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 NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA DE RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES EM CENTROS URBANOS POR PERDA DO ACESSO SOLAR: O EXEMPLO DA ÁREA URBANA DE TRANSIÇÃO EM CHAPECÓ - SC[1]

ZAMBARDA, Laura B. (1); PACHECO, Miguel T. G. (2); ZARDO, Isadora Z. (3); ATUATTI, Letícia (4); GUADA, Nádia Paula (5); GROTH, Susan Cristina (6);

(1) Unochapecó, laurabz@unochapeco.edu.br
(2) Pesquisador independente, miguelpacheco@outlook.com
(3) Pesquisadora independente, isa_zardo@hotmail.com
(4) Unochapecó, leticia.a@unochapeco.edu.br
(5) Unochapecó, n.guarda@unochapeco.edu.br
(6) Unochapecó, s.groth@unochapeco.edu.br
(7) Unochapecó, antunestamara@unochapeco.edu.br

RESUMO

A geração fotovoltaica é uma fonte renovável de energia importante no Brasil por ser contracíclica à geração hidroelétrica, base da matriz elétrica. A geração distribuída fotovoltaica em centros urbanos aproxima a produção de energia do consumo, evitando perdas de transmissão e distribuição, já que as residências unifamiliares conjugam poucos pisos com baixo consumo e facilmente atingem o balanço zero. O adensamento e verticalização das cidades, devido legislações mais permissivas, ameaçam o acesso solar e o sombreamento condiciona a geração fotovoltaica, que também depende de políticas favoráveis. A cidade de Chapecó-SC teve um crescimento populacional extremo, adensando o centro urbano, com alterações no plano diretor que permitiram maior ocupação do solo e acréscimo de altura. Assim, objetiva-se analisar o impacto das alterações do plano diretor municipal na geração distribuída de uma residência unifamiliar, comparando o desempenho de três simulações de geração fotovoltaica da residência com diferentes índices no seu entorno. As simulações utilizam os programas Trimble SketchUp com plugin Euclid 0.93 e EnergyPlus. Os resultados mostram diminuições na geração fotovoltaica de um terço à metade, conforme o mês, tornando evidente o impacto do sombreamento causado pela alteração de índices urbanos na geração fotovoltaica, com uma diminuição anual de 1000 kWh.

Palavras-chave: *Geração fotovoltaica. Geração distribuída. Acesso solar.*

ABSTRACT

Photovoltaic generation is an important renewable energy source in Brazil as it is countercyclical to hydroelectric generation, the basis of the electrical matrix. Distributed photovoltaic generation in urban centers brings energy production closer to consumption,

[1]ZAMBARDA, Laura B et al. Impacto do adensamento na geração distribuída fotovoltaica de residências unifamiliares em centros urbanos por perda do acesso solar: o exemplo da área urbana de transição em Chapecó – SC. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

avoiding transmission and distribution losses, since single-family homes combine few floors with low consumption and easily reach zero balance. The densification and verticalization of cities, due to more permissive legislation, threaten solar access and the shading of buildings conditions the photovoltaic generation, which also depends on favorable policies. The city of Chapecó-SC had an extreme population growth, densifying the center, with changes in the masterplan that allowed greater land occupation and increased height. Thus, the objective is to analyze the impact of changes in the municipal masterplan on the distributed generation of a single-family residence, comparing the performance of three simulations of photovoltaic generation of the residence with different rates in its surroundings. The simulations use the Trimble SketchUp programs with plugin Euclid 0.93 and EnergyPlus. The results show decreases in photovoltaic generation from one third to half, according to the month, making evident the impact of shading caused by the alteration of urban indices in photovoltaic generation, with an annual decrease of 1000 kWh.

***Keywords**: Photovoltaic generation. Distributed generation. Solar access.*

1 INTRODUÇÃO

A geração distribuída é uma modalidade onde o consumidor gera energia elétrica, para seu consumo próprio através de fontes renováveis e para troca com a rede elétrica pública. A geração distribuída fotovoltaica é particularmente relevante nos centros urbanos, ao permitir geração de energia perto do consumo, reduzindo perdas em transmissão e distribuição, algo particularmente relevante no contexto brasileiro, além de ser contracíclica à geração hidrelétrica, principal fonte de energia elétrica brasileira (RÜTHER; ZILLES, 2011).

O sucesso da geração distribuída fotovoltaica no Brasil depende de uma política institucional favorável, incluindo condições para além da jurisdição da agência reguladora do setor elétrico (ANEEL). Por exemplo, em 2013, uma resolução do Conselho Nacional de Política Fazendária eliminou a isenção do ICMS para a geração distribuída reduzindo a viabilidade econômica no ano seguinte à sua implantação pela ANEEL (MONTENEGRO, 2013).

As residências unifamiliares são importantes para a geração distribuída fotovoltaica, conjugando poucos pisos com consumo baixo de energia. Podem atingir facilmente o balanço zero no Brasil, exportar eletricidade para a rede durante o horário comercial, aumentar a segurança energética e alocar capital privado para a descarbonização da matriz elétrica brasileira (PACHECO; LAMBERTS, 2013).

Nos meios urbanos, a geração distribuída fotovoltaica é condicionada pelo sombreamento provocado por edifícios em lotes do entorno. Nos Estados Unidos, onde a geração distribuída fotovoltaica foi introduzida há mais tempo do que no Brasil, o acesso solar (*Solar Access*) é objeto de provisão legal em prefeituras que visam incentivar a geração distribuída fotovoltaica (ASHLAND, 2015; BOULDER, 2006; COMMUNITIES ASSOCIATIONS INSTITUTE, 2019; SOLAR AMERICA BOARD FOR CODES AND STANDARDS, 2008).

No contexto nacional, as cidades estão em adensamento. A cidade de Chapecó é um exemplo extremo. A sua população cresceu aproximadamente 20% na última década (2010-2019) (IBGE, 2020a), acima da média nacional de aproximadamente 10% no mesmo período (IBGE, 2010, 2020b). Esse crescimento foi acompanhado de adensamento e verticalização da área central da cidade com edifícios ultrapassando os trinta pisos (MICHALTHUK, 2019). Esse processo é induzido pela alteração de planos diretores municipais, permitindo maiores ocupações do solo e acréscimos nas alturas máximas dos edifícios. Tais alterações dos planos diretores ameaçam o acesso solar, que não é um direito consagrado no Brasil. Faltam estudos

analisando o impacto do adensamento dos centros urbanos no acesso solar de residências unifamiliares.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar como a alteração do plano diretor em Chapecó reduz a geração fotovoltaica de uma residência unifamiliar com sistema de geração fotovoltaico distribuída.

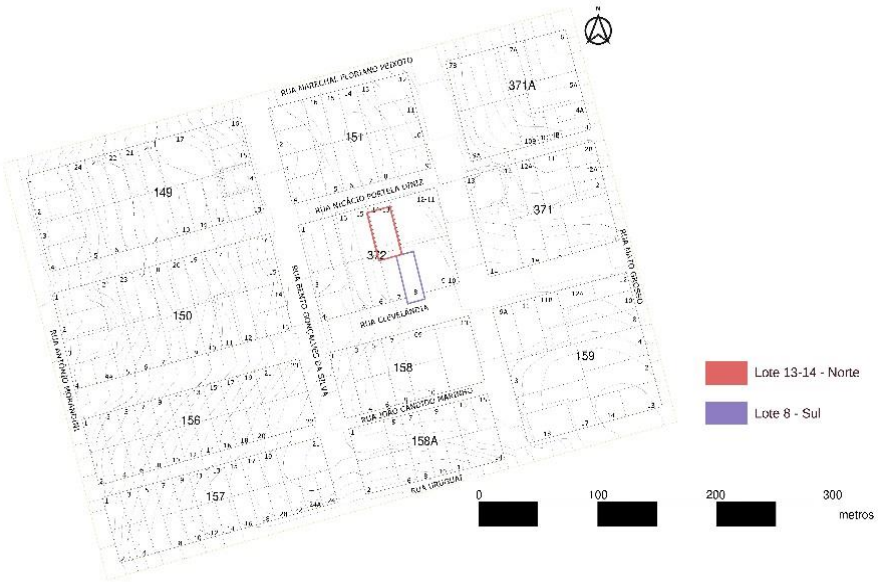
3 MÉTODO

Este trabalho compara o desempenho da geração fotovoltaica de um mesmo sistema fotovoltaico para uma residência unifamiliar, simulado em dois lotes diferentes da mesma quadra. Um dos dois lotes com testada a norte e outro com testada a sul. São desenvolvidas três simulações para cada um dos lotes com diferentes índices de adensamento no seu entorno. Adicionalmente, para o lote norte, são feitas quatro simulações adicionais para testar o efeito do sombreamento, dos edifícios nos lotes imediatamente contíguos a sul, leste e oeste, na geração fotovoltaica. O método divide-se em definição do entorno para cada simulação e na definição do método das simulações. O método e resultados são apresentados sucintamente dada a limitação de páginas.

3.1 Entorno

A área de estudo localiza-se em Chapecó, Santa Catarina e pertence à Área Urbana de Transição (AUT), uma unidade territorial definida no Plano Diretor de Chapecó. As quadras escolhidas formam um retângulo onde os lotes de estudo (nº8 e nº13-14) estão localizados na quadra central (nº732) (ver Figura 1).

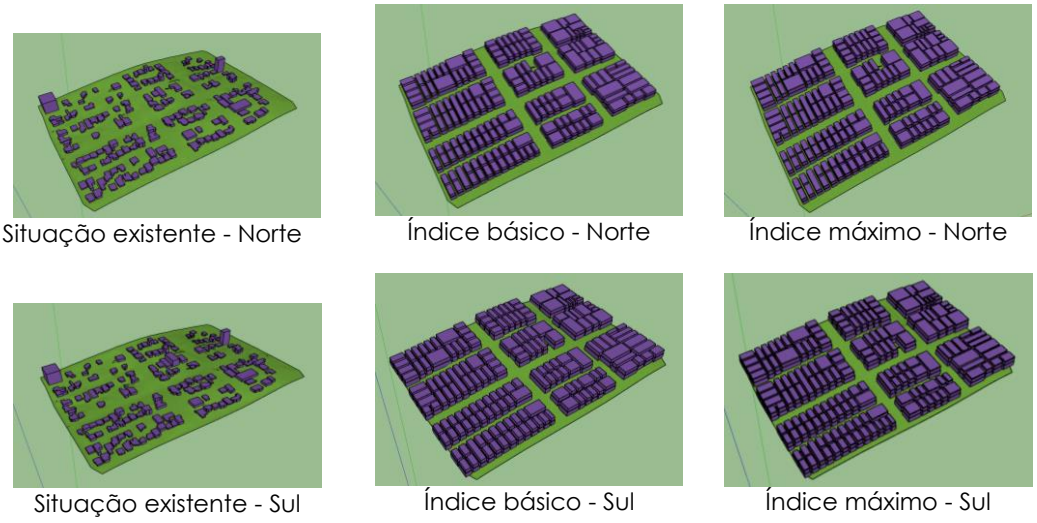
Figura 1 – Planta de Situação delimitando a área de estudo da Unidade Territorial Área Urbana de Transição com lote assinalado (AUT)



Fonte: Autores (2020)

A AUT foi criada desmembrando uma parte de uma unidade territorial planejada para residências unifamiliares, designada de Unidade de Moradia (UM). As residências construídas na área desmembrada tinham uma expectativa legal de edifícios no máximo de quatro pisos, que a transformação em AUT aumentou para um básico de oito pisos. Num contexto legal da UM, o morador tem uma expectativa de acesso solar que o desmembramento de UM para AUT alterou. A alteração de UM para AUT também aumentou as taxas de ocupação, isto é, a área do lote que pode ser construída. A ocupação de mais área no lote por parte dos edifícios implica também em menor acesso solar, principalmente se conjugada com o aumento do número máximo de pisos permitido.
Dentro da AUT, foi escolhido o conjunto de quadras onde ainda predominam as residências unifamiliares. Esta área de estudo visa permitir sombreamento em todos os azimutes, contabilizando as variações sazonais do nascer e pôr do sol. Na quadra de estudo 372, o lote nº8 foi escolhido por ter testada para sul e não ser um lote de esquina, enquanto o lote nº 13-14 tem testada para norte e também fica no meio da quadra. O sombreamento dos outros edifícios da quadra tende a ser maior nos lotes com testada a sul. Por oposição, nos lotes com testada para norte, leste e oeste ou de esquina, a rua de acesso afasta os edifícios, por estarem do outro lado da via, reduzindo o sombreamento.
Nestas onze quadras, são feitas três simulações diferentes com índices crescentes, para ambas as residências (ver Figura 2).

Figura 2 – Modelos de situação atual, índices básico e máximo



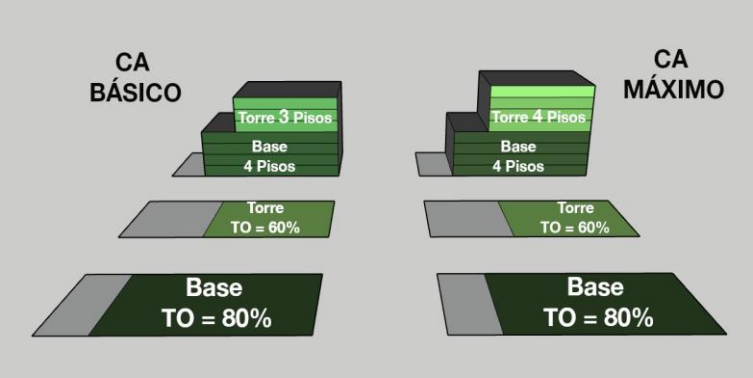
Fonte: Autores (2020)

A "situação existente" corresponde aos edifícios existentes no segundo semestre de 2019, representando as suas volumetrias. As plantas das volumetrias foram estimadas através de fotos de satélite e as alturas através de levantamento em campo, contando o número de pisos de cada edifício e estimando uma distância de piso a piso de 3 m. Os edifícios foram implantados nos lotes tais como definidos no Mapeamento Urbano Básico (MUB). Lotes e quadras foram numerados igualmente de acordo com o MUB.

As simulações básica e máxima aplicam os índices básico e máximo previstos no Plano Diretor de Chapecó para a AUT. Para o índice básico, a taxa de ocupação máxima é de 80% para base e 60% para torre, com coeficiente de aproveitamento de 5 e, se utilizando do máximo potencial construtivo e máxima taxa de ocupação,

configura sete pisos. Para o índice máximo, a taxa de ocupação máxima é de 80% para base e 60% para torre, com oito pisos, conforme Figura 3.

Figura 3 – Ilustração de taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento para os índices básico e mínimo no AUT



Fonte: Autores (2020)

3.2 Simulação

O sistema fotovoltaico foi simulado com 2800 Wp de potência, baseado no valor utilizado pelo programa Bônus Fotovoltaico de promoção da geração distribuída fotovoltaica em residências unifamiliares no estado de Santa Catarina (CELESC, 2018). As simulações foram feitas com o EnergyPlus 8.7, um programa de simulação financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos para simulação integral de edifícios (ENERGYPLUS, 2019). Os modelos volumétricos simulando e área de estudo foram criados utilizando o Trimble SketchUp com o plugin Euclid 0.93 que permitiu assim a sua exportação para o EnergyPlus.

O sistema fotovoltaico foi orientado ao azimute 0º com uma inclinação de 10º do plano do solo, a 3,5 m do solo. A orientação para o azimute 0º maximiza a geração fotovoltaica possível de se implementar, dada a orientação dos limites dos lotes da área de estudo. A área de estudo apresenta um número significativo de residências unifamiliares de um piso, as quais apresentam o pior caso possível para sombreamento. As residências unifamiliares na área de estudo apresentam tipologias de coberturas inclinadas e planas. Os módulos foram simulados adotando uma inclinação de 10º do plano do solo, opção feita por três razões: alguns proprietários têm restrições estéticas quanto deixar os módulos visíveis da rua; com esta inclinação os módulos podem ser ocultados atrás da platibanda; o ângulo de 10º do plano do solo permite a auto limpeza dos módulos. Finalmente, embora a inclinação seja subótima para a latitude de Chapecó, a perda de geração não é tão significativa (SANTOS, 2013).

Dado o foco da pesquisa nos efeitos do sombreamento na geração fotovoltaica, todos os edifícios foram simulados como zonas de sombra, para reduzir a complexidade computacional e reduzir tempo de simulação. Para a simulação da geração fotovoltaica foi usado o objeto do EnergyPlus PhotovoltaicPerformance:Simple com uma eficiência fixa de 12%. Para o cálculo de sombras utilizou-se o algoritmo SutherlandHodgman para o polygon clipping e o Detailed Sky Diffuse Modeling para a simulação da luz difusa.

Os dados de irradiação solar foram extraídos de arquivo climático anual horário EPW (EnergyPlusWeather). Como Chapecó não possui arquivo climático em EPW, foi

adotado o arquivo da cidade de Xanxerê, Santa Catarina, distante aproximadamente 33 km de Chapecó, por ser o mais próximo e não existirem diferenças significativas no clima.

4 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados anuais de geração para as simulações da situação existente, índice básico e índice máximo das residências a norte e a sul.

Tabela 1 – Resultados anuais de geração fotovoltaica para situação existente, índice básico e máximo

Geração fotovoltaica	Situação existente [kWh]	Índice básico [kWh]	Índice máximo [kWh]
Anual - Norte	2992	1989	1819
Anual - Sul	3042	1820	1761

Fonte: Autores (2020)

As gerações fotovoltaicas variam mais de 1000 kWh ano entre a situação existente comparada com a aplicação dos índices básico ou máximo. O adensamento do entorno mostra ter um impacto significativo, sendo mais acentuado a sul, decorrente da redução do acesso solar a norte.

No entanto, na situação existente, verificou-se uma menor geração a norte do que a sul, que é contraintuitivo. Para entender os resultados foram feitas simulações adicionais para a situação existente a norte. Foi feita uma nova simulação, situação hipotética, onde o sistema fotovoltaico foi simulado isolado, sem edifícios vizinhos, que apresenta a maior geração fotovoltaica teórica possível. Foram também feitas simulação adicionais para o lote a norte sem edifícios no lote a sul, sem edifícios nos lotes sul e leste, e sem edifícios nos lotes sul e oeste, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados anuais de geração fotovoltaica para situação hipotética e situação existente exploratórias

Geração Fotovoltaica [kWh]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Situação hipotética	353	301	290	187	153	106	148	185	248	268	373	433
Situação Existente Norte sem edifício oeste e sul	353	301	290	187	153	106	148	185	248	268	373	433
Situação Existente Sul	352	300	290	186	153	106	148	185	248	267	372	433
Situação Existente Norte sem edifício sul	351	299	289	185	152	105	147	184	247	267	371	432
Situação Existente Norte sem edifício leste e sul	351	299	289	185	152	105	147	184	247	267	371	432
Situação Existente Norte	349	298	287	183	150	104	145	182	245	265	369	430

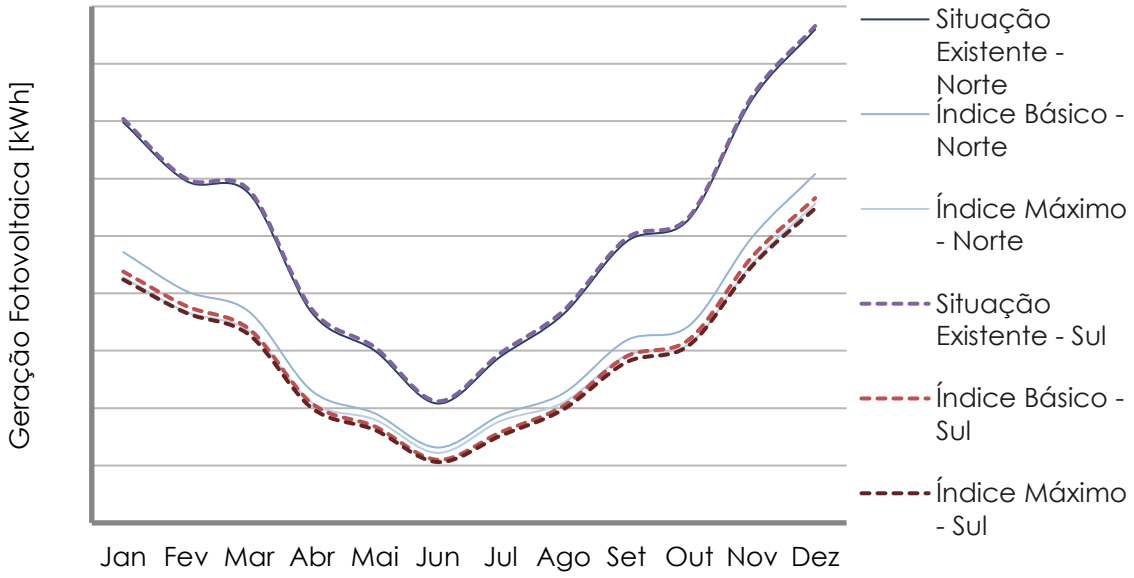
Fonte: Autores (2020)

Os resultados dividem-se em quatro grupos que mostram a importância dos edifícios a oeste. O cenário Existente Norte sem edifícios a oeste e sul apresenta a mesma geração fotovoltaica que a situação hipotética, enquanto o cenário sem o edifício leste ou sem os edifícios leste e sul apresentam menores gerações de igual valor. A menor geração da Situação Existente Norte comparada com a Situação Existente Sul decorre do edifício no lote a oeste. O edifício contiguo no lote oeste a norte é maior,

provocando mais sombreamento.

A Figura 4 apresenta os resultados mensais de geração fotovoltaica para as simulações situação existente, índice básico e índice máximo.

Figura 4 – Geração mensal para situação existente, índice básico e máximo



Fonte: Autores (2020)

A geração mensal na situação existente é superior em todos os meses às gerações dos índices básico e máximo. No entanto, a diferença relativa entre as gerações mensais da situação existente com as dos índices básico e máximo varia sazonalmente. Em dezembro a diferença é aproximadamente de um terço. Em junho, essa diferença aumenta, aproximando-se de metade. Este resultado decorre da menor altura solar no inverno, que aumenta a projeção das sombras dos edifícios, sendo esse efeito potencializado quanto mais alto o edifício.

Entre os resultados das simulações dos índices básico e máximo, as diferenças relativas mensais são estáveis, como consequência da similaridade das volumetrias.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que o adensamento do entorno de uma residência unifamiliar representado pelas volumetrias dos índices básico e máximo resultam numa redução de geração fotovoltaica anual mais de 1000 kWh ao ano comparado com a situação atual para a cidade de Chapecó, SC. Esta redução representa mais de um terço da geração fotovoltaica anual e teria impactos significativos na capacidade de atender a demanda do edifício que o sistema fotovoltaico serve.

Apesar dos resultados deste estudo serem referentes à legislação de Chapecó, o adensamento nos centros urbanos no Brasil é geral. É possível concluir que proprietários de residências unifamiliares em centros urbanos com sistemas de geração distribuída fotovoltaica em entornos de baixa densidade, na ausência de leis que garantam o acesso solar, estão na contingência de reduções significativas de produção de energia elétrica, mesmo quando rodeados de edifícios de alturas moderadas de sete e oito pisos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina (UNIEDU), viabilizado por meio da Universidade Comunitária da Região de Chapecó - UNOCHAPECÓ, a partir do Edital n.013/REITORIA/2019 e o apoio do PIBIC/CNPq, por meio da UNOCHAPECÓ, a partir do Edital nº060/REITORIA/2019.

REFERÊNCIAS

ASHLAND. **City of Ashland, Oregon - Community Development - Solar Setback Guide**. 2015. Disponível em: http://www.ashland.or.us/Page.asp?NavID=11748. Acesso em: 8 ago. 2016.

BOULDER. **Solar acess**, 2006. Disponível em: https://www-static.bouldercolorado.gov/docs/PDS/forms/815_Solar_Access_Brochure.pdf.

CELESC. **Projeto Bônus Fotovoltaico**. 2018. Disponível em: http://bonusfotovoltaico.celesc.com.br/. Acesso em: 19 mar. 2018.

COMMUNITIES ASSOCIATIONS INSTITUTE. **Solar Rights and Easement Legislation by State in Homeowners Associations and Common Interest Communities**, 2019. Disponível em: https://www.caionline.org/Advocacy/StateAdvocacy/PriorityIssues/SolarRestrictions/Documents/Solar%20Rights%20-%202019%20update.pdf. Acesso em: 20 fev. 2020.

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.

MONTENEGRO, Alexandre de Albuquerque. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. 2013. mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/130917.

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, Isis Portolan Dos. **Tese_Isis_Portolan_dos_Santos.pdf**. 2013. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Isis_Portolan_dos_Santos.pdf. Acesso em: 25 fev. 2020.

SOLAR AMERICA BOARD FOR CODES AND STANDARDS. **Solar ABCs: A Comprehensive Review of Solar Access Law in the United States**. 2008. Disponível em: http://www.solarabcs.org/about/publications/reports/solar-access/. Acesso em: 20 out. 2016.