

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUrb)**  
**Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PROGRAU)**



Dissertação de Mestrado

**A INFLUÊNCIA DOS ÍNDICES URBANÍSTICOS NA CAPACIDADE DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM ZONAS RESIDENCIAIS**

**Bianca Pereira Lucas**

Pelotas, 2024

Bianca Pereira Lucas

**A INFLUÊNCIA DOS ÍNDICES URBANÍSTICOS NA CAPACIDADE DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM ZONAS RESIDENCIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Orientadora: Profa. Dra. Isabel Salamoni

Coorientadora: Profa. Dra. Celina Maria Britto Correa

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

L933i Lucas, Bianca Pereira

A influência dos índices urbanísticos na capacidade de geração de energia fotovoltaica em zonas residenciais [recurso eletrônico] / Bianca Pereira Lucas ; Isabel Salamoni, orientadora ; Celina Maria Britto Correa, coorientadora. – Pelotas, 2024.

95 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. BIPV. 2. Potencialidade de geração FV. 3. Morfologia urbana. I. Salamoni, Isabel, orient. II. Correa, Celina Maria Britto, coorient. III. Título.

CDD 720

Elaborada por Alex Serrano de Almeida CRB: 10/2156

Bianca Pereira Lucas

## **A INFLUÊNCIA DOS ÍNDICES URBANÍSTICOS NA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM ZONAS RESIDENCIAIS**

Dissertação aprovada, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data de defesa: 18 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

-----  
Prof. Dr<sup>a</sup>. Isabel Tourinho Salamoni. (Orientadora)

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina.

-----  
Prof. Dr<sup>a</sup>. Celina Maria Britto Correa. (Coorientadora)

Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid.

-----  
Prof. Dr. Eduardo Rocha

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

-----  
Prof. Dr<sup>a</sup>. Ísis Portolan dos Santos

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina.

-----  
Prof. Dr<sup>a</sup>. Natália dos Santos Petry

Doutora em Eng. Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



## **Agradecimentos**

Agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram a concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, por acreditarem e incentivarem a realização dos meus sonhos.

A minha irmã, pelo apoio e torcida pelo meu sucesso.

Ao meu namorado, pelas palavras de carinho e por me fazer feliz.

A minha orientadora Isabel e coorientadora Celina, por me guiarem ao longo dessa trajetória, compartilhando o conhecimento, me ensinando e incentivando nessa jornada desafiadora.

Aos meus amigos, por deixarem o caminho mais leve e mostrarem como as pessoas ao nosso redor são importantes para seguirmos em frente.

Aos membros da banca, pela dedicação na leitura e pelas sugestões.

Obrigada.

## RESUMO

LUCAS, Bianca. **A influência dos índices urbanísticos na capacidade de geração de energia fotovoltaica em zonas residenciais.** Orientadora: Isabel Salamoni. 2024.95f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Os avanços tecnológicos possibilitam que as edificações possuam geradores de energia instalados no corpo da construção, produzindo parte ou toda a energia que consomem. Entre as tecnologias que permitem a geração de energia elétrica na edificação, a tecnologia fotovoltaica é uma das mais promissoras. A integração fotovoltaica -BIPV- deve ocorrer durante a fase de projeto das edificações, os módulos devem ser considerados como parte do envelope e não como uma adição posterior aos elementos do edifício construído. A morfologia urbana desempenha um papel fundamental na eficiência energética das cidades, pois a disposição das edificações, largura das vias e entre outros fatores podem criar sombreamentos que impactam negativamente o desempenho dos sistemas FV. Esta dissertação investiga o impacto da morfologia urbana no BIPV em uma área residencial de baixa densidade no município de Pelotas/RS, no bairro Laranjal. Foram analisadas características morfológicas e a legislação local que influenciam o desempenho de sistemas BIPV, considerando variáveis como dimensões dos terrenos, altura das edificações, recuos obrigatórios e orientações solares. Modelos representativos de tipologias predominantes na região foram simulados no software Autodesk Revit com o plugin Insight, avaliando a radiação solar incidente em superfícies horizontais (coberturas) e verticais (fachadas) sob diferentes distâncias entre edificações e orientações solares (NO, NE, SO, SE). Os resultados mostraram que as coberturas têm melhor desempenho em termos de radiação, enquanto fachadas sofrem maior impacto do sombreamento. A orientação solar NO foi a mais favorável, enquanto SE apresentou a menor disponibilidade de radiação solar. Após a simulação da disponibilidade de radiação solar, foi calculado manualmente a capacidade de geração FV para os modelos com melhor e pior desempenho na disponibilidade de radiação solar. Apesar das restrições em algumas situações, os resultados indicaram que as edificações podem gerar energia suficiente para suprir o consumo médio mensal de uma família, evidenciando a viabilidade da aplicação

de BIPV na área estudada. Por fim, a pesquisa propôs ajustes no planejamento de novos empreendimentos e projetos arquitetônicos para maximizar a eficiência dos sistemas BIPV. Os achados reforçam que a morfologia urbana da expansão do bairro Laranjal contribui positivamente para a integração de BIPV, alinhando-se às demandas de sustentabilidade energética e urbanística.

**Palavras-chave:** BIPV; potencialidade de geração FV; morfologia urbana.

## ABSTRACT

LUCAS, Bianca. **The Influence of Urban Planning Indices on Photovoltaic Energy Generation Capacity in Residential Areas**. Advisor: Isabel Salamoni. 2024.95f. Dissertation (Master in Architecture and Urbanism) - Faculty of Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

Technological advances enable buildings to incorporate energy generators within their structures, producing part or all of the energy they consume. Among the technologies that allow for on-site energy generation, photovoltaic technology is one of the most promising. Building-integrated photovoltaics (BIPV) should be incorporated during the design phase of buildings, with photovoltaic modules considered as part of the building envelope rather than as later additions. Urban morphology plays a fundamental role in the energy efficiency of cities, as factors such as building layout, street width, and others can create shading that negatively impacts the performance of photovoltaic systems. This dissertation investigates the impact of urban morphology on BIPV in a low-density residential area in the city of Pelotas/RS, specifically in the Laranjal neighborhood. Morphological characteristics and local legislation influencing BIPV system performance were analyzed, considering variables such as plot dimensions, building heights, required setbacks, and solar orientations. Representative models of predominant typologies in the region were simulated using Autodesk Revit software with the Insight plugin, evaluating solar radiation on horizontal surfaces (roofs) and vertical surfaces (facades) under different building distances and solar orientations (NW, NE, SW, SE). The results showed that roofs performed better in terms of solar radiation, while facades were more affected by shading. The NW solar orientation was the most favorable, while SE showed the lowest solar radiation availability. After simulating solar radiation availability, the photovoltaic generation capacity was manually calculated for the models with the best and worst solar radiation availability. Despite restrictions in some situations, the results indicated that buildings can generate sufficient energy to meet the average monthly consumption of a household, demonstrating the feasibility of BIPV application in the studied area. Finally, the research proposed adjustments to the planning of new developments and architectural projects to maximize BIPV

system efficiency. The findings emphasize that the urban morphology of the Laranjal neighborhood's expansion contributes positively to BIPV integration, aligning with energy and urban sustainability demands.

**Keywords: bipv; photovoltaic generation potential; urban morphology.**

## Lista de figuras

Figura 1 Módulos fotovoltaicos coloridos em fachadas .....	18
Figura 2 Mapa de Irradiação global horizontal do Brasil. ....	21
Figura 3 Representatividade e classe de consumo da GD .....	29
Figura 4 Delineamento da metodologia.....	42
Figura 5 Mapa da cidade de Pelotas com a indicação das regiões administrativas .....	43
Figura 6 Condomínios urbanísticos de lotes existentes na região do Laranjal. ....	44
Figura 7 Condomínios e loteamento estudados .....	45
Figura 8 Posicionamento do objeto de estudo em relação a Av. de acesso ...	47
Figura 9 Implantação dos empreendimentos .....	48
Figura 10 Gabarito das vias dos objetos de estudo .....	53
Figura 11 Disposição dos lotes no Condomínio “A”, com a localização de áreas verdes. ....	56
Figura 12 Dimensões dos volumes edificadas .....	58
Figura 13 Marcação do lote simulado e edificações lindeiras . ....	58
Figura 14 Distâncias entre edificações .....	60
Figura 15 Distâncias entre edificações .....	61
Figura 16 Distâncias entre edificações.....	62
Figura 17 Indicação das coordenadas da localização do estudo .....	63
Figura 18 Exemplo de simulação .....	64
Figura 19 Exemplos do comportamento das superfícies na simulação.....	65
Figura 20 Áreas de exposição à radiação .....	71
Figura 21 Áreas de exposição à radiação .....	75
Figura 22 Áreas de exposição à radiação .....	78

## Lista de tabelas

Tabela 1 recuos permitidos nos empreendimentos e na lei municipal 5502/08	50
tabela 2 levantamento dos recuos de fundos obrigatórios do objeto de estudo a .....	50
tabela 3- dimensões e quantidade de exemplares de lotes nos objetos de estudo .....	51
tabela 4- síntese das dimensões mais frequentes nos lotes dos objetos de estudo .....	52
tabela 5- resultado do levantamento da tipologia existente nos objetos de estudo .....	52
tabela 6 distâncias entre as edificações de cada objeto de estudo.....	54
tabela 7- síntese da caracterização dos objetos de estudo.....	57
tabela 8 - caracterização do grupo uniforme .....	59
tabela 9- caracterização do grupo misto 1 .....	60
tabela 10 caracterização do grupo misto 2.....	61
tabela 11- dados utilizados na simulação.....	64
tabela 12-dimensões e parâmetros elétricos do módulo fv – módulo jkm410m- 6r13- 410w do jinko solar .....	68
tabela 13- disponibilidade de radiação solar para modelos uniformes .....	69
tabela 14 geração solar fotovoltaica em modelos uniformes.....	80
tabela 15 geração solar fotovoltaica em modelo misto - edificação com 7m....	81
tabela 16 geração solar fotovoltaica em modelo misto- edificação de 3,5m ....	82

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Justificativas e relevância do trabalho .....	19
1.2	Objetivos.....	23
1.2.1	Objetivo Geral.....	23
1.2.2	Objetivos Específicos .....	23
2	Revisão bibliográfica.....	24
2.1	Energia solar fotovoltaica no mundo.....	24
2.2	Geração distribuída no Brasil .....	25
2.3	Geração distribuída através da energia solar no Brasil .....	28
2.4	Geração de energia nas edificações .....	29
2.5	Radiação solar.....	32
2.6	Edifícios fotovoltaicos e energia zero .....	35
2.7	Morfologia Urbana e o impacto no BIPV.....	37
2.8	Simulação Computacional .....	39
3	Metodologia .....	42
3.1	Considerações iniciais .....	42
3.2	Caracterização do objeto de estudo .....	43
3.3	Implantação e análise dos índices urbanísticos .....	46
3.3.1	Implantação .....	47
3.3.2	Índices Urbanísticos .....	49
3.4	Construção do modelo urbano .....	56
3.4.1	Definição do modelo urbano .....	56
3.5	Ferramentas de análise .....	62
3.5.1	Parâmetros para a simulação.....	63
3.6	Cálculo da geração de energia.....	66
3.6.1	Potencial fotovoltaico instalado .....	66
3.6.2	Geração fotovoltaica.....	66
3.6.3	Definição do percentual de áreas disponíveis para a colocação do sistema FV .....	67
3.6.4	Escolha das características do sistema FV .....	67

4	Análise dos resultados.....	68
4.1	Disponibilidade de radiação solar.....	68
4.1.1	Modelos uniformes.....	69
4.1.2	Modelos mistos.....	72
4.2	Avaliação do impacto da morfologia urbana na incidência de radiação solar nas superfícies verticais e horizontais.....	78
4.3	Capacidade de geração solar FV das superfícies para o pior e para o melhor modelo estudado.....	79
4.4	Alternativas no planejamento de novos empreendimentos residenciais de forma a maximizar a capacidade de geração dos sistemas BIPV.....	83
5	Conclusões.....	86
5.1	Limitações do trabalho.....	89
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	89

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, tecnológicas, econômicas e políticas são uma realidade que impactam o futuro do nosso planeta. Cada vez mais agressivos os impactos ambientais exigem uma revisão de mentalidade e de comportamentos em relação ao meio ambiente, tornando-se um assunto cada vez mais debatido e preocupante.

O consumo mundial e a dependência energética crescem, gerando impactos negativos no planeta. Torna-se necessário repensar o consumo, direcionando-o para sistemas mais eficientes, menos poluentes e com menor impacto ambiental.

Um problema encontrado na maioria dos países é a dependência de fontes não renováveis e poluentes, tendo apenas 14, 1% da sua matriz baseada em fontes renováveis de energia (FRE). No Brasil, este cenário é diferente, pois o país apresenta aproximadamente 47% da sua oferta baseada em FRE (BEN, 2023). Sendo assim, é fundamental repensar a oferta da matriz energética e o uso da energia.

Durante a 27ª Conferência do Clima da ONU - COP27 foram discutidas formas para minimizar a crise climática. Apesar de não chegarem a um acordo sobre medidas para reduzir o uso de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo aquecimento global, foi proposto um pacto com instituições financeiras e o setor privado para a aceleração de uma transição energética justa e sustentável entre as economias emergentes, muitas destas ainda bastante dependentes de combustíveis fósseis (ONU, 2022).

Baseado nesses aspectos, diversos países passaram a buscar e a investir em formas de se obter matrizes energéticas mais limpas e menos agressivas, principalmente no que diz respeito a geração de energia elétrica, já que o setor é responsável por mais de dois terços das emissões globais de gases de efeito estufa e é alimentado principalmente por combustíveis fósseis (IEA, 2022).

O investimento em energias renováveis é de grande interesse global, impulsionado por questões ambientais, tecnológicas e econômicas. Um exemplo relevante foi a invasão da Ucrânia pela Rússia, em 2022, que desencadeou uma crise econômica mundial, resultando em uma forte inflação nos preços de energia, alimentos e outros suprimentos. Esse contexto evidencia a necessidade

de os países reduzirem sua dependência energética, sendo as fontes renováveis a alternativa mais acessível para atingir esse objetivo (IEA, 2022).

A construção civil é um campo que vem se transformando para respeitar os princípios de sustentabilidade. É importante buscar tecnologias capazes de diminuir os impactos ao meio ambiente tanto na construção da edificação quanto na utilização da mesma. No Brasil, a energia elétrica tem seu principal consumo, cerca de 52% atribuído ao ambiente construído, desde o início da construção e ao longo da vida útil da edificação (ZOMER; CUSTÓDIO, 2022).

Os avanços tecnológicos possibilitaram que as edificações tenham geradores de energia instalados no corpo da construção, produzindo parte ou toda a energia que consomem e ainda que possam ser edifícios com conceito *Zero Energy Buildings*, que geram mais energia do que consomem (EUROPEAN..., 2010). O equilíbrio entre o consumo e geração no mesmo edifício permite que edificações diminuam seu impacto ambiental, gerando sua própria energia ou contribuindo para a energia consumida na cidade.

Os conceitos de *nearly Zero energy building* e de *Net Zero Energy Building* (nZeb/NZEB) são considerados como soluções para minimizar o consumo de energia e de eletricidade nas edificações. Os edifícios nZeb possuem um desempenho energético muito elevado, cujas necessidades de energia quase nulas devem ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo a produzida no local ou nas proximidades. Os edifícios NZEB possuem o balanço entre a energia consumida da rede e injetada nela nulo ao longo de um período avaliativo de um ano. Se, no mesmo período avaliativo, produzir energia além da própria necessidade, o edifício é considerado um net positive-energy building (NPEB). Neste caso, além de suprir sua demanda, ele compensa o consumo de outros (DUTRA, 2020).

Na Europa isso já é uma realidade, desde 2010 a *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) 2010/31/EU traz diretrizes de obrigatoriedade de geração local nas novas edificações e nas edificações que irão passar por reformas, buscando chegar próximo ao consumo zero de energia nas unidades.

A partir de então, os países europeus começaram a adotar definições ZEB's e a desenvolver suas políticas nacionais para a implementação do conceito, sendo que cada país define suas metodologias, conforme suas condições nacionais, regionais ou locais (SCHMALFUSS, 2021).

No contexto brasileiro, não há definição de balanço energético nulo na legislação, sequer um plano de metas para atingir o conceito ZEB. Portanto, as regulamentações internacionais de eficiência energética estão em níveis bem mais avançados do que o brasileiro, tornando cada vez mais necessária a discussão sobre o assunto para a reformulação de normativas vigentes (SCHMALFUSS, 2021).

O Brasil pode se beneficiar da experiência europeia, uma vez que a maioria das zonas climáticas brasileiras apresenta semelhanças significativas com o clima do sul da Europa (RESENDE *et al.*, 2020).

Dessa forma, entre as tecnologias disponíveis para a geração de energia elétrica em edificações, a tecnologia fotovoltaica (FV) se destaca como uma das mais promissoras. Essa solução permite a produção de energia elétrica por meio da conversão da luz solar, utilizando materiais semicondutores em módulos fotovoltaicos, que podem ser instalados em qualquer área ensolarada da edificação.

O conceito de BIPV (*Building - Integrated Photovoltaics*) representa a integração de múltiplos aspectos: conceitos, estratégias e funções. A arquitetura passa a incorporar a tecnologia FV de forma elegante e inteligente, maximizando o uso do recurso solar para a geração de energia. Essa abordagem se destaca por atender às críticas estéticas sem comprometer o desempenho energético, explorando diversas possibilidades de uso dos módulos FV como elementos construtivos (ZOMER, 2023).

Esses módulos podem ser aplicados em fachadas coloridas, claraboias semitransparentes que iluminam grandes átrios, coberturas de diferentes dimensões, pergolados que sombreiam jardins, brises que barram uma irradiação indesejada, superfícies curvas ou ainda como proteção para veículos em garagens. A Figura 1 ilustra dois exemplos de aplicação de módulos FV (ZOMER; MACHADO, 2023).



Figura 1 Módulos fotovoltaicos coloridos em fachadas  
Fonte: ZOMER, Machado 2023.

Podendo ser instalado no corpo da edificação, o sistema fotovoltaico ganha, a cada dia, mais espaço no mercado e é uma aposta no futuro da tecnologia já que pode ser instalado aproveitando áreas já em uso. Outra vantagem das instalações é a geração junto ao ponto de consumo, gerando energia para a rede de distribuição sem custos de transmissão de energia ao contrário do que é necessário nas grandes centrais de geração.

Além disso, a tecnologia FV é modular, o que permite projetos de diferentes escalas, centralizados e distribuídos. Os avanços tecnológicos que buscam integrar células fotovoltaicas em materiais de construção não apenas se relacionam com a geração distribuída, mas também podem contribuir para a eficiência energética, ajudando a reduzir o consumo líquido de edificações (PNE 2050, 2020).

Considerando as elevadas tarifas residenciais, a grande disponibilidade do recurso solar em todo o país, a geração distribuída e junto ao ponto de consumo integrada a edificações urbanas, a tecnologia FV se destaca quando comparada a fontes convencionais de energia, mesmo com seu custo inicial de instalação ainda elevado. Ter centros urbanos com integração de módulos FV, contribui para o alívio de carga do sistema de distribuição convencional, evitando custos de expansão de rede e reduzindo quedas no fornecimento de energia elétrica (MONTENEGRO, 2013).

A eficiência energética deve ser abordada conectando o construído com o urbano, a forma urbana pode ser projetada para reduzir a demanda energética em edifícios e transportes, mas também beneficiando a geração de energia.

Forma e organização urbana influenciam a produção local de energia a partir de fontes renováveis e o acesso ao abastecimento e distribuição de energia das cidades (ZANON e VERONES, 2013).

O crescimento das cidades leva ao adensamento construtivo e por isso algumas regras são criadas para garantir o acesso solar nos edifícios, elas atribuem limitações de alturas, espaçamentos entre as edificações e partidos arquitetônicos que garantem o acesso ao sol (VIANNA, 2017).

A morfologia urbana é uma ciência que estuda as formas e relaciona os elementos externos do meio urbano e suas relações mútuas, explicando e definindo a paisagem urbana e sua estrutura. O estudo da forma urbana coloca em evidência a estrutura construída. Este estudo é muito importante para entender e planejar a cidade e interage com diversas disciplinas. Um estudo de morfologia urbana trata da divisão, em partes, do meio urbano (elementos morfológicos) e da articulação dos elementos entre si e com o conjunto que os definem, que são os lugares que definem, que são os lugares que constituem o espaço urbano (LAMAS, 2009).

É necessário olhar para as oportunidades além da construção isolada. A morfologia urbana é determinante para conseguirmos ter cidades energeticamente eficientes. Os arranjos das edificações, as larguras de vias e outros elementos urbanos podem criar barreiras/ sombreamentos que prejudicam o desempenho do sistema influenciando no potencial de geração FV (CHATZIPOULKAA *et al.*, 2018), visto que um fator importante que determina o rendimento da eletricidade solar e a viabilidade econômica de um sistema FV é a disponibilidade de radiação solar.

Sendo assim, esse trabalho se propõe a relacionar a morfologia de condomínios e loteamentos residenciais no sul do Brasil à possibilidade de radiação solar nas fachadas e coberturas, permitindo a geração de energia FV em superfícies horizontais e verticais de edificações.

## 1.1 Justificativas e relevância do trabalho

A eletricidade está se consolidando como a principal forma de consumo de energia nos próximos 25 anos, superando outras fontes de energia. Esse movimento é impulsionado pela ampla adoção de fontes renováveis, como a

energia eólica e solar, que estão na vanguarda da transição para uma matriz energética mais limpa. Além de fornecer acesso à eletricidade para quase 800 milhões de pessoas que atualmente não a possuem, essa transformação também contribuirá para a redução da poluição do ar e para o alcance das metas climáticas que podem ser resumidas em combater as alterações climáticas, reduzir as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e manter a temperatura média do globo no limite de 1,5°C (IEA, 2023).

Portanto, para garantir um futuro viável para as próximas gerações, é fundamental repensar padrões de consumo, adotar práticas sustentáveis em todas as esferas da vida e buscar soluções inovadoras que possam conciliar o desenvolvimento econômico com a proteção do meio ambiente (ONU, 2023).

A ONU e seus parceiros no Brasil trabalham para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). São 17 objetivos ambiciosos e interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade (ONU, 2023).

Dentre os Objetivos, o sétimo item se refere a Energia Limpa e acessível para garantir o acesso a fontes de energia confiáveis, sustentáveis e modernas para todos. Até 2030, devem ser aumentados, substancialmente, a participação de energias renováveis na matriz energética global através do aumento de infraestrutura, desenvolvimento de tecnologia e incentivos políticos (ONU, 2023).

A energia solar é a fonte que apresenta o maior aumento anual de capacidade instalada no mundo. Isso se deve aos preços decrescentes nos últimos anos, à robustez tecnológica, ao vasto potencial técnico e à ausência de emissões de gases de efeito estufa durante a operação (IRENA, 2023).

No Brasil, essa tendência também se aplica devido aos altos índices de irradiação solar e à sua distribuição relativamente uniforme por todo o território nacional, a Figura 2 apresenta o mapa de irradiação do país, onde essa uniformidade pode ser observada. Isso permite o desenvolvimento de projetos solares viáveis em diferentes regiões, contribuindo para os compromissos do país na redução de gases de efeito estufa (PNE 2050, 2020).

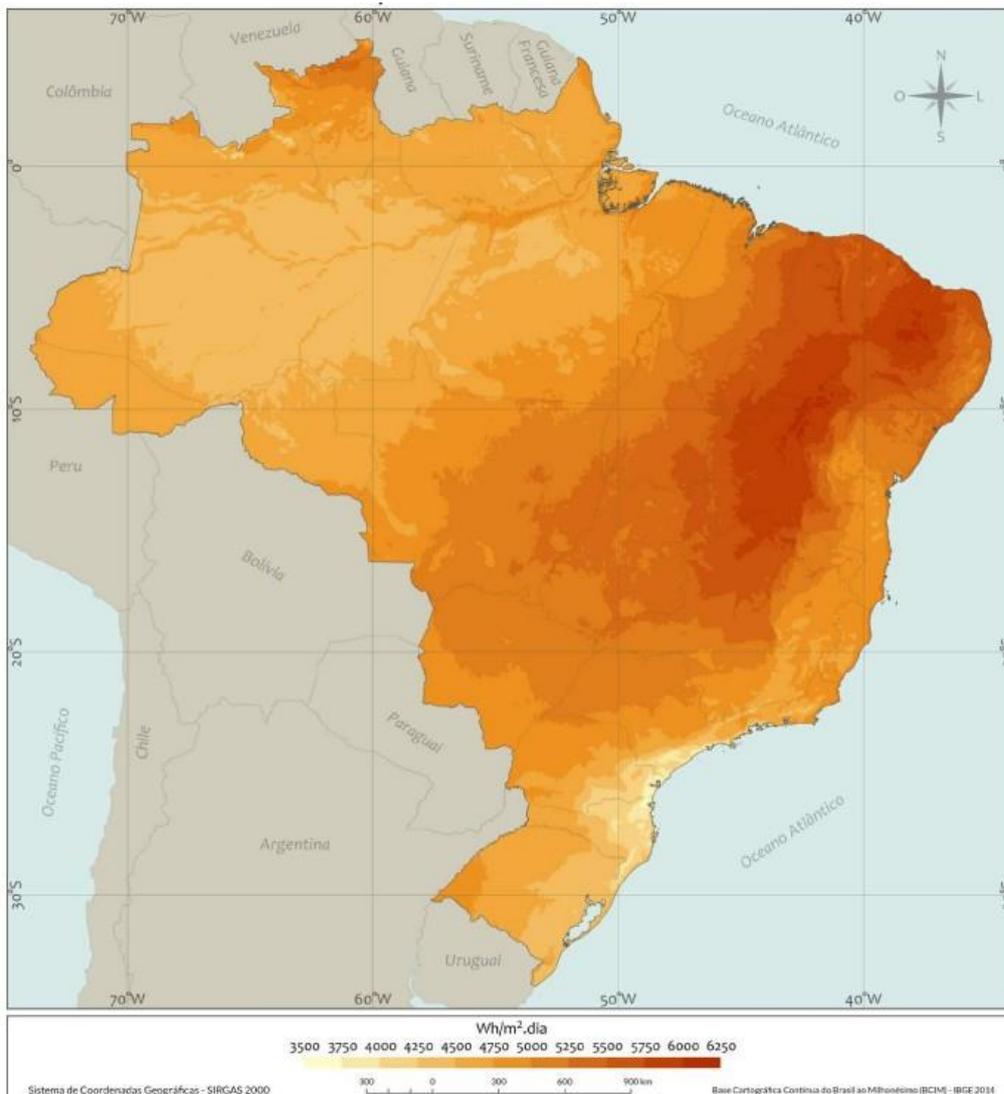


Figura 2 Mapa de Irradiação global horizontal do Brasil.

Fonte: Atlas brasileiro de energia solar, 2017.

O foco principal de análise e discussões sobre as relações entre morfologia urbana e sustentabilidade ambiental tem sido investigar se a forma das cidades e bairros pode determinar a sua eficiência energética, e conseqüentemente, seu menor impacto ambiental. Nesses termos, o potencial de geração de energia renovável dentro dos limites da cidade é um tema de crescente interesse e a energia solar parece ser uma alternativa simples e eficiente entre os recursos disponíveis.

Grande parte dos estudos realizados nos ambientes urbanos, apresentam uma análise individual das edificações, retirando uma pequena amostra de edificações ou ainda tendem a ser voltados para grandes empreendimentos de geração conectada à rede elétrica ou casos de sistemas locais isolados e muitas

vezes não consideram a morfologia urbana (VULKAN *et al.*, 2018; SILVESTRE *et al.*, 2014; SARETTA *et al.*, 2020; MENDIS *et al.*, 2020; ZOMER *et al.*, 2020; FREITAS *et al.*, 2020; SHIRAZI *et al.*, 2019; SUN *et al.*, 2021).

O crescimento das zonas residenciais, com regras urbanísticas estabelecidas pelos códigos municipais ou particulares (ex.: condomínios), não tem sido considerado, dessa forma, simplificando os diagnósticos e apresentando uma limitação, visto que fazer uma avaliação isolada, considerando apenas uma edificação sem identificar o impacto do entorno, vai refletir na eficiência do sistema de geração. Portanto, é importante que formas urbanas reais sejam testadas e avaliadas quanto a sua integração na arquitetura e quanto ao seu potencial de geração de energia.

Assim, a partir do reconhecimento da necessidade do uso de fontes renováveis para reduzir o impacto que a construção e o seu uso proporcionam; das características simples e da facilidade de aplicação da tecnologia FV; da demanda por tecnologia FV apresentada pelo setor residencial; dos poucos estudos que abordam a relação entre forma urbana e possibilidade de integração de módulos fotovoltaicos em edificações residenciais, esse trabalho de dissertação pretende avaliar o impacto que a morfologia urbana de uma zona residencial possui na geração de energia em um recorte urbano.

Parte-se do princípio de que a cidade de Pelotas possui uma expansão urbanística na região do Laranjal e que o recorte urbano da localidade possui baixa densidade, construções agrupadas de forma regular e homogênea. Assim, sugerem as seguintes questões a serem respondidas por essa pesquisa:

A morfologia urbana predominante na nova expansão da região administrativa do Laranjal possibilita o aproveitamento de todas as superfícies da construção para a aplicação de BIPV?

Quais as restrições que a morfologia urbana apresenta quanto a aplicação do BIPV?

## 1.2 **Objetivos**

### 1.2.1 **Objetivo Geral**

Este trabalho busca identificar o impacto da morfologia urbana na geração de energia solar FV por meio de BIPVS em área residencial com baixa densidade.

### 1.2.2 **Objetivos Específicos**

1. Analisar parâmetros equivalentes entre diferentes áreas condominiais e de loteamentos em uma zona de expansão da cidade de Pelotas-RS;
2. Desenvolver modelos gráficos representativos dos índices encontrados com mais frequência nesta zona;
3. Avaliar o impacto da morfologia urbana na incidência de radiação solar nas superfícies verticais e horizontais;
4. Verificar a capacidade de geração solar FV das superfícies para o pior e para o melhor modelo estudado;
5. Propor alternativas no planejamento de novos empreendimentos residenciais de forma a maximizar a capacidade de geração dos sistemas BIPV.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Energia solar fotovoltaica no mundo

Atualmente, a maior parte da energia consumida mundialmente vem do petróleo, do carvão e do gás natural (ABSOLAR, 2023). O crescimento da população implica em um aumento da demanda energética, aliada as pressões econômicas e industriais pelo desempenho. Estes fatores reforçam a necessidade de explorar as fontes renováveis de energia. Uma das tecnologias de energia renovável mais promissoras é a energia FV.

A energia FV é um meio de produzir eletricidade no local a partir do sol, sem preocupação com o fornecimento de energia ou danos ambientais (RUTHER, 2004). É estimado que o total de energia consumida pelos humanos em um ano é igual a apenas uma hora de energia solar absorvida pela terra. O sistema solar FV produz eletricidade a partir da luz solar, silenciosamente e com pouca ou nenhuma manutenção, sem poluição e sem esgotamento significativo dos recursos materiais (ZOMMER *et al.*, 2022).

A geração FV segue aumentando sua participação na composição da produção de energia em todo mundo. Segundo relatórios da IEA (2023), a tecnologia solar ultrapassou o recorde de 270 TWh em 2022 (aumento de 26%), atingindo quase 1.300TWh gerados. A energia solar FV representou 4,5% da geração global de eletricidade e continua sendo a terceira maior tecnologia de eletricidade renovável, atrás apenas da energia hidrelétrica e eólica, e está se tornando a opção mais barata para a nova geração de eletricidade na maior parte do mundo, o que deve impulsionar o investimento nos próximos anos (IEA 2023).

A China foi responsável por cerca de 38% do crescimento da geração solar FV em 2022. O segundo maior crescimento de geração, cerca de 17% do total, foi registrado na União Europeia e o terceiro maior nos Estados Unidos (15%). As centrais de grande escala foram responsáveis por 52% do acréscimo global de capacidade solar FV em 2022, seguida pelo comercial e industrial (25%) e segmento residencial (23%), (IEA, 2023).

No Brasil, as fontes renováveis representam 92,1% da matriz elétrica, muito superior ao observado no resto do mundo. Segundo o Balanço Energético

Nacional (BEN) de 2023, a geração solar atingiu 16,8 TWh, o que representou um avanço de 55,9% em relação ao ano anterior.

## 2.2 Geração distribuída no Brasil

Geração distribuída é a geração de eletricidade que ocorre junto ou próximo ao ponto de consumo. Esse processo de produção de energia, que utiliza geradores de pequeno porte, se opõe ao modelo de geração centralizada, que se caracteriza, principalmente, por usinas hidrelétricas e termelétricas, afastadas de centros urbanos e que necessitam transmitir energia para as unidades consumidoras através de linhas de transmissão e distribuição, acarretando perdas energéticas pelo caminho. Existem diversas formas de utilizar a geração distribuída no Brasil a partir de fontes renováveis, tais como: energia solar, eólica, biomassa e hídrica (GREENER, 2023).

A opção de utilizar os sistemas FV com geração distribuída apresenta alguns benefícios para as concessionárias, já que ocorre a adição de energia à rede, reduzindo as perdas por transmissão e pela postergação dos custos de expansão, visto que o sistema pode ser instalado e dar suporte de capacidade a um alimentador considerado crítico para o sistema convencional (SANTOS, 2009).

O modelo de geração distribuída foi criado no Brasil em 2004 pelo decreto Lei nº 5163 do Governo Federal, mas foi em 2015 através da Resolução Normativa Nº 482/2012 que a geração distribuída se tornou acessível à sociedade brasileira, permitindo o acesso à rede de distribuição de baixa tensão por consumidores comuns, com o objetivo de produzir energia elétrica para autoconsumo.

Em 2015, a REN 482/2012 passou por uma revisão e foi ampliada pela REN 687/2015 e em 2022 foi publicada a Lei 14.300 que institui o Marco Legal da Geração Distribuída. O marco legal coloca o Brasil um passo à frente no processo de transição energética. A criação do Marco Legal possibilita o consumidor compensar a energia elétrica na sua conta de luz por meio de sistemas de micro ou minigeração distribuída (MMGD). Ele garante um avanço brasileiro se tratando de sustentabilidade, competitividade e inovação (ANEEL, 2015).

Mesmo o mercado ter sido regulado anteriormente pela REN 482/2012, uma resolução normativa da Aneel não é suficiente para trazer segurança jurídica necessária para o crescimento sustentável da MMGD. Dessa forma, o Marco Legal representará uma base legal e regulatória mais robusta trazendo não apenas segurança jurídica, mas também mais estabilidade e previsibilidade para o mercado, preservando investimentos realizados e a expectativa no retorno de investimentos futuros, garantindo o direito do consumidor em gerar sua própria energia e reduzir sua conta de luz e reconhecer a MMGD como estratégia para a política energética nacional (ANEEL, 2022).

Fica definido na Lei 14.300/ 2022 que a microgeração distribuída pode ter potência instalada até 75kW e a minigeração distribuída pode ter potência acima de 75kW e menor ou igual a 3MW (podendo ser até 5MW em situações específicas). Ambas são conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (BRASIL, 2022).

O sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) permite que o restante de energia de MMGD fotovoltaico de dia seja injetada para a rede e, no período da noite, a rede devolve para a unidade consumidora a energia e supre as necessidades adicionais. A rede funciona como uma espécie de bateria armazenando o excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora. Quando a energia gerada em determinado mês é superior à quantidade utilizada para abater a energia consumida naquele período, o consumidor fica com um crédito de energia que pode ser distribuído no mesmo mês a outras unidades consumidoras ou transformar em uma compensação do consumo dos meses seguintes. De acordo com as regras, o prazo de validade dos créditos é de 60 meses.

Entre as modalidades de participação no SCEE, estão:

- Autoconsumo local: a energia é gerada e compensada no mesmo local onde é instalada a MMGD;
- Autoconsumo remoto: a energia pode ser gerada em um local e compensada em outro, desde que em unidades consumidoras de mesmo titular;
- Geração distribuída em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras: a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens ou ordem de prioridades definidas pelos próprios consumidores;

- Geração compartilhada: diversos interessados podem se unir por meio de consórcio, cooperativa, condomínio edilício ou qualquer outra forma de associação civil, instituída para esse fim para instalar uma ou mais centrais de MMGD e utilizar a energia gerada para a compensação do consumo de todos os participantes.

A ANEEL não estabelece o custo dos equipamentos de geração e tampouco condições de financiamento. Portanto, o consumidor deve analisar a relação custo/benefício para instalação de MMGD com base em diversas variáveis tais como: o tipo da fonte de energia, tecnologia dos equipamentos, porte da unidade consumidora e da central geradora, localização, valor da tarifa e regras de compensação à qual a unidade consumidora estará submetida, condições de pagamento/financiamento do projeto e existência de outras unidades consumidoras que possam usufruir dos excedentes do SCEE.

Por fim, em relação aos custos, para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será feito o pagamento referente ao custo de disponibilidade, valor em reais equivalente a 30kWh (monofásico), 50kWh (bifásico) ou 100kWh (trifásico). Já para os consumidores conectados em alta tensão (grupo A), a parcela de energia da fatura poderá ser zerada (caso a quantidade de energia injetada ao longo do mês seja maior ou igual à quantidade de energia consumida), sendo que a parcela da fatura correspondente à demanda contratada será faturada normalmente (ANEEL, 2022).

Em 2023 a Lei 14.300 determina uma tarifa progressiva referente ao Fio B. A Tarifa de Energia compreende todos os custos com a aquisição da Energia; já a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) abrange os custos de transmissão e distribuição. Dentro da TUSD, temos o FIO A, que é a transmissão, e o FIO B, que são os custos para a distribuição de energia (ANEEL, 2022).

Portanto a partir de 2023 a tarifa FIO B passou a ser cobrada quando a energia resultante é injetada na rede, ou seja, quando a energia produzida não for totalmente consumida e o que sobrar for direcionada a rede pública. Fica definido, então, um aumento de 15% a partir de janeiro de 2023 e progressivamente o aumento 30%, 45%, 60%, 75% e 90 % até o ano de 2028,

após esse período a ANEEL irá definir como será a taxa FIO B para o futuro (ANEEL, 2022).

### 2.3 Geração distribuída através da energia solar no Brasil

Dentre as fontes renováveis, a energia solar FV é a mais utilizada para a geração própria de energia no Brasil. Segundo a ANEEL (2023), cerca de 99% dos geradores distribuídos são FV e estão espalhados por todas as regiões do Brasil. A potência instalada em geração solar distribuída ultrapassou 12GWp no ano de 2022.

Em 2022 a quantidade de sistemas FV instalados cresceu 84,9% em relação a 2021, atingindo 1,6 milhões de instalações em todo o país. Segundo o relatório de 2023 da ANEEL, 82% das unidades consumidoras que recebem créditos de energia se enquadram no modelo de negócio de geração local na unidade consumidora, enquanto 17% se enquadram no modelo de autoconsumo remoto.

A parcela de clientes residenciais aumentou de 49% em 2021 para 56% em 2024. O gráfico apresentado na Figura 3 mostra que a maior parte das instalações FV pertencem a pessoas físicas (residências) e apenas 24% pertencem ao setor comercial. Essa recuperação de crescimento na classe residencial pode ser atribuída aos preços mais baixos dos sistemas FV, queda de juros e retomada gradual do interesse do consumidos (GREENER, 2024).

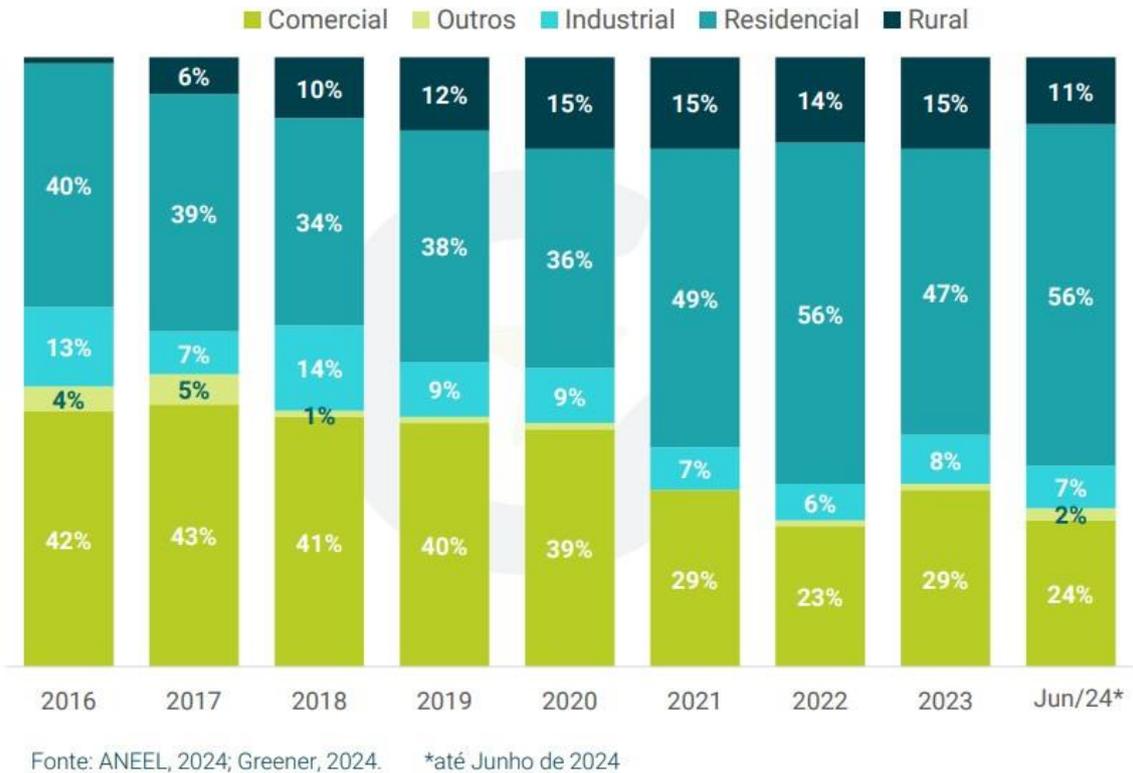


Figura 3 Representatividade e classe de consumo da GD

Fonte: Greener, 2024

Os preços dos sistemas FV apresentaram uma queda média de 8% em 2024 devido ao aumento mundial da produção da matéria prima e da crescente demanda por módulos. Houve ainda uma aceleração no volume de projetos fotovoltaicos em desenvolvimento em 2023, apesar do maior custo de capital, sendo o principal fator impulsionador a mudança no critério de compensação (pagamento da TUSD linha B) para os projetos que solicitam conexões a partir de 2023 em diante (GREENER, 2024).

Ainda que o início da transição das regras preveja um aumento gradativo no pagamento da TUSD linha B, remunerando as operadoras de rede, em geral, os sistemas FV continuam atrativos para o consumidor final dado o baixo impacto no retorno do investimento para sistemas que utilizam a geração local, que representa a maior capacidade instalada atualmente.

#### 2.4 Geração de energia nas edificações

Nos últimos anos, tornou-se evidente que produtos BIPV mais sofisticados e eficientes estão disponíveis no mercado, com novos padrões de qualidade e

desenvolvidos para garantir sua adequação como componentes de construção e melhor desempenho técnico e econômico (CERÓN *et al.* 2013; SHUKLA *et al.* 2016; SHUKLA *et al.* 2017).

Além disso, a integração de sistemas FV em edificações é uma estratégia de aproveitamento da radiação solar alinhada aos critérios internacionais de sustentabilidade e à política de uso de energia renovável, que busca maior eficiência energética (HESTNES *et al.* 2003; SCOGNAMIGLIO *et al.* 2012). Segundo Kibert (2016), o conceito básico de eficiência energética é a redução da demanda de energia, ou seja, energia mais barata e menos consumida. Isso mostra que o primeiro desafio ao projetar um edifício onde será aplicado um sistema BIPV será oferecer condições de conforto interno, bem como atender a outros requisitos de funcionalidade com o menor consumo de energia possível.

Existem alguns estudos que apontam que cerca de 80% das decisões de projeto que influenciam o desempenho energético de um edifício são feitas por arquitetos na fase inicial do projeto, enquanto os 20% restantes do projeto são feitos por engenheiros durante a fase posterior (FREITAS *et al.*, 2020).

Alcançar a eficiência energética em edificações exige integrá-las de forma consciente e respeitando o meio ambiente, considerando o clima local e os recursos naturais disponíveis. As edificações possuem diversas funcionalidades como ventilação e iluminação natural, proteção contra umidade, resistência térmica e ao vento, proteção visual e física, função de barreira acústica, entre outras. Além disso as envolventes dos edifícios configuram os espaços públicos, caracterizam as cidades e estão intrinsecamente ligadas ao modo de vida da sociedade (FREITAS *et al.*, 2020).

Projetar, construir ou reformar um edifício requer experiência e conhecimento de muitas áreas profissionais, ao adicionar um sistema BIPV a dimensão de complexidade aumenta em um processo que já é multidisciplinar. Diversos estudos apontam que para aplicações bem-sucedidas de BIPV é preciso colaboração entre os agentes envolvidos no processo de projeto e construção (SHUKLA *et al.*, 2016; MONTORO *et al.*, 2008). Uma estratégia de design adequada deve encontrar um equilíbrio entre a geometria do edifício e as necessidades de geração de energia. Deve sempre aproveitar ao máximo a irradiação solar, evitando sombreamento (YANG *et al.*, 2007; CHENG *et al.*, 2009). Os requisitos básicos do BIPV podem afetar o projeto arquitetônico de

diversas maneiras, devido à orientação e localização do terreno e também a sua forma e sistema construtivo, exigindo em alguns casos uma nova configuração do projeto arquitetônico do edifício (CHIVELET *et al.*, 2007; SCOGNAMIGLIO *et al.*, 2012). Diferentes requisitos de projeto, como materiais, componentes e estratégias energéticas têm sido estudadas para buscar as melhores soluções de projeto de arquitetura e engenharia. O trabalho de Sorgato *et al.* (2018) questionou os aspectos técnicos e econômicos da aplicação de BIPV substituindo matérias convencionais de fachadas e telhados em edifícios de escritório em climas ensolarados, como o Brasil. Utilizando um prédio de quatro andares como exemplo e utilizando os simuladores *EnergyPlus* e o *PVSyst*, foi verificado que a energia produzida pelos telhados e fachadas BIPV atenderam as demandas de energia elétrica em seis cidades brasileiras, mesmo quando os sistemas não estavam inclinados e orientados idealmente.

Em um trabalho de análise técnico-econômico, Shirazi *et al.* (2019) avaliou as fachadas de edifícios com os módulos fotovoltaicos instalados mostrando que é possível alcançar em latitudes norte um aumento na geração de energia, e rentabilidade econômica em fachadas sul. A análise foi feita com três parâmetros usando o *Grasshopper*. O primeiro algoritmo selecionou a fachada e superfícies que recebem mais de 1.000 kWh/m<sup>2</sup> de energia solar média anual de radiação. O segundo algoritmo calculou o ângulo de inclinação ideal e por fim, o terceiro parâmetro avaliou o desempenho econômico com base em índices financeiros.

A implantação bem-sucedida de sistemas FV em ambientes urbanos requer uma avaliação do potencial FV do local. Isso depende diretamente da exposição local a luz solar. A radiação que atinge um ponto ao longo de um período de tempo varia de acordo com fatores locais, espaciais, temporais e meteorológicos. A utilização de modelos urbanos georreferenciados associados a ferramentas de radiação solar para determinar a radiação solar incidente é interessante uma vez que permite considerar as sombras dos edifícios do entorno ou outras características topográficas (REDWEIK *et al.*, 2013).

Investigar os traçados urbanos é um dos fatores essenciais no desenvolvimento de áreas urbanas mais sustentáveis. No trabalho de Domingos *et al.* (2022) três cenários urbanos são criados para a cidade de Cuiabá, no Brasil, os cenários possuem quatro prédios de quatro pavimentos que se

diferenciam pelo tamanho das vias de cada cenário. As larguras foram definidas baseado nos tipos de vias mais encontrados na cidade. O estudo explora o impacto das larguras das ruas no consumo energético de edificações, mesmo não sendo o tema dessa pesquisa é interessante acompanhar os resultados com o intuito de otimizar o uso de energia solar de acordo com a morfologia urbana.

Quando comparado os resultados por pavimentos o estudo mostra que a partir do segundo pavimento o afastamento dos prédios aumenta a exposição à radiação solar e conseqüentemente o consumo de energia também acompanha esse afastamento (DOMINGOS *et al.*, 2022).

Leea *et al.* (2015) realizaram um estudo de viabilidade sobre a relação entre densidade habitacional e acessibilidade solar. A pesquisa realizou diversas simulações para investigar as relações entre as condições climáticas e o potencial solar, manipulando fatores de projeto relacionados a densidade, incluindo tipologia, layout e cobertura do local, e o número de pavimentos. O processo da pesquisa foi feito por simulação computacional e avaliados dois tipos de cenários: i) três áreas urbanas distintas foram comparadas para mostrar a gama de potencial solar pela variação da densidade habitacional e ii) 24 modelos genéricos de habitações baixas, médias e altas foram analisados de acordo com a mudança relacionados a densidade.

Nesse estudo, o limite de aplicação de FV foi definido a 800 kWh/m<sup>2</sup> para fachadas de edifícios e 1000kWh/m<sup>2</sup> para coberturas. Os resultados mostram que a quantidade de irradiação solar que atinge a fachada do edifício está inversamente relacionada com a densidade: quanto menor a densidade, maior o potencial solar. Por outro lado, a densidade tem menos efeito no potencial solar da cobertura, onde o clima desempenha um papel mais influente (LEEA *et al.*, 2015).

## 2.5 Radiação solar

Um dos fatores que mais influenciam a geração fotovoltaica é a disponibilidade de radiação solar, termo utilizado para indicar a transmissão de energia por meio do espaço. Irradiação solar é o termo utilizado para a exposição à radiação (ZOMMER, 2010).

Na superfície da Terra, a radiação solar depende da localização geográfica do local, ou seja, a combinação de longitude e latitude. Uma cidade localizada próxima à Linha do Equador nunca receberá a mesma quantidade de irradiação anual que uma cidade mais afastada, em outras palavras, essa irradiação não atinge a Terra de modo uniforme, trazendo vantagens para países tropicais, como Brasil, para o aproveitamento da energia do sol (ZOMER e CUSTÓDIO, 2022).

O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA, 2012) reúne dados e ferramentas de análise do recurso solar e eólico desenvolvidos em conjunto com diversas organizações internacionais. Os conteúdos disponíveis no site do SWERA estão ao dispor do público e são destinados a apoiar o trabalho dos diversos profissionais tomadores de decisões envolvidos com o setor energético. No Brasil e na América Latina a coordenação das atividades ficou sob a responsabilidade do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).

O INPE publicou, como um dos resultados do projeto SWERA, o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) que apresenta mapas solamétricos do país e dados referentes a irradiação solar. Nos mapas é possível verificar as médias diárias de incidência solar para todo o território nacional. No Brasil, as superfícies com a inclinação igual a latitude local e voltadas para o Norte apresentam médias diárias anuais acima de 4200 kWh/m<sup>2</sup> para todo o território nacional, chegando a valores acima de 6700 kWh/m<sup>2</sup> nas regiões com maior nível de incidência solar anual.

O Brasil possui um potencial muito grande para a utilização de sistemas fotovoltaicos, o local com a menor incidência de irradiação solar no país ainda recebe 40% mais energia que a melhor região da Alemanha, a pioneira no uso da tecnologia FV em larga escala (SALAMONI *et al.*, 2019).

A irradiação solar que atinge um módulo FV é composta por um espectro com diferentes comprimentos de onda. A irradiação direta é aquela que provém diretamente do sol e atinge o objeto. A irradiação difusa é proveniente da atmosfera. A soma da irradiação direta com a difusa é a irradiação global. O albedo é a irradiação proveniente da refletância da camada de cobertura do solo e de seu uso (PEREIRA *et al.*, 2017).

A partir dos mapas solamétricos do país, para a cidade de Pelotas - RS, cidade objeto deste estudo, o nível de irradiação é cerca de 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia a 31° de inclinação (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017).

A inclinação de um módulo em ângulo igual a latitude local e orientado ao norte possibilita o maior aproveitamento da energia solar, isso é ocasionado pela inclinação do eixo terrestre em relação a órbita solar. O posicionamento dos módulos em diferentes posições, inclinação e orientação, acarretam perdas no potencial de geração, mas não inviabilizam essas opções. Ao escolher os módulos é necessário considerar as questões arquitetônicas e também o potencial de geração.

Apesar de refletir no potencial de geração ainda assim, é possível adotar a tecnologia FV não orientadas e inclinadas de maneira ideal. O desenvolvimento de módulos de várias tecnologias e em vários tamanhos e modelos e ainda a possibilidade de conectar geradores FV à rede pública permitem adaptar e integrar esses geradores em todas as superfícies da edificação.

Santos e Ruther (2014) realizaram um estudo sobre as limitações e possibilidades de integrar o fotovoltaico em áreas de superfícies que não são idealmente orientadas e inclinadas em diferentes capitais do Brasil. O resultado do estudo demonstrou que as variações de inclinação e orientação não causaram grandes perdas anuais de irradiação até cerca de 20° de inclinação. Mostrando para planejadores de sistemas fotovoltaicos que, sob condições bastante flexíveis, é possível instalar o sistema em qualquer orientação, mantendo os altos níveis de irradiação anual, e que as limitações de orientação e inclinação podem ser relativamente baixas.

Ainda neste estudo, ficou registrado que na região Norte e Nordeste do Brasil, com variações de 20° de inclinação os níveis de irradiação solar atingiram uma porção de 95% para qualquer orientação. Os desvios azimutais do Norte verdadeiro resultaram em perdas insignificantes de geração de energia para a mesma variação de até 20°. Em ângulos de inclinação de até 35°, uma fração ainda alta (90%) dos níveis máximos de irradiação solar atingirá os módulos FV em qualquer azimute. Regiões do Centro e Norte, os altos níveis de irradiação solar podem ser obtidos para ângulos de inclinação de até 35°, se os desvios azimutais forem mantidos abaixo de 60. As regiões Sul, local de estudo dessa pesquisa, e Sudeste possuem a maior restrição para a orientação e inclinação

para obter os 95% de nível máximo de irradiação solar. Desvios azimutais de até 60° são admissíveis para perdas máximas de 5% se os ângulos de inclinação forem mantidos entre uma inclinação mínima de cerca de 5° e 25°. Para superfícies voltadas para o norte verdadeiro, os ângulos de 35° são admissíveis para obter os 95% do nível máximo de irradiação.

## 2.6 Edifícios fotovoltaicos e energia zero

Os edifícios com o conceito de *Quase/ Net Zero Energy Building* (NZEB) tem como princípio fundamental a redução das necessidades energéticas das edificações por meio de medidas eficientes e utilizar fontes renováveis para suprir a demanda energética. O termo NZEB pode ser usado para se referir a edifícios conectados à rede elétrica, enquanto *Zero Energy Building* (ZEB) é mais geral e pode incluir edifícios autônomos desconectados da rede. A palavra “Net” enfatiza o fato de que há um equilíbrio entre a energia recebida e a enviada para as redes de energia durante um certo período (RESENDE *et al.*, 2020).

Uma construção eficiente, com baixo consumo energético, que no final do ciclo de um ano possa ser capaz de gerar mais energia que o seu consumo passa a ser chamada de PEB - *Positive Energy Building* (BENDER, 2018).

Desde o final de 2020, todos os novos edifícios na Europa devem ser classificados como edifícios de energia quase zero (nZEBs). Este novo paradigma energético é uma revolução para a arquitetura e também para a energia fotovoltaica no mundo todo, mas há obstáculos culturais e técnicos que deverão ser superados. É necessário repensar em como os edifícios são concebidos e como é projetado o sistema fotovoltaico. A energia fotovoltaica ganha cada vez mais relevância no desenho dos ZEBs graças as suas características e potencialidades entre elas a adequação para qualquer tipo de demanda energética e a facilidade de integração (SCOGNAMIGLIO e ROSTVIK, 2012).

Através da *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) 2010/31/EU foram estabelecidas diretrizes que exigem a geração local nas edificações, sejam elas novas construções ou em um processo de reforma, com o objetivo de alcançar o consumo quase zero de energia nas unidades (EPBD, 2010).

A fim de acompanhar a tendência de redução do consumo de energia, a União Europeia (EU) introduziu o conceito de *Quase/NET Zero Energy Building* (NZEB) por meio da reformulação da Diretiva de desempenho Energético dos Edifícios (EPBD). Isso resultou em alterações nos códigos de construção dos Estados Membros (EM) da EU, estabelecendo que todos os novos edifícios devem atender aos requisitos de NZEB a partir do final de 2020. O NZEB é considerado um passo antes de alcançar o conceito de Edifício de Energia Zero (RESENDE *et al.*, 2020).

A definição e aplicação prática de NZEB são de responsabilidade dos Estados Membros. Eles devem determinar, por exemplo, o que constitui um desempenho energético muito elevado e qual é a contribuição recomendada de energia de fontes renováveis. No caso de edifícios residenciais, a maioria dos EM tem como objetivo limitar o consumo de energia primária a 50kWh/m<sup>2</sup>ano. A recomendação da Comissão Europeia para os padrões de referência do NZEB varia de acordo com a região, dividindo o continente em cinco zonas climáticas (Mediterrâneo, Nórdico, Português, Espanhol e Italiano). As regiões mais quentes permitem valores mais baixos, enquanto regiões mais frias permitem valores mais altos (EUROPEAN COMMISSION, 2016).

Resende *et al.* (2020) realizaram um estudo avaliando a adequação de certos requisitos do sul da Europa para algumas regiões brasileiras, buscando entender como o Brasil pode se beneficiar das discussões, mais avançadas sobre o conceito de NZEB nesses países europeus e refletir sobre as possibilidades de alcançar o balanço anual de energia zero para atingir o conceito de NZEB.

No Brasil, assim como na Europa, há uma ampla variedade de climas, o que traz diversas oportunidades e desafios para a redução da demanda energética. É preocupante observar o aumento do consumo de energia dos lares brasileiros nos últimos anos e a perspectiva de um aumento ainda maior devido à necessidade de climatização. Isso faz com que seja urgente a implementação de um regulamento que promova a rápida adoção de edifícios de consumo energético quase nulo (NZEB) ou, pelo menos, a incorporação de princípios de edifícios de consumo energético quase zero (RESENDE *et al.*, 2020).

Segundo Scognamiglio e Rostvik (2012) a pesquisa de engenharia levando em consideração apenas os aspectos energéticos não é suficiente para

garantir a difusão dos modelos ZEB, o arquiteto tem um papel importante para criar a revolução porque a forma dos edifícios e cidades devem mudar devido a esse novo requisito energético. Os edifícios precisarão ser projetados para necessitar de pouca energia (estratégias de projeto passivo para eficiência energética) e para integrar superfícies ativas (módulos fotovoltaicos) para geração de energia.

A energia que se utiliza deve ser vista como uma variável capaz de se relacionar com a forma dos edifícios, com as cidades e paisagens, em vez de ser vista como uma espécie de variável abstrata com a qual o design não pode lidar. É necessário considerar não apenas o espaço que se usa diretamente, mas também os espaços necessários para fornecer energia elétrica e térmica de fontes renováveis: a superfície necessária para colocar os dispositivos de geração de energia (SCOGNAMIGLIO *et al.*, 2011).

## 2.7 Morfologia Urbana e o impacto no BIPV

A implantação eficaz de painéis solares integrada em edifícios (BIPV), depende do ambiente construído e da morfologia urbana geral. Devido ao sombreamento dos prédios vizinhos, nem todas as superfícies das edificações são adequadas para instalação fotovoltaica.

Segundo KH Poon *et al.* (2020), morfologia urbana significa “a ciência da forma e estrutura urbana”, é o estudo do tecido físico (construído) da forma urbana, das pessoas e dos processos que a moldam. Diferente do desenho urbano, a morfologia urbana é a análise da realidade existente, enquanto o desenho urbano visa determinar a forma urbana futura.

A morfologia urbana na escala do bairro tem um impacto significativo na geração de eletricidade por painéis fotovoltaicos instalados na cobertura e na fachada do edifício, mas quando os estudos morfológicos são realizados não é possível fornecer modelos replicáveis e transponíveis, pois cada cidade é diferente uma da outra. É necessário compreender as regras urbanísticas de cada localidade assim como a latitude local. Existem alguns estudos que buscam entender a morfologia urbana e a irradiação solar de edifícios em diversos contextos urbanos por meio de estudo paramétrico. Estimar o potencial de geração fotovoltaica é importante e o resultados dos estudos podem fornecer

aos planejadores urbanos alguns indicadores que afetariam o potencial de energia solar para a edificação.

Cheng et al. (2006) realizaram uma pesquisa sobre o desenho urbano sustentável para a cidade de São Paulo/SP, Brasil. Os autores investigaram as relações entre forma urbana construída, densidade e potencial solar. Dezoito modelos genéricos representando uma variedade de formas e densidades construídas foram comparadas quanto ao desempenho da luz do dia e o potencial solar. Uma de suas recomendações mais importantes para o planejamento de cidades foi a aleatoriedade no arranjo horizontal, ou seja, para uma mesma área de terreno é desejável uma organização dispersa, com volumes distribuídos de forma aleatória, com distâncias e agrupamentos variados, do que uniforme. Em segundo lugar, arranjos com edifícios mais altos e com menor cobertura do terreno, e com mais espaços abertos são melhores do que aqueles com edifícios mais baixos e com maior cobertura do terreno. Por fim, o arranjo vertical aleatório também deve ser incentivado, mas para isso as regulamentações deveriam ser mais flexíveis em relação as alturas.

O trabalho Sorralde *et al.* (2015) teve como objetivo identificar a relação entre morfologia urbana e potencial solar na criação de cidades mais adequadas para a captação de energia solar e através de um exercício teórico foram estipulados parâmetros para explorar se o potencial solar dos envelopes de edifícios poderia ser otimizado pela introdução de mudanças na morfologia urbana dos bairros.

Para isso, foram quantificadas 18 características da morfologia urbana de Londres e categorizou esses dados em cinco grupos, são eles: 1) Tipologia da construção; 2) Distribuição vertical e horizontal; 3) Uso do terreno; 4) Geometria do edifício e 5) Distância média entre edificações. A ligação entre as características morfológicas e a radiação solar simulada é encontrada por análise estatística e então um modelo de otimização é construído. Os resultados do estudo mostram que, com a combinação otimizada de parâmetros morfológicos, a irradiação solar nos telhados e fachadas podem ser aumentadas em 9% e 45%, respectivamente (SORRALDE *et al.*, 2015).

No trabalho de Bensehla *et al.* (2021), foram discutidos o efeito da forma urbana nas necessidades energéticas e como a produção fotovoltaica nos telhados pode reduzir as necessidades energéticas nos cenários atuais e futuros

(2050). O estudo foi realizado em uma cidade da Argélia que possui alta intensidade de radiação solar e longos períodos de sol e céu limpo durante o dia.

Quatro amostras de forma urbana foram retiradas da cidade e mesmo com variação de densidade urbana, da altura dos edifícios, da inclinação do terreno ou da orientação das ruas foi possível perceber um potencial solar significativo na área dos telhados. As simulações realizadas também mostram que no futuro as temperaturas serão mais elevadas no verão aumentando a procura de eletricidade para o arrefecimento, ao mesmo tempo que diminuirão a eficiência fotovoltaica instalada inicialmente, exigindo uma capacidade extra instalada para satisfazer a procura futura de energia.

Gavira *et al.* (2013) analisaram o potencial de aplicação de painéis FV em fachadas em diferentes configurações urbanas. Foram adotadas três tipologias urbanas para avaliação de um bairro: 1) Mista, possuindo edificações com diferentes alturas; 2) Uniforme, com edificações de alturas iguais; 3) Miolo de quadra, as edificações possuem alturas iguais, porém são posicionadas apenas na periferia da quadra, deixando um espaço interno vazio; combinadas com as taxas de ocupação de cada volume edificado.

Os resultados obtidos demonstram que os modelos uniformes apresentam a melhor relação entre demanda e geração. Os modelos de miolo de quadra, devido a área de cobertura reduzida tiveram um decréscimo no desempenho, embora o vazio central ofereça altos níveis de acessibilidade solar nas fachadas.

## 2.8 Simulação Computacional

A simulação computacional é uma ferramenta que permite criar modelos virtuais do mundo real e executá-los em um ambiente controlado. As simulações ajudam a prever como uma situação se comportará em diferentes condições, testar hipóteses e tomar decisões permitindo a avaliação das consequências, os pontos fracos ou a ineficiência de determinado estudo. Com base nos resultados da simulação, é possível propor melhorias e otimizar o desempenho do objeto de estudo.

Existem diversas discussões sobre as ferramentas mais rápidas para otimizar a fase inicial de projeto. Pernato *et al.* (2017) utiliza o programa *Grasshopper* para estimar diferentes layouts PV possíveis vinculando ao

*CitySim*, uma ferramenta de simulação de construção estabelecida para ambientes urbanos (BPS). Eles alegam que em comparação a outros BPS utilizados em *softwares* utilizar a ferramenta paramétrica como um plug-in diminui significativamente os parâmetros de entrada e esforço computacional. Costanzo et al. (2018) realizou estudos utilizando a modelagem 3D com o ambiente *Rhino CAD* vinculado ao *Grasshopper plus Radiance* acoplado ao DIVA, *software* especificamente utilizado para estimar a quantidade de irradiação solar em coberturas e fachadas.

É bastante comum que mais de uma ferramenta de simulação sejam utilizadas durante o processo de projeto do BIPV, e essas ferramentas frequentemente não são interligadas umas às outras. A avaliação de irradiação solar e simulações fotovoltaicas podem ser realizadas utilizando softwares como o *PVSyst*, *EnergyPlus* e outros, a maioria dos quais não possuem uma interface convidativa e não interagem com o pensamento arquitetônico e acabam sendo indicados para a utilização em projetos em fases mais avançadas em vez da fase inicial de projeto.

Salimzadeh et al. (2020) alertam que os escritórios de arquitetura têm cada vez mais utilizado o design 3D paramétrico e ferramentas BIM como o *Rhinoceros* e *REVIT*, embora sejam poderosas ferramentas de projeto e análise de edifícios devido ao fato de fornecerem informações detalhadas sobre os componentes, seu uso para simular superfícies específicas de edificações apresenta limitações quanto a forma como os dados semânticos são processados para análise solar. Pabasara et al. (2019) concluem ainda que nenhuma ferramenta lidará com todos os aspectos relacionados ao projeto e gerenciamento de um projeto, sendo necessário a utilização de complementos e *plugins*.

Freitas et al. (2020) em seu trabalho avaliam os *plugins Grasshopper* e *Ladybug* para modelagem 3D *Rhinoceros* no processo de projeto de *retrofits* de envelopes de edifícios institucionais na zona central de Brasília/DF, Brasil. A utilização desses programas demonstrou ser eficaz, gerando resultados para os primeiros esboços de projetos de BIPV devido à facilidade de aprendizado e operação das ferramentas. O estudo ainda salienta que as simulações podem ser realizadas com geometria simplificada.

De forma semelhante, o *Insight Solar Analysis*, um *plugin* integrado ao *Autodesk Revit*, também contribui para a análise e otimização energética no ambiente BIM. Essa ferramenta permite simular o desempenho energético de edifícios, com ênfase no aproveitamento de recursos renováveis, como a energia solar, além de identificar áreas com maior potencial para instalação de painéis solares (LE, 2022). Ambos os estudos destacam o papel de tecnologias digitais avançadas na viabilização de projetos sustentáveis e no uso eficiente de recursos renováveis.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Considerações iniciais

Este trabalho é um estudo exploratório que visa analisar se a relação entre morfologia urbana e o potencial solar pode ajudar a criar cidades mais eficientes, em termos de relação entre índices urbanísticos, volumetria e potencial de geração BIPV. É importante ressaltar que as variáveis da forma urbana envolvida nessa análise são fruto da exploração da morfologia urbana dos novos condomínios de lotes e novos loteamentos desenvolvidos no bairro do Laranjal, uma região em expansão na cidade de Pelotas- RS.

O potencial de geração de energia de sistemas BIPV é avaliado através de modelos criados a partir da análise dos índices urbanísticos propostos no Plano Diretor de Pelotas e nas normas construtivas específicas dos condomínios em estudo. Para tanto, foi utilizada a simulação computacional.

As etapas dessa pesquisa estão resumidas na Figura 4.

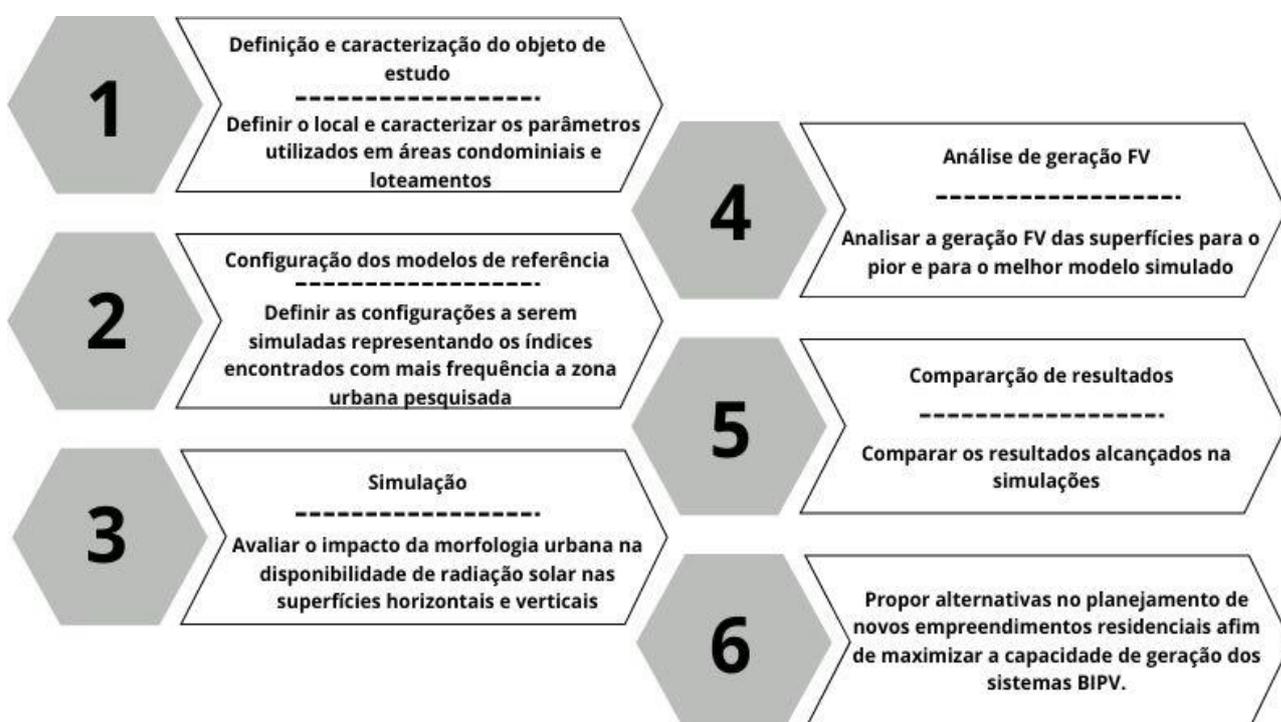


Figura 4 Delineamento da metodologia

Fonte: Autora,2024.

### 3.2 Caracterização do objeto de estudo

A cidade de Pelotas é localizada no extremo sul do país, possui uma economia baseada nas atividades de comércio e serviços, é um importante polo cultural e acadêmico na região sul do Brasil. A cidade abriga diversas instituições de ensino, incluindo a Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e a Universidade Católica de Pelotas (UCPel).

A zona Urbana de Pelotas divide-se em sete regiões administrativas, sendo elas: Centro, Fragata, Barragem, Três vendas, Areal, Laranjal e São Gonçalo (Figura 5).

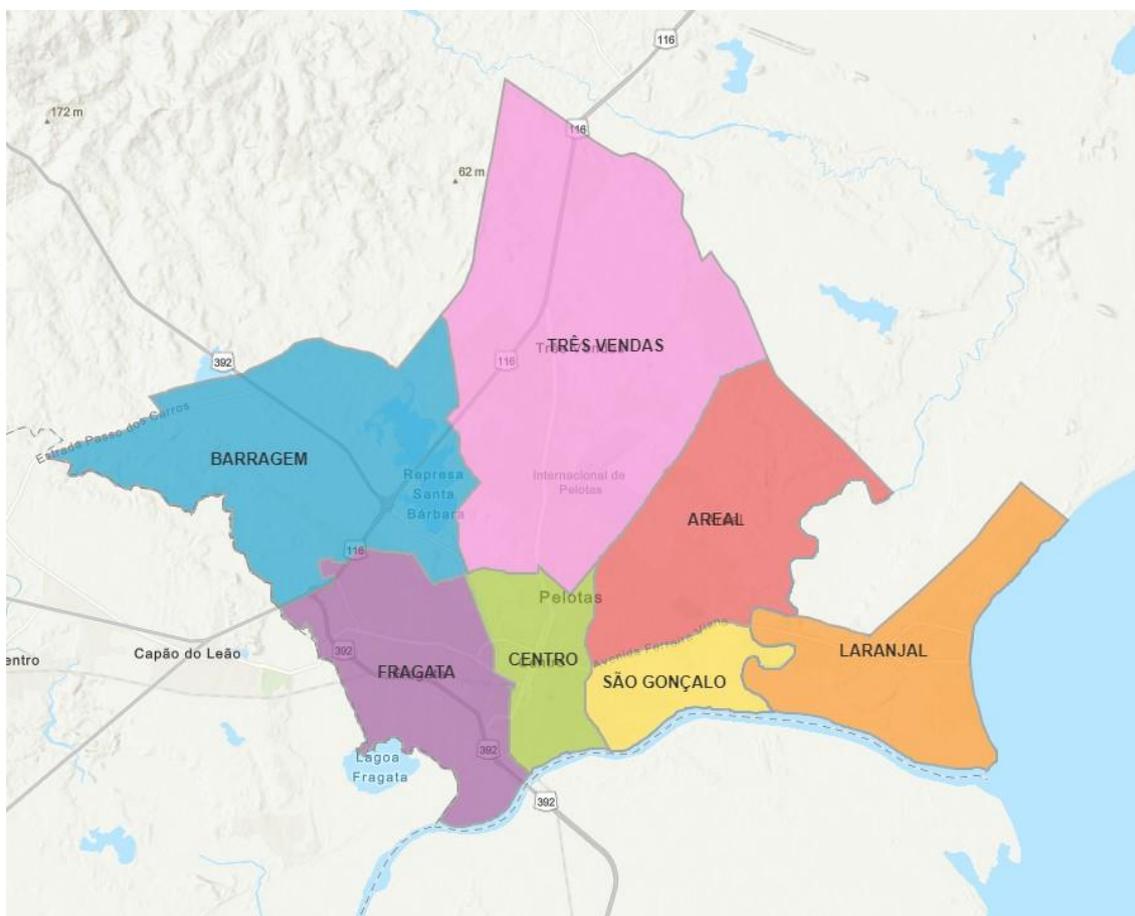


Figura 5 Mapa da cidade de Pelotas com a indicação das regiões administrativas

Fonte: Prefeitura de Pelotas

A partir do ano de 2006 o município passou por um crescimento tanto em relação a extensão quanto na densidade. A partir desse período foram edificadas grandes conjuntos habitacionais de casas, condomínios urbanísticos de lotes além de novos loteamentos (PELOTAS, 2023).

No ano de 2009, a criação de novos condomínios tem um momento marcante no município com a aprovação da Lei Municipal 5.660/2009, que permitiu a implantação de condomínios horizontais em áreas de até 35 hectares, anteriormente a área máxima permitida era de 1 hectare (FERREIRA, 2023).

Em 2010, o primeiro condomínio de exatos 35 hectares foi lançado na região administrativa São Gonçalo e no ano de 2012 outro grande condomínio horizontal foi lançado, marcando ser o primeiro desse porte na região administrativa do Laranjal (FERREIRA, 2023).

No município atualmente existem 10 condomínios urbanísticos de lotes, sendo 7 deles localizados na região administrativa do Laranjal, fator que determinou que esse estudo seja voltado para essa região de expansão da cidade (Figura 6).

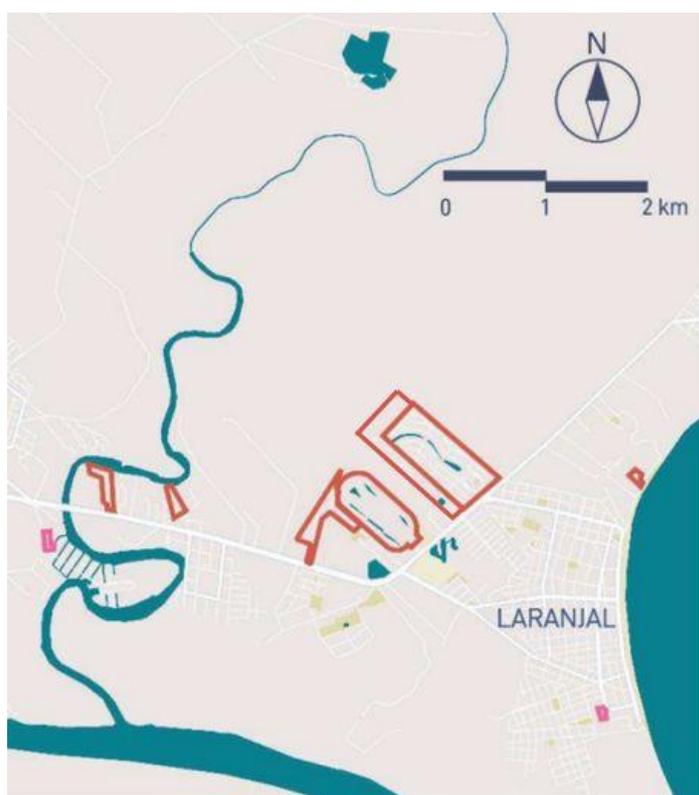


Figura 6 Condomínios urbanísticos de lotes existentes na região do Laranjal

Esses empreendimentos têm previsão de baixa densidade populacional, são unicamente residenciais, com aproximadamente metade de sua área destinada ao uso comum privado, para as vias de circulação, quadras de esportes, áreas de lagos, clubes, etc. Há condomínios pequenos em área, que

possuem apenas 9 lotes e condomínios bem maiores e mais populosos, possuindo 556 lotes.

A quantidade de condomínios existentes na zona leste da cidade, demonstra uma valorização imobiliária próxima a lagoa dos Patos devida à disponibilidade de terras passíveis de serem urbanizadas com grandes empreendimentos imobiliários (FERREIRA, 2023).

Este trabalho estuda três condomínios (A, B e C) e um loteamento (D), representados na Figura 7. Estes, foram escolhidos para análise por: i) terem sido construídos após 2010; ii) apresentarem grande número de lotes, a partir de 400 lotes; iii) possibilitarem mais acesso à informação de dados; iv) serem representativos para a compreensão desse modelo urbano.



Figura 7 Condomínios e loteamento estudados Fonte: Autora

Os condomínios possuem um regulamento estabelecendo regras e limitações urbanísticas, com a finalidade de disciplinar o uso e a ocupação do solo. As regras estipuladas são complementares, não excluindo o cumprimento do disposto nas legislações Federal, Estadual, Municipal e normas técnicas construtivas.

Nesta etapa é realizada uma análise da implantação dos lotes nos empreendimentos, suas regras complementares, a implantação dos empreendimentos e para isso também se faz necessário compreender o Plano Diretor e o Código de Obras Municipal.

No quadro 1 são apresentadas as características gerais de cada condomínio e loteamento, objetos de estudo dessa pesquisa. Os quatro empreendimentos possuem em torno de 500 lotes e uma área superior a 25 hectares.

Objeto de estudo	Tipo	Área	Endereço	Quantidade de lotes
A	Condomínio de lotes	35 hectares	Av. Adolf Fetter, 3551	454
B	Condomínio de lotes	34, 5 hectares	Av. Adolf Fetter, 4085	525
C	Condomínio de lotes	52 hectares	Av. Adolf Fetter, 4331	556
D	Loteamento	25 hectares	Av. Adolf Fetter, 4330	515

Quadro 1 Características gerais dos objetos de estudo Fonte: Autora

### 3.3 Implantação e análise dos índices urbanísticos

O Plano diretor Municipal de Pelotas é o instrumento básico da política de desenvolvimento municipal, abrangendo os aspectos físicos, sociais, econômico e administrativos do crescimento da cidade, visando a orientação da atuação do Poder Público e da iniciativa privada, bem como ao atendimento das necessidades da comunidade, sendo a principal referência normativa para as relações entre cidadão, as instituições e o espaço físico municipal (Lei Municipal nº 5502, 2008).

O Código de Obras Municipal é uma ferramenta normativa para o planejamento e a ordenação do espaço municipal, juntamente com os instrumentos do sistema de planejamento e gestão municipal, indicados no III Plano Diretor de Pelotas e devem ser respeitados por todos os empreendimentos

da cidade não importando se possuem caráter privado ou público (Lei Municipal nº 5528,2008).

As características especificadas nesse trabalho se referem ao regime urbanístico da região administrativa do Laranjal, área de estudo delimitada nessa pesquisa.

### 3.3.1 *Implantação*

Os condomínios e o loteamento possuem acesso pela Avenida Adolfo Fetter, importante artéria de ligação viária do Laranjal com o centro da cidade, e estão implantados de forma perpendicular ao eixo da avenida como apresentado na Figura 8.



Figura 8 Posicionamento do objeto de estudo em relação a Avenida de acesso Fonte: Autora

Na Figura 9 pode-se ver a relação entre a implantação dos lotes, vias transversais e o eixo principal de acesso, por sua vez transversal à Avenida Adolfo Fetter. Apesar das formas orgânicas que os condomínios apresentam, o eixo de circulação principal, originado a partir do acesso, distribui a estrutura formal dos empreendimentos, paralelo a ele estão as vias principais e cortando esse eixo as vias secundárias se formam. O condomínio B se difere em relação aos outros quanto à forma, pois possui um formato em “L”, apresentando dois eixos que definem a distribuição da infraestrutura, mas segue as formas

orgânicas no geral. Já o loteamento D possui um padrão mais regular, da quadrícula tradicional, apresentando linhas mais retas tanto na delimitação das vias quanto na formação das quadras, mas ainda assim com a mesma relação de distribuição, qual seja, o eixo horizontal como via principal e as perpendiculares a ele como secundárias.

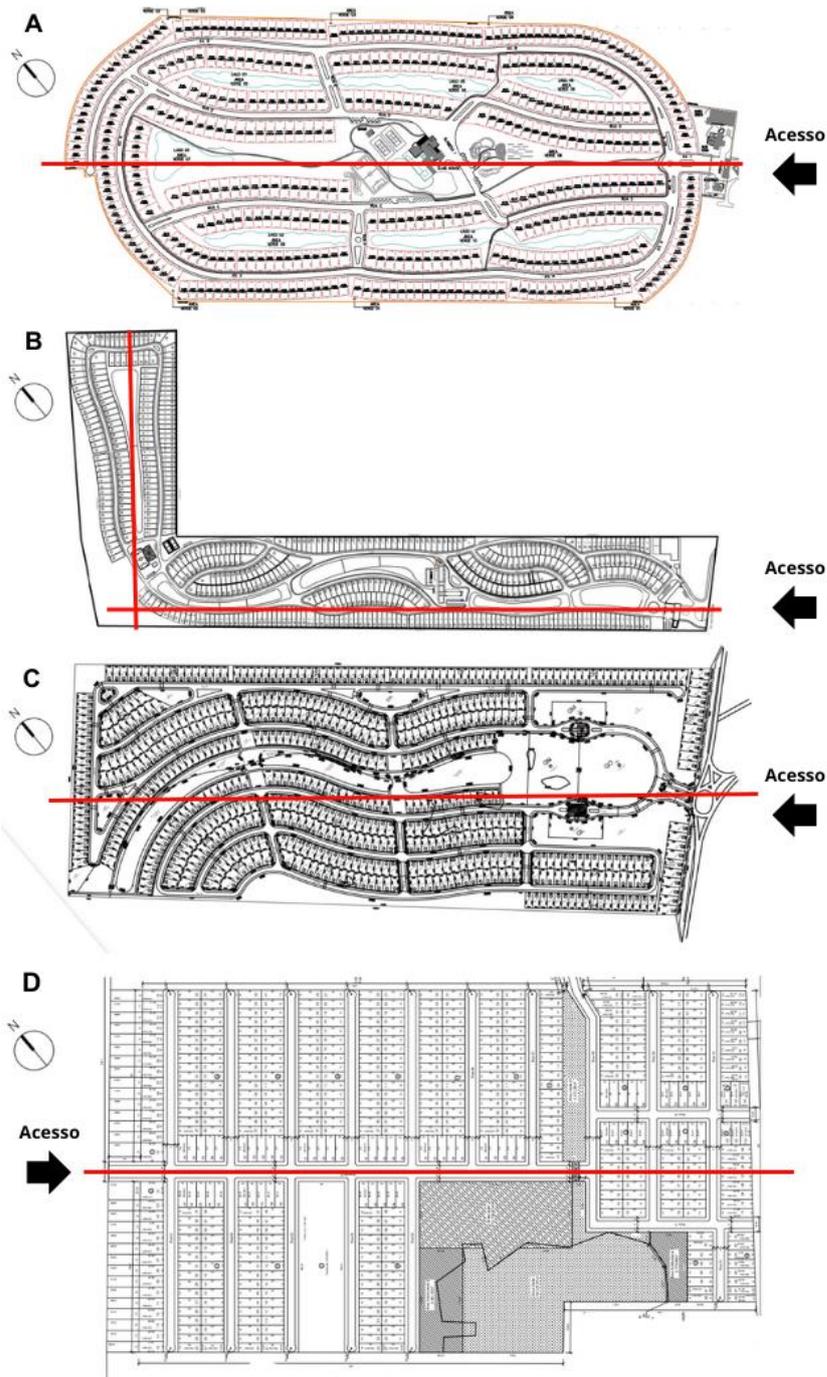


Figura 9 Implantação dos empreendimentos Fonte: Autora

A partir desses eixos consegue-se perceber que a estrutura do miolo dos condomínios é destinada as áreas de lazer e áreas verdes, com exceção do

condomínio A que apresenta a área verde distribuída em três linhas, central e laterais em relação ao eixo demarcado, característica essa que impacta na distribuição dos lotes. No loteamento (D), as áreas institucionais, verdes e de lazer seguem o rigor formal das quadras, sendo delimitadas por vias e não impactando na distribuição dos lotes.

Em relação aos lotes e quadras, os condomínios (A, B e C) são delimitados por muros, criando faixas de terrenos que são finalizadas com muros. No condomínio A, os lotes possuem lindeiros laterais, sendo separados na parte da frente e fundos por vias, áreas verdes ou de lazer, o que impacta significativamente as distâncias entre os terrenos, como será analisado mais adiante. Os condomínios B e C, apesar das formas orgânicas, possuem quadras com características tradicionais, com lotes que apresentam lindeiros nas laterais e fundos.

A orientação solar dos condomínios mostra que as frentes dos lotes estão voltadas, predominantemente, a NE e SO e no loteamento, os lotes apresentam frentes voltadas tanto para NO quanto para SE.

### 3.3.2 ***Índices Urbanísticos***

Os índices urbanísticos referentes a aproveitamento, taxa de ocupação, taxa de permeabilidade, alturas e os recuos dos terrenos com face para vias públicas devem seguir as diretrizes do Plano Diretor; os recuos das edificações internas ao condomínio poderão ser regrados pela norma de condomínio (Lei Municipal nº 5502,2008).

#### 3.3.2.1 **Altura das edificações**

Na região administrativa do Laranjal as construções possuem um limite de altura diferente das demais regiões da cidade. É permitida a construção de até sete metros de altura (Lei Municipal nº 5502, 2008). Por isso, todos os empreendimentos possuem altura máxima permitida em seus regimentos de sete metros.

### 3.3.2.2 Recuos

Os recuos possuem variações dentro do permitido pela Lei Municipal nº 5502 (2008). O município estabelece o recuo de ajardinamento obrigatório para essa região da cidade de 4m. Esse valor é seguido pelos objetos de estudo B e D, e os objetos A e C apresentam um recuo superior estabelecido.

O recuo lateral não possui obrigatoriedade na Lei Municipal, com exceção quando houver esquadrias voltadas para os lindeiros laterais, o objeto D segue essa regra e A, B, C apresentam a obrigatoriedade, estabelecida pelo regulamento dos condomínios, de recuos de 1,5m nas duas laterais do terreno.

O recuo de fundos deve obedecer a distância mínima de 3m, nos objetos estudados apenas A e B apresentam uma distância superior a exigida.

Os valores para cada recuo são especificados na Tabela 1.

Tabela 1 Recuos permitidos nos empreendimentos e na Lei Municipal 5502/08

Objeto de estudo	Recuo de ajardinamento	Recuo Lateral	Recuo fundo
A	5m	1,5m*	6m***
B	4m	1,5m	4m
C	5m	1,5m	3m
D	4m	Isento**	3m
Lei Municipal 5502/08	4m	Isento**	3m

\*Um dos recuos laterais do lote terá isenção de recuo mínimo no comprimento máximo de 6m para abrigar a garagem.

\*\*O recuo lateral de 1,5m é exigido quando existir aberturas voltadas para os lotes lindeiros.

\*\*\*O Condomínio A apresenta tipologias de lotes com algumas alterações referentes ao recuo de fundos. Na Tabela 2, são apresentadas as variações existentes.

Tabela 2 Levantamento dos recuos de fundos obrigatórios do objeto de estudo A

Tipologia (Lateral/Fundo)	Recuo fundos	Quantidade existente
Esquina/ Acesso	6m	2
Lote/Muro	6m	161
Condomínio/ Muro	6m	18
Lote/Rua	6m	10
Esquina/ Rua	6m	1
Esquina/ Lago	7m	11
Lote/ Lago	7m	153
Condomínio/Praça	8m	4
Lote/ Praça	8m	58
Esquina/ Praça	8m	12

A partir desse levantamento a tipologia que possui a indicação 6m de recuo de fundos prevaleceu.

### 3.3.2.3 Dimensões de lotes

Os lotes apresentam algumas variações de tamanho devido ao desenho urbano de cada objeto estudado. Na tabela 3 é apresentada a variação de dimensões dos lotes e o número de lotes com tal dimensão. O objetivo é identificar o número de lotes com mais frequência a fim de adotá-lo nos modelos de referência.

Tabela 3- Dimensões e quantidade de exemplares de lotes nos objetos de estudo

Objeto de estudo	Profundidade dos lotes (m)	Número de lotes (un)	Frente dos lotes (m)	Número de lotes (un)
A	28	182	<b>11 - 12</b>	<b>172</b>
	<b>30</b>	<b>225</b>	12 - 13	74
	32	47	14 - 15	143
			15 - 16	7
			Esquinas irregulares	32
B	<b>24</b>	<b>147</b>	<b>10 - 11</b>	<b>248</b>
	25	100	11 - 12	141
	26	40	13 - 14	19
	27	24	Esquinas irregulares	36
	28	59		
	29	25		
	30	42		
	31	20		
	32	20		
	33	21		
	34 - 38	22		
	40 - 44	5		
C	26 - 29	8	12 - 13	52
	<b>30</b>	<b>548</b>	<b>13 - 14</b>	<b>298</b>
			14 - 15	42
			15 - 16	42
			16 - 17	8
			17 - 18	20
			Esquinas irregulares	64
D	23 - 25	13	<b>10 - 11</b>	<b>484</b>
	<b>25</b>	<b>386</b>	11 - 12	28
	25 - 30	158	15 - 16	42
			50	1
			Esquinas irregulares	2

A variação dos lotes se justifica pelo desenho de cada um dos objetos de estudo. Existem curvas, recortes pela delimitação do terreno, distribuição de áreas verdes/ lazer e esquinas.

Na tabela 4 é apresentada a síntese dos lotes encontrados com mais frequência.

Tabela 4- Síntese das dimensões mais frequentes nos lotes dos objetos de estudo

Objeto de estudo	Dimensões frente	Dimensões profundidade
A	11m – 12m	30m
B	10m – 11m	24m
C	13m – 14m	30m
D	10m – 11m	25m

Através do levantamento pode-se perceber que os lotes mais frequentes variam de 10 metros a 14 metros de frente e possuem de 24 metros a 30 metros de profundidade, essa variação, como dito anteriormente, está relacionada ao desenho urbano de cada local e comparando entre os objetos de estudo pode-se definir como modelo representativo um terreno de 11m x 30m.

### 3.3.2.4 Tipologia das construções existentes nos Objetos de estudo

No decorrer do trabalho foram realizadas visitas aos locais de estudo para o levantamento. O condomínio B atualmente encontra-se em obras de infraestrutura e ainda não possui edificações construídas para realizar o levantamento das edificações existentes.

Os condomínios possuem caráter predominantemente residencial e o loteamento por ter liberdade de ocupação mista apresenta alguns exemplares de pequenos comércios como padarias e mercados.

Para esse estudo é importante a identificação das tipologias existentes, quanto ao número de pavimentos. Pelo limite de altura estipulado para essa região são encontradas edificações de um e dois pavimentos. Além das edificações, foram computados os lotes sem ocupação, vazios, afim de compreender a situação de todos os terrenos nos objetos de estudo. A tabela 5 mostra o resultado do levantamento no local.

Tabela 5- Resultado do levantamento da tipologia existente nos Objetos de estudo

Objeto de estudo	1 Pavimento	%	2 pavimentos	%	Vazio	%
A	24	5%	<b>385</b>	<b>85%</b>	45	10%

B	-	-	-	-	525	100%
C	64	11%	<b>320</b>	<b>58%</b>	173	31%
D	<b>253</b>	<b>49%</b>	129	25%	132	26%

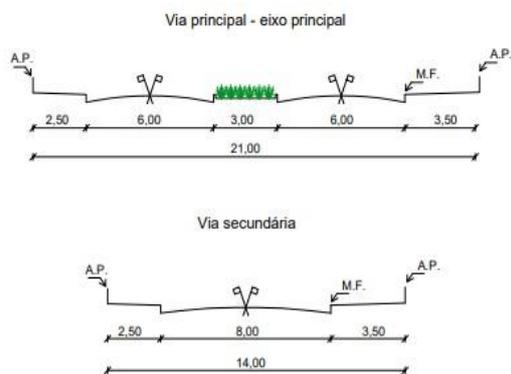
Através do levantamento fica evidente a preferência por edificações de dois pavimentos em condomínios (A, B, C) e de um pavimento no loteamento (D).

### 3.3.2.5 Estrutura Viária

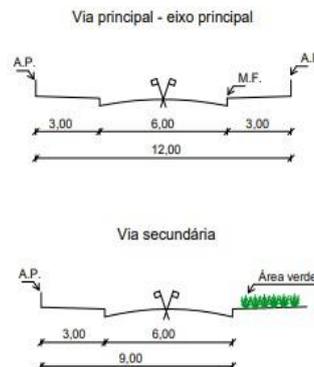
Os condomínios e loteamento possuem vias locais para baixo volume de tráfego, com uso restrito e com função de possibilitar o acesso às edificações. Vias são compostas pelo faixa carroçavel e calçadas. Na figura 10 estão representados os gabaritos de cada via dos empreendimentos.

#### GABARITOS:

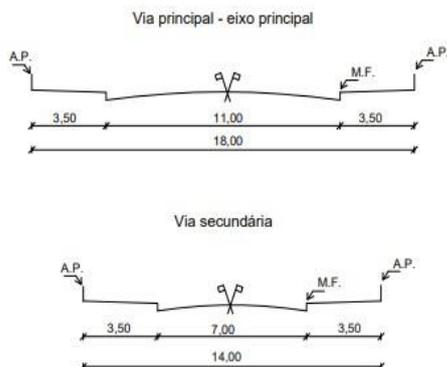
##### Objeto de estudo A



##### Objeto de estudo B



##### Objeto de estudo C



##### Objeto de estudo D

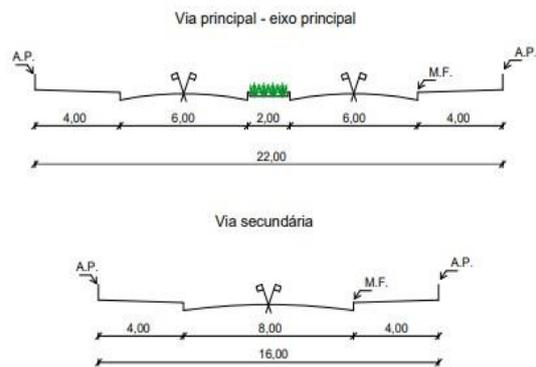


Figura 10 Gabarito das vias dos objetos de estudo Fonte: Autora

É possível observar a variação de tamanho entre o gabarito das vias, que possuem faixa carroçável entre seis metros e oito metros e calçadas entre dois metros e meio e quatro metros. A via mais larga, com calçadas nas duas laterais e sem canteiro no centro, possui 16 metros, a via mais larga, com canteiro no meio tem 22 metros de largura, e as vias secundárias, 14 metros. O condomínio B que possui as menores vias entre os quatro, possui uma via que tem calçada em apenas uma lateral com o tamanho de 9 metros, enquanto a via com calçadas laterais apresenta de 12 metros de largura.

A Lei Municipal 5502/08 determina que as vias locais devem obedecer às seguintes diretrizes: i) gabaritos mínimos da via: 16,00 metros em situações normais e 14,00 metros para ruas sem saída com dispositivo de retorno e comprimento máximo de 200,00 metros.

Os condomínios não precisam obedecer a essas diretrizes por serem vias internas, sem contato com as vias públicas, que podem seguir o regimento interno do condomínio.

### 3.3.2.6 Distância entre as edificações

Aqui são apresentadas as distâncias mínimas possíveis entre duas edificações considerando a projeção do perímetro da construção de acordo com os recuos obrigatórios em cada caso e a dimensão da via mais recorrente no local. Esses valores compreendem a maior parte das edificações construídas até o momento.

A tabela 6 caracteriza as distâncias entre as edificações encontradas nos quatro objetos de estudo.

Tabela 6 Distâncias entre as edificações de cada objeto de estudo

Objeto de estudo	Distância frontal	Distância lateral	Distância de fundos
A	24m	3m	-*
B	20m	3m	8m
C	24m	3m	6m
D	24m	Isento	6m

\*Os lotes possuem fundos voltados para as áreas verdes

O levantamento mostra que a distância lateral se mantém igual nos condomínios (A, B, C) por apresentarem recuos laterais obrigatórios de 1,5

metros e, como exceção, a distância lateral não é predominante no loteamento (D) por não possuir a obrigatoriedade do recuo lateral.

A distância frontal é o somatório do recuo de ajardinamento e da largura da via. Mesmo existindo diferenças de dimensões, como apresentado nos itens “3.3.2.2- Recuos” e “3.3.2.5 – Estrutura viária”, ao somar esses dois elementos encontra-se duas distâncias entre as edificações predominantes: 20 metros e 24 metros.

A distância de fundos também é resultado do somatório dos recuos de fundos das edificações, predominando a existência de distâncias de oito metros e seis metros entre as edificações.

O condomínio “A” apresenta valores variáveis das distâncias de fundo pela característica da implantação do empreendimento, apesar de possuir recuos de fundos dos terrenos bem definidos, os lotes fazem confronto pelos fundos com áreas verdes, possuindo uma variação de distância entre lotes muito grande, ou muro, não possuindo dimensões entre edificações. A Figura 11 exemplifica a variedade de distâncias entre as edificações nesse objeto de estudo.

## Objeto de Estudo A

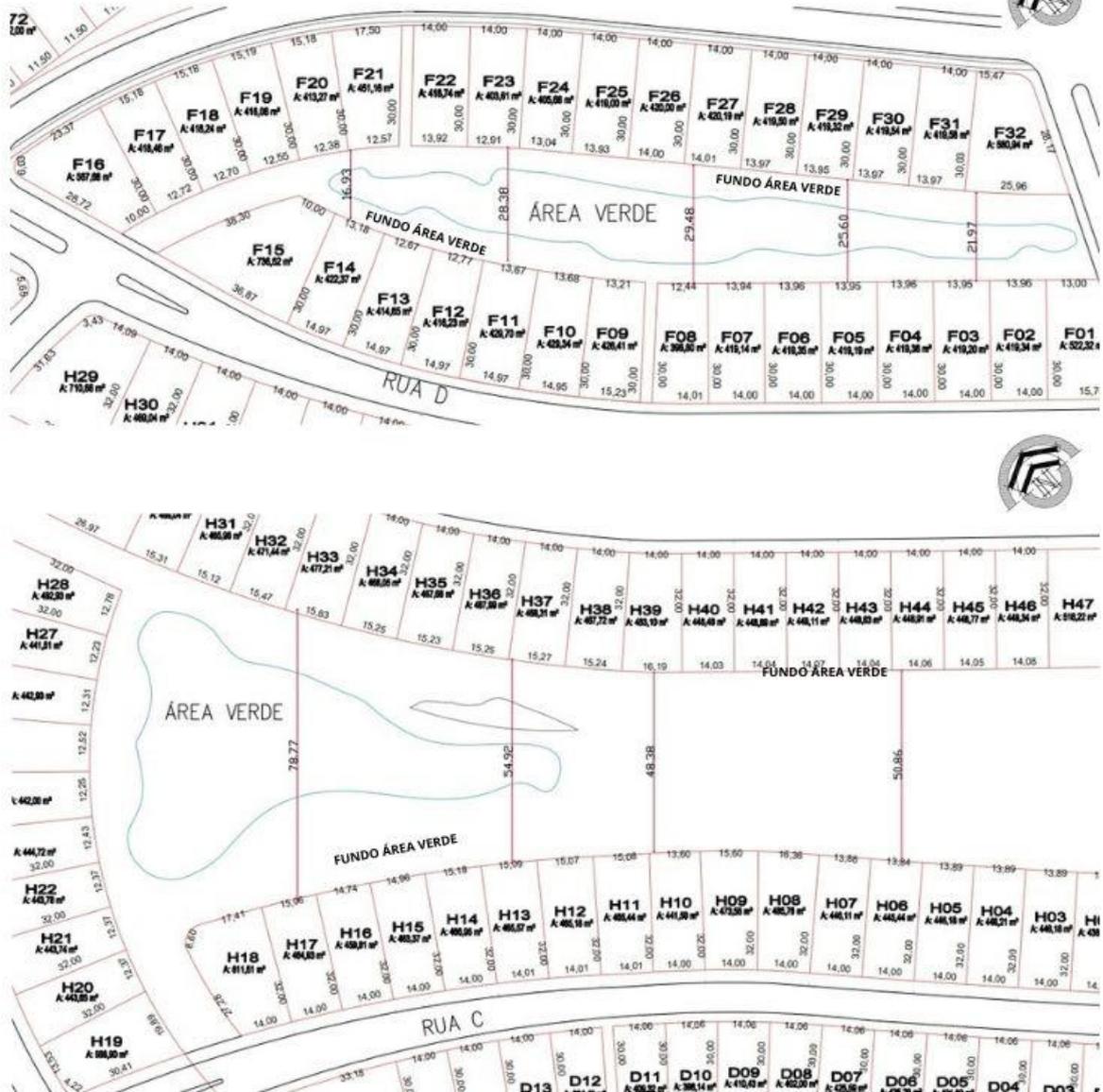


Figura 11 Disposição dos lotes no Condomínio "A", com a localização de áreas verdes. Fonte: Autora

### 3.4 Construção do modelo urbano

#### 3.4.1 Definição do modelo urbano

A partir da caracterização dos lotes encontrados em cada objeto de estudo, conforme síntese apresentada na tabela 7, foram desenvolvidos

modelos computacionais utilizando os dados encontrados com maior frequência entre eles.

Tabela 7- Síntese da caracterização dos objetos de estudo

OE	Dimensões (m)		Recuos			Tipologia	Distâncias entre edificações		
	Frente	Prof.	Ajardinamento	Lateral	Fundo		Frontal	Lateral	Fundos
A	11 - 12	30	5m	1,5m	6m	2 pav. (7m)	24	3	Variável
B	10 – 11	24	4m	1,5m	4m	-	20	3	8
C	13 – 14	30	5m	1,5m	3m	2 pav. (7m)	24	3	6
D	10 – 11	25	4m	isento	3m	1 pav (3,5 m)	24	-	6
Orientação Solar (Fachadas Principais)									
NE, NO, SE, SO									

Primeiro, foram desenvolvidos volumes para representar as edificações encontradas nos objetos de estudo. Embora a tipologia mais comum nos levantamentos realizados tenha sido de dois pavimentos, para abranger uma gama maior do que foi encontrado, foram feitas simulações com tipologias de sete metros de altura (máxima altura estipulada nos índices) e de três metros e meio de altura. A escolha dessas duas alturas é necessária para compreender o impacto que o sombreamento das edificações vizinhas causa na disponibilidade de radiação solar nas superfícies da edificação. Para definir as dimensões do volume padrão, foi estipulado, com base nas características encontradas nos objetos de estudo, um terreno de 11m X 30m e aplicados os recuos mais frequentes.

Os volumes possuem formas simplificadas, visando facilitar a simulação e dar liberdade aos profissionais responsáveis pelos projetos arquitetônicos avaliarem as melhores opções de recortes e o impacto de cada variável no potencial de geração de energia a partir dos resultados dessa pesquisa. A Figura 12 apresenta os volumes de edificações que serão usados.

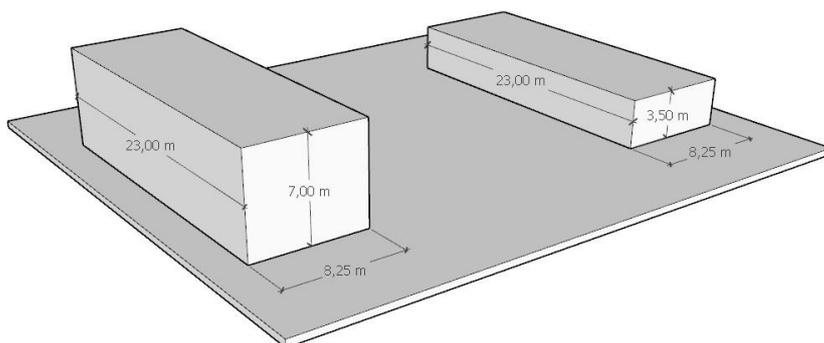


Figura 12 Dimensões dos volumes edificados Fonte: Autora

As simulações aconteceram em um volume edificado, porém todas as edificações do entorno fornecem informações de sombreamento de acordo com as distâncias e as alturas que possuem em relação ao volume simulado.

Para poder explorar o sombreamento e todos os recuos que estão presentes no estudo, foram criadas quadras que possuem lotes distribuídos linearmente com lotes lindeiros e lotes de fundo. A figura 13 mostra a disposição das quadras e, principalmente, o lote utilizado na simulação, demarcado com a cor verde e os lotes lindeiros que possuem influência direta no sombreamento do lote que sofre a simulação, demarcado com a cor azul. As demais quadras existem apenas para criar um cenário de ambientação para a pesquisa.

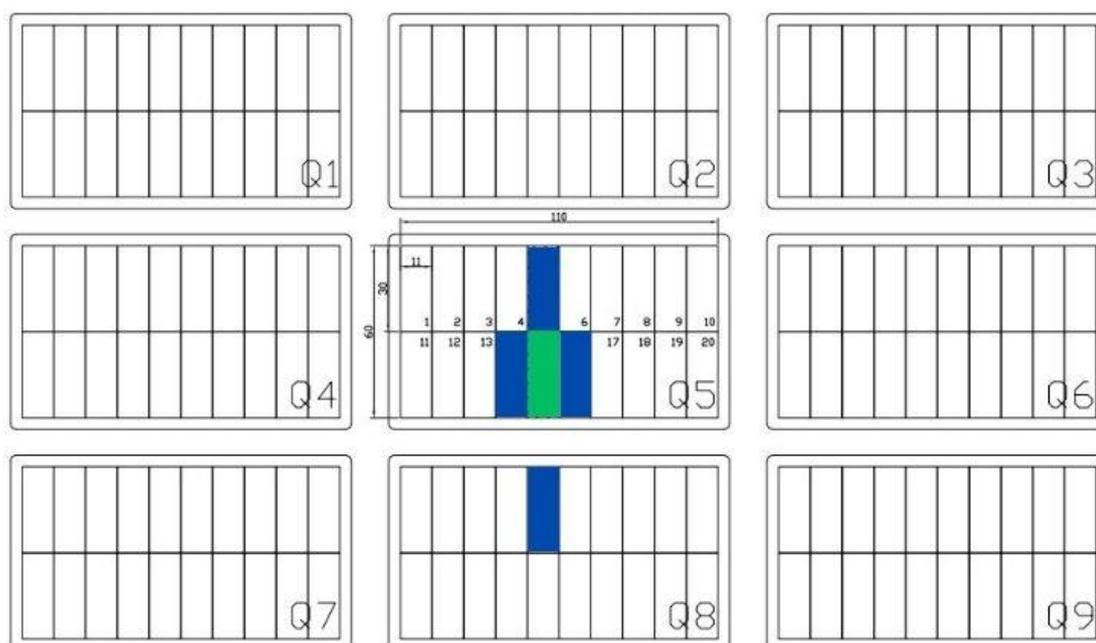


Figura 13 Marcação do lote simulado e edificações lindeiras Fonte: Autora.

Com esse modelo urbano e com os modelos de volumetria definidos, foram criados dois grupos de volumetria para a simulação.

Os modelos estão separados em dois grupos: i) uniformes, que possuem todas as edificações com dois pavimentos (7m de altura), retratando o limite de altura determinado no Plano Diretor de Pelotas e também a maior incidência encontrada nos objetos de estudo caracterizados anteriormente e ii) mistos, que possuem edificações com alturas diferentes, 3,5m e 7m (um pavimento e dois pavimentos, respectivamente), afim de compreender o impacto das diferenças de alturas em um modelo de morfologia. Todos os grupos são simulados com as mesmas variações de distâncias entre edificações, conforme o estudo realizado anteriormente.

No grupo uniforme (tabela 8) os modelos analisados variam entre si com relação às distâncias entre as edificações. Todas as edificações são representadas com dois pavimentos, as distâncias laterais possuem três metros e as distâncias de fundos e frontal variam de 6m a 8m e de 20m a 24m, respectivamente. Essas variações foram definidas conforme os dados encontrados nos índices apresentados anteriormente nos objetos de estudo.

Tabela 8 - Caracterização do grupo uniforme

Modelo Uniforme					
Altura das edificações	7m				
Distâncias simuladas entre as edificações	3m	6m	8m	20m	24m

A figura 14, mostra como foi realizada a distribuição dessas distâncias para realizar a simulação.

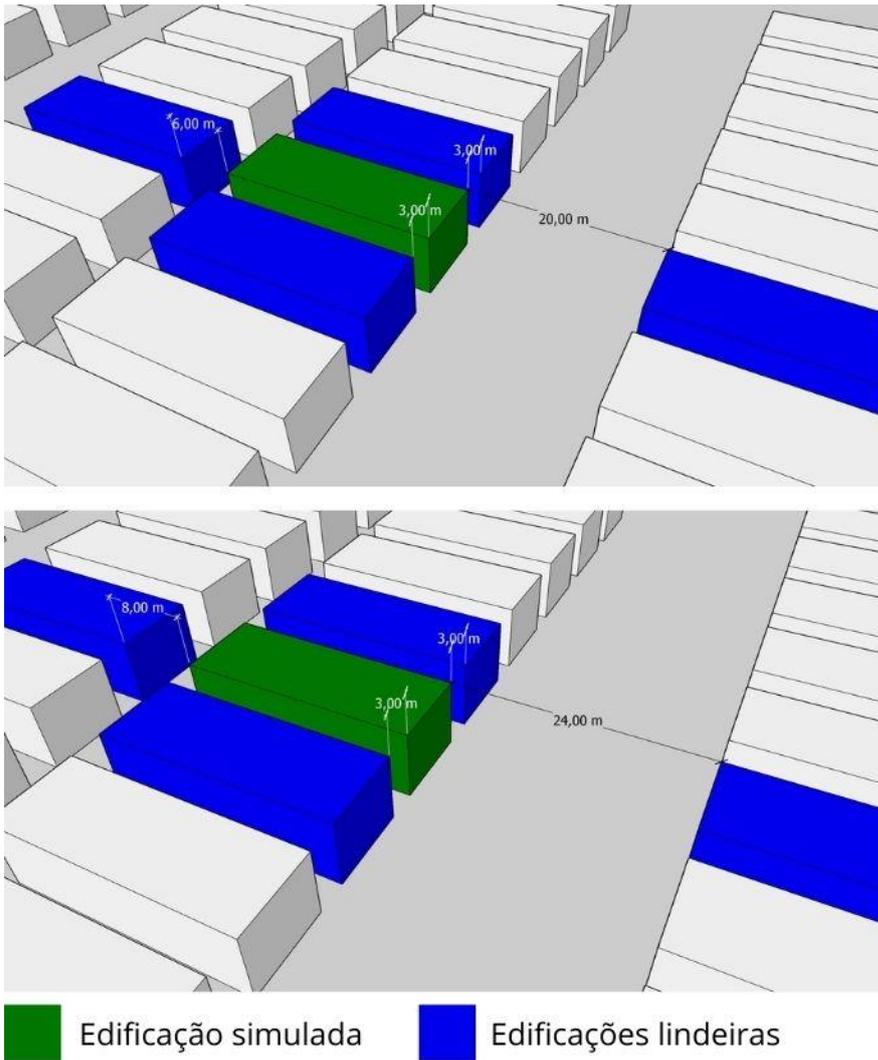


Figura 14 Distâncias entre edificações Fonte: Autora

O grupo misto (tabela 9 e 10) apresenta 2 modelos com diferentes alturas. A edificação simulada possui uma altura e as edificações vizinhas possuem a altura contrária, ou seja, quando a edificação principal possui 3,5m as edificações do entorno imediato possuem 7m de altura. As distâncias seguem as do modelo uniforme.

Tabela 9- Caracterização do grupo misto 1

Modelo Misto 1					
Altura da edificação simulada	7m				
Altura das edificações lindeiras	3,5m				
Distâncias simuladas entre as edificações	3m	6m	8m	20m	24m

A figura 15, mostra como foi realizada a distribuição dessas distâncias para realizar a simulação.

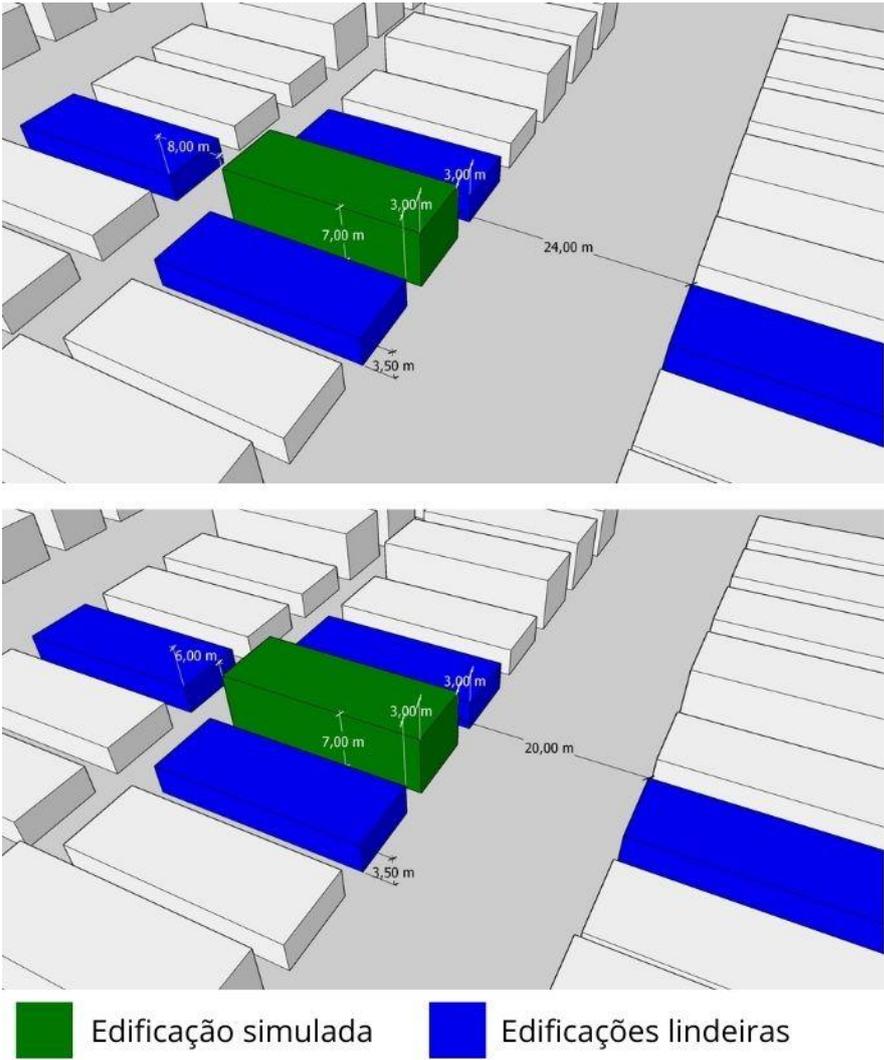


Figura 15 Distâncias entre edificações Fonte: Autora

Tabela 10 Caracterização do grupo misto 2

Modelo Misto 2					
Altura da edificação simulada	3,5m				
Altura das edificações lindeiras	7m				
Distâncias simuladas entre as edificações	3m	6m	8m	20m	24m

A figura 16 mostra como foi realizada a distribuição dessas distâncias para realizar a simulação.

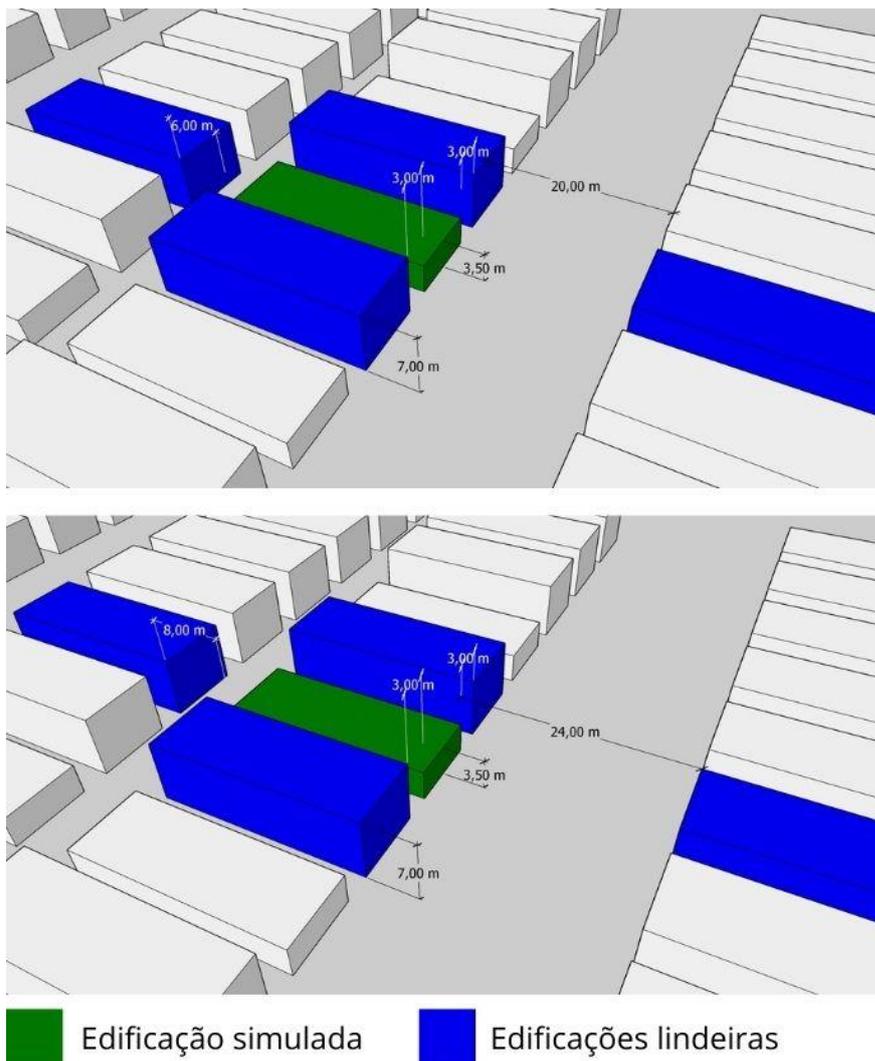


Figura 16 Distâncias entre edificações Fonte: Autora

Além da avaliação com diferentes alturas e diferentes distâncias entre as edificações, os modelos tanto do grupo uniforme quanto do grupo misto foram simulados para diferentes orientações solares: NO, NE, SO, SE.

### 3.5 Ferramentas de análise

Os modelos tridimensionais foram construídos no *Autodesk Revit*, um *software* amplamente usado por arquitetos e engenheiros que permite criar diversos projetos (arquitetônico, elétrico, hidráulico) simultaneamente. É possível editar geometrias, orientações, tipologias e materiais de elementos para exportá-los a outros programas ou incluí-los em simulações com *plugins* compatíveis com o programa (Autodesk, 2023).

O *plugin Insiqth Solar Analysis*, distribuído também pela empresa *Autodesk*, permite realizar uma série de avaliações de desempenho ambiental, entre elas o mapa de radiação. O aplicativo realiza o cálculo da radiação anual que incide sobre as superfícies em determinada cena. Os dados obtidos nos resultados de radiação solar disponíveis nas superfícies da envoltória das edificações estão em kWh/m<sup>2</sup>/ano (Autodesk, 2023).

### 3.5.1 **Parâmetros para a simulação**

As simulações foram realizadas a partir da indicação da localização e endereço do local, os dados de radiação solar são disponibilizados pelo programa por geolocalização (Figura 17).

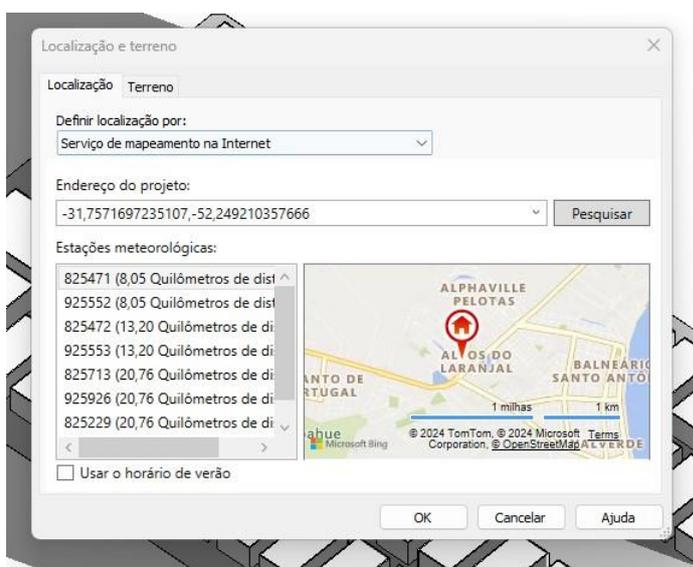


Figura 17 Indicação das coordenadas da localização do estudo Fonte: Autora

Cada modelo foi posicionado seguindo a orientação solar encontrada nos empreendimentos analisados e foi habilitada a posição do sol e as sombras criadas ao longo do ano (Figura 18).

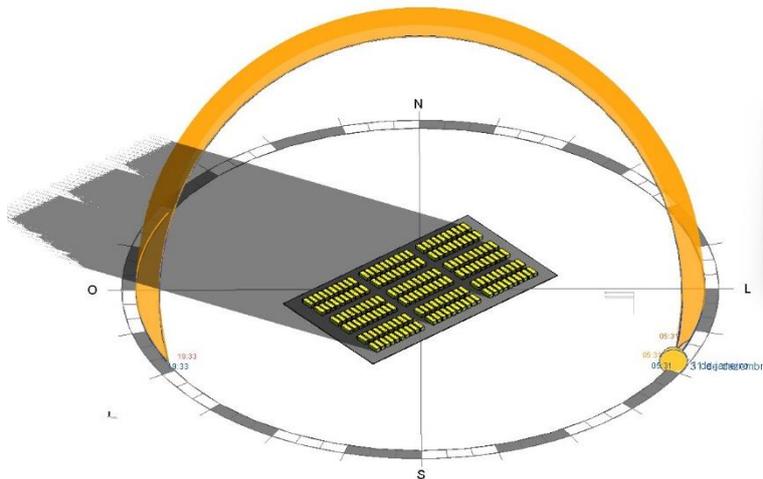


Figura 18 Exemplo de simulação Fonte: Autora

A análise solar é realizada de forma personalizada, onde são determinadas as superfícies de análise, especificando o período escolhido e a unidade de medida.

A Tabela 11 apresenta os dados utilizados na simulação, indicando os dados geográficos de Pelotas, local do projeto, o período de análise, período de um ano caracterizando todos os sombreamentos causados nesse espaço de tempo, e a unidade de medida que a simulação respeita ao dar os resultados.

Tabela 11- Dados utilizados na simulação

Localização do projeto	-31° 46'19" S -52°20'33" W
Período de análise	01/01/2024 – 05:31 31/12/2024 – 19:33
Unidade de medida	kWh/m <sup>2</sup> /ano

Os resultados de cada fachada são apresentados através de manchas, gráficos e valores. A fachada avaliada apresenta um degradê (começando pela cor amarelo e finalizando na cor roxo) compreendido através do gráfico e acompanhado do painel de informações da análise solar. No gráfico fica marcado o menor valor (roxo), o valor mediano e o maior valor (amarelo) disponível de radiação solar para aquela situação e funciona como uma legenda para as cores que estamos enxergando no modelo. No painel podemos observar o valor

mediano em kWh/m<sup>2</sup> para aquela fachada, para o período de um ano e o tamanho da área simulada.

Com as superfícies das edificações selecionadas é possível identificar a quantidade de radiação solar incidente nas mesmas. A quantidade de radiação solar incidente será diferente, dependendo da localização e da orientação da superfície dentro do contexto urbano. A Figura 19 apresenta duas simulações realizadas e a diferença no comportamento ao variar a simulação.

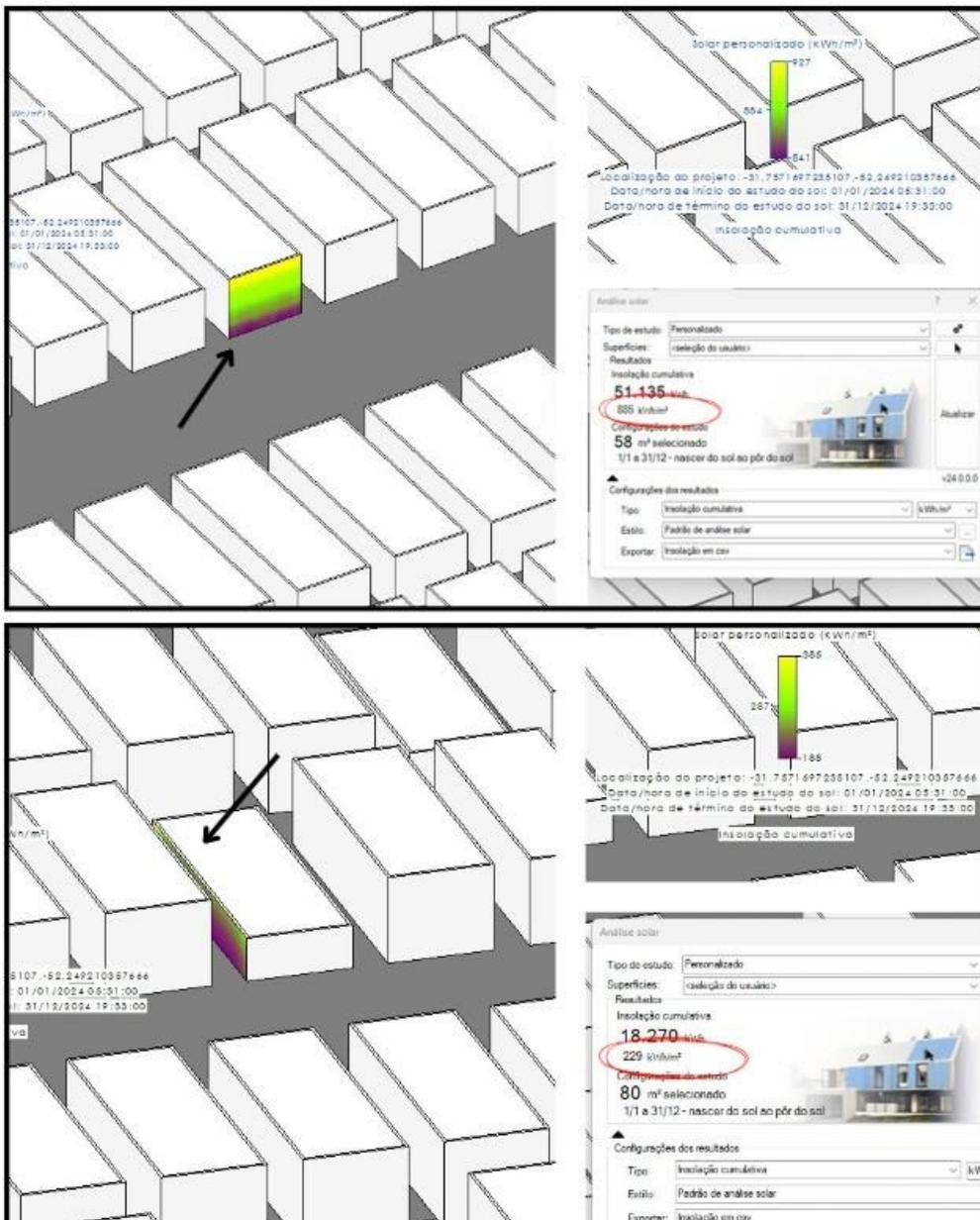


Figura 19 Exemplos do comportamento das superfícies na simulação Fonte: Autora

### 3.6 Cálculo da geração de energia

#### 3.6.1 *Potencial fotovoltaico instalado*

O potencial de geração FV das superfícies é calculado a partir da disposição de módulos fotovoltaicos na área de disponibilidade de radiação solar. A partir do número de módulos, multiplica-se este valor por sua potência nominal, conforme a equação 1.

$$P_{cc} = n^{\circ} \times \text{Pot. Nom.} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$P_{cc}$  = potência instalada (kWp).

$N^{\circ}$  = quantidade de módulos fotovoltaicos que cabem em determinada área.

Pot. Nom = Potência Nominal do módulo fotovoltaico em kW.

Para se chegar à quantidade de módulos, foi dividida a área total disponível pela área individual de um módulo fotovoltaico.

#### 3.6.2 *Geração fotovoltaica*

A partir dos dados de disponibilidade de radiação solar, e levando em consideração o sistema FV adotado, é calculada a quantidade de energia produzida por cada edificação no período de um ano.

O cálculo é realizado por meio da seguinte equação 2:

$$E = G \times r \times P_{cc} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$E$  = Geração solar fotovoltaica (kWh/ano)

$G$  = Irradiação anual recebida no plano do painel fotovoltaico (kWh/m<sup>2</sup>), dividida pela irradiância de referência de 1Kw/m<sup>2</sup>, expressa em número de horas (h) (ZOMMER, 2010 e GAVIRIA et al., 2013).

r= Rendimento do sistema. Utiliza-se o valor 0,8 por ser um rendimento do sistema comumente recomendado na literatura (RUTHER, 2004; ZOMMER, 2010; GAVIRIA et al., 2013)

Pcc= Potência do sistema em corrente contínua (Kw)

### 3.6.3 **Definição do percentual de áreas disponíveis para a colocação do sistema FV**

Para avaliar o real potencial de uma determinada superfície (fachadas ou coberturas) é necessário levar em consideração que existem elementos como esquadrias, reservatórios de água e detalhes arquitetônicos que não vão impactar a área disponibilizada para a aplicação do sistema FV.

Nessa pesquisa foi avaliada a aplicação de módulos opacos, semitransparentes e transparentes, assim pretende-se identificar o maior potencial que uma edificação pode ter utilizando as superfícies verticais por completo.

A superfície da cobertura pode receber elementos que impossibilitam a colocação dos módulos FV em toda a área, afim de definir um percentual foi realizado um levantamento das coberturas dos objetos de estudo através de imagens de satélite, através delas chegou-se a percentuais de 10% a 20% de obstrução por reservatórios e áreas técnicas. Para esse estudo adotou-se o percentual de 20%, ou seja, 80% da área da cobertura pode ser utilizada para a colocação do sistema FV.

### 3.6.4 **Escolha das características do sistema FV**

No mercado existem diversos sistemas fotovoltaicos que se diferenciam em custo, eficiência, aparência e materiais de fabricação.

Como pretende-se avaliar as superfícies sem realizar diferenciação de matérias para os módulos, ou seja, utilizando módulos para substituir revestimentos opacos e vidros, escolha do tipo de módulo buscou uma potência nominal mediana. O modelo utilizado foi JKM410M-6RL3, com potência nominal de 410 Wp e com dimensões de 1855 x 1029 x 30mm. Suas características são apresentadas na tabela 12.

Tabela 12-Dimensões e parâmetros elétricos do módulo FV – MÓDULO JKM410M-6RL3- 410W do Jinko Solar

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Área (m <sup>2</sup> )	1,91 m <sup>2</sup>
Número de células em série	132 (2x66)
Potência nominal (Wp)	410
Tensão de potência máxima (Vmp)	36,84
Corrente de potência máxima (Imp) (V)	11,13
Tensão de circuito aberto (Vco) (A)	44,29
Corrente de curto-circuito (Isc) (V)	11,79
Eficiência do módulo STC (%)	21,48%
Temperatura de operação (°C)	-40 ~ +85
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC
Classificação máxima de fusível em série (A)	20
Tolerância de potência (%)	0~+3
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0.35%/°C
Coefficiente de temperatura Voc	-0.28%/°C
Coefficiente de temperatura Isc	0.048%/°C
Temperatura operacional nominal da célula (NOCT)	45±2°C

Fonte: Autora

#### 4 **Análise dos resultados**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da aplicação do método proposto nos modelos de estudo.

Os valores de radiação solar em cada superfície são resultado das simulações realizadas no programa Revit, com auxílio do plugin Insight. A geração de energia através dos módulos FV foi calculada manualmente.

##### 4.1 **Disponibilidade de radiação solar**

Depois de realizar o estudo dos empreendimentos no bairro do Laranjal foram criados os modelos representando a realidade existente no local. A simulação foi realizada para as cinco distâncias entre edificações predominantes nos objetos de estudo, para cada orientação solar encontrada e para diferentes alturas. A maioria dos objetos de estudo possuem edificações com altura máxima de 7m, mas como no objeto de estudo D (loteamento) foi encontrado a maioria de edificações com um pavimento, foi necessário, então, realizar a simulação para compreender como uma edificação de um pavimento se comporta com edificações lindeiras de dois pavimentos e como edificações de dois pavimentos se comportam com vizinhos que possuem apenas um pavimento.

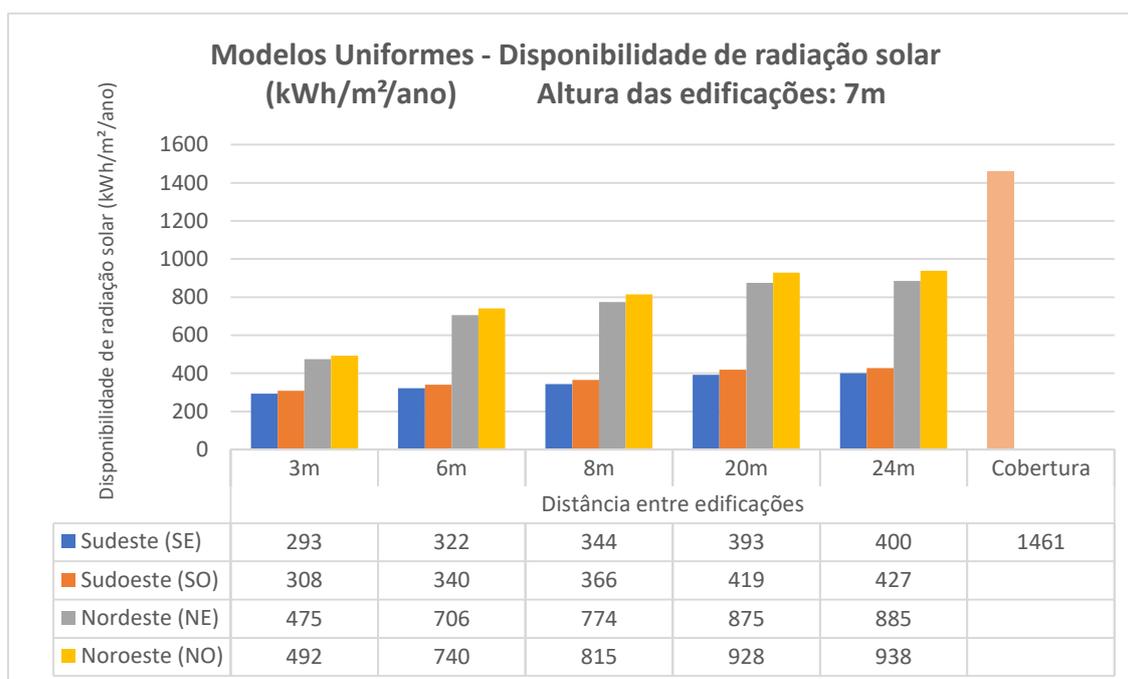
Três grupos foram criados de acordo com essas características e seus resultados são apresentados na sequência.

#### 4.1.1 Modelos uniformes

Os modelos uniformes possuem todas as edificações com sete metros de altura e através das simulações pode-se ver como a distância entre as edificações e a orientação solar impacta na disponibilidade de radiação solar.

A tabela 13 apresenta o resultado do valor médio de disponibilidade de radiação solar no período de um ano de uma superfície de acordo com a orientação solar e distância entre edificações.

Tabela 13- Disponibilidade de radiação solar para modelos uniformes



Quando analisa-se os valores médios disponíveis em cada distância nota-se que o valor para orientação solar NO é sempre maior em qualquer um dos casos. Nos casos de 6m, 8m, 20m e 24m a redução dos valores quando comparamos NO (maior valor) e SE (menor valor) é de aproximadamente 60%, quando realizada a mesma comparação para a distância de 3m entre edificações essa redução diminui para 40% da disponibilidade de radiação solar variando a orientação solar.

Ao observar a variação entre as orientações NO e NE a redução de disponibilidade é de 6% para as distâncias de 20m e 24m, para as distâncias de 6m e 8m a diminuição é de 5% e para a distância de 3m é de 3%. Mostrando que apesar de ter uma diminuição de disponibilidade na orientação solar da superfície voltada para NE a perda não é significativa.

Ao comparar os resultados entre SE e SO, essa diferença também é bem pequena variando em igual proporção ao que ocorre em NO e NE.

Comparando os valores e tabela 13 pode-se perceber que existe um aumento expressivo de disponibilidade de radiação solar ao aumentar a distância entre as edificações quando voltadas para NO e NE, entorno de 48% entre o menor e maior valor, o que não ocorre ao analisar o aumento quando voltadas para SO e SE, em todas as distâncias quando voltadas mais ao sul os valores de radiação solar disponíveis são similares e alteram entorno de 28% entre o menor e maior valor. A Figura 20 mostra a proporção dessas variações.

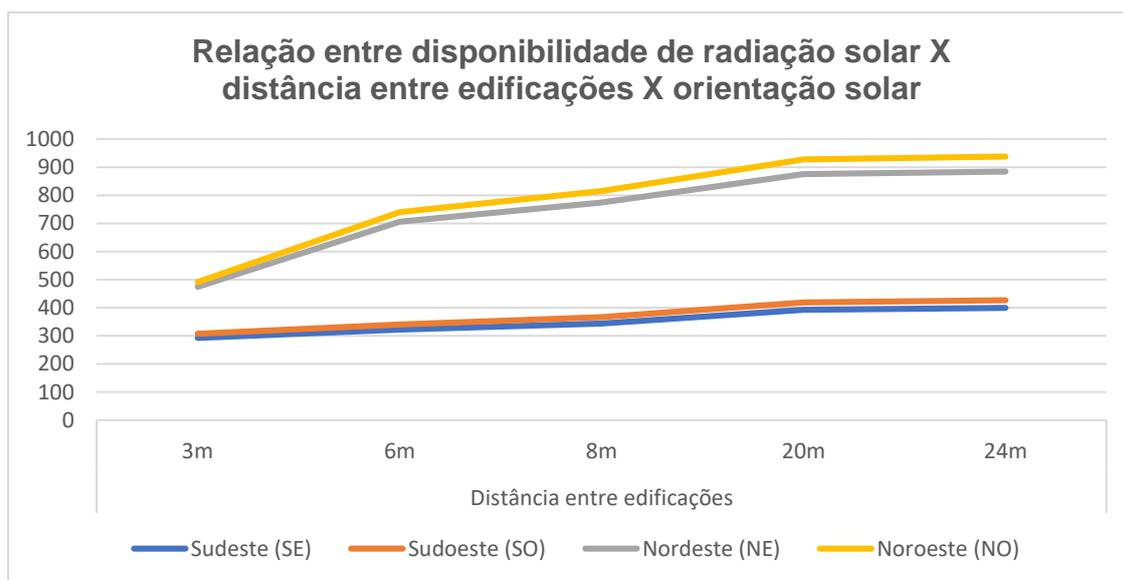


Figura 20 Relação entre disponibilidade de radiação solar X distância entre edificações X orientação solar

Fonte: Autora

Outra análise interessante é perceber que aumentar em 4m a distância entre as edificações não torna significativo o ganho em disponibilidade de radiação solar o que pode-se perceber ao comparar os valores nas distâncias de 20m e 24m entre edificações.

A cobertura, por não sofrer influência de sombreamento do entorno e estar em um plano paralelo ao sol, possui uma disponibilidade de radiação solar

superior às demais superfícies. Ao comparar a cobertura com o maior valor disponível em uma superfície vertical (distância de 24m – NO), observa-se uma redução de aproximadamente 36%, e ao comparar com o menor valor disponível (distância: 3m; orientação: SE), a redução é de 80% na disponibilidade de radiação.

Nesse cenário a melhor configuração para aplicar os módulos FV seria a Fachada NO (938 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 24m da fachada vizinha, fachada SE (344 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 8m da superfície lindeira e as fachadas NE, SO (475 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 308 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distantes 3m da fachada adjacente.

É interessante avaliar também a combinação das distâncias entre edificações de 24m, 6m e 3m que representam as distâncias que mais aparecem nos objetos de estudo dessa pesquisa. Nesse caso a melhor escolha seria: fachada NO (938 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 24m da fachada vizinha, fachada SE (322 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 6m, e fachadas SO e NE (308 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 475 kWh/m<sup>2</sup>/ano) distante 3m das fachadas lindeiras.

Ao comparar essas duas configurações, observa-se uma redução de apenas 1% na disponibilidade de radiação solar ao diminuir poucos metros entre as edificações. Ao avaliar a pior configuração utilizando as menores distâncias (20m, 6m e 3m) e a superfície distante 20m da edificação vizinha voltada para SE a redução de disponibilidade é de 6% ao comparar com o melhor caso nessas mesmas distâncias.

A disposição solar é maior perto da cobertura, edificações com alturas iguais apresentam maior sombreamento quando menor for a distância entre elas. A figura 21 mostra um pouco dessa interação. A disponibilidade varia do maior valor (amarelo) até o menor valor (roxo).

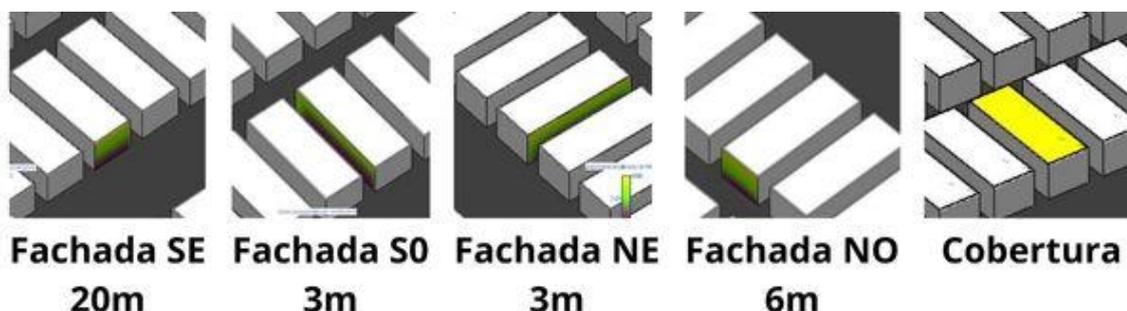


Figura 21 Áreas de exposição à radiação Fonte: Autora

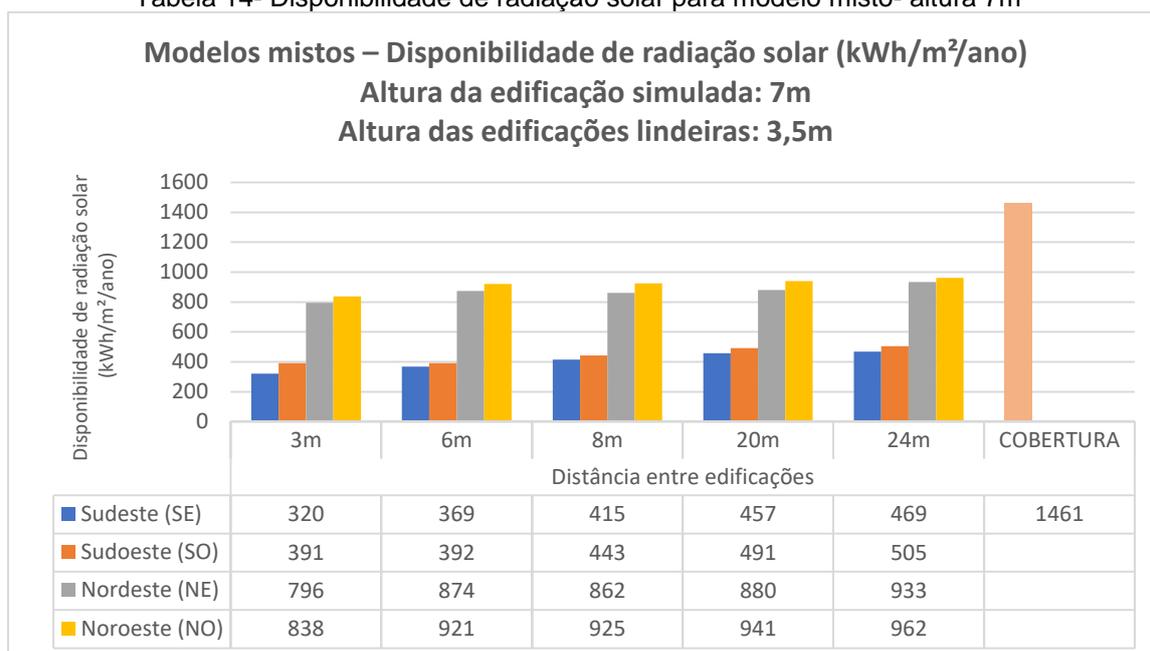
#### 4.1.2 Modelos mistos

Os modelos mistos possuem a altura das edificações simuladas diferente das edificações lindeiras, e as simulações mostram como a distância entre as edificações, a orientação solar e a diferença de altura impactam na disponibilidade de radiação solar.

##### 4.1.2.1 Modelo com edificação simulada de 7m de altura e edificações do entorno de 3,5m de altura

A tabela 14 apresenta o resultado do valor médio de disponibilidade de radiação solar no período de um ano de uma superfície de acordo com a orientação solar e distância entre edificações.

Tabela 14- Disponibilidade de radiação solar para modelo misto- altura 7m



Esse modelo misto representa edificações de dois pavimentos com edificações lindeiras de um pavimento, nota-se uma melhora de disponibilidade de radiação solar entre as distâncias comparado ao modelo uniforme (tabela 13).

Aos valores médios disponíveis em cada distância notamos que o valor para orientação solar NO é sempre maior em qualquer um dos casos. Nas distâncias de 8m, 20m e 24m a redução dos valores quando comparamos NO

(maior valor) e SE (menor valor) é de aproximadamente 53%, quando realizada a mesma comparação para as distâncias de 3m e 6m entre edificações essa redução aumenta para 60% da disponibilidade de radiação solar variando a orientação solar.

Ao contrário do que ocorre no modelo uniforme, percebemos uma diferença maior nas distâncias de 3m e 6m justamente pela influência de sombreamento de uma edificação de um pavimento em edificações de dois pavimentos em pequenos espaços.

Ao observar a variação entre as orientações NO e NE a redução de disponibilidade é de 5% para as distâncias de 3m e 6m, para as distâncias de 8m e 20m a diminuição é de 6% e para a distância de 24m é de 3%. Mostrando que apesar de ter uma diminuição de disponibilidade na orientação solar da superfície voltada para NE a perda não é significativa, principalmente quando espaçamos as edificações em 24m.

Ao comparar os resultados entre SE e SO, para as distâncias de 6m, 8m, 20m e 24m, a diferença entre elas é, em média, de 7%. No entanto, ao avaliar a distância de 3m, observa-se uma variação maior, com a disponibilidade de radiação solar em SE diminuindo em torno de 18% em relação a SO.

Ao relacionar os valores e o gráfico da tabela 14, percebe-se uma diferença de 14% ao aumentar a distância da menor (3m) para a maior (24m) nas orientações NO e NE. Quando essa diferença é analisada para as orientações SE e SO, a variação é, em média, de 27%. O gráfico da figura 22 ilustra essa variação.

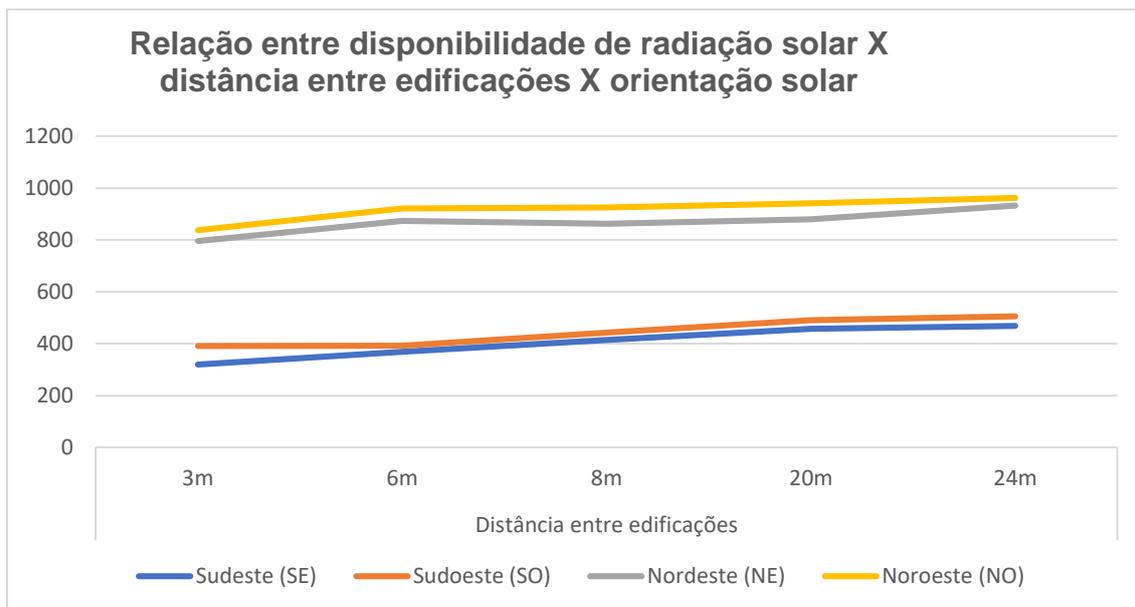


Figura 22 Relação entre disponibilidade de radiação solar X distância entre edificações X orientação solar

Fonte: Autora.

Assim como no caso anterior, os valores de disponibilidade de radiação solar são menores em superfícies voltadas mais ao Sul do que em superfícies voltadas mais ao Norte.

A cobertura, por não sofrer influência de sombreamento do entorno e estar em um plano paralelo ao sol possui uma disponibilidade de radiação solar superior as demais superfícies. Ao comparar a cobertura com o maior valor disponível em uma superfície vertical (distância 24m – NO) vemos uma redução de aproximadamente 34% e ao comparar com o menor valor disponível (distância: 3m; orientação: SE) a redução é de 78% na disponibilidade de radiação.

Como a fonte de sombreamento é mais baixa (edificações de um pavimento) a disponibilidade de radiação solar na cobertura não é alterada em relação ao modelo uniforme, não existe impacto de sombreamento na cobertura nos dois modelos.

A melhor configuração, nesse cenário, para aplicar os módulos FV seria a Fachada NO (962 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 24m da fachada vizinha, fachada SE (415 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 8m da superfície lindeira e as fachadas NE, SO (796 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 391 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distantes 3m da fachada adjacente.

Avaliando, também, a combinação das distâncias entre edificações de 24m, 6m e 3m que representam as distâncias que mais aparecem nos objetos

de estudo dessa pesquisa. Nesse caso a melhor escolha seria: fachada NO (962 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 24m da fachada vizinha, fachada SE (396 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 6m, e fachadas SO e NE (391 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 796 kWh/m<sup>2</sup>/ano) distante 3m das fachadas lindeiras.

Ao comparar essas duas configurações, observa-se uma redução de 0,75% na disponibilidade de radiação solar ao diminuir alguns metros entre as edificações.

Ao avaliar a pior configuração utilizando as menores distâncias (20m, 6m e 3m) com a superfície distante 20m da edificação vizinha voltada para SE a disponibilidade é igual a melhor situação. Isso é possível já que o sombreamento é bem menor, garantindo que as fachadas voltadas mais ao norte possuam uma disponibilidade de radiação mesmo com a distância até a edificação vizinha pequena, como no caso de 3m voltado para NO.

A disposição solar é maior perto da cobertura, quando a edificação de dois pavimentos possui edificações lindeiras com um pavimento as superfícies possuem uma parcela maior de área exposta a radiação. A figura 23 mostra um pouco dessa interação. A disponibilidade varia do maior valor (amarelo) até o menor valor (roxo).

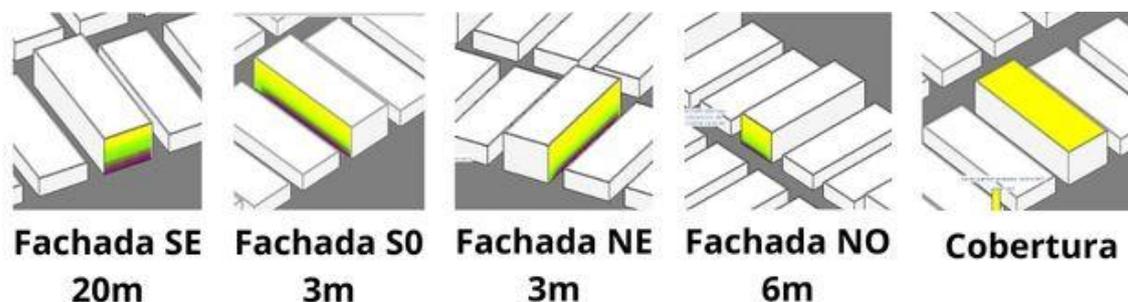
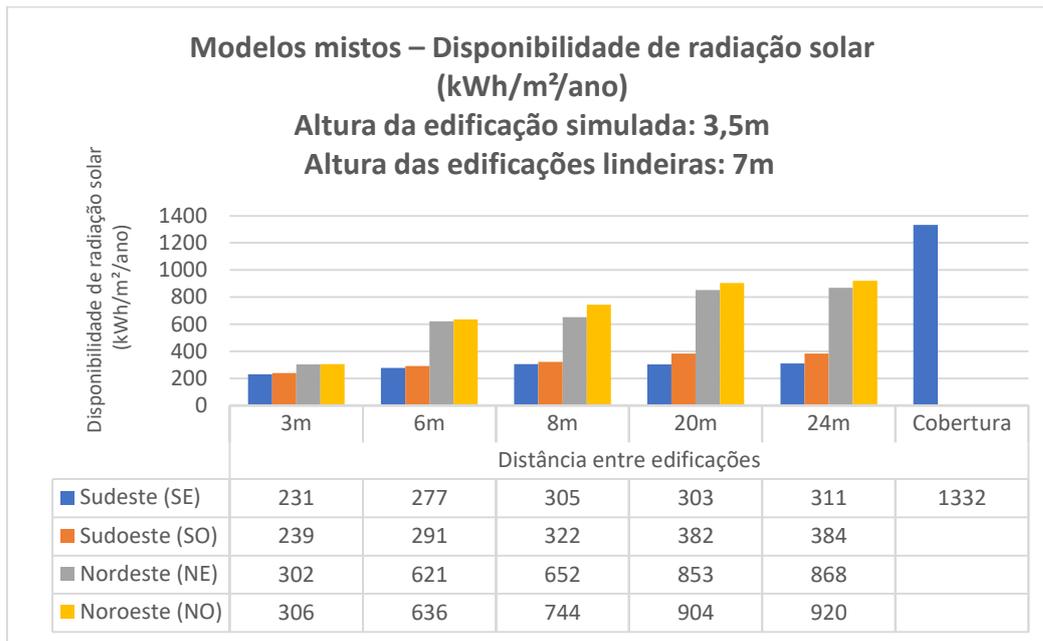


Figura 23 Áreas de exposição à radiação Fonte: Autora

#### 4.1.2.2 Modelo com edificação simulada de 3,5m de altura e edificações do entorno de 7m de altura

A tabela 15 apresenta o resultado do valor médio de disponibilidade de radiação solar no período de um ano de uma superfície de acordo com a orientação solar e distância entre edificações.

Tabela 15: Disponibilidade de radiação solar para modelo misto-altura 3,5m



No modelo misto que possui a edificação simulada com 3,5m de altura e as edificações lindeiras com 7m de altura percebe-se uma diminuição na disponibilidade de radiação solar na cobertura em relação aos modelos anteriores devido ao sombreamento das edificações lindeiras, essa redução é de aproximadamente 8%. Apesar de existir uma redução, ainda representa uma ótima disponibilidade de radiação solar.

Percebe-se uma redução de 31% de disponibilidade de radiação solar quando comparamos a cobertura com a fachada NO distante em 24m de outra edificação. Quando comparada aos valores disponíveis na fachada SE distante 3m de outra edificação essa diferença aumenta para 83%.

Ao analisar os valores médios disponíveis em cada distância notamos que o valor para orientação solar NO é sempre maior em qualquer um dos casos. Nas distâncias de 20m e 24m a redução dos valores quando comparamos NO (maior valor) e SE (menor valor) é de aproximadamente 66%, quando realizada a mesma comparação para as distâncias de 6m e 8m entre edificações essa redução diminui para 57% da disponibilidade de radiação solar variando a orientação solar e para a distância de 3m a redução é de apenas 24%.

Ao observar a variação entre as orientações NO e NE a redução de disponibilidade é de 2% para as distâncias de 3m e 6m, para a distância de 8m a diminuição é de 10% e para a distância de 20m e 24m é de 6%. Mostrando

que apesar de ter uma diminuição de disponibilidade na orientação solar da superfície voltada para NE a perda não é significativa, principalmente quando espaçamos as edificações em 3m e 6m.

Ao comparar os resultados entre SE e SO, para a distância de 3m a diferença é de 3%, para as distâncias de 6m e 8m o valor diminui em 5%, mas quando avaliamos as distâncias de 20m e 24m notamos uma variação maior, a disponibilidade de radiação solar em SE diminui em torno de 21% em relação a SO.

Relacionando os valores e o gráfico da tabela 15, percebe-se uma diferença média de 66% quando aumentamos da menor distância (3m) até a maior distância (24m) nas orientações NO e NE. Ao analisar essa diferença para as orientações SE e SO a variação é em média de 32%. O gráfico da figura 23 mostra essa variação.

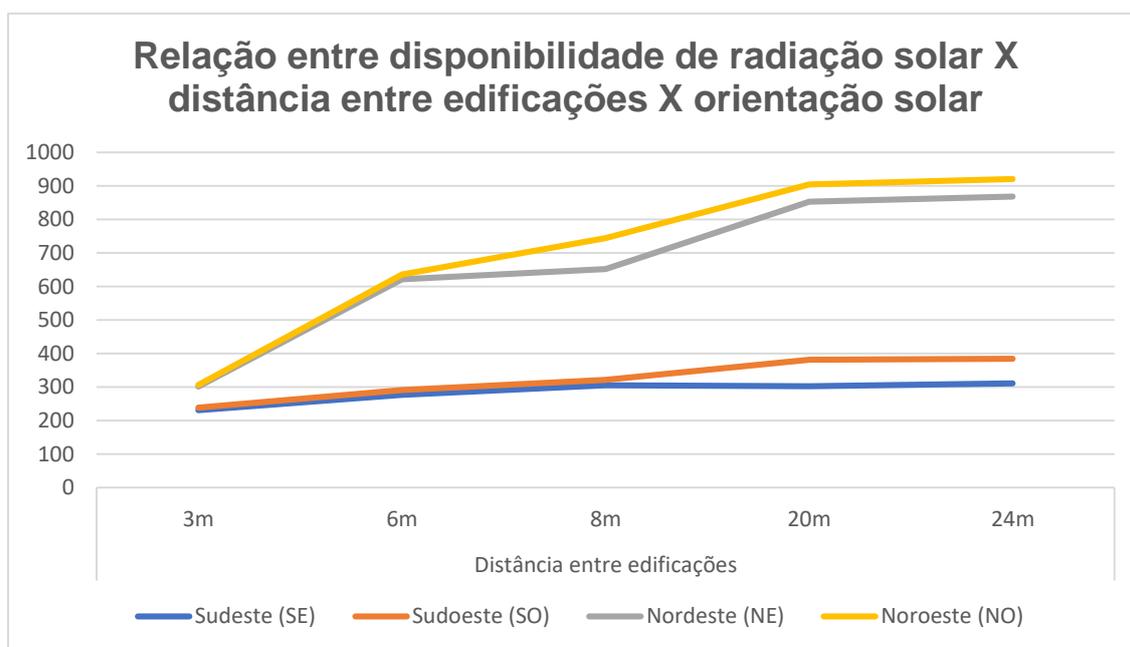


Figura 24 Relação entre disponibilidade de radiação solar X distância entre edificações X orientação solar

Fonte: Autora

Nesse cenário a melhor configuração para aplicar os módulos FV seria a Fachada NO (920 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 24m da fachada vizinha, fachada SE 305 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 8m da superfície lindeira e as fachadas NE, SO (302 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 239 kWh/m<sup>2</sup>/ano ), distantes 3m da fachada adjacente.

É interessante avaliar também a combinação das distâncias entre edificações de 24m, 6m e 3m que representam as distâncias que mais aparecem nos objetos de estudo dessa pesquisa. Nesse caso a melhor escolha seria: fachada NO (920 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 24m da fachada vizinha, fachada SE (277 kWh/m<sup>2</sup>/ano), distante 6m, e fachadas SO e NE (239 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 302 kWh/m<sup>2</sup>/ano) distante 3m das fachadas lindeiras.

Ao comparar essas duas configurações, observa-se uma redução de 1,5% na disponibilidade de radiação solar ao diminuir alguns metros entre as edificações.

Ao avaliar a pior configuração utilizando as menores distâncias (20m, 6m e 3m) e a superfície distante 20m da edificação vizinha voltada para SE a redução de disponibilidade é de 14% ao comparar com o melhor caso nessas mesmas distâncias.

Quando a edificação de um pavimento possui edificações lindeiras com dois pavimentos, as superfícies possuem uma parcela menor de área exposta a radiação. A Figura 22 mostra essa interação. A disponibilidade varia do maior valor (amarelo) até o menor valor (roxo).

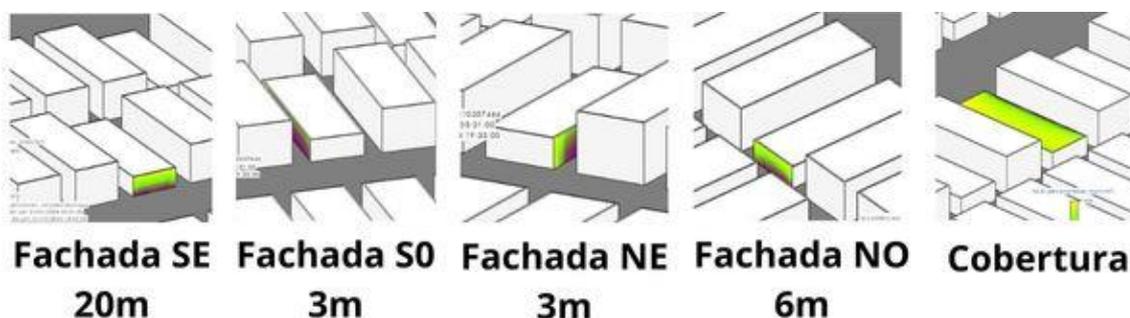


Figura 25 Áreas de exposição à radiação Fonte: Autora

#### 4.2 Avaliação do impacto da morfologia urbana na incidência de radiação solar nas superfícies verticais e horizontais

Após verificar o resultado dos três modelos definidos é necessário criar uma comparação entre eles afim de entender os pontos positivos e negativos e assim, verificar o impacto que a morfologia urbana existente nessa região da cidade de Pelotas gera.

É importante destacar o desempenho das coberturas (superfície horizontal), por estarem em uma região de baixa densidade e sem variações extremas de altura entre edificações - diferença ocorre apenas entre um pavimento e dois pavimentos, não existindo prédios em altura nas proximidades - as coberturas possuem um bom desempenho, mesmo quando a edificação de 3,5m de altura é posicionada entre edificações de 7m de altura, a redução de disponibilidade é de apenas 8% devido ao sombreamento.

Em relação as distâncias das superfícies verticais, os valores de radiação solar disponível aumentam, em todas as situações, à medida que a distância entre edificações cresce, mostrando que a redução do sombreamento é proporcional ao espaçamento. A radiação disponível para distâncias maiores (20m e 24m) tende a se estabilizar, indicando um ponto de saturação na redução de sombreamento.

As orientações NO e NE apresentam maior disponibilidade de radiação solar em todas as situações, reforçando a importância de ter as maiores distâncias entre edificações voltadas para essas direções.

A orientação SE e SO têm menor disponibilidade de radiação solar, especialmente em distâncias menores entre edificações, devido ao maior sombreamento.

O modelo misto com a edificação simulada de 7m de altura se destaca com os maiores valores de radiação solar disponíveis em relação aos outros modelos, o pior caso desse modelo possui valores superiores aos melhores arranjos nos outros modelos, isso ocorre pelo menor sombreamento que a edificação recebe devido à altura das edificações vizinhas.

Os resultados do estudo mostram que, com a combinação otimizada de parâmetros morfológicos, a irradiação solar nos telhados e fachadas podem ser aumentadas em 8% e em até 66%, respectivamente.

#### **4.3 Capacidade de geração solar FV das superfícies para o pior e para o melhor modelo estudado**

Com o objetivo de compreender quais as melhores opções para a aplicação de BIPV foi realizado o cálculo de geração de energia nos três modelos

(uniforme e mistos). Foram escolhidos os piores e melhores valores simulados em cada um dos modelos.

De acordo com o anuário estatístico de energia elétrica de 2023, o consumo de eletricidade residencial per capita na região do Rio Grande do Sul foi de 221 kWh/hab por mês (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024). Para esta pesquisa, foi considerado o consumo de uma família com seis integrantes, totalizando um consumo mensal de 1.326 kWh. Essa informação sobre o consumo residencial é relevante para a análise da melhor opção de BIPV para atender às necessidades de uma família.

A Tabela 14 apresenta os valores de geração Solar FV em cada superfície da edificação em um modelo uniforme. São apresentados quatro valores para superfícies verticais, simulando as fachadas da residência e o valor da cobertura, superfície horizontal.

Tabela 14 Geração Solar Fotovoltaica em Modelos Uniformes

<b>Modelo Uniforme - Geração Solar Fotovoltaica (kWh/mês) - MELHOR OPÇÃO</b>					
<b>Altura das edificações: 7m</b>					
	<b>Orientação solar</b>				
<b>Distância entre edificações</b>	<b>NO</b>	<b>NE</b>	<b>SO</b>	<b>SE</b>	<b>Cobertura</b>
<b>3m</b>		1094	710		
<b>8m</b>				284	3174
<b>24m</b>	775				
<b>Total (kWh/mês):</b>	<b>6037</b>				
<b>Modelo Uniforme - Geração Solar Fotovoltaica (kWh/mês) - PIOR OPÇÃO</b>					
<b>Altura das edificações: 7m</b>					
	<b>Orientação solar</b>				
<b>Distância entre edificações</b>	<b>NO</b>	<b>NE</b>	<b>SO</b>	<b>SE</b>	<b>Cobertura</b>
<b>3m</b>		1094	710		
<b>6m</b>	612				3174
<b>20m</b>				325	
<b>Total (kWh/mês):</b>	<b>5915</b>				

O valor total, tanto na melhor quanto na pior situação geram mais energia do que o consumo da edificação. A cobertura por não possuir obstruções apresenta o melhor resultado, mas utilizando apenas as fachadas também seria suprida a necessidade. Apesar da disponibilidade de radiação solar nas

superfícies distantes em 3m das superfícies adjacentes serem menores, por possuírem uma área maior que as demais, a capacidade de geração possui valores superiores em função de possuírem mais módulos FV distribuídos.

As fachadas orientadas a SE possuem o menor valor de geração de energia, além de apresentar os menores valores de disponibilidade de radiação possuem a menor área de fachada para a aplicação de BIPV.

A redução nos valores de geração de energia na fachada orientada a SE distante 24m da outra edificação (menor desempenho do modelo uniforme) é de 91% em relação a cobertura. Ao comparar a cobertura com a fachada voltada a NE que apresenta o mesmo resultado na melhor e na pior opção a redução de geração de energia é de 65%. Apesar das diferenças entre a melhor e a pior opção no modelo uniforme, essa diferença é de apenas 2%, mostrando que ambas as situações têm potencial para a geração de energia FV em BIPV.

No modelo misto, edificação simulada de dois pavimentos e o entorno de um pavimento (tabela 15), é o modelo com melhor desempenho do BIPV. Assim como o modelo uniforme, a geração FV é superior ao consumo residencial de eletricidade utilizando todas as superfícies.

Tabela 15 Geração Solar Fotovoltaica em modelo misto - Edificação com 7m

<b>Modelo Misto - Geração Solar Fotovoltaica (kWh/mês) - MELHOR OPÇÃO</b>					
<b>Altura da edificação simulada: 7m</b>					
	<b>Orientação solar</b>				
<b>Distância entre edificações</b>	<b>NO</b>	<b>NE</b>	<b>SO</b>	<b>SE</b>	<b>Cobertura</b>
<b>3m</b>		1834	901		
<b>8m</b>				343	3174
<b>24m</b>	795				
<b>Total (kWh/mês):</b>	<b>7047</b>				
<b>Modelo Misto - Geração Solar Fotovoltaica (kWh/mês) - PIOR OPÇÃO</b>					
<b>Altura da edificação simulada: 7m</b>					
	<b>Orientação solar</b>				
<b>Distância entre edificações</b>	<b>NO</b>	<b>NE</b>	<b>SO</b>	<b>SE</b>	<b>Cobertura</b>
<b>3m</b>		1834	901		
<b>6m</b>	761				3174
<b>20m</b>				375	
<b>Total (kWh/mês):</b>	<b>7045</b>				

A maior diferença comparado ao resultado do modelo uniforme seria no desempenho das fachadas, por possuir uma disponibilidade de radiação solar maior e a influência de sombreamento nos módulos FV menor os valores disponíveis de geração de energia são superiores, possuindo fachadas que sozinhas ou com a combinação de duas fachadas poderiam suprir a necessidade de uma família. Nesse caso a diferença entre o pior e o melhor caso é insignificante.

A tabela 16 mostra os resultados de modelos mistos com a edificação simulada com 3,5m de altura e com o entorno possuindo edificações com 7m de altura. Nesse caso, os resultados são piores que os outros dois modelos comentados anteriormente. Um dos motivos é por possuírem áreas disponíveis para a colocação dos módulos menores que os outros e também por sofrerem uma influência grande do sombreamento proveniente das edificações vizinhas.

Tabela 16 Geração Solar Fotovoltaica em modelo misto- edificação de 3,5m

<b>Modelos Mistos – Geração solar fotovoltaica (kWh/mês) - MELHOR OPÇÃO</b>					
<b>Altura da edificação simulada: 3,5m</b>					
	<b>Orientação solar</b>				
<b>Distância entre edificações</b>	<b>NO</b>	<b>NE</b>	<b>SO</b>	<b>SE</b>	<b>Cobertura</b>
<b>3m</b>		348	275		
<b>8m</b>				305	2894
<b>24m</b>	380				
<b>Total (kWh/mês):</b>	<b>4202</b>				
<b>Modelos Mistos – Geração solar fotovoltaica (kWh/mês- PIOR OPÇÃO</b>					
<b>Altura da edificação simulada: 3,5m</b>					
	<b>Orientação solar</b>				
<b>Distância entre edificações</b>	<b>NO</b>	<b>NE</b>	<b>SO</b>	<b>SE</b>	<b>Cobertura</b>
<b>3m</b>		348	275		
<b>6m</b>	263				2894
<b>20m</b>				125	
<b>Total (kWh/mês):</b>	<b>3905</b>				

Assim como nos outros modelos a cobertura possui um bom desempenho. A diferença entre o desempenho da cobertura e o melhor valor gerado nas fachadas é de 87%.

O modelo misto com a edificação simulada de 7m de altura é a única situação que o somatório da geração de energia FV das fachadas é superior ao valor da cobertura.

Comparando o caso misto com edificação simulada de 7m, que apresenta os melhores resultados estando na melhor e pior situação, com o modelo uniforme que retrata as características mais presentes na região do bairro Laranjal, nota-se uma diminuição na capacidade de geração FV de 16% e ainda assim o modelo uniforme consegue gerar mais energia do que é consumida por uma família.

Ao comparar o melhor modelo de geração com o pior caso (modelo misto com edificação simulada de 3,5m de altura) a diferença na capacidade de geração é de 45 %. Isso ocorre pela menor disponibilidade de radiação em todas as superfícies, mas também pelo tamanho das áreas disponíveis para a colocação dos painéis FV, como possui apenas um pavimento as áreas são menores que uma edificação de dois pavimentos.

A pensar de as superfícies verticais não serem capazes de gerar o seu máximo de energia por sofrerem influência significativa do sombreamento, haverá alguma geração. Se o usuário pode optar entre revestir sua edificação com um material que apenas cumpra requisitos estéticos e entre outro, capaz de gerar energia elétrica e, em curto e médio prazo, agregar benefícios econômicos, já uma grande vantagem.

A aplicação de BIPV nas edificações estudadas garante que a geração de energia seja maior do que a consumida por mês por uma família de seis pessoas. O sistema de compensação de energia elétrica (SCEE) permite que o restante de energia FV gerada seja injetada para rede e assim o consumidor fica com um crédito de energia, que pode ser distribuído no mesmo mês a outras unidades consumidoras (autoconsumo remoto) ou transformar em uma compensação do consumo dos meses seguintes na própria residência (autoconsumo local).

#### **4.4 Alternativas no planejamento de novos empreendimentos residenciais de forma a maximizar a capacidade de geração dos sistemas BIPV.**

A partir das análises realizadas anteriormente fica claro que o potencial fotovoltaico é impactado pela morfologia urbana da zona residencial estudada, mas esse impacto é positivo mostrando que existem possibilidades de utilizar não apenas as superfícies horizontais como também as superfícies verticais.

Ao analisar as diferenças de alturas, é importante manter as edificações com alturas iguais ou então posicionar edificações de dois pavimentos perto de edificações de um pavimento garantindo maior disponibilidade e potencial de geração de energia.

Ao especificar o local de posicionamento dos painéis FV é importante dar prioridade para o segundo pavimento, nele a disponibilidade solar é superior. Deve-se evitar, então, elementos que criem sombreamentos nessas regiões.

O tamanho da área da superfície é um fator determinante para o melhor desempenho na geração FV. Fachadas orientadas a NO e NE possuem maior disponibilidade de radiação solar tornando interessante dar prioridade para elas, proporcionando uma maior área disponível para aplicação dos painéis FV.

A distância de 3m entre edificações é a que apresenta menor desempenho em disponibilidade de radiação, indicando que criar recortes nessa fachada aumentariam esse recuo e conseqüentemente a disponibilidade de radiação e o potencial de geração de energia.

A disponibilidade de radiação solar para superfícies distantes em 24m de outras é superior, existe uma influência de sombreamento bem menor que na distância de 3m, sendo necessário um cuidado especial ao escolher essas fachadas para a aplicação dos módulos. Estudar a utilização de módulos FV mais potentes aumentaria a capacidade de geração de energia.

Em casos de residências de um pavimento possuindo o entorno imediato com dois pavimentos, o ideal seria utilizar a cobertura como fonte principal de geração de energia e as superfícies verticais como um suporte para aumentar a geração.

Uma boa alternativa para melhorar o desempenho de edificações seria aumentar o tamanho dos terrenos. Os recuos que são aplicados na legislação são favoráveis para a aplicação de BIPV, porém as distâncias maiores entre as edificações apresentam uma fachada menor disponível, por estarem localizados da parte frontal e de fundos do terreno. Seria interessante tornar os terrenos mais quadrados, com uma proporção nos quatro lados similar, ou então possuindo

uma frente maior para explorar a disponibilidade radiação solar em distâncias maiores como 20m e 24m.

Residências isoladas no lote com recuos maiores favorecem ainda mais no potencial de geração, mas dentro da realidade dos lotes encontrados na zona de estudo na cidade de Pelotas isso não ocorre, então é necessário cuidado com alguns elementos construtivos, como muros, que possuem impacto de sombreamento no primeiro pavimento.

## 5 Conclusões

O desenvolvimento desse trabalho teve como foco principal o estudo das características da morfologia urbana existente em um recorte do município de Pelotas e o impacto dessa morfologia no potencial solar para a aplicação de sistemas BIPV.

Ao contrário dos geradores de energia que utilizam combustíveis fósseis, o sistema FV pode ser integrado ao ambiente urbano, pois produz energia limpa de maneira silenciosa, sem causar poluição, e ainda, pode ser harmoniosamente incorporado à arquitetura. A integração arquitetônica, BIPV, apresenta desafios significativos, exigindo uma mudança na abordagem de projetos arquitetônicos e urbanísticos. Não basta considerar apenas os aspectos energéticos; arquitetos têm papel crucial nesse processo, já que a forma da edificação e das cidades precisa atender às novas demandas energéticas. Nesse contexto, a energia deve ser encarada como um elemento interligado à forma das edificações, cidades e paisagens, e não como uma variável abstrata e alheia a estética do projeto.

A morfologia urbana na escala do bairro influencia diretamente a geração de energia por painéis FV instalados em coberturas e fachadas, pois o sombreamento causado pelas edificações vizinhas pode impactar significativamente a eficiência desses sistemas. Assim, a implantação eficaz de BIPV está diretamente relacionada ao ambiente construído e a configuração da morfologia urbana.

Portanto, foi objetivo principal dessa dissertação buscar identificar o impacto da morfologia urbana na geração de energia solar FV por meio de BIPVS em uma área residencial com baixa densidade.

Dentre os objetivos específicos, foram definidos e caracterizados os objetos de estudos. O bairro do Laranjal, na cidade de Pelotas – RS, se destaca por ser uma zona residencial de expansão na cidade e como objetos de estudo, foram escolhidos os quatro novos condomínios e loteamento da região. A caracterização de cada um deles considerou os parâmetros morfológicos e a legislação vigente, que determinam dimensões de terreno, altura máxima de edificações, recuos obrigatórios, tamanho de vias, distâncias entre edificações e tipologia das construções, afim de identificar as equivalências.

O segundo objetivo específico foi construir modelos representativos dos índices encontrados com mais frequência nessa região de Pelotas. Três modelos representativos foram criados: i) modelo uniforme com edificações de dois pavimentos; ii) modelo misto com edificação de dois pavimentos rodeada de volumes de um pavimento e iii) modelo misto com edificação de um pavimento rodeada de volumes com dois pavimentos.

Todos os modelos foram simulados utilizando o programa *Autodesk REVIT* utilizando o *plugin Insight* e avaliados com a variação de distâncias entre edificações de 3m, 6m, 8m, 20m e 24m, e aplicando, também, as orientações solares NO, NE, SO, SE que foram as orientações encontradas nos objetos de estudo.

O terceiro objetivo específico avaliou o impacto da morfologia urbana na incidência de radiação solar nas superfícies verticais e horizontais. A superfície horizontal, cobertura, teve o melhor desempenho, mesmo com o efeito de sombreamento de edificações mais altas no modelo misto, a cobertura teve apenas 8% de diferença em relação ao melhor desempenho. As superfícies verticais, fachadas, sofrem mais com o efeito do entorno.

A orientação solar NO é a que apresenta a melhor disponibilidade de radiação solar e SE a pior disponibilidade. Nos três modelos ao manter distância entre edificações e variar a orientação solar de NO para SE progressivamente os valores de disponibilidade aumentaram, em alguns casos o aumento foi de 60%. Ao alterar as orientações entre NO e NE e entre SO e SE os ganhos não foram expressivos variando de 3% até 12% dependendo do modelo avaliado.

Avaliando as diferenças de disponibilidade entre a cobertura e as fachadas, o resultado mostrou que a diferença gira entorno de 30% com fachadas voltadas para NO em todos os modelos e quando as fachadas são voltadas a SE a diferença fica em torno de 80% em relação a cobertura.

Em todos os modelos a melhor configuração de uma edificação seria ter a fachada principal voltada a NO distante 24m da edificação vizinha, as fachadas laterais distantes 3m das edificações lindeiras e voltadas para SO e NE e a fachada de fundos distante 8m da edificação vizinha orientada a SE. Mesmo essa sendo a melhor configuração ao comparar com o pior caso a diferença na disponibilidade é pequena. No modelo uniforme a variação é de 6%, no modelo misto com a edificação simulada tendo dois pavimentos não existe variação e no

modelo misto com a edificação simulada de um pavimento e o entorno de dois pavimentos a diferença foi de 14%.

O quarto objetivo específico dessa pesquisa foi verificar a capacidade de geração FV das superfícies para o pior e melhor modelo estudado. Foram realizados cálculos de geração de energia para compreender como cada modelo se comportava e por fim se chegou à conclusão que o modelo misto com a edificação simulada de dois pavimentos é o que possui a maior geração de energia, apresentando uma diferença de 45% em relação ao outro modelo misto. Essa diferença significativa é atribuída a menor disponibilidade de radiação solar nas superfícies, mas também a menor área de fachadas para a aplicação de painéis FV.

Foi importante fazer a comparação também com o modelo mediano, o modelo uniforme, por ele ser o modelo que representa melhor o que foi encontrado nos objetos de estudo em relação as tipologias. A diminuição na capacidade de geração FV foi de 16% em relação ao melhor modelo misto estudado.

Em todos os modelos, a edificação pode gerar mais energia do que uma família com seis integrantes consome no mês, mostrando que é possível a aplicação BIPV no modelo de morfologia urbana que está sendo executado nessa zona urbana do município.

O último objetivo específico dessa pesquisa foi propor alternativas no planejamento de novos empreendimentos de forma a maximizar a capacidade de geração dos sistemas BIPV. Alguns ajustes na proposta arquitetônica podem melhorar o desempenho de fachadas com pequenas distâncias entre edificações, por exemplo, recortes na fachada aumentariam o recuo e com isso proporcionariam mais disponibilidade de radiação solar na superfície. Os empreendimentos podem também rever o tamanho dos lotes, ter lotes com frentes maiores aumentaria a capacidade de geração das fachadas frontais por aumentarem a área disponível para a colocação de painéis FV, por possuírem uma distância maior até a edificação vizinha, a disponibilidade de radiação já é maior que nas outras distâncias e seria melhor aproveitada.

Os resultados dessa pesquisa mostram que a morfologia urbana predominante na nova expansão do bairro laranjal contribui de forma positiva para a aplicação de BIPV, mesmo apresentando algumas restrições em

determinadas situações já explicadas anteriormente. A geração de energia por BIPV nas edificações é superior ao consumo mensal de uma família permitindo a compensação de energia elétrica prevista pela ANEEL.

### **5.1 Limitações do trabalho**

Esse estudo apresentou algumas limitações que são aqui apresentadas.

As análises foram desenvolvidas em modelos simplificados, nos quais não foram trabalhadas as particularidades arquitetônicas que existem em uma edificação. Sendo assim as conclusões se referem a esses modelos genéricos, que são baseados nas características mais recorrentes dos condomínios e loteamentos existentes, mas que não abraçam toda a diversidade que existe nos exemplares arquitetônicos ali presentes.

Foram considerados os impactos das volumetrias de edificações vizinhas e da distância entre elas, mas seria interessante apresentar resultados levando em consideração a presença de vegetações, mobiliários urbanos e elementos construtivos que acabam por influenciar na disponibilidade de radiação solar, por em alguns casos, sombrearem áreas que poderiam receber radiação solar.

### **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Este trabalho de dissertação cumpriu com seus objetivos, concluindo que a morfologia urbana na zona residência do bairro do laranjal impacta de forma positiva no desempenho da aplicação de BIPV. Baseado nisso, sugere-se com pesquisas futuras:

- Estudar a aplicação de módulos fotovoltaicos opacos e semitransparentes em um modelo de projeto arquitetônico existente nos condomínios e loteamento estudados nesse trabalho.
- Estudar a aplicação em coberturas inclinadas afim de identificar se a disponibilidade de radiação solar é melhor do que em coberturas planas..

## BIBLIOGRAFIA

ABSOLAR Acesso em: 10 de maio 2013. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa N° 482, de 17 de abril de 2012.** Acesso em: 10 de ago. 2022

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa N° 657, de 14 de abril de 2015.** Acesso em: 10 de ago. 2022.

BEN. **Relatório Síntese 2022.** Ano Base 2021. Ministério de Minas e Energia, 2022.

BENDER, Livia Vasques. **Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2.** 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

BRASIL. Lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022. **Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS).** 2022

CERÓN, I., CAAMAÑO-MARTÍN, E., & NEILA, F. J. **“State-of-the-art” of building integrated photovoltaic products.** Renewable Energy, 58, 127–133. 10.1016/j.renene.2013.02.013. 2013

CHENG, C.L.; JIMENEZ, C.S.S.; LEE, M. **Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans.** Renew Energy 34, 1644-1650, 2009.

CHIVELET, N.M; SOLLA, I.F. **Envolvente fotovoltaica em la Arquitectura.** Editorial Reverté, Barcelona, 2007.

7 CHATZIPOULKA, C., NIKOLOPOULOU, M. **Urban geometry, SVF and insolation of open spaces: London and Paris.** Building Research & Information, 46(8), 881–898, 2018.

12 CRONEMBERGER, J.; CAAMAÑO-MARTÍN, E.; SÁNCHEZ, S.V. **Assessing the Solar Irradiation Potencial For Solar Photovoltaic Applications in Buildings at Low Latitudes: making the case for Brazil.** Energy and Buildings, v. 55, p. 264-272, set. 2012.

3 ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS DIRECTIVE (EPBD) 2010/31/EU  
Acesso em: 05 de maio, 2023. Disponível em:<<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>>

DIRECTIVE 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Special edition in Croatian: Chapter 12 Volume 003 P. 124 - 146

EPE. **Balanço energético Nacional 2020:** Ano base 2019. Ministério de Minas e Energia, 2020.

EPE. **Balanço energético Nacional 2022:** Ano base 2021. Ministério de Minas e Energia, 2022.

EPE. **Balanço energético Nacional 2023:** Ano base 2022. Ministério de Minas e Energia, 2023.

2 EUROPEAN UNION. **Directive 2010/31/EU: of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.** Acessado em: 01 de março de 2023. Online. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do>

EUROPEAN COMMISSION. **Guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are early zero-energy buildings** – Commission Recommendation (EU) 2016/1318. Off J Eur Union 2016; L208: 46–57

FREITAS, J. DE S., CRONEMBERGER, J., SOARES, R. M., & DAVID AMORIM, C. N. **Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug**. Renewable Energy, 2020.

GAVIRA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. **Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 7-23, out./dez. 2013. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

GRENNER. Acesso em: 10 de maio 2013. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/>>

HESTNES, A.; HASTINGS, R.; SAXHOF, B. **Solar Energy Houses: Strategies Technologies Examples**. Eathscan Publications, London, 2003.

IEA- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **PVPS Annual Report International Energy Agency**, 2022.

IEA- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **PVPS Annual Report International Energy Agency**, 2023.

LAMAS, J. M. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. 12. ed. Lisboa: [s.n.], v. 1, 2009.

LE, Phuc. **Solar-analysis-calculating-shaded-areas-in-revit-for-sustainable-design**. 2022. Disponível em: <https://medium.com/autodesk-university/solar-analysis-calculating-shaded-areas-in-revit-for-sustainable-design-c201bd9bb3f4>. Acesso em: 5 maio 2023.

MENDIS, T., HUANG, Z., XU, S., & ZHANG, W. **Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: A case study of Colombo, Sri Lanka.** Energy, 116908, 2020.

MONTORO, D.F.; DESPOTOU, E.; LATOUR, M.; SLUSARZ, T.; WEISS, I.; CAVENA, S.; HELM, P.; GOODAL, J.; FINTIKAKIS, N.; SCHELLEKES, E. **PV diffusion in the Building Sector.** 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference Proceedings, Valencia, Spain, pp 3300-3304, 2008.

ONU- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Acesso em: 15 de dez. de 2022. Disponível em: < <https://brasil.un.org/>>

ONU- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Acesso em: 11 de mar. de 2023. Disponível em: < <https://brasil.un.org/>>

PABASARA, W.M.; WIJERATNE, U.; YANG, R.J.; TOO, E.; WAKEFIELD, R. **Design and development of distributed solar PV systems: do the current tools work.** Sustain. Cities Soc. 45, 553-578, 2019.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. **G. Atlas brasileiro de energia solar.** 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.

PNE 2050. **Plano Nacional de Energia.** Ministério de Minas e Energia, 2020.

POON, K. H., KÄMPF, J. H., TAY, S. E. R., WONG, N. H., & REINDL, T. **G. Parametric study of URBAN morphology on building solar energy potential in Singapore context.** Urban Climate, 33, 100624, 2020

PORTOLAN DOS SANTOS, I. **Integração de painéis fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista.** 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-

Graduação em engenharia Civil- PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

PORTOLAN DOS SANTOS, I; RÜTHER, R. **Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil**. Renewable Energy, v. 63, p. 116-124, 2014.

REDWEIK, P., CATITA, C., & BRITO, M. **Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape**. Solar Energy, 97, 332–341, 2013.

RESENDE, J., MONZÓN-CHAVARRÍAS, M., & CORVACHO, H. **The applicability of nearly/net zero energy residential buildings in Brazil – A study of a low standard dwelling in three different Brazilian climate zones**. Indoor and Built Environment, 1420326X2096115, 2020.

ROBERT; MCNEEL & ASSOCIATES. Rhinoceros 7. User's Guide. Acesso em: 05 abr. 2023. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com>>

RUTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. USFC/LABSOLAR ed. Florianópolis: 2004.

SALIMZADEH, N.; VAHDATIKHAKI, F.; HAMMAD, A. **Parametric modeling and surface-specific sensitivity analysis of PV module layout on building skin using BIM**. Energy Build, 216, 109953, 2020.

SALAMONI, I.; RICARDO RUTHER, P. D.; ZILLES, R. **Uma oportunidade para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica no Brasil: eletricidade solar para os telhados**. Parcerias Estratégicas. v.14, 2009.

SARETTA, E.; CAPUTO, P.; FRONTINI, F. **An integrated 3D GIS-based method for estimating the urban potential of BIPV retrofit of façades**. Sustainable Cities and Society, 62, 102410, 2020.

SCHMALFUSS, L. **Análise de viabilidade de um edifício comercial atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética, no extremo sul do Brasil.** 2021. 142 f. Dissertação (MESTRADO)-Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

SCOGNAMIGLIO, A., & RØSTVIK, H. N. **Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design.** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21(6), 1319–1336, 2012.

SHIRAZI, Ali Mohammad *et al.* **Techno-economic BIPV evaluation method in urban areas.** Renewable Energy. [S.L], p. 1235-1246. 10 maio. 2019.

SHUKLA, A. K., SUDHAKAR, K., & BARENDAR, P. **A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system.** Energy and Buildings, 128, 99–110. 2016

SHUKLA, A. K., SUDHAKAR, K., & BARENDAR, P. **Recent advancement in BIPV product technologies: A review.** Energy and Buildings, 140, 188–195. 2017

SOLEMMA. Environmental Tools to Empower Design. Acesso em: 05 abr. 2023. Disponível em: <http://www.solemma.com>

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, 118, 84–98, 2018.

SORRALDE, JJ. *Et al.* **Solar energy and urban morfophology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighborhoods in London.** Renewable Energy, 2015.

SUN, Huixuan *et al.* **Comprehensive feasibility assessment of building integrated photovoltaics (BIPV) on building surfaces in high-density urban environments.** *Solar Energy*. [S.L], p. 734-746. 5 ago. 2021.

VIANNA, S. **Análise do “Direito ao sol” nos planos diretores de Pelotas- RS, em zonas residenciais.** 2017. 200 f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2017.

VULKAN, A., KLOOG, I., DORMAN, M., & ERELL, E. **Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas.** *Energy and Buildings*, 169, 97–109. 2018.

ZANON, B., & VERONES, S. **Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools.** *Land Use Policy*, 32, 343–355, 2013.

ZOMER, C. **Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Uma Edificação Inserida em Meio Urbano e Conectada à Rede Elétrica.** Florianópolis, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Departamento da Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ZOMER, Clarissa Debiazi; CUSTÓDIO, Isadora Pauli; ANTONIOLLI, Andriago; RUTHER, Ricardo. **Performance assessment of partially shaded building-integrated photovoltaic (BIPV) systems in a positive-energy solar energy laboratory building: Architecture perspectives.** *Solar Energy*. [S.L], p. 879-896. 15 out. 2020.

ZOMER, Clarissa Debiazi; CUSTÓDIO, Isadora Pauli. **O que toda empresa de energia solar precisa saber sobre integração de sistemas fotovoltaicos a edificações residenciais e comerciais.** [S. L]: Arquetetando Energia Solar, 2022. 54

ZOMER, Clarissa; MACHADO, Aline. **Arquitetos que projetam com o sol: a importância da parceria entre integradores e arquitetos para elevar a qualidade dos projetos fotovoltaicos nas edificações.** A importância da parceria entre integradores e arquitetos para elevar a qualidade dos projetos fotovoltaicos nas edificações. 2023. Disponível em: file:///C:/Users/integ/Downloads/1698177232241Ebook.arquitetos.que.projetam.com.o.sol.pdf. Acesso em: 05 jan. 2024.

YANG, H.; LU, L. **The optimum tilt angles and orientations of PV claddings for building- integrated photovoltaic (BIPV) applications.** J. Sol. Energy Eng. 129, 253-255, 2007.

IRENA – Agência Internacional de Energias Renováveis. Acesso em: 3 de outubro 2023. Disponível em: < <https://www.irena.org/>>