



ENTAC 2024

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



Influência da Morfologia Urbana no Potencial Solar da Envoltória de Edifícios nZEB

Influence of Urban Morphology on the Solar Potential of nZEB Building Envelopes

Isabella Dias Botelho

Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | isabella.botelho@gmail.com

Lucídio Gomes Avelino Filho

Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | lucidio.arquitetura@gmail.com

Joára Cronemberger Ribeiro Silva

Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | joaracronemberger@unb.br

Caio Frederico e Silva

Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | caiofreds@gmail.com

Resumo

Os Edifícios de Energia Quase Zero (nZEBs) emergem como uma abordagem promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa causadas pelo elevado consumo energético do setor. Neste contexto, a geração de energia fotovoltaica integrada na envoltória das edificações se apresenta como uma das estratégias-chave para alcançar a meta dos nZEBs. Este estudo investiga como a morfologia urbana afeta a disponibilidade solar em um modelo hipotético de edifício de escritórios situado em três diferentes cidades: Belém, Brasília e Porto Alegre. Por meio de simulações computacionais parametrizadas, a métrica urbanística da relação entre a altura dos edifícios e a largura entre eles foi examinada para avaliar o impacto do entorno no potencial solar de dispositivos de proteção solar (PVSD) em fachadas. Os resultados revelam que a configuração urbana, representada pela Razão H/W, tem um efeito significativo na eficiência energética e na produção de energia solar em fachadas, apresentando forte relação com o potencial de alcançar a meta nZEB. Por fim, a análise destaca a importância do planejamento urbano na maximização da geração local de energia solar.

Palavras-chave: Morfologia Urbana. Razão H/W. Edifícios de Energia Quase Zero (nZEB). Integração fotovoltaica em edificações (BIPV). Dispositivo de sombreamento fotovoltaico (PVSD).

Abstract

Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs) emerge as a promising approach to reducing greenhouse gas emissions caused by the high energy consumption of the sector. In this context, the integration of photovoltaic energy generation into building envelopes is presented as one of the key strategies to achieve the nZEBs goal. This study investigates how urban morphology affects solar availability in a hypothetical office building model situated in three different cities: Belém, Brasília, and Porto Alegre. Through parameterized computer simulations, the urban metric of



Como citar:

BOTELHO, i. d. et. al. Influência da Morfologia Urbana no Potencial Solar da Envoltória de Edifícios nZEB. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2024.

the ratio between building height and the width between them was examined to evaluate the impact of the surroundings on the solar potential of solar protection devices (PVSD) on façades. The results reveal that the urban configuration, represented by the H/W Ratio, has a significant effect on energy efficiency and solar energy production on façades, showing a strong relationship with the potential to achieve the nZEB goal. Finally, the analysis highlights the importance of urban planning in maximizing local solar energy generation.

Keywords: Urban Morphology. H/W Ratio. Nearly Zero Energy Building (nZEB). Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Photovoltaic Integrated Shading Devices (PVSD).

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a busca por soluções energéticas sustentáveis que minimizem a emissão de gases de efeito estufa. Neste cenário, os Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo (nZEBs) se destacam como uma resposta promissora para o setor da construção civil, que está entre os principais consumidores da energia global, sendo responsáveis por 40% do consumo total da energia primária [1].

Os nZEBs são edifícios projetados com o objetivo de maximizar a eficiência energética, de modo que a sua baixa demanda de energia possa ser integralmente ou quase totalmente suprida a partir da produção local de energia renovável. Desta forma, o balanço final entre o consumo e geração de energia pelo edifício é zero ou quase zero. Entretanto, ainda não há uma definição internacionalmente acordada sobre o conceito de nZEBs e tampouco uma metodologia unificada para avaliá-los [2], [3].

No Brasil, este conceito foi delineado pela primeira vez em 2022, a partir da publicação da Instrução Normativa do Inmetro para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), que atualizou o método brasileiro de etiquetagem de edificações. Essa normativa define que uma Edificação de Energia Quase Zero (nZEB) deve obter a classificação “A” de eficiência energética, e ter ao menos 50% de sua demanda energética anual suprida por energia renovável gerada localmente [4].

A concepção de um edifício nZEB perpassa por adotar estratégias adaptadas ao clima local para reduzir ao máximo a demanda energética. Ao analisar 34 casos de edifícios nZEBs em climas quentes e úmidos ao redor do mundo, o estudo de [3], sintetizou as principais estratégias de projeto implementadas para maximizar o desempenho energético. A maioria das estratégias apontadas correspondem a soluções arquitetônicas passivas, tais como: otimização das propriedades térmicas da envoltória, ventilação natural, redução do percentual de envidraçamento nas fachadas (PAF), adoção de dispositivos de proteção solar e vidros com baixo fator solar. Dentre as estratégias ativas de maior potencial, a pesquisa destaca os sistemas de climatização e iluminação energeticamente eficientes. [3].

Aliada aos objetivos nZEBs, a tecnologia fotovoltaica vem sendo frequentemente explorada, tanto pela redução dos custos decorrente dos avanços tecnológicos do setor, como também devido à sua adaptabilidade e elevado potencial de integração em diversas superfícies urbanas.

A evolução tecnologia dos módulos fotovoltaicos permitiu a integração desses sistemas às edificações para também cumprir funções arquitetônicas, substituindo partes do edifício como fachada, janelas, proteções solares e cobertura. Esses sistemas, denominados BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*), emergem como componentes inovadores, tornando-se uma estratégia eficaz para atingir os padrões dos nZEBs [5],[6].

Embora a disponibilidade solar nas coberturas das edificações frequentemente resulte em uma geração de energia mais favorável que em fachadas [7], a geração exclusiva nas coberturas tem se mostrado insuficiente para atingir as metas de nZEBs [8],[9]. As proteções solares, implementadas como solução para mitigar o superaquecimento dos ambientes internos, oferecem oportunidades de incorporação das tecnologias fotovoltaicas, transformando-as em sistemas multifuncionais que também geram energia. Uma vantagem desses sistemas integrados é a capacidade de ajustar o ângulo de inclinação para maximizar a eficiência na produção elétrica, adaptando-se à localização geográfica do edifício, à intensidade da radiação solar e às variações ao longo do dia [5].

No entanto, a efetividade desses sistemas está intrinsecamente ligada à disponibilidade de radiação solar. A localização geográfica, especificamente a latitude, e a morfologia urbana têm um papel significativo neste potencial solar, influenciando diretamente tanto no consumo quanto na geração de energia dos edifícios [5].

Em áreas urbanas densamente construídas ou com configurações urbanas que limitam a exposição ao sol, como ruas estreitas ladeadas por edifícios altos, os edifícios podem sombrear uns aos outros, limitando a capacidade de suas fachadas captarem energia solar. A métrica da razão altura/largura (H/W), também chamada de Razão de Aspecto, é frequentemente utilizada em estudos sobre a forma urbana, para avaliar seu impacto tanto no consumo de energia quanto no potencial solar [10].

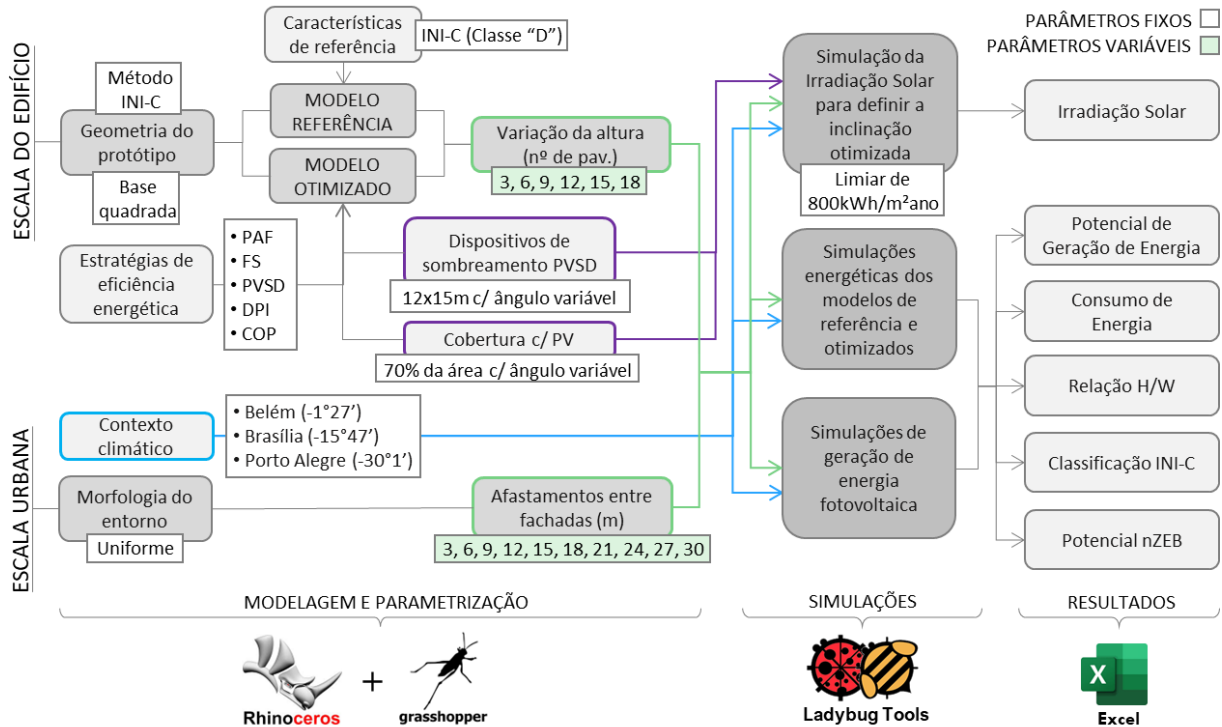
Há uma dualidade no comportamento urbano em relação à Razão H/W no que concerne à disponibilidade solar. Enquanto o sombreamento proporcionado por uma alta razão H/W é benéfico para a redução do consumo energético, ele simultaneamente reduz a disponibilidade solar, prejudicando a geração de energia fotovoltaica em áreas urbanas.

Este paradoxo constitui o foco desta pesquisa, que busca investigar a influência da razão H/W por meio da análise de indicadores que tratam do consumo e geração de energia de forma integrada. Assim, esta pesquisa apresenta uma investigação sobre a relação da morfologia urbana no potencial de geração de energia em dispositivos de sombreamento (PVSD) e no consumo de energia dos edifícios, com o objetivo de alcançar a meta nZEB, em um contexto urbano hipotético uniforme, considerando três diferentes condições climáticas em latitudes distintas.

MÉTODO

Para conduzir as análises de simulação energética, de irradiação solar e de geração de energia fotovoltaica, foram estabelecidas duas escalas de abordagem: escala do edifício e a escala urbana. O método se apresenta resumidamente na Figura 1.

Figura 1: Resumo do método



Fonte: Autores.

FERRAMENTAS DE ANÁLISE

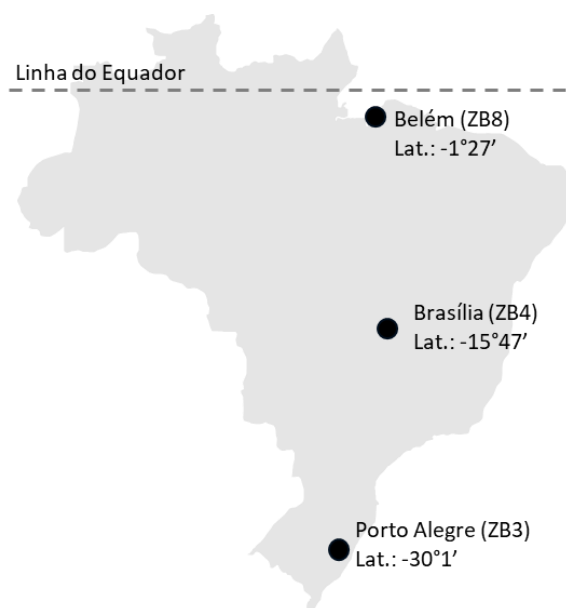
O modelo base foi desenvolvido de forma parametrizada utilizando as ferramentas do Grasshopper, integradas ao software de modelagem Rhinoceros 7. As simulações energéticas foram realizadas com o uso das ferramentas do Honeybee, que operam com o motor de cálculo EnergyPlus. A análise de irradiação foi efetuada com as ferramentas do Ladybug, que utiliza funções do Radiance. Para o cálculo da geração de energia fotovoltaica, também foram utilizados componentes do Honeybee, recém-disponibilizados em março de 2024. Os resultados obtidos foram registrados utilizando-se o componente Data Recorder do Grasshopper e em seguida planilhados em Excel para análise e elaboração dos gráficos.

CONTEXTO CLIMÁTICO

Para contemplar a diversidade climática e a grande extensão territorial do Brasil, a análise foi realizada considerando três cidades, Belém, Brasília e Porto Alegre (Figura 2), selecionadas por estarem situadas em diferentes zonas bioclimáticas, ZB 8, ZB 4 e ZB 3, respectivamente, e por representarem, em termos de latitude, os extremos norte (-1°27') e sul (-30°1'), e a região central do país (-15°47'). Foram adotados os arquivos

climáticos (EPW) oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), conforme recomendação da INI-C.

Figura 2: Mapa com a localização das cidades avaliadas



Fonte: Autores.

GEOMETRIA DO EDIFÍCIO

Na escala do edifício, foi definido o uso da edificação como sendo escritório, caracterizado pela significativa geração de calor interno, o que resulta em um elevado consumo energético. Além disso, a relativa padronização de uso dessa tipologia, que possui horários e dias de operação bem definidos, contribui para obtenção de resultados mais consistentes na pesquisa.

Para determinar o consumo de energia das edificações geradas a partir do modelo base, foi adotado o método de simulação estabelecido na Instrução Normativa Inmetro para edificações comerciais, de serviços e públicas (INI-C). De acordo com a INI-C, a classificação de eficiência energética é realizada pela comparação entre o consumo energético da edificação proposta com a mesma edificação em uma condição de referência, equivalente à classificação “D” [4].

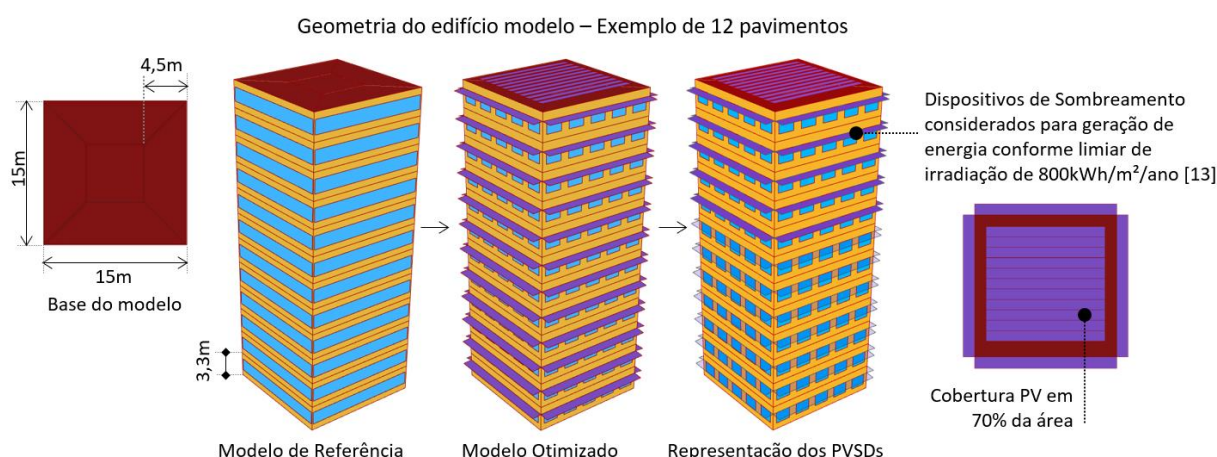
Definiu-se como objeto de análise um modelo de geometria regular, sem compartimentação interna, com medidas de fachadas iguais, resultando em uma base quadrada, para garantir a comparabilidade na análise das quatro orientações (Figura 3). Quanto às dimensões, a altura de piso a piso foi estabelecida de 3,30m, enquanto a base foi fixada em 15mx15m, cuja profundidade é considerada satisfatória para permitir uma iluminação natural adequada nos ambientes internos. A altura do edifício foi parametrizada de acordo com o número de pavimentos, o qual corresponde a um dos parâmetros variáveis da análise. A Tabela 1 apresenta as configurações gerais dos principais parâmetros aplicados em cada caso.

Tabela 1: Resumo dos parâmetros de entrada

| Parâmetros | Modelo de Referência | Modelo Otimizado |
|---|-----------------------|---------------------------|
| | Classe "D" [4] | Meta "A" |
| ESTRATÉGIAS PASSIVAS | | |
| PAF - Percentual de área de abertura na fachada (%) | 50% | 30% [11] |
| Parede | | |
| Argamassa interna e externa (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9 cm) | | |
| Upar - Transmitância da parede externa (W/(m².K)) | | 2,39 |
| αpar - Absortância da parede | | 0,5 |
| CTpar - Capacidade térmica da parede externa (kJ/(m².K)) | | 150 |
| Cobertura | | |
| Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm) | | |
| Ucob - Transmitância da cobertura (W/(m².K)) | | 2,06 |
| αcob - Absortância da cobertura | | 0,8 |
| CTcob - Capacidade térmica da cobertura (kJ/(m².K)) | | 233 |
| Vidro (simples incolor) | | |
| FS – Fator solar do vidro | 0,82 | 0,43 |
| Uvid - Transmitância do vidro (W/(m².K)) | 5,7 | 5,6 |
| Dispositivos de Proteção Solar PVSD | Não há | Brise horizontal |
| Medidas | | 1,20m x 15m |
| Inclinação | | Variável |
| Módulos PV na cobertura | Não há | 70% da área |
| Inclinação | | Variável |
| ESTRATÉGIAS ATIVAS | | |
| DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m²) | 14,1 | 8,5 nível "A" [4] |
| DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m²) | | 15 |
| COP - Coeficiente de performance (W/W) | 2,6 | VRF nível "A"* [4] |
| *variável conforme a capacidade do sistema, tomando como referência condicionadores de ar do tipo VRF com condensação a ar. | | |
| Temperatura setpoint (°C) | | 24 |
| Cronogramas de operação | | |
| Ocupação (m²/pessoa) | | 10 |
| Horas de ocupação (horas) | | 10 |
| Dias de ocupação (N ano) | | 260 |
| Infiltração por área de fachada (m³/s) - <i>Default leaky building</i> | | 0,0006 |
| Taxa de ventilação por pessoa (m³/s) | | 0,0075 [16] |
| Geração de Energia Fotovoltaica | | |
| | Não há | Monocristalino |
| Eficiência | | 0,20 |
| Fração da área aplicada | | 0,90 |
| Eficiência inversor - <i>Default 96%</i> | | 0,96 |
| Fator de conversão DC para AC - <i>Default 1,1</i> | | 1,10 |
| Edifícios do entorno | | |
| Altura e afastamentos uniformes | Mesmo contexto urbano | |
| Refletância do material | | 0,5 |

Fonte: Autores.

Figura 3: Representação da geometria do modelo



Fonte: Autores.

ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Com base nos estudos de [3], [11] e [12], foram definidas as estratégias de aprimoramento energético para o modelo otimizado. Optou-se por aplicar um conjunto uniforme de estratégias passivas e ativas nas três cidades avaliadas, a fim de comparar a eficácia das soluções adotadas para alcançar a classificação “A” nas diferentes condições climáticas. A Tabela 1 apresenta os parâmetros detalhados adotados para o modelo de referência e o modelo otimizado.

Para bloquear a incidência de radiação solar direta nas aberturas e ao mesmo tempo produzir energia renovável, foram propostos dispositivos de proteção solar externo horizontal associados a sistemas de geração fotovoltaica (PVSD). Com a finalidade de maximizar os benefícios da redução do ganho de calor e da produção de energia, essa solução foi considerada aplicada em todas as fachadas e em todos os pavimentos. Para estabelecer o ângulo ótimo do anteparo, foi conduzida uma análise da irradiação solar, considerando as superfícies efetivas para produção de energia aquelas que recebem valores anuais de irradiação iguais ou superiores a 800 kWh/m² [13].

MORFOLOGIA DO ENTORNO

Para avaliar a influência da morfologia urbana no potencial de geração de energia dos dispositivos de sombreamento (PVSD) e no alcance da meta nZEB, foi proposto um cenário hipotético de um quarteirão urbano configurado como uma malha uniforme, composta por 25 edifícios com dimensões em planta e altura equivalentes ao edifício modelo.

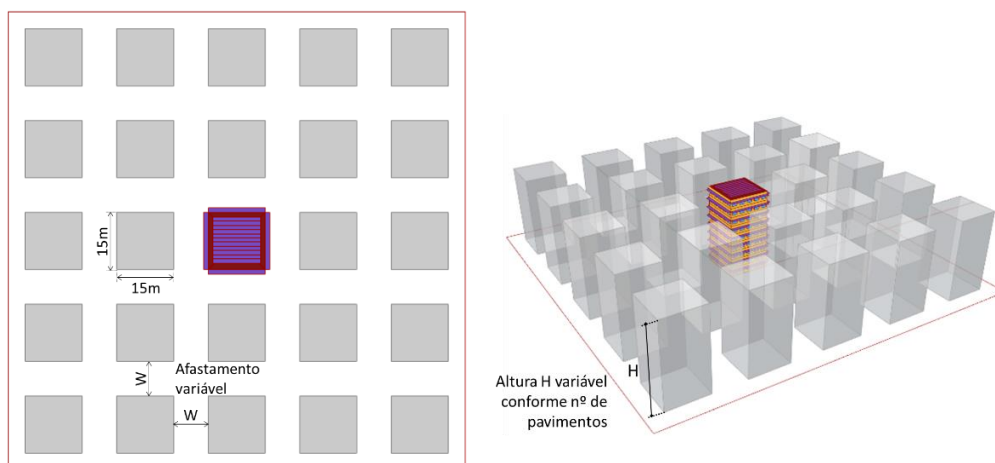
Conforme apontado nos estudos de [14] e [15], a Razão de Aspecto (H/W), definida como a relação entre a altura do edifício e a largura entre eles, representa um dos parâmetros morfológicos urbanos mais relevantes para avaliar o potencial solar para produção de energia e a economia de energia.

Nesta investigação, o afastamento entre os edifícios (Figura 4) foi parametrizado, variando de 3 a 30 metros, em intervalos de 3 metros, totalizando 10 possibilidades. Esta escolha foi feita a despeito de boas práticas ou códigos urbanos, a fim de compor

uma amostra uniforme e permitir uma melhor avaliação da sensibilidade de cada variável nos resultados.

Considerando que a altura do edifício modelo foi parametrizada variando de 3 a 18 pavimentos, também em intervalos de 3 metros, totalizando 6 possibilidades, a análise compreendeu uma amostra de 60 cenários para cada cidade avaliada, totalizando, portanto, 180 cenários.

Figura 4: Representação da geometria do quarteirão urbano e os parâmetros variáveis



Fonte: autores.

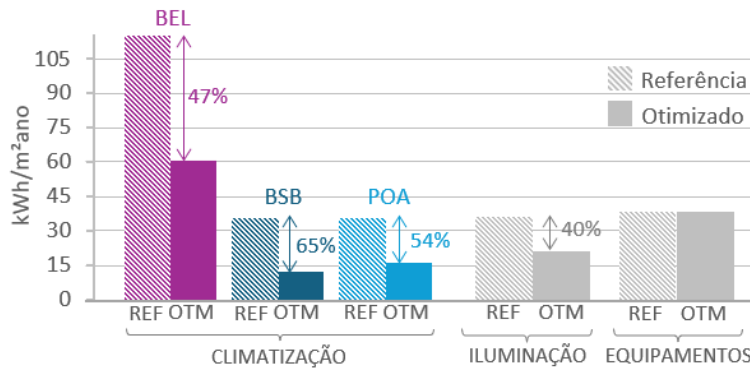
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Partindo de uma análise dos consumos de energia separados por uso, as simulações energéticas demonstraram que as estratégias de otimização da eficiência energética resultaram em uma média de redução do consumo para climatização de 47% em Belém (BEL), 65% em Brasília (BSB) e 54% em Porto Alegre (POA), em relação ao modelo de referência. Quanto ao consumo de iluminação, este foi reduzido em 40%.

Porém, em termos absolutos, as estratégias de otimização representaram uma redução média do consumo para climatização de 54kWh/m²ano em Belém, 23kWh/m²ano em Brasília e 19kWh/m²ano em Porto Alegre (Figura 6). Portanto, apesar dos percentuais relativos indicarem uma maior redução do consumo em Brasília e Porto Alegre, a redução do consumo para climatização em Belém, em números absolutos, foi mais significativa, sendo quase três vezes maior que a redução alcançada em Porto Alegre.

Ao analisar os consumos totais, isto é, climatização, iluminação e equipamentos agregados, a Redução do Consumo de Energia Primária em relação ao modelo de referência (RED_{cep}), calculada conforme a metodologia INI-C para todos os 180 cenários, revela que o conjunto de estratégias de otimização adotados na investigação obteve os melhores resultados para Belém, seguido por Brasília e Porto Alegre, respectivamente (Figura 7).

Figura 6: Média dos consumos de energia do Modelo de Referência x Modelo Otimizado



Fonte: Autores.

Figura 7: Redução do Consumo de Energia Primária em relação ao modelo de referência (RED_{cep}) [%], conforme metodologia INI-C

| Belém (BEL) Lat: -1°27' | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3 | 38,8% | 39,8% | 39,1% | 39,2% | 39,4% | 39,4% | 39,5% | 39,6% | 39,5% | 39,6% |
| 6 | 32,8% | 34,4% | 35,2% | 35,7% | 35,9% | 36,1% | 36,2% | 36,4% | 36,4% | 36,5% |
| 9 | 31,5% | 33,0% | 34,0% | 34,7% | 35,1% | 35,4% | 35,6% | 35,9% | 36,0% | 36,1% |
| 12 | 30,8% | 32,1% | 33,1% | 34,0% | 34,3% | 34,9% | 35,1% | 35,5% | 35,6% | 35,9% |
| 15 | 30,3% | 31,6% | 32,6% | 33,2% | 33,7% | 34,6% | 34,8% | 35,2% | 35,3% | 35,6% |
| 18 | 30,0% | 31,2% | 32,0% | 32,8% | 33,3% | 34,0% | 34,3% | 34,7% | 34,9% | 35,3% |
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |

| Brasília (BSB) Lat: -15°47' | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3 | 32,2% | 34,5% | 35,4% | 35,9% | 36,1% | 36,3% | 36,6% | 36,7% | 36,7% | 36,8% |
| 6 | 29,0% | 31,7% | 33,5% | 33,9% | 34,5% | 34,9% | 35,3% | 35,6% | 35,7% | 35,8% |
| 9 | 26,8% | 29,2% | 31,1% | 32,4% | 33,4% | 34,2% | 34,7% | 35,1% | 35,3% | 35,5% |
| 12 | 25,9% | 28,0% | 29,8% | 31,3% | 32,4% | 33,2% | 33,9% | 34,5% | 34,8% | 35,2% |
| 15 | 25,3% | 27,2% | 28,8% | 30,3% | 31,5% | 32,4% | 33,2% | 33,9% | 34,3% | 34,7% |
| 18 | 24,9% | 26,6% | 28,1% | 29,6% | 30,7% | 31,7% | 32,6% | 33,3% | 33,8% | 34,2% |
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |

| Porto Alegre (POA) Lat: -30°1' | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3 | 29,5% | 31,0% | 31,7% | 32,1% | 32,2% | 32,4% | 32,6% | 32,7% | 32,7% | 32,8% |
| 6 | 26,0% | 27,8% | 29,0% | 29,8% | 30,3% | 30,7% | 31,0% | 31,2% | 31,3% | 31,4% |
| 9 | 24,8% | 26,5% | 27,8% | 28,7% | 29,4% | 30,0% | 30,4% | 30,8% | 30,9% | 31,1% |
| 12 | 24,1% | 25,6% | 26,9% | 27,9% | 28,7% | 29,3% | 29,8% | 30,3% | 30,5% | 30,8% |
| 15 | 23,6% | 25,0% | 26,2% | 27,2% | 28,1% | 28,8% | 29,3% | 29,8% | 30,0% | 30,4% |
| 18 | 23,3% | 24,6% | 25,7% | 26,7% | 27,5% | 28,3% | 28,9% | 29,4% | 29,7% | 30,1% |
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |

Afastamento entre edifícios (m)

Fonte: Autores.

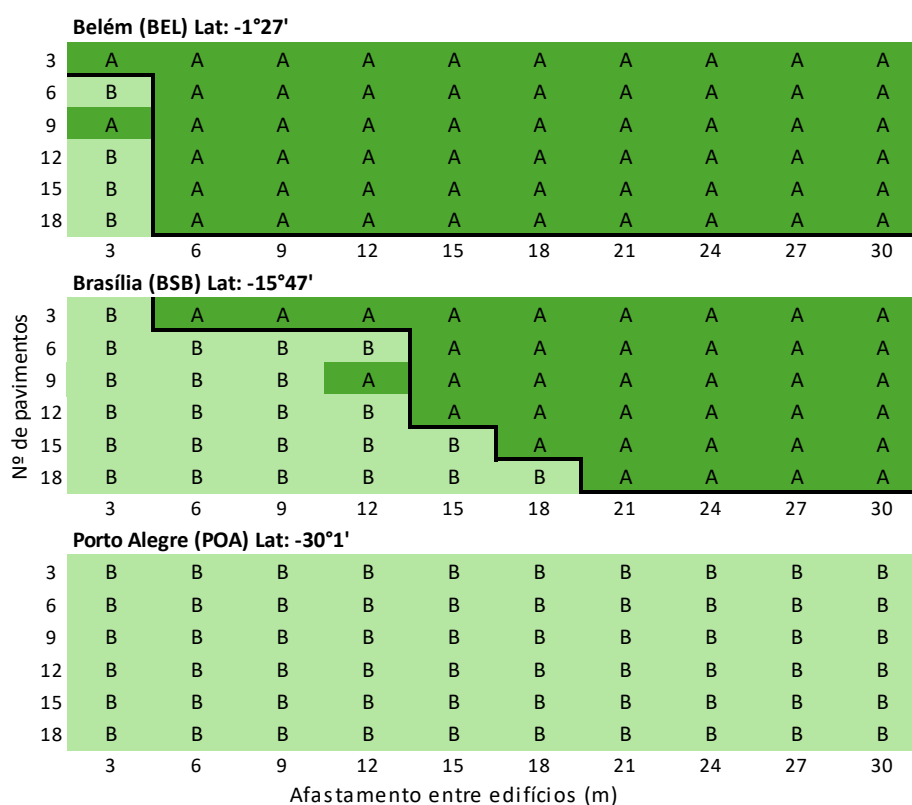
Essa conjuntura refletiu nos resultados da análise quanto a Classificação de Eficiência Energética INI-C. As soluções de otimização foram insuficientes para alcançar a classificação "A" em 100% dos cenários em Porto Alegre, em 38% dos cenários em Brasília e em apenas 7% dos cenários em Belém (Figura 8).

Para melhor compreender a influência da morfologia urbana na RED_{cep}, esta variável dependente foi analisada em função da Razão de Aspecto, ou Razão H/W, considerada como a variável independente, conforme representado na Figura 9. Este gráfico revela uma relação consistente entre essas variáveis para todas as cidades avaliadas. Observa-se que, conforme a Razão H/W aumenta, a RED_{cep} tende a diminuir.

Essa tendência é modelada por equações de potência ajustadas para cada cidade, a fim de auxiliar na previsão de como a Razão H/W pode afetar a RED_{cep}. Para Belém, a equação de potência ajustada apresenta um coeficiente de determinação de R²=0,8294. Em Brasília, a equação de potência possui um R²=0,9064, demonstrando uma forte correlação. Porto Alegre apresenta a maior correlação, com R²=0,9413. Estes resultados corroboram a hipótese de que a morfologia urbana, representada neste estudo pela Razão H/W, é um fator relevante na eficiência energética das edificações.

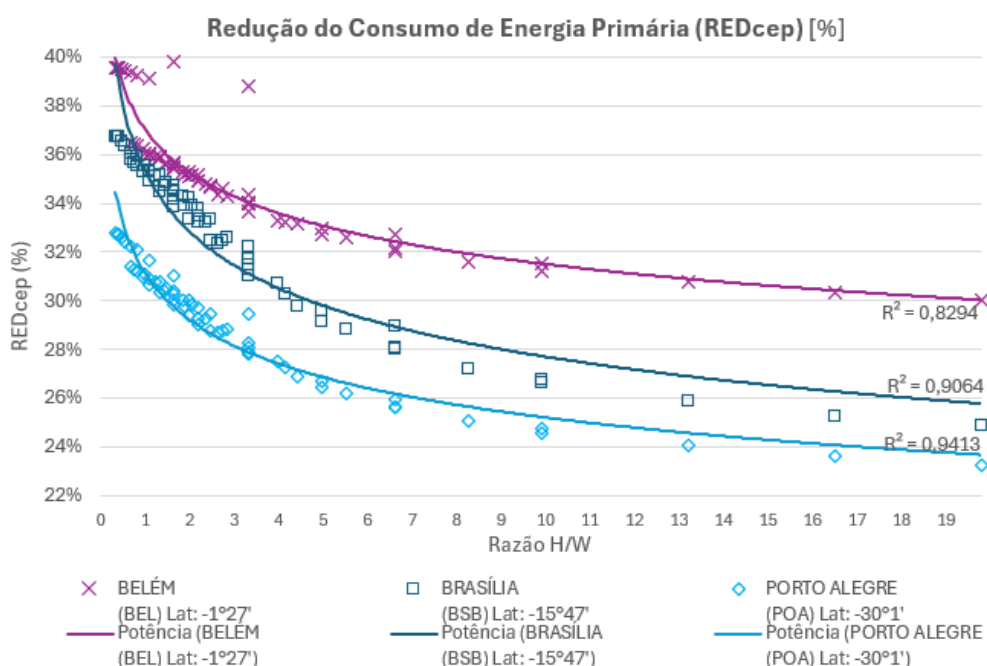
Para alcançar a meta nZEB, conforme definido pela INI-C [5], ao menos 50% do consumo de energia primária da edificação deve ser compensado pela produção de energia renovável in loco. Esta classificação somente é atingida quando o edifício alcança a eficiência energética de nível "A". Portanto, esta meta não seria possível para os 86 casos em que se obteve a classificação "B". No entanto, para o escopo desta pesquisa, o Potencial de Geração de Energia e a respectiva qualificação na meta nZEB serão avaliados desconsiderando essa restrição.

Figura 8: Classificação de Eficiência Energética INI-C



Fonte: Autores.

Figura 9: Relação da Razão H/W (Razão de Aspecto) com a Redução do Consumo de Energia Primária (RED_{cep})

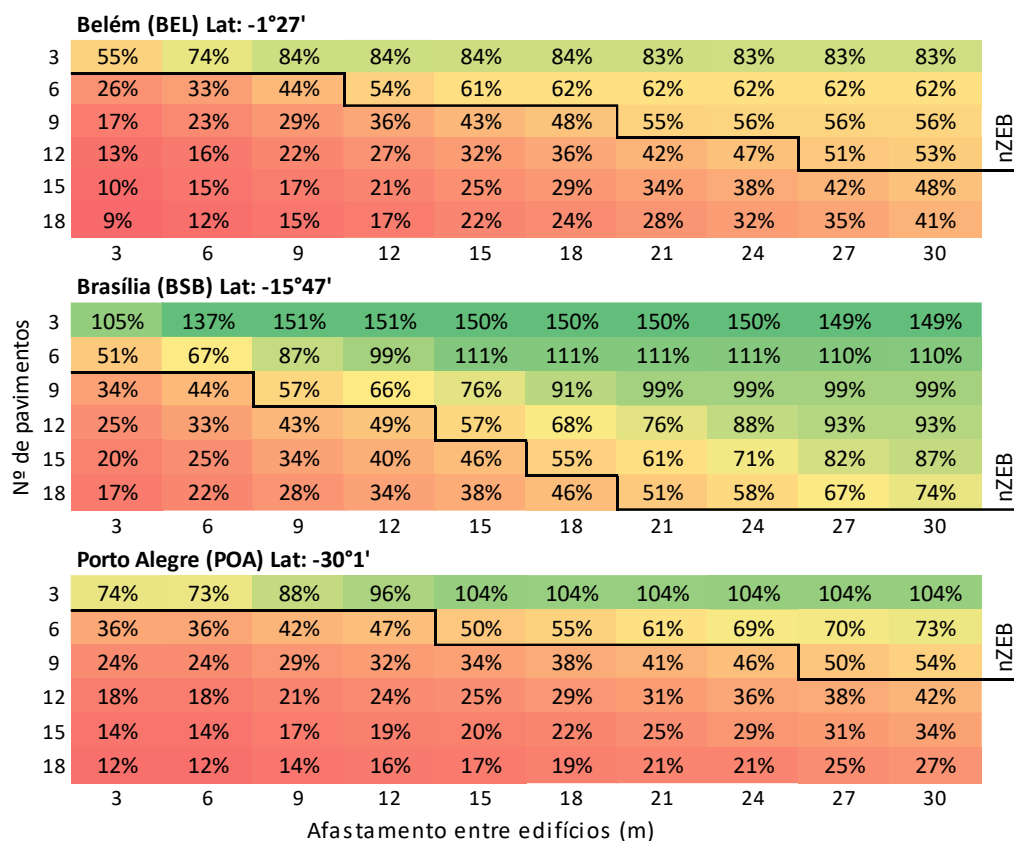


Fonte: Autores.

A Figura 10 apresenta os resultados do Potencial de Geração de Energia (PG) para todos os cenários simulados nas três cidades investigadas. Comparativamente, observa-se que Brasília apresentou o maior PG, atingindo a meta nZEB em 72% dos casos, inclusive superando o balanço energético nulo em 27% dos casos, os quais obtiveram a classificação EEP (Edifício de Energia Positiva) (Figura 11). Esse excelente desempenho é atribuído ao baixo consumo de energia combinado com a elevada irradiação solar global anual nesta cidade. Em Belém, apesar de ter sido alcançada uma maior redução no consumo energético, os altos valores absolutos de consumo representam um desafio maior para atingir a meta nZEB. Ainda assim, os resultados de Belém foram mais favoráveis em comparação a Porto Alegre, devido à maior disponibilidade solar. Não obstante, em Belém, o balanço energético zero não foi superado em nenhum cenário. Enquanto em Porto Alegre, esta marca foi superada em 10% dos casos. Cabe destacar que, em Porto Alegre, os baixos PGs encontrados refletem também a menor otimização do modelo, que resultou em classificação “B” em todos os cenários. As variações observadas nos resultados sugerem que poderia ser pertinente a INI-C considerar percentuais de cobertura do consumo de energia na classificação nZEB diferentes para cada cidade, de modo a refletir as diversidades climáticas nacionais.

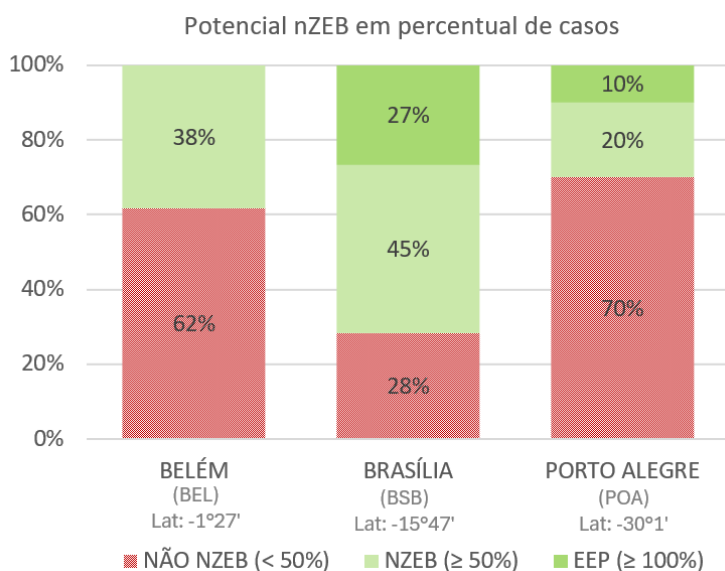
Conforme a Figura 12, em todas as cidades, o modelo de edificação com três pavimentos atinge a meta nZEB em todos os cenários de afastamento entre edifícios analisados. À medida que o número de pavimentos aumenta, torna-se mais desafiador alcançar a meta nZEB. Contudo, observa-se que o aumento no afastamento entre os edifícios favorece o cumprimento desse objetivo, demonstrando a influência positiva deste parâmetro urbanístico (Figura 12).

Figura 10: Potencial de Geração de Energia (PG) [%], conforme metodologia INI-C



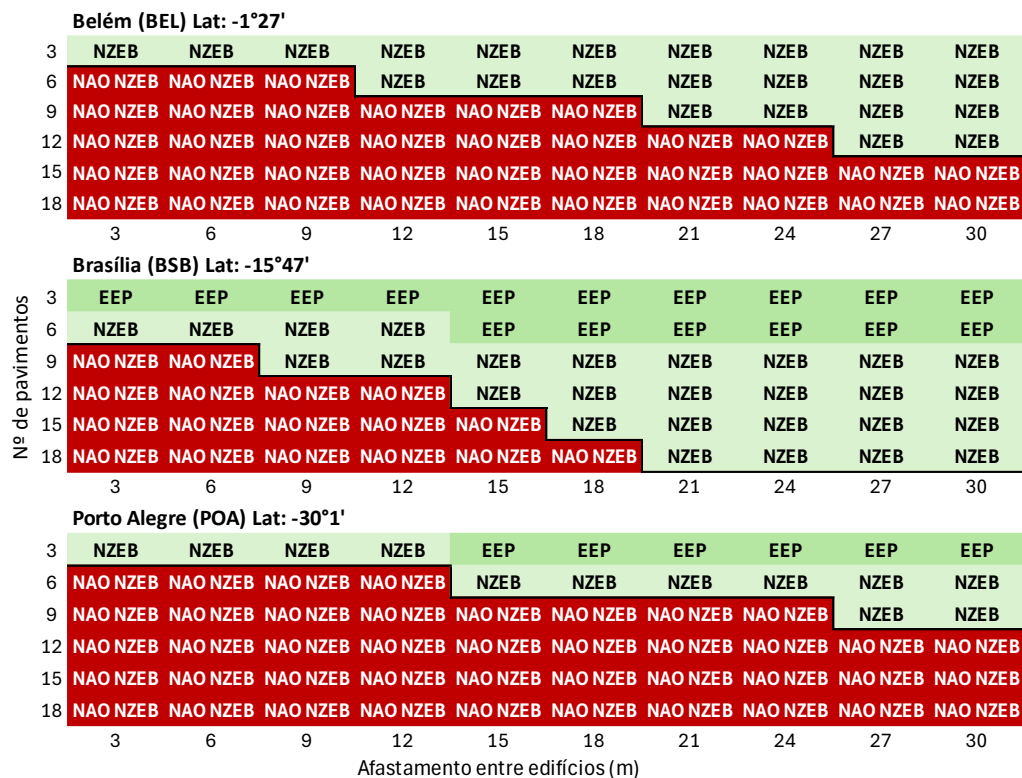
Fonte: Autores.

Figura 11: Meta nZEB - Classificação conforme balanço energético INI-C



Fonte: Autores.

Figura 12: Meta nZEB - Classificação conforme balanço energético INI-C

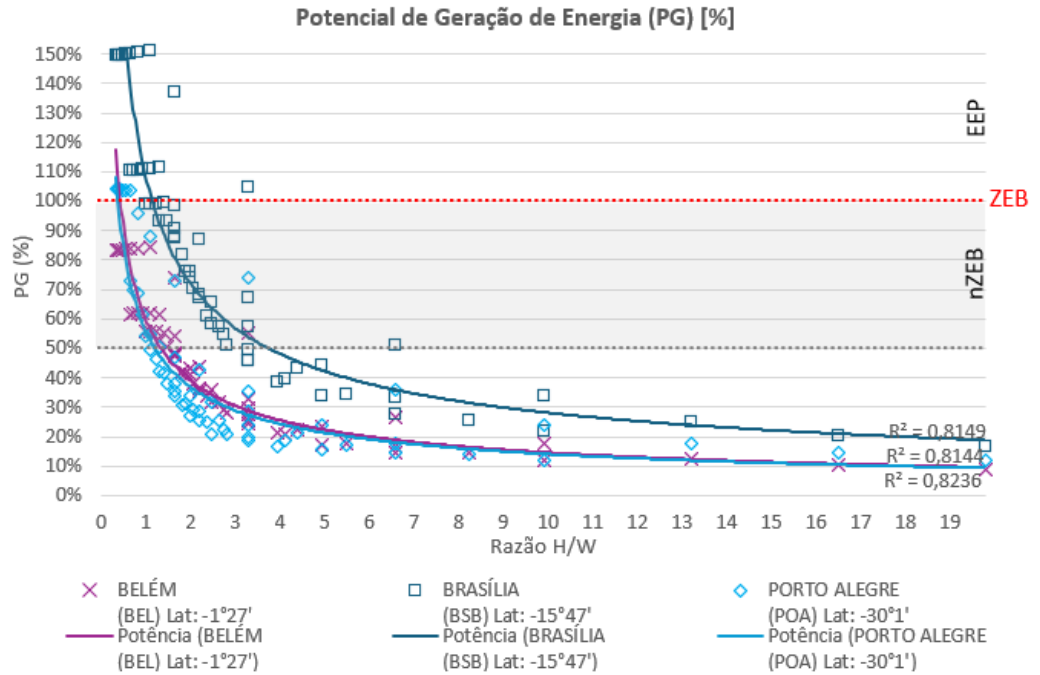


Fonte: Autores.

Para melhor compreender a influência da morfologia urbana no PG, esta variável foi analisada em função da Razão de Aspecto(H/W), (Figura 13). Observa-se que, à medida que a Razão H/W aumenta, o PG diminui significativamente para todas as cidades, indicando que edificações altas com menor afastamento entre edifícios (maior H/W) são menos eficientes em termos de geração de energia. Esta tendência é modelada por equações de potência ajustadas para cada cidade, a fim de auxiliar na previsão de como a Razão H/W pode afetar a PG. Para Belém, a equação de potência ajustada apresenta um coeficiente de determinação de $R^2=0,8236$. Em Brasília apresenta um ajuste com $R^2=0,8149$. Em Porto Alegre, com um $R^2=0,8144$, demonstra uma correlação similar. As linhas de referência horizontais marcam as metas nZEB (edifício de energia quase zero), ZEB (edifício de energia zero), e EEP (edifício de energia positiva). A forte correlação observada nas equações de potência evidencia que a morfologia urbana, representada neste estudo pela Razão H/W, desempenha um papel relevante no potencial de geração de energia em dispositivos de sombreamento em fachadas.

Conforme constatado nas análises anteriores, verifica-se que os menores valores da relação H/W, sinalizados em tons claros na Figura 14, tendem a resultar em cenários mais favoráveis para alcançar a meta nZEB. Excluindo os extremos situados acima da linha de referência, onde os mesmos valores da Razão H/W são encontrados em cenários abaixo dela (“não nZEB”), determinou-se que o limite da Razão H/W recomendado é de até 1,65 para Belém, até 2,83 para Brasília, e até 1,32 para Porto Alegre.

Figura 13: Relação da Razão H/W (Razão de Aspecto) com Potencial de Geração de Energia (PG) [%]



Fonte: Autores.

Figura 14: Razão de Aspecto (Razão H/W) e o Potencial nZEB

Belém (BEL) Lat: -1°27' ----> Valor recomendado para Razão H/W ≤ 1,65

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| 3 | 3,30 | 1,65 | 1,10 | 0,83 | 0,66 | 0,55 | 0,47 | 0,41 | 0,37 | 0,33 | ↑ nZEB |
| 6 | 6,60 | 3,30 | 2,20 | 1,65 | 1,32 | 1,10 | 0,94 | 0,83 | 0,73 | 0,66 | |
| 9 | 9,90 | 4,95 | 3,30 | 2,48 | 1,98 | 1,65 | 1,41 | 1,24 | 1,10 | 0,99 | |
| 12 | 13,20 | 6,60 | 4,40 | 3,30 | 2,64 | 2,20 | 1,89 | 1,65 | 1,47 | 1,32 | |
| 15 | 16,50 | 8,25 | 5,50 | 4,13 | 3,30 | 2,75 | 2,36 | 2,06 | 1,83 | 1,65 | |
| 18 | 19,80 | 9,90 | 6,60 | 4,95 | 3,96 | 3,30 | 2,83 | 2,48 | 2,20 | 1,98 | |

Brasília (BSB) Lat: -15°47' ----> Valor recomendado para Razão H/W ≤ 2,83

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| 3 | 3,30 | 1,65 | 1,10 | 0,83 | 0,66 | 0,55 | 0,47 | 0,41 | 0,37 | 0,33 | ↑ nZEB |
| 6 | 6,60 | 3,30 | 2,20 | 1,65 | 1,32 | 1,10 | 0,94 | 0,83 | 0,73 | 0,66 | |
| 9 | 9,90 | 4,95 | 3,30 | 2,48 | 1,98 | 1,65 | 1,41 | 1,24 | 1,10 | 0,99 | |
| 12 | 13,20 | 6,60 | 4,40 | 3,30 | 2,64 | 2,20 | 1,89 | 1,65 | 1,47 | 1,32 | |
| 15 | 16,50 | 8,25 | 5,50 | 4,13 | 3,30 | 2,75 | 2,36 | 2,06 | 1,83 | 1,65 | |
| 18 | 19,80 | 9,90 | 6,60 | 4,95 | 3,96 | 3,30 | 2,83 | 2,48 | 2,20 | 1,98 | |

Porto Alegre (POA) Lat: -30°1' ----> Valor recomendado para Razão H/W ≤ 1,32

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | |
| 3 | 3,30 | 1,65 | 1,10 | 0,83 | 0,66 | 0,55 | 0,47 | 0,41 | 0,37 | 0,33 | ↑ nZEB |
| 6 | 6,60 | 3,30 | 2,20 | 1,65 | 1,32 | 1,10 | 0,94 | 0,83 | 0,73 | 0,66 | |
| 9 | 9,90 | 4,95 | 3,30 | 2,48 | 1,98 | 1,65 | 1,41 | 1,24 | 1,10 | 0,99 | |
| 12 | 13,20 | 6,60 | 4,40 | 3,30 | 2,64 | 2,20 | 1,89 | 1,65 | 1,47 | 1,32 | |
| 15 | 16,50 | 8,25 | 5,50 | 4,13 | 3,30 | 2,75 | 2,36 | 2,06 | 1,83 | 1,65 | |
| 18 | 19,80 | 9,90 | 6,60 | 4,95 | 3,96 | 3,30 | 2,83 | 2,48 | 2,20 | 1,98 | |

Afastamento entre edifícios (m)

Fonte: Autores.

Conclui-se, portanto, que os valores ótimos da Razão H/W não apresentam uma correlação direta com a latitude. Apesar da elevada disponibilidade solar presente em cidades de baixa latitude, como Belém, estas regiões tendem também a ser mais quentes, resultando em um consumo energético de climatização mais elevado. Consequentemente, o potencial para alcançar a meta nZEB é reduzido devido à alta demanda energética, refletindo na necessidade de menores valores de Razão H/W para atingir a meta. Brasília apresentou um intervalo maior de Razão H/W por combinar um clima ameno e uma elevada disponibilidade de irradiação solar. Por sua vez, Porto Alegre revelou-se o cenário mais desfavorável, porém, com resultados semelhantes a Belém. Embora apresente o consumo de energia mais semelhante a Brasília, a menor disponibilidade solar em Porto Alegre resultou em um desempenho inferior. Faz-se necessário acrescentar a ressalva de que o edifício poderia ser ainda mais otimizado para alcançar melhores resultados.

Entende-se que a análise da correlação entre o Potencial de Geração de Energia (PG) e a Razão H/W é uma abordagem bastante adequada para entender o paradoxo do comportamento urbano em relação à disponibilidade solar, pois esse parâmetro integra tanto o consumo quanto a geração de energia em uma única métrica, permitindo que ambos os indicadores sejam avaliados de forma concomitante, ao invés de maneira isolada.

CONCLUSÕES

Os resultados indicam que a morfologia urbana, representada neste estudo pela Razão H/W, tem um impacto significativo no potencial dos edifícios alcançarem a meta nZEB. Edificações com menor Razão H/W, ou seja, edifícios mais baixos com afastamentos maiores entre edifícios, tendem a apresentar melhores resultados em termos de eficiência energética e geração de energia solar. Esse comportamento foi confirmado pelas equações de potência ajustadas para cada cidade, que mostraram uma forte correlação entre a Razão H/W, a Redução do Consumo de Energia Primária (REDcep) e o Potencial de Geração de Energia (PG).

Conclui-se que os valores ótimos da Razão H/W não possuem uma correlação direta com a latitude. Cidades de baixa latitude, como Belém, possuem alta disponibilidade solar, mas apresentam um maior consumo de climatização, resultando em um limite máximo da Razão H/W de 1,65 para alcançar a meta nZEB. Brasília, com seu clima ameno e alta irradiação solar, apresentou um limite maior, de 2,83. Porto Alegre, embora apresente consumos mais semelhantes a Brasília, a menor disponibilidade solar provocou resultados semelhantes a Belém, com um limite da Razão H/W de 1,32.

Recomenda-se que futuras pesquisas considerem um quarteirão heterogêneo para refletir a diversidade dos cenários urbanos e a inclusão de soluções complementares de eficiência energética para alcançar a classificação “A” em diferentes cenários. Também é pertinente avaliar o impacto dos dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD) na iluminação natural e na qualidade da integração arquitetônica sob aspectos estéticos, os quais não foram avaliados.

Compreender a influência das variáveis urbanísticas na demanda energética e no potencial solar dos edifícios é crucial para apoiar decisões de planejamento urbano rumo ao nZEB, especialmente nas etapas preliminares de projeto.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] GLOBAL ABC (Global Alliance for Buildings and Construction). Relatório de situação Global 2020 para Edifícios e Construção. ONU, 2020.
- [2] D’AGOSTINO, Delia; MAZZARELLA, Livio. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 21, p. 200–212, jan. 2019. ISSN 23527102. DOI 10.1016/j.jobeb.2018.10.019.
- [3] FENG, Wei ... LAU, Stephen Siu Yu. A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 114, p. 109303, 1 out. 2019. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2019.109303.
- [4] BRASIL. Portaria INMETRO Nº 309, de 15 de agosto de 2022. Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 ago. 2022. Seção 1, p. 45. Anexo I.
- [5] FREITAS, Sara; BRITO, Miguel Centeno. Solar façades for future cities. **Renewable Energy Focus**, [s. l.], v. 31, p. 73–79, dez. 2019. ISSN 17550084. DOI 10.1016/j.ref.2019.09.002.
- [6] GHOLAMI, Hassan; NILS RØSTVIK, Harald; STEEMERS, Koen. The Contribution of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) to the Concept of Nearly Zero-Energy Cities in Europe: Potential and Challenges Ahead. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 19, p. 6015, 22 set. 2021. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en14196015.
- [7] CRONEMBERGER, Joára; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; SÁNCHEZ, Sergio Vega. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 55, p. 264–272, dez. 2012. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.08.044.
- [8] DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 27–42, set. 2014. ISSN 1678-8621. DOI 10.1590/S1678-86212014000300003.
- [9] COSTA, João Francisco Walter. Edifícios de balanço energético nulo: um estudo para escritórios em Brasília. [s. l.], p. 329, 2018.
- [10] CZACHURA, Agnieszka; KANTERS, Jouri; GENTILE, Niko; WALL, Maria. Solar Performance Metrics in Urban Planning: A Review and Taxonomy. **Buildings**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 393, 23 mar. 2022. ISSN 2075-5309. DOI 10.3390/buildings12040393.
- [11] COSTA, João Francisco Walter; AMORIM, Claudia Naves David; SILVA, Joára Cronemberger Ribeiro. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 32, p. 101680, nov. 2020. ISSN 23527102. DOI 10.1016/j.jobeb.2020.101680.

- [12] LOHWANITCHAI, Kittisak; JAREEMIT, Daranee. Modeling Energy Efficiency Performance and Cost-Benefit Analysis Achieving Net-Zero Energy Building Design: Case Studies of Three Representative Offices in Thailand. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 5201, 6 maio 2021. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su13095201.
- [13] NATANIAN, Jonathan; LUCA, Francesco De; NABONI, Emanuele. From repetition to diversity: workflow for energy-driven optimization of heterogeneous urban blocks in hot climates, 2022.
- [14] ROSTAMI, Ehsan; NASROLLAHI, Nazanin; KHODAKARAMI, Jamal. A comprehensive study of how urban morphological parameters impact the solar potential, energy consumption and daylight autonomy in canyons and buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 305, p. 113904, fev. 2024. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2024.113904.
- [15] MARTINS, Michele Agra De Lemos. Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. **Solar Energy**, [s. l.], v. 137, p. 11–24, nov. 2016. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2016.07.053.
- [16] BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução nº 09, de 16 de janeiro de 2003. Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, 10 jan. 2003a. Seção 1, n. p. 45-53, 2003.