públicas que incentivem projetos sustentáveis, incluindo a integração de tecnologias fotovoltaicas na legislação urbanística. Conclui-se que a organização espacial das cidades pode impactar significativamente a captação de energia solar, contribuindo para a sustentabilidade energética e ambiental. Este trabalho oferece subsídios teóricos e práticos para urbanistas, planejadores e formuladores de políticas públicas na implementação de estratégias sustentáveis para o desenvolvimento urbano.

Palavras-chave: Morfologia urbana, Energia solar fotovoltaica, Planejamento urbano sustentável, Eficiência energética, Simulação computacional.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of urban morphology on the potential for photovoltaic solar energy generation in neighborhoods of Cuiabá, Mato Grosso. Using three-dimensional numerical models and computational simulations, urban parameters such as compactness, street width, spacing, orientation, and building height were examined. The research adopts the Design Science Research (DSR) methodology, aiming to propose practical solutions to maximize solar energy capture efficiency. The results indicate that neighborhoods with lower occupancy coefficients and greater spacing between buildings, such as Jardim das Américas, exhibit higher solar incidence compared to densely built areas like the city center. Fifteen distinct scenarios were simulated, varying the parameters of Building Potential (PC) and Occupation Coefficient (CO) to identify urban configurations that optimize available solar radiation. The analysis revealed that configurations with a Building Potential of 0.50 and an Occupation Coefficient between 30% and 50% achieve the best results for solar incidence, highlighting the importance of urban planning that balances housing density and energy efficiency. The research also emphasizes the need for public policies that encourage sustainable projects, including the integration of photovoltaic technologies into urban legislation. It is concluded that the spatial organization of cities can significantly impact solar energy capture, contributing to energy and environmental sustainability. This work provides theoretical and practical insights for urban planners, policymakers, and researchers in implementing sustainable strategies for urban development.

Keywords: Urban morphology, Photovoltaic solar energy, Sustainable urban planning, Energy efficiency, Computational simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da energia solar no Brasil	14
Figura 2 – Ranking Estadual de geração distribuída	15
Figura 3 – Ranking Municipal de geração distribuída	16
Figura 4 – Sistema de microgeração de energia	22
Figura 5 – Efeito fotovoltaico	23
Figura 6 – Energia solar em áreas urbanas	24
Figura 7 – Fluxo sem sombreamento x fluxo com sombreamento	26
Figura 8 – Interface CitySim	28
Figura 9 – Interface ENVI-met	29
Figura 10 – Interface Ladybug Tools	30
Figura 11 – Interface Climate Studio	30
Figura 12 – Ilustração do Potencial Construtivo	33
Figura 13 – Ilustração da taxa de ocupação	35
Figura 14 – Mapa síntese da evolução do perímetro urbano de Cuiabá	36
Figura 15 – Localização Cuiabá-MT	37
Figura 16 – Etapas da Design Science Research (DSR)	39
Figura 17 – Materiais padronizados para as superfícies analisadas	40
Figura 18 – Workflow das simulações utilizando o Rhinoceros e ClimateStudio	41
Figura 19 – Localização áreas de estudo e diferentes densidades	45
Figura 20 – Bairros Centro e Jardim das Américas	46
Figura 21 – Mapa de Zoneamento Urbano de Cuiabá-MT	47
Figura 22 – Resumo dos índices urbanísticos	48
Figura 23 – Quarteirão típico e lote 20x40	49
Figura 24 – Cenários 1A, 1B e 1C	50
Figura 25 – Cenários 2A, 2B e 2C	51
Figura 26 – Cenários 3A, 3B, 3C, 3D, 3E, 3F, 3G, 3H e 3I	52
Figura 27 – Simulação ClimateStudio – Jardim das Américas	54
Figura 28 – Simulação ClimateStudio – Centro	55
Figura 29 – Simulação ClimateStudio – Cenários	57
Figura 30 – Gráfico Comparação incidência solar por bairro	60
Figura 31 – Gráfico Exposição Solar por Potencial Construtivo	62
Figura 32 – Gráfico Comparação Exposição Solar por coeficiente de ocupação	63

Figura 33 – Gráfico Comparação Exposição Solar por PC e CO	65
Figura 34 – Tendência de Exposição solar por cenário	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cenários simulados - Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO)
– p. 45

Tabela 2 – Exposição solar nos cenários simulados – p. 48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BIPV – Building Integrated Photovoltaics

CO – Coeficiente de Ocupação

COP28 – 28ª Conferência das Partes sobre Mudança do Clima

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

DSR – Design Science Research

EPW – EnergyPlus Weather File

GW – Gigawatt

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – International Energy Agency

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

kWh/m²·ano – Quilowatt-hora por metro quadrado ao ano

LOUOS – Lei de Ordenamento e Uso do Solo

MW – Megawatt

NBR – Norma Brasileira Registrada

ONU – Organização das Nações Unidas

PC – Potencial Construtivo

PET – Physiological Equivalent Temperature

PMV – Predicted Mean Vote

PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso

UTCI – Universal Thermal Climate Index

ZC – Zona Central

ZIH1 – Zona de Interesse Histórico 1

ZPR – Zona Predominantemente Residencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Relevância do Estudo e Questões de Pesquisa	19
1.2 Estrutura da Tese	20
2 DESENVOLVIMENTO.....	22
2.1 Revisão da Literatura	22
2.1.1. Energia solar fotovoltaica.....	22
2.1.2. Modelos Numéricos de Cidades.....	27
2.1.3. Desenho Urbano e Geração de Energia Solar	32
2.1.4. Contexto Urbano de Cuiabá-MT	36
2.1.5. Conforto Térmico e Energia Solar em Climas Quentes	38
2.2 Metodologia	40
2.2.1 Fundamentos da Design Science Research	40
2.2.2. Design Science Research aplicada a pesquisa.....	42
2.2.3. Modelagem e simulações	43
2.2.4. Áreas de Estudo	45
2.3 Resultados	53
2.3.1- Estudo de caso e simulação no climate studio	54
2.3.2 Análise Estatística e Comparativa dos Cenários Propostos	58
2.4 Discussão.....	59
2.4.1 Análise Comparativa dos Bairros.....	60
2.4.2 Relação entre Densidade, Sombreamento e Eficiência Energética	61
2.4.3 Parâmetros Urbanísticos e Sombreamento Mútuo	64
2.4.4 Expansão das Discussões: Conforto, Infraestrutura e Cenários Futuros	66
2.4.5 Contribuição Teórico-Prática	66
2.4.6 Análise dos Cenários Propostos: Melhores e Piores Desempenhos	67
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
3.1 Recomendações para Políticas Públicas.....	74

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional global desde os anos 1950 resultou em desafios urbanos complexos, especialmente no que tange à sustentabilidade energética. Em cidades como Cuiabá, onde a alta incidência solar favorece a geração de energia fotovoltaica, a morfologia urbana desempenha papel decisivo na eficiência energética e planejamento sustentável.

Projeções apontam que 66% da população global residirá em áreas urbanas até 2050, tornando essencial o desenvolvimento de estratégias para aproveitamento energético sustentável. Dados mais recentes da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), de 2015, apontam que 84,72% dos brasileiros vivem em áreas urbanas, podendo atingir 92,4% até 2050, conforme projeções da ONU (2018).

A expansão urbana desordenada impõe pressões sobre infraestruturas existentes, como transporte, moradia, saúde, educação e saneamento básico, resultando em problemas como congestionamentos, déficit habitacional e acesso precário a serviços essenciais, como coleta de lixo, redes de esgoto e abastecimento de água potável. Além disso, o crescimento populacional gera pressões ambientais e sociais, comprometendo a qualidade de vida e o equilíbrio ecológico.

No contexto energético, o relatório Renewables in Cities 2021: Global Status Report destaca que as cidades, abrigando mais de 55% da população global, são responsáveis por cerca de três quartos do consumo final de energia e por 75% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂).

As discussões sobre desenvolvimento sustentável, iniciadas há décadas nas conferências da ONU, reforçam a urgência de transição para fontes limpas e renováveis de energia. Na conferência, COP28, realizada em Dubai entre 30 de novembro e 12 de dezembro de 2023, resultou em um compromisso global pela substituição de combustíveis fósseis por fontes sustentáveis.

Durante a COP28, o Brasil assumiu compromissos importantes para ampliar o uso de energias renováveis e promover a transição energética. Junto com outras 117 nações, o país comprometeu-se a triplicar sua capacidade de produção de energias renováveis até 2030, elevando-a de 3.400 GW para 11.000 GW. Também anunciou investimentos superiores a R\$ 20 bilhões para financiar projetos relacionados à bioeconomia, descarbonização industrial e energias renováveis, por meio do programa Mais Inovação Brasil. Essas iniciativas reforçam o compromisso brasileiro com uma economia de baixo carbono e sustentável.

Dentre as fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica se destaca como uma solução acessível e eficiente, sem emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Essas mudanças vêm se manifestando por meio do aumento das temperaturas médias globais, da intensificação de eventos climáticos extremos: como ondas de calor, secas prolongadas e enchentes, além da elevação do nível do mar e da maior variabilidade nos regimes de precipitação.

Vale salientar que tais fenômenos impactam diretamente a qualidade de vida nas áreas urbanas, intensificando o consumo energético, agravando o desconforto térmico e pressionando os sistemas de infraestrutura urbana. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica apresenta alto potencial de aplicação, podendo ser inserida em áreas urbanas ou isoladas, complementando ou substituindo fontes convencionais e contribuindo para a construção de cidades mais resilientes e sustentáveis.

Na última década, o uso da tecnologia fotovoltaica cresceu exponencialmente. No Brasil, a capacidade instalada aumentou de apenas 8 MW em 2012 para 50.675 MW em novembro de 2024, um crescimento de mais de 6.300 vezes em 12 anos.

Esse avanço foi impulsionado principalmente pela geração distribuída, que representou 67% do total em 2024, enquanto a geração centralizada respondeu por 33%, refletindo a tendência de descentralização na produção de energia (Figura 01). Nos últimos anos, a expansão foi particularmente acelerada, com a capacidade instalada triplicando entre 2021 e 2023.

Apesar de contribuir com a redução das emissões de carbono, o crescimento da energia solar no Brasil tem sido motivado predominantemente por fatores econômicos — como os incentivos regulatórios, a redução nos custos dos equipamentos e a busca por autonomia energética por parte dos consumidores — mais do que por um compromisso efetivo com a ampliação de fontes renováveis como política de Estado. Essa realidade evidencia que, embora a tecnologia desempenhe papel relevante no contexto das mudanças climáticas, sua difusão está fortemente vinculada à lógica de mercado e aos interesses descentralizados do setor elétrico nacional.

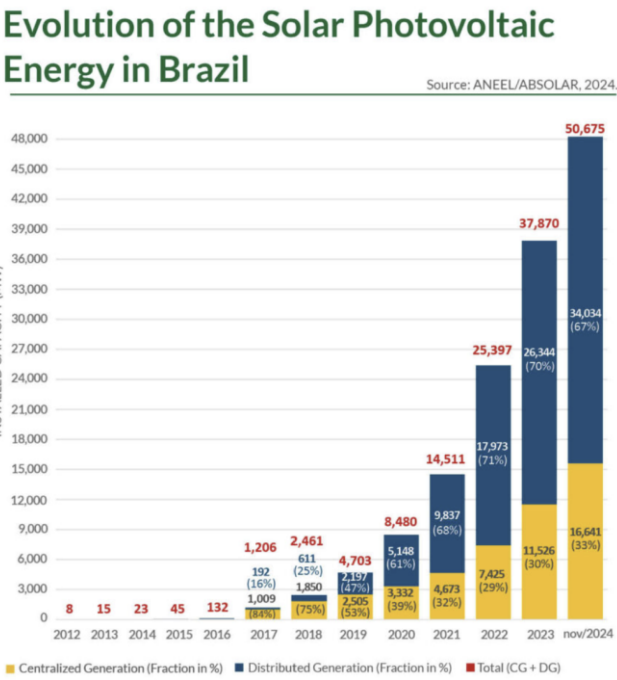


Figura 01: Evolução da energia solar no Brasil; Fonte: ABSOLAR 2024.

Em várias cidades brasileiras, a energia solar já é uma realidade consolidada. Dados de dezembro de 2024, publicados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) (Figura 03), mostram Brasília (DF) como líder em potência instalada, com São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul liderando entre os estados (Figura 02).

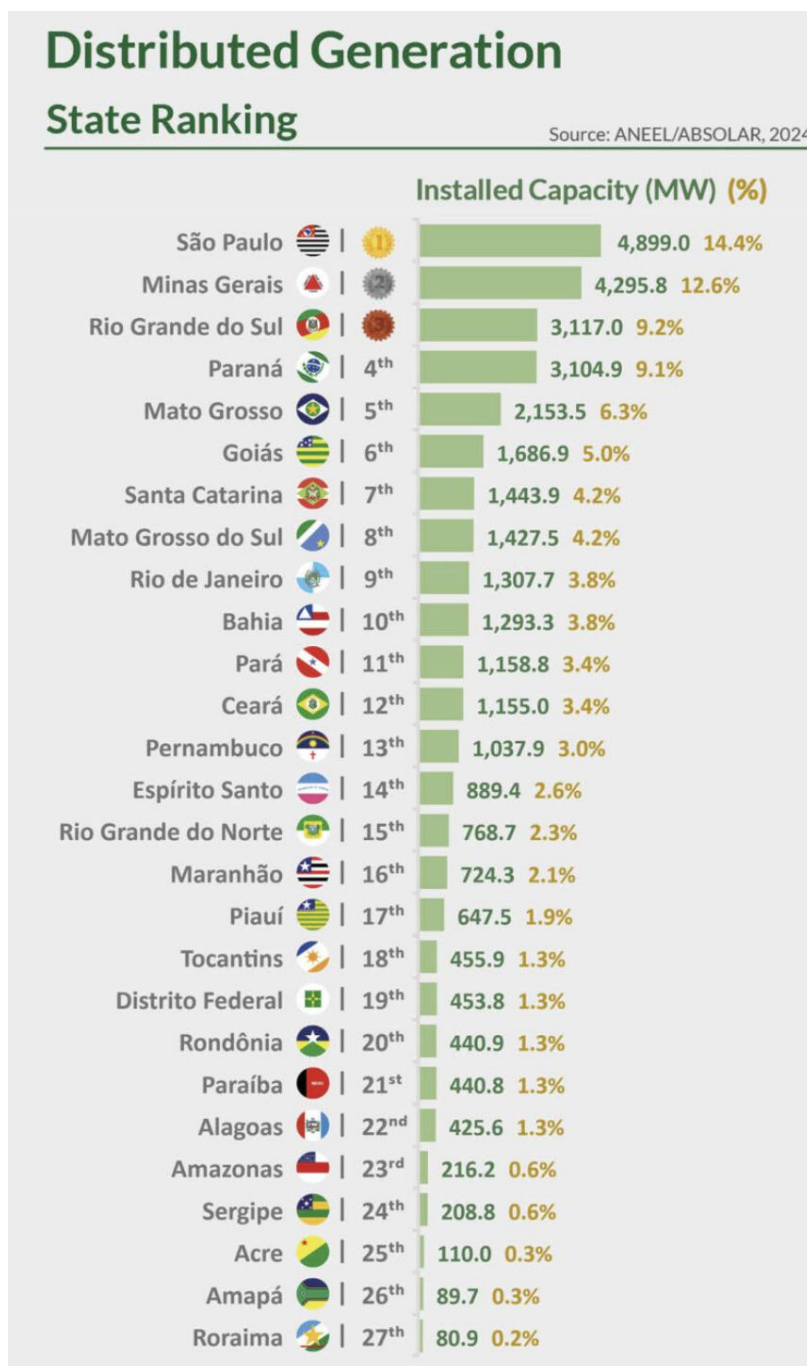


Figura 02 – Ranking Estadual de geração distribuída; Fonte: ABSOLAR 2024.

Apesar de o Mato Grosso ocupar a quinta posição no ranking estadual (figura 02), o município de Cuiabá destaca-se como o segundo maior em capacidade instalada (figura 03), totalizando 350,6 MW, o que representa 1,0% da capacidade nacional. Esse desempenho reflete políticas públicas voltadas para a expansão da energia solar na região.

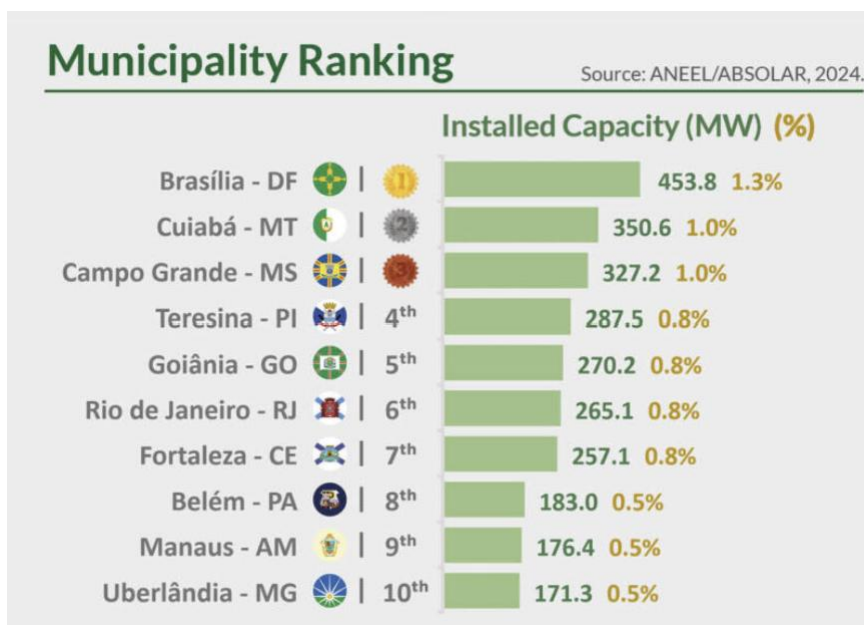


Figura 03 – Ranking Municipal de geração distribuída; Fonte: ABSOLAR 2024.

O Mato Grosso implementou incentivos fiscais, como a isenção do ICMS para geração distribuída de até 1 MW, além de linhas de financiamento facilitadas por bancos estaduais e federais. Programas estaduais também incentivaram a instalação de painéis solares em prédios públicos e parcerias com o setor privado, impulsionando o uso residencial, comercial e rural.

Além disso, órgãos governamentais têm oferecido suporte técnico para capacitação de profissionais, fomentando empregos no setor. A alta incidência solar torna Mato Grosso um polo atrativo para investimentos em energia fotovoltaica, consolidando Cuiabá como exemplo na transição energética sustentável no Brasil.

No entanto, o incentivo à energia solar requer análise criteriosa de viabilidade, especialmente nas cidades brasileiras, onde planos diretores urbanos carecem de parâmetros que garantam acesso ao sol e previnam sombreamento excessivo. Em locais de clima quente, como Cuiabá, há desafios adicionais: enquanto a energia solar demanda superfícies expostas, estratégias bioclimáticas buscam minimizar ganhos térmicos.

Portanto, a aplicação da tecnologia solar deve considerar condições climáticas, potencial de geração e características construtivas. Em áreas densas, fatores como altura dos edifícios, afastamentos e morfologia viária influenciam a captação solar (Polo López; Frontini; Bouziri, 2015).

O aumento da demanda por energia renovável evidencia a necessidade de planejamento urbano adaptado à geração fotovoltaica. Globalmente, a transição energética busca reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover sustentabilidade (IEA, 2021).

A pesquisa tem como objetivos:

- a) Avaliar, por meio de modelagem tridimensional e simulações ambientais, o impacto de diferentes configurações urbanas na captação de radiação solar e no desempenho de sistemas fotovoltaicos em nível de vizinhança.
- b) Analisar os parâmetros urbanísticos previstos na LOUOS¹ (Lei Complementar nº 389/2015) de Cuiabá, especialmente os relacionados a Potencial Construtivo, Coeficiente de Ocupação e gabarito, em diferentes zonas da cidade.
- c) Comparar cenários simulados com base em variações legais dos parâmetros urbanísticos e identificar quais combinações morfológicas otimizam a geração de energia solar, considerando a eficiência energética e a viabilidade normativa.
- d) Discutir os limites e possibilidades da energia solar como estratégia urbana sustentável, à luz de seus impactos socioambientais e da lógica predominantemente econômica que rege sua expansão no Brasil.

Através de modelos numéricos tridimensionais, a pesquisa busca definir os principais parâmetros urbanísticos que influenciam o aproveitamento da energia solar e estabelecer quais deles oferecem os melhores resultados.

A hipótese central deste estudo é que a morfologia urbana — definida por parâmetros como o Potencial Construtivo, o Coeficiente de Ocupação e o gabarito das edificações — exerce influência direta e mensurável na eficiência da geração de energia solar fotovoltaica em áreas urbanas. Supõe-se que configurações urbanas mais adensadas e verticalizadas, comuns em zonas centrais, promovem maior sombreamento entre edificações e, portanto, reduzem a incidência solar sobre superfícies captadoras, enquanto tipologias urbanas com afastamentos mais generosos e gabaritos baixos — como as presentes em zonas predominantemente residenciais — favorecem a exposição solar e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

¹ LOUOS (Lei de Ordenamento, Uso e Ocupação do Solo): instrumento legal municipal que estabelece os parâmetros urbanísticos que regem o uso do solo urbano, como zoneamento, gabaritos, recuos, taxas de ocupação, potencial construtivo, entre outros. Sua função é orientar o desenvolvimento urbano, disciplinando a implantação de edificações e usos compatíveis com as diretrizes do Plano Diretor, visando à ordenação territorial, à sustentabilidade e ao bem-estar coletivo.

Espera-se, assim, identificar correlações significativas entre parâmetros urbanísticos legalmente estabelecidos e o aproveitamento do potencial solar urbano, especialmente em um contexto climático de alta irradiação como o de Cuiabá-MT.

Pesquisas realizadas em Londres por Chatzipoulka et al. (2016) evidenciam que o desenho urbano desempenha um papel significativo na disponibilidade de radiação solar nas superfícies horizontais e nas fachadas dos edifícios. Observou-se uma relação direta entre a geometria urbana e o desempenho solar, indicando que volumes construídos maiores aumentam a obstrução do sol, reduzindo a radiação solar disponível.

No Brasil, estudos conduzidos por Girotti (2019) e colaboradores em São Paulo (SP) focaram nos parâmetros urbanísticos que maximizam a geração de energia fotovoltaica. Concluiu-se que o número de pavimentos e os afastamentos entre edificações influenciam significativamente a incidência de radiação solar. Edificações mais altas e afastamentos maiores entre as construções favorecem a captura de radiação solar nas coberturas.

1.1 Relevância do Estudo e Questões de Pesquisa

Apesar dos avanços nos estudos sobre a relação entre morfologia urbana e desempenho energético, ainda persistem lacunas na compreensão de como os parâmetros urbanísticos — como Potencial Construtivo (PC), Coeficiente de Ocupação (CO), recuos e orientação das edificações — interagem de forma conjunta para influenciar a incidência solar nas superfícies urbanas.

Essas variáveis, ao serem aplicadas em contextos reais e sob marcos regulatórios específicos, podem produzir efeitos distintos sobre a eficiência da captação de energia solar fotovoltaica, especialmente em cidades de clima tropical, como Cuiabá.

Diante disso, esta pesquisa busca responder às seguintes questões:

- a) De que forma diferentes combinações entre Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO) ²afetam a quantidade de radiação solar incidente nas coberturas e fachadas de edificações urbanas em Cuiabá?

² Potencial Construtivo (PC) é um índice urbanístico que expressa a relação entre a área do terreno e a área máxima permitida para edificação, geralmente definida pela legislação municipal. Um PC de 1,0 indica que é possível construir uma área equivalente à área do lote; um PC de 2,0 permite construir o dobro da área do terreno, e assim por diante. Já o Coeficiente de Ocupação (CO) representa a porcentagem do terreno que pode ser ocupada pela edificação na projeção horizontal. Por exemplo, um CO de 50% indica que a construção pode ocupar até metade da área total do lote. Ambos os parâmetros influenciam diretamente a forma urbana e a eficiência da captação de energia solar, sendo instrumentos fundamentais no ordenamento territorial urbano

- b) Como os parâmetros estabelecidos na legislação urbanística vigente podem favorecer ou restringir a integração de sistemas fotovoltaicos ao ambiente construído?
- c) É possível conciliar a densidade urbana desejável — fundamental para conter o espraiamento e promover cidades mais compactas — com a necessidade de maximizar a eficiência da captação solar nas áreas edificadas?

1.2 Estrutura da Tese

Esta tese está organizada em três capítulos principais, além dos elementos pré e pós-textuais. A seguir, apresenta-se a estrutura adotada:

- a) Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o contexto do estudo, destacando os desafios relacionados à sustentabilidade energética nas cidades tropicais, com foco na geração de energia solar fotovoltaica. São explicitados os objetivos da pesquisa, as questões norteadoras, a hipótese central e a justificativa teórico-prática da investigação.
- b) Capítulo 2 – Desenvolvimento: Estruturado em quatro grandes seções:

2.1 Revisão de Literatura: Reúne o referencial teórico sobre energia solar fotovoltaica, modelos numéricos urbanos, morfologia urbana, conforto térmico em climas quentes e as especificidades do contexto urbano de Cuiabá-MT.

2.2 Metodologia: Detalha a aplicação da abordagem *Design Science Research* (DSR), apresentando as etapas de construção e avaliação dos artefatos utilizados, os critérios de escolha das áreas de estudo e os procedimentos de modelagem tridimensional e simulação computacional com Climate Studio.

2.3 Resultados: Expõe os dados obtidos nas simulações, comparando a incidência de radiação solar em diferentes configurações urbanas. Os resultados são organizados por cenários, com base em variações de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO).

2.4 Discussão: Interpreta os resultados à luz dos objetivos da pesquisa, explorando a relação entre densidade urbana, sombreamento mútuo e eficiência energética. Propõe reflexões sobre os impactos urbanísticos e ambientais, além de possíveis implicações para a revisão de instrumentos legais como a LOUOS e o Plano Diretor de Cuiabá.

- c) Capítulo 3 – Considerações Finais: Apresenta as principais conclusões do estudo, evidenciando a relevância da morfologia urbana no desempenho de sistemas fotovoltaicos. São apontadas as limitações da pesquisa, propostas diretrizes para políticas públicas e sugeridos caminhos para futuras investigações no campo do planejamento urbano sustentável em regiões de alta radiação solar.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão da Literatura

2.1.1. Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das fontes mais promissoras de energia renovável devido à sua abundância, sustentabilidade e potencial para redução das emissões de gases de efeito estufa. Com o avanço tecnológico e a diminuição dos custos de instalação, a energia solar fotovoltaica tem se tornado cada vez mais acessível e eficiente, sendo uma alternativa viável para diversas regiões do mundo (JÄGER-WALDAU, 2013).

O sistema fotovoltaico (figura 04) converte a energia solar diretamente em eletricidade utilizando células fotovoltaicas, que são dispositivos semicondutores capazes de gerar corrente elétrica quando expostos à luz solar (LUQUE; HEGEDUS, 2011).



Figura 04: Sistema de microgeração de energia; Fonte: Disponível em: <https://passosenergiasolar.com.br/page4.html>. Acesso em: 10 de Junho de 2024.

Esse processo é baseado no efeito fotovoltaico, descoberto por Edmond Becquerel³ em 1839, e tem sido aprimorado ao longo dos anos para aumentar a eficiência e a durabilidade dos sistemas solares.

Quando as partículas de luz solar incidem no material utilizado na fabricação da célula fotovoltaica (geralmente silício), os fótons da luz interagem com os elétrons presentes nas células da placa solar causando uma diferença de potencial e assim temos a geração de energia solar fotovoltaica através do efeito que chamamos de “fotovoltaico”.

A figura 5 ilustra o efeito fotovoltaico que ocorre no painel solar:

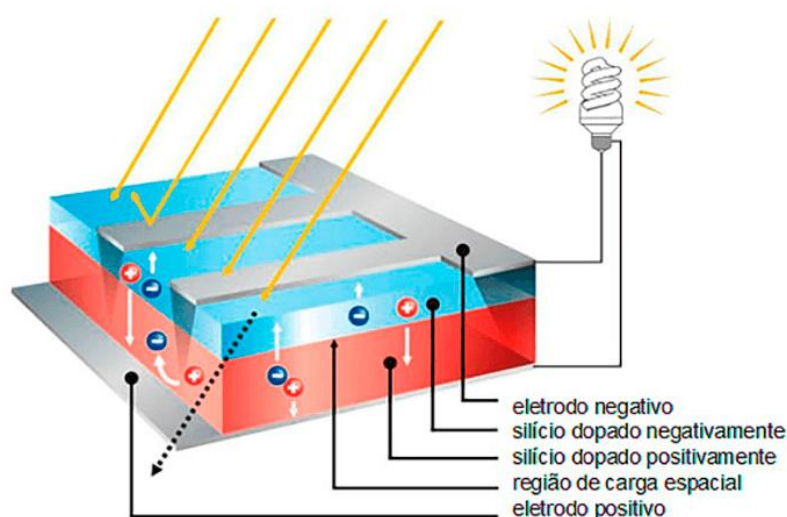


Figura 05: Efeito fotovoltaico; Disponível em: <https://metalsol.com.br/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/>. Acesso em: 12 de Julho de 2024.

Como podemos ver na figura 05, as partículas de luz do sol (os fótons) ao entrar em contato com a célula fotovoltaica do painel solar, fazem com que os elétrons dos átomos de silício se energizem e desprendam-se, sendo transportados do lado negativo para o lado positivo, dessa forma criando-se uma corrente elétrica contínua.

As áreas urbanas oferecem um grande potencial para a geração de energia solar devido à vasta quantidade de superfícies disponíveis, como telhados de edifícios (figura 06) e outras

³ Edmond Becquerel (1820–1891): físico francês que, em 1839, descobriu o efeito fotovoltaico ao observar que certos materiais geravam corrente elétrica quando expostos à luz solar. Seu experimento pioneiro com eletrodos de platina imersos em solução eletrolítica é considerado a base teórica do funcionamento das células solares modernas. Foi um dos precursores da física da luz e da eletroquímica, tendo contribuído significativamente para o desenvolvimento da ciência fotovoltaica.

estruturas urbanas (YANG et al., 2018). Estudos mostram que a densidade urbana e a orientação dos edifícios são fatores críticos para a maximização da captação de energia solar ((GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2019)



Figura 06: Disponível em: <https://driveintgs.com.br/energia-solar-em-areas-pequenas-como-otimizar-espacos-urbanos/>. Acesso em: 12 de julho de 2024.

Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, Brasil, possui condições climáticas altamente favoráveis para a geração de energia solar fotovoltaica, com elevados índices de radiação solar ao longo de todo o ano (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2015). De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a região de Cuiabá apresenta valores médios anuais de irradiação global horizontal superiores a $5,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$, superando capitais como Curitiba (cerca de $4,4 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$) e São Paulo (aproximadamente $4,7 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$), cujas médias são inferiores devido à latitude mais elevada e maior cobertura de nuvens (CRESESB, 2020).

Nos últimos anos, observa-se um processo crescente de verticalização em diversas áreas da cidade, impulsionado pelo adensamento urbano e pela valorização do solo em regiões centrais e intermediárias. Esse fenômeno, embora desejável sob a ótica da otimização do uso do solo, pode comprometer a eficiência da captação solar devido ao aumento do sombreamento mútuo entre edificações altas e à consequente redução da insolação direta nas coberturas e fachadas.

Soma-se a isso o contexto climático extremo de Cuiabá, caracterizado por longos períodos de altas temperaturas — frequentemente superiores a 35°C — o que eleva significativamente a demanda por energia elétrica, sobretudo para climatização de ambientes. A utilização intensiva de aparelhos de ar-condicionado não apenas aumenta o consumo energético, mas também contribui para a emissão de gases de efeito estufa, como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), intensificando os impactos ambientais (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Dessa forma, torna-se evidente a urgência de estudos que explorem soluções urbanas capazes de equilibrar densidade construtiva, eficiência energética e planejamento sensível ao clima. A investigação da relação entre morfologia urbana e geração solar fotovoltaica em cidades como Cuiabá é, portanto, essencial para o desenvolvimento de diretrizes urbanísticas que respondam simultaneamente à demanda habitacional, à mitigação das emissões e à adaptação aos extremos climáticos.

Além disso, os modelos de implementação eficazes consideram não apenas a viabilidade técnica, mas também aspectos econômicos, regulatórios e sociais. A integração da energia solar fotovoltaica na morfologia urbana não só contribui para a sustentabilidade energética das cidades, mas também devem influenciar o planejamento e o design urbano.

Embora a energia solar fotovoltaica seja reconhecida como uma solução viável e sustentável para a geração de energia em áreas urbanas, especialmente em locais com alta incidência solar, como Cuiabá-MT, sua eficiência depende de uma série de fatores ambientais e estruturais. Estudos indicam que o rendimento dos geradores fotovoltaicos é diretamente influenciado por condições climáticas, temperatura, sombreamento e posicionamento em relação ao sol (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A temperatura, por exemplo, é um fator determinante no desempenho dos painéis solares. Em regiões tropicais, como Cuiabá, onde as temperaturas são frequentemente elevadas, estratégias de resfriamento passivo, como ventilação natural e superfícies refletivas, podem mitigar os efeitos do aquecimento, preservando a eficiência das células fotovoltaicas.

Estudos apontam que a eficiência dos módulos solares podem diminuir em aproximadamente 0,4% para cada grau Celsius acima de 25°C. Assim, soluções como telhados verdes e materiais de alta refletância são recomendadas para minimizar perdas de desempenho.

Além disso, o sombreamento é um dos principais fatores que afetam a eficiência dos painéis solares (Figura 07). Obstáculos como edifícios, árvores e outras estruturas podem bloquear a luz solar e reduzir drasticamente a geração de energia.

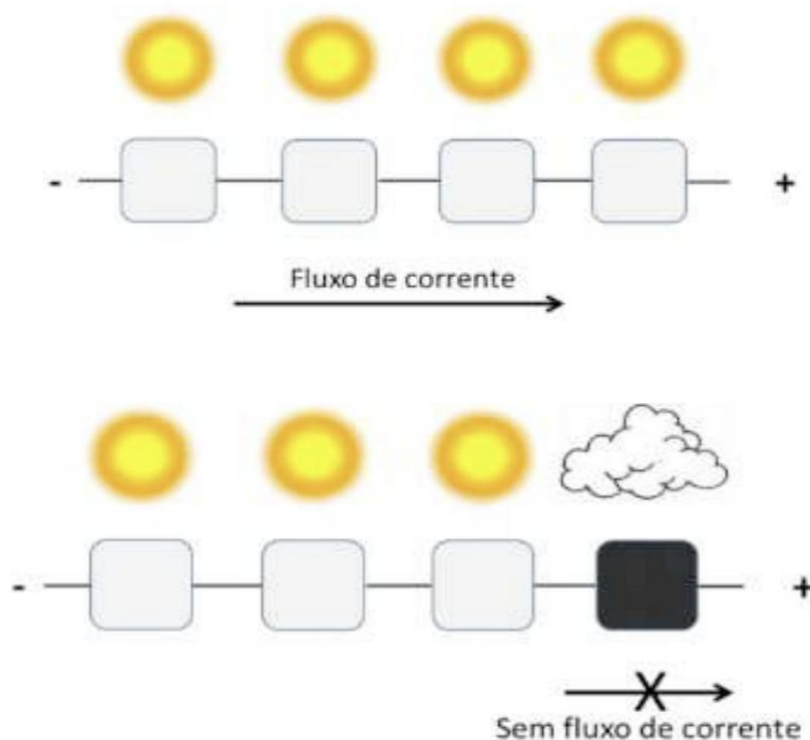


Figura 07: Fluxo sem sombreamento x fluxo com sombreamento. Fonte: Adaptado de Coutinho et al 2019

Pesquisas indicam que sombras parciais podem diminuir o rendimento dos painéis em até 50%, mesmo quando apenas uma pequena área do módulo está sombreada. Ferramentas como o Climate Studio permitem prever padrões de sombreamento e otimizar o posicionamento dos painéis para minimizar essas perdas. Estratégias adicionais, como o uso de microinversores e sistemas de rastreamento solar, podem compensar variações na exposição solar ao longo do dia.

Portanto, considerando as características climáticas e morfológicas de Cuiabá, torna-se evidente a necessidade de políticas públicas e diretrizes urbanísticas que promovam o uso eficiente da energia solar. A aplicação de soluções inovadoras, baseadas em simulações computacionais e metodologias como o Design Science Research, pode viabilizar projetos de

urbanização sustentável, consolidando Cuiabá como um modelo de integração entre tecnologia fotovoltaica e planejamento urbano.

2.1.2. Modelos Numéricos de Cidades

Os modelos numéricos de cidades são ferramentas computacionais que simulam diversos aspectos do ambiente urbano, permitindo análises detalhadas e previsões sobre o comportamento de sistemas urbanos complexos. Esses modelos são essenciais para estudos de planejamento urbano, sustentabilidade e eficiência energética, oferecendo uma compreensão aprofundada sobre como diferentes elementos da morfologia urbana interagem e impactam o desempenho das cidades (BATTY, 2013).

A morfologia urbana refere-se ao estudo da forma, estrutura e configuração dos componentes das cidades, como edifícios, ruas e espaços públicos. O uso de modelos numéricos e simulações computacionais tem se tornado essencial para avaliar como diferentes configurações urbanas — em especial variações na densidade, altura, orientação e espaçamento entre edificações — afetam o desempenho energético, o conforto térmico e a radiação solar disponível no tecido urbano.

Pesquisas como as de Ratti, Raydan e Steemers (2003) e Perini et al. (2017) demonstram que o formato das edificações e sua disposição no espaço urbano influenciam diretamente o sombreamento, a ventilação natural e o potencial de geração de energia solar, sendo fundamentais para o planejamento de cidades mais sustentáveis e resilientes.

Esses modelos podem avaliar, por exemplo, como a densidade populacional, a altura das edificações e a configuração urbana influenciam a circulação de ar e a radiação solar — fatores cruciais para o desempenho energético e o conforto térmico das cidades. Em especial, estudos como os de Oke (1988) e Emmanuel (2005) demonstram que a compactação urbana excessiva pode limitar o fluxo de ar e intensificar o sombreamento entre edificações, reduzindo a ventilação natural e a incidência solar sobre as superfícies construídas. Tais limitações impactam negativamente a eficiência da captação solar fotovoltaica, além de potencializar o efeito de ilhas de calor em regiões densamente edificadas.

Duarte (2012) destaca que a densificação urbana é um fenômeno inevitável nas metrópoles contemporâneas, mas que deve ser planejada de forma a promover a qualidade ambiental e o conforto térmico. A autora argumenta que a densificação pode ser desejável

quando associada a estratégias de projeto urbano que considerem a ventilação natural, a insolação adequada e a presença de áreas verdes, elementos essenciais para mitigar os efeitos das ilhas de calor urbanas e reduzir a demanda por climatização artificial.

No entanto, ela alerta para os riscos de uma densificação mal planejada, que pode resultar em ambientes urbanos com baixa qualidade ambiental, aumento do consumo energético e maior emissão de gases de efeito estufa. Portanto, a integração de estratégias de conforto ambiental e eficiência energética no planejamento urbano é fundamental para garantir que a densificação contribua positivamente para a sustentabilidade das cidades.

Além de avaliar a densidade, os modelos numéricos são amplamente utilizados para otimizar a localização de painéis solares em edifícios, levando em consideração fatores como a orientação das edificações, a inclinação dos telhados e as sombras projetadas por construções vizinhas. Esses modelos ajudam a maximizar a captação de energia solar e a eficiência geral dos sistemas fotovoltaicos.

Portanto a modelagem da cidade pode simular diferentes configurações urbanas e suas implicações na eficiência energética, fornecendo diretrizes valiosas para planejadores urbanos e formuladores de políticas públicas (BATTY, 2013).

Ferramentas de modelagem desempenham um papel fundamental na análise e visualização de dados urbanos, permitindo simulações precisas e detalhadas que apoiam o processo de planejamento e tomada de decisão.

Essas ferramentas possibilitam avaliar a interação entre variáveis ambientais, morfológicas e energéticas, facilitando a criação de estratégias urbanísticas mais eficientes e sustentáveis. Entre as principais ferramentas utilizadas estão:

- **CitySim:** Um modelo de simulação urbana (figura 08) que permite a análise de fluxos de energia em cidades, considerando variáveis como a geometria dos edifícios e a vegetação urbana (ROBINSON et al., 2009).

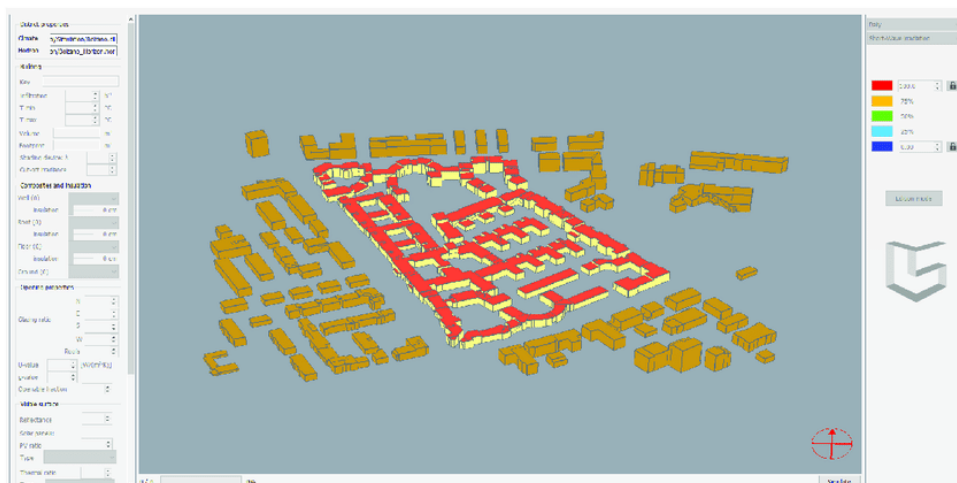


Figura 08: Interface CitySim. Disponível em:

https://www.researchgate.net/figure/GUI-CitySim-Pro-with-the-25D-model-of-the-case-study_fig2_355408784. Acesso em: 20 de dezembro de 2024.

- **ENVI-met:** Um software de simulação microclimática (figura 09) que avalia o impacto da morfologia urbana no microclima local e na eficiência energética dos edifícios (BRUSE; FLEER, 1998).

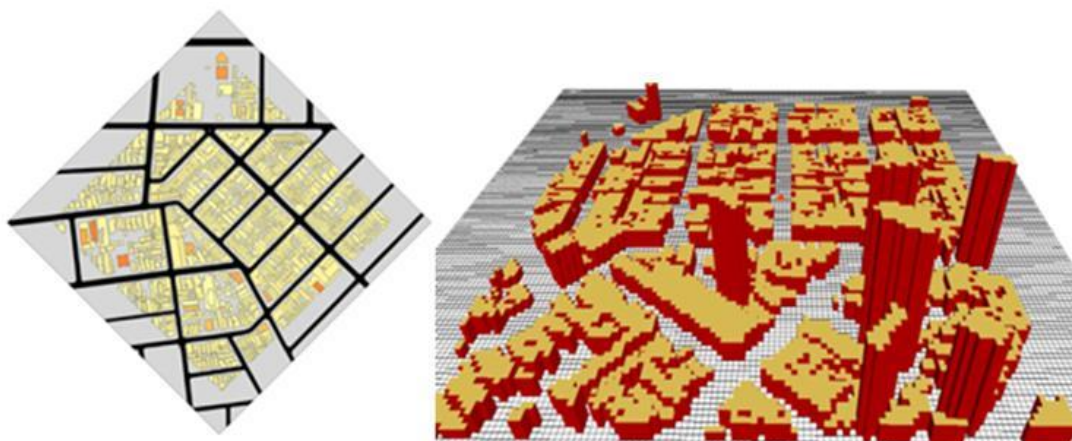


Figura 09: Envimet. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/pmDzH7QcmzH6hMZxR3tKBVk/>. Acesso em: 20 de dezembro de 2024.

- **Ladybug Tools:** Conjunto de ferramentas para modelagem ambiental integrada (figura 10) no Rhinoceros e Grasshopper, permitindo análise de radiação solar, sombreamento e conforto térmico urbano (RUDOLPH; SCHWARTZ, 2017).

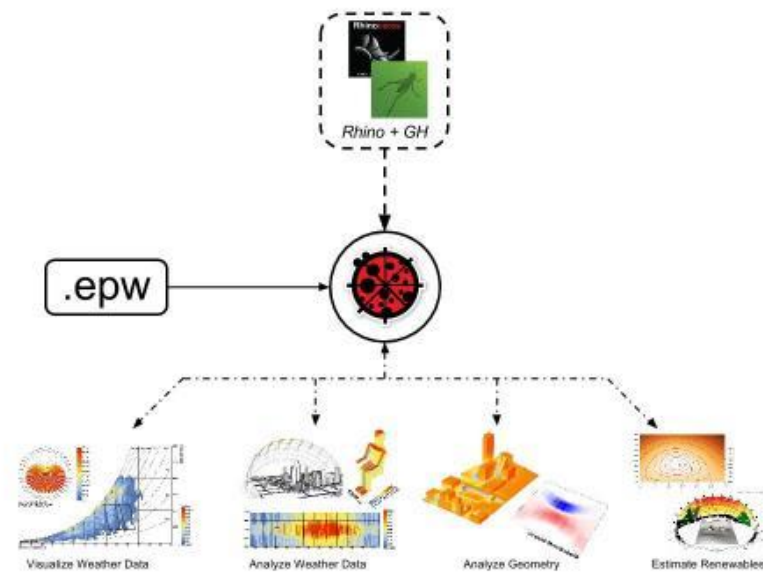


Figura 10: Ladybug Tools. Disponível em: Acesso em: Acesso em: 20 de dezembro de 2024.

- **Climate Studio:** Software avançado para simulações de desempenho ambiental e eficiência energética (figura 11), utilizado para calcular radiação solar, sombreamento, iluminação natural e análise térmica integrada. Amplamente empregado em projetos de arquitetura sustentável e urbanismo (SOLOMON; REINHART, 2020).

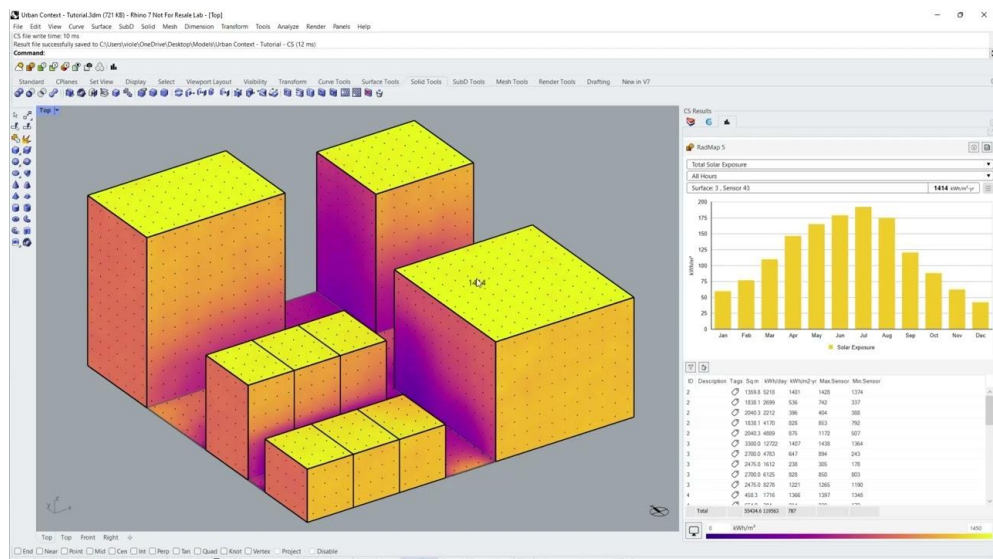


Figura 11: Climate Studio. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=LnLfBrUc3XE> Acesso em: Acesso em: 20 de dezembro de 2024.

A aplicação de modelos numéricos de cidades em estudos sobre morfologia urbana e geração de energia solar em Cuiabá-MT pode trazer contribuições significativas tanto teóricas quanto práticas. Teoricamente, amplia o conhecimento sobre a interação entre a forma urbana e a eficiência energética. Praticamente, oferece ferramentas e estratégias para otimizar a implantação de sistemas solares e promover a sustentabilidade urbana.

2.1.2.1 Estudos de Caso a partir de Modelagens urbanas

Estudos de modelagens urbanas têm sido fundamentais para avaliar o impacto da morfologia e do planejamento urbano na eficiência energética e na geração de energia solar fotovoltaica. A seguir, destacam-se pesquisas relevantes:

- a) Reinhart e Davison (2009) - Esse estudo utilizou o CitySim para avaliar como a geometria urbana influencia a radiação solar. As simulações mostraram que edifícios mais altos e próximos criam zonas de sombreamento que reduzem a captação solar em até 30%. Por outro lado, edificações com afastamentos maiores apresentaram melhor desempenho energético. Esse estudo destacou a importância do planejamento urbano para maximizar a eficiência solar e a necessidade de layouts urbanos que favoreçam a distribuição uniforme de luz solar.
- b) Robinson et al. (2009) - Robinson et al. aplicaram o ENVI-met para modelar microclimas urbanos em Londres. O estudo demonstrou que áreas densamente ocupadas criam ilhas de calor e reduzem o potencial de radiação solar em fachadas inferiores. Foram propostas soluções como corredores de ventilação e fachadas verdes para mitigar os impactos negativos. A pesquisa destacou a relevância de estratégias de design passivo para melhorar a eficiência energética em áreas urbanas densas.
- c) Girotti (2019) - Este estudo utilizou o Climate Studio para analisar o impacto de afastamentos e alturas em São Paulo-SP. Os resultados indicaram que fachadas fotovoltaicas (BIPV) podem compensar perdas em áreas mais verticalizadas. O estudo sugeriu adaptações normativas para otimizar layouts urbanos e melhorar a eficiência energética, destacando a flexibilidade do software para simulações solares e climáticas.
- d) Análise Urbana no Belenzinho, São Paulo - Outro estudo com o Climate Studio avaliou a eficiência de painéis solares em diferentes configurações morfológicas no bairro do Belenzinho, em São Paulo. A pesquisa revelou que afastamentos maiores e edificações mais baixas maximizam a captação solar. Foram propostas alterações

normativas para incentivar layouts urbanos mais eficientes, destacando o papel das simulações no planejamento urbano sustentável.

2.1.3. Desenho Urbano e Geração de Energia Solar

O desenho urbano é um campo interdisciplinar que envolve a organização física dos espaços urbanos, influenciando diretamente a qualidade de vida, a sustentabilidade e a eficiência energética das cidades.

Estudos indicam que a forma como as cidades são projetadas pode impactar significativamente a performance energética dos ambientes construídos, incluindo a capacidade de gerar energia solar por meio de sistemas fotovoltaicos. A disposição dos edifícios, sua altura, orientação e afastamentos influenciam diretamente a incidência de radiação solar nas superfícies edificadas (RATTI; RAYDAN; STEEMERS, 2003).

A geração de energia solar fotovoltaica em áreas urbanas depende de diversos fatores, como a orientação das edificações, a inclinação das coberturas e a minimização de sombreamentos. Estudos apontam que o planejamento urbano adequado pode maximizar a captação solar e, conseqüentemente, contribuir para a redução da dependência de fontes de energia não-renováveis (RATTI; RAYDAN; STEEMERS, 2003; DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A morfologia urbana, ou seja, a forma e estrutura das cidades, tem um papel crucial na eficiência energética. Em cidades com alta densidade de edificações, a geração de energia solar pode ser otimizada através do planejamento adequado da altura dos edifícios e da largura das ruas, garantindo a máxima exposição ao sol (STEEMERS, 2003).

Exemplos de Planejamento Urbano para Energia Solar:

- a) **Desenho de Telhados:** Telhados inclinados e orientados para o sul no hemisfério norte (ou para o norte no hemisfério sul) são ideais para a captação de energia solar (DUFFIE; BECKMAN, 2013).
- b) **Planejamento de Edificações:** A distância entre edifícios e a altura das construções devem ser planejadas para minimizar sombras e maximizar a exposição solar (TSANGRASSOULIS et al., 2005).
- c) **Espaços Verdes e Abertos:** A inclusão de espaços verdes e abertos pode contribuir para a redução das ilhas de calor urbano e melhorar a eficiência da geração de energia solar (GAGO et al., 2013).

O desenho urbano tem um impacto significativo na geração de energia solar fotovoltaica. Em cidades como Cuiabá-MT, o planejamento adequado pode não apenas melhorar a eficiência energética, mas também promover um desenvolvimento urbano mais sustentável e resiliente. A integração de práticas de desenho urbano com estratégias de geração de energia solar é crucial para enfrentar os desafios energéticos contemporâneos.

A definição de parâmetros urbanísticos, como potencial construtivo (figura 12) e taxa de ocupação (figura 13), exerce influência direta sobre as possibilidades de incorporação de sistemas fotovoltaicos e demais estratégias de geração de energia solar no ambiente construído.

Esses parâmetros definem tanto a forma e o volume das edificações quanto a densidade urbana, condicionando a incidência solar e o aproveitamento das superfícies disponíveis para instalação de painéis solares (LA ROCHE, 2017).

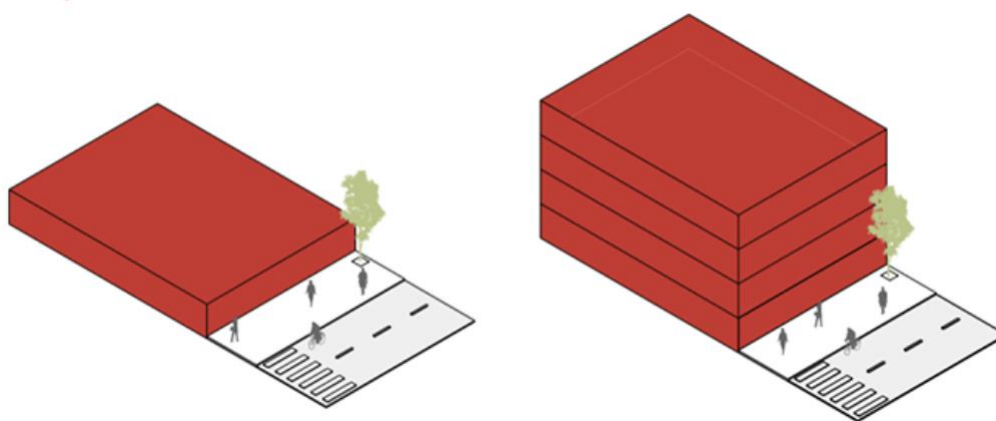


Figura 12 – Ilustração do Potencial Construtivo. Disponível em:

<https://www.tetrisej.com.br/single-post/como-entender-a-guia-amarela>. Acesso em: 20 de dezembro de 2024.

O potencial construtivo (também chamado de índice de aproveitamento ou coeficiente de aproveitamento, em algumas legislações) estabelece a relação entre a área do terreno e a área máxima passível de edificação. Em termos gerais, ele pode ser definido como a quantidade de metros quadrados que podem ser construídos em um lote, levando em consideração:

- a) Zoneamento urbano: cada zona (habitacional, comercial, industrial etc.) costuma ter limites específicos de construção, visando equilibrar a ocupação do solo e a infraestrutura urbana disponível (BRASIL, 2001).

- b) Regras locais: legislações municipais, como as leis de uso e ocupação do solo, podem estabelecer diferentes coeficientes urbanísticos conforme a localização — áreas centrais, zonas residenciais ou de proteção ambiental — visando ao ordenamento do território e à sustentabilidade urbana (BRASIL, 2001; RIBEIRO, 2018).
- c) Possíveis outorgas onerosas: em algumas cidades, podem existir mecanismos que permitem adquirir potencial construtivo adicional (acima do coeficiente básico), mediante contrapartidas financeiras ou medidas compensatórias, as chamadas “outorgas onerosas” (MARICATO, 2001).

Quando se projeta um edifício com vistas à geração de energia solar, é fundamental considerar que o potencial construtivo limitará o volume total da edificação e, portanto, a superfície de cobertura disponível para instalação de painéis fotovoltaicos. Além disso, a forma arquitetônica (por exemplo, edifícios mais altos e esbeltos versus edifícios mais baixos e extensos) interfere na incidência solar e no sombreamento que a edificação projeta sobre si mesma e sobre as vizinhanças (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2019).

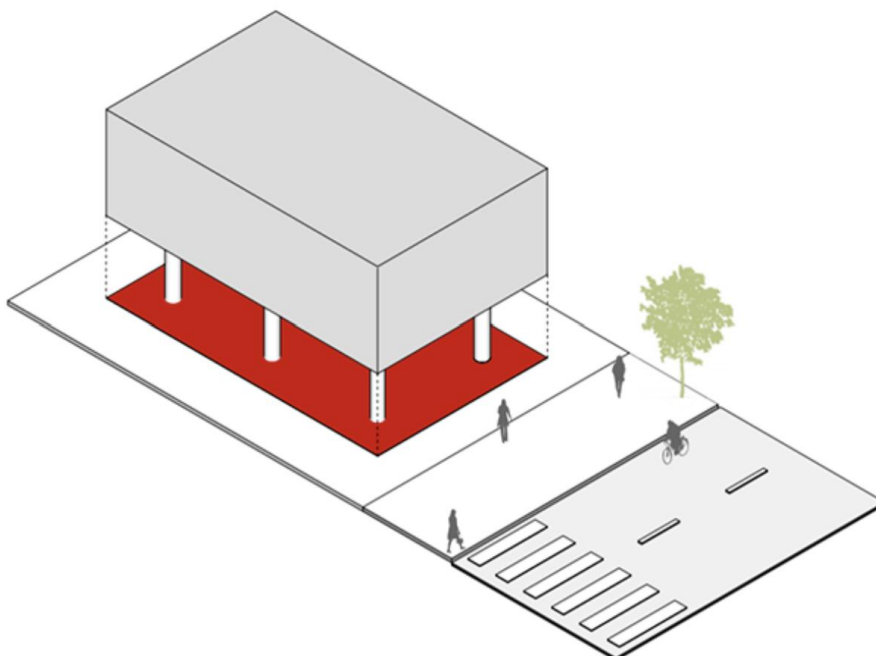


Figura 13- Ilustração da taxa de ocupação. Disponível em:

<https://www.tetrisej.com.br/single-post/como-entender-a-guia-amarela>. Acesso em: 20 de dezembro de 2024.

A taxa de ocupação refere-se à razão entre a área construída em projeção horizontal e a área total do lote, geralmente expressa em porcentagem. Por exemplo, se um terreno tem 1000 m² e a taxa de ocupação máxima permitida for de 50%, a edificação poderá ocupar até 500 m² na projeção do solo (RIBEIRO, 2018). Assim como no potencial construtivo, sua definição procura equilibrar:

- a) Ventilação e iluminação natural: ao limitar a área ocupada no solo, preservam-se recuos e espaços livres que podem favorecer a circulação de ar e a entrada de luz natural (NBR 15575, 2021).
- b) Conforto térmico e ambiental: a menor ocupação do lote pode permitir o uso de áreas verdes e superfícies permeáveis, contribuindo para o conforto térmico urbano e a drenagem de águas pluviais (TUCCI, 2012).
- c) Possibilidade de implantação de tecnologias solares: ao estabelecer limites para a ocupação do solo, cria-se potencial para a conformação de pavimentos recuados (terraços, varandas) ou lajes de cobertura com maior espaço para instalação de sistemas fotovoltaicos ou de aquecimento solar (SANTOS, 2018).

No contexto de geração de energia solar, a taxa de ocupação dialoga com o desenho urbano na medida em que determina as dimensões e a forma que as edificações podem assumir. Edifícios com maior recuo lateral ou frontal podem, por exemplo, apresentar fachadas menos sombreadas pelos vizinhos, ampliando a incidência solar. Em contrapartida, edifícios com elevada taxa de ocupação, concentrados em grandes torres ou blocos, podem criar sombras mais extensas, prejudicando a performance dos painéis (LA ROCHE, 2017).

Para maximizar o aproveitamento de energia solar em áreas urbanas, é essencial:

- a) Planejamento das massas edificadas: projetos que distribuam melhor as volumetrias e alturas, reduzindo sombreamentos mútuos e potencializando a incidência solar nas coberturas e fachadas (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2019).
- b) Diretrizes de sustentabilidade no código de obras: inserção de parâmetros que incentivem (ou exijam) a adoção de sistemas de geração fotovoltaica, telhados verdes ou fachadas ativas, considerando a legislação local (BRASIL, 2001; RIBEIRO, 2018).
- c) Aproveitamento do espaço livre: maior valorização das áreas de recuo e cobertura, que podem receber painéis solares e, ao mesmo tempo, proporcionar espaços de lazer e jardinagem (TUCCI, 2012).

A definição adequada de potencial construtivo e taxa de ocupação é, portanto, um instrumento que permite alinhar os objetivos de eficiência energética, uso racional do solo e sustentabilidade urbana. Ao mesmo tempo, viabiliza o aumento de áreas disponíveis para instalação de painéis fotovoltaicos, favorecendo a transição para matrizes energéticas mais limpas e renováveis (GAVIRIA et al., 2019).

2.1.4. Contexto Urbano de Cuiabá-MT

Cuiabá, a capital do estado de Mato Grosso, Brasil, foi fundada em 1719 durante o ciclo do ouro. Ao longo dos séculos, a cidade evoluiu (figura 14) de um pequeno assentamento para um importante centro urbano, econômico e cultural do Centro-Oeste brasileiro.

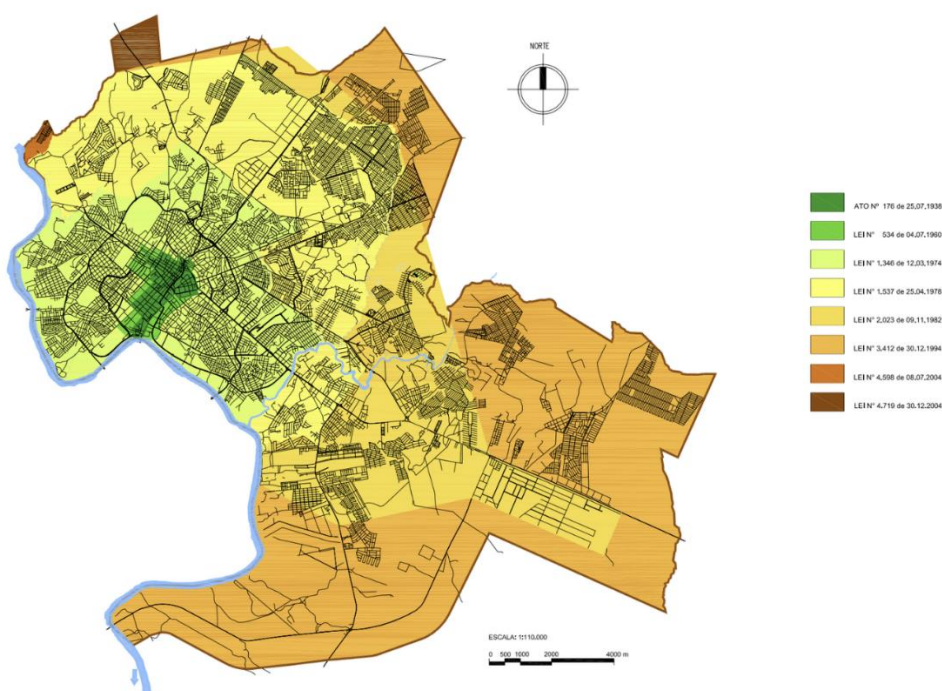


Figura 14: Mapa síntese da evolução do perímetro urbano de Cuiabá. Fonte: Modificado de Plano Diretor de Desenvolvimento Estratégico de Cuiabá 2008)

Geograficamente, Cuiabá (Figura 15) está localizada próxima ao centro geodésico da América do Sul, o que lhe confere uma posição estratégica em termos de acessibilidade e logística regional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010).

A cidade apresenta características urbanas e climáticas que a tornam um objeto de estudo relevante para investigações voltadas à eficiência energética e à sustentabilidade urbana. Seu processo de urbanização tem sido marcado por um crescimento horizontal predominante, especialmente em bairros residenciais de média densidade, ao mesmo tempo em que setores centrais passaram por adensamento progressivo e verticalização parcial. Em estudo anterior, Magalhães et al. (2018) analisaram o potencial da utilização de energia solar no contexto cuiabano, destacando as condições climáticas favoráveis e os desafios urbanos associados à implantação de sistemas fotovoltaicos.



Figura 15: Localização Cuiabá-MT. Fonte: Elaboração própria. (2025)

Cuiabá é conhecida por seu clima tropical quente e úmido, com duas estações bem definidas: a estação chuvosa, que vai de outubro a março, e a estação seca, que ocorre de abril a setembro. As altas temperaturas médias anuais, frequentemente acima de 30°C, e a elevada incidência solar tornam a cidade um local promissor para a implementação de tecnologias de energia solar fotovoltaica.

A morfologia urbana de Cuiabá reflete um desenvolvimento histórico marcado pela expansão horizontal. A densidade populacional de Cuiabá, conforme dados do Censo 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é de 150,41 habitantes por quilômetro

quadrado. Em comparação, a densidade demográfica média do Brasil é de 23,86 habitantes por quilômetro quadrado.

Portanto, a densidade populacional de Cuiabá é significativamente superior à média nacional. Esse dado indica que a cidade possui uma concentração populacional mais elevada em relação à média do país, o que pode influenciar diretamente na morfologia urbana e nas estratégias de planejamento energético, especialmente na integração de sistemas de energia solar.

A alta radiação solar em Cuiabá, combinada com políticas de incentivo à energia renovável, posiciona a cidade como um local estratégico para a geração de energia solar fotovoltaica.

Estudos indicam que a região tem uma das maiores taxas de irradiação solar do país, o que pode ser aproveitado tanto em projetos de pequena escala, como sistemas residenciais, quanto em instalações de maior porte, como usinas solares (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

Apesar do grande potencial, a implementação de energia solar fotovoltaica em Cuiabá enfrenta desafios como a necessidade de infraestrutura adequada, financiamento e conscientização pública sobre os benefícios da energia solar. No entanto, as oportunidades superam os desafios, com benefícios que incluem a redução da dependência de fontes de energia não renováveis, a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e a criação de empregos no setor de energia renovável.

2.1.5. Conforto Térmico e Energia Solar em Climas Quentes

Em cidades de clima tropical, como Cuiabá, o conforto térmico urbano é uma variável crítica para a qualidade ambiental dos espaços públicos e para o desempenho energético das edificações. A combinação entre alta temperatura média anual (superior a 30°C), alta umidade relativa do ar na estação chuvosa e baixos índices de ventilação urbana em zonas densamente construídas potencializa o efeito das ilhas de calor urbanas e eleva substancialmente a demanda por resfriamento artificial (GIVONI, 1998; OKE, 1987).

O planejamento urbano voltado para o conforto térmico externo deve considerar os princípios do desenho urbano bioclimático, que integra variáveis ambientais (como radiação solar, vento e umidade) à morfologia urbana, com o objetivo de criar espaços mais habitáveis e energeticamente eficientes (OLGYAY, 1963; EVANS, 1980).

Estudos apontam que características como orientação das ruas, proporção altura/largura (H/W) das vias, sombreamento natural e presença de vegetação influenciam diretamente a percepção térmica dos pedestres e a eficiência das edificações quanto à captação solar (SANTAMOURIS, 2001).

Diversos índices de conforto térmico têm sido utilizados em pesquisas urbanas e ambientais para quantificar o impacto microclimático da forma urbana:

- a) PMV (Predicted Mean Vote) – desenvolvido por Fanger (1970), é amplamente aplicado em ambientes internos, mas também adaptado para ambientes externos;
- b) PET (Physiological Equivalent Temperature) – desenvolvido por Höppe (1999), é um dos mais utilizados para espaços abertos, pois considera variáveis fisiológicas humanas;
- c) UTCI (Universal Thermal Climate Index) – recomendado pela Organização Meteorológica Mundial, fornece uma análise integrada de condições ambientais sobre o corpo humano e tem se destacado em estudos urbanos por sua adaptabilidade a diferentes contextos climáticos.

Em estudos aplicados ao contexto brasileiro, como os realizados por Moraes (2011) e França et al. (2015), o uso combinado de índices de conforto térmico — como PET, IDT e ITU — permitiu identificar zonas críticas de desconforto térmico urbano, correlacionando-as com parâmetros urbanísticos como densidade construída, permeabilidade do solo e cobertura vegetal. As pesquisas sugerem intervenções como a criação de corredores de vento, ampliação de áreas verdes, utilização de superfícies de alta refletância e redução de áreas impermeáveis como estratégias para mitigar os efeitos do calor nas cidades.

No contexto específico de Cuiabá, a utilização desses índices pode subsidiar a formulação de estratégias urbanas que conciliem a geração de energia solar fotovoltaica e a mitigação de ganhos térmicos indesejáveis.

Por exemplo, o uso de recuos laterais adequados, a criação de fachadas ventiladas e a arborização de ruas podem, simultaneamente, aumentar a eficiência térmica e garantir áreas com boa insolação para instalação de painéis solares, desde que estes estejam protegidos contra o superaquecimento.

Portanto, o desafio do conforto térmico em climas quentes não deve ser visto como um obstáculo à adoção de tecnologias solares, mas como uma oportunidade para repensar o

urbanismo a partir de abordagens bioclimáticas e integradas, promovendo cidades mais resilientes, habitáveis e energeticamente autônomas.

2.2 Metodologia

2.2.1 Fundamentos da Design Science Research

A metodologia Design Science Research (DSR) é empregada nesta pesquisa como ferramenta para desenvolver e testar modelos urbanísticos que maximizem a eficiência da captação solar fotovoltaica. Essa abordagem integra a criação de artefatos com o avanço teórico, possibilitando análises aplicadas ao planejamento urbano sustentável em Cuiabá.

Simon (1996) define a ciência do design como uma atividade criativa voltada para desenvolver alternativas que promovam transformações no mundo real. Nesse contexto, Hevner et al. (2004) descrevem o DSR como um processo estruturado que visa desenvolver artefatos inovadores, tais como modelos, métodos, processos e sistemas aplicáveis. Essa abordagem integra a geração de conhecimento científico com a prática e utiliza a validação experimental para garantir sua relevância.

Segundo Peffers et al. (2007), o DSR contribui tanto para a prática quanto para a teoria, oferecendo soluções concretas e testáveis. Ele também facilita a integração entre teorias existentes e novas abordagens práticas, promovendo avanços significativos em diversas áreas do conhecimento.

Hevner et al. (2004) e Peffers et al. (2007) apresentam um modelo de processo para o DSR, dividido em seis etapas principais:

- a) **Identificação do Problema:** Análise detalhada do contexto e formulação do problema de pesquisa. Essa etapa envolve a compreensão profunda do problema existente e a definição clara dos desafios a serem abordados.
- b) **Definição dos Objetivos:** Estabelecimento dos resultados esperados, com base nas necessidades identificadas. Os objetivos devem ser mensuráveis e direcionados à criação de soluções inovadoras e eficazes.
- c) **Desenvolvimento do Artefato:** Criação de soluções concretas, como modelos, métodos, processos ou sistemas, projetados para resolver o problema identificado. Essa etapa é focada na inovação e na materialização de ideias.

- d) Avaliação: Testes e validação do artefato desenvolvido. Aqui, são aplicadas métricas e técnicas para determinar a eficácia e eficiência da solução proposta. Os resultados dessa avaliação podem levar a refinamentos e ajustes no artefato.
- e) Comunicação: Documentação e disseminação dos resultados obtidos. Isso inclui a elaboração de relatórios, artigos acadêmicos e apresentações para compartilhar os achados com a comunidade científica e prática.
- f) Interação e Melhoria Contínua: Revisão e aprimoramento do artefato com base nos feedbacks recebidos e nos resultados obtidos. Essa etapa garante a evolução contínua da solução proposta.

A abordagem Design Science Research (DSR) tem se mostrado adequada para a criação de artefatos aplicáveis à análise do ambiente construído, como ferramentas computacionais e modelos de simulação urbana (PEFFERS et al., 2007).

A análise da morfologia urbana é fundamental para identificar padrões e características que influenciam a eficiência energética, especialmente no que se refere à incidência solar e ao potencial de geração de energia fotovoltaica (RATTI; RAYDAN; STEEMERS, 2003). A energia solar fotovoltaica, por sua vez, destaca-se como uma fonte renovável de energia, com forte apelo pela sustentabilidade e pela capacidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa (JÄGER-WALDAU, 2013).

Estudos sobre a integração de energia solar no ambiente urbano concentram-se em fatores como orientação dos edifícios, inclinação dos telhados e densidade urbana, que são críticos para maximizar a captura de energia solar.

A aplicação da metodologia DSR para investigar a morfologia urbana de Cuiabá pode fornecer insights valiosos sobre como otimizar o design urbano para aumentar a eficiência da geração de energia solar fotovoltaica.

O Design Science Research (DSR) oferece uma estrutura metodológica robusta para o desenvolvimento de soluções inovadoras aplicáveis à integração entre morfologia urbana e eficiência energética. Em contextos específicos como o de Cuiabá-MT, sua aplicação permite a criação de artefatos que promovem práticas sustentáveis e otimizam a geração de energia solar, alinhando-se a demandas locais e globais (VAN AKEN, 2004; HEVNER et al., 2004).

2.2.2. Design Science Research aplicada a pesquisa

Com base na metodologia Design Science Research (DSR), esta pesquisa modela cenários urbanos em Cuiabá utilizando ferramentas computacionais avançadas para avaliar a eficiência da captação solar fotovoltaica. O processo segue ciclos iterativos de desenvolvimento e avaliação, garantindo precisão analítica e aplicabilidade prática. Por que DSR?

- a) Foco na Inovação: O DSR permite a concepção de soluções específicas (modelos 3D, métodos de simulação) adaptadas às particularidades de Cuiabá.
- b) Iteratividade: As etapas de construção e avaliação de artefatos permitem refinar modelos conforme os resultados vão sendo obtidos.
- c) Alinhamento Teoria-Prática: Além de gerar soluções para o problema, contribui para a literatura de planejamento urbano em clima tropical.

A DSR se baseia em um ciclo iterativo (Figura 16) de construção e avaliação de artefatos, sendo que cada ciclo contribui tanto para a prática quanto para a teoria. Segundo Hevner et al. (2004), a DSR visa a criação de novos conhecimentos através da construção e avaliação de artefatos, que podem ser modelos, métodos, instâncias ou instâncias de sistemas.



Figura 16: Etapas da Design Science Research (DSR). Fonte: Elaboração própria. (2025)

Sendo assim, as etapas da pesquisa foram divididas conforme os itens abaixo:

- a) Definição dos Objetivos da Solução: Identificação do problema e motivação.
- b) Projeto e Desenvolvimento: Desenvolvimento de modelos tridimensionais das áreas de estudo.
- c) Avaliação e Demonstração: Simulações de radiação solar e análise dos resultados.

- d) Comunicação dos Resultados: Discussão e divulgação dos achados.

2.2.3. Modelagem e simulações

As simulações analisaram o potencial de geração solar, considerando a interação entre variáveis urbanísticas, como altura e afastamento das edificações. Essa abordagem permite identificar configurações que otimizam a captação energética para aplicação em projetos urbanos sustentáveis.

Para isso, foram utilizadas ferramentas avançadas de modelagem e simulação:

- a) Modelagem Tridimensional: O Rhinoceros e o Revit foram utilizados para criar modelos detalhados das áreas de estudo. Essas ferramentas permitiram a construção precisa das geometrias urbanas necessárias para a análise.
- b) Simulação de Radiação Solar: As simulações de irradiação solar foram realizadas no Climate Studio, plugin integrado ao Rhinoceros, que utiliza técnicas avançadas de *ray-tracing*⁴ e *radiosity*⁵ para calcular a distribuição da radiação solar sobre as superfícies urbanas ao longo do ano. Para garantir uniformidade nos resultados e evitar interferência de propriedades ópticas variadas, foi adotado um padrão de materiais simplificados para as superfícies analisadas. As massas edificadas foram atribuídas ao material "*Beige Ceramic Tile Wall*", enquanto a topografia pavimentada e as vias foram representadas com o material "*Asphalt Road 2*". Esses materiais foram selecionados por apresentarem propriedades reflexivas médias e neutras, compatíveis com uma avaliação comparativa entre cenários. O modelo tridimensional final, com as geometrias e materiais padronizados, foi então submetido à simulação no plugin Climate Studio dentro do ambiente Rhino, utilizando como referência o arquivo climático no formato EPW específico da cidade de Cuiabá. (Figura 17).

⁴ Ray tracing (traçado de raios): técnica computacional utilizada para simular o comportamento da luz em ambientes tridimensionais, baseada no princípio do lançamento de raios a partir da fonte luminosa ou do observador em direção às superfícies da cena. É amplamente empregada em simulações de iluminação natural e artificial, renderizações realistas e estudos de desempenho energético em edificações, permitindo calcular com precisão a incidência solar, sombreamento e reflexos em superfícies complexas.

⁵ Radiosity: método de simulação de iluminação utilizado em ambientes tridimensionais que calcula a troca de energia luminosa entre superfícies difusas, considerando a emissão, reflexão e absorção de luz. No software Climate Studio, o método radiosity é empregado para estimar com maior precisão a distribuição da luz natural em ambientes internos, permitindo análises de desempenho lumínico e térmico, especialmente em estudos de iluminação natural e conforto visual, com base na interação física da luz entre superfícies opacas.

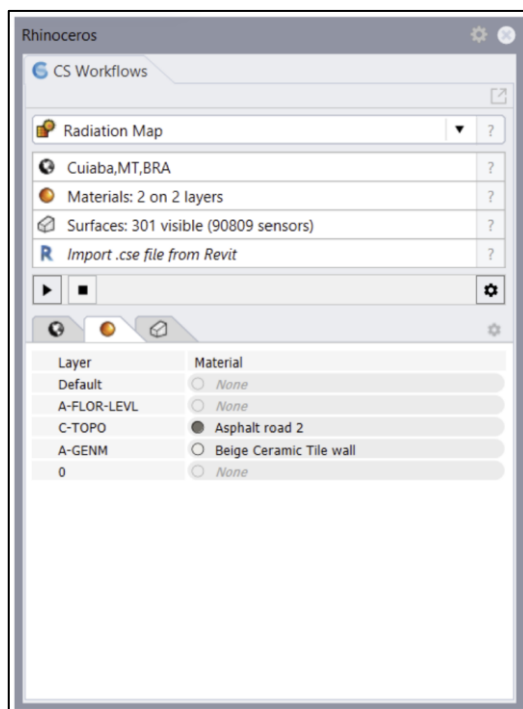


Figura 17: Materiais padronizados para as superfícies analisadas; Fonte: Elaboração própria. (2025)

- c) Dados Climáticos: Para garantir a representatividade climática da simulação, foi utilizado o arquivo EPW⁶ da cidade de Cuiabá, disponibilizado pela plataforma PBE Edifica. Esse arquivo contém dados meteorológicos horários históricos, incluindo radiação solar direta e difusa, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, entre outras variáveis fundamentais para simulações de desempenho ambiental em climas tropicais. A utilização de um arquivo climático regional garante que os resultados obtidos estejam condizentes com as condições reais da localidade analisada.

A abordagem adotada (Figura 18) permitiu uma avaliação minuciosa de como diferentes configurações urbanas afetam a captação de energia solar, considerando a interação complexa entre edificações e o ambiente urbano.

⁶ Arquivo EPW (*EnergyPlus Weather file*): arquivo padronizado que contém dados climáticos horários históricos, utilizados em simulações ambientais e energéticas. Desenvolvido pelo *U.S. Department of Energy* para o software EnergyPlus, o arquivo inclui variáveis como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, entre outras. No Brasil, esses arquivos estão disponíveis por meio da plataforma PBE Edifica, vinculada ao Ministério de Minas e Energia e ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), com apoio do PROCEL.

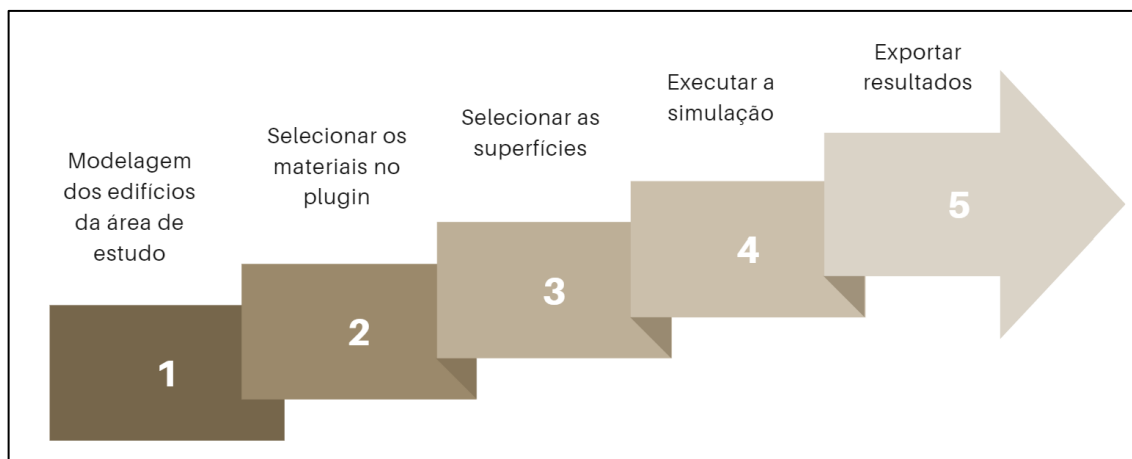


Figura 18: Workflow das simulações utilizando o Rhinoceros e ClimateStudio. Fonte: Elaboração própria. (2025)

No contexto desta pesquisa, a DSR foi aplicada para desenvolver modelos tridimensionais que permitem a análise do impacto da morfologia urbana no potencial de geração de energia solar.

O processo envolveu a criação de cenários urbanos detalhados utilizando softwares como Rhinoceros e Revit, seguido por simulações de radiação solar com Climate Studio.

Os artefatos desenvolvidos foram então avaliados através de simulações que mediram a irradiação solar disponível em diferentes configurações urbanas, permitindo uma análise comparativa dos resultados.

2.2.4. Áreas de Estudo

Para identificar bairros representativos da diversidade morfológica de Cuiabá, considerou-se: a disponibilidade de dados atualizados (informações cartográficas, imagens de satélite), as diferentes densidades e gabaritos (bairro de menor densidade vs. região central) – Figura 19, e a relevância urbana (bairro em processo de verticalização x bairro consolidado).

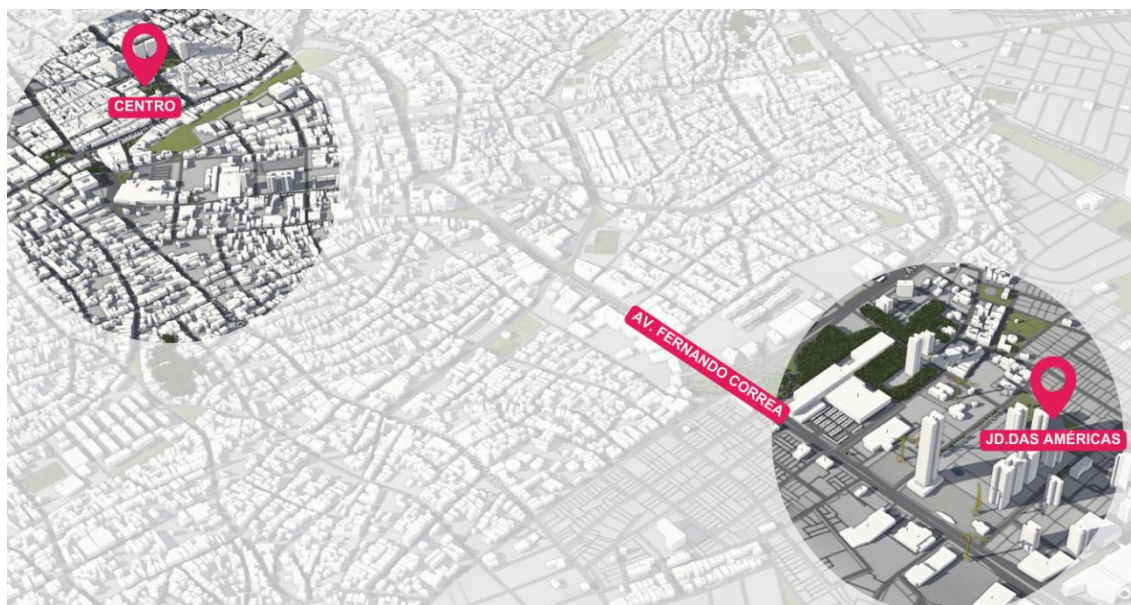


Figura 19: Localização áreas de estudo e diferentes densidades. Fonte: Elaboração própria. (2025)

A escala de trabalho é a da unidade de vizinhança, pois possibilita realizar um estudo de mudanças na forma urbana e avaliar as condições de aproveitamento do potencial fotovoltaico.

Segundo Calthorpe (1993), uma unidade de vizinhança eficiente deve ter em torno de 50 hectares, conter diversidade de usos e estar estruturada de forma a permitir deslocamentos a pé até equipamentos urbanos básicos, promovendo sustentabilidade ambiental, coesão social e menor dependência do automóvel.

Sendo assim, foram escolhidas duas tipologias típicas da cidade de Cuiabá.

- a) Centro de Cuiabá (Figura 20): Caracterizado por uma maior densidade urbana, com edificações mais altas e menores afastamentos entre as construções. As ruas são mais estreitas e as edificações estão mais próximas umas das outras.
- b) Bairro Jardim das Américas (Figura 20): Possui um coeficiente de ocupação menor e maiores afastamentos entre as construções, resultando em uma menor densidade urbana. As edificações são geralmente mais baixas e bem espaçadas. Além disso, é um bairro consolidado e que passa, atualmente, por grande mudança do uso e ocupação e por verticalização.

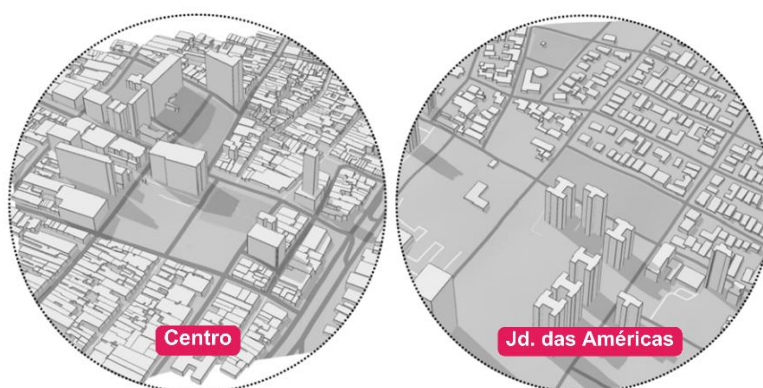


Figura 20: Bairros Centro e Jardim das Américas. Fonte: Elaboração própria. (2025)

Para que fosse feita a análise dos dados e estudo de caso entre os bairros citados, foi necessário a avaliação dos parâmetros urbanísticos de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO), com base nos parâmetros definidos pela legislação urbanística vigente no município de Cuiabá, estabelecidos pela Lei Complementar nº 389/2015 (LOUOS).

Os bairros analisados pertencem a zonas distintas, com diferentes diretrizes de uso e ocupação do solo (figura 21). O Centro Histórico está inserido predominantemente na Zona Central (ZC) e em trechos classificados como Zona de Interesse Histórico 1 (ZIH1), enquanto o bairro Jardim das Américas está incluído na Zona Predominantemente Residencial (ZPR).



Figura 21: Mapa de Zonaamento Urbano de Cuiabá-MT. Fonte: Modificado de Lei Complementar nº 389/2015 (LOUOS).

A Zona Central (ZC) é caracterizada por uso misto, alta densidade e permissividade para edificações verticais, sendo uma área consolidada da cidade, com grande concentração de serviços, comércio e moradias. Já a Zona de Interesse Histórico 1 (ZIH1) delimita trechos do Centro onde há incidência de bens tombados ou de interesse de preservação, implicando diretrizes adicionais relacionadas ao controle volumétrico, preservação do patrimônio e limites de gabarito. Nessas zonas, os parâmetros urbanísticos previstos pela LOUOS permitem Potencial Construtivo (PC) básico de até 2,0, com possibilidade de outorga onerosa⁷ para incrementos, e Coeficiente de Ocupação (CO) variável, podendo atingir 80% em alguns casos.

Por outro lado, o bairro Jardim das Américas, localizado na Zona Predominantemente Residencial (ZPR), apresenta ocupação de média densidade, uso majoritariamente habitacional unifamiliar e baixa verticalização. Nessa zona, a LOUOS estabelece um Potencial Construtivo básico de 1,0 e um Coeficiente de Ocupação máximo de 50%, com limites mais restritivos quanto à altura e ao alinhamento das edificações, visando preservar o caráter residencial e a qualidade ambiental do bairro.

Lous 2015 - Índices urbanísticos predominantes por área

Área	Zona	Macrozona	PC	CO
Centro	ZC/ZIH1	MC	1,0 a 2,0*	até 80%
Jd.das Américas	ZUM/ZPR	MCU	0,5 a 1,0	30 a 50%

Figura 22: Resumo dos índices urbanísticos. Fonte: Elaboração própria (2025)

Além da modelagem e análise dos cenários originais consolidados, para a conclusão da metodologia DSR, a partir de simulações comparativas, foram criados cenários propostos dentro de um quarteirão do Bairro Jardim das Américas, bairro esse que passa por mudanças em seu uso e ocupação.

⁷ *Outorga onerosa do direito de construir* é um instrumento previsto no Estatuto da Cidade (Lei Federal nº 10.257/2001) e regulamentado por legislações municipais, que permite ao proprietário construir acima do coeficiente de aproveitamento básico definido para o terreno, mediante contrapartida financeira ao poder público. Essa contrapartida, cobrada em forma de pagamento, é revertida em melhorias urbanas, como habitação social, mobilidade, infraestrutura ou áreas verdes. Em Cuiabá, os índices superiores ao Potencial Construtivo Básico, como definidos na LOUOS (Lei Complementar nº 389/2015), estão condicionados à aplicação desse mecanismo, especialmente em zonas como a ZMC (Zona Mista Central).

A criação dos cenários propostos foi estruturada com o intuito de avaliar, de forma detalhada, o impacto de diferentes configurações urbanísticas sobre o ganho de radiação solar e a redução do sombreamento em um quarteirão típico, com lotes de 20x40 metros (figura 23). Essa abordagem permitiu a simulação e a análise de múltiplas combinações de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO), variáveis diretamente relacionadas à densidade e ao arranjo espacial das edificações.

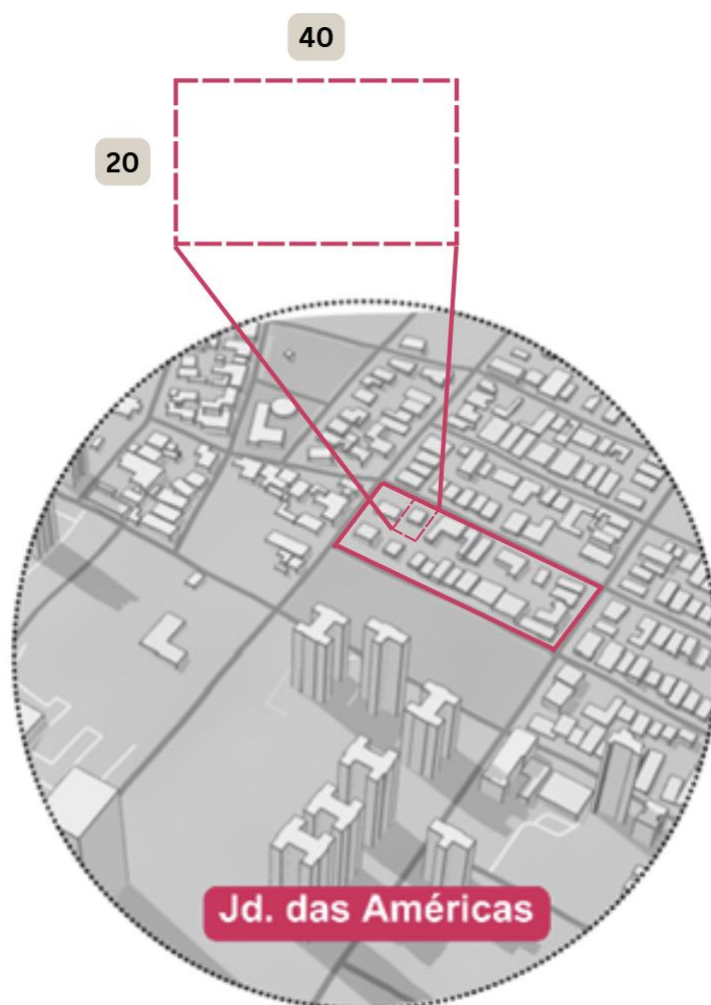


Figura 23: Quarteirão típico e lote 20x40. Fonte: Elaboração própria (2025)

O principal objetivo foi investigar como ajustes nos parâmetros urbanísticos influenciam:

- a) A incidência solar nas superfícies edificadas – Avaliar a quantidade de radiação solar disponível para aproveitamento.
- b) O sombreamento mútuo entre edificações – Analisar como a proximidade e altura das construções afetam a exposição solar.

- c) A eficiência na utilização de áreas para instalação de painéis solares – Identificar configurações que maximizem o aproveitamento energético.

Essa análise contribui para o planejamento de estratégias urbanísticas que conciliem eficiência energética e sustentabilidade em áreas urbanas com alta densidade solar, como Cuiabá.

A formulação dos cenários foi dividida em três grupos, cada um explorando variações específicas, a definição dos grupos de cenários foi fundamentada em configurações urbanísticas realistas, compatíveis com os parâmetros legais vigentes e as especificidades de uso e ocupação do solo do bairro Jardim das Américas, citados anteriormente. Essa contextualização normativa permitiu avaliar não apenas a eficiência energética das tipologias simuladas, mas também sua viabilidade de implementação à luz das diretrizes urbanísticas do município.

Grupo 1 – Variação do Potencial Construtivo com CO Fixo (figura 24)

Neste grupo, o Coeficiente de Ocupação (CO) foi mantido constante em 50%, enquanto o Potencial Construtivo (PC) variou em três níveis:

- a) 1A – PC = 0,50
- b) 1B – PC = 0,75
- c) 1C – PC = 1,00

O objetivo foi avaliar o impacto do aumento da altura das edificações (Potencial Construtivo) sobre a exposição solar, mantendo uma ocupação média do terreno.



Figura 24: Cenários 1A, 1B e 1C. Fonte: Elaboração própria (2025).

Grupo 2 – Variação do Coeficiente de Ocupação com PC Fixo (figura 25)

Neste modelo, o Potencial Construtivo (PC) foi mantido fixo em 1,00, enquanto o Coeficiente de Ocupação (CO) variou em três faixas:

- a) 2A – CO = 30%
- b) 2B – CO = 40%
- c) 2C – CO = 50%

Nesse grupo, o objetivo foi avaliar o efeito da compactação horizontal (taxa de ocupação) sobre a eficiência da radiação solar, com edificações de maior altura.



Figura 25: Cenários 2A, 2B e 2C; . Fonte: Elaboração própria (2025).

Grupo 3 – Combinação de Variações em PC e CO (figura 26)

Neste grupo, tanto o Potencial Construtivo (PC) quanto o Coeficiente de Ocupação (CO) foram ajustados simultaneamente, criando um conjunto mais amplo de cenários:

- a) 3A – PC = 0,50 e CO = 30%
- b) 3B – PC = 0,50 e CO = 40%
- c) 3C – PC = 0,50 e CO = 50%
- d) 3D – PC = 0,75 e CO = 30%
- e) 3E – PC = 0,75 e CO = 40%
- f) 3F – PC = 0,75 e CO = 50%
- g) 3G – PC = 1,00 e CO = 30%
- h) 3H – PC = 1,00 e CO = 40%
- i) 3I – PC = 1,00 e CO = 50%

Aqui, o objetivo foi simular as interações entre altura e ocupação do solo, identificando combinações mais eficientes para maximizar a captação de radiação solar e minimizar perdas por sombreamento.

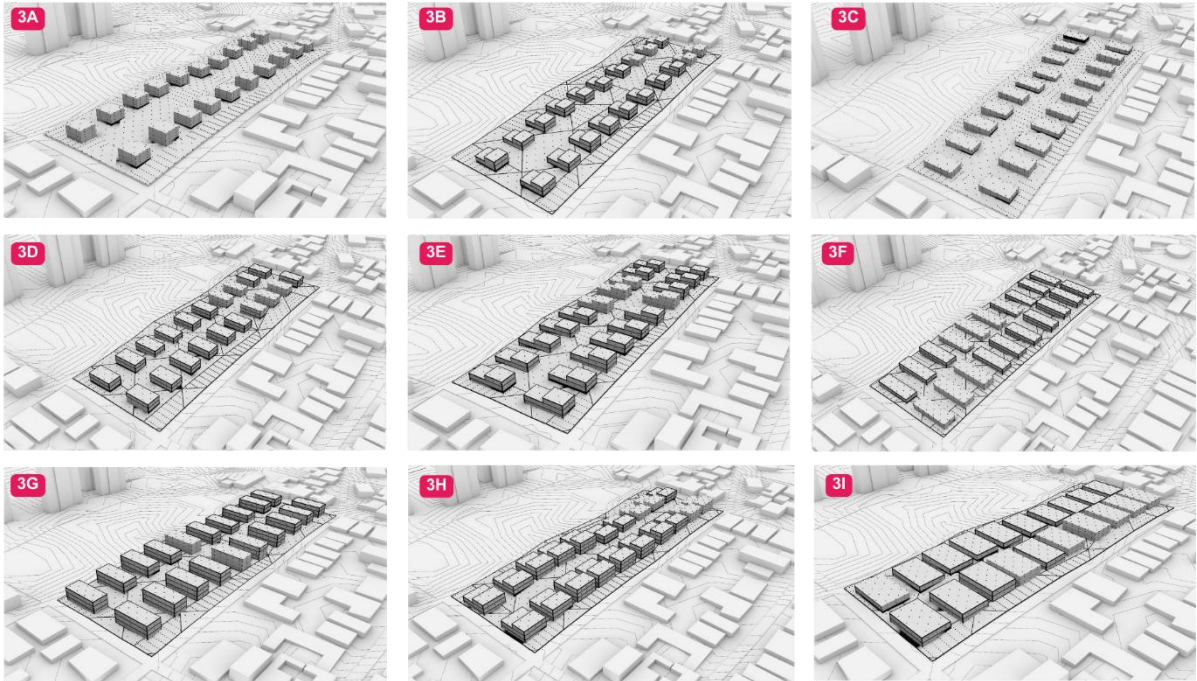


Figura 26: Cenários 3A, 3B, 3C, 3D, 3E, 3F, 3G, 3H e 3I. Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 1 – Cenários simulados - PC e CO

<i>Cenários Propostos</i>	<i>Potencial Construtivo (PC)</i>	<i>Coefficiente de Ocupação (CO)</i>
1A	0,50	50%
1B	0,75	50%
1C	1,00	50%
2A	1,00	30%
2B	1,00	40%
2C	1,00	50%
3A	0,50	30%
3B	0,50	40%

<i>3C</i>	0,50	50%
<i>3D</i>	0,75	30%
<i>3E</i>	0,75	40%
<i>3F</i>	0,75	50%
<i>3G</i>	1,0	30%
<i>3H</i>	1,0	40%
<i>3I</i>	1,0	50%

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados obtidos a partir dos cenários simulados foram analisados por meio do software Climate Studio, que possibilitou a mensuração da incidência solar sobre as coberturas e fachadas das edificações em cada configuração morfológica testada. A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros urbanísticos adotados em cada modelo, com destaque para dois comportamentos distintos identificados nas simulações:

- a) Maior captação solar: Observada nos cenários de baixa densidade urbana, com Potencial Construtivo (PC) de 0,50 e Coeficiente de Ocupação (CO) igual ou inferior a 40%. Essas configurações, ainda que não estejam previstas na legislação vigente de Cuiabá (LOUOS), foram incluídas com o objetivo de ampliar a análise e discutir possibilidades futuras de revisão normativa. Nesses cenários, a menor altura das edificações e o maior espaçamento entre construções resultaram em redução significativa do sombreamento, maximizando a radiação solar incidente sobre as superfícies captadoras.
- b) Menor eficiência energética: Verificada nos cenários de alta densidade, com PC de 1,00 e CO de 50%, parâmetros que refletem os limites máximos estabelecidos na LOUOS para diversas zonas urbanas. Nessas configurações, a maior altura das edificações e a ocupação mais intensiva do solo geraram sombreamento mútuo acentuado, especialmente entre fachadas voltadas para o interior das quadras.

2.3 Resultados

Este tópico apresenta e analisa os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o software Climate Studio.

O foco é avaliar a influência da morfologia urbana sobre a captação de radiação solar nas edificações e no solo, considerando diferentes configurações de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO).

Os dados são discutidos em termos de desempenho energético e eficiência na captação de radiação solar, destacando as variáveis espaciais e morfológicas que impactam diretamente a disponibilidade energética.

2.3.1- Estudo de caso e simulação no climate studio

No bairro Jardim das Américas, a simulação indicou uma incidência solar de 869 kWh/m²·ano (Figura 27) nas superfícies das edificações e no solo. A análise considerou a radiação incidente sobre coberturas, fachadas e o terreno, permitindo uma avaliação abrangente da captação solar disponível.

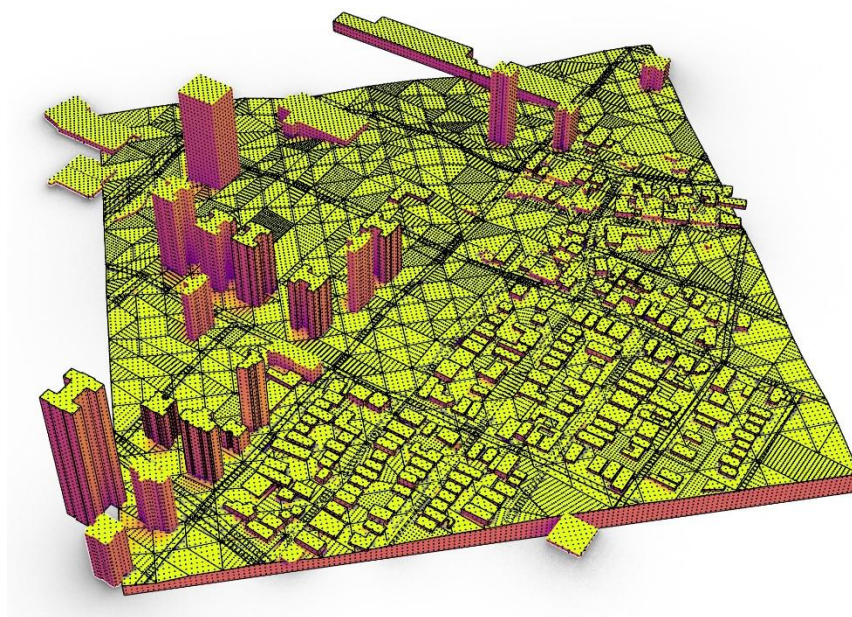


Figura 27: Simulação ClimateStudio – Jardim das Américas. Fonte: Elaboração própria (2025).

A configuração urbanística do bairro, caracterizada por afastamentos maiores entre as construções, favoreceu uma melhor captura de radiação solar, especialmente nas coberturas dos edifícios. Essa característica evidencia a relevância do espaçamento entre edificações como um fator determinante para a maximização da eficiência energética.

No caso específico do Jardim das Américas, essa condição está associada ao fato de o bairro ter sido originalmente concebido como uma área residencial, com predominância de edificações unifamiliares e de baixo gabarito, obedecendo a parâmetros urbanísticos mais restritivos quanto à altura e ocupação do solo.

No entanto, o bairro tem passado por um processo gradativo de transição para o uso misto, impulsionado pela localização estratégica, pela presença de equipamentos urbanos e pelo adensamento funcional em determinadas vias. Esse momento de transformação explica a coexistência de morfologias horizontais com o surgimento de novas tipologias de uso comercial e institucional, o que torna o Jardim das Américas um exemplo representativo de zona urbana em reestruturação, cuja morfologia atual ainda favorece o aproveitamento da radiação solar direta — sobretudo em comparação com bairros mais consolidados e verticalizados da cidade.

Em contraste, no bairro Centro, a simulação apontou uma incidência solar de 665 kWh/m²·ano (Figura 28).

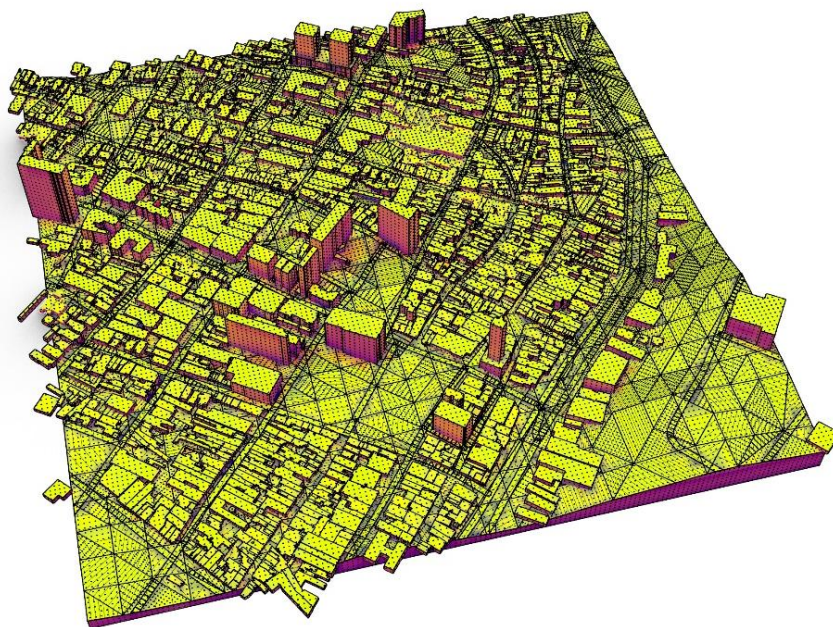


Figura 28: Simulação ClimateStudio – Centro. Fonte: Elaboração própria (2025).

A maior densidade urbana do Centro, resultou em sombreamento mútuo acentuado, limitando a captação de radiação solar. Essa diferença de 204 kWh/m²·ano em relação ao Jardim das Américas reforça a influência direta da morfologia urbana sobre a eficiência energética e destaca o papel do planejamento urbano na otimização da exposição solar.

A Tabela 2 apresenta os resultados detalhados das simulações computacionais realizadas para avaliar a exposição solar nos diferentes cenários urbanísticos propostos. Os valores, expressos em kWh/m²·ano, demonstram como a variação dos parâmetros Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO) impacta a captação de radiação solar.

Tabela 2 – Exposição solar nos cenários simulados

<i>Cenários Propostos</i>	<i>Potencial Construtivo</i>	<i>Coeficiente de Ocupação</i>	<i>Exposição solar (KWh/m²-ano)</i>
<i>1A</i>	0,50	50%	369
<i>1B</i>	0,75	50%	308
<i>1C</i>	1,00	50%	268
<i>2A</i>	1,00	30%	292
<i>2B</i>	1,00	40%	283
<i>2C</i>	1,00	50%	265
<i>3A</i>	0,50	30%	389
<i>3B</i>	0,50	40%	367
<i>3C</i>	0,50	50%	365
<i>3D</i>	0,75	30%	331
<i>3E</i>	0,75	40%	315
<i>3F</i>	0,75	50%	310
<i>3G</i>	1,0	30%	299
<i>3H</i>	1,0	40%	285
<i>3I</i>	1,0	50%	269

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados indicam que cenários com Potencial Construtivo mais baixo (0,50) e Coeficiente de Ocupação moderado (30% a 50%) apresentaram melhor desempenho na captação solar. Essas configurações, com edificações mais baixas e afastadas, minimizaram o sombreamento mútuo, favorecendo a eficiência energética.

Por outro lado, cenários com PC elevado (1,00) e CO alto (50%) resultaram em menores índices de exposição solar, evidenciando as perdas causadas pelo adensamento urbano e pelo sombreamento excessivo.

A Figura 29 complementa a análise ao apresentar graficamente as tendências de exposição solar nos cenários simulados.



Figura 29: Simulação ClimateStudio – Cenários. Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se uma relação inversamente proporcional entre densidade urbana e eficiência energética. À medida que aumentam os valores de PC e CO, há uma queda na incidência solar, destacando o impacto do sombreamento mútuo sobre a captação de radiação.

Para aprofundar essa análise e validar estatisticamente as tendências observadas, foi realizado o teste de Kruskal-Wallis com o objetivo de verificar se as diferenças nos índices de exposição solar entre os cenários simulados são estatisticamente significativas.

2.3.2 Análise Estatística e Comparativa dos Cenários Propostos

Após a realização das simulações de radiação solar nos diferentes cenários morfológicos propostos — variando os parâmetros de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO) — foi conduzida uma análise estatística com o objetivo de verificar se as diferenças observadas na exposição solar eram estatisticamente significativas.

Inicialmente, foi realizada uma avaliação da normalidade da distribuição dos dados, utilizando o teste de Shapiro-Wilk, que apontou valores de $p < 0,05$ para os grupos analisados.

Esse resultado indicou que os dados não seguiam uma distribuição normal, inviabilizando o uso de testes paramétricos tradicionais, como a ANOVA. Diante disso, optou-se pela utilização da estatística não paramétrica de Kruskal-Wallis, método recomendado para a comparação de três ou mais grupos independentes quando as suposições de normalidade não são atendidas.

O teste de Kruskal-Wallis foi aplicado para comparar os níveis de exposição solar entre os três grupos de Potencial Construtivo simulados (PC = 0,50; 0,75; 1,00). Os resultados indicaram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, com $H = 13,08$ e $p = 0,0014$.

Isso demonstra que o aumento do PC, associado à verticalização das edificações e ao adensamento urbano, impacta negativamente a incidência solar sobre as superfícies das edificações. Os cenários com PC = 0,50, por exemplo, apresentaram maior mediana de exposição solar e menor variabilidade, enquanto os cenários com PC = 1,00 foram os que registraram as menores médias de irradiação, em virtude do sombreamento mútuo causado por construções mais altas e próximas entre si.

Cabe destacar que, para a aplicação da análise estatística, optou-se por utilizar exclusivamente o Potencial Construtivo (PC) como variável independente nos testes de

comparação entre os cenários simulados. Essa escolha se justifica por dois aspectos principais. Primeiro, porque nos cenários analisados — especialmente no Grupo 1 — o Coeficiente de Ocupação (CO) foi mantido fixo em 50%, permitindo isolar o efeito do PC sobre a exposição solar.

Dessa forma, garantiu-se o controle das demais variáveis urbanísticas, assegurando comparabilidade entre os grupos. Segundo, porque o PC tem relação direta com a altura das edificações, o que impacta significativamente o sombreamento vertical sobre coberturas e fachadas — superfícies consideradas nas simulações de irradiação solar. Já o CO influencia a ocupação horizontal do lote, afetando indiretamente a radiação incidente e sendo mais apropriado para análises morfológicas tridimensionais do tecido urbano.

Assim, a adoção do PC como variável de segmentação estatística foi tecnicamente fundamentada e compatível com os objetivos da presente análise. Esses resultados reforçam a hipótese central desta pesquisa: há uma correlação inversa entre a densidade construtiva e o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico, especialmente em contextos urbanos com clima quente e alta incidência solar, como o de Cuiabá.

A análise estatística fortalece o argumento de que diretrizes urbanísticas que favoreçam afastamentos laterais, recuos e limites de gabarito mais moderados podem contribuir para a eficiência energética e a sustentabilidade do tecido urbano.

2.4 Discussão

Os resultados confirmam a hipótese de que a morfologia urbana altera significativamente o potencial de geração de energia solar fotovoltaica. Bairros com menor densidade urbana e maior espaçamento entre edificações são mais eficazes na captação de energia solar.

Apesar dos benefícios na captação solar proporcionados por edificações mais baixas e afastadas, essa configuração pode levar à expansão horizontal, elevando custos de infraestrutura e dificultando a mobilidade urbana. Nesse sentido, estratégias híbridas, como a aplicação de fachadas fotovoltaicas em edifícios mais altos e recuos planejados, surgem como alternativas viáveis para conciliar densidade urbana e eficiência energética.

Discussões Principais:

- a) Como os parâmetros PC e CO influenciam o sombreamento mútuo dos edifícios?

- b) Quais configurações se mostraram mais eficazes para maximizar a insolação (por exemplo, PC=0,50; CO=30–40%)?
- c) O que esses resultados significam na prática para o Plano Diretor e a Lei de Uso e Ocupação do Solo (LOUOS) de Cuiabá?
- d) Possibilidades de aplicar fachadas fotovoltaicas em edifícios mais altos para compensar a menor área de cobertura disponível?

A análise dos resultados de irradiação solar em cada cenário de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO) adquire uma dimensão ainda mais rica quando inserida no contexto da morfologia urbana de Cuiabá (MT) e de sua vocação para geração de energia solar fotovoltaica.

Cuiabá é uma das capitais brasileiras com maiores índices de radiação ao longo do ano, mas também enfrenta desafios climáticos e urbanísticos específicos de regiões muito quentes, o que faz com que o desenho urbano (forma dos quarteirões, alturas, gabaritos, alinhamentos) seja particularmente relevante para o desempenho solar e, ao mesmo tempo, para o conforto térmico.

2.4.1 Análise Comparativa dos Bairros

O gráfico da figura 30 apresenta a comparação da incidência solar nos bairros Jardim das Américas e Centro, com valores expressos em kWh/m²-ano. Observa-se que o Jardim das Américas registrou uma incidência solar significativamente superior, alcançando 869 kWh/m²-ano, enquanto o Centro obteve 665 kWh/m²-ano. Essa diferença é atribuída à configuração morfológica de cada bairro.

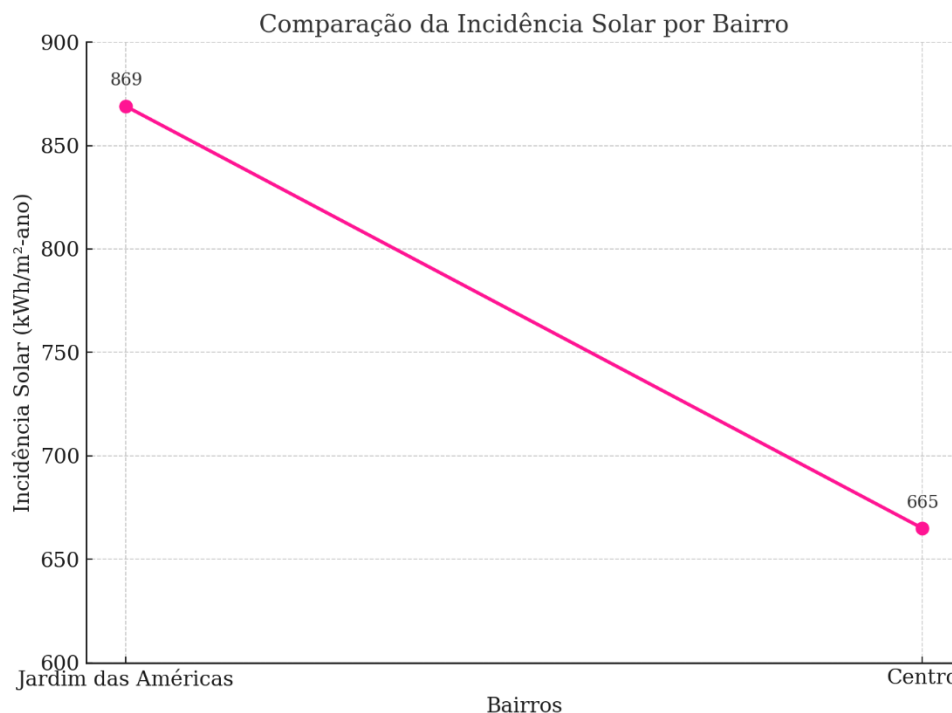


Figura 30: Gráfico Comparação incidência solar por bairro. Fonte: Elaboração própria.

Jardim das Américas: A maior distância entre as edificações favoreceu a penetração da luz solar, maximizando a capacidade de incidência nos planos horizontais (coberturas) e verticais (fachadas). Observou-se ainda que, em determinados cenários (por exemplo, PC de 0,50 e CO variando de 30% a 50%), o nível de irradiação anual se manteve mais homogêneo entre as superfícies, indicando uma menor obstrução solar.

Centro de Cuiabá: A maior proximidade entre edificações, aliada à verticalização, promoveu sombras mais extensas, resultando em níveis de irradiação inferiores. Essa constatação dialoga com estudos como o de Chatzipoulka et al. (2016), que relatam a correlação direta entre densidade urbana e obstrução solar em grandes centros.

A diferença de até 25% na disponibilidade de radiação entre os dois bairros é especialmente significativa em se tratando de geração fotovoltaica, uma vez que variações de dezenas de pontos percentuais podem impactar diretamente a viabilidade econômica e energética de projetos de energia solar.

2.4.2 Relação entre Densidade, Sombreamento e Eficiência Energética

O gráfico da Figura 31 evidencia a relação entre Potencial Construtivo (PC) e exposição solar, destacando que cenários com PC mais baixos (0,50) apresentam maior incidência de

radiação solar, superando 360 kWh/m²-ano. Isso se deve à menor altura das edificações, que reduz o sombreamento mútuo.

Por outro lado, cenários com PC mais elevados (1,00) mostram queda na captação solar, indicando que volumes mais compactos e altos comprometem a eficiência energética. Esses resultados reforçam a necessidade de equilibrar densidade e insolação no planejamento urbano, otimizando a exposição solar sem comprometer o uso racional do solo.

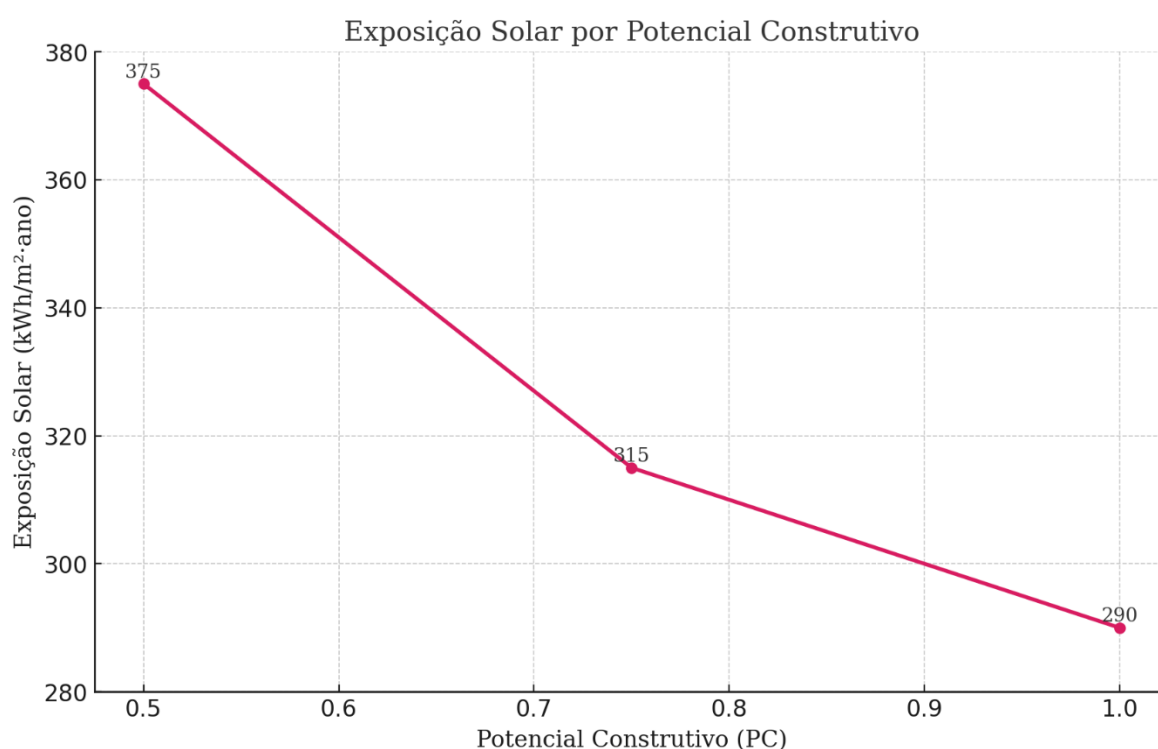


Figura: 31: Gráfico Exposição Solar por Potencial Construtivo. Fonte: Elaboração própria.

A Figura 32 ilustra a influência do Coeficiente de Ocupação (CO) sobre a radiação solar disponível. Os cenários com CO mais baixos (30%) apresentam melhores resultados, atingindo até 340 kWh/m²-ano. À medida que o CO aumenta para 50%, observa-se uma queda gradual, atribuída ao aumento da compactação urbana e do sombreamento.

Assim, o gráfico reforça a importância de definir coeficientes moderados para favorecer a eficiência solar e, ao mesmo tempo, evitar a expansão horizontal excessiva, garantindo equilíbrio entre densidade e sustentabilidade.

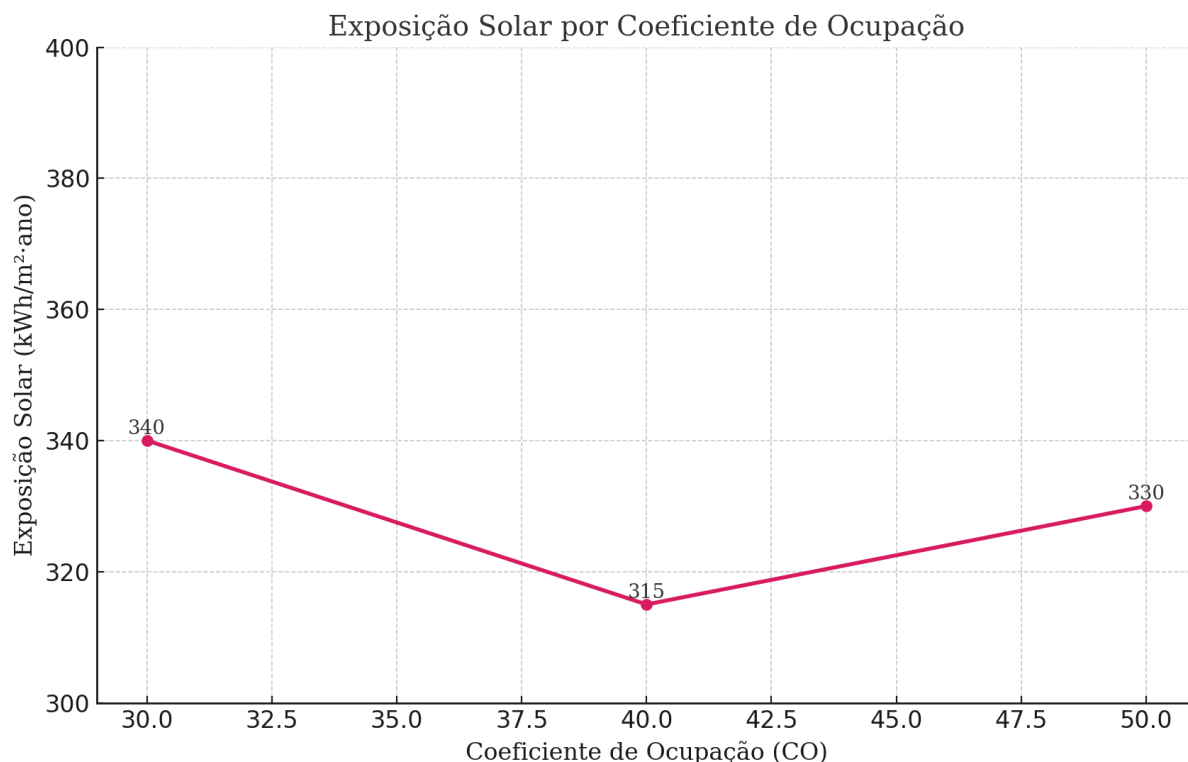


Figura: 32: Gráfico Comparação Exposição Solar por coeficiente de ocupação. Fonte: Elaboração própria.

A densidade urbana é frequentemente associada à racionalização do uso da infraestrutura e à contenção do espraiamento urbano, promovendo maior eficiência no uso do solo e na mobilidade urbana (UN-HABITAT, 2013), porém pode comprometer a disponibilidade de irradiação solar. Baixa densidade e afastamentos generosos favorecem a captação de radiação solar, uma vez que reduzem o sombreamento entre edificações (STEEMERS, 2003; RATTI et al., 2003). No entanto, esse padrão de ocupação urbana pode elevar significativamente os custos de infraestrutura, como redes de transporte, saneamento e serviços públicos (MARICATO, 2001).

Assim, há uma clara tensão entre densidade adequada e a maximização da insolação nas superfícies edificadas, devendo-se buscar um equilíbrio que atenda tanto às demandas energéticas quanto às de ordenamento territorial.

Embora bairros com baixa densidade apresentem melhor desempenho na captação solar, essa configuração pode resultar em expansão horizontal e aumento dos custos de infraestrutura e mobilidade urbana. Portanto, políticas urbanísticas devem equilibrar eficiência energética e viabilidade econômica, promovendo soluções híbridas.

Nesse sentido, faz-se necessária a criação de zonas mistas onde a verticalização seja acompanhada por recuos estrategicamente planejados, minimizando o sombreamento. Sob perspectiva do Planejamento Energético: Em regiões de clima quente, como Cuiabá, é preciso considerar ainda o conforto térmico e o microclima urbano.

Edifícios altos podem gerar maior sombreamento benéfico para espaços públicos, reduzindo ilhas de calor, mas, ao mesmo tempo, podem prejudicar a insolação nas coberturas voltadas à instalação de painéis solares. Logo, é necessária uma análise que concilie eficiência solar com estratégias de mitigação de calor urbano (GAGO et al., 2013).

2.4.3 Parâmetros Urbanísticos e Sombreamento Mútuo

O gráfico da Figura 33 apresenta os efeitos combinados de Potencial Construtivo (PC) e Coeficiente de Ocupação (CO) na captação solar. Os melhores resultados foram observados em cenários com PC = 0,50 e CO entre 30% e 40%, alcançando mais de 365 kWh/m²-ano. Essas configurações favorecem maior insolação devido à menor altura e ocupação, reduzindo o sombreamento.

Por outro lado, cenários com PC = 1,00 e CO = 50% apresentaram os piores desempenhos, com valores abaixo de 270 kWh/m²-ano, evidenciando os efeitos negativos da verticalização densa.

Os achados reforçam a necessidade de revisar parâmetros urbanísticos, como o Potencial Construtivo (PC) e o Coeficiente de Ocupação (CO). **Cenários com PC = 0,50 e CO entre 30% e 40% apresentaram melhor desempenho na captação solar.** Políticas públicas devem incluir incentivos para fachadas fotovoltaicas e bônus construtivos vinculados à eficiência energética, favorecendo um equilíbrio entre densidade e captação solar.

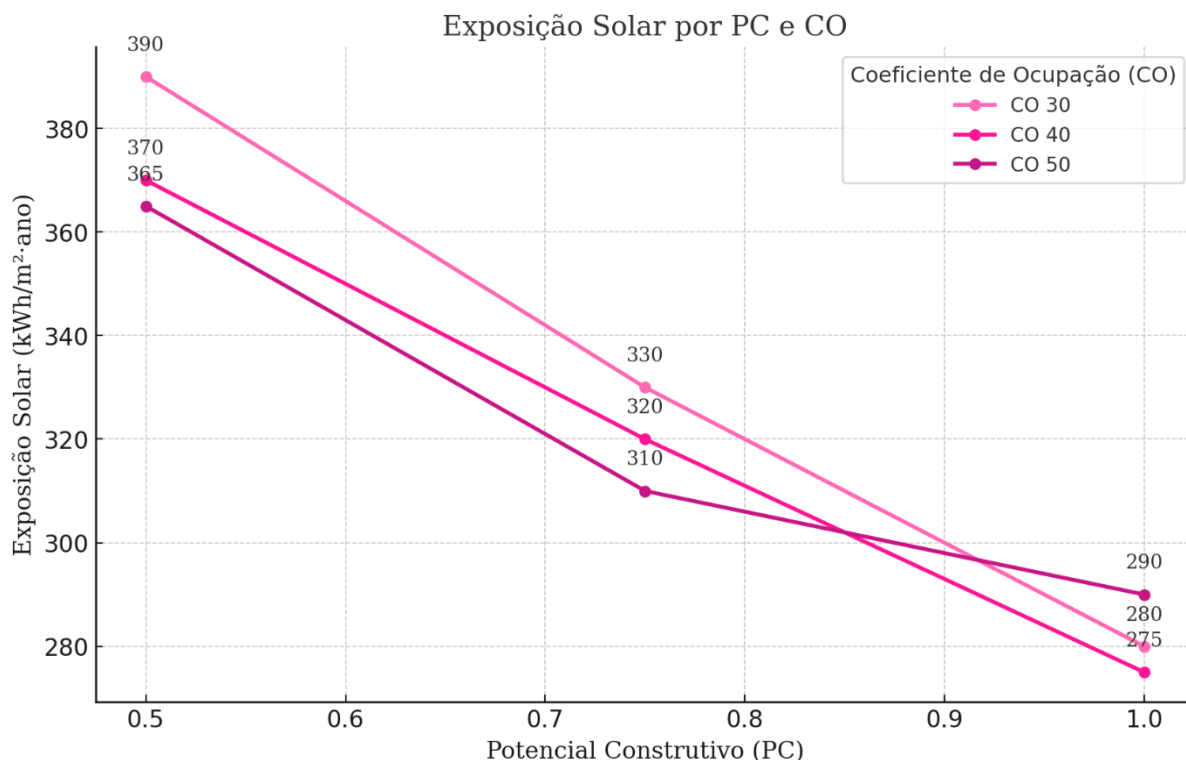


Figura: 33: Gráfico Comparação Exposição Solar por PC e CO. Fonte: Elaboração própria.

Os dados mostram que valores de PC e CO mais baixos tendem a minimizar o sombreamento mútuo, enquanto valores mais altos podem se traduzir em obstruções significativas. Na prática, isso se revela no resultado dos cenários propostos:

Cenários com PC = 0,50 e CO = 30–40% mostraram maiores índices de kWh/m²·ano, evidenciando que a conjugação de altura limitada e baixa ocupação do solo contribui para a exposição solar prolongada.

Em contrapartida, os cenários simulados com PC = 1,00 e CO = 50% apresentaram significativa redução na incidência solar, principalmente nas fachadas voltadas a vias estreitas, devido ao sombreamento entre edificações. Essa tendência é consistente com os princípios estabelecidos por Ghisi e Lamberts (2004), que destacam a influência da forma edificada e da obstrução solar no desempenho energético.

Esse entendimento pode orientar revisões do Plano Diretor e da Lei de Uso e Ocupação do Solo (LOUOS) de Cuiabá, visando equilibrar a necessidade de compactação urbana com o incentivo ao aproveitamento de energia solar. Políticas públicas que flexibilizem certos coeficientes ou outorgas onerosas para incorporar soluções fotovoltaicas podem ser estratégicas para promover a transição energética e reduzir a pegada de carbono das áreas urbanas.

2.4.4 Expansão das Discussões: Conforto, Infraestrutura e Cenários Futuros

Além de otimizar a captação de energia solar, o planejamento urbano deve considerar o conforto térmico, especialmente em climas quentes como o de Cuiabá. Configurações com afastamentos estratégicos e alturas moderadas podem favorecer a ventilação cruzada, reduzindo o efeito de ilhas de calor sem comprometer a densidade urbana. Para tanto, recomenda-se o uso de telhados verdes, materiais refletivos e sombreamento planejado, promovendo maior eficiência térmica e energética.

Todavia, afastamentos generosos implicam maior consumo de solo e perdas na capacidade urbana, o que pode comprometer a eficiência do uso do território. A densidade populacional, nesse contexto, constitui elemento essencial para a sustentabilidade econômica, social e ambiental das cidades.

Do ponto de vista infraestrutural, a adoção de tipologias mais verticalizadas deve vir acompanhada de:

- a) Sistemas de sombreamento inteligente nas fachadas, para reduzir ganhos térmicos.
- b) Aproveitamento de coberturas para instalação de painéis fotovoltaicos integrados (BIPV – Building Integrated Photovoltaics), compensando a eventual menor área disponível no solo.
- c) Estímulos financeiros (incentivos fiscais, bônus construtivos) que possam direcionar construtoras e incorporadoras a adotar parâmetros de implantação e volumetria que resultem em maior eficiência energética.

2.4.5 Contribuição Teórico-Prática

A análise dos cenários urbanísticos avaliados permitiu compreender como a organização espacial das edificações influencia a disponibilidade de radiação solar. Esses resultados oferecem diretrizes práticas para revisões no Plano Diretor e na Lei de Uso e Ocupação do Solo (LOUOS), viabilizando o uso estratégico de energia solar em áreas urbanas compactas e sustentáveis.

A densidade urbana deve, portanto, ser planejada em conjunto com estratégias de conforto térmico, uso racional do solo e infraestrutura adequada, de modo que a cidade se torne não apenas mais eficiente energeticamente, mas também um lugar de maior qualidade ambiental para seus habitantes.

As diferentes configurações analisadas permitem projetar diretrizes que possam ser aplicadas em outros contextos de clima quente, ampliando o arcabouço teórico sobre desenho urbano focado em energia renovável.

Em síntese, esta discussão evidencia a complexidade que permeia a incorporação de tecnologias fotovoltaicas em climas quentes e densidades urbanas variadas. As escolhas de densidade, afastamentos e índices construtivos devem considerar não só a incidência solar, mas também uma gama de fatores intrinsecamente ligados à sustentabilidade urbana — incluindo infraestruturas, transporte, custo de serviços públicos, conforto ambiental e viabilidade econômica.

Dessa forma, os resultados obtidos nessa pesquisa demonstram que intervenções orientadas pelos cenários de PC e CO mais favoráveis podem, de fato, elevar o potencial fotovoltaico de Cuiabá, trazendo implicações diretas para o planejamento urbano local, para o desenvolvimento de políticas públicas e para a formulação de estratégias de desenho urbano voltadas à sustentabilidade em outras cidades de características similares.

2.4.6 Análise dos Cenários Propostos: Melhores e Piores Desempenhos

A Figura 34 apresenta a análise comparativa dos cenários propostos, destacando o desempenho superior do cenário 3A (PC = 0,50; CO = 30%), que atingiu 389 kWh/m²-ano. Essa configuração, com altura reduzida e baixa ocupação, demonstrou maior eficiência na captação solar. Em contrapartida, o cenário 2A (PC = 1,00; CO = 30%) obteve o pior desempenho, com apenas 262 kWh/m²-ano, devido ao maior sombreamento causado por edificações mais altas.

Esses achados reforçam que o equilíbrio entre altura e ocupação é essencial para otimizar a eficiência energética em ambientes urbanos. Configurações mais densas podem ser ajustadas por meio de recuos estratégicos e integração de sistemas fotovoltaicos, permitindo conciliar compactação urbana com captação solar. Essa análise contribui para a formulação de diretrizes urbanísticas que promovam cidades sustentáveis e energeticamente eficientes.

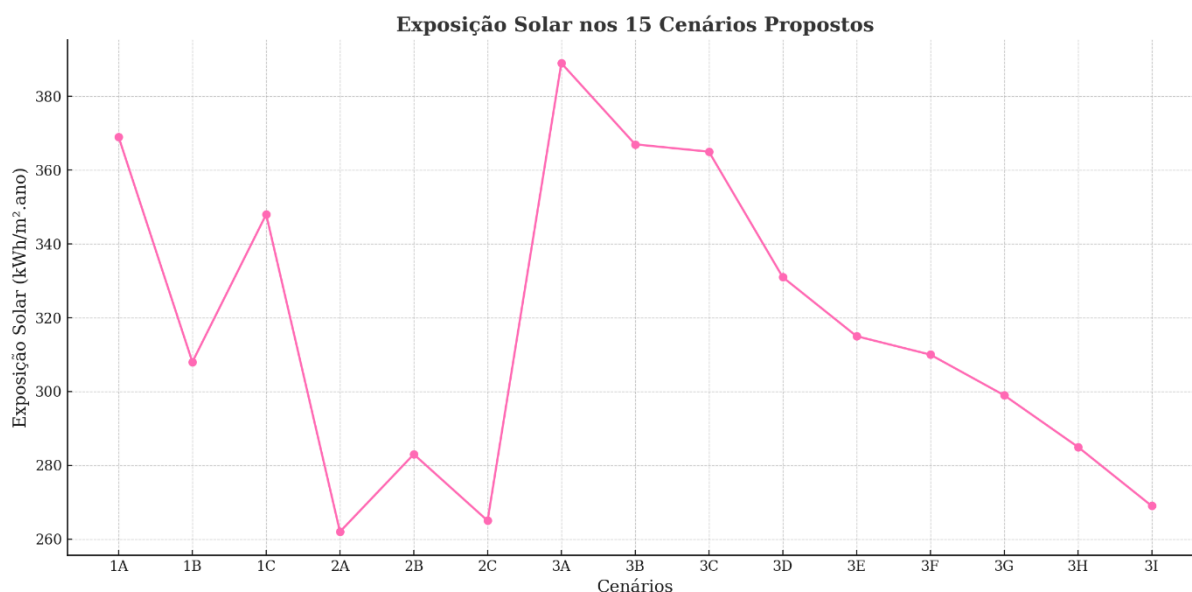


Figura: 34: Tendência de Exposição solar por cenário. Fonte: Elaboração própria.

- a) A fim de compreender de forma mais aprofundada como o Potencial Construtivo (PC) e o Coeficiente de Ocupação (CO) influenciam a disponibilidade de radiação solar, foram propostas diferentes combinações desses parâmetros, resultando em cenários com variações na exposição solar ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$). O gráfico de tendências de exposição solar por cenário evidencia, por exemplo, que:
 - b) Cenário 3A ($\text{PC} = 0,50$ e $\text{CO} = 30\%$) obteve $389 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, configurando-se como um dos melhores desempenhos de incidência solar.
 - c) Cenário 2A ($\text{PC} = 1,00$ e $\text{CO} = 30\%$), por outro lado, apresentou $262 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, sendo o menor valor entre todos os cenários simulados.

Esses achados corroboram a tendência de que maiores alturas (PC elevado) combinadas a restrições na ocupação (CO baixo ou médio) nem sempre resultam em melhor aproveitamento de energia solar. A ausência de um equilíbrio entre esses parâmetros pode levar a sombreamentos indesejáveis, especialmente em quarteirões onde a volumetria é mais verticalizada e as fachadas são próximas umas das outras.

a) Melhores Cenários

- I. 3A ($\text{PC} = 0,50$; $\text{CO} = 30\%$): além de apresentar o maior índice de exposição solar ($389 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$), evidencia a influência benéfica de uma altura limitada combinada a um

menor coeficiente de ocupação. Essa configuração tende a gerar volumetrias mais horizontais, com recuos suficientes para evitar sombras excessivas.

- II. Outros cenários, como 1A (PC = 0,50; CO = 50%) e 3B (PC = 0,50; CO = 40%), também figuram entre os que apresentaram resultados próximos (entre 365 e 369 kWh/m²·ano), reforçando a conclusão de que a limitação do potencial construtivo e a ocupação moderada do lote aumentam a disponibilidade de radiação solar.

b) Piores Cenários

- I. 2A (PC = 1,00; CO = 30%): apresentou o menor índice de exposição (262 kWh/m²·ano). Aqui, embora o coeficiente de ocupação seja relativamente baixo, o potencial construtivo elevado permite edificações mais altas, o que pode gerar maior sombreamento nas coberturas e fachadas, prejudicando a captação solar.
- II. Cenários como 2C (PC = 1,00; CO = 50%) e 3I (PC = 1,00; CO = 50%) também registraram valores de exposição solar inferiores (265 e 269 kWh/m²·ano, respectivamente), indicando que quando o PC é alto, mesmo combinando diferentes CO, a presença de edifícios mais robustos obstrui a incidência solar.

c) Interpretação e Implicações

A comparação entre os cenários evidencia que o sombreamento mútuo e a altura das edificações exercem influência decisiva sobre a quantidade de radiação solar disponível. Cenários com PC reduzido (0,50) e CO entre 30% e 50% favorecem o desígnio de quarteirões menos compactos em termos de volumetria, garantindo maior insolação nas coberturas. Em contrapartida, quando o PC atinge 1,00, a chance de ocorrerem grandes blocos edificadas aumenta substancialmente, intensificando a projeção de sombras.

Esses resultados apontam que nem sempre “densidade” e “eficiência solar” caminham de forma linear; é necessário um ajuste fino entre altura, afastamentos e ocupação do lote. Embora cenários com alto PC tendam a reduzir a eficiência solar devido ao sombreamento, esses impactos podem ser mitigados por recuos estratégicos, uso de fachadas fotovoltaicas e integração de tecnologias passivas de sombreamento. Recomenda-se que políticas públicas incentivem essas soluções, aliadas a instrumentos regulatórios, como bônus construtivos e certificações verdes, para estimular a transição energética sustentável.

Em última análise, a adoção de tais cenários exige discussão ampliada sobre:

- I. Viabilidade econômica de manter densidades mais baixas sem onerar excessivamente infraestrutura, transporte e serviços urbanos.
- II. Necessidade de políticas públicas que incentivem a integração de estratégias passivas (recuos, corredores de vento, fachadas solares) nos edifícios de maior altura, de modo a viabilizar arranjos urbano-arquitetônicos mais densos, porém energeticamente eficientes.
- III. Equilíbrio entre densidade e sustentabilidade, pois municípios como Cuiabá devem, ao mesmo tempo, evitar o espraiamento urbano e buscar a otimização da captação solar, fundamental para a transição energética e a redução das emissões de carbono.

Em suma, a análise pormenorizada dos cenários propostos reforça a importância de conciliar parâmetros urbanísticos com as boas práticas de desenho urbano bioclimático. Esse diagnóstico oferece subsídios para que o Plano Diretor e a LOUOS possam incorporar metas e índices mais balanceados, estimulando configurações construtivas que aliem eficiência energética, conforto térmico e viabilidade socioeconômica para a expansão das cidades.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou de forma robusta a importância da morfologia urbana como variável crítica na eficiência da geração de energia solar fotovoltaica, sobretudo em contextos de clima tropical como o de Cuiabá-MT, caracterizado por alta incidência solar ao longo do ano.

A pesquisa demonstrou que a forma como os espaços urbanos são estruturados — incluindo o arranjo das edificações, os afastamentos entre construções, a proporção das vias e os parâmetros urbanísticos vigentes — interfere diretamente na disponibilidade de radiação solar incidente sobre coberturas e fachadas, impactando de maneira significativa o desempenho dos sistemas fotovoltaicos integrados ao ambiente construído.

Por meio de simulações computacionais realizadas com o auxílio do software Climate Studio, foi possível mensurar os efeitos da configuração urbana sobre a captação solar em diferentes cenários de ocupação.

A comparação entre os bairros Jardim das Américas e Centro de Cuiabá revelou contrastes importantes no desempenho energético resultante da forma urbana. Observou-se que o Jardim das Américas, caracterizado por maiores afastamentos entre edificações, edifícios de menor altura e maior proporção de áreas livres, apresentou índices superiores de incidência solar, permitindo maior eficiência na captação e conversão de energia por sistemas fotovoltaicos. Essa condição é explicada pela diminuição do sombreamento mútuo e pela disponibilidade de superfícies expostas de forma mais uniforme ao longo do dia.

Em contrapartida, o Centro da cidade, por concentrar edificações mais altas e adensadas, inseridas em uma malha urbana de vias estreitas e menores recuos, apresentou redução significativa na incidência solar, sobretudo nas fachadas voltadas para os eixos viários leste-oeste. Essa obstrução solar compromete a eficiência dos sistemas fotovoltaicos e acarreta, em médio prazo, desvantagens energéticas em contextos urbanos mais densos quando não há um planejamento integrado entre forma urbana e estratégia energética.

Diante desses achados, a pesquisa propõe diretrizes técnicas e urbanísticas voltadas à otimização da radiação solar nas áreas edificadas, considerando os parâmetros de Potencial Construtivo (PC), Coeficiente de Ocupação (CO), orientação das edificações e dimensões das vias públicas. Essas diretrizes se fundamentam na premissa de que é possível alinhar eficiência energética, forma urbana e sustentabilidade ambiental, desde que os instrumentos legais —

como o Plano Diretor, a Lei de Uso e Ocupação do Solo (LOUOS) e os códigos de obras e edificações — incorporem a variável energia solar como critério de planejamento urbano.

A aplicação dessas diretrizes pode subsidiar políticas públicas locais, fomentando a criação de zonas de aproveitamento solar prioritário, a flexibilização de parâmetros para favorecer a instalação de sistemas fotovoltaicos e a incentivos a criação de soluções arquitetônicas que promovam superfícies captadoras bem orientadas e sem obstruções. Tais medidas ganham ainda mais relevância em um contexto de emergência climática global, no qual as cidades desempenham papel central na mitigação das emissões de gases de efeito estufa e na adaptação às mudanças climáticas.

Assim, a articulação entre morfologia urbana e geração de energia solar fotovoltaica não deve ser entendida como uma variável secundária, mas como um eixo estruturante do planejamento urbano contemporâneo. O estudo reforça a necessidade de que os municípios brasileiros — especialmente aqueles localizados em regiões com alta insolação anual, como Cuiabá — incorporem critérios técnico-ambientais na formulação e revisão de seus marcos regulatórios, integrando a energia solar como estratégia territorial, normativa e climática.

Embora os resultados obtidos ofereçam subsídios concretos para o aprimoramento das políticas urbanas e energéticas, é necessário reconhecer as limitações inerentes à presente pesquisa. A análise baseou-se em modelos simulados, elaborados a partir de parâmetros urbanísticos hipotéticos e de duas áreas reais da cidade de Cuiabá, o que impõe restrições à generalização direta dos dados para toda a malha urbana. Ademais, as simulações consideraram materiais padronizados, condições ideais de manutenção dos sistemas solares e ausência de variáveis atmosféricas extremas, como poeira e poluição, que podem afetar o desempenho real dos módulos fotovoltaicos.

Outro aspecto limitante diz respeito à não consideração de variações socioeconômicas no padrão de ocupação do solo. A morfologia urbana não se estrutura apenas por parâmetros legais, mas também por dinâmicas de mercado, informalidade, gentrificação e desigualdade socioespacial, que escapam à modelagem puramente técnica. Assim, futuros estudos poderão incorporar indicadores sociais, econômicos e ambientais ao processo de simulação, ampliando a capacidade de diagnóstico e proposição de diretrizes mais contextualizadas e inclusivas.

Sugere-se, ainda, que pesquisas futuras explorem a integração entre análises morfológicas e sistemas de informação geográfica (SIG), com uso de dados empíricos reais de

consumo e geração fotovoltaica em diferentes bairros, incluindo variáveis como altitude, albedo urbano, vegetação e tempo de payback energético. Além disso, o uso de metodologias híbridas, que combinem simulações computacionais com entrevistas, oficinas participativas e análise normativa, pode contribuir para uma abordagem mais abrangente e transdisciplinar no planejamento energético das cidades.

Destaca-se também a importância de futuros estudos dedicados à análise da arborização urbana no nível do pedestre, com foco na compatibilização entre sombreamento vegetal e captação solar. Embora a vegetação urbana desempenhe papel fundamental na regulação microclimática, na mitigação das ilhas de calor e no conforto térmico externo, é preciso identificar espécies arbóreas e padrões de plantio que não comprometam significativamente a eficiência dos sistemas fotovoltaicos instalados nas edificações.

Avaliar variáveis como volume de copa, altura da vegetação, época de floração, albedo foliar e densidade de plantio permitirá construir diretrizes técnicas que favoreçam simultaneamente ambientes urbanos mais agradáveis e sistemas energéticos mais eficazes. A integração entre urbanismo climático, paisagismo e desempenho energético é, portanto, um caminho promissor para o avanço das cidades sustentáveis em regiões tropicais.

A contribuição deste trabalho reside, sobretudo, na demonstração de que a eficiência da geração solar fotovoltaica no meio urbano não depende apenas do clima, mas é fortemente condicionada pelas decisões espaciais e normativas adotadas na organização do território urbano. Ao propor a incorporação da variável solar nas discussões urbanísticas, esta tese oferece um instrumento técnico e teórico para orientar revisões de planos diretores, códigos de obras e legislações de uso do solo, com vistas à promoção de cidades mais resilientes, autossuficientes e ambientalmente justas.

Em suma, conclui-se que há um potencial significativo e ainda subexplorado para integrar energia solar à estrutura urbana de Cuiabá, e que a sua efetivação requer a superação de paradigmas setoriais e a construção de estratégias integradas de planejamento. A transição para matrizes energéticas renováveis, no contexto das cidades tropicais, passa necessariamente por uma releitura crítica da forma urbana, capaz de aliar desempenho ambiental, equidade territorial e governança climática.

3.1 Recomendações para Políticas Públicas

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, é possível formular um conjunto de recomendações direcionadas ao poder público municipal, visando à incorporação da variável eficiência energética solar nos instrumentos de planejamento urbano, especialmente no contexto de cidades tropicais como Cuiabá-MT. As recomendações a seguir buscam alinhar o crescimento urbano à sustentabilidade energética, por meio de ajustes normativos e diretrizes estratégicas aplicáveis à legislação urbanística, aos programas habitacionais e às ações de infraestrutura.

- a) Inclusão da variável solar nos instrumentos de planejamento urbano: Propõe-se que o Plano Diretor Municipal, a Lei de Uso e Ocupação do Solo (LOUOS) e os códigos de obras e edificações passem a considerar a incidência solar como critério técnico para zoneamento e parâmetros construtivos. Isso implica, por exemplo, a adoção de normas que favoreçam orientações solares favoráveis, afastamentos mínimos estratégicos e limitações de altura baseadas em análise de sombreamento urbano, com vistas à maximização da radiação solar incidente nas edificações.
- b) **Criação de zonas especiais para aproveitamento solar urbano:** Recomenda-se a delimitação de zonas de incentivo ao uso de energia solar, com base na análise da morfologia urbana, nas quais se possa flexibilizar regras edilícias (como taxa de ocupação ou recuos) mediante comprovação de eficiência energética. Essas zonas podem ser priorizadas em programas de reabilitação urbana, habitação de interesse social ou requalificação de eixos estruturais, promovendo o uso de sistemas fotovoltaicos integrados ao tecido urbano.
- c) Incentivo à arborização estratégica e inteligente: A política pública de arborização urbana deve ser revisada para integrar critérios de compatibilidade entre vegetação e captação solar. Sugere-se a criação de um manual técnico municipal de arborização eficiente, que oriente a escolha de espécies, espaçamento, volume de copa e altura, especialmente para áreas com potencial de instalação de sistemas fotovoltaicos. O objetivo é garantir sombreamento no nível do pedestre sem obstrução significativa das superfícies captadoras solares.
- d) Implementação de diretrizes para projetos públicos e privados: Órgãos públicos municipais devem adotar diretrizes de aproveitamento solar como pré-requisito em licenciamentos urbanísticos, projetos de habitação e construções públicas, promovendo o exemplo institucional. Da mesma forma, recomenda-se a criação de manuais de orientação

técnica para arquitetos, engenheiros e urbanistas, incentivando o uso do sol como elemento de projeto em edifícios públicos e privados.

e) Criação de incentivos fiscais e financeiros: A adoção de mecanismos de incentivo fiscal, como isenção ou redução de IPTU Verde, e a oferta de linhas de financiamento subsidiadas para retrofit energético e instalação de sistemas fotovoltaicos em áreas prioritárias pode contribuir para a adesão massiva de tecnologias sustentáveis no espaço urbano, fortalecendo a agenda climática local.

f) Capacitação técnica e governança intersetorial: Sugere-se a promoção de programas de capacitação técnica continuada para gestores públicos, profissionais da construção civil e conselhos municipais, com foco na integração entre energia solar, morfologia urbana e sustentabilidade. Ademais, recomenda-se a criação de núcleos intersetoriais de governança energética, articulando as secretarias de planejamento, meio ambiente, habitação, obras e ciência e tecnologia, para garantir a transversalidade da política pública.

Em suma, esta pesquisa reforça a necessidade de considerar a morfologia urbana como um fator determinante no planejamento das cidades que buscam maximizar o aproveitamento da energia solar fotovoltaica.

Ao adotar estratégias de planejamento que promovam configurações urbanas favoráveis à captação de energia solar, é possível avançar significativamente na direção da sustentabilidade energética, beneficiando tanto o meio ambiente quanto a qualidade de vida dos habitantes urbanos.

Essas recomendações reforçam a necessidade de transpor os achados acadêmicos para a prática urbana, promovendo uma transição energética territorialmente sensível e socialmente justa. A adoção de medidas como as aqui propostas pode posicionar Cuiabá como referência nacional na integração entre planejamento urbano e geração de energia solar, contribuindo de forma estratégica para o enfrentamento da crise climática e para o desenvolvimento de cidades mais resilientes, eficientes e inclusivas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL.** *Sistema de Informações de Geração – SIGA*. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- BATTY, M.** *The new science of cities*. Cambridge: MIT Press, 2013.
- BRASIL.** Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001. *Estatuto da Cidade*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 11 jul. 2001.
- BRUSE, M.; FLEER, H.** *Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model*. Environmental Modelling & Software, v. 13, n. 3, p. 373–384, 1998.
- CALTHORPE, P.** *The next American metropolis: ecology, community, and the American dream*. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
- CHATZIPOULKA, C. et al.** *Sky view factor as a predictor of solar availability on building façades: using the case of London as an example*. Energy and Buildings, [S. l.], v. 125, p. 86–98, 2016.
- CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO.** *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. Rio de Janeiro: INPE, 2020.
- DUARTE, D. H. S.** Densidade e qualidade ambiental: o inevitável, o desejável e o possível. In: GALICIA, S.; FREIXANET, V. (Orgs.). *Hábitat Sustentable*. México, D.F.: UAM Azcapotzalco, 2012. p. 85–99.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.** *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2013.
- EVANS, M.** *Housing, climate and comfort*. London: Architectural Press, 1980.
- FANGER, P. O.** *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

FRANÇA, M. S. et al. Estimativa de índices de conforto térmico na cidade de Cuiabá-MT. *Revista Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 16, n. 55, p. 141–151, 2015.

GAGO, E. J. et al. *The city and urban heat islands: a review of strategies to mitigate adverse effects*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 749–758, 2013.

GAVIRIA, L. R. et al. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 7–22, out./dez. 2019.

GIROTTI, C. et al. Análise da morfologia urbana para maximização de geração de energia fotovoltaica no Belenzinho, em São Paulo. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 7–22, out./dez. 2019.

GIVONI, B. *Climate considerations in building and urban design*. New York: John Wiley & Sons, 1998.

HEVNER, A. R. et al. *Design science in information systems research*. *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004.

HÖPPE, P. *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*. *International Journal of Biometeorology*, v. 43, p. 71–75, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Censo Demográfico 2022: resultados preliminares*. Rio de Janeiro, 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. *Dados de irradiação solar do Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos, 2015.

JÄGER-WALDAU, A. *Photovoltaics and renewable energies in Europe*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 3703–3710, 2013.

LA ROCHE, P. *Passive solar architecture: heating, cooling, ventilation, daylighting and more using natural flows*. Boca Raton: CRC Press, 2017.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2. ed. Chichester: Wiley, 2011.

MAGALHÃES, N. A et al. Análise do potencial da utilização de energia solar em Cuiabá/MT. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.3, p.114-123, 2019.

MARICATO, E. *O impasse da política urbana no Brasil*. Petrópolis: Vozes, 2001.

MARSHALL, S. *Urban coding and planning*. London: Routledge, 2012.

MORAIS, J. D. M. Análise exploratória de diferenças de conforto térmico entre dois padrões de ocupação urbana representados por ocupação espontânea e por ocupação planejada. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

OKE, T. R. *Boundary layer climates*. 2. ed. London: Methuen, 1987.

OLGYAY, V. *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton: Princeton University Press, 1963.

PEFFERS, K. et al. *A design science research methodology for information systems research*. *Journal of Management Information Systems*, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007.

RATTI, C.; RAYDAN, D.; STEEMERS, K. *Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate*. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 49–59, 2003.

REINHART, C. F.; DAVISON, G. *Urban building energy modeling: a review of a nascent field*. *Building and Environment*, v. 97, p. 196–202, 2009.

ROBINSON, D. et al. *CitySim: comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning*. *Building Simulation*, v. 1, p. 95–112, 2009.

SANTAMOURIS, M. *Energy and climate in the urban built environment*. London: James & James, 2001.

SANTOS, I. P. Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais urbanas: estudo de caso no bairro Santa Mônica, Florianópolis-SC. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SHERWOOD, L. *U.S. Solar Market Trends Report*. Interstate Renewable Energy Council – IREC, 2012.

SIMON, H. A. *The sciences of the artificial*. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

STEEMERS, K. *Energy and the city: density, buildings and transport*. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 3–14, 2003.

TSANGRASSOULIS, A. et al. *On the estimation of solar radiation received by building façades under shading*. *Solar Energy*, v. 79, p. 203–212, 2005.

UN-HABITAT. *Planning and Design for Sustainable Urban Mobility: Global Report on Human Settlements 2013*. New York: Routledge, 2013.

VAN AKEN, J. E. *Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules*. *Journal of Management Studies*, v. 41, n. 2, p. 219–246, 2004.

YANG, T. et al. *Assessment of rooftop solar photovoltaic potential in urban areas using remote sensing and GIS*. *Renewable Energy*, v. 116, p. 191–204, 2018.