2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

IMPACTO DO ADENSAMENTO E VERTICALIZAÇÃO NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE FACHADA EM QUADRA NA ÁREA URBANA CENTRAL DE CHAPECÓ SC [1]

BOLSONI, Dyuliana R. (1); GHENO, Greissi K. Z. (2); ZARDO, Isadora Z. (3); PACHECO, Miguel T. G. (4)

(1) Universidade Comunitária da Região de Chapecó, dyuliana@unochapeco.edu.br
(2) Universidade Comunitária da Região de Chapecó, greissigheno@unochapeco.edu.br
(3) Pesquisador Independente, isa_zardo@hotmail.com
(4) Pesquisador Independente, miguelpacheco@outlook.com

RESUMO

A geração fotovoltaica distribuída no Brasil complementa a geração hidrelétrica, aproveitando os índices elevados de irradiação solar e reduzindo perdas de transmissão e distribuição ao gerar energia no ponto de consumo. Coberturas maximizam a geração fotovoltaica, mas edificações verticalizadas apresentam uma área limitada para maior número de andares. As fachadas têm menor eficiência e estão mais sujeitas ao sombreamento, devido aos resultado dos índices urbanísticos, que são mais impactantes em edifícios da mesma quadra. Chapecó-SC é um exemplo do adensamento e verticalização das áreas urbanas centrais, com aumentos sucessivos nos índices na última década. Objetiva-se analisar o impacto dos índices urbanísticos máximos da cidade em uma quadra na Área Urbana Central na geração fotovoltaica de fachada. São feitas simulações, com o EnergyPlus 8.7, de geração mensal dos módulos nas fachadas Norte, Leste e Oeste. A localização na quadra variou a geração fotovoltaica entre 2918 a 1254 kWh/m²/ano. Nos meses com maior sombreamento, os módulos instalados nos andares inferiores contribuem para aproximadamente metade da geração total das fachadas. Contudo módulos fotovoltaicos devem ser instalados em todos os andares e loteamentos devem atentar às orientações azimutais que favoreçam a exposição solar.

Palavras-chave: *Geração fotovoltaica. Geração distribuída. Sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios.*

ABSTRACT

The distributed photovoltaic generation in Brazil complements hydroelectric generation, takes advantage of high levels of solar irradiation and reduces losses in transmission and distribution, allowing generating energy at the point of consumption. Roofs maximize photovoltaic generation, but high rise buildings present a limited area for a greater number of floors. Façade are lower efficiencies and more susceptible to shading, owing urban indexes, which are more impacting on buildings on the same block. Chapecó-SC is an example of the densification and verticalization of central urban areas with successive increases in building codes in the last decade. The objective is to analyze the impact of the maximum urban indexes in the city in a lot in the central urban area in the photovoltaic

[1]BOLSONI, Dyuliana R; GHENO, Greissi K. Z.; ZARDO, Isadora Z.; PACHECO, Miguel T. G.. Impacto intraquadra na geração fotovoltaica de fachada do adensamento e verticalização na Área Urbana Central de Chapecó SC. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

generation of the façade. Simulations are carried out with EnergyPlus 8.7, monthly module generation on the North, East and West façades. The location within the lot affected photovoltaic generation from 2918 to 1254 kWh/m²/year. In the months more shading, the modules installed on lower floors contributed to approximately half of total generation of the facades. However, photovoltaic modules should be installed on all floors and azimuth guidelines must favor solar incidacion in allotments.

***Keywords**: Photovoltaic generation, Distributed generation, Building integrated photovoltaics.*

1 INTRODUÇÃO

A geração distribuída fotovoltaica, é particularmente adequada para o Brasil, por ser contracíclica à geração hidrelétrica, gera energia no ponto de consumo reduzindo perdas com a transmissão e distribuição, e reforça a matriz elétrica nacional (RÜTHER; ZILLES, 2011). O território brasileiro apresenta condições muito favoráveis para a geração fotovoltaica (RÜTHER; ZILLES, 2011) e permite mobilizar capital privado para a descarbonização da matriz energética brasileira (PACHECO; LAMBERTS, 2013).

Nos edifícios, as coberturas apresentam as melhores condições para a instalação de sistemas fotovoltaicos, otimizando os ângulos de incidência da irradiação solar para a geração (em latitudes baixas e médias). Edifícios com pouco andares, como residenciais unifamiliares e galpões não refrigerados, apresentam maior potencial de atender o seu consumo de energia elétrica (GRIFFITH et al., 2007). No entanto, o processo de crescimento das cidades, adensamento e verticalização, substitui edifícios de poucos andares por edificações multifamiliares e comerciais verticalizadas. Chapecó, Santa Catarina, é um exemplo do adensamento acelerado do centro urbano. A população cresceu aproximadamente 20% na última década (2010-2019) (IBGE, 2010, 2020a, 2020b). Como resultado de alterações frequentes no Plano Diretor de Chapecó, o centro da cidade adensou e verticalizou, tornando-se frequentes edifícios com dezenas de andares (MICHALTHUK, 2019).

A verticalização implica na redução da razão da área de cobertura em relação aos andares, mas aumenta a área nas fachada disponível para geração fotovoltaica, mesmo com menores eficiências. Autores têm argumentado pela utilização de módulos fotovoltaicos nas fachadas no território brasileiro (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2017; SANTOS, 2015; SORGATO; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018). O adensamento implica um maior número de edifícios em altura, com menores distâncias entre eles, aumentando o sombreamento e reduzindo ainda mais a geração fotovoltaica nas fachadas. A redução na geração fotovoltaica nas fachadas é máxima em edifícios vizinhos na mesma quadra, pela maior proximidade se comparada com edifícios em quadras diferentes, atingindo o seu ápice nos andares inferiores. É, portanto, necessário pesquisar a relação entre geração acrescida disponível na maiores áreas de fachadas, em oposição às perdas provocadas pelo sombreamento.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar como os índices urbanísticos máximos na Área Urbana Central de Chapecó afetam a geração fotovoltaica de módulos instalados nas fachadas de edifícios da mesma quadra, pelo impacto do adensamento e verticalização.

3 MÉTODO

Este trabalho compara simulações de desempenho da geração fotovoltaica nas fachadas Norte, Leste e Oeste, para analisar os efeitos do sombreamento intraquadra. O método divide-se nas definições do entorno e das simulações.

3.1 Entorno

A área de estudo definida é a quadra 363, destacada em vermelho na figura 1, localizada na cidade de Chapecó, Santa Catarina e pertencente à Área Urbana Central (AUC), unidade territorial definida pelo Plano Diretor de Chapecó. A quadra foi escolhida devido a sua localização e unidade territorial, correspondendo ao centro da cidade, com rápido adensamento e verticalização, por concentrar as principais atividades econômicas do município. De acordo com a base cartográfica do município, a quadra possui doze lotes. Para cada lote, foram definidas volumetrias de edifício de acordo com a maior taxa de ocupação (TO), sendo ela 90% para base e 60% para torre, com coeficiente de aproveitamento (CA) de 10,2, índices definidos pelo Plano Diretor de Chapecó para a AUC. Resultaram assim doze volumetrias com quatro andares de base e dezessete andares de torre (representados na figura 1).

Figura 1 – Planta de situação e índices urbanísticos vigentes na área de estudo conforme Plano Diretor de Chapecó.



Fonte: Mapa Urbano de Base de Chapecó - MUB, 2014. Edição: Autores, 2020.

De acordo com o objetivo da pesquisa de analisar o sombreamento intraquadra, os edifícios em quadras vizinhas não foram considerados, eliminando os efeitos de sombreamentos destes nas simulações.

3.2 Simulação

Para estimar os efeitos do sombreamento na geração fotovoltaica nas fachadas de edifícios intraquadra, dois parâmetros serão avaliados: 1) Os edifícios que apresentam maiores e menores gerações fotovoltaicas anuais, visando determinar como a posição na quadra afeta o desempenho; 2) As diferenças de geração fotovoltaica entre andares da mesma fachada, procurando o ponto de equilíbrio onde a geração fotovoltaica agregada dos pisos inferiores mais se aproxime da geração agregada dos pisos superiores. Nas fachadas Norte, Leste e Oeste das torres nos doze edifícios, foram simulados sistemas fotovoltaicos. Dada a orientação solar desfavorável não foram feitas simulações nas fachadas Sul.

As gerações fotovoltaicas anuais das três fachadas de cada edifício foram divididas pelas suas respectivas áreas de módulos fotovoltaicos, para equalizar a comparação, posteriormente somadas por edifício. Os resultados serão apresentados em valores relativos de geração fotovoltaica por área (kWh/m^2), uma vez que as fachadas dos edifícios têm áreas distintas, ou em valor absoluto (kWh). Em cada fachada são instalados dezessete (um por andar) sistemas fotovoltaicos independentes, localizados a 90º em relação ao solo. Em cada andar, um terço da área das suas fachadas Norte, Leste e Oeste, é dedicado à instalação de módulos fotovoltaicos, criando uma faixa com altura de 1 metro, contando do inicio da laje, e largura respectiva a da fachada, conforme ilustra a figura 2.

Figura 2 – Ilustração da localização dos módulos fotovoltaicos simulados.

Módulos

Fonte: Autores, 2020.

Os modelos tridimensionais dos edifícios foram feitos através do programa Sketchup com o plugin Euclid versão 0.93, que permite exportação para o programa de simulação de desempenho termoenergético EnergyPlus versão 8.7. O Energyplus foi escolhido para simular facilmente os efeitos de uma geometria complexa no sombreamento dos módulos fotovoltaicos. Os edifícios foram todos simulados como zonas de sombra para reduzir tempo de simulação. Para a eficiência do sistema fotovoltaico foi adotado um valor fixo de 12%. O sombreamento foi calculado com o algoritmo *SutherlandHodgman* para o polygon clipping e o *Detailed Sky Diffuse Modeling* para a simulação da luz difusa. O arquivo climático utilizado foi o de Xanxerê, cidade distante 33 Km com clima similar a Chapecó, que não possui arquivo climático no formato epw para simulação em EnergyPlus.

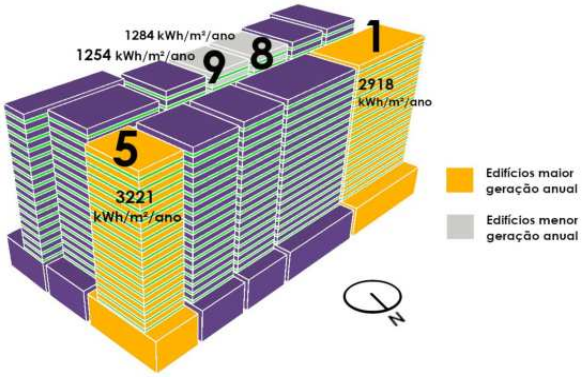
4 RESULTADOS

4.1 Geração fotovoltaica nas fachadas por orientação solar

A figura 3 apresenta os edifícios com maior e menor geração fotovoltaica anual. Os edifícios em lotes de esquina com testadas a Norte apresentam melhores desempenhos anuais, dado o acesso solar desimpedido a Norte e a Leste ou Oeste. Congruentemente, os edifícios com testada a Sul e afastados das esquinas apresentam os piores desempenhos anuais, devido o sombreamento por outros edifícios da quadra. A tabela 1 compara o desempenho anual dos edifícios 1, 5, 8 e

9 por fachada.

Figura 3 – Edifícios com maiores e menores gerações fotovoltaicas totais anuais por área



Fonte: Autores.

Tabela 1 – Geração fotovoltaica anual por fachada dos edifícios com maiores e menores desempenhos

Orientação	**Edifício 1 [kWh/m²/ano]**	**Edifício 5 [kWh/m²/ano]**	**Edifício 8 [kWh/m²/ano]**	**Edifício 9 [kWh/m²/ano]**
Norte	1430	1482	584	570
Leste	369	1394	374	347
Oeste	1119	345	325	337
TOTAL	**2918**	**3221**	**1284**	**1254**

Fonte: Autores

A tabela 1 mostra que a geração fotovoltaica das fachadas Leste, é maior comparada com a geração das fachadas a Oeste, exceto no edifício 1 que tem a fachada Oeste com maior exposição solar devido sua localização na quadra. Adicionalmente, mesmo a geração fotovoltaica da fachada Norte do edifício 5 (na esquina Leste da quadra de estudo) é superior à geração fotovoltaica da fachada Norte do edifício 1 (na esquina Oeste da quadra de estudo). Os resultados decorrem da orientação da testada Norte da quadra para o azimute 343° (-17°). Esta ligeira rotação favorece a geração fotovoltaica a Leste, por expor mais as fachadas Leste para o quadrante Norte.

4.2 Variações da geração fotovoltaica entre andares da mesma fachada

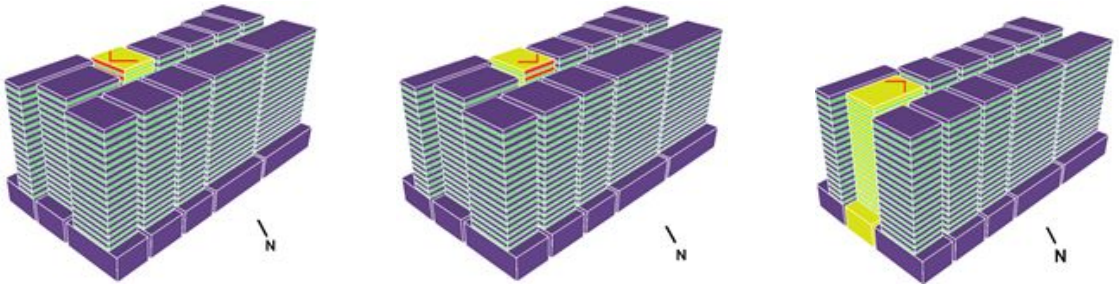
A figura 4 apresenta os edifícios com maiores variações da geração fotovoltaica entre andares da mesma fachada, de acordo com a orientação e o mês que cada uma ocorre.

Figura 4 – Edifícios com maior variação da geração fotovoltaica entre andares de uma mesma fachada

Edifício 10
fachada Norte em julho

Edifício 10
fachada Leste em agosto

Edifício 11
fachada Oeste em junho



Nota: Edifícios referência a amarelo, fachadas referências a vermelho e módulos a verde. Fonte: Autores.

O sombreamento é maior em fachadas voltadas para os edifícios vizinhos na quadra, resultando numa assimetria entre os valores de geração fotovoltaica dos andares superiores comparados com os inferiores. Este efeito aumenta quando a altura solar é menor, nos meses de inverno com menores irradiações solares. A figura 5 apresenta as fachadas na quadra com menores gerações fotovoltaicas mensais por orientação solar. As gerações fotovoltaicas são discriminadas por andar indicando também os pontos de equilíbrio entre gerações fotovoltaicas dos andares superiores e inferiores.

Figura 5 – Comparação da geração fotovoltaica por andar em kWh/m^2

Edifício 10: fachada Norte,
em julho [kWh/m²]

Edifício 10: fachada Leste
em agosto [kWh/m²]

Edifício 11: fachada Oeste
em junho[kWh/m²]



Fonte: Autores.

Embora verifique-se uma redução sensível na geração fotovoltaica dos últimos andares (andar 17) para os penúltimos e antepenúltimos (andares 16 e 15), a tendência é que essa redução decresce entre os pisos inferiores. Os valores de geração fotovoltaica dos andares 1 a 10-12 são praticamente constantes. O impacto pode ser visto na figura 6, que quantifica os valores absolutos de geração fotovoltaica em kWh mensais dos andares inferiores mais próximos às gerações dos andares superiores.

Figura 6 – Comparativo do ponto de equilíbrio entre geração fotovoltaica dos andares inferiores e superiores



Fonte: Autores.

Os resultados convergem que o impacto cumulativo da geração fotovoltaica nos andares inferiores, aproxima-se ou ultrapassa a geração fotovoltaica dos andares superiores.

5 CONCLUSÕES

A localização dos edifícios na quadra e os impactos intraquadra alteram a geração fotovoltaica anual por área em mais de 2,5 vezes (3221 kWh/m²/ano no edifício 5 comparado com 1254 kWh/m²/ano no edifício 9). Este resultado decorre dos maiores sombreamentos em edifícios com testada para sul e afastados das esquinas, com impacto significativo na produção de energia elétrica, que deve ser levado em conta no projeto de sistemas fotovoltaicos de fachada.

A assimetria de geração fotovoltaica entre andares da mesma fachada, pode ser maior que seis vezes na fachada norte (edifício 10) e aproximadamente 3 vezes para as fachadas Leste e Oeste dos edifícios 10 e 11, respectivamente. A redução da geração é sensível dos últimos andares, mas praticamente estabiliza entre o 11º e 10º andar, em todas as orientações (Norte, Leste e Oeste). Esta estabilização, provoca um ponto de equilíbrio entre as gerações agregadas dos módulos fotovoltaicos dos andares superiores e inferiores nos andares 15 na fachada orte, 13 na fachada Leste e 11 na fachada Oeste. Apesar da baixa eficiência individual da geração fotovoltaica de cada módulo nos andares inferiores, consideradas cumulativamente, equivalem à geração dos módulos fotovoltaicos dos andares superiores com maiores eficiências. Sem a instalação de módulos fotovoltaicos nos andares inferiores a produção de energia elétrica destas fachadas seria reduzida a metade, demonstrando que o impacto cumulativo da maior área de geração das fachadas compensa as menores eficiências.

Adicionalmente, os resultados mostram que além do impacto dos índices urbanísticos na geração, as orientações azimutais das testadas das quadras, afetam assimetricamente a geração fotovoltaica entre lotes na mesma quadra em todas as orientações. Este fato é importante, não só para projeto individual de edifícios, como no processo de loteamento definindo orientações azimutais de vias, divisas de quadra e lote e as próprias opções de loteamento das quadras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Secretaria de Educação do Estado de Santa Catarina que financiou este estudo, através do programa de bolsas UNIEDU, no

edital EDITAL N. 59/REITORIA/2019 e o apoio do PIBIC/CNPq por meio do edital 32/REITORIA/2019.

REFERÊNCIAS

DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Avaliação da influência do contexto urbano na radiação solar para geração de energia. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, *[S. l.]*, v. 9, p. 408–424, 2017. DOI: 10.1590/2175-3369.009.supl1.ao012.

GRIFFITH, B.; LONG, N.; TORCELLINI, P.; JUDKOFF, R.; CRAWLEY, D.; RYAN, J. **Assessment of the Technical Potential for Achieving Net Zero-Energy Buildings in the Commercial Sector**, 2007. Disponível em: http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41957.pdf.

IBGE. **IBGE | censo 2010 | resultados | notícias | Censo 2010: população do Brasil é de 190.732.694 pessoas**. 2010. Disponível em: https://censo2010.ibge.gov.br/noticias-censo.html?busca=1&id=3&idnoticia=1766&t=censo-2010-populacao-brasil-190-732-694-pessoas&view=noticia. Acesso em: 26 fev. 2020.

IBGE. **IBGE | Cidades@ | Santa Catarina | Chapecó | Panorama**. 2020a. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/chapeco/panorama. Acesso em: 26 fev. 2020.

IBGE. **IBGE | Cidades@ | Brasil | Panorama**. 2020b. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama. Acesso em: 26 fev. 2020.

MICHALTHUK, Nadia. DI Online - Cresce o número de andares em edifícios de Chapecó. **Diário do Iguaçu**, Chapecó, 2019. Disponível em: https://www.diariodoiguacu.com.br/noticias/detalhes/cresce-o-numero-de-andares-em-edificios-de-chapeco--49421. Acesso em: 27 fev. 2020.

PACHECO, Miguel; LAMBERTS, Roberto. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, *[S. l.]*, v. 63, p. 716–725, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.133.

RÜTHER, Ricardo; ZILLES, Roberto. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, *[S. l.]*, v. 39, n. 3, p. 1027–1030, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.12.021.

SANTOS, Arthur Henrique Cursino Dos. **Avaliação técnica e financeira da geração fotovoltaica integrada à fachada de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo**. 2015. text - Universidade de São Paulo, *[S. l.]*, 2015. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-12022016-101152/. Acesso em: 2 mar. 2016.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, *[S. l.]*, v. 118, p. 84–98, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.091.