

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO DA MAIA BUENO

**ESTIMATIVA DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

MEDIANEIRA

2022

BRUNO DA MAIA BUENO

**ESTIMATIVA DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

Estimated photovoltaic potential using digital image processing

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Cristiane Lionço de Oliveira.

Coorientador: Pedro Luiz de Paula Filho.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNO DA MAIA BUENO

**ESTIMATIVA DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/novembro/2022

Cristiane Lionço de Oliveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Pedro Luiz de Paula Filho
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alex Lemes Guedes
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Filipe Marangoni
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Cristiane Lionço de Oliveira e ao meu coorientador Prof. Dr. Pedro Luiz de Paula Filho pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Não se esconde do que você é
Tenha orgulho do que você é
E faça a sua maior dificuldade ser a sua maior
característica a sua maior força,
Porque que essa pessoa faz sucesso?
Você nunca vai entender
Porque você tá achando que sucesso é uma coisa
e sucesso é você poder ser você mesmo!”
(ALEXANDRE; GAULES, 2022).

RESUMO

A produção de energia fotovoltaica mostra-se como uma alternativa de grande potencial e ambientalmente viável para auxiliar no suprimento do aumento da demanda energética mundial. A geração distribuída vem com uma forma para redução da necessidade de expansão das linhas transmissão de energia e o caráter descentralizado do sistema faz com que os custos e impactos de geração convencional sejam evitados. Este trabalho tem como objetivo a determinação da área de telhados de unidades consumidoras residenciais de um quarteirão localizado na área urbana da cidade de Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, por meio de um algoritmo que utiliza processamento digital de imagens, utilizando imagens capturadas por satélites para a instalação de módulos fotovoltaicos e o cálculo de seu potencial de geração de energia fotovoltaica. Aplicando os filtros utilizados no algoritmo dentre eles um filtro em escala de cinza, filtro de cores em preto e branco, o *canny edge*, a transformada de *Hough* e alguns filtros lógicos foi possível identificar a área disponível e orientação de telhados na região de estudo, com isso chegou-se a um potencial de geração fotovoltaica de 227.448 kWh/ano. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a área urbana estudada possui um grande potencial de geração de energia elétrica e que a metodologia apresentada pode ser utilizada para a determinação do potencial de geração de energia fotovoltaica em telhados de domicílios residenciais.

Palavras chaves: geração de energia; energia renovável; forma alternativa, detecção de telhados;

ABSTRACT

The production of photovoltaic energy is an alternative of great potential and environmentally viable, to help supply the increase in world energy demand. Distributed generation comes with a way to reduce the need to expand power transmission lines and the decentralized character of the system means that the costs and impacts of conventional generation are avoided. This work aims to determine the roof area of residential consumer units in a block located in the urban area of the city of Foz do Iguaçu, in the state of Paraná, through an algorithm that uses digital image processing, using images captured by satellites for installing photovoltaic modules and calculating their photovoltaic energy generation potential. Applying the filters used in the algorithm, including a gray scale filter, a black and white color filter, the canny edge, the Hough transform and some logic filters, it was possible to identify the available area and the orientation of the roofs in the region of study, with With this, a photovoltaic generation potential of 227,448 kWh/year was reached. The results obtained in this work demonstrate that the studied urban area has a great potential for electric energy generation and that the presented methodology can be used to determine the potential for photovoltaic energy generation on the roofs of residences.

Keywords: power generation; renewable energy; alternative form; roof detection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz de geração de energia elétrica do Brasil por origem de geração ...	17
Figura 2 - Média de irradiação solar – Média anual(kWh/m ² ano).....	19
Figura 3 - Célula de silício fotovoltaica	20
Figura 4 - Procedimentos fundamentais para PDI.....	23
Figura 5 - Etapas do procedimento	28
Figura 6 - Vista superior da localização da região escolhida.....	33
Figura 7 - Escala em cinza aplicação do algoritmo	34
Figura 8 - Imagem com bordas nítidas do algoritmo	34
Figura 9 - Todas as bordas detectadas com o algoritmo	35
Figura 10 - Limites detectadas com o algoritmo.....	35
Figura 11 - Área total encontrada com o algoritmo	36
Figura 12 - Análise do domicílio 1 com o algoritmo	45
Figura 13 - Análise do domicílio 2 com o algoritmo	46
Figura 14 - Análise do domicílio 3 com o algoritmo	47
Figura 15 - Análise do domicílio 4 com o algoritmo	48
Figura 16 - Análise do domicílio 5 com o algoritmo	49
Figura 17 - Análise do domicílio 6 com o algoritmo	50
Figura 18 - Análise do domicílio 7 com o algoritmo	51
Figura 19 - Análise do domicílio 8 com o algoritmo	52
Figura 20 - Análise do domicílio 9 com o algoritmo	53
Figura 21 - Análise do domicílio 10 com o algoritmo	54
Figura 22 - Análise do domicílio 11 com o algoritmo	55
Figura 23 - Análise do domicílio 12 com o algoritmo	56
Figura 24 - Análise do domicílio 13 com o algoritmo	57
Figura 25 - Análise do domicílio 14 com o algoritmo	58
Figura 26 - Análise do domicílio 15 com o algoritmo	59
Figura 27 - Área do telhado encontrada pelo <i>google maps</i> e pelo algoritmo	60
Quadro 1 - Orientação dos telhados	37
Quadro 2 - Média mensal e anual de geração de cada domicílio.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PV	Potencial Fotovoltaico
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SCFR	Sistema de Fotovoltaicos de Energia Elétrica
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
kW	Quilowatt
MW	Megawatt
PDI	Processamento Digital de Imagem
RGB	Red, Green e Blue
HSV	Hue, Saturation e Value
CLAGE	Contrast Limited AHE
FV	Fotovoltaico
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PCC	Potência instalada no sistema
Ad	Área disponível
Eff	Eficiência do painel fotovoltaico
E	Energia total gerada
Nel	Eficiência do inversor
PVF	Potencia Fotovoltaica
GPOA	Grau de Irradiação Solar Anual
WP	Watt-pico
NI	Nível de irradiação
kWh/m ²	Quilowatt hora por metro quadrado
kWh/m ²	Quilowatt hora ano
IA	Inteligência Artificial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivos específicos	15
3	ESTADO DA ARTE	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1	Energia Solar	17
4.2	Radiação Solar	18
4.3	Tecnologia Fotovoltaica	19
4.4	Geração Fotovoltaica	21
4.5	Processamento Digital de Imagens	22
4.6	Filtro Bilateral	24
4.7	Filtro de Cores	24
4.8	A equalização do histograma	25
4.8.1	A equalização do histograma adaptável	25
4.9	Equalização Adaptativa Limitada Contrastiva	26
4.10	Canny Edge	26
4.11	Transformada de Hough	26
5	MATERIAS E MÉTODOS	28
5.1	Realizar o mapeamento de telhados e estimar o número de domicílios	28
5.1.1	Avaliação do Telhado	29
5.2	Identificar a área total e orientação dos telhados	29
5.2.1	Extração parcial de telhados	29
5.2.2	Estimativa de Inclinação	30
5.2.3	Detecção da estrutura do telhado	31
5.3	Calcular a estimativa do potencial de geração de energia fotovoltaica	31
5.3.1	Simulação de irradiação	31
5.3.2	Simulação de rendimento	31
5.4	Processamento de dados	32
6	RESULTADOS	33
6.1	Região de estudo	33
6.2	Obtenção da área total	33

6.3	Orientação dos telhados.....	36
6.4	Cálculo do potencial fotovoltaico	37
7	CONCLUSÃO	40
7.1	Metodologia aplicada	40
7.2	Trabalhos e Aplicações futuras	40
	REFERÊNCIAS.....	42
	APÊNDICE A - Questionário de pesquisa	45

1 INTRODUÇÃO

A procura por fontes renováveis de energia tem se tornado um dos grandes desafios da humanidade e vem ganhando importância com o aumento do efeito estufa. Uma das alternativas para a geração é utilizar a energia fornecida pelo sol, uma fonte limpa e gratuita de energia. (DANTAS, POMPERMAYER, 2018).

Segundo Barros, Koluszuk e Sauaia (2018), a implantação de mais energia solar na matriz energética do país, pode contribuir indiretamente na diminuição bandeiras tarifárias com o aumento de energia disponível no Sistema Elétrico Nacional, reduzindo a utilização de hidrelétricas que operam em alta de preço quando os reservatórios apresentam níveis baixos, o que acaba ocasionando a operação de usinas termelétricas que tem um alto custo de geração, para o suprimento da demanda de energética do País.

Comparando aos países de referência, como China, Alemanha, Japão, Estados Unidos e Índia que possuem esse modelo de geração, o Brasil possui enorme potencial de geração fotovoltaica já que apresenta uma maior incidência solar e tarifas de energia elétrica em patamares parecidos aos de países onde a tecnologia já é difundida como China, Alemanha, Japão, Estados Unidos e Índia. No entanto, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, adotado no Brasil, não oferece a mesma atratividade financeira que outras nacionalidades, como por exemplo na Alemanha as companhias elétricas devem pagar, em dinheiro, os consumidores que devolvem o excedente de energia gerada (EPE, 2014).

O rápido desenvolvimento e o conseqüente aumento do uso de energias renováveis como a energia solar fotovoltaica têm ocorrido nas áreas urbanas na última década, porém, o uso desta tecnologia requer uma análise mais detalhada das variáveis determinantes do potencial fotovoltaico, para que seja possível utilizar o máximo do potencial fotovoltaico disponível no meio urbano. Em análises de geoprocessamento é necessário fotografias de alta resolução para demonstrar a real distribuição espacial-temporal do potencial solar sobre as superfícies dos edifícios e fornecer uma análise estatística precisa. (LI; LIU, 2017)

A produção de energia fotovoltaica mostra-se como uma alternativa de grande potencial e ambientalmente viável, como solução ao aumento da demanda energética mundial. Este estudo vem a ser um incentivo para a maior utilização de

painéis fotovoltaicos, mostrando a importância desta fonte de energia alternativa e limpa, evitando impactos ambientais, podendo suprir a necessidade de cidades inteiras. Como alternativa para a determinação do potencial fotovoltaico de uma região, este estudo buscou desenvolver um algoritmo para obter a área e orientação dos telhados da região estudada em Foz do Iguaçu, Paraná. O desenvolvimento da metodologia proposta se deu através do uso da técnica de processamento digital de imagens, utilizando imagens gratuitas retiradas de satélites. O principal objetivo deste trabalho foi determinar o potencial de geração de energia fotovoltaica na região de estudo, realizando uma estimativa da quantidade de energia que pode ser gerada anualmente, se baseando nas condições de cada telhado e no clima existente no município de Foz do Iguaçu, Paraná.

A metodologia proposta aplicando os filtros utilizados no algoritmo dentre eles um filtro em escala de cinza, filtro de cores em preto e branco, o *canny edge*, a transformada de *Hough* e alguns filtros lógicos foi possível identificar a área disponível e orientação de telhados na região de estudo, é uma forma facilitada para o cálculo de geração fotovoltaica e até mesmo o cálculo da área total de um telhado, pois com apenas uma imagem é possível obter, com precisão, a área total do mesmo, uma maneira alternativa de determinar o PV de um domicílio, podendo reduzir custos em determinadas áreas.

2 OBJETIVO GERAL

Mapear a área de telhados de unidades consumidoras residências de uma quadra da área urbana de Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, que podem ser utilizadas para instalação de módulos fotovoltaicos recorrendo a técnicas de processamento digital de imagens e sistemas de informações geográficas.

2.1 Objetivos específicos

1. Desenvolver um algoritmo para detecção de telhados e dados obtidos de forma *online* (imagens de telhados);
2. Realizar o mapeamento de telhados de uma quadra e estimar o número de domicílios candidatos à instalação dos sistemas fotovoltaicos, a partir de técnicas de PDI, utilizando-se do algoritmo de detecção de telhados;
3. Identificar a área total e a orientação dos telhados;
4. Calcular a estimativa do potencial de geração de energia fotovoltaica.

3 ESTADO DA ARTE

Diversas publicações já abordaram o problema da identificação de Potenciais Fotovoltaicos (PV). As principais etapas dos métodos de estimativa do PV incluem a avaliação da área disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos, a simulação de irradiância solar nas superfícies dos módulos e o cálculo da potência elétrica produzida a partir da irradiância.

Segundo Melius et al. (2013) são classificados em três grupos os métodos de classificação de telhados. O primeiro é o Método do Valor Constante, que se baseia em suposições de configuração típica dos telhados e um multiplicador aplicado a região inteira, apresenta um valor aproximado aplicado a grandes áreas. O segundo é o Método da Seleção Manual, que está baseado na observação de fotos aérea e inspeção visual; o método é aplicado em menor escala. Por último o autor apresenta o Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizado principalmente com modelos 3D para determinar a área de cobertura disponível, aplicado com precisão a grandes áreas, mas requer mais recursos para sua aplicação.

Com a utilização de imagens de satélites Malof e Bradbury (2016), identificaram o potencial fotovoltaico, baseando-se na detecção remota de telhados utilizando um algoritmo de segmentação para identificação do PV automaticamente. Tendo uma taxa de assertividade de 94% na análise.

Para análises em grande escala, métodos baseados em dados estatísticos, e construção de bancos de dados, são comumente usados. Schalleberg-Rodríguez (2013) fornece uma revisão dos métodos para a avaliação da área de telhado disponível usando dados estatísticos de construção e fatores de utilização de telhado, o cálculo dos valores mensais de radiação solar em superfícies inclinadas e a produção anual de eletricidade.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Os fatores mais importantes envolvidos no cálculo do potencial fotovoltaico de uma região com sistemas fotovoltaicos alocados nos telhados de domicílios residenciais são: o nível de irradiação solar, a área do telhado aproveitável para a instalação dos painéis solares e a eficiência de conversão do sistema fotovoltaico.

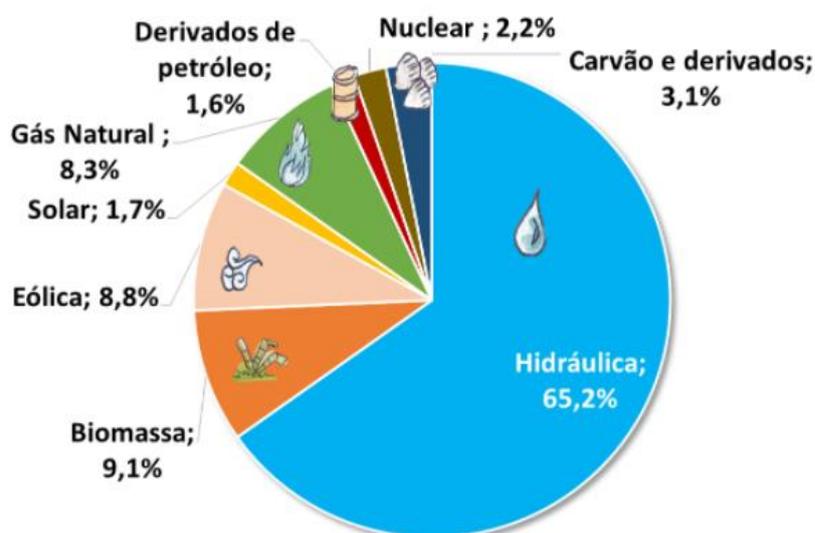
A seguir serão descritos os pressupostos teóricos relacionados com a temática abordada no presente trabalho, com o intuito de demonstrar que influenciam no mapeamento de telhados em áreas urbanas.

4.1 Energia Solar

A energia solar é uma fonte geradora de luz e calor, sendo utilizado pelas células fotovoltaicas para converter a luz direta incidente em energia elétrica. O Sol é uma fonte inesgotável na escala de tempo terrestre. (PINHO; GALDINO,2014)

A produção de energia fotovoltaica no Brasil, está em uma crescente anual, com isso temos cada vez mais domicílios gerando energia para o consumo próprio. Além de diminuir a sobrecarga existentes nas hidrelétricas no Brasil, pois temos ainda cerca de 1,7% da energia fotovoltaica gerada no país sendo possível aumentar em grande escala a produção. Figura 1 (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA,2019)

Figura 1. Matriz de geração de energia elétrica do Brasil por origem de geração



Fonte: Balanço Energético Nacional, 2021

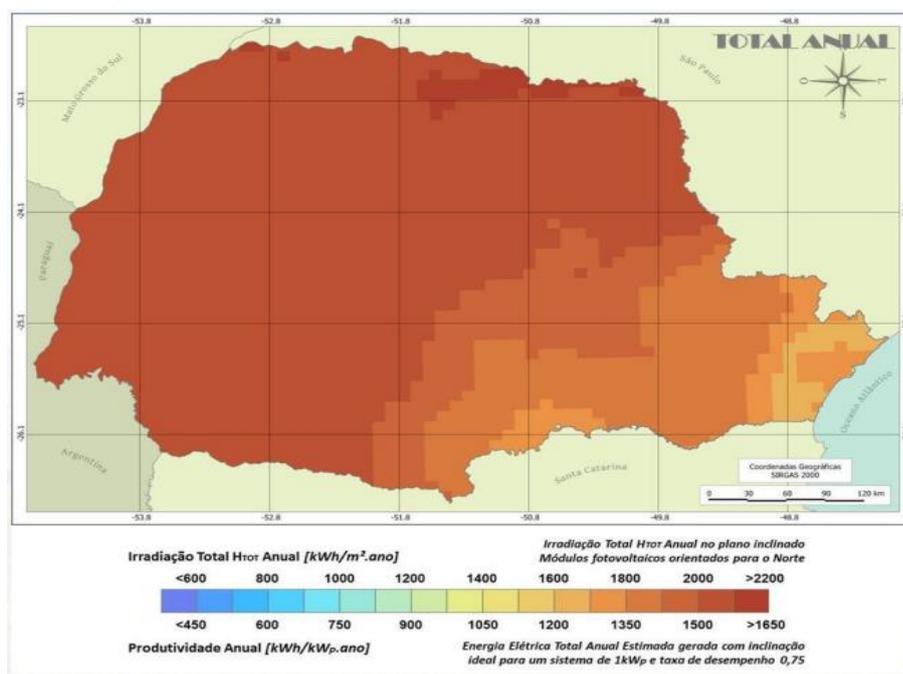
4.2 Radiação solar

A informação sobre o nível de radiação solar em uma determinada área é importante, pois representa uma possível fonte de energia que pode ser aproveitada. Uma das maneiras de aproveitar essa energia nos últimos anos é através de sistemas fotovoltaicos. Outra informação que deve ser avaliada são os níveis de irradiação solar da região, o mapeamento desses níveis é de vital importância para o desenvolvimento da energia fotovoltaica, já que pode ser útil para determinar os lugares mais adequados para instalar os sistemas fotovoltaicos (CHIELBI; GAGNON; WAEWSAK, 2015).

Entre os métodos encontrados para estimar a radiação solar: modelos de regressão, imagens de satélites, redes neurais e as máquinas de suporte vetorial. Porém os modelos mais utilizados para estimar a radiação global são os modelos empíricos, pois focam na razão entre a radiação solar medida na superfície e a radiação solar calculada no topo da atmosfera (CHIELBI; GAGNON; WAEWSAK, 2015).

Na Figura 2 é apresentado o mapa da média anual diária de irradiação solar no estado do Paraná. O Paraná apresenta uma boa uniformidade em sua média anual de irradiação solar, com níveis relativamente bons na maior parte da sua extensão, com um valor acima de $2.000\text{kWh/m}^2\text{ano}$. Este fato deve ser considerado com um incentivo para a possibilidade de utilização de sistemas fotovoltaicos no estado do Paraná.

Figura 2. Mapa de irradiação solar – Média anual (kwh/m²ano)



Fonte: A Energia Solar e o Potencial Fotovoltaico do Estado do Paraná: Barreiras e Perspectivas, 2016.

4.3 Tecnologia Fotovoltaica

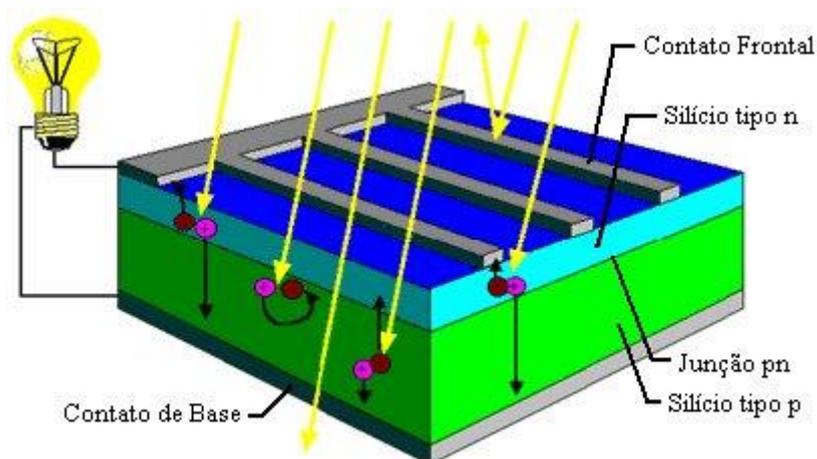
A energia fotovoltaica é definida como: a energia produzida através da luz solar, esta conversão ocorre em uma unidade de geração chamada de célula fotovoltaica. Sua instalação é constituída basicamente por componentes elétricos capazes de converter a irradiação solar em energia. (APARICIO, 2010)

A célula fotovoltaica é constituída por um material semicondutor que geralmente é o silício, estas são formadas por uma camada fina de silício do tipo N e outra com uma espessura maior de silício do tipo P, ambas são eletricamente neutras, porém, ai serem unidas formam um campo elétrico na região P-N devido aos elétrons livres do silício do tipo N, que ocupam o vazio das estrutura do silício do tipo P.(HIMRICHS; KLEINBACH; REIS, 2010; RÜTHER, 2004).

Quando a radiação solar incide sobre a celular fotovoltaica, os fótons se chocam com os outros elétrons da estrutura de silício, fornecendo energia e os transformando em condutores. Devido ao campo elétrico gerado entre P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada P para a camada N. Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera um fluxo de elétrons,

também conhecido como corrente elétrica. Como mostra a Figura 3. (HIMRICHES; KLEINBACH; REIS, 2010; RÜTHER, 2004).

Figura 3. Célula de silício fotovoltaica



Fonte: Investigação experimental da geração de energia elétrica solar fotovoltaica, 2010.

A potência (P) de uma célula fotovoltaica é o resultado da multiplicação da sua tensão (V) medida em volts pela sua corrente medida em ampere (A). Cada célula fotovoltaica só pode produzir uma quantidade específica de potência. Para uma maior potência de geração há a necessidade de associação em série e paralelo de várias células, criando um módulo fotovoltaico. Sua associação em série resulta no somatório das tensões envolvidas sem alteração da corrente, já a associação em paralelo das unidades resulta no somatório das correntes sem alterar a tensão das unidades (PINHO; GALDINO, 2014).

O impacto ambiental gerado pela energia fotovoltaica é praticamente nulo, quando se trata de impacto direto, ou seja, o impacto que ocorre durante a operação de um sistema ou equipamento. A vida útil das tecnologias atualmente no mercado varia de 20 a 30 anos. São consideradas uma fonte de energia limpa, derivada de fontes renováveis e não requer nenhum tipo de ruído, resíduos ou alterações ambientais além do visual do aspecto visual dos painéis instalados em telhados ou grandes áreas. No entanto seu processo de fabricação tem impacto ambiental mínimo e requer muita energia em todos os processos produtivos, o que significa usar outras fontes de energia como petróleo e carvão, além de lixo eletrônico caracterizado com altamente tóxico (SILVA, 2014).

4.4 Geração fotovoltaica

Um sistema fotovoltaico é composto basicamente por um bloco de geração, um bloco de potência e nos sistemas de baterias um bloco de armazenamento. O bloco de geração é responsável pela geração direta de energia elétrica, constituídos pelos módulos fotovoltaicos montados de forma para se obter a potência desejada. A energia produzida é transmitida para o bloco de condicionamento onde pode conter controladores de carga, inversor e dispositivos de proteção, supervisão e controle e por último o bloco de armazenamento que contém as baterias (MOLINA, 2017).

A geração de energia pode ser feita como geração centralizada, caracterizada por uma grande usina, o modelo mais tradicional dentro do Brasil, ou pode ser feita na forma de geração distribuída, que vem a ser conectada na rede ou não. A geração distribuída difere da geração centralizada, por produzir energia no local a ser consumido, de modo que evita prejuízos e perdas para o consumidor (MOLINA,2017).

A geração distribuída caracteriza-se pela geração elétrica junto ou próxima do(s) consumidor(es), independente da potência, tecnologia e fonte de energia (INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2016).

A lei nº 5163 de 30 de julho de 2004, Artigo 14º, define GD da seguinte forma: “[...] para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei no 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador [...]” .

Segundo Torres (2015) os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) não necessitam de nenhum tipo de acumuladores de cargas, pois a energia produzida é injetada diretamente na rede elétrica ou consumida pela carga ligada, o gerador fotovoltaico atua como uma fonte complementar à rede que alimenta a residência.

Para complementar as definições de Geração Distribuída e SFCR, a Agência Nacional de Energia Elétrica (2012), a partir da Resolução Normativa Nº 482/2012,

Artigo 2º, define micro e mini geração distribuída e Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) da seguinte forma:

- Micro geração distribuída: geração de energia elétrica, de potência instalada (PI) inferior ou igual a 75 kW, utilizando fontes como renováveis ou cogeração qualificada, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- Mini geração distribuída: geração de energia elétrica, de potência instalada (PI) entre 75 kW e 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW, utilizando fontes como renováveis ou cogeração qualificada, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- Sistema de Compensação de Energia Elétrica: a energia produzida por micro geração ou mini geração é cedida, de forma gratuita à distribuidora e posteriormente compensada pelo consumo de energia elétrica ativa da unidade consumidora.

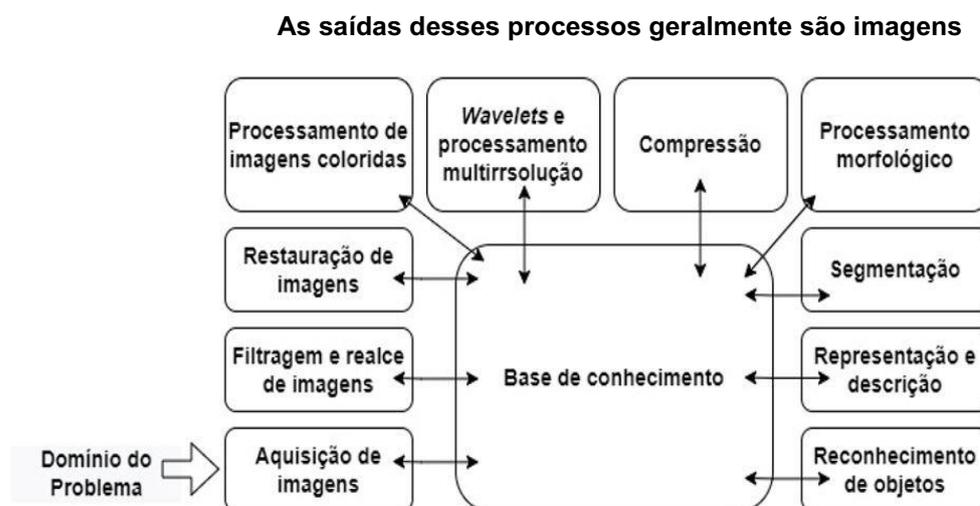
Destacam-se no Brasil mais de 16 mil unidades de geração integradas somente com o uso de energia fotovoltaica. A região Sudeste está em primeiro lugar com 53,1% das unidades, seguida pela região Sul com menos da metade, 25,8% totalizando 4376 unidades. O Paraná representa 7,47% das unidades do país, com 1264 unidades e um potencial instalado de 9102,6kW. De todo potencial instalado do Paraná, 82,83% são instalações com menos de 10kW, 13,8% estão entre 10kW e 40kW e somente 3,4% estão acima de 40kW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017b).

4.5 Processamento Digital de Imagens

O Processamento Digital de Imagens está ligado à análise e tratamento e imagens. Visando a manipulação e a exibição de imagens prontas, tratando de diversos processos de tratamento da imagem bem como os procedimentos que permitem a interface entre dispositivos de entrada e saída gráfica e o arquivo de imagem. O Processamento Digital de Imagens tem por objetivo a manipulação de imagens previamente geradas e a extração de informações a partir das mesmas. (SANTOS,2008).

Segundo Gonzales e Woods (2000) são considerados passos fundamentais para o PDI: aquisição de imagens, processamento de imagens, segmentação, extração e reconhecimento de padrões. O diagrama da Figura 4 não caracteriza todo o processo que é aplicado a uma imagem. O processo apresentado no diagrama tem a intenção de transmitir uma ideia de todas as metodologias que podem ser aplicadas a imagens para diferentes propósitos e, possivelmente, com diferentes objetivos.

Figura 4- Procedimentos fundamentais para PDI



Fonte: Autoria própria (2022).

Uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, em que cada elemento corresponde a uma localização e um vetor e pode ser tratado como uma matriz cujos os índices e colunas identificam um ponto na imagem e o correspondente valor do elemento identifica o nível cinza naquele ponto naquele ponto. Os elementos desta matriz são conhecidos como elementos da imagem, elementos da figura, "pixels" ou "pels", estas duas últimas, são abreviações de "picture elements" (elementos de figura). Um pixel é o elemento básico de uma imagem cuja forma mais comum é a retangular ou quadrada, ele também é um elemento com dimensões finitas na representação de uma imagem (SANTOS,2008).

Com os avanços nos últimos anos das tecnologias e do próprio poder computacional, foram criados alguns sistemas capazes de medir parâmetros de textura mais rapidamente.

Segundo Gonzalez e Woods (2000) as três formas principais formas que devem ser utilizadas em PDI para a medição de texturas são a estatística, a

estrutural e a espectral. As estatísticas são classificadas como suave, áspera, granular, entre outras. As estruturais tratam da organização de imagens (*textels*) e caracterizam a imagem com textura muito regular e as espectrais são baseadas em propriedade de alguma transformada.

As técnicas mais avançadas pra uso do PDI são com a utilização de câmeras ou *scanners* para a captura de imagens, além do uso de computadores, onde é feito o tratamento dessas imagens com o uso de software. A literatura técnica que trata de PDI cresceu e ganhou mais atenção nos últimos anos (ARAÚJO,2017).

4.6 Filtro Bilateral

É utilizado para suavizar imagens e reduzir o ruído, preservando assim as bordas. este ruído pode ser causado por perturbações bruscas e repentinas no sinal da imagem. Apresenta-se como pixels brancos e pretos de ocorrência esparsa. Um método eficaz de redução de ruído para este tipo de ruído é um filtro mediano ou um filtro morfológico.

4.7 Filtro de Cores

A segmentação de cores ou filtragem de cores é amplamente utilizada no OpenCV para identificar objetos / áreas específicas com cores específicas. O espaço de cores mais utilizado é o espaço de cores RGB conhecido como espaço de cores complementares. porque os três tons se combinam para criar a cor da imagem. Ponha bordas para identificar áreas de uma determinada cor e crie máscaras para separar outras cores.

O espaço de cores HSV é muito mais útil para essa finalidade, pois as cores no espaço HSV são muito mais localizadas e mais fáceis de separar. A filtragem de cores tem muitas utilizações e casos de uso, como criptografia, análise de infravermelho, preservação de alimentos perecíveis, etc. Nesses casos, os conceitos de

O processamento de imagem pode ser usado para detectar ou destacar áreas de uma cor específica. Tudo o que você precisa para o fatiamento de cores é um limite ou conhecimento dos limites inferior e superior de uma cor no espaço de

cores. Funciona melhor no espaço de cores. Matiz-Saturação-Valor. Após especificar a faixa de cores a ser segmentada, uma máscara precisa ser criada de acordo, e com ela, uma determinada região de interesse pode ser separada.

4.8 A equalização do histograma

O histograma é uma representação gráfica da distribuição de intensidade de uma imagem. Em termos simples, representa o número de pixels para cada valor de intensidade considerado. O eixo X representa a escala tonal (preto à esquerda e branco à direita) e o eixo Y representa o número de pixels em uma imagem. Aqui, o histograma mostra o número de pixels para cada nível de brilho (do preto ao branco), e quando há mais pixels, o pico em determinado nível de brilho é maior.

A Equalização de Histograma é uma técnica de processamento de imagem de computador usada para melhorar o contraste nas imagens. Ele consegue isso distribuindo efetivamente os valores de intensidade mais frequentes, ou seja, estendendo a faixa de intensidade da imagem. Esse método geralmente aumenta o contraste global das imagens quando seus dados utilizáveis são representados por valores de contraste próximos. Isso permite que áreas de menor contraste local ganhem um contraste maior.

Um histograma de cores de uma imagem representa o número de pixels em cada tipo de componente de cor. A equalização do histograma não pode ser aplicada separadamente aos componentes Vermelho, Verde e Azul da imagem, pois leva a mudanças dramáticas no equilíbrio de cores da imagem. No entanto, se a imagem for primeiro convertida em outro espaço de cores, como o espaço de cores HSL/HSV, o algoritmo poderá ser aplicado ao canal de luminância ou valor sem resultar em alterações no matiz e na saturação da imagem.

4.8.1 Equalização de histograma adaptável

A equalização adaptativa de histograma difere da equalização de histograma comum no sentido de que o método adaptativo calcula vários histogramas, cada um correspondendo a uma seção distinta da imagem, e os usa para redistribuir os

valores de luminosidade da imagem. É, portanto, adequado para melhorar o contraste local e aprimorar as definições de bordas em cada região de uma imagem.

4.9 Equalização Adaptativa Limitada Contrastiva

Contrast Limited AHE (CLAHE) difere da equalização de histograma adaptativo em sua limitação de contraste. No caso do CLAHE, o procedimento de limitação de contraste é aplicado a cada vizinhança da qual uma função de transformação é derivada. O CLAHE foi desenvolvido para evitar a amplificação excessiva do ruído que a equalização adaptativa do histograma pode causar.

4.10 Canny edge

De acordo com Do Vale & Dal Poz (2002), John F. Canny em 1986 desenvolveu um processo de detecção de bordas a partir de critérios de quantificação de desempenho de operadores de bordas conhecidos como os critérios de detecção e de localização.

Estes critérios de desempenho ainda estão sujeitos ao critério de resposta múltipla, que corresponde ao fato de que deve haver, na saída do operador, uma única resposta para uma única borda. Para que os critérios sejam aproximadamente atendidos, Canny aproxima o operador ótimo, obtido a partir dos critérios de desempenho, pela primeira derivada da função Gaussiana (JESUS AND COSTA JR, 2015).

Em complemento, foi proposto um processo conhecido como supressão não máxima (supressão de valores de pixels que não forem máximos locais na direção transversal à borda), que causaria um afinamento da borda, atendendo à injunção de resposta múltipla; e uma junção adaptativa com complementação de bordas, para eliminar a fragmentação dos contornos das bordas (RONG, 2014)

4.11 Transformada de Hough

A Transformada de Hough utiliza grupos de pixels que juntos formam elementos geométricos, partindo geralmente de uma imagem resultante de um detector de borda aplicado em uma imagem em nível de cinza (DUDA AND HART, 1972). O algoritmo é utilizado para encontrar formas geométricas, como linhas e círculos em imagens binárias, mesmo em situações de ruído ou de retas incompletas. Para detecção de linhas retas, é adotada a Equação (1):

$$p=x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (1)$$

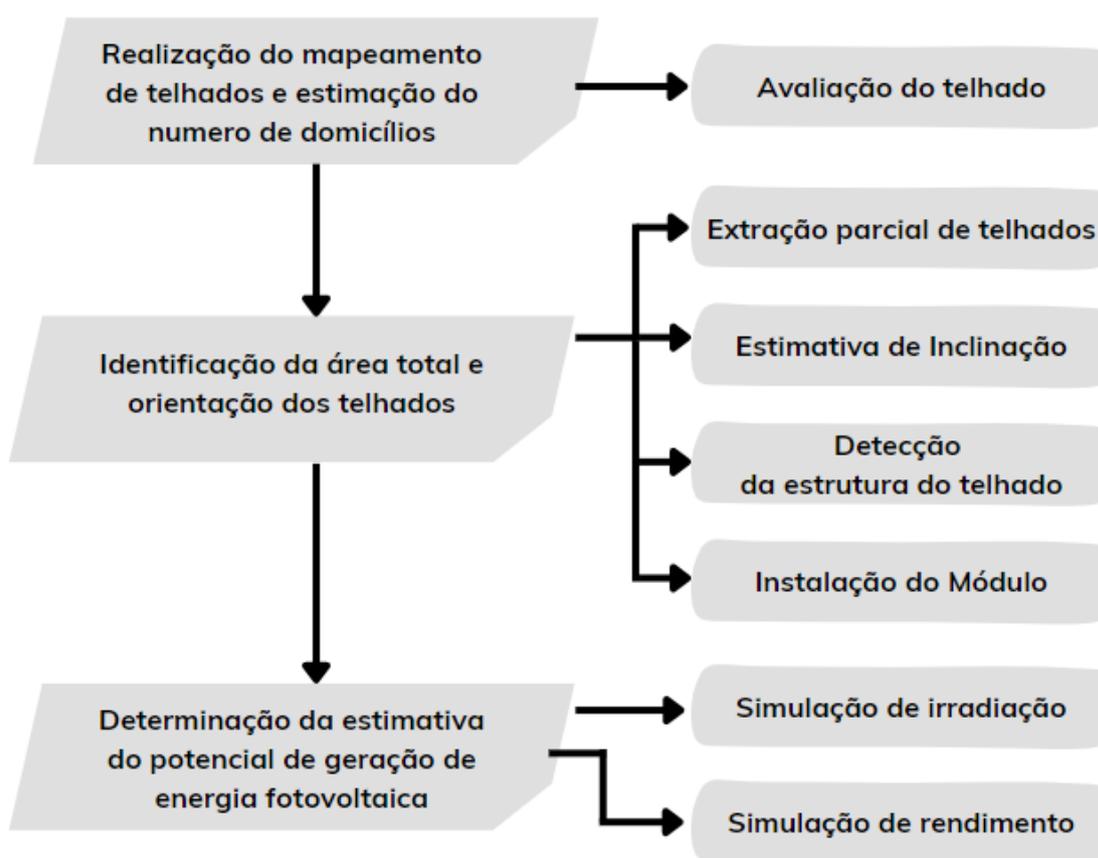
Onde os parâmetros θ representam, respectivamente, a distância da linha reta ao centro do sistema de coordenadas e o ângulo que esta reta forma com o eixo x . Assim a transformada de Hough visa encontrar os valores de θ , que determinam as retas que mais se aproximam dos pontos dados por coordenadas (x, y) na imagem.

A Transformada de Hough utiliza uma matriz de contagem de duas dimensões, onde a primeira corresponde ao valor de p e a segunda ao valor de θ . A partir disso, para cada ponto não-nulo da imagem (x, y) , é feita uma análise do ponto e da vizinhança, e a célula correspondente aos valores encontrados é incrementada. Os pontos com maior número de votos (ou seja, maior número de ocorrências na matriz de contagem) têm maior probabilidade de corresponder a uma reta verdadeira (SHAPIRO AND STOCKMAN, 2000).

5 MATERIAS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho que é mapear a área de telhados que podem ser utilizadas para instalação de módulos fotovoltaicos em telhados da área urbana de Foz do Iguaçu, no estado do Paraná serão utilizadas técnicas de processamento digital de imagens, algoritmos de detecções e sistemas de informações geográficas, apresentando o número de domicílios possíveis para instalação de sistemas fotovoltaicos e o potencial de geração de energia fotovoltaica dessa região. Esse objetivo será atingido por meio do desenvolvimento das seguintes etapas demonstradas na Figura 5:

Figura 5 – Etapas do procedimento.



Fonte: Autoria própria (2022).

5.1 Realização do mapeamento de telhados e estimativa do número de domicílios

5.1.1 Avaliação do telhado

A determinação do local de estudo deve ser feita usando as imagens retiradas do *Google Maps*. O *Google Maps* não fornece nenhuma informação sobre altura ou forma dos telhados dos edifícios, apenas sua imagem em si, com ela pode-se calcular sua área e estimar o número de domicílios na região, para assim calcular o seu potencial de geração fotovoltaica.

5.2 Identificação da área total e orientação dos telhados

5.2.1 Extração parcial de telhados

Para cada domicílio, a imagem de seu telhado é retirada e recortada no seu formato e após isso são aplicados alguns algoritmos de processamento de imagens, para que se deduza as áreas parciais dos telhados. Este procedimento é apresentado a seguir:

- a) Um filtro bilateral é aplicado para reduzir o ruído e preservar as bordas da imagem.
- b) Um filtro de cores que cria uma versão em preto e branco da imagem, para pixel, a média ponderada é calculada somando os valores para os componentes da cor do telhado, cinza e laranja.
- c) A equalização do histograma é aplicada a imagem, este método consiste em aumentar o contraste geral da imagem, espalhando os mais frequentes valores de intensidade para criar uma distribuição uniforme. Isso facilita a distinção, por exemplo, duas áreas de telhados parciais separadas nos casos em que eles têm brilho e cor semelhantes.
- d) O algoritmo *Canny Edge*, será empregado para extrair as bordas. Áreas com mudança significativas de intensidade local. Isso é feito conectando e identificando os máximos locais de gradiente de intensidade nas direções verticais e horizontais. Essas bordas geralmente representam estruturas como paredes, chaminés, janelas e o que é mais interessante o cume do telhado.

- e) O algoritmo da Transformada de *Hough*, é aplicada para detectar linhas nas bordas encontradas anteriormente. Isto é conseguindo a iteração sobre o parâmetro ter espaço de linha nas equações de linhas nas coordenadas polares. Assim identificando cada pixel nos sistemas e em quais linhas a maioria se encontra.
- f) Estas linhas são posteriormente analisadas por uma subseção aplicando filtros lógicos com frequência para determinar qual linha representa o cume dos telhados. Isso envolve a exclusão de linhas que estão muito próximas as paredes dos edifícios e linhas que não são paralelas a uma das paredes dos mesmos. Se a linha do cume for encontrada, ela pode ser utilizada para deduzir as áreas parciais do telhado (que estão voltadas em diferentes direções) do edifício.

A seleção dos algoritmos, como seus parâmetros e a ordem que são aplicados foram determinados com base em trabalhos já feitos com este processo para sua validação citados na seção 3. Alguns parâmetros são ajustados dinamicamente, por exemplo, quando não possuir cume as linhas serão encontradas, os limites para o *Canny* e os algoritmos de *Hough* são reduzidos iterativamente. A maioria dos algoritmos de processamento de imagens são fornecidos através da biblioteca computacional aberta *OpenCV* utilizada para detecção.

Em alguns casos nenhuma linha do cume de um edifício pode ser encontrada e tratada como válida, isto ocorre quando o contraste é muito fraco para encontrar a linha do cume, quando o prédio ainda não está capturado pela imagem aérea, ou quando há uma superfície plana no telhado. Portanto estes prédios serão classificados como tendo um telhado plano.

5.2.2 Estimativa de Inclinação

O segundo parâmetro a ser estudado é a inclinação do telhado. Em telhados planos os módulos fotovoltaicos são montados geralmente em suportes, enquanto em telhados inclinados são montados no mesmo ângulo do telhado.

No entanto, as imagens que foram utilizadas fornecem apenas, a vista superior, portanto não contém as informações sobre altura do edifício, isso dificulta a

extração da inclinação do telhado. Uma estimativa de 30 graus foi utilizada para estimar a inclinação de cada telhado, esses parâmetros foram derivados ajustando uma função normal de distribuição apresentada, em Kuman (2018). Se nenhuma linha do cume puder ser identificada, o domicílio em questão possui um telhado plano e assim o seu ajuste será feito por meio de um suporte.

5.2.3 Detecção da estrutura do telhado

Na maioria dos casos, apenas uma parte da área do telhado pode receber a instalação de um sistema FV, pois alguns edifícios possuem chaminés, janelas, etc, que limitam a sua área disponível. O método aqui apresentado utiliza a imagem para identificar estas estruturas.

Para isso, os métodos de detecção de contornos e aproximação de polígonos são empregados para identificar de possíveis objetos nas potenciais áreas do telhado. Todos os objetos identificados que cumprem certos critérios são tratados o como um desvio da área útil, sendo eles como chaminés, claraboias, entre outros.

5.3 Determinação da estimativa do potencial de geração de energia fotovoltaica

5.3.1 Simulação de irradiação

Pra calcular a energia que pode ser gerada pelos módulos, a quantidade de irradiação que eles recebem tem que ser simulada, a irradiação global em planos globais de módulos consiste de contribuições diretas, difusas e reflexivas dos componentes e pode ser calculada usando a irradiação em um plano horizontal e aplicação de cálculos métricos.

Para calcular o potencial de geração ao longo do ano, é utilizado a taxa média de irradiação e o potencial de geração de cada modulo instalado no sistema FV.

5.3.2 Simulação de rendimento

A produção de energia de um FV não depende apenas da irradiação solar recebida, mas também da temperatura do modulo, bem como nos módulos

instalados e dos inversores de frequência instalados. Neste trabalho, foram considerados esses fatores para o cálculo final de geração.

5.4 Processamento de dados

Para realização do presente trabalho foram utilizados dados da taxa média de irradiação do estado do Paraná, para a região de estudo em Foz do Iguaçu. De acordo com a disponibilidade existente, foram reunidos dados anuais de radiação fornecidos pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Foi utilizada uma equação característica para o cálculo de geração de energia solar, através da radiação incidente em painéis fotovoltaicos. Antes do cálculo de energia produzida se faz necessário o cálculo de potência instalada no sistema o qual foi adotado o uso de painéis de silício monocristalino que apresenta em média uma eficiência de 25%, em uma área de captação de aproximadamente 13 m².

Para o cálculo de geração foi utilizado um inversor de carga com eficiência de 90% que é a eficiência mínima oferecida pelos fabricantes, assim foi estimada a energia média anual gerada pelo sistema ao longo de um ano para cada domicílio.

Para o cálculo de potência instalada foi utilizada a Equação (2):

$$\text{Energia} = P_{\text{módulo}} \times N^{\circ} \text{ de horas} \times \text{rendimento}$$

Energia = Total de energia gerada por modulo em kWh

$P_{\text{Módulo}}$ = Potência do modulo em Wp

Rendimento = rendimento de cada modulo porcentagem

Para o calculo da potencia total foi utilizada a Equação (3)

$$P_{\text{total}} = N^{\circ} \text{ de placas} * \text{Energia}$$

P_{total} = Potência total instalada em kWh

N° de placas = área disponível do telhado / área do modulo

Energia = Total de energia gerada por modulo em kWh

6 RESULTADOS

6.1 Região de estudo

Primeiramente é necessário identificar a região onde se deseja calcular o potencial fotovoltaico. O método proposto pode ser replicado para qualquer região. Entretanto, para demonstrar a aplicação da metodologia proposta, foi escolhida uma região da cidade de Foz do Iguaçu de forma aleatória e assume-se que ela apresenta uma boa representatividade das características de ocupação e das edificações da cidade, que consiste em casas e edifícios verticais de pequena ou média altura. Na Figura 6 é apresentada a região de estudo extraída do *google maps*

Figura 6: Vista superior da localização da região escolhida.



Fonte: *Google Maps*, 2022.

6.2 Obtenção da área total

O cálculo do potencial de geração fotovoltaica se baseia na área disponível para a inserção dos módulos fotovoltaicos. Desta forma é de grande importância que as áreas utilizadas no estudo apresentem o valor mais próximo possível da realidade. Sendo assim, aplicando a imagem da região de estudo no algoritmo desenvolvido foram iniciados os procedimentos necessários para realização do cálculo da área total da região de estudo mostrada na Figura 6.

Após a primeira etapa do algoritmo, foi aplicada uma escala em cinza para que os telhados sejam enaltecidos e apareçam, mais nitidamente. Como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Escala em cinza aplicação do algoritmo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Após a aplicação do primeiro passo mostrado na Figura 7, é aplicado um filtro de cores que cria uma versão em preto e branco, utilizando assim os pixels para calcular uma media ponderada somando os valores para as cores cinza e laranja. Em conjunto com a equalização do histograma citada na seção 5.2.1. Como é mostrado na Figura 8.

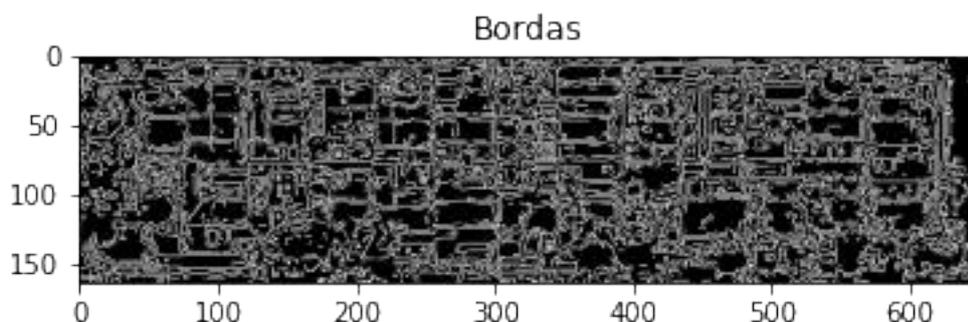
Figura 8: Imagem com bordas nítidas do algoritmo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Nesta etapa foi aplicada o algoritmo do *canny edge* onde o mesmo detecta todas as bordas existentes na imagem utilizada. Estas bordas representam linhas como limites dos telhados, chaminés, entre outros. Como é mostrada na Figura 9.

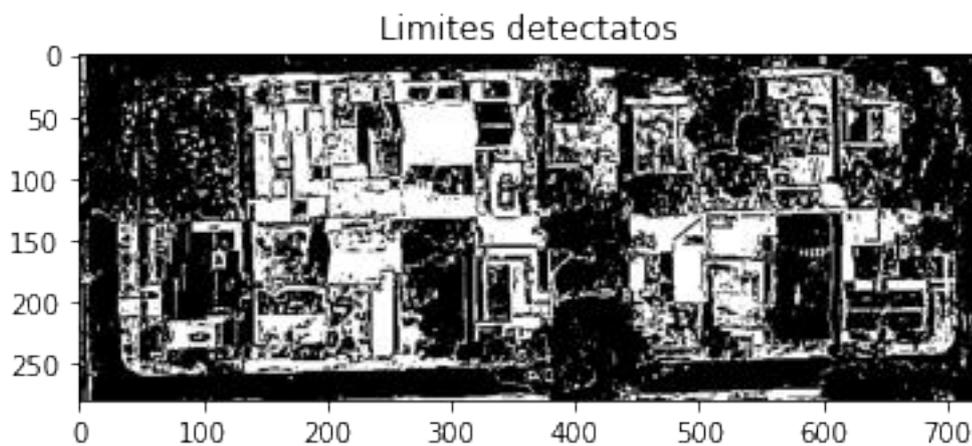
Figura 9: Todas as bordas detectadas com o algoritmo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Após isso foi aplicada a transformada de *Hough* para permitir a detecção das linhas encontradas na Figura 10, ou seja, os limites de cada domicílio, com base no que foi apresentado nos procedimentos anteriores.

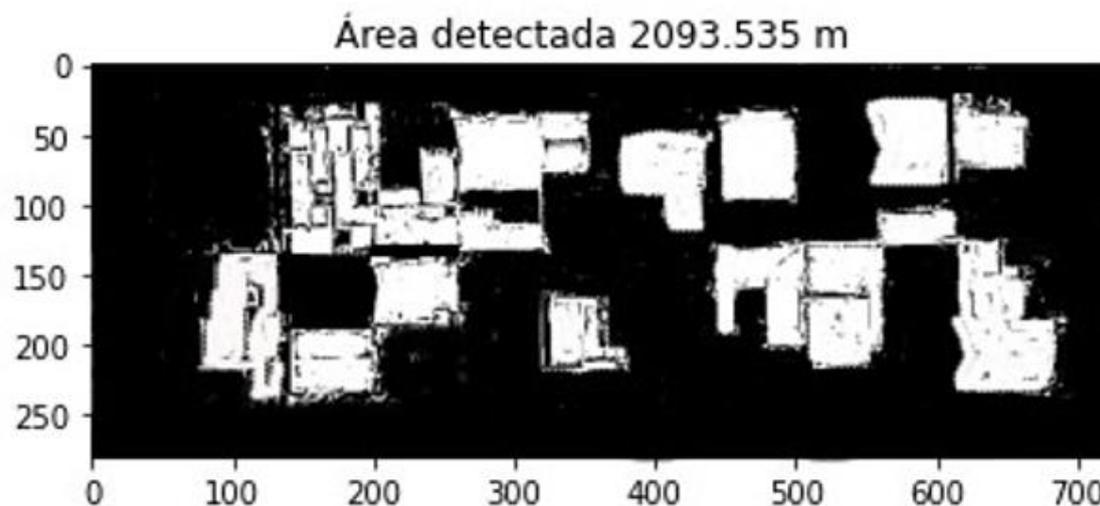
Figura 10: Limites detectadas com o algoritmo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com todos os limites detectados foram aplicados filtros lógicos para detectar as linhas limites dos telhados, fazendo assim a eliminação de ruídos na imagem e calculando suas áreas com base nos limites detectados. Como é mostrado na Figura 11.

Figura 11: Área total encontrada com o algoritmo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Após a aplicação da metodologia proposta foi obtida a área total de aproximadamente 2093.535 m² com um total de 15 domicílios detectados. Afim de validar o valor da área total encontrada, são apresentadas no Apêndice A, da Figura 12 à Figura 26, todas as etapas executadas para obtenção da área de cada telhado separadamente.

Na Figura 27, disposta no Apêndice A, é apresentada a área total do Domicílio 14 utilizando a ferramenta do google maps e a metodologia proposta neste trabalho. Tendo em vista que a área obtida pelo algoritmo foi de 118.8m² e a área encontrada pelo google maps foi de 118.67m².

6.3 Orientação dos telhados

Para identificação da orientação do telhado, determinou-se manualmente levando como referência os pontos cardeais e assim determinou-se, aproximadamente, qual a porcentagem da cobertura está voltada para as direções

Norte, Sul, Leste e Oeste. Este tipo de classificação só ocorreu para os telhados do tipo Inclinado, já que os telhados do tipo Plano não possuem variação quanto a orientação dos módulos.

Desta forma, foi possível estimar a partir da área total de cobertura do domicílio o quanto está voltado para cada direção, apenas multiplicando a área total de cada telhado pela porcentagem que cada direção representa deste. Quando a cobertura não estava exatamente voltada para as direções Norte, Sul, Leste e Oeste, considerou-se a direção que mais se aproxima. Na Tabela 1 são apresentadas as orientações para cada domicílio.

Tabela 1- Orientação do telhado

Domicílios	Orientação
Domicílio 1	Norte-Sul
Domicílio 2	Leste-Oeste
Domicílio 3	Leste-Oeste
Domicílio 4	Norte-Sul
Domicílio 5	Norte-Oeste
Domicílio 6	Leste-Oeste
Domicílio 7	Leste-Oeste
Domicílio 8	Norte-sul
Domicílio 9	Leste-Oeste
Domicílio 10	Norte-Sul
Domicílio 11	Norte-Leste
Domicílio 12	Norte-Sul
Domicílio 13	Leste-Oeste
Domicílio 14	Leste-Oeste
Domicílio 15	Norte-Sul

Fonte: Autoria própria (2022).

Com a orientação e a área de cada telhado foram feitos os cálculos para o potencial de geração fotovoltaica da região estudada.

6.4 Cálculo do potencial fotovoltaico

Para dar seguimento ao trabalho, foi utilizado para o cálculo do potencial fotovoltaico os seguintes dados: Placas fotovoltaicas de 450Wp com área total de 1,45m² instaladas, o NI (Nível de irradiação) adotado foi o de 5.0kWh/m² segundo dados do INMET é o nível médio para a região Sul do país.

Após as estimativas realizadas para cada telhado, realizou-se o somatório dos potenciais de cada domicilio levando em consideração a orientação de cada telhado. Na Tabela 2 é apresentado o número total de domicílios, a área total de cada telhado, quantidade de placas utilizadas por domicilio o potencial fotovoltaico e sua média anual de geração.

Tabela 2: Média mensal e anual de geração de cada domicilio.

Domicílios	Área(m ²)	Quantidade de placas	PV	Média Anual
Domicilio 1	133.5	22	1188 kWh/mês	14.256 kWh/ano
Domicilio 2	94.875	16	864 kWh/mês	10.368 kWh/ano
Domicilio 3	175.875	30	1620 kWh/mês	19.440kWh/ano
Domicilio 4	122.69	20	1080 kWh/mês	12.960 kWh/ano
Domicilio 5	236.92	40	2160 kWh/mês	25.920 kWh/ano
Domicilio 6	117.225	19	1026 kWh/mês	12.312 kWh/ano
Domicilio 7	148.5	25	1350 kWh/mês	16.200 kWh/ano
Domicilio 8	90.825	15	810 kWh/mês	9.720 kWh/ano
Domicilio 9	111.825	18	972 kWh/mês	11.664 kWh/ano
Domicilio 10	98.625	17	918 kWh/mês	11.016 kWh/ano
Domicilio 11	137.1	23	1242 kWh/mês	14.904 kWh/ano
Domicilio 12	84.675	14	756 kWh/mês	9.072 kWh/ano
Domicilio 13	161.7	28	1512 kWh/mês	18.144 kWh/ano
Domicilio 14	118.8	19	1026 kWh/mês	12.312 kWh/ano
Domicilio 15	260.4	45	2430 kWh/mês	29.16 kWh/ano
Total	2093.535	351	18.954 kWh/mês	227.448 kWh/ano

Fonte: Autoria própria (2022).

Dentre os resultados apresentados na Tabela 2 pode-se destacar dois extremos de geração: o domicilio 12 possui a maior área para instalação e possui uma orientação norte-sul com isso possui o maior potencial de geração mensal da região estudada, em contrapartida temos o domicilio 2 com uma área total de 94.875 com orientação leste-oeste possui uma geração menor pois a media de irradiação solar é menor com base na orientação do seu telhado. Totalizando assim uma média anual de 227.448 kWh/ano.

Caso haja interesse dos proprietários para instalação dos módulos fotovoltaicos, em todos os telhados estudados, levando em consideração que cada domicilio utilize em torno de 600 kWh/mês, teremos um excedente total da região estudada em torno de 9.954kWh/mês e anualmente um montante de 119.448

kWh/mês excedente de geração, podendo assim ficar em créditos e ser utilizada em outro domicílio de mesmo CPF do proprietário.

Podemos identificar que é a região estudada possui um bom potencial de geração, apesar das taxas baixas de irradiação da região Sul do país. Considerando os dados de potência instalada da Usina Hidrelétrica de Itaipu, que é 14000MW ou 14GW e comparando com os valores de estimados para a zona do centro, afirma-se que o total produzido em um ano nesta zona corresponde a alguns minutos de funcionamento em capacidade máxima da usina (ITAIPU BINACIONAL, 2017).

7 CONCLUSÃO

É importante a criação de novas políticas públicas que facilitem e incentivem o uso da tecnologia fotovoltaica no Brasil e que possibilitem o aumento da inserção de energia na rede de distribuição provenientes de fontes renováveis de energia.

7.1 Metodologia aplicada

A metodologia aplicada e desenvolvida neste tem como objetivo facilitar a forma de estimar o potencial de geração de energia fotovoltaica de um domicílio com baixo custo, fugindo do uso de tecnologias de alto custo e difícil acesso. Utilizando dados e *softwares* gratuitos disponíveis em *site* de órgãos do governo.

Durante o desenvolvimento foram obtidos resultados bastantes expressivos em relação ao cálculo da área total do telhado de cada domicílio. É notável desde o início dos testes com o algoritmo que podemos utilizar esse método para o cálculo de geração fotovoltaica de uma determinada região, podendo ser aplicado para outras regiões.

O uso de imagens com uma melhor resolução espacial, uma captura mais nítida feita por um satélite. As imagens com resolução menor que 20 metros, tendo em vista que no presente trabalho foi utilizada uma resolução de 20 metros.

7.2 Trabalhos e Aplicações futuras

Com a realização deste trabalho foram notadas várias possibilidades para o surgimento de trabalhos futuros. Há a possibilidade da aplicação deste método para identificação de diferentes utilizações de sistemas fotovoltaicos, como estacionamentos solares, calçadas fotovoltaicas, áreas de lazer e outros. O Trabalho pode ser melhorado enaltecendo as áreas sombreadas, mostrando as áreas de efeitos negativos, com relação a edificações mais altas. Sugere-se também a possibilidade de utilização de Inteligência Artificial (IA) para identificar e analisar imagens, semelhante a sistemas de identificação facial.

Outra sugestão para futuros trabalhos é a realização de um estudo mais específico com relação a orientação de cada telhado, determinando os pesos de

geração conforme o ângulo em relação ao norte verdadeiro, para se chegar em um resultado mais específico.

Os resultados obtidos com a estimativa do potencial de geração fotovoltaica para a região estudada em Foz do Iguaçu destacam a capacidade de produção de energia elétrica dos domicílios estudados, sendo útil para análises de viabilidade da compensação energética destes domicílios, destacando a capacidade de reduzir custos com o consumo de energia elétrica e aliviar o potencial da rede de distribuição nacional.

Em uma análise de maior escala, demonstra-se que a energia fotovoltaica é colocada como uma alternativa econômica e ambiental ao aumento na demanda de energia elétrica do país, reduzindo a necessidade de grandes obras de engenharia ou do uso de usinas poluidoras de alto custo como o caso das termoeletricas que são ativadas sempre que é reduzida a produção de energia das usinas hidroelétricas.

A utilização deste método mostra-se viável para a aplicação em estudos de planejamento urbano ou estimativas de potenciais de produção fotovoltaica, que necessitam das informações sobre telhados urbanos, mas careça de recursos financeiros, visto que é necessário apenas de uma imagem retirada do *google maps*, de licença livre, e que os dados necessários para o estudo são obtidos gratuitamente.

Como sugestão o aprimoramento do algoritmo utilizado sugere-se a colocação das placas fotovoltaicas nos telhados, por meio de estudo com um tamanho definido de placa e com a determinação do ângulo de 30° para instalação.

REFERÊNCIAS

GALVANIN, Edinéia Aparecida dos Santos. **Extração automática de contornos de telhados de edifícios em um modelo digital de elevação, utilizando inferência bayesiana e campos aleatórios de Markov**. 2007.

MITSUHASHI, Bruno Shingo. **Estimativa do potencial de energia fotovoltaica em telhados com imagens obtidas por aeronaves remotamente pilotadas-RPARemotely Piloted Aircraft-um estudo de caso**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

KUMAR, Akash. Solar potential analysis of rooftops using satellite imagery. **arXiv preprint arXiv:1812.11606**, 2018.

DANTAS, Stefano Giacomazzi; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. Texto para Discussão, 2018.

VILLAVICENCIO GASTELU, Joel. **Análise espacial do potencial fotovoltaico em telhados de residências usando modelagem hierárquica bayesiana**. 2016. SALAMONI, Isabel Tourinho et al. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte**. 2004. GONÇALVES, Ana Kássia Lopes. **Avaliação da drenagem superficial em pista de pouso e decolagem por meio de Processamento Digital de Imagens**. 2020. AMISSE, Caisse. **Modelagem 3D de telhados de edificações singulares a partir de imagens UAV para estimativa do potencial fotovoltaico e coleta de água pluvial**. 2016.

MOLINA, Leonardo de Souza. **Potencial de energia fotovoltaica em telhados: desenvolvimento de metodologia com dados de sensoriamento remoto**. 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MAGOGA, Giovanna Silva; LEITE, Patrícia Teixeira; DE MELO, Diego Marcochi. Mapeamento do potencial solar fotovoltaico em telhados domiciliares de um município. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 6, n. 5, p. 89-102, 2019. KHANNA, Kunal. **3D Rooftop Detection And Modeling Using Orthographic Aerial Images**. Arizona State University, 2013.

SCARDUELI, Caio et al. **Desenvolvimento e aplicação de metodologia para mapeamento da estimativa de geração distribuída utilizando sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas.** 2015.

FU, Ran et al. **US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2017.** EERE Publication and Product Library, Washington, DC (United States), 2017.

MAINZER, Kai et al. Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques. **Solar Energy**, v. 155, p. 561-573, 2017. TIEPOLO, Gerson Máximo et al. Energia Solar no Estado do Paraná: potencial, barreiras e políticas públicas. In: **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético.** 2016.

ARAÚJO, José Rafael Benigno de et al. **Potencial para instalação de sistemas fotovoltaicos residenciais na região nordeste.** 2019.

DANTAS, Stefano Giacomazzi; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico.** Texto para Discussão, 2018.

BARROS, Ricardo; KOLOSZUK, Ronaldo; SAUAIA, Rodrigo. Perspectivas para a geração centralizada solar fotovoltaica no Brasil. **O Setor Elétrico**, ed, v. 160, p. 50, 2019.

PINHO, João Tavares et al. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro**, v. 1, p. 47-499, 2014.

BANCO, DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO. Agência Nacional de Energia Elétrica– Aneel. 2019. Disponível em <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em 15 Abr.2022.

Martin-Chivelet, N., 2016. Photovoltaic potential and land use estimation methodology. *Energy* 94, 233–242. doi:10.1016/j.energy.

Schallenberg-Rodríguez, J., 2013. **Photovoltaic techno economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands.** Methodological review and methodology proposal. *Renewable and Sustainable En ergy Reviews* 20, 219–239. doi:10.1016/j.rser.2012.11. 1179.

Defaix, P.R., van Sark, W., Worrell, E., de Visser, E., 2012. **Technical potential for photovoltaics on buildings in the EU-27.** *Solar Energy* 86, 2644–2653. doi:10.1016/j. solener.2012.06.007.

Mainzer, K., Fath, K., McKenna, R., Stengel, J., Fichtner, W., Schultmann, F., 2014. **A high-resolution determination of the technical potential for residential-roofmounted photovoltaic systems in Germany.** *Solar Energy* 105,715–731. doi:10.1016/j.solener.2014.04.015.

Romero Rodriguez, L., Duminil, E., S´anchez Ramos, J., Eicker, U., 2017. **Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach.** *Solar Energy* 146, 264– 275. doi:10.1016/j.solener.2017.02.043.

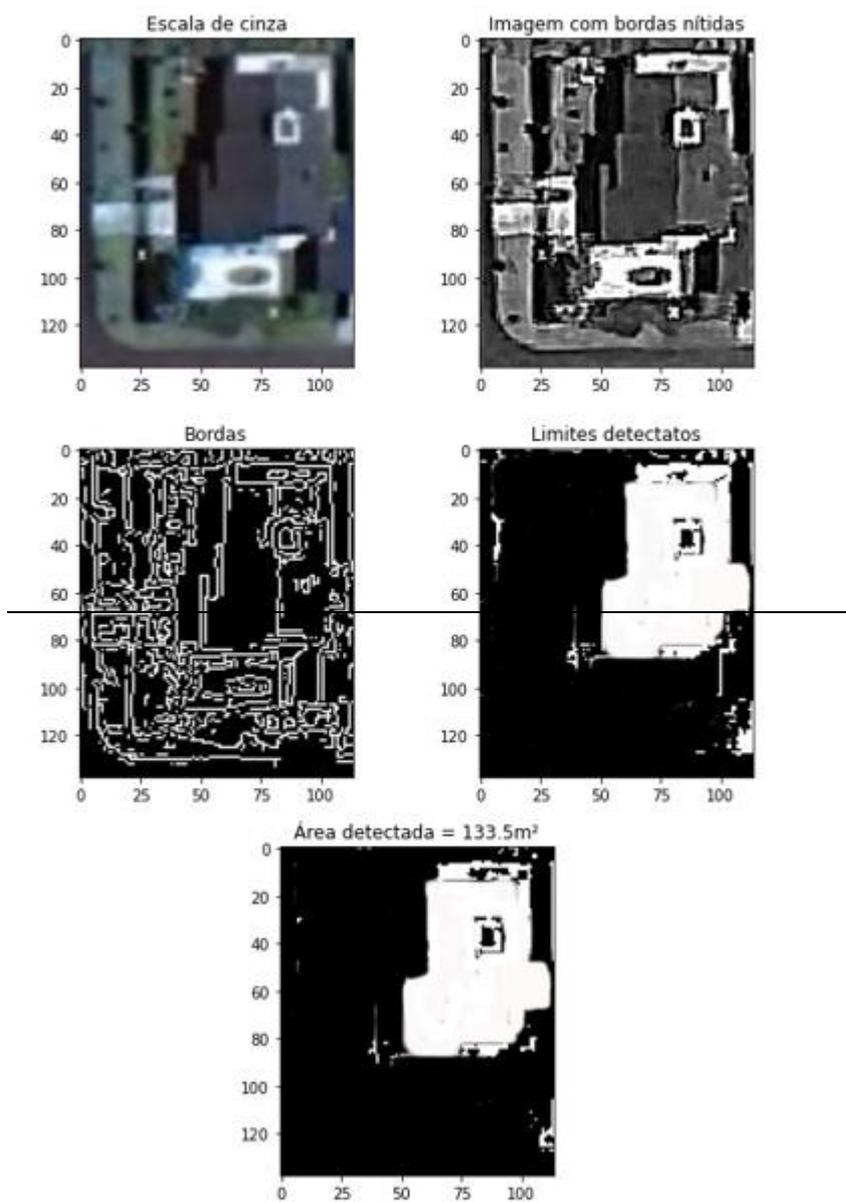
Sreckovic, N., Lukac, N., Zalik, B., Stumberger, G., 2016. **Determining roof surfaces suitable for the installation of PV (photovoltaic) systems: based**

on LiDAR (Light Detection And Ranging) data, pyranometer measurements, and distribution network configuration. Energy 96, 404– 414. doi:10.1016/j.energy.2015.12.078.

(INMET), Instituto Nacional de Meteorologia. Normais de Radiação Solar.2021. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia>. Acesso em 01 de jul. 2022.

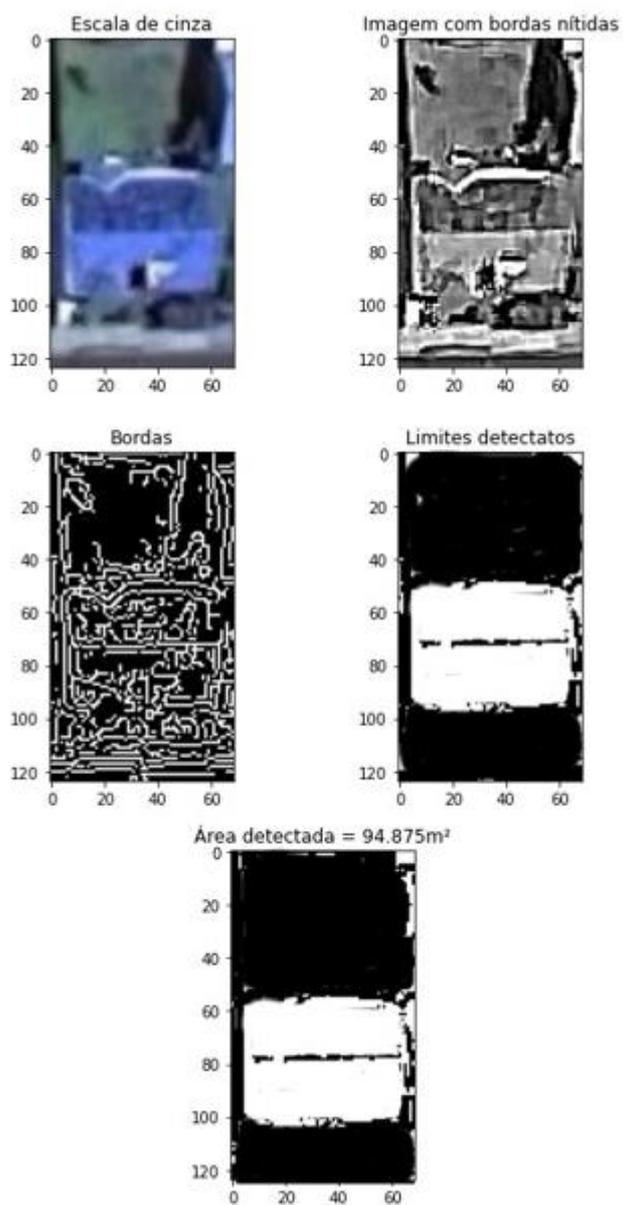
APENDICE A

Figura 12: Análise do domicílio 1 com o algoritmo.



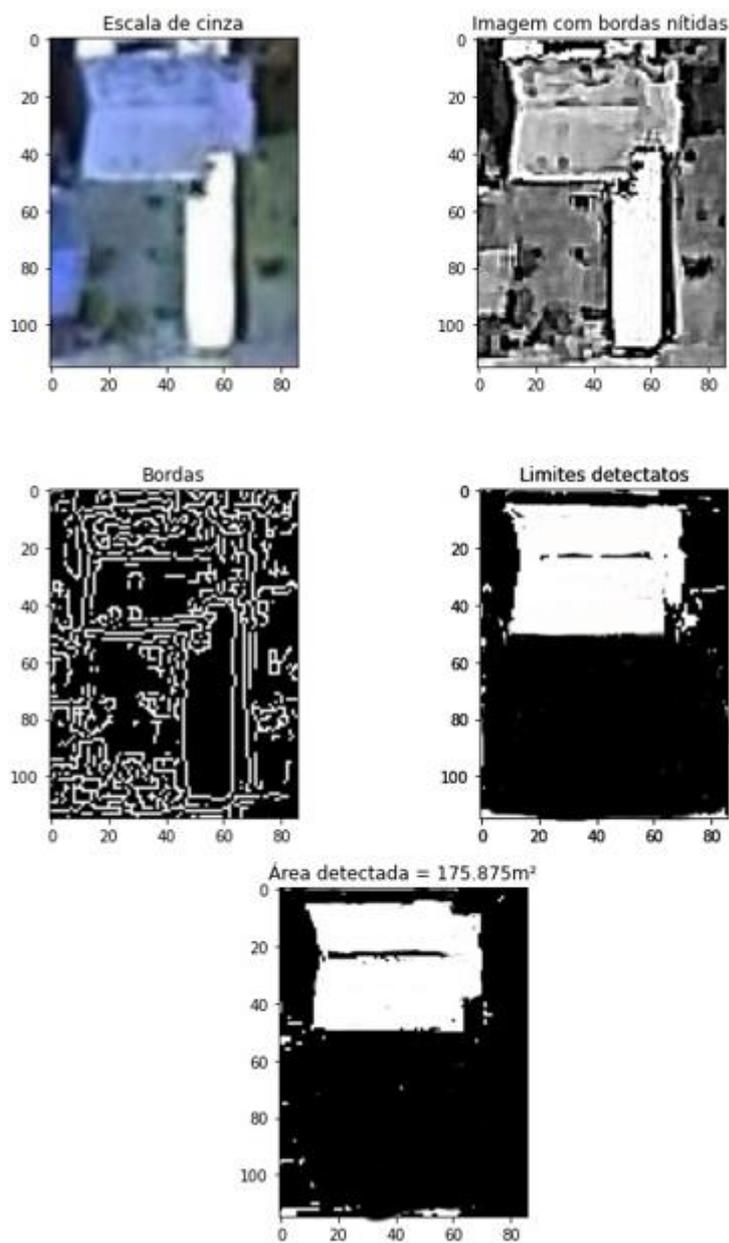
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 13: Análise do domicílio 2 com o algoritmo.



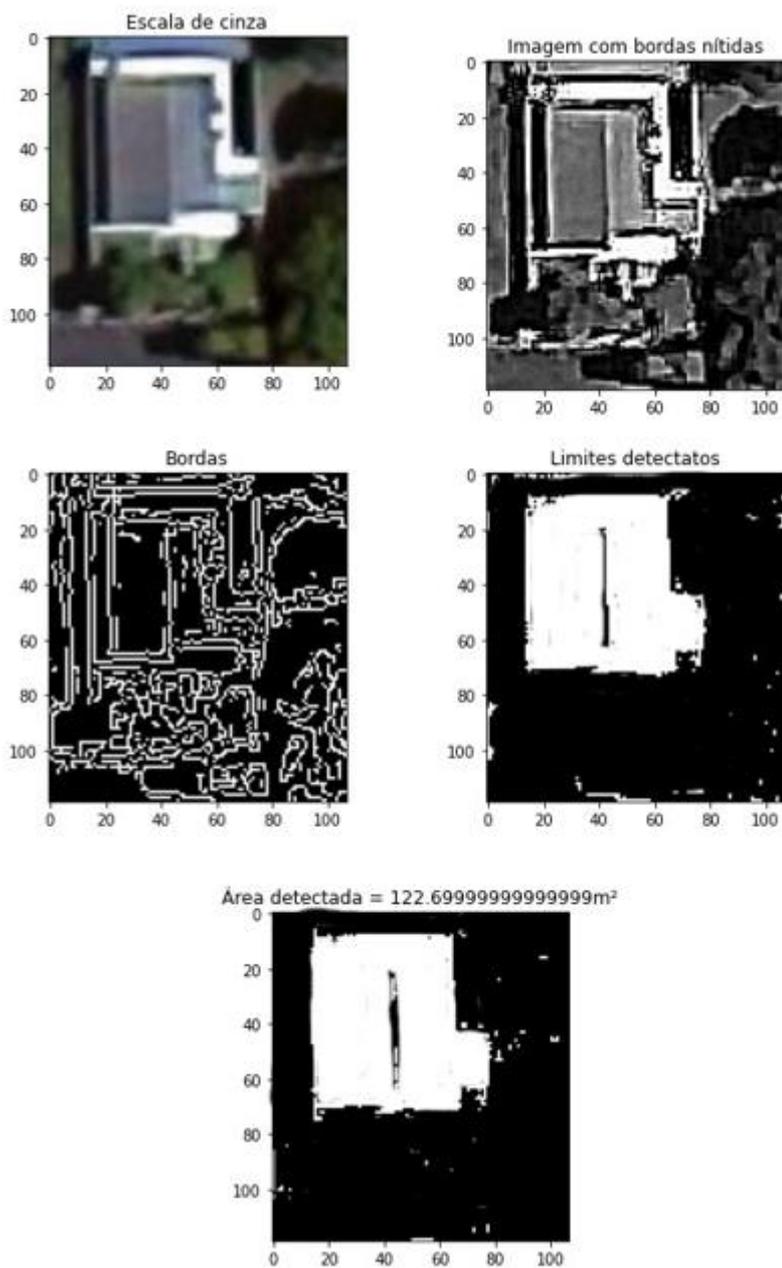
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 14: Análise do domicílio 3 com o algoritmo.



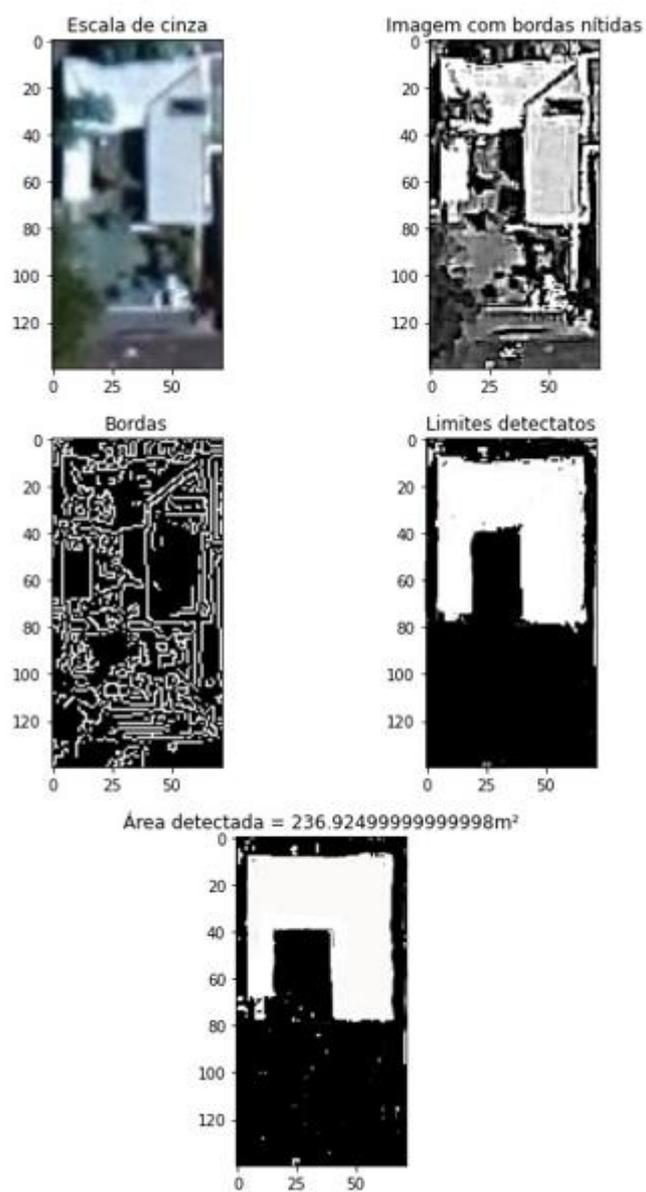
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 15: Análise do domicílio 4 com o algoritmo.



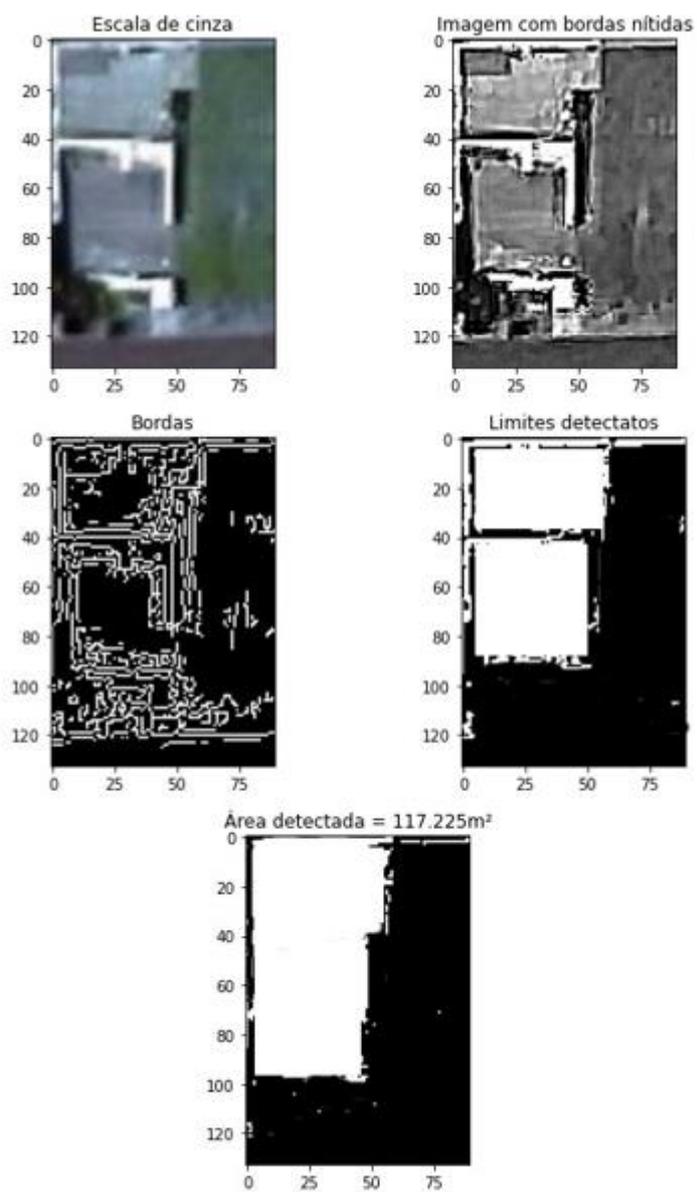
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 16: Análise do domicílio 5 com o algoritmo.



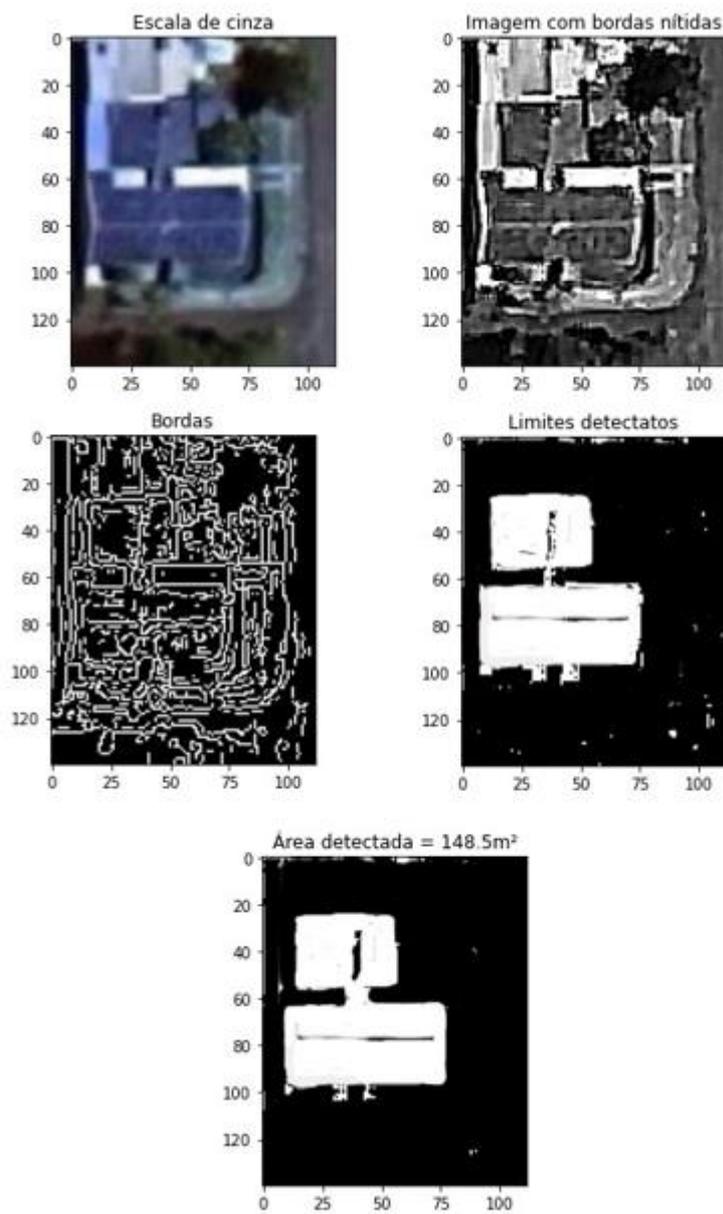
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 17: Análise do domicílio 6 com o algoritmo.



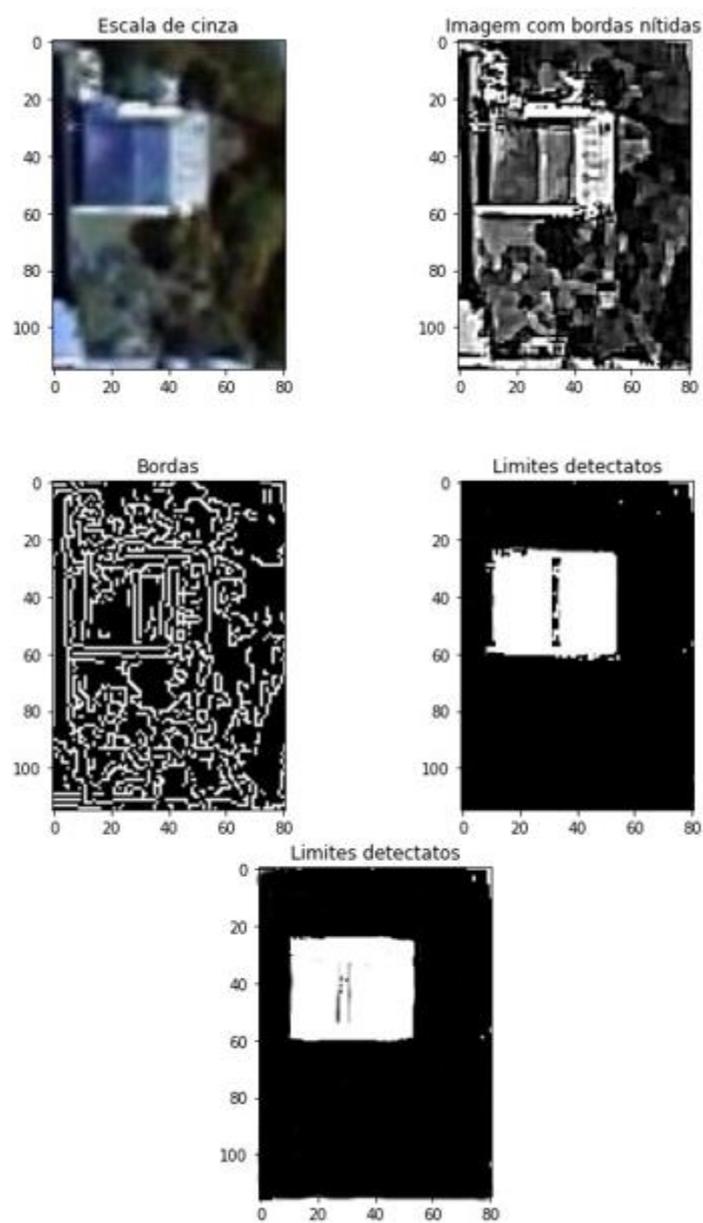
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 18: Análise do domicílio 7 com o algoritmo.



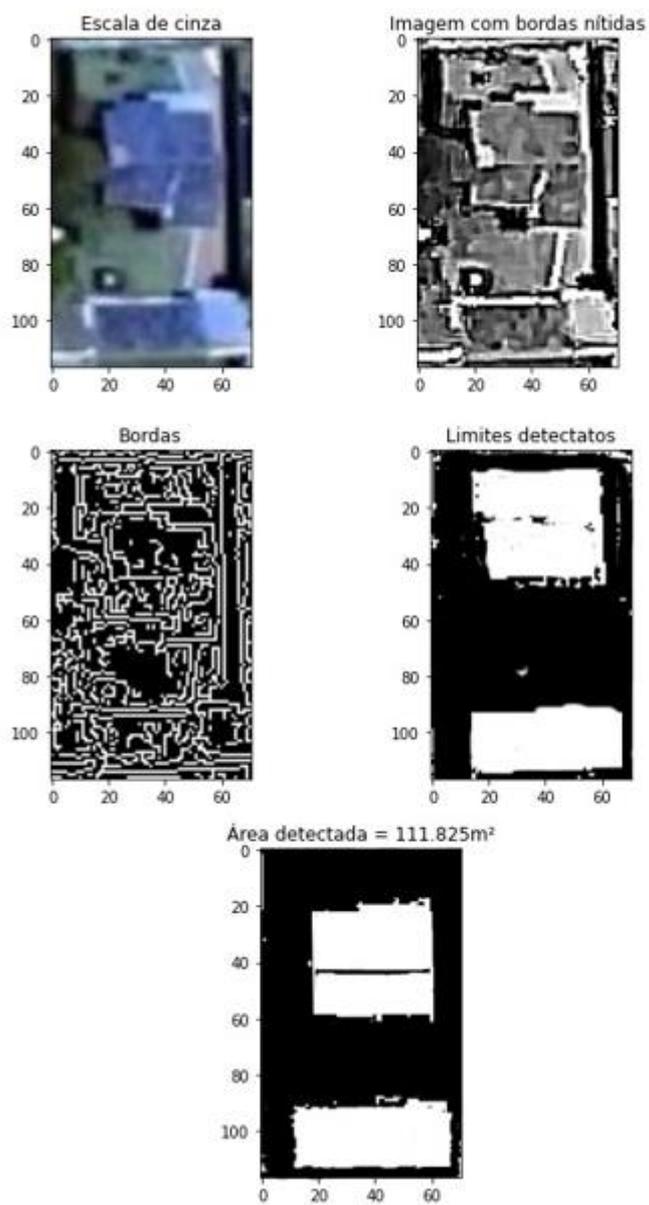
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 19: Análise do domicílio 8 com o algoritmo.



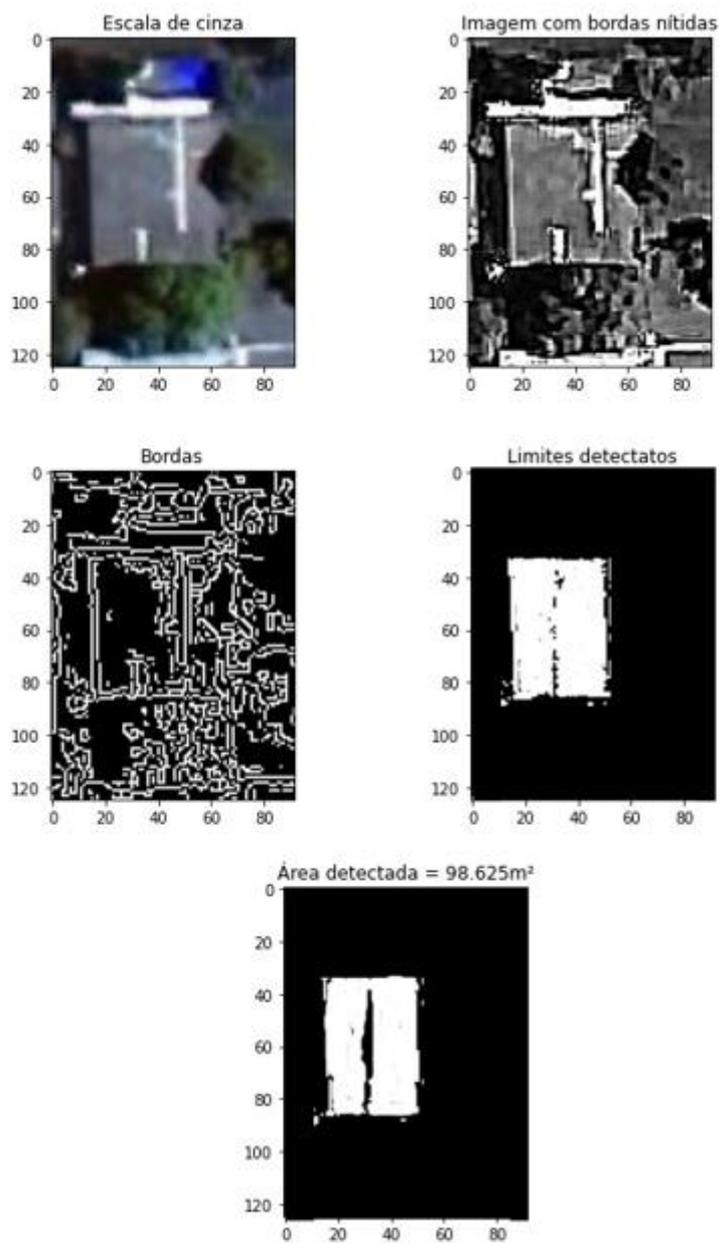
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 20: Análise do domicílio 9 com o algoritmo.



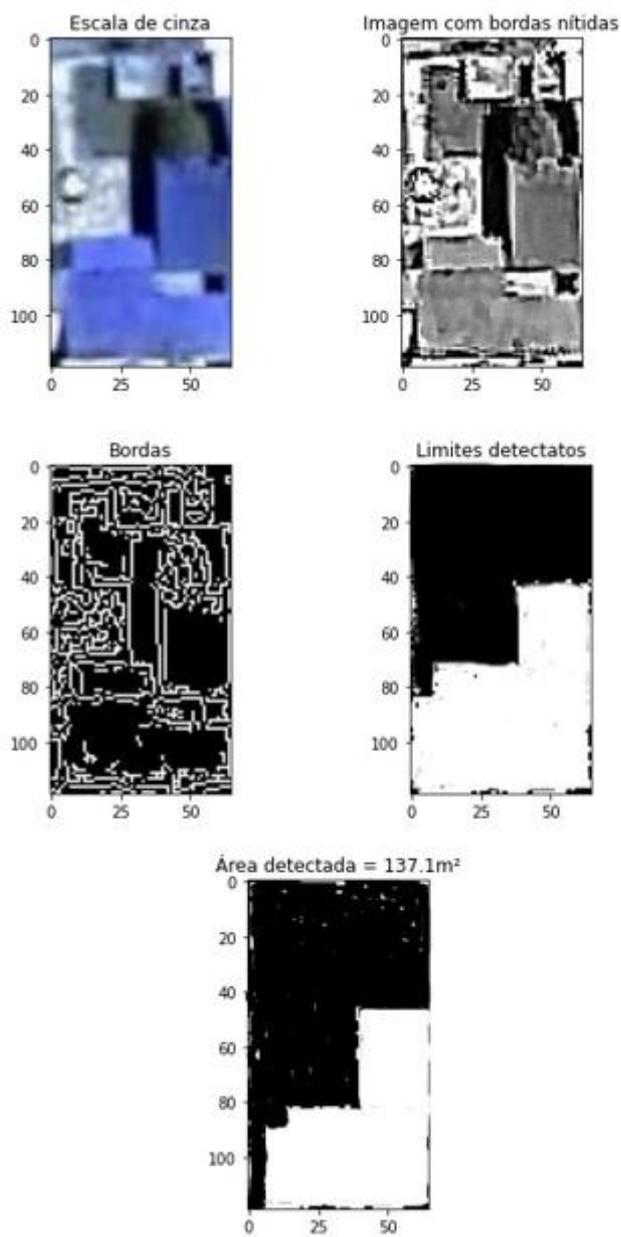
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 21: Análise do domicílio 10 com o algoritmo.



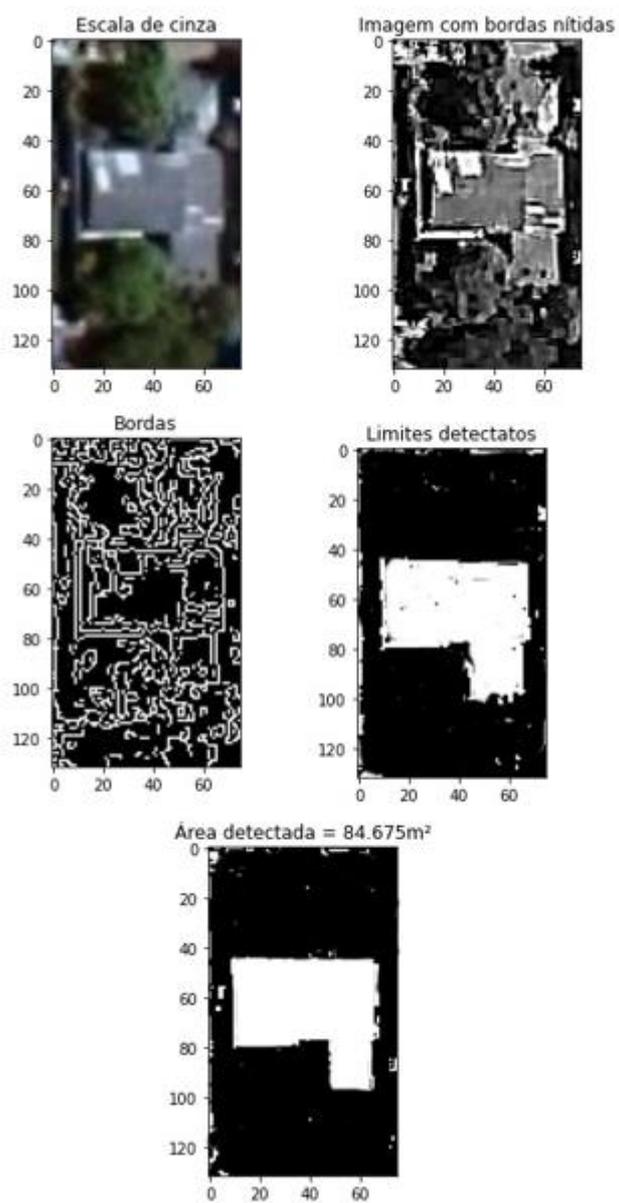
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 22: Análise do domicílio 11 com o algoritmo.



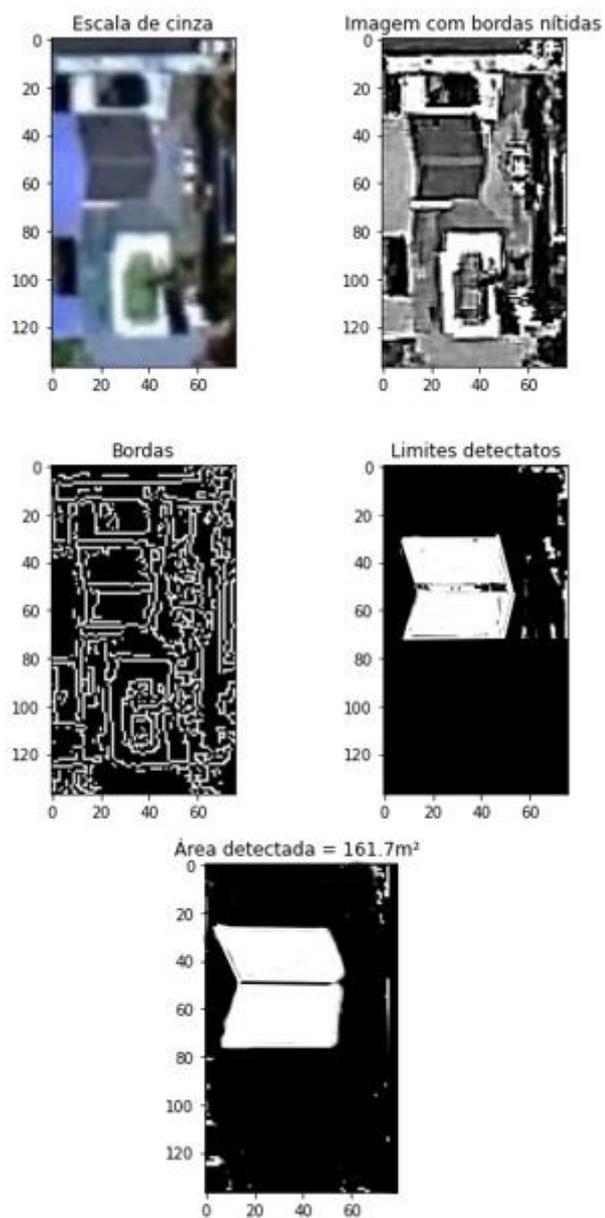
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 23: Análise do domicílio 12 com o algoritmo.



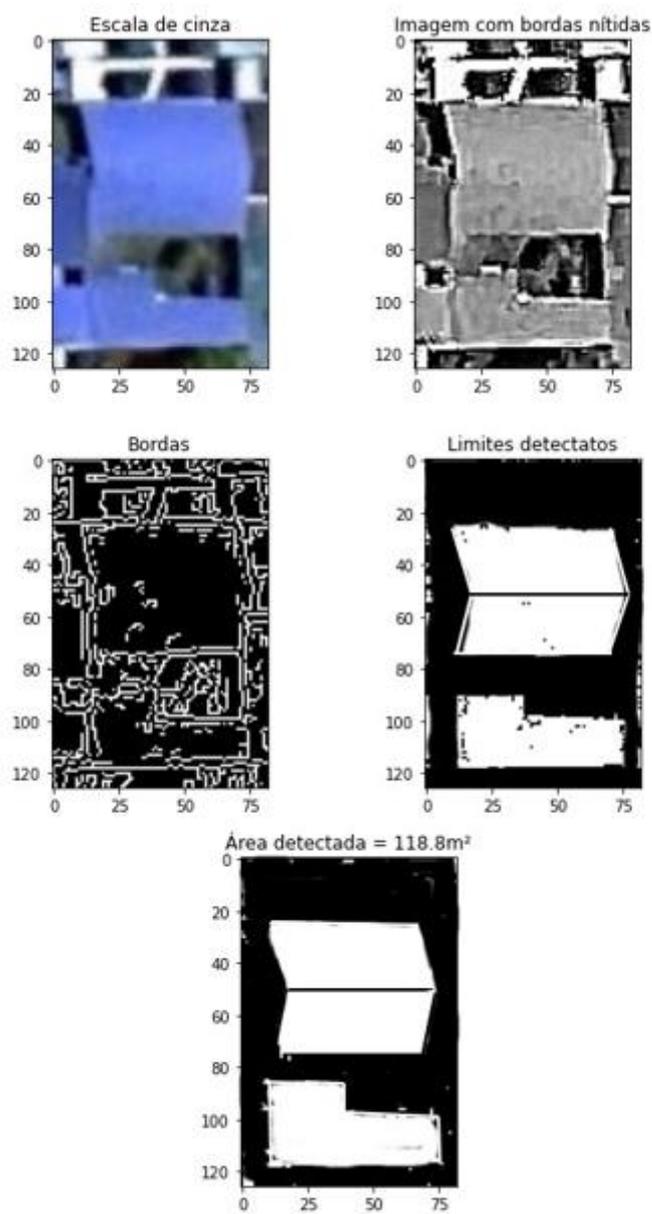
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 24: Análise do domicílio 13 com o algoritmo.



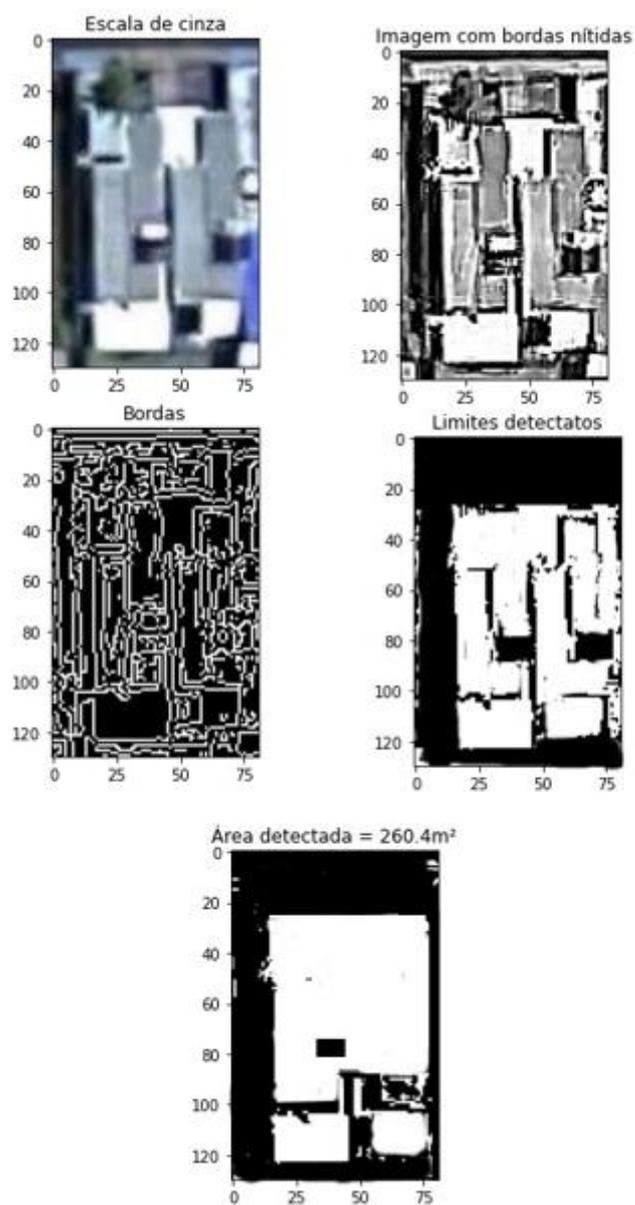
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 25: Análise do domicílio 14 com o algoritmo.



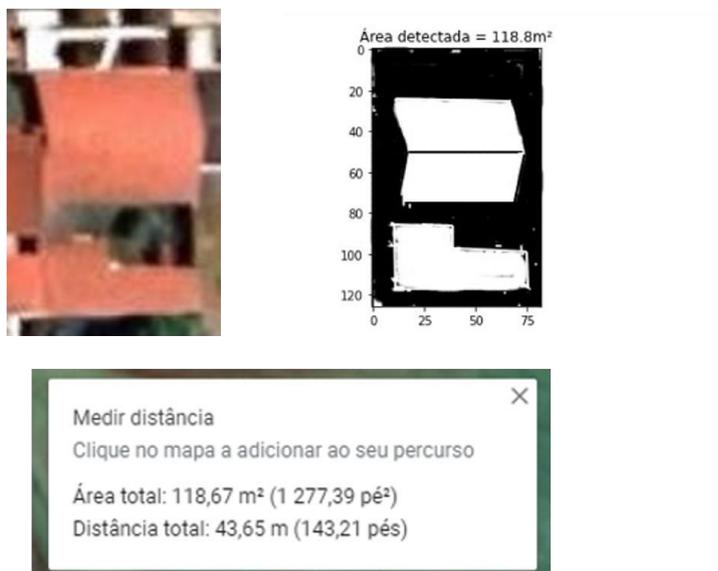
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 26: Análise do domicílio 15 com o algoritmo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 27: Área do telhado encontrada pelo *google maps* e pelo algoritmo.



Fonte: Autoria própria (2022).