

Análise do potencial de geração distribuída de energia solar em edificações residenciais: um estudo de caso em área a ser adensada na cidade de Belo Horizonte

Analysis of the distributed generation of solar energy in residential Buildings: a case study in an area to be densified in the city of Belo Horizonte

Análisis de la generación distribuida de energía solar en edificios residenciales: un estudio de caso en un área a ser densificada en la ciudad de Belo Horizonte

*Rejane Magiag Loura, doutorado em Ciências Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais.
E-mail: rejaneml@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-7048-8035>*

*Ana Júlia Maia Mairink, mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Universidade Federal de Minas Gerais.
E-mail: ana_julia_maia@hotmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-0587-4765>*

*Camila Carvalho Ferreira, doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.
E-mail: camilaccferreira@yahoo.com.br  <https://orcid.org/0000-0002-1121-9126>*

Para citar este artigo: LOURA, R. L.; MAIRINK, A. J. M.; FERREIRA, C. C. Análise do potencial de geração distribuída de energia solar em edificações residenciais: um estudo de caso em área a ser adensada na cidade de Belo Horizonte. *Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo*, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 91-111, 2023. DOI 10.5935/cadernospos.v23n1p91-111



Submissão: 2022-06-26

Aceite: 2022-10-04

Resumo

O aumento do consumo de energia pelo setor residencial, aliado às mudanças climáticas, é um incentivo à geração distribuída a partir de fontes renováveis. Uma das barreiras atuais para a geração distribuída de fontes renováveis está justamente nas políticas urbanas municipais que não possuem parâmetros que garantam o acesso ao sol na maior parte das cidades. O objetivo deste trabalho é avaliar uma abordagem para inclusão da autonomia energética das edificações residenciais, obtidas a partir do acesso ao sol, como parâmetro para a possibilidade de adensamento de determinado território. O procedimento desenvolvido trata-se da construção de cenários de adensamento urbano, posteriormente simulados a partir de modelagem paramétrica de quadras utilizando o *software* Rhinoceros 6.0 e os *plugins* Grasshopper e Ladybug. A aplicação do procedimento se deu em duas quadras com alto potencial de adensamento localizadas no bairro Lagoinha, em Belo Horizonte. O algoritmo desenvolvido permite que o procedimento seja replicado em outros contextos urbanos, pois possibilita a realização de ajustes dos parâmetros urbanísticos. No caso analisado, foi possível constatar que o planejador municipal, do ponto de vista de autonomia energética, precisa considerar não apenas o impacto que o coeficiente de aproveitamento tem sobre a área disponível à geração, mas também o impacto da densidade populacional sobre a demanda. Ficou demonstrado a viabilidade de recorrer a parâmetros urbanísticos tradicionais para refletir sobre o planejamento energético na escala municipal.

Palavras-chave: Setor residencial; Fontes renováveis; Potencial de geração distribuída; Parâmetros urbanísticos.

Abstract

The increase in energy consumption by the residential sector, combined with climate change, is an incentive for distributed generation from renewable sources. One of the current barriers to the distributed generation of renewable sources is precisely in municipal urban policies that do not have parameters that guarantee access to the sun in most cities. The objective of this work is to evaluate an approach to include the energy autonomy of residential buildings, obtained from access to the sun, as a parameter for the possibility of densification of a given territory. The procedure developed is the construction of urban densification scenarios, later simulated from parametric modeling of blocks using Rhinoceros 6.0 software and Grasshopper and Ladybug plugins. The procedure was applied in two blocks with high potential for densification located in the Lagoinha neighborhood, in Belo Horizonte. The developed algorithm allows the procedure to be replicated in other urban contexts, as it allows adjustments to be made to urban parameters. In the case analyzed, it was possible to verify that the municipal planner, from the point of view of energy autonomy, needs to consider not only the impact that the utilization coefficient has on the area available



for generation, but also the impact of population density on demand. The feasibility of using traditional urban parameters to reflect on energy planning at the municipal scale was demonstrated.

Keywords: Residential sector; Renewable sources; Distributed generation potential; Urban parameters.

Resumen

El aumento del consumo energético del sector residencial, combinado con el cambio climático, es un incentivo para la generación distribuida a partir de fuentes renovables. Una de las barreras actuales a la generación distribuida de fuentes renovables está precisamente en las políticas urbanísticas municipales que no cuentan con parámetros que garanticen el acceso al sol en la mayoría de las ciudades. El objetivo de este trabajo es evaluar un enfoque para incluir la autonomía energética de los edificios residenciales, obtenida a partir del acceso al sol, como parámetro para la posibilidad de densificación de un territorio determinado. El procedimiento desarrollado es la construcción de escenarios de densificación urbana, posteriormente simulados a partir del modelado paramétrico de manzanas utilizando el software Rhinoceros 6.0 y los plugins Grasshopper y Ladybug. El procedimiento fue aplicado en dos bloques con alto potencial de densificación ubicados en el Barrio Lagoinha, en Belo Horizonte. El algoritmo desarrollado permite replicar el procedimiento en otros contextos urbanos, ya que permite realizar ajustes a los parámetros urbanos. En el caso analizado, se pudo verificar que el planificador municipal, desde el punto de vista de la autonomía energética, necesita considerar no solo el impacto que tiene el coeficiente de aprovechamiento sobre el área disponible para generación, sino también el impacto de la densidad de población Bajo demanda. Se demostró la factibilidad de utilizar parámetros urbanos tradicionales para reflexionar sobre la planificación energética a escala municipal.

Palabras clave: Sector residencial; Fuentes renovables; Potencial de generación distribuida; Parámetros urbanos.

INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia pelo setor residencial, aliado às mudanças climáticas, é um incentivo à geração distribuída a partir de fontes renováveis. Segundo o *Balanço Energético Nacional* (BRASIL, 2022), o setor residencial foi responsável por 10,9 % do consumo de energia do País, apresentando um aumento do consumo em relação aos anos anteriores. Somam-se ao aumento do consumo, os efeitos gerados pela expansão das cidades nos ambientes construído e natural (THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014), sendo seus efeitos sentidos de forma cada vez mais intensa nesses espaços, originando problemas associados à deterioração ambiental e à crise climática.



A emergência climática desafia paradigmas tradicionais de políticas públicas. Uma das barreiras atuais para a geração distribuída de fontes renováveis está justamente nas políticas urbanas municipais que, além de não incentivarem a implantação de dispositivos de geração distribuída de energia solar nas edificações, não possuem parâmetros que garantem o acesso ao sol na maior parte das cidades. A simples aplicação dos parâmetros urbanísticos especificados pela legislação, muitas vezes, induz a um forte adensamento urbano, aumentando a demanda energética da área. Além disso, resulta em pequena flexibilidade na volumetria das edificações e restritos recuos entre elas, o que minora de maneira significativa o potencial de energia distribuída a partir do sol no tecido urbano (BECK; PEREIRA; SCALCO, 2017).

A geração de energia a partir da fonte solar e o direito de acesso ao sol em tecidos urbanos

A principal fonte de energia elétrica no Brasil é a hidráulica, cuja produção é dependente das condições climáticas, ocorrendo instabilidade na geração em função de secas e diminuição dos níveis dos reservatórios. Propor soluções para os períodos de instabilidade na geração de energia torna-se, portanto, estratégico para o País. O Brasil apresenta condições climáticas favoráveis para o aproveitamento da energia solar em todo seu território (BRASIL, 2014). Ainda segundo a EPE (BRASIL, 2014), os maiores potenciais de geração, em termos absolutos, estão nas regiões mais povoadas do País e há potencial de geração fotovoltaica suficiente para abastecer todo o setor residencial.

Nos últimos anos, duas normativas Resolução Normativa n. 482, de 2012 (RN 482), modificada em 2017 pela Resolução Normativa n. 786 (RN 786), regulamentaram o mercado de geração fotovoltaica distribuída no País, originando grande impulso para a ampliação no número de sistemas instalados (BRASIL; 2012; 2015; 2017). Logo, a garantia do direito de acesso à radiação solar é condição fundamental para viabilizar a ampliação de geração distribuída de energia a partir da fonte solar em áreas urbanas.

A abordagem do conceito de “envelope solar” tem sido utilizada em legislações urbanas em diferentes partes do mundo para essa finalidade. O conceito abrange a garantia de insolação nos períodos de funcionamento da edificação. O tamanho e a forma dos envelopes solares variam com o tamanho e a orientação do lote, a latitude, o tempo de acesso solar desejado e a quantidade de sombra permitida em ruas e edifícios adjacentes (PÉREZ, 2013; KNOWLES, 2003). Constata-se que já é usual em algumas cidades haver leis de uso e ocupação do solo, assim como zoneamentos, que resultam em direito de acesso à radiação limitado em função da altura, recuos e afastamentos, restrições externas ao projeto, exigências para ocupação do lote e sua orientação adotados, entre outros.



Assim, o artigo propõe um procedimento que possibilita a aproximação da política urbana com a política energética ao considerar a autonomia energética das edificações a partir da geração solar distribuída como um parâmetro a contribuir para a elaboração de propostas de legislação urbanística. O presente conteúdo mostra a aplicação do procedimento desenvolvido em duas quadras localizadas em área com potencial de adensamento na cidade de Belo Horizonte, a região da Lagoinha.

METODOLOGIA

Para analisar a relação do acesso à radiação solar das edificações de acordo com os parâmetros urbanísticos, desenvolveu-se um procedimento com base na construção de cenários de adensamento urbano, que são posteriormente simulados a partir de modelagem paramétrica de quadras utilizando o *software* Rhinoceros 6.0 e os *plugins* Grasshopper e Ladybug. A aplicação do procedimento deu-se em duas quadras com alto potencial de adensamento localizadas no bairro Lagoinha, em Belo Horizonte. O algoritmo desenvolvido possibilita que o procedimento seja replicado em outros contextos urbanos, pois permite a realização de ajustes dos parâmetros urbanísticos.

Parâmetros urbanísticos do estudo de caso

O bairro Lagoinha, na região noroeste de Belo Horizonte, está presente no tecido urbano da cidade desde o Plano de Aarão Reis e possui importância cultural e histórica para a capital mineira. A ocupação das zonas suburbanas fez que o bairro se tornasse ponto estratégico para articulação viária municipal (BELO HORIZONTE, 2021). Pela característica de articulação do sistema viário, da proximidade ao centro, da infraestrutura e da baixa densidade construtiva, o Lagoinha apresenta grande potencial de adensamento e renovação urbana, já identificado pela Operação Urbana Consorciada Antônio Carlos/Pedro I – Leste-Oeste (OUC ACLO).

A Figura 1 mostra a localização das duas quadras de interesse dentro do limite de OUC ACLO. Neste mapa-síntese, é possível identificar os usos do solo, as áreas consolidadas e as edificações com algum grau de proteção do órgão de patrimônio histórico.



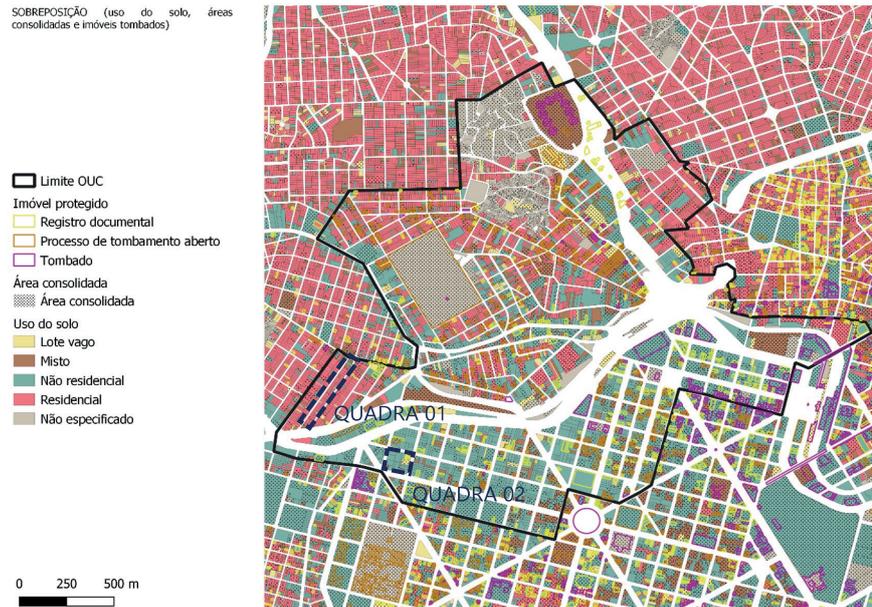


Figura 1: Mapa-síntese. Fonte: Elaboração própria, a partir de dados de Suplan/SMPU, 2021.

De acordo com a legislação municipal, a Quadra 1 apresenta zoneamento OM-2 e a Quadra 2, OP-3. Os parâmetros urbanísticos referentes aos zoneamentos são expostos na Figura 2.

Após o levantamento dos parâmetros urbanísticos informados ao algoritmo desenvolvido para simulação, deve-se fazer a caracterização das quadras de análise.

A Quadra 1 caracteriza-se pela predominância do uso residencial e algumas edificações de uso misto e comercial. Nela foram identificadas quatro edificações consolidadas, mantidas no processo de análise com a volumetria original e quantidade de unidades habitacionais no decorrer das simulações. No caso-base, a quantidade de unidades habitacionais por edificação considerada foi de 1 para as edificações residenciais e de uso misto. Para as edificações consolidadas, consideraram-se 18, 12 e 16 unidades residenciais em duas delas, totalizando 126 UH na quadra.

De acordo com diagnóstico da Quadra 2, esta possui uma ocupação majoritariamente comercial, com três edificações de uso misto. Para o cálculo da quantidade de unidades habitacionais, consideraram-se 1, 4 e 8 unidades residenciais para essas três edificações, resultando em apenas 13 UH. Duas edificações são consideradas consolidadas. Desse modo, foram preservadas como na situação atual ao longo das análises. Além disso, há um lote vago assim mantido, pois há sinalização de registro de proteção do patrimônio histórico.

Zoneamento	CA básico	CA máximo	QT (m ² /unid)	Legenda		
OM-2	1,0	1,3	40	CA - coeficiente de aproveitamento OM - Ocupação Moderada OP - Ocupação Preferencial		
OP-3	1,0	5,0	Sem limite			
Parâmetros para lotes e quadras						
	Área mínima de lote (m ²)		Área máxima de lote (m ²)	Frente mínima de lote (m) ¹	Frente mínima de lote para EUC (m)	Extensão máxima de quadra (m)
Zoneamento	Via local ou coletora	Via arterial ou de ligação regional				
OM-2 e OP-3	125	500	10.000	5,0	10,0	200
Regra geral de Afastamento Frontal						
Classificação da via				Afastamento frontal mínimo (m)		
Via de ligação regional ou arterial				4,0		
Via coletora ou local				3,0		
Via mista ou de pedestre				sem exigência		
Regra geral de Afastamentos						
Situação				Afastamentos laterais e de fundos mínimos (m)		
H < 8,0 m				1,5		
H ≥ 8,0 m e ≤ 12,0 m				2,3		
H > 12,0 m				Regra do H - 2,3 + (H - 12,0) / B		
Notas:						
1. Considera-se como fator para o cálculo dos afastamentos:						
a. B = 8 em áreas de centralidade regional, áreas de grandes equipamentos e OP-3;						
b. B = 6 em áreas de centralidade local;						
c. B = 4 nas demais situações.						

Figura 2: Parâmetros urbanísticos das quadras de análise. Fonte: Elaboração própria com base no Plano Diretor (BELO HORIZONTE, 2019).

Cenários

A construção dos cenários considerou dois eixos principais. No contexto urbano, a disponibilidade de radiação solar é determinada em grande parte pela topografia, pela morfologia urbana e pela volumetria das edificações, que pode ser definida a partir do coeficiente de aproveitamento do terreno e afastamentos mínimos estabelecidos na legislação municipal. O segundo eixo tem relação com o consumo de energia em residências. Tal aspecto varia em função dos hábitos dos moradores – cujos dados disponíveis não são capazes de retratar detalhadamente os distintos contextos sociais e regionais do País de maneira pormenorizada – e da densidade populacional bruta, ou seja, a quantidade de pessoas e unidades residenciais em determinada área.

O parâmetro urbano presente no Plano Diretor de Belo Horizonte que permite explorar essa variação é a Quota de Terreno por Unidade Habitacional – QT (m²/un). Esse parâmetro corresponde à quantidade de unidades habitacionais segundo unidade de área do terreno, definindo a densidade habitacional a partir da relação entre o número de unidades habitacionais a serem idealmente produzidas e a área total do terreno (BELO HORIZONTE, 2019). A QT está indicada na legislação urbana para cada área da cidade. Nas áreas mais adensadas a QT é 40 metros quadrados e naquelas menos adensadas os valores são significativamente mais elevados.

Considerando esses parâmetros e o objetivo da pesquisa, foram definidas cinco situações de análise: o caso-base (situação atual) e quatro cenários especulativos sobre adensamento e renovação urbana.

- Caso-base (CB): Configuração urbana atual.
- Cenário 1 (C1): Configuração prevista na legislação vigente, ou seja, CA base (1,0) + QT mínima (40 m²).
- Cenário 2 (C2): Configuração prevista na legislação vigente para os parâmetros urbanísticos, exceto a QT que seria elevada para comportar uma edificação de padrão normal de acordo com a NBR12.721:2006 (ABNT, 2005), ou seja CA base (1,0) + variação da QT mínima (80 m²).

Conforme estabelecido pelo Plano Diretor de Belo Horizonte, é permitido descontar como área construída espaços de garagem, circulação vertical e horizontal coletivas, além de permitir o acréscimo do CA Básico por meio de benefícios urbanísticos. Esse acréscimo não computado no potencial construtivo é de 0,7 m² de área edificada para cada 1,0 m² de área líquida construída nas unidades autônomas da edificação, condicionada a ser utilizada nos espaços de uso comum ou destinados a estacionamento de veículos leves e área de manobra (BELO HORIZONTE, 2019). Portanto, neste trabalho, a volumetria final da edificação é equivalente a 1,7 para o CA básico e 8,5 para o CA máximo.

- Cenário 3 (C3): Elevação do coeficiente de aproveitamento do terreno para valores significativamente altos e manutenção da QT vigente, ou seja, CA máx (5,0) + QT mínima (40m²). O CA máximo do zoneamento OP-3 foi adotado também para os demais zoneamentos. A adoção do CA máximo de 5,0 para todas as quadras, mesmo aquelas que não estão no zoneamento OP-3, se justifica pela proposta de OUC, que prevê o aumento do potencial construtivo.
- Cenário 4 (C4): Elevação do coeficiente de aproveitamento do terreno para valores significativamente altos e QT seria elevada para comportar uma edificação de padrão normal de acordo com a NBR12.721:2006 (ABNT, 2005), ou seja, CA máx (5,0) + QT mínima (80 m²).

A definição da densidade populacional bruta deu-se a partir da Pesquisa de Posse e Hábitos (ELETROBRAS, 2019) – cujo número médio de moradores habituais por residência para o País é o de 3,45 e 3,43 para o Estado de Minas Gerais. Segundo o Censo Nacional (IBGE, 2012), a média de habitantes por domicílio em Belo Horizonte é de 3,11 habitantes/domicílio. Decidiu-se trabalhar com o número inteiro imediatamente superior, pois esse é o tipo de informação demandada pela NBR 5626:2020 (ABNT, 2020), ou seja, estabeleceu-se que cada unidade habitacional analisada teria quatro moradores.



Modelagem

Após a definição dos cenários de análise, procedeu-se com a modelagem computacional da morfologia urbana da área de interesse iniciando pela topografia das quadras de interesse e aquelas adjacentes a seu entorno imediato, como mostra a Figura 3. A etapa seguinte consiste na inserção das edificações presentes nas quadras adjacentes de forma paramétrica. Desenvolveu-se um algoritmo que associa a área de projeção da edificação – disponível no levantamento cadastral do município – com as altimetrias das edificações existentes – obtidas *in loco* – para alcançar uma volumetria simplificada.

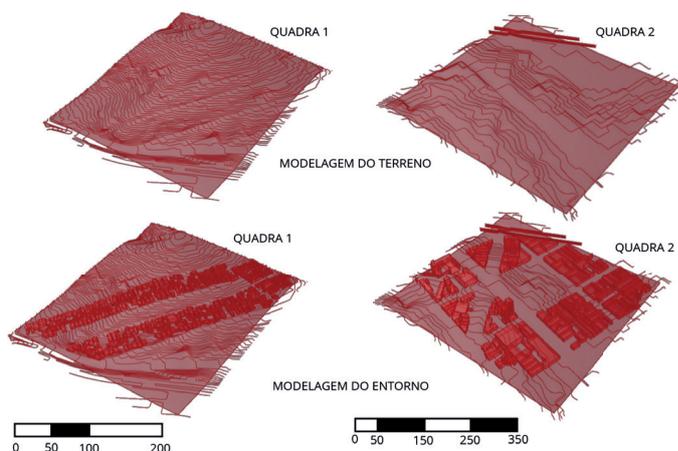


Figura 3: Etapas da modelagem paramétrica. Fonte: Elaboração própria.

Após a preparação do entorno-base de simulação, deve-se preparar cada um dos cenários. A Figura 4 ilustra todos os cenários resultantes do processo descrito a seguir. Primeiramente, foram montados os algoritmos para simulação do CB das duas quadras. Utilizando as projeções das edificações existentes do Cadastro Territorial Municipal (CTM) e um levantamento realizado *in loco*, foi possível construir o CB das duas quadras (PRODABEL, 2011). A partir das informações da PBH, identificaram-se aquelas edificações que não seriam substituídas nos cenários de análise, seja porque são consideradas consolidadas, seja porque contam com algum nível de proteção patrimonial.

Para preparar o algoritmo dos C1 e C2, a projeção da edificação existente foi desconsiderada e trabalhou-se com o limite de cada lote passível de substituição – os muros indicados na CTM. Aplicando os parâmetros urbanísticos presentes na legislação vigente – coeficiente de aproveitamento e afastamentos laterais, de fundo e frontal –, obteve-se a área de projeção na nova edificação. O processo para definição da altimetria da nova edificação parte da área construída total – área do terreno multiplicada pelo coeficiente de aproveitamento – dividida pela área de projeção. A resultante deve ser arredondada para o número inteiro imediatamente inferior, indicando o número de pavimentos da nova edificação. A altimetria total é a multiplicação do número de pavimentos pelo pé-direito (3,0 metros), acrescido de 1,0 metro para áreas técnicas na cobertura.

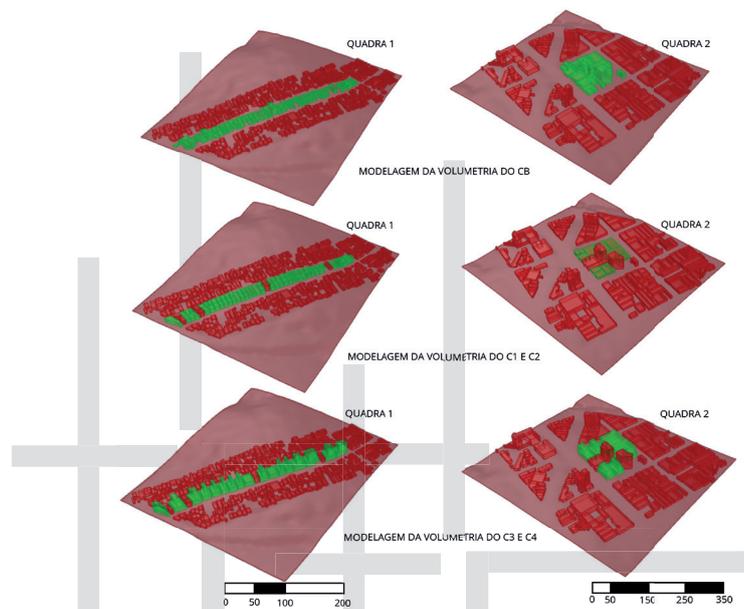


Figura 4: Modelagem das volumetrias dos cenários-base, C1, C2, C3 e C4. Fonte: Elaboração própria.

O algoritmo dos C3 e C4 tem por objetivo investigar os impactos do maior adensamento nas áreas de estudo. Logo, mantêm-se os parâmetros legais vigentes, exceto o CA para o qual se define um novo valor (5,0 neste caso). Os afastamentos laterais, que, conforme a legislação, devem seguir a regra do H, quando aplicados na maioria dos lotes do CB, inviabilizam as novas volumetrias nos lotes existentes. Portanto, parte-se para aglutinação aleatória dos lotes. Após essa etapa, o processo segue exatamente igual aquele descrito para o C1 e C2 até a definição da altimetria. Contudo, para a geração da volumetria final nos C3 e C4 de cada edificação são necessários outros passos. Aplicam-se os afastamentos laterais e de fundo de 1,5 metro e o afastamento frontal de 3,0 metros até a alta de 8,0 metros, os afastamentos laterais e de fundo de 2,3 m entre 8,0 e 12,0 metros e os afastamentos conforme a regra do H para alturas acima de 12,0 metros.

A partir de uma mesma volumetria, a densidade da quadra foi variada, modificando-se a área mínima da unidade habitacional dentro da edificação de 40 metros quadrados para o C1 e C3 e 80 metros quadrados para o C2 e C4. A área de projeção foi multiplicada pela quantidade de pavimentos em número inteiro para a obtenção da área das unidades privativas. A área das unidades privativas total foi dividida pela área das unidades habitacionais (40 m² ou 80 m²), obtendo-se a quantidade de UH em cada cenário.

Simulação

Todas as cinco situações de análise foram submetidas às simulações computacionais utilizando o arquivo climático do Aeroporto da Pampulha, em Belo Horizonte.



Para realizar a análise de radiação incidente nas coberturas e eventuais áreas de sombreamento, recorreu-se ao *plugin* Ladybug. Apesar de não obrigatório para o processamento da simulação, o entorno é essencial para uma análise mais acurada. O resultado da radiação aparece graficamente na superfície de análise: as coberturas. Essa informação orienta a definição das áreas viáveis para instalação dos sistemas fotovoltaicos e termossolares. Também é possível obter a saída da simulação de forma numérica por ponto. Entretanto, neste trabalho, realizou-se a opção pela análise gráfica dessa variável, já que o interesse principal é a informação sobre o potencial de energia gerada.

Tendo em vista o percentual significativo do consumo do chuveiro elétrico no total do consumo residencial, aproximadamente 15% de acordo com a PPH (ELETROBRAS, 2019), e seu impacto na curva de carga do setor, optou-se por priorizar o atendimento integral à demanda de água quente antes do cálculo da produção de energia fotovoltaica. A opção por priorizar o atendimento do aquecimento de água também se apoia no custo da tecnologia, o sistema termossolar possui um menor valor de investimento inicial. Ademais, o sistema é mais eficiente, uma vez que há a conversão direta de energia.

A intenção inicial da pesquisa era utilizar o *plugin* Ladybug com um *script* próprio para a definição da quantidade de água quente residencial. No entanto, a realização de testes apontou que esse *script* superdimensiona a quantidade de água quente necessária, provavelmente porque foi desenvolvido para outra realidade climática. Assim, para o dimensionamento do sistema termossolar, tomou-se como base a referência de Creder (1991), que estima consumo de água quente por pessoa em residências com aquecimento solar de água em 50 litros. Para o cálculo do volume de água a ser aquecido, considerou-se que cada unidade habitacional teria quatro moradores. Após o cálculo da demanda de água quente, determinou-se a energia necessária para o aquecimento do volume de água previsto, conforme Equação 1 a seguir (CASTILHO; CHAVES, 2016).

$$E = \frac{V \times C_p \times \Delta t \times 30}{3600}$$

E – Demanda de energia por dia em kWh/mês.

V – Volume mensal de água quente a ser aquecido em litros.

C_p – Calor específico da água constante de 4,18 kJ/kg °C.

Δt – Diferença de temperatura da água para banho da temperatura ambiente da água.

Conhecendo a demanda de energia solar, utilizaram-se dados dos equipamentos do Procel (2020) para selecionar uma placa coletora solar para banho e proceder com o cálculo da área necessária para aquecer o volume de água quente calculado. Escolheu-se um equipamento de nível de eficiência A, com eficiência energética média de 72,5% e produção média mensal de energia de 104,9 kWh/mês*m², do fabricante Helisol, marca Solarium, modelo PP200.



No CB, aplicou-se o fator de correção de 1,35, utilizado para quando o coletor solar está em uma orientação não favorável. A área necessária para o aquecimento de água foi subtraída da disponível para energia solar. A área disponível foi estabelecida como 50% da área de cobertura para o CB e 70% para os quatro cenários. O valor de metade da área de cobertura disponível para a situação atual foi estabelecido pela predominância de edificações com telhado de duas águas no parque edificado real. Sendo assim, uma das orientações seria mais favorável para a implantação dos sistemas de aquecimento de água. Já o percentual um pouco mais elevado, de 70%, para as situações das conjecturas futuras, se dá pelo fato de que, ao se projetar uma nova edificação, a instalação dos sistemas poderá ser feita visando à orientação ideal, conforme decisão projetual.

Sabendo a área necessária para atender à demanda de água quente para banho, passou-se para a realização da estimativa de produção de energia fotovoltaica utilizando o *script* do *plugin* Ladybug. Os dados de entrada obrigatórios são o arquivo climático e a superfície de geração – nesse caso, a cobertura das edificações. Além disso, incluiu-se a porcentagem da cobertura – fator entre 0 e 100 – de fato disponível para a instalação do sistema fotovoltaico. Esse valor foi obtido por meio da subtração da área necessária para o aquecimento de água, do total disponível (CB – 50%, Cenários – 70%). A saída dessa etapa é a energia total gerada no ano em kWh, apresentado por superfície.

Em relação às características do módulo fotovoltaico, é possível informar as características do equipamento especificado com um *script* específico e inserir o dado de entrada no “PVmoduleSettings”. Nesta pesquisa, utilizou-se a configuração padrão, o material do módulo é o silício cristalino (c-Si) com eficiência de 15%, valores condizentes com as informações levantadas durante a pesquisa bibliográfica.

Com isso, comparou-se a produção de energia frente ao consumo. Os dados médios de consumo mensal de energia para Belo Horizonte foram obtidos na PPH (ELETROBRAS, 2019), excluindo o percentual do consumo do chuveiro elétrico (15%), uma vez que o consumo de água quente para banho está sendo considerado como atendido pelo sistema termossolar. O consumo anual foi multiplicado pela quantidade de unidades residenciais em cada cenário, resultando na demanda da quadra em cada cenário. Apesar da intenção em priorizar o atendimento da demanda de água quente, tendo em vista que o aquecimento de água poderia ser suprido com a utilização de outras tecnologias com uso mais racional de energia, para as situações em que não houve autonomia energética, considerou-se um novo contexto investigativo em que toda a área útil de geração foi destinada à produção fotovoltaica. Nesse caso, a intenção foi verificar qual seria a contribuição exclusiva da geração fotovoltaica diante da demanda por eletricidade.

Por fim, cabe explicitar que todo o processo de simulação não considerou as edificações de uso não residenciais nos cálculos de demanda de energia, assim como as suas áreas de cobertura foram excluídas para a estimativa de geração de energia solar.



RESULTADOS

Inicialmente, apresentou-se a disponibilidade de radiação nas coberturas. Em seguida, os dados do potencial de atendimento da demanda energética por geração distribuída de energia solar, ou seja, a autonomia energética da quadra. Por fim, fez-se uma discussão propositiva sobre diretrizes que visam à manutenção do potencial de atendimento da demanda energética do setor residencial.

Radiação disponível nas coberturas

O primeiro conjunto de simulação visou verificar se o acesso ao sol está garantido na situação atual, independentemente do uso da edificação.

A Figura 5 demonstra que a Quadra 1 com baixas altimetrias apresenta valores de irradiação solar acima de 1100 kWh/m² na maior parte das edificações, chegando a valores superiores a 1500 kWh/m². Já a Quadra 2, com edificações de até 37 metros, têm áreas bastante sombreadas, com níveis chegando a valores abaixo de 500 kWh/m². As edificações mais sombreadas da Quadra 2 possuem uso comercial, portanto essas áreas sombreadas não interferem no potencial das edificações residenciais.

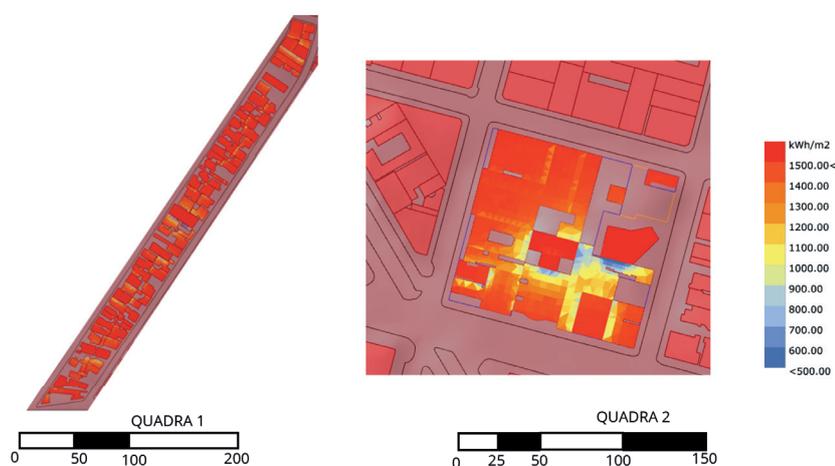


Figura 5: Radiação – Quadras 1 e 2 para o caso-base. Fonte: Elaboração própria.

Analisando a disponibilidade de radiação na cobertura apenas das edificações de uso residencial e misto para o CB e os quatro cenários, observa-se na Figura 6 a evolução da radiação incidente na cobertura das edificações residenciais da Quadra 2.

No CB as edificações consolidadas são aquelas com maior altimetria na quadra e não sofrem sombreamento do entorno, o que permanece nos C1 e C2. No entanto, nos C3 e C4 elas passam a ser bastante sombreadas pelas novas volumetrias nos lotes adjacentes. O CB tem sombreamento disperso ao longo da quadra,

resultante das diferenças de altura entre as edificações. Quando aplicados os parâmetros previstos na legislação de maneira homogênea, nos cenários C1 a C4, há um menor sombreamento entre as edificações propostas.

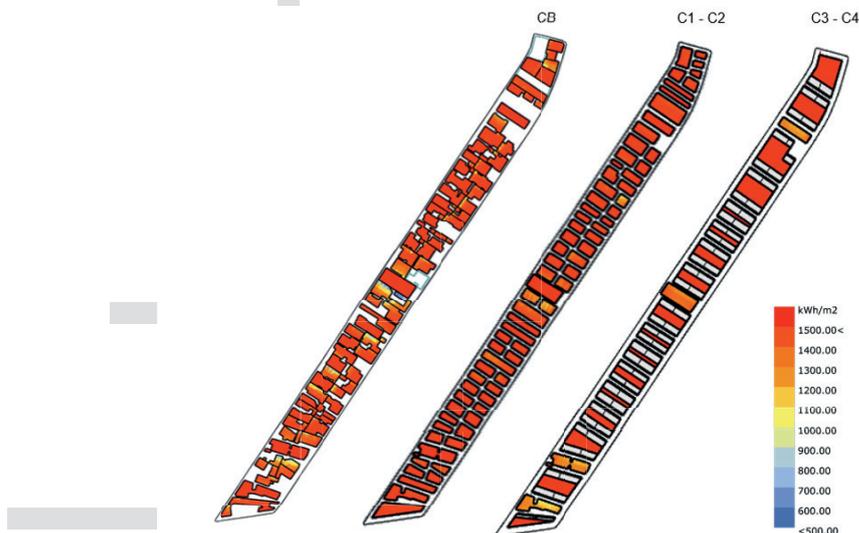


Figura 6: Radiação – Quadra 1. Fonte: Elaboração própria.

A Figura 7 expõe a evolução da radiação incidente na cobertura das edificações residenciais da Quadra 2. O CB conta com apenas 3 edificações de uso misto que são pouco sombreadas pelo entorno. Nos C1 e C2, as edificações sofrem bastante sombreamentos na porção interior da quadra, sendo sombreadas pelas edificações consolidadas que chegam a 37 metros de altura. No entanto, nos C3 e C4, as edificações propostas atingem altimetrias mais próximas às das edificações consolidadas, assim como os afastamentos entre elas se tornam maior, o que reduz o sombreamento pelas volumetrias adjacentes. Esses resultados sugerem para a Quadra 2 maior adequação do CA mais elevado, entre os casos simulados.

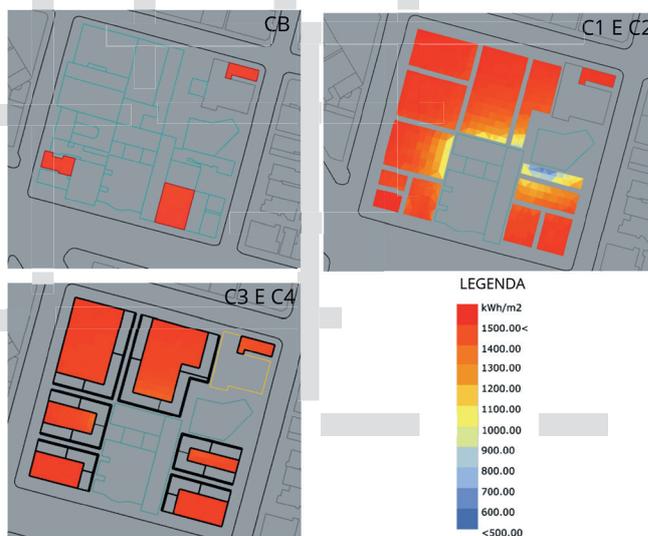


Figura 7: Radiação – Quadra 2 – CB e cenários. Fonte: Elaboração própria.

Potencial de autonomia energética

A Tabela 1 apresenta os dados resultantes do dimensionamento dos sistemas termossolar e fotovoltaico. Para as duas quadras é possível perceber o aumento da área dos painéis termossolares à medida que se aumenta o coeficiente de aproveitamento ou reduz-se a quota mínima da unidade habitacional. Chega-se a ponto de não ser possível no C3 contar com área disponível para instalação do sistema fotovoltaico. Observando-se as cinco situações de análise, o atendimento da demanda por água quente para banho nas duas quadras, apenas no C3 das quadras 1 e 2 não foi possível o atendimento pleno da demanda de água quente para banho (Tabela 2).

É interessante destacar desses resultados que, aparentemente, a morfologia das quadras e a topografia das quadras de estudo não interferiram na capacidade de produção de água quente a partir do sistema termossolar. Entretanto, não se pode afirmar que essa interferência não ocorrerá em outras situações urbanas.

Acerca da geração de energia fotovoltaica, apresentam-se na Figura 7 os dados de demanda, potencial de geração em MWh e a razão entre o potencial de geração e a demanda. A razão entre o potencial de geração distribuída de energia e a demanda define o grau de autonomia energética. Quando esse valor é superior a 1,0, a geração da fonte solar é capaz de suprir a demanda prevista para o uso residencial, após excluir o consumo de energia para aquecimento de água.

Quadra	Cenário	UH	Área de cobertura (m ²)	Área útil geração (m ²)	Área AQ (m ²)	Área PV (m ²)	Porcentagem de área AQ	Porcentagem de área PV
1	CB	126	10.254,42	5.127,21	338,90	4.788,31	6,61%	93,39%
	C1	541	9.478,16	6.634,71	1.077,87	5.556,84	16,25%	83,75%
	C2	278	9.478,16	6.634,71	553,88	6.080,83	8,35%	91,65%
	C3	2.845	5.345,47	3.741,83	5.668,30	0,00	100,00%	0,00%
	C4	1.449	5.345,47	3.741,83	2.886,95	854,88	77,15%	22,85%
2	CB	13	894,68	447,34	34,97	412,37	7,82%	92,18%
	C1	345	6.995,39	4.896,77	687,37	4.209,40	14,04%	85,96%
	C2	172	6.995,39	4.896,77	342,69	4.554,09	7,00%	93,00%
	C3	1.833	4.144,65	2.901,25	4.144,65	0,00	100,00%	0,00%
	C4	917	4.144,65	2.901,25	1.827,01	1.074,25	62,97%	37,03%

Tabela 1: Áreas. Fonte: Elaboração própria.



Quadra	Cenário	UH	Demanda (L)	Área AQ (m ²)	Potencial de atendimento (%)
1	CB	126	25.200	338,90	100%
	C1	541	108.200	1.077,87	100%
	C2	278	55.600	553,88	100%
	C3	2.845	569.000	5.668,30	66%
	C4	1.449	289.800	2.886,95	100%
2	CB	13	2.600	34,97	100%
	C1	345	69.000	687,37	100%
	C2	172	34.400	342,69	100%
	C3	1.833	366.600	3.652,02	79%
	C4	917	183.400	1.827,01	100%

Tabela 2: Água quente. Fonte: Elaboração própria.

A demanda é plenamente atendida nos casos CB, C1 e C2. Já o atendimento é parcial para C3 e C4. O C1 demonstra um maior equilíbrio entre a demanda e a geração nas duas quadras.

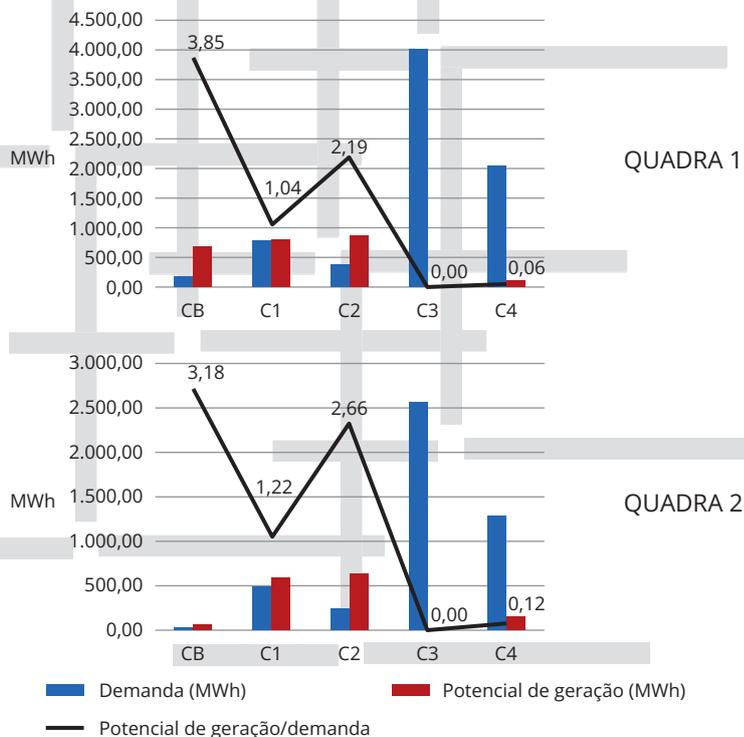


Figura 8: Dados de demanda, potencial de geração em MWh e razão entre potencial de geração e demanda. Fonte: Elaboração própria.



A título de investigação, especulou-se para C3 e C4 qual seria o percentual de atendimento à demanda de eletricidade caso toda a área de telhado fosse destinada apenas à produção fotovoltaica. A Figura 9 mostra os resultados dessas simulações considerando que os cenários denominados como “a” são os originais, que levam em conta o aquecimento solar de água; já os denominados como “b” são aqueles somente com a geração fotovoltaica. Pode-se perceber em C3b uma discreta autonomia energética que, possivelmente, não alcance viabilidade econômica para instalação do sistema fotovoltaico nas duas quadras. Em C4b, a autonomia avança de forma mais significativa.

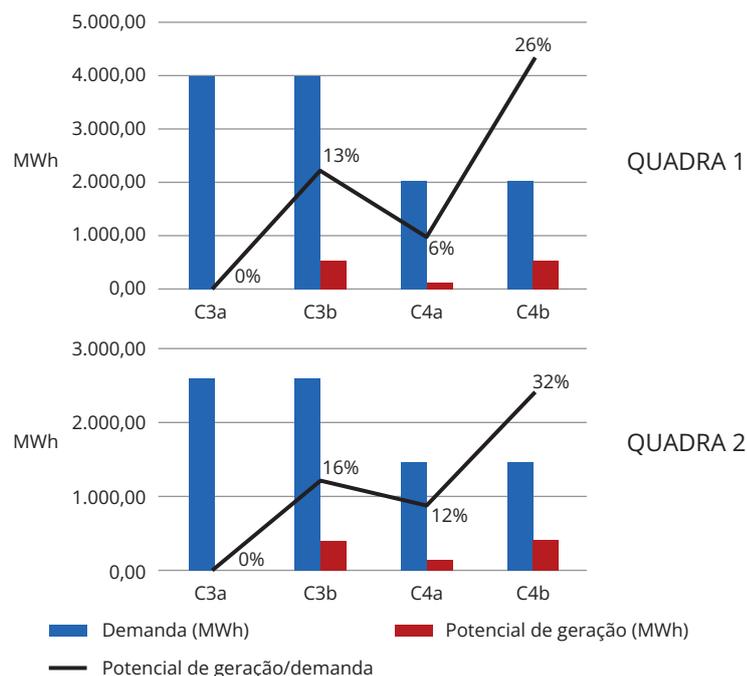


Figura 9: Atendimento à demanda de eletricidade pelo sistema fotovoltaico exclusivamente.

Fonte: Elaboração própria.

Análises e discussão propositiva

O intuito aqui é discutir maneiras de aproximar questões afeitas ao planejamento energético ao planejamento urbano. Primeiramente, fica claro que elevação do CA impacta sobre o aumento de demanda e na redução da área de geração pela vigência da regra do H. Ressalta-se que foi utilizada apenas a cobertura superior em C3 e C4, tendo em vista a ocupação padrão de edificações do tipo “bolo de noiva”, nas quais o afastamento intermediário é usado como área privativa dos apartamentos. Nesse contexto, pode-se inferir a existência de espaço para decisões durante a elaboração dos projetos das edificações que visem ao aumento da geração de energia fotovoltaica se outras áreas forem consideradas. Percebe-se haver espaço também para desenvolvimento de regras de afastamento entre edificações distintas à regra do H atualmente vigente, com o intuito de alcançar área de cobertura relativamente maior.

A definição de QT mostrou ter relevante papel sobre a autonomia energética nos cenários analisados. Dessa forma, o planejador pode buscar um equilíbrio entre CA e QT para as quadras. É interessante atentar para a relação próxima de 1,0 encontrada em C1 nas duas quadras, o que é um indicativo de equilíbrio entre CA e QT. Considerando esses tamanhos de lote, seria a combinação mais adequada a viabilidade técnica e econômica de geração. Diante do arcabouço normativo nacional vigente – Resolução Normativa n. 482, de 2012 (RN482), modificada em 2017 pela Resolução Normativa n. 786 (RN786), a geração com excedente muito elevado não traz benefícios financeiros diretos para o usuário final, pois essa não pode ser comercializada. Portanto, o alto potencial observado em CB e C2 não apresentaria viabilidade financeira. Em outro contexto normativo, CB e C2 poderiam ser considerados áreas geradoras, ou seja, a geração excedente nessa região com morfologia urbana mais favorável poderia compensar a demanda em regiões mais adensadas e/ou com menor área de cobertura disponível.

O procedimento desenvolvido indica haver espaço para aprofundar os estudos sobre estruturação de políticas públicas voltadas ao incentivo à autonomia energética de edificações residenciais em áreas com expectativa de adensamento. Pois, mesmo no C3 (situação menos favorável), mais de 65% da água quente demandada pode ser obtida por meio de fonte de energia limpa, economicamente acessível e não emissora de gases de efeito estufa.

As normativas federais de regulação da geração distribuída de energia solar representaram um grande avanço para o a ampliação da implementação das tecnologias de geração de energia solar. No entanto, ainda há carência de políticas nas esferas municipais que incentivem essa adesão. O procedimento permite chegar a valores estimados de geração e possibilitam ao planejador decidir sobre seguir pelo caminho de adoção voluntária a partir de políticas públicas de incentivo para o mercado imobiliário, por exemplo, descontos em impostos ou aquisição de coeficiente de aproveitamento adicional – ou optar pelo caminho da prescrição. Nesse sentido, determinadas tipologias e/ou áreas da cidade deveriam obrigatoriamente atender à exigência mínima de autonomia energética. Finalmente, o estudo indicou haver condições de estabelecer política energética pautada no ODS7 atrelada à política urbana mesmo que, em um primeiro momento, não seja possível trabalhar a partir do conceito clássico de envelope solar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da instabilidade energética do Brasil dos últimos anos e da necessidade de redução de emissão de gases de efeito estufa observadas, este artigo teve como objetivo desenvolver um procedimento para permitir avaliar o potencial da geração distribuída de energia solar em edificações residenciais implantadas em área com potencial de adensamento na cidade de Belo Horizonte. Para tanto, recorreu-se ao uso de simulação computacional por meio de modelagem



paramétrica para diagnosticar o potencial atual e em cenários especulativos de geração distribuída de energia solar.

O algoritmo desenvolvido por meio da ferramenta Grasshopper mostrou-se uma ferramenta aplicável à análise integrada dos parâmetros urbanísticos previstos na legislação municipal, sobretudo quando se analisa diferentes configurações morfológicas urbanas. A ferramenta pode ser usada em outros contextos urbanos permitindo construir e avaliar distintos cenários de interesse. Ademais, pode ser adaptada para outros contextos legislativos.

Outros contextos urbanos ou parâmetros construtivos podem conduzir a resultados distintos daqueles encontrados nessa aplicação. A modelagem das áreas de análise não considerou a presença de vegetações, que podem gerar sombreamento adicional, e a inclinação da cobertura no CB, o que não condiz com a realidade observada *in loco*.

Por fim, o presente trabalho atinge seu objetivo proposto, com o estabelecimento do procedimento para avaliação do potencial de autonomia energética a partir de fonte solar em tecidos urbanos com possibilidade de renovação e/ou adensamento. Também demonstrou-se a viabilidade de recorrer a parâmetros urbanísticos tradicionais para refletir sobre o planejamento energético na escala municipal.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto NBR 5626:2020: Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, set. 2020.

BECK, L. M.; PEREIRA, F. O. R.; SCALCO, V. A. Análise da iluminação natural em ambientes internos inseridos em cenários urbanos virtuais. *In: XIV ENCAC & X ELACAC: Habitat Humano: em busca de conforto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade no século XXI*, 2017, Santa Catarina. *Anais... Balneário Camboriú*, 27-29 set.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/prodabel>. Acesso em: 8 fev. 2023.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Lei n. 11.181, de 8 de agosto de 2019*. Aprova o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte e dá outras providências. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/b/belo-horizonte/lei-ordinaria/2019/1119/11181/lei-ordinaria-n-11181-2019-aprova-o-plano-diretor-do-municipio-de-belo-horizonte-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 8 fev. 2023.



BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Subsecretaria de Planejamento Urbano. Subsecretaria Municipal de Política Urbana. *Plano de Qualificação Urbanística Centro-Lagoinha*. Belo Horizonte, ago. 2021. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/politica-urbana/planejamento-urbano/plano-centro-lagoinha/plano-qualificacao-urbanistica-centro-lagoinha>. Acesso em: 10 fev. 2023.

BRASIL. ANEEL. *Resolução ANEEL n. 482, de 17 de abril de 2012*. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 2 set. 2020.

BRASIL. ANEEL. *Resolução ANEEL n. 687, de 24 de novembro de 2015*. Altera a Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 2 set. 2020.

BRASIL. ANEEL. *Resolução ANEEL n. 4786, de 17 de outubro de 2017*. Altera a Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>. Acesso em: 2 set. 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DE ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. MINISTÉRIO DE ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Nota Técnica DEA 19/14: Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos*. Rio de Janeiro: EPE, out. 2014. (Recursos Energéticos). Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20\(Revisada\)\[1\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20(Revisada)[1].pdf). Acesso em: 5 fev. 2023.

CASTILHO, E. L. de; CHAVES, G. S. *Estudo de viabilidade técnico-econômica da implantação de um sistema de energia solar térmica*. 2016. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CREDER, H. *Instalações hidráulicas e sanitárias*. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 1991.



ELETROBRAS. *Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial*: Relatório Técnico. Eletrobras, 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao>. Acesso em: 14 nov. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 5 fev. 2023.

KNOWLES, R. L. The solar envelope: its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings*, Los Angeles, v. 35, n. 1, p. 15-25, 2003.

PÉREZ, D. R. C. *O Envelope solar e o direito ao sol*. 2007. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Construção) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PROCEL INFO. *Equipamentos*. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BB70B5A3C-19EF-499D-B7BC-D6FF3BABE5FA%7D>. Acesso em: 14 nov. 2020.

PRODABEL. Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte. *Cadastro Técnico Municipal*, 2011.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*. Geneva: IPCC, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 8 fev. 2023.

