



MODELOS NUMÉRICOS PARA SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE PARA FINS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

NUMERICAL MODELS FOR SIMULATION AND ASSESSMENT OF INCIDENT SOLAR IRRADIATION FOR PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY GENERATION

BASTIAN, Andrea Verri¹,

Resumo

Este estudo aborda a utilização de modelos numéricos para simulação e avaliação da irradiação solar incidente em edificações urbanas, visando otimizar o aproveitamento da energia solar fotovoltaica. Com foco na cidade de Salvador (BA), o trabalho utiliza dados climáticos locais para avaliar o potencial de irradiação solar e demonstra como esses modelos podem ser ferramentas valiosas para auxiliar no planejamento urbano e arquitetônico, definindo parâmetros urbanos que potencializam o aproveitamento do potencial solar. O trabalho inicia apresentando os principais conceitos relacionados aos modelos numéricos e discute exemplos de aplicações onde estes modelos são utilizados para fins de simulação energética. Finaliza com experimentos realizados em diversos cenários de modelos genéricos de bairros, baseados nos parâmetros urbanos atuais da cidade de Salvador, gerados no programa Rhinoceros e simulando a irradiação solar incidente na superfície das edificações por meio da ferramenta ClimateStudio. Os resultados indicam que a modelagem numérica é uma técnica promissora que pode ser utilizada para melhorar a eficiência energética e promover o uso sustentável de recursos em cidades densamente povoadas, fornecendo uma base sólida para futuras investigações e permitindo uma melhor exploração do potencial solar na envoltória dos edifícios.

Palavras-chave: simulação; modelos numéricos; parâmetros urbanos; energia solar fotovoltaica.

Abstract

This study addresses the use of numerical models for the simulation and assessment of incident solar irradiation on urban buildings, aiming to optimize the utilization of photovoltaic solar energy. Focusing on the city of Salvador, the work utilizes local climatic data to evaluate the potential of solar irradiation and demonstrates how these models can be valuable tools to assist in urban and architectural planning by defining urban parameters that enhance the use of solar potential. The work begins by presenting the main concepts related to numerical models and discusses examples of applications where these models

¹ Universidade Federal da Bahia, ORCID: 0009-0005-6162-6810, andrea.bastian@ufba.br

are used for energy simulation purposes. It concludes with experiments conducted in various scenarios of generic urban block models, based on the current urban parameters in the city of Salvador (BA), generated in the Rhinoceros program and simulating the incident solar irradiation on the surface of the buildings through the ClimateStudio tool. The results indicate that numerical modeling is a promising technique that can be used to improve energy efficiency and promote the sustainable use of resources in densely populated cities, providing a solid foundation for future investigations and enabling better exploitation of the solar potential in the envelope of the buildings.

Keywords: simulation; numerical models; urban parameters; photovoltaic energy.

1 Introdução

A transição global para fontes de energia renováveis é imperativa para mitigar as mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Entre as várias fontes de energia renovável, a energia solar tem se destacado devido à sua abundância e potencial para fornecimento ininterrupto em muitas regiões do mundo. Nesse contexto, a avaliação precisa da irradiação solar incidente torna-se fundamental para o planejamento e otimização de instalações solares, principalmente, quando se trata de sistema fotovoltaicos instalados em edificações no contexto urbano.

Os modelos numéricos emergem como ferramentas poderosas neste cenário, oferecendo a capacidade de simular e avaliar a irradiação solar incidente em edificações com base em dados climáticos, geográficos e temporais. Estes modelos podem variar desde abordagens simplificadas até simulações mais complexas que levam em consideração múltiplos fatores.

De acordo com Batty (2013), os métodos modernos de modelagem urbana devem cumprir certos critérios essenciais, incluindo a capacidade de gerar previsões de maneira ágil e o uso de interfaces gráficas para promover a comunicação entre os interessados. Isso deve permitir tanto análises dinâmicas quanto estáticas, abrangendo variações temporais de curto e longo prazos. Billen e colaboradores (2014) argumentam que os modelos urbanos devem ser reconhecidos como instrumentos robustos para a integração de conhecimento sobre o urbanismo. Esse conhecimento, ou informação semântica, os torna valiosos para propósitos que se estendem para além da mera visualização, fornecendo dados sobre a essência, função ou uso dos objetos urbanos, assim como sua história. Julin e colaboradores (2018) apontam que a definição dos componentes de um modelo numérico de cidade ainda é vaga e imprecisa, visto que a nomenclatura é aplicada

de formas variadas na literatura, desde reconstruções tridimensionais até modelos semânticos. Tipicamente, esses modelos são percebidos como uma fusão de informações geométricas e não geométricas de elementos urbanos (como estradas, árvores, terrenos e construções), coletadas por meio de técnicas como fotogrametria, escaneamento a laser e dados de Sistemas de Informações Geográficas (GIS), criando um modelo que retrata o contorno exterior do edifício juntamente com uma identificação específica.

Os modelos têm o potencial de servir propósitos mais elevados, como aprimorar a compreensão de sistemas urbanos, incluindo tráfego, utilização do solo e qualidade do ar. Eles podem ser empregados para calcular estimativas, como a poluição do ar e sua dispersão, bem como o volume de tráfego. Além disso, podem avançar o conhecimento sobre o sistema e seus processos, como a dinâmica de uso do solo e o aumento da população. Em suma, atuam como um instrumento facilitador no contexto emergente das cidades inteligentes (Julin *et al.*, 2018).

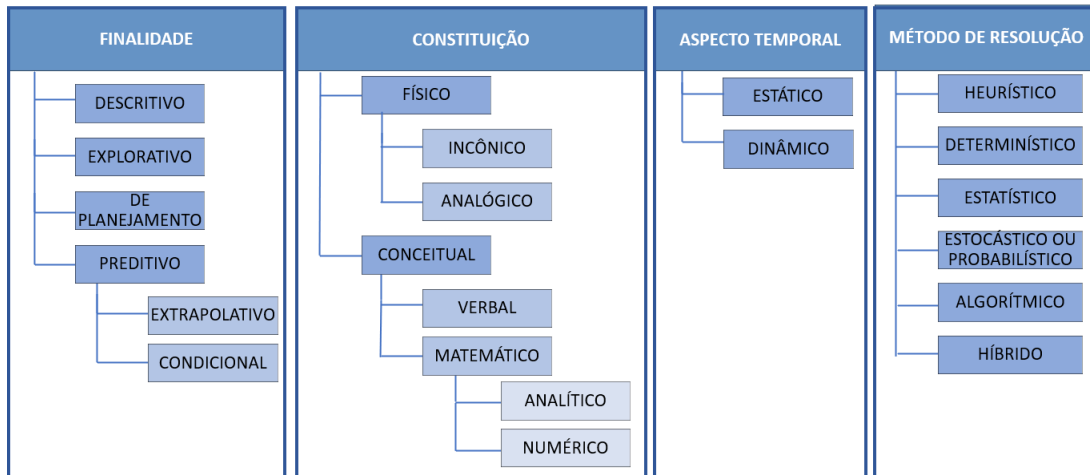
Portanto, este artigo visa explorar o uso de modelos numéricos na simulação e avaliação da irradiação solar incidente, discutindo suas metodologias, aplicações, vantagens e limitações. Ao fazê-lo, busca-se contribuir para o avanço do uso da modelagem numérica na área de simulação com finalidade de verificar o potencial de geração energia solar.

2 Modelos: classificação e características

Batty (2009) descreve modelos numéricos como abstrações teóricas implementadas em ambientes computacionais, que simulam sistemas de maneira a destacar suas características principais, facilitando a experimentação teórica com capacidade preditiva para explorar futuros cenários. Já em 2007, Batty diferenciou os modelos com base em sua formalização, entre icônicos e simbólicos, e na mídia utilizada para sua representação, seja material ou digital. Modelos icônicos são representações em miniatura de sistemas reais, podendo ser tanto físicos quanto digitais. Os modelos simbólicos, por outro lado, substituem o sistema físico por representações matemáticas que possuem funções preditivas ou exploratórias.

Amorim (2020), baseado em outros autores, classifica os modelos quanto a finalidade, constituição, aspecto e método de resolução (Figura 1).

Figura 1 - Classificação de modelos quanto a finalidade, constituição, aspecto e método de resolução



Fonte: Adaptado de Amorim (2020).

Os modelos voltados para previsões futuras são conhecidos como preditivos, que podem ser de natureza exploratória, analisando tendências existentes, ou condicionais, fundamentando-se em causas e efeitos. Quanto à sua estrutura, os modelos podem ser divididos em físicos, que replicam as propriedades de seus objetos de estudo, ou conceituais, baseados em abstrações e princípios lógicos. Modelos físicos podem alterar em escala e material, enquanto modelos conceituais podem ser verbais, usando a linguagem falada ou escrita, ou matemáticos, aplicando princípios e lógica matemática. Também existem modelos conceituais matemáticos que utilizam simbologia e notações para análises e modelos numéricos que são implementados via computacional. Modelos estáticos focam em um estado específico do sistema em um ponto no tempo, ao passo que os dinâmicos examinam como o sistema evolui. Os métodos de solução vão desde heurísticos, baseados em regras e experiência, a determinísticos, que seguem relações de causa e efeito, passando por estatísticos, que analisam séries de tempo, e estocásticos ou probabilísticos, que lidam com eventos aleatórios, até algorítmicos, que são lógicos e sequenciais, além de métodos híbridos que integram diversas abordagens.

Antes dos progressos em Ciência da Computação, os modelos eram predominantemente icônicos, criados com materiais convencionais e destinados a representar de forma estática o planejamento físico urbano. O avanço tecnológico nessa área possibilitou a criação de modelos digitais e simulações de espaços arquitetônicos para diversos propósitos, como visualizar projetos ainda não realizados, recriar edificações históricas, alterar visualmente construções existentes e simular novas construções (Batty, 2007). Ainda, Batty (2009) descreve a modelagem urbana como o processo de definir, elaborar e empregar modelos digitais para a simulação e o planejamento de espaços

físicos, fazendo dos modelos numéricos urbanos ferramentas computacionais para simular o comportamento de cidades sob teorias específicas.

2.1 Modelos numéricos para fins de simulação energética

Modelos numéricos urbanos oferecem a capacidade de simular variados cenários de uso e produção de energia, auxiliando no planejamento e na gestão da cidade para implementar estratégias de longo prazo. Para os proprietários de imóveis, esses modelos fornecem subsídios para ações focadas na diminuição do consumo energético. Independentemente da aplicação, os modelos contribuem para facilitar e promover estratégias de energia direcionadas à sustentabilidade urbana (Nouvel *et al.*, 2013).

O Atlas Solar de Berlim (Figura 2), um dos pioneiros em modelos geométricos enriquecidos com informação semântica voltados para questões energéticas, foi criado para aprimorar as escolhas relativas à geração, distribuição e consumo de energia nas cidades. Este modelo digital abrange aproximadamente 550.000 construções detalhadas no nível LOD2, cerca de 100 edifícios em LOD3 (pontos de referência) e quatro edificações ainda mais detalhadas em LOD4, além de incluir o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área estudada. A finalidade principal da criação do mapa solar de Berlim era mostrar os locais dos painéis fotovoltaicos já instalados pela cidade e identificar os telhados mais propícios para futuras instalações (Döllner *et al.*, 2006; Krüger; Kolbe, 2012).

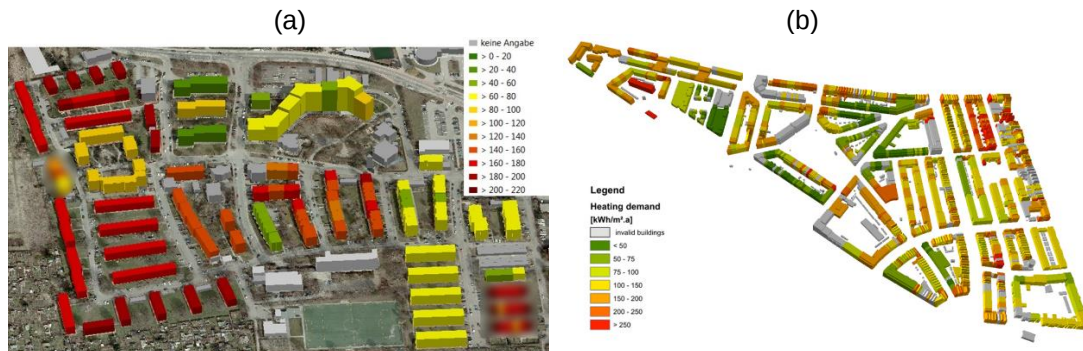
Figura 2 - Atlas Solar de Berlim



Fonte: Disponível em: <https://www.virtualcitysystems.de/en/references#3d-city-models>. Acesso em: 11 jan. 2020.

Outros exemplos modelos geométricos com finalidade de simulação de consumo de energia para aquecimento, podem ser citados os modelos: do distrito de Grünbühl na cidade de Ludwigsburg (Alemanha) (Figura 1a), dos bairros de Rintheimer Feld (Karlsruhe - Alemanha) e o modelo de Bospolder (Rotterdam - Holanda) (Figura 1b).

Figura 3 – Modelo geométrico de: (a) distrito de Grünbühl; (b) Bospolder



Fonte: Projeto Simstad (2020).

Além dos exemplos citados, *websites* como o Projeto SunRoof do Google e o Mapdwell fornecem informações sobre a irradiação solar e, conseqüentemente, a viabilidade da instalação de painéis solares em determinadas áreas.

No caso deste artigo os modelos numéricos, apresentados na seção seguinte, foram empregados com o objetivo de quantificar a irradiação solar incidente na envoltória das edificações, levando em consideração as condições climáticas e espaciais específicas da cidade de Salvador (Bahia) de modo a permitir verificar a influência no potencial de geração de energia solar fotovoltaica das edificações.

3 Experimentação

Como método de pesquisa, foi utilizada a pesquisa experimental baseada na modelagem, uma vez que, utiliza uma abordagem pautada em experimentos que permite avaliar a eficácia de um artefato¹ e apoiar

[...] os investigadores para o melhor entendimento dos problemas, uma vez que os modelos são representações simplificadas da realidade e permitem uma compreensão do ambiente que está sendo estudado (Dresch; Lacerda; Antunes Junior, 2015, p. 26).

Os estudos de simulação foram realizados no programa Rhinoceros

[...] uma vez que se trata de um software gráfico e desenho assistido por computador, baseado no modelo matemático NURBS², que permite gerar

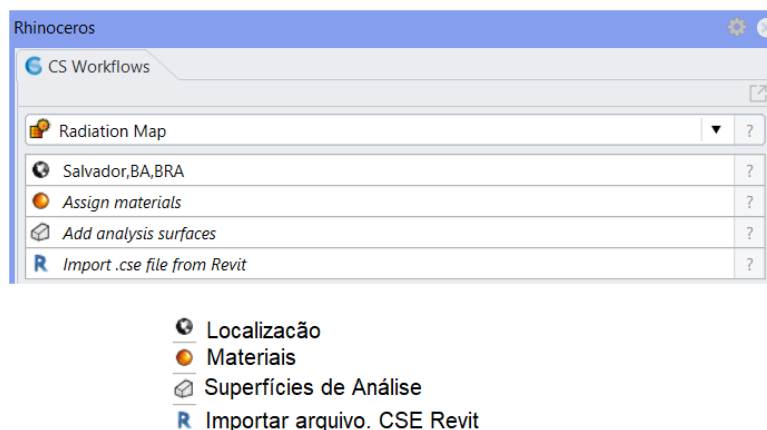
¹ Segundo Simon (1996, p. 28) artefatos são “[...] objetos artificiais que podem ser caracterizados em termos de objetivos, funções e adaptações. São normalmente discutidos, particularmente durante a concepção, tanto em termos imperativos como descritivos [...]”.

uma ampla variedade de produtos, incluindo de arquitetura. Além do exposto, o programa se utiliza de representação B-Rep³ para compor os objetos tridimensionais e realizar manipulação de geometria, o que permite a análise da irradiação solar e da iluminância por meio de técnicas de *ray-tracing* e *radiosity* (Bastian, 2023, p. 204).

Já os valores de irradiação solar foram avaliados por meio de simulação computacional dinâmica no *plug-in* ClimateStudio versão 1.9.8389.22035. Segundo Solemma (2021), trata-se de uma ferramenta de análise integrada nos ambientes Rhinoceros e Grasshopper, e permite a simulação avançada para análises térmicas, de iluminação natural e de energia, que permite gerar resultados precisos de desempenho ambiental para projetos de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC).

Para a realização das análises de irradiação solar incidentes o programa disponibiliza a ferramenta *Radiation Map* (Figura 3) e requer como *input* uma geometria, materiais de superfícies e o arquivo dos dados meteorológicos (formato EPW⁴) contendo as séries históricas da região a ser estudada (Salvador – BA). A simulação leva em consideração o período (meses do ano), a geometria das edificações contidas no modelo, os materiais das superfícies, como também, topografia e obstruções.

Figura 3 - Plug-in ClimateStudio



Fonte: Elaborado pela autora – captura de tela Rhinoceros

Embora o programa possibilite a geração de modelos com o uso de algoritmos generativos por meio do Grasshoper, os modelos aqui utilizados foram desenvolvidos manualmente por questões de disponibilidade de hardware.

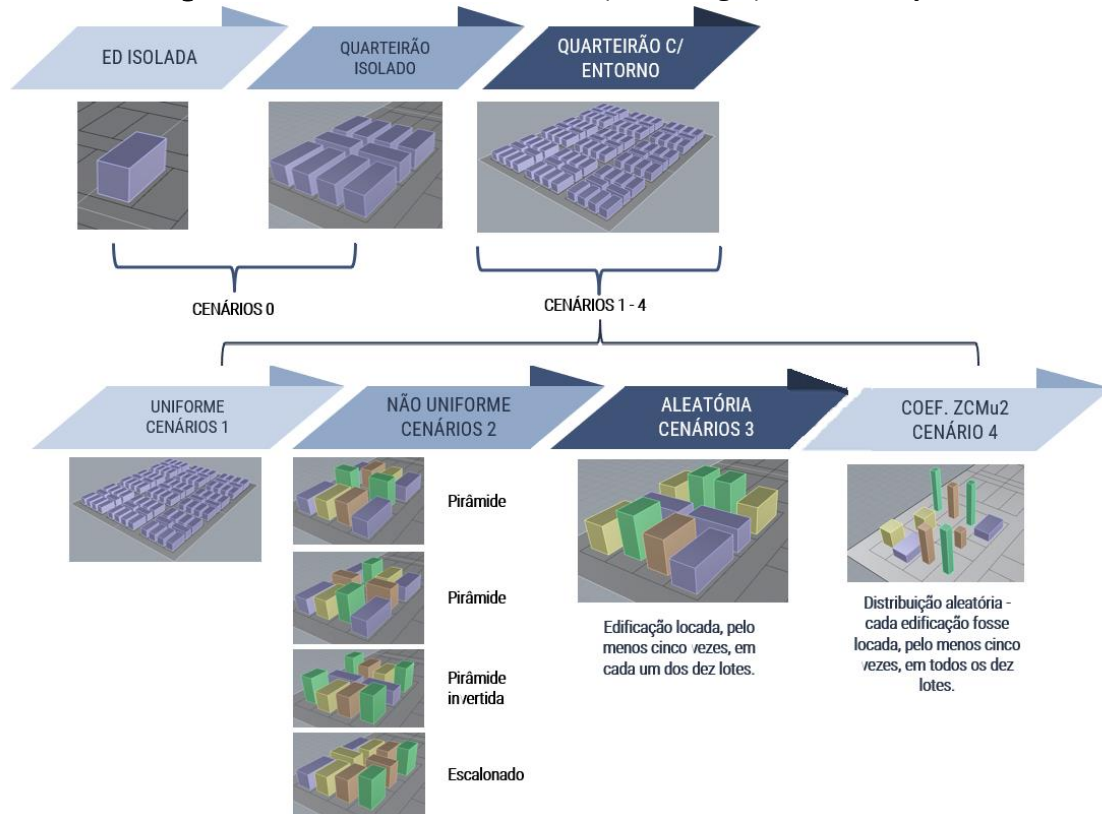
² Do inglês *Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)* são curvas ou superfícies cuja equação utilizada para representá-las é expressa como um coeficiente de dois polinômios, ao invés de um único polinômio somado. A extensão da influência de um vértice de controle pode variar, se tornando útil para modelar superfícies irregulares. (AUTODESK, 2018).

³ Do inglês *Boundary Representation* - O esquema chamado de B-Rep descreve o objeto por meio de fronteiras (faces, arestas e vértices), em que os componentes possuem uma hierarquia definida. Assim, o modelo é organizado topologicamente e geometricamente (Bastian, 2015).

⁴ O formato EPW é utilizado por programas de simulação energética, como o EnergyPlus. Foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA (DoE), contém dados meteorológicos que são usados para executar simulações. Em 2018, o LABEE realizou correções no cálculo da nebulosidade. Para as simulações foi utilizado o arquivo climático de Salvador, indicado e disponibilizado no PBE Edifica por meio do endereço: <http://pbeedifica.com.br/arquivos-climaticos>.

Para as simulações foram criados sete tipos de cenários (Figura 4) baseados nos parâmetros urbanos de Salvador existentes no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU – 2016) vigente.

Figura 4 – Cenários utilizados nos sete primeiros grupos de simulações



Fonte: BASTIAN (2023).

O workflow para a simulações pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Workflow para as simulações utilizando Rhinoceros e ClimateStudio

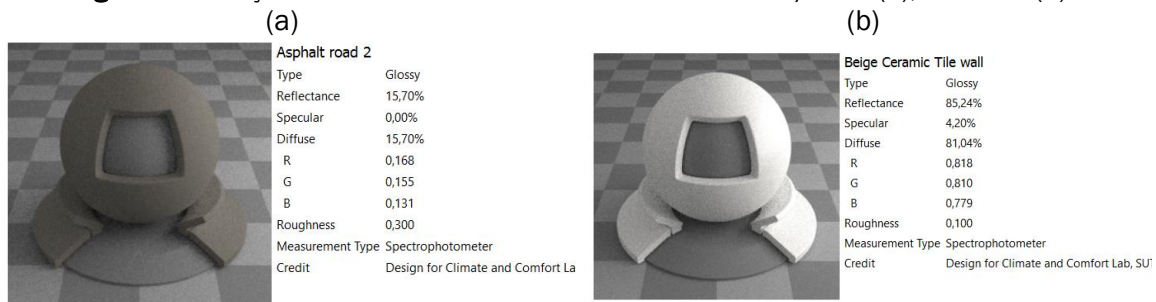


Fonte: Bastian (2023).

As características dos materiais escolhidos têm influência na quantidade de irradiação final incidente nas superfícies. Assim, para que a comparação das simulações pudesse ser

realizada de forma precisa, foram utilizados os mesmos materiais em todas as simulações (Figura 6).

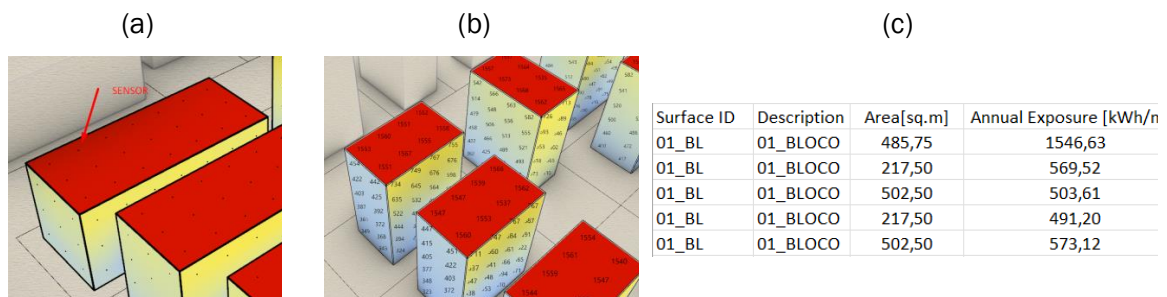
Figura 6 - Seleção de materiais ClimateStudio: arruamento/lotes (a), edifícios (b)



Fonte: captura de tela ClimateStudio (Bastian, 2023).

O programa gera, automaticamente, em cada superfície pré-selecionada, sensores virtuais (Figura 7a) que possibilitam quantificar a irradiação incidente (Figura 7b) e, conseqüentemente, totalizar a irradiação em cada um dos blocos do modelo⁵ (Figura 7c).

Figura 7 – Sensores virtuais nas superfícies (a), Exemplo de simulação módulo Radiatio Map (b), Relatório gerado a partir da simulação (c)



Fonte: Bastian (2023).

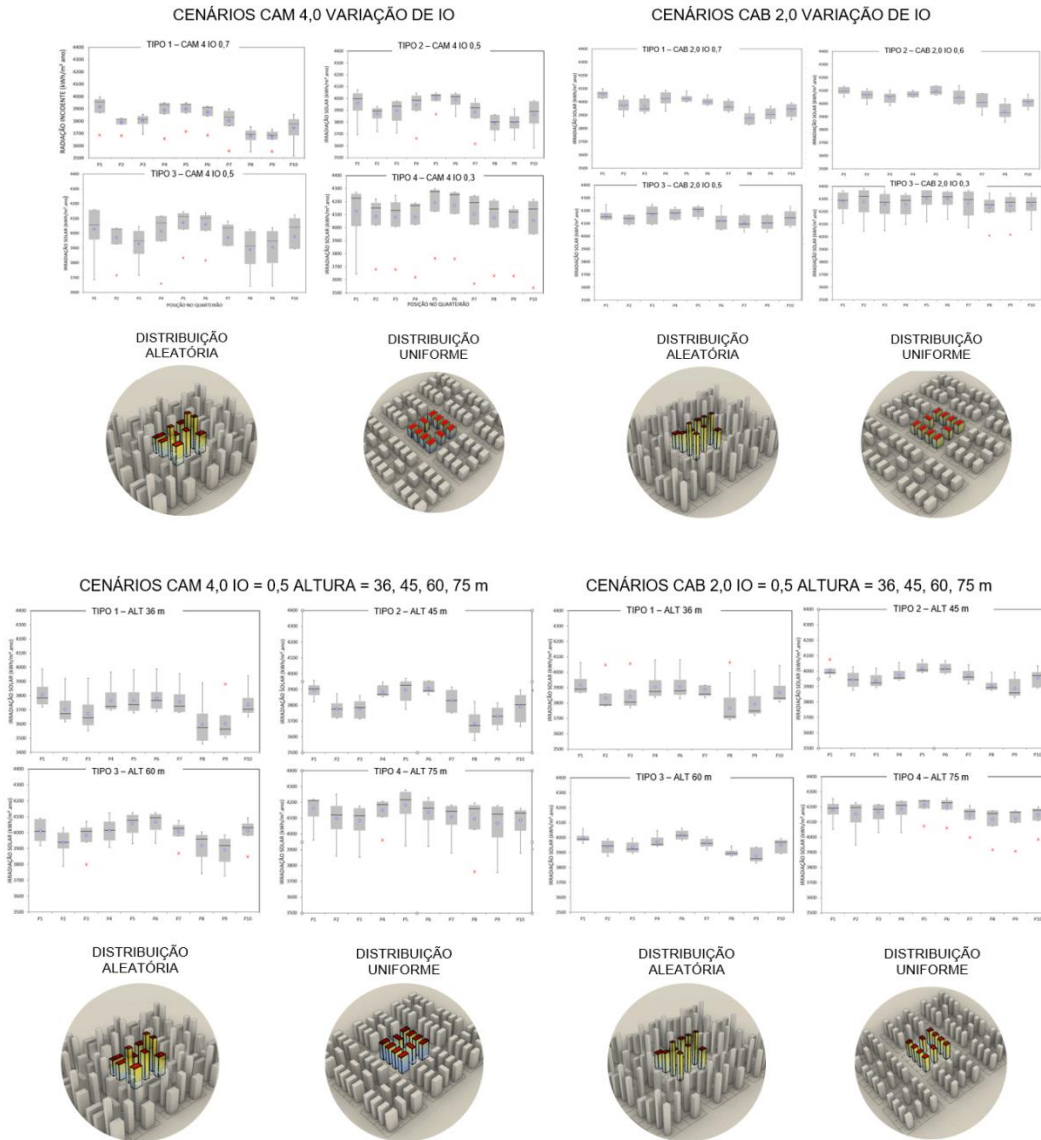
Os resultados obtidos nas simulações são expressos em Wh/m².ano, exportados no formato CSV⁶, armazenados em planilhas eletrônicas e, posteriormente, foram tratados e analisados para que se pudesse verificar a influência dos parâmetros urbanos de Salvador (coeficiente de aproveitamento, altura das edificações, índice de ocupação) na quantidade de irradiação incidentes nas edificações e, assim, a influência do contexto urbano.

A Figura 8 apresenta um exemplo de análise realizada a partir dos dados fornecidos por meio das simulações.

Figura 8 – Exemplo de análise realizada a partir das simulações

⁵ Cada bloco representa uma edificação e, cada edificação é composta por cinco superfícies, sendo quatro fachadas e uma cobertura totalizando cinco linhas de informação por edificação

⁶ O formato Valores Separados por Vírgula - CSV (do inglês *Comma-Separated-Values*) é um tipo especial de arquivo que pode ser criado ou editado no Excel. Em vez de armazenar informações em colunas, os arquivos CSV armazenam informações separadas por vírgulas (MICROSOFT, 2020).



Fonte: Bastian (2023).

Com base nos resultados obtidos nas simulações foi possível verificar o impacto dos parâmetros urbanos na irradiação incidente, como também, quais os parâmetros estudados apresentaram influência mais significativa o que, consequentemente, provocaria um maior ou menor potencial de geração de energia solar fotovoltaica das edificações.

4 Considerações Finais

Este trabalho demonstra a eficácia da utilização de modelos numéricos na simulação e avaliação da irradiação solar em edificações inseridas no contexto urbano, com foco específico para fins de geração de energia solar fotovoltaica. Os resultados obtidos a partir das simulações reafirmam a utilidade das ferramentas utilizadas no que se refere a questões relacionadas a planejamento urbano. Embora existam limitações, uma vez que os

modelos utilizados foram aproximações genéricas da cidade, foi possível verificar a influência do entorno das edificações, bem como, dos principais parâmetros urbanísticos vigentes na cidade de Salvador, servindo como base para trabalhos futuros que possam incluir análises mais detalhadas e modelos que representem precisamente a cidade e, assim, balizar a definição de novos parâmetros urbanos que possam efetivamente maximizar o potencial de geração solar nas edificações.

5 Referências

AMORIM, Arivaldo Leão de. Sistemas e Modelos. Notas de Aula da Disciplina: Seminário em Tecnologias Digitais Aplicadas à Arquitetura e ao Urbanismo. Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

AUTODESK: Conceitos de NURBS. **AUTODESK help**, [s. l.], set. 2018. Disponível em: <https://knowledgeNon-Uniform Rational B-Splines.autodesk.com/pt-br/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/PTB/3DSMax-Modeling/files/GUID-C99618D4-8AB8-4476-A313-4D4519B0DDCF.html>. Acesso em: 19 maio 2019.

BASTIAN, A. V. Morfologia urbana e a geração de energia solar fotovoltaica em Salvador. 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2023.

BATTY, Michael. Cities as Complex Systems: scaling, interaction, networks, dynamics and urban morphologies. **Encyclopedia Of Complexity and Systems Science**, [s. l.], p. 1041-1071, 2009. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_69. Acesso em: 22 abr. 2019.

BATTY, Michael. Complexity in City Systems: understanding, evolution, and design. **Centre For Advanced Spatial Analysis**: University College London, Londres, mar. 2007, p. 1-35.

BATTY, Michael. Urban Modeling. **International Encyclopedia of Human Geography**: Oxford, 2009, p. 51-58.

BATTY, Michael. **The New Science of Cities**. Massachusetts: MIT - Massachusetts Institute of Technology, 2013. p. 518.

BILLEN, R. et al. 3D City Models and urban information: current issues and perspectives. **3D City Models and Urban Information: Current issues and perspectives – European COST Action TU0801**, [S.l.], p. 1-129, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/tu0801/201400001>. Acesso em: 13 maio 2019.

DÖLLNER, J. *et al.* Smart Buildings: A Concept for AD-HOC Creation and Refinement of 3D Building Models. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON NEXT GENERATION 3D CITY MODELS*, 1., 2005, Boon – Alemanha. **Proceedings** [...]. Boon: EuroSDR, 2006. p. 5-10.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JUNIOR, José Antônio Valle. **Design Science Research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015. p. 204.

JULIN, Arttu *et al.* Characterizing 3D City Modeling Projects: Towards a Harmonized Interoperable System. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 55, 2018. DOI: 10.3390/ijgi7020055.

KRÜGER, A.; KOLBE, T. H. Building Analysis for Urban Energy Planning Using Key Indicators on Virtual 3D City Models – The Energy Atlas of Berlin. **The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [s. l.], v. 2, p. 145-150, 27 jul. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b2-145-2012>. Acesso em: 14 out. 2020.

NOUVEL, Romain *et al.* SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. *In: Proceedings of International Conference CISBAT 2015*, Lausanne, 2015. Lausanne: EPFL, 2015, p. 889-894. DOI: <https://doi.org/10.5075/epfl-cisbat2015-889-894>. Acesso em: 12 nov. 2018.

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