

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**RENAN FIORANTE
VICTOR COELHO FOGAGNOLI**

MEDIÇÃO DE AMBIENTES POR FOTOGRAMETRIA

**SÃO PAULO
2022**

**RENAN FIORANTE
VICTOR COELHO FOGAGNOLI**

MEDIÇÃO DE AMBIENTES POR FOTOGRAMETRIA

Dissertação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II apresentada ao curso de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito à obtenção de aprovação para o programa de graduação.

Área de concentração: Engenharia Mecatrônica.

Linha de pesquisa: Fotogrametria.

Orientador: Prof. Dr. Marcos de Sales Guerra
Tsuzuki

Coorientador: Dr. Rogerio Yugo Takimoto

SÃO PAULO

2022

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos iniciais vão para o Orientador Prof. Dr. Marcos de Sales Guerra Tsuzuki e Coorientador Dr. Rogerio Yugo Takimoto, que nos auxiliaram em todos os momentos de dificuldade ao longo do ano de 2022, sempre nos suportando para atingir os objetivos pretendidos. Em segundo lugar, gostaríamos de agradecer os membros da Modú, em especial Christophe Bigon e Enrico Martins pela oportunidade de desenvolvermos juntos este projeto, uma ferramenta que será de grande valia a startup. E finalmente agradecemos nossos familiares, que sempre nos apoiaram e serviram de base para que conseguíssemos finalizar está etapa tão sonhada em nossas vidas.

Thus God himself was too kind to remain idle, and began to play the game of signatures, signing his likeness into the world; therefore I chance to think that all nature and the graceful sky are symbolized in the art of geometry.

Joahannes Kepler (1873–1912).

RESUMO

A presente Monografia apresenta alguns conceitos teóricos de fotogrametria e técnicas de visão computacional que foram aplicadas com o objetivo de permitir a medição de ambientes a partir de uma única fotografia/imagem, utilizando-se de alguma dimensão conhecida presente na cena. Além disso, são apresentados as metodologias utilizadas no desenvolvimento do programa e os resultados dos testes com uma discussão acerca da precisão obtida em cada método para as situações consideradas.

Este trabalho está foi feito em parceria com a startup de móveis modulares, Modú, que demonstrou interesse em uma ferramenta computacional que pudesse efetuar a medição de ambientes a partir de fotos enviadas por clientes, aumentando a eficiência e rapidez no processo, além de evitar gastos nos deslocamentos até os locais na fase de orçamento.

Palavras-chave: Ponto de Fuga, Linha do Horizonte, Fotogrametria, Visão Monocular, OpenCV.

ABSTRACT

This Monograph presents some theoretical concepts of photogrammetry and computer vision techniques that were applied with intent to allowing the measurement of environments from a single photograph/image, using objects of known dimensions. In addition, the methodology used in the development of the program and the results of the tests are presented, conducting a discussion about which methods are most suitable for each situation.

This work was supported with Modú modular furniture startup, which has shown interest in a computational tool that could have simulated the measurement of environments based on photos sent by customer, increasing efficiency and speed, as well as avoiding expenses in traveling to locations at the budget stage.

Keywords: Vanishing Point, Vanishing Line, Photometry, Monocular Vision, OpenCV

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Métodos de medição e reconstrução 3D.	10
Figura 2 – Representação da geometria epipolar existente entre pares de imagens adjacentes.	11
Figura 3 – Esquema de câmera <i>pinhole</i>	12
Figura 4 – Relação entre os pontos 3D e 2D.	12
Figura 5 – Diferentes sistemas de coordenadas a serem considerados no equacionamento.	13
Figura 6 – Matriz de projeção.	13
Figura 7 – Exemplos de <i>vanishing points</i> e <i>vanishing line</i>	14
Figura 8 – <i>Vanishing points</i> e <i>vanishing line</i> de diferentes perspectivas.	14
Figura 9 – Esquema com os parâmetros considerados nos cálculos.	15
Figura 10 – Aplicação do método de medição de distâncias a partir de um mesmo plano de referência.	16
Figura 11 – Aplicação do método de medição de distâncias entre planos paralelos.	16
Figura 12 – Homografia de plano para plano.	17
Figura 13 – Exemplo de aplicação da matriz de homografia.	18
Figura 14 – Casos de Uso do Software.	22
Figura 15 – Máquina de Estados.	23
Figura 16 – Ligação dos pontos, para chegar ao plano de fuga do plano	24
Figura 17 – Ligação dos pontos, para chegar ao plano de fuga do plano	25
Figura 18 – <i>Vanishing Line</i> da imagem	26
Figura 19 – Medição altura no mesmo plano de referência	26
Figura 20 – Determinação de altura no mesmo plano.	27
Figura 21 – Determinação de altura em planos paralelos.	28
Figura 22 – Teste realizado em um armário.	29
Figura 23 – Teste realizado na varanda, com as dimensões conhecidas de uma folha A4.	30
Figura 24 – Teste realizado em uma obra, com as dimensões conhecidas de altura e enver- gadura de um homem.	31
Figura 25 – Resultados para imagem padrão	32
Figura 26 – Resultados para imagem padrão	32
Figura 27 – Resultados para imagem padrão	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	MOTIVAÇÕES	8
1.2	OBJETIVO GERAL	8
1.3	ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	8
2	ESTADO DA ARTE	9
2.1	FOTOGRAMETRIA	9
2.2	VISÃO ESTEREOSCÓPICA	10
2.3	VISÃO MONOCULAR	11
2.3.1	Modelo de Câmera Pinhole	12
2.3.2	Determinação da Matriz de Projeção pelos Pontos de Fuga	13
2.3.3	Medição de Distâncias a partir de um Plano de Referência	14
2.3.4	Medição de Distâncias entre Planos Paralelos	15
2.3.5	Determinação da Matriz de Homografia de um Plano	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	19
3.2	CASOS DE USOS	21
4	RESULTADOS	24
4.1	DETERMINAÇÃO DE <i>VANISHING POINTS</i>	24
4.2	DETERMINAÇÃO DE <i>VANISHING LINE</i>	25
4.3	MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS A PARTIR DO MESMO PLANO DE REFERÊNCIA	25
4.4	MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS ENTRE PLANOS PARALELOS	27
4.5	MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS NO MESMO PLANO	28
4.6	INFLUÊNCIA DO USUÁRIO NAS MEDIÇÕES E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	31
4.7	RELAÇÃO ENTRE ERRO NA MEDIÇÃO E O ORÇAMENTO DO MÓVEL	32
5	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A visão computacional vem sendo cada vez mais empregada, aliada ao avanço das linguagens de programação, para a obtenção de informações a partir de imagens e seu uso vai desde o desenvolvimento de cartas topográficas até a digitalização de artefatos históricos. A seguinte monografia apresentará três metodologias para o cálculo de distâncias através de uma medida de referência conhecida. O software apresentado foi elaborado e desenvolvido inteiramente em linguagem Python, utilizando-se da biblioteca Open-CV, que possibilitou a detecção de parâmetros para cálculo das distâncias. Estudando-se essas informações, é possível estabelecer relações dos pontos na imagem com os pontos no mundo real e calcular as dimensões do ambiente.

1.1 MOTIVAÇÕES

A motivação inicial para a construção do software de medição de imagens, deveu-se a um problema que permeia as indústrias de móveis. Na fase inicial de projeto, está a elaboração do orçamento, a qual necessita de uma medição *in loco* no recinto destinado aos móveis, que faz com que seja pouco escalável e aumente o custo de operação das empresas, quando os clientes não são capazes de fornecer as medidas diretamente.

1.2 OBJETIVO GERAL

Diante do problema descrito, este trabalho visa desenvolver um software em Python capaz de obter as medidas de um ambiente, com baixa margem de erro, tendo como referências dimensões conhecidas na imagem.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, são apresentadas referências bibliográficas e conceitos teóricos que foram considerados para a resolução do problema e que contribuíram no desenvolvimento do trabalho; no capítulo 3, é relatada a descrição da metodologia empregada para efetuar as medições bem como os casos de uso do software, demonstrando as ações que podem ser executadas; no capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos nos testes demonstrando a efetividade dos métodos; por fim, o capítulo 5 discute acerca das precisões, como os métodos podem auxiliar em cada situação e fornece uma orientação sobre quais situações tendem a ter uma precisão maior na medição.

2 ESTADO DA ARTE

Na área da visão computacional, não existe uma fórmula ou método padrão de como solucionar os problemas, mas, sim, diversas técnicas que podem ser utilizadas para resolver vários problemas bem definidos. Desta forma, há mais de uma maneira de realizar um mesma tarefa.

Uma possível abordagem para problemas que requerem as técnicas de visão computacional é o uso de mais de uma imagem do mesmo ambiente em ângulos diferentes (visão estereoscópica). Este método permite uma reconstrução de alta precisão e detalhamento, sendo muito utilizado para digitalizar artefatos históricos, fósseis e pequenos objetos, cuja medição mecânica é difícil e pode danificar a peça em estudo.

Contudo, dada a necessidade primária de se obter de forma rápida as dimensões do local, não sendo essencial um grau de detalhamento elevado, optou-se por seguir métodos de medição e por detecção de segmentos e planos de uma única imagem (visão monocular), utilizando dimensões já conhecidas.

Avaliou-se que, com esse método, o tempo de processamento do programa seria menor e que o armazenamento dos computadores da empresa não fosse sobrecarregado com grandes quantidades de fotos e vídeos enviados pelos clientes. Além disso, presume-se que as instruções a serem seguidas pelos clientes para uma captura adequada das imagens se tornem mais simples, uma vez que será necessário observar alguns aspectos para a obtenção de apenas uma imagem, em vez de ter que se preocupar na boa qualidade de uma série de fotografias.

Postas essas considerações iniciais, serão apresentados neste capítulo conceitos teóricos, definições e artigos relevantes para o desenvolvimento deste projeto.

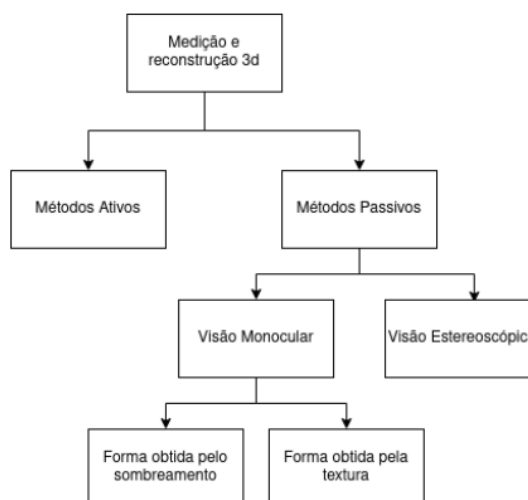
2.1 FOTOGRAMETRIA

O termo “fotogrametria” deriva de três palavras gregas: *photos* (luz); *grámma* (escrito ou desenhado); e *métron* (medida ou medição). Ou seja, a técnica da fotogrametria permite estudar informações quanto às formas, dimensões e posições de objetos no espaço utilizando medições obtidas a partir de gravuras e fotografias.

A fotogrametria surge no século XIX com Aimé Laussedat, oficial militar francês, que passou a utilizar desenhos de diferentes perspectivas para realizar a medição de edifícios e elaborar mapas topográficos. Antigamente, obtinha-se as medidas diretamente das fotos de forma analógica com o uso de equipamentos de alta mecânica de precisão. Mas com o desenvolvimento dos computadores, esse processo passou a ser feito de forma digital por meio de algoritmos.

A reconstrução 3D por fotogrametria é muito utilizada na produção de cartas topográficas,

Figura 1 – Métodos de medição e reconstrução 3D.



na geologia, arqueologia, indústrias e na digitalização de artefatos históricos. Impressoras 3D, muito popularizada nos últimos anos, têm usado softwares de reconstrução para reproduzirem objetos de difícil modelagem. Também bastante populares, os drones têm usado a fotogrametria para a inspeção de grandes áreas, sendo de grande ajuda no monitoramento de florestas e em projetos de engenharia civil.

2.2 VISÃO ESTEREOSCÓPICA

Na Visão Estereoscópica, é possível inferir informações de estruturas 3D a partir de duas ou mais imagens de uma cena, capturadas de diferentes pontos de vista. Essa abordagem é bastante utilizada para estudos topográficos e digitalização de artefatos históricos e pequenos objetos, pois permite um alto nível de detalhamento.

Dos trabalhos pesquisados que abordam esse tipo de metodologia, uma das primeiras etapas é a identificação de pontos característicos (*features*) nas imagens de entrada. Existem diversas técnicas para o rastreamento dessas *features*, mas a maioria identifica esses pontos em regiões de forte texturização, ou que representem arestas e cantos das estruturas presentes na cena. Dentre os detectores de pontos característicos, destaca-se o SURF (*Speeded-Up Robust Features*) e o SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*). A utilização desses pontos facilmente identificáveis contribui para que haja uma maior precisão no cálculo do posicionamento e uma diminuição do custo computacional, além de facilitar a etapa de correspondência (*matching*), que é o processo de reconhecer pontos homólogos em um par de imagens.

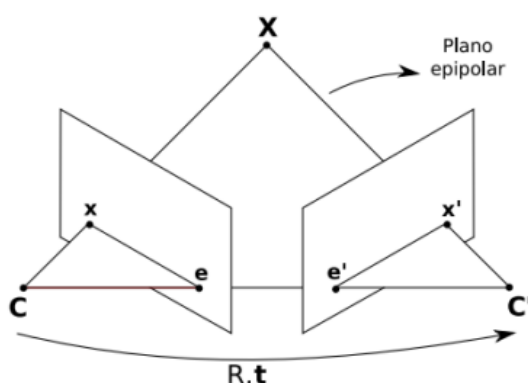
Um conceito muito importante quando se trata estereoscopia é a Geometria Epipolar. A Figura 2 representa o conceito da geometria epipolar, com um ponto X no mundo e suas projeções x e x' em dois planos diferentes associados a duas câmeras de centros de projeção C e C' . É com este estudo que se pode estabelecer relações entre fotografias tiradas de perspectivas diferentes.

Para tanto, são necessários parâmetros extrínsecos e intrínsecos da câmera, bem como os pontos homólogos. A fim de garantir uma boa correspondência entre um par de imagens, a posição e orientação das câmeras em cada cena não podem ser muito diferentes, assim como a iluminação do ambiente, já que dificultaria a identificação de pontos homólogos. Além disso, para que o *matching* seja feito adequadamente, são recomendados pelo menos 8 pontos homólogos entre os *features* de um par de imagens.

Dependendo do detalhamento requisitado em determinado projeto, podem ser aplicados filtros para refinar os dados obtidos em cada etapa. Por fim, é realizada a triangulação das *features* rastreadas para a reconstrução 3D da cena.

Para informações mais detalhadas a respeito da reconstrução 3D com a abordagem de visão estereoscópica, sugere-se consultar as referências (FARIAS, 2012), (MARRO, 2014), (LAURAS, 2020), (LAGE, 2022) e (MASSON, 2018).

Figura 2 – Representação da geometria epipolar existente entre pares de imagens adjacentes.



Fonte: Extraído de (MARRO, 2014)

2.3 VISÃO MONOCULAR

Na Visão Monocular, é possível inferir informações de estruturas 3D a partir da utilização de apenas uma imagem, estudando-se características bidimensionais como texturas, silhuetas e sombreamento. Neste método, há uma redução na precisão das informações obtidas em relação a métodos que utilizam visão estereoscópica, uma vez que não há uma mudança de perspectiva. Porém, por exigir menos memória e maior rapidez de processamento, é altamente empregada para monitoramentos em tempo real.

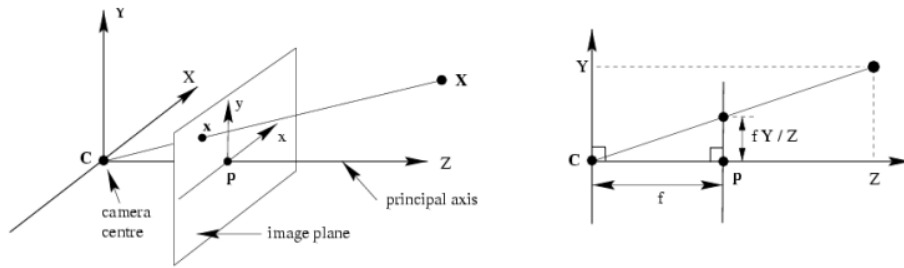
Para a solução do problema de falta de perspectivas, pode-se identificar segmentos e planos na imagem e, então, utilizar relações e cálculos geométricos para inferir a posição dos pontos no sistema de coordenadas 3D. Com esse objetivo, a qualidade das fotos é essencial para garantir um bom reconhecimento da cena.

Para melhor entendimento da abordagem de visão monocular, recomenda-se as referências (CRIMINISI, 2002), (CRIMINISI; REID; ZISSERMAN, 2000), (SHU,), (CRIMINISI, 2001), (HARTLEY; ZISSERMAN, 2000), (SUN, 2011).

2.3.1 Modelo de Câmera Pinhole

Em (KITANI,) e (CHIEN, 2021), é descrito o método de mapeamento de pontos 3D para 2D e obtenção das matrizes de câmeras *pinhole*. A figura 3 mostra um desenho esquemático da projeção de um ponto X 3D no plano da imagem para uma câmera com foco f . A equação $x=PX$ pode ser escrita como apresentado na figura 4, onde a matriz contendo o foco da câmera é chamada de matriz de parâmetros intrínsecos (K) e a matriz de última coluna igual a zero é referente aos parâmetros extrínsecos, sendo as 3 primeiras colunas relacionadas a rotação (matriz R) e a última coluna relacionada a translação (matriz T).

Figura 3 – Esquema de câmera *pinhole*.



Fonte: Extraído de (CHIEN, 2021)

Figura 4 – Relação entre os pontos 3D e 2D.

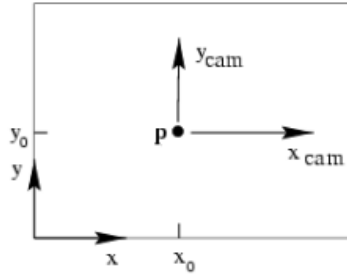
$$\begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Fonte: Extraído de (CHIEN, 2021)

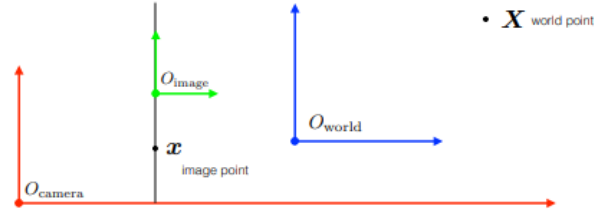
Esse modelo considera que câmera, o plano de imagem e o ponto X no espaço estão no mesmo sistema de coordenadas. Porém, na maior parte dos casos, existem 3 sistemas distintos, sendo necessárias algumas alterações na equação para que o mapeamento esteja correto. Nas figuras 5a e 5b, está representada a situação em que há diferentes sistemas de coordenadas.

Dessa forma, a matriz de projeção P pode ser reescrita como mostra a figura 6.

Figura 5 – Diferentes sistemas de coordenadas a serem considerados no equacionamento.



(a) Sistema de coordenada da câmera em relação ao sistema da imagem.



(b) Sistemas de coordenadas da câmera, da imagem e do mundo 3D.

Fonte: (a) Extraído de (CHIEN, 2021). (b) Extraído de (KITANI,)

Figura 6 – Matriz de projeção.

$$\mathbf{P} = \underbrace{\begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{intrinsic parameters}} \underbrace{\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix}}_{\text{extrinsic parameters}}$$

Fonte: Extraído de (KITANI,)

2.3.2 Determinação da Matriz de Projeção pelos Pontos de Fuga

De acordo com (CRIMINISI, 2001), podemos mapear os pontos no sistema de coordenadas 3D do mundo real para o sistema 2D da imagem definindo uma matriz de projeção 3×4 , como apresentado na fórmula 2.1. Para tanto, deve-se encontrar os *vanishing points* dos eixos X , Y e Z do sistema de coordenadas definido para o mundo real - cujo o ponto de origem está no plano de referência -, bem como a *vanishing line*, que é a linha do horizonte que liga o ponto de fuga em X e o ponto de fuga em Y . A determinação dos *vanishing points* se dá pelo prolongamento de retas paralelas no mundo real, que tendem a convergir para um ponto dependendo do ângulo em que a foto foi tirada; este ponto de intersecção das retas é o *vanishing point*. As figuras 7a, 7b e 8 exemplificam o conceito por trás da determinação dos pontos de fuga e da *vanishing line*.

$$x = PX = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \end{bmatrix} X \quad (2.1)$$

Denotando os pontos de fuga dos eixos X , Y e Z como v_x , v_y e v , respectivamente, temos que $p_1 = v_x$, $p_2 = v_y$, $p_3 = v$ e $p_4 = o$, origem do sistema de coordenadas do mundo.

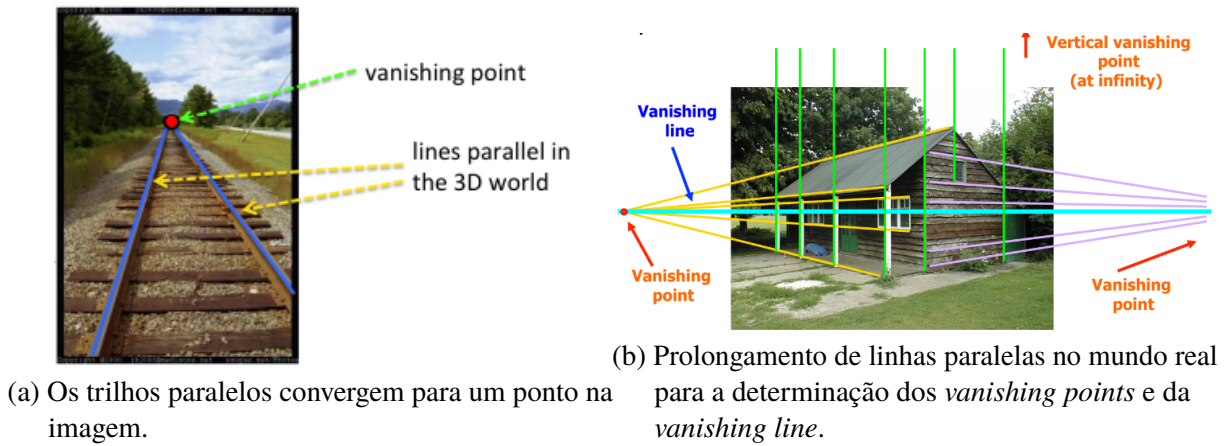
Para garantir que os pontos das colunas 1, 2 e 4 sejam linearmente independentes, a

origem do sistema de coordenadas não pode estar na linha do horizonte l . Então, pode-se definir $o = p_4 = l||l|| = \hat{l}$, chegando na matriz P :

$$P = \begin{bmatrix} v_x & v_y & \alpha v & \hat{l} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

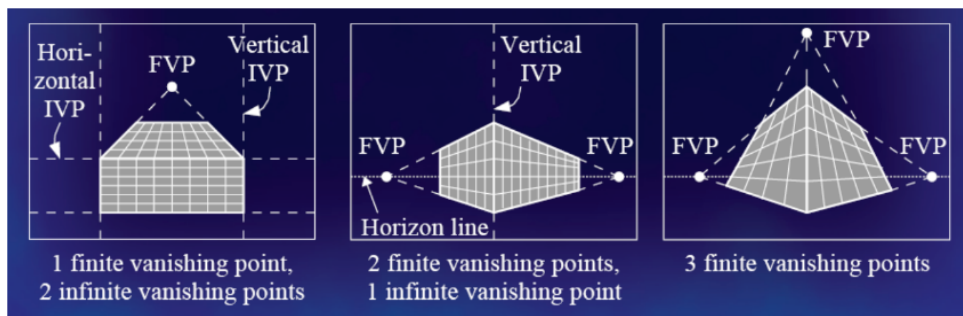
Onde α é um fator de escala.

Figura 7 – Exemplos de *vanishing points* e *vanishing line*



Fonte: (a) Extraído de (FIDLER; URTASUN, 2015). (b) Extraído de (SEITZ; HOIEM,)

Figura 8 – *Vanishing points* e *vanishing line* de diferentes perspectivas.



Fonte: Extraído de (SEITZ; HOIEM,)

2.3.3 Medição de Distâncias a partir de um Plano de Referência

A partir da matriz de projeção descrita em (CRIMINISI, 2001), chega-se em um método para estimar a altura de objetos presentes na cena tendo como base um outro objeto de altura conhecida no mesmo plano de referência.

Uma vez computados os pontos de fuga e a linha de horizonte, deve-se selecionar os pontos da base e do topo do objeto de altura conhecida para calcular o fator métrico α , como

descrito na equação 2.3, onde b_r é o ponto da base do objeto, t_r é o ponto do topo e Z_r é a altura conhecida (SUN, 2011).

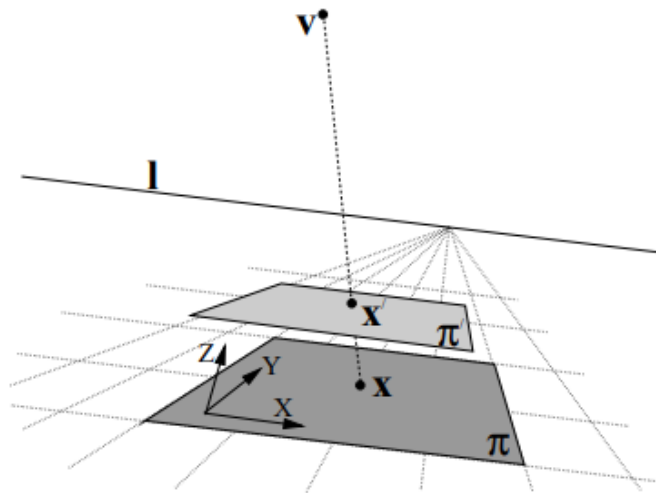
$$\alpha = -\frac{||b_r \times t_r||}{Z_r(\hat{l} \cdot b_r)||v \times t_r||} \quad (2.3)$$

Calculado o valor de α , agora é possível determinar a altura de outro objeto que se encontra no mesmo plano de referência. Aplicando a fórmula 2.4, onde b_x é o ponto da base do objeto a ser medido e t_x é o ponto do topo, chega-se no valor da altura Z_x .

$$Z_x = -\frac{||b_x \times t_x||}{\alpha(\hat{l} \cdot b_x)||v \times t_x||} \quad (2.4)$$

As figuras 10a e 10b mostram, respectivamente, um esquema com os parâmetros considerados nos cálculos e um exemplo da aplicação deste método. Na figura 10b pode-se observar a *vanishing line* em azul e a altura do corrimão em vermelho usada como parâmetro para obter a altura da mulher e da maçaneta, considerando o chão como o plano de referência.

Figura 9 – Esquema com os parâmetros considerados nos cálculos.

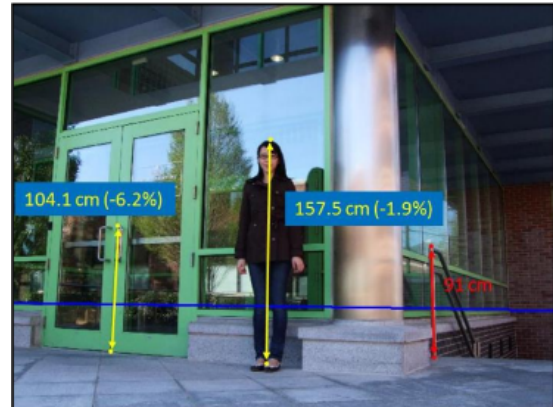
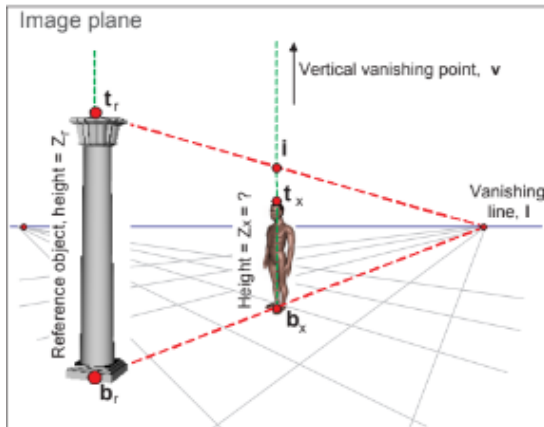


Fonte: Extraído de (CRIMINISI, 2001)

2.3.4 Medição de Distâncias entre Planos Paralelos

Em (CRIMINISI, 2001), é descrito um método semelhante ao apresentado em 2.3.3, mas que permite a medição de alturas entre planos paralelos a partir de uma altura conhecida. Como pode-se observar no esquema apresentado na figura 11a, sabendo da distância Z_r entre dois planos paralelos π e π' , é possível determinar a distância entre outros dois planos paralelos π' e π'' . A figura 11b mostra um exemplo de aplicação deste método, no qual foi possível calcular a altura da pasta a partir da altura do móvel onde ela se encontra.

Figura 10 – Aplicação do método de medição de distâncias a partir de um mesmo plano de referência.

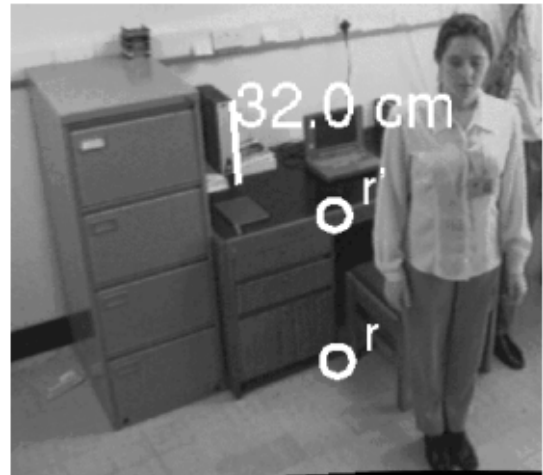
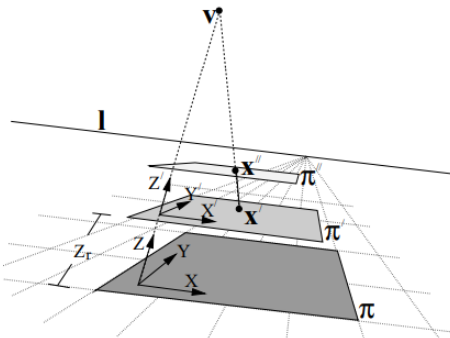


(a) Esquema com os parâmetros considerados nos cálculos.

(b) Exemplo de aplicação do método para a medição da altura da mulher e da maçaneta da porta.

Fonte: Extraídos de (SUN, 2011)

Figura 11 – Aplicação do método de medição de distâncias entre planos paralelos.



(a) Esquema com os parâmetros considerados nos cálculos.

(b) Exemplo de aplicação do método para a medição da altura da pasta a partir da altura do móvel.

Fonte: Extraídos de (CRIMINISI, 2001)

Uma vez determinados os pontos de fuga, a linha do horizonte e os pontos na imagem da base e do topo das altura em questão, aplica-se as fórmulas 2.5 e 2.6 para estimar a altura Z' .

$$\rho' = \frac{p_4 \cdot x'}{1 + Z_r(p_3 \cdot p_4)} \quad (2.5)$$

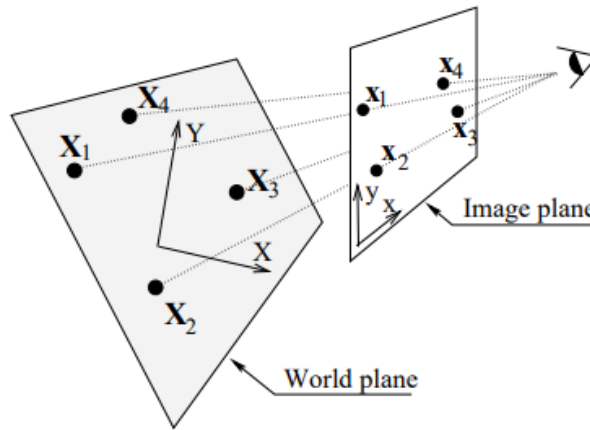
$$Z' = -\frac{\|x' \times x''\|}{\rho' \|p_3 \times x''\|} \quad (2.6)$$

2.3.5 Determinação da Matriz de Homografia de um Plano

A homografia de plano para plano associa as coordenadas de um ponto em um plano real com as coordenadas deste mesmo ponto no plano da imagem. Essa relação se dá pela equação $X = H.x$, onde X é a coordenada homogênea 2D do plano no mundo real, x é a coordenada homogênea 2D da imagem e H é a matriz 3×3 de homografia.

Uma das formas de determinar a matriz H , descrita em (CRIMINISI, 2001), é seleccionar 4 ou mais pontos não colineares do plano em questão, cujas distâncias entre si são conhecidas, e estabelecer uma relação com os pontos homólogos na imagem. Para tanto, deve-se definir um sistema de coordenadas 2D do mundo real, como pode-se observar na figura 12.

Figura 12 – Homografia de plano para plano.



Fonte: Extraído de (CRIMINISI, 2001)

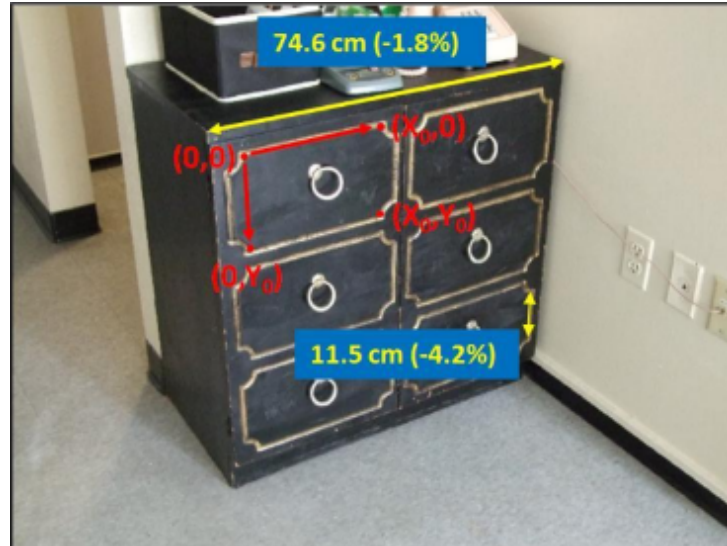
Escrevendo a matriz H como um vetor $h = [h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33}]^T$, tem-se que $Ah = 0$, sendo A uma matriz $2n \times 9$ representada em 2.7.

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -y_1X_1 & -X_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1Y_1 & -y_1Y_1 & -Y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -y_2X_2 & -X_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2Y_2 & -y_2Y_2 & -Y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_nX_n & -y_nX_n & -X_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -x_nY_n & -y_nY_n & -Y_n \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Sabendo-se, então, as coordenadas dos pontos tanto no sistema do mundo real, quanto no sistema da imagem, pode-se calcular a matriz A , onde x_n e y_n são as coordenadas do ponto n no

sistema de coordenadas da imagem e X_n e Y_n são as coordenadas no sistema do mundo real. Por fim, para obter a matriz de homografia, utiliza-se o método *Singular Value Decomposition*, cuja matriz resultante V é a matriz H .

Figura 13 – Exemplo de aplicação da matriz de homografia.



Fonte: Extraído de (SUN, 2011)

A Figura 13 mostra um exemplo de aplicação do método de medição pela matriz de homografia de um plano. No caso, foram selecionados 4 pontos da moldura de uma das gavetas do móvel e definiu-se o ponto superior direito como a origem do sistema de coordenadas 2D do mundo real. Com isso, é possível realizar qualquer medição no plano que passa pela face escolhida do móvel.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são explicadas as etapas do desenvolvimento do *software* e apresentados os casos de uso.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

- **Biblioteca Utilizada:**

Para elaboração do projeto de medição, foi utilizado a biblioteca de visão computacional em Python, o OpenCV. Através desta biblioteca muito explorada atualmente, pode-se obter informações de imagens e fazer os tratamentos necessários.

- **Ponto de Fuga:**

Como na maior parte das fotos há a possibilidade de estimar os pontos de fuga, a técnica para sua detecção foi a etapa principal para o desenvolvimento da ferramenta de medição. A detecção dos *vanishing points* em cada direção dos eixos de coordenadas 3D consiste no prolongamento das retas paralelas. Como há uma distorção na passagem do 3D para o 2D, as retas no ambiente 3D que são paralelas, no ambiente 2D tendem a convergir em um ponto, chamado de *vanishing point*. Dessa forma, para se determinar os pontos de fuga são necessárias ao menos 2 retas paralelas no mundo real.

O algoritmo 1 exemplifica uma forma de encontrar os pontos de fuga das imagens utilizando OpenCV.

Algorithm 1

Determine 2 segmentos de retas paralelos no mundo real

$$r_1 \parallel r_2$$

São necessários 4 pontos

$$p_1 = (x_1, y_1)$$

$$p_2 = (x_2, y_2)$$

$$p_3 = (x_3, y_3)$$

$$p_4 = (x_4, y_4)$$

Cálculo das tangentes

$$m_1 = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$m_2 = (y_4 - y_3) / (x_4 - x_3)$$

Equação das retas

$$r_1 \rightarrow y - y_1 = m(x - x_1)$$

$$r_2 \rightarrow y - y_2 = m(x - x_2)$$

O ponto de fuga é definido

$$r_1 = r_2 \rightarrow (x_c, y_c)$$

- **Reta de Fuga:**

Através dos pontos de fuga calculados no tópico anterior, é possível determinar a Reta de Fuga de um plano, traçando um linha que liga os 2 pontos de fuga dos eixos que definem este plano.

Algorithm 2

A partir de dois pontos de fuga $p_{f1} = (x_{c1}, y_{c1})$ $p_{f2} = (x_{c2}, y_{c2})$

$$m_f = (y_{c2} - y_{c1}) / (x_{c2} - x_{c1})$$

A reta de fuga é definida

$$l \rightarrow y - y_{c1} = m_f(x - x_{c1})$$

• **Medição de Distâncias a Partir do Mesmo Plano de Referência:**

O algoritmo 3 exemplifica o método de medição de distâncias descrito na 2.3.3:

Algorithm 3

Determine os pontos de fuga da imagem;

Determine a linha de horizonte do plano de referência;

Selecione o ponto de base (b_r) e de topo (t_r) do segmento de referência;

Informe o valor da dimensão Z_r ;

Calcule o fator de escala α aplicando a fórmula:

$$\alpha = - \frac{\|b_r \times t_r\|}{Z_r(\hat{l} \cdot b_r)\|v \times t_r\|} \quad (3.1)$$

Repita os seguintes passos para efetuar as medidas:

Selecione o ponto de base (b_x) e de topo (t_x) do segmento que deseja medir;

Calcule a distância Z_x aplicando a fórmula.

$$Z_x = - \frac{\|b_x \times t_x\|}{\alpha(\hat{l} \cdot b_x)\|v \times t_x\|} \quad (3.2)$$

• **Medição de Distâncias Entre Planos Paralelos:**

O algoritmo 4 exemplifica o método de medição de distâncias descrito na 2.3.4:

Algorithm 4

Determine os pontos de fuga da imagem;
 Determine a linha de horizonte dos planos paralelos;
 Selecione o ponto de base e de topo do segmento de referência;
 Informe o valor da dimensão Z_r ;
 Calcule o fator de escala ρ aplicando a fórmula:

$$\rho' = \frac{p_4 \cdot x'}{1 + Z_r(p_3 \cdot p_4)} \quad (3.3)$$

Repita os seguintes passos para efetuar as medidas:

Selecione o ponto de base (b_x) e de topo (t_x) do segmento que deseja medir;
 Calcule a distância Z' aplicando a fórmula:

$$Z' = -\frac{\|x' \times x''\|}{\rho' \|p_3 \times x''\|} \quad (3.4)$$

- **Medição de Distâncias no Mesmo Plano:**

O algoritmo 5 exemplifica o método de medição de distâncias descrito na 2.3.5:

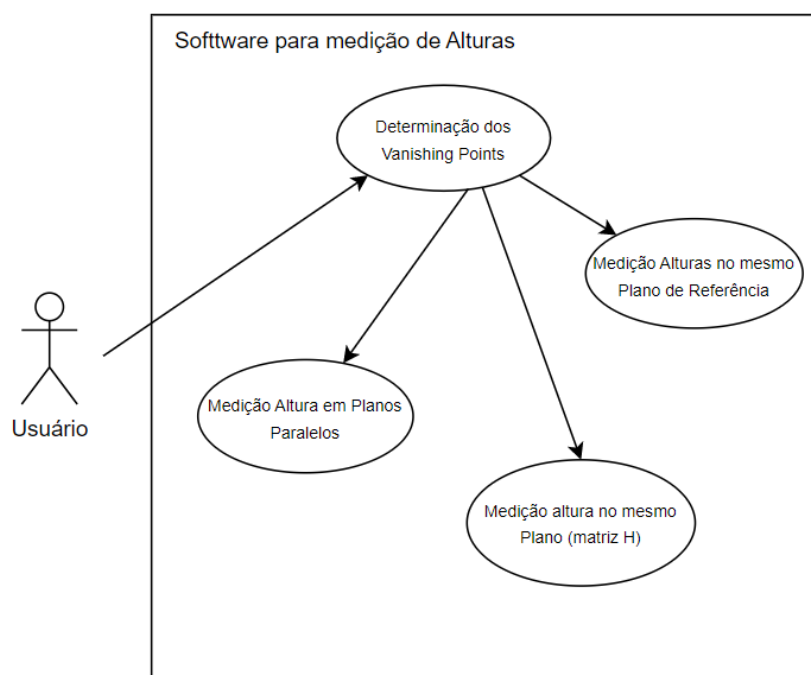
Algorithm 5

Selecione em um plano 4 ou mais pontos não colineares;
 Forneça as coordenadas 2D destes pontos no sistema de coordenadas do mundo real;
 Determine a matriz de homografia do plano pelo método descrito em 2.3.5;
 Repita os seguintes passos para efetuar as medidas no plano:
 Selecione dois pontos x_1 e x_2 no plano da imagem;
 Determine os pontos X_1 e X_2 no sistema de coordenada do mundo real;
 Calcule a distância entre X_1 e X_2 .

3.2 CASOS DE USOS

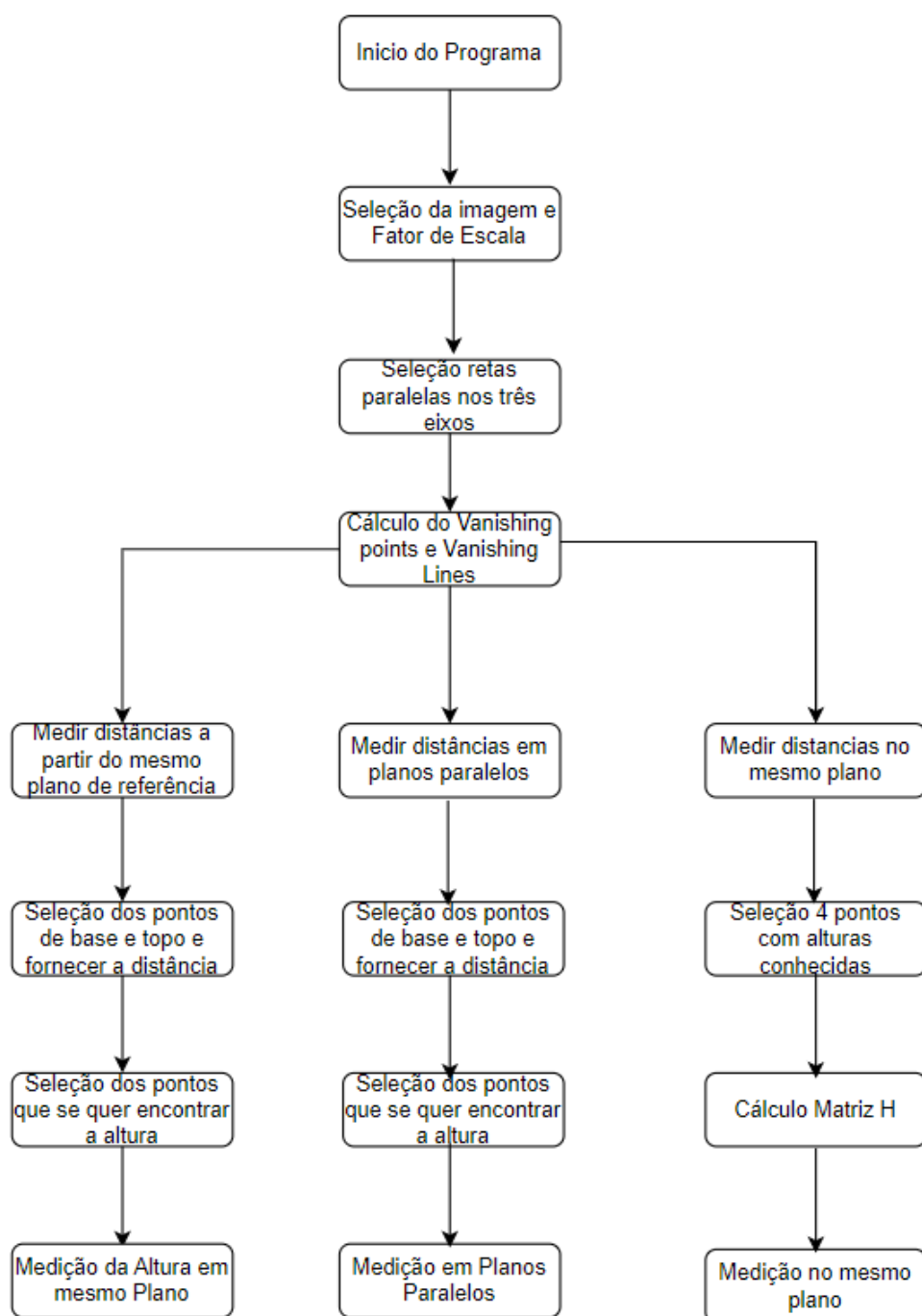
Visando uma melhor elaboração do *software*, foi determinado seus Casos de Usos para cada funcionalidade. Foram projetadas as três funcionalidades para medição após a determinação inicial dos pontos de fuga. Para isto, o operador deverá escolher está funcionalidade quando for apresentado o Menu e seguir o passo a passo indicado. A primeira função é a de medição de alturas a partir de um mesmo plano de referência. A segunda funcionalidade, é a de medição de distâncias entre planos paralelos. Caso o operador necessite trabalhar em um único plano, o deverá escolher a terceira modalidade. Esta elabora uma matriz, que possibilita o cálculo em qualquer direção no mesmo plano.

Figura 14 – Casos de Uso do Software.



Para a Máquina de Estados, foi construído um fluxograma, representando as funcionalidades do código de forma exemplificada.

Figura 15 – Máquina de Estados.



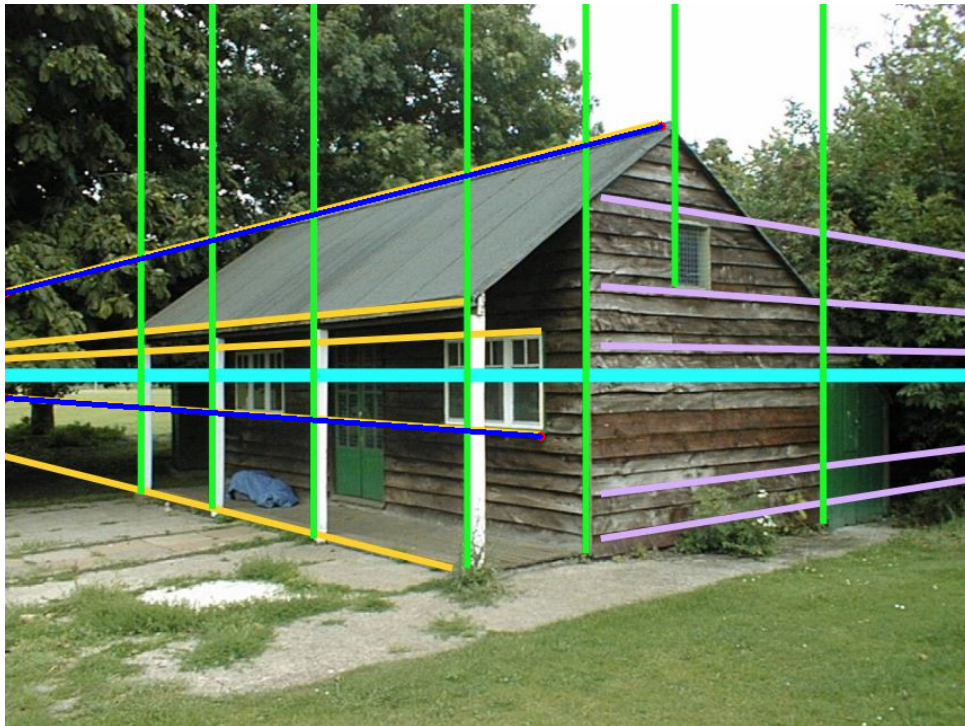
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada etapa do processo de medição, bem como a influência do operador do software na precisão das medidas e a relação entre a porcentagem de erro com o orçamento a ser passado para os clientes da Modú.

4.1 DETERMINAÇÃO DE *VANISHING POINTS*

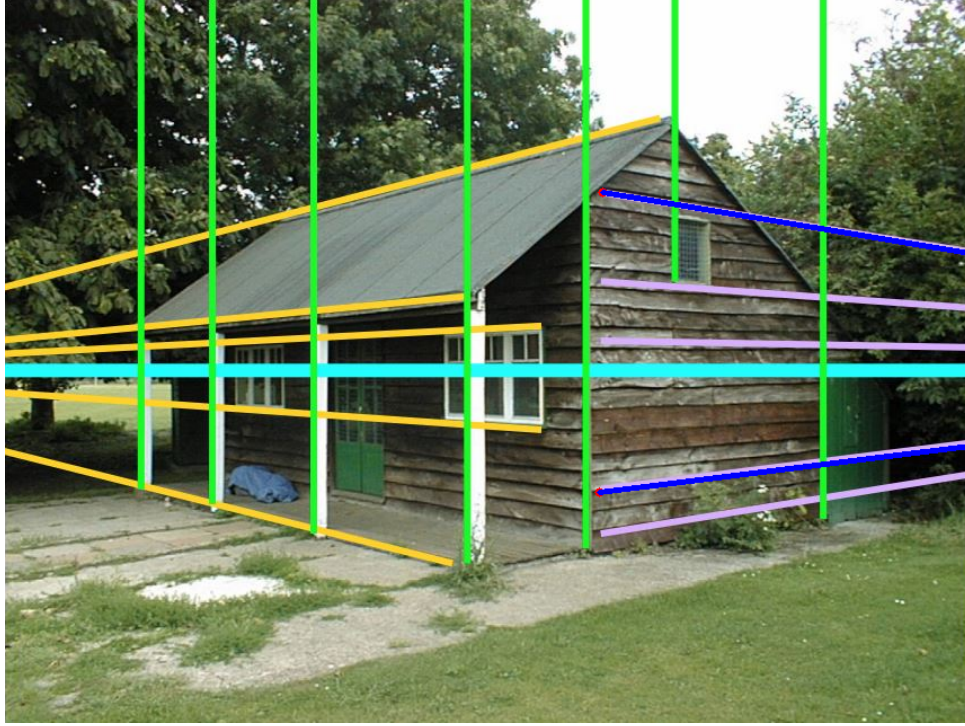
Para determinar os pontos de fuga em cada eixo, foram selecionados 2 pontos em cada segmento de retas paralelas e, calculando a equação das retas, pode-se chegar no ponto de intersecção, como visto no algoritmo 1. Como se pode observar nas figuras 16 e 17, foi utilizada uma imagem retirada de (SEITZ; HOIEM,) para o teste do código de pontos de fuga e o resultado obtido foi como o esperado, visto que os *vanishing points* nos dois planos estão fora da imagem.

Figura 16 – Ligação dos pontos, para chegar ao plano de fuga do plano



Para se encontrar a *vanishing line*, foram utilizadas retas traçadas na imagem em azul escuro, desta forma se determinou os pontos de fuga nos planos laterais da casa. Através do software, chegou-se a um ponto de fuga no pixel $(-424,52;496,11)$, tendo em vista que a imagem utilizada de 642×860 pixel, desta forma, nota-se que este ponto de fuga está à esquerda e fora da imagem.

Figura 17 – Ligação dos pontos, para chegar ao plano de fuga do plano



4.2 DETERMINAÇÃO DE *VANISHING LINE*

Através da figura 17, através do mesmo método, é encontrado o ponto o outro ponto de fuga do plano está situado no pixel (2171,35; 481,46), mostrando que o ponto de fuga está à direita da imagem. Com os pontos determinados nas figuras 16 e 17, foi traçada uma reta ligando estes 2 pontos, correspondente à reta de fuga. Analisando a figura 18, nota-se que o programa feito tem uma acurácia muito próxima da ideal. A linha azul corresponde à *vanishing line* correta e a linha em vermelho à calculada, que se encontra bem próxima da ideal, as divergências podem ter ocorrido por uma imprecisão do usuário ao utilizar ao escolher os pontos.

4.3 MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS A PARTIR DO MESMO PLANO DE REFERÊNCIA

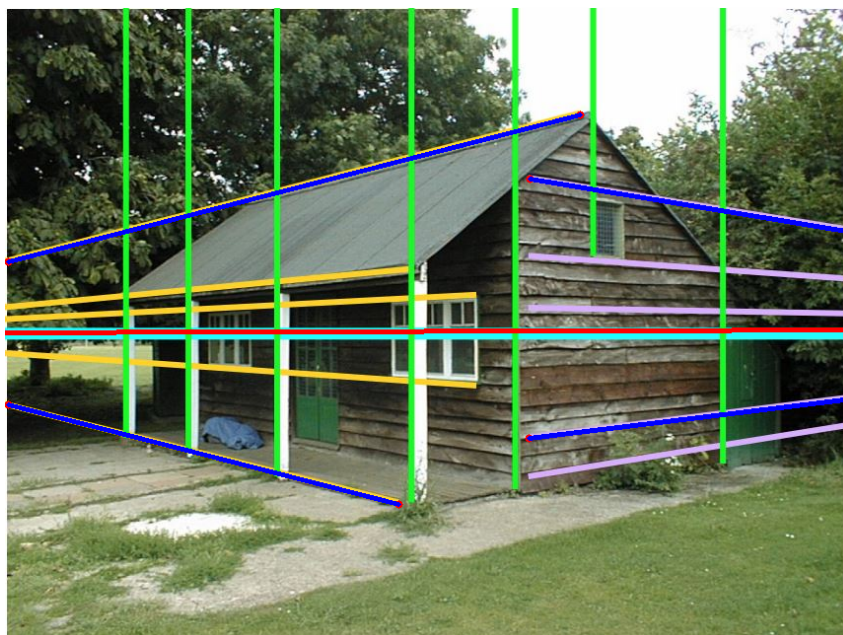
Para determinação da altura de um objeto, através de uma altura conhecida são utilizadas as seguintes equações.

$$\alpha = -\frac{||b_r \times t_r||}{Z_r(l \cdot b_r)||v \times t_r||} \quad (4.1)$$

$$Z_x = -\frac{||b_x \times t_x||}{\alpha(l \cdot b_x)||v \times t_x||} \quad (4.2)$$

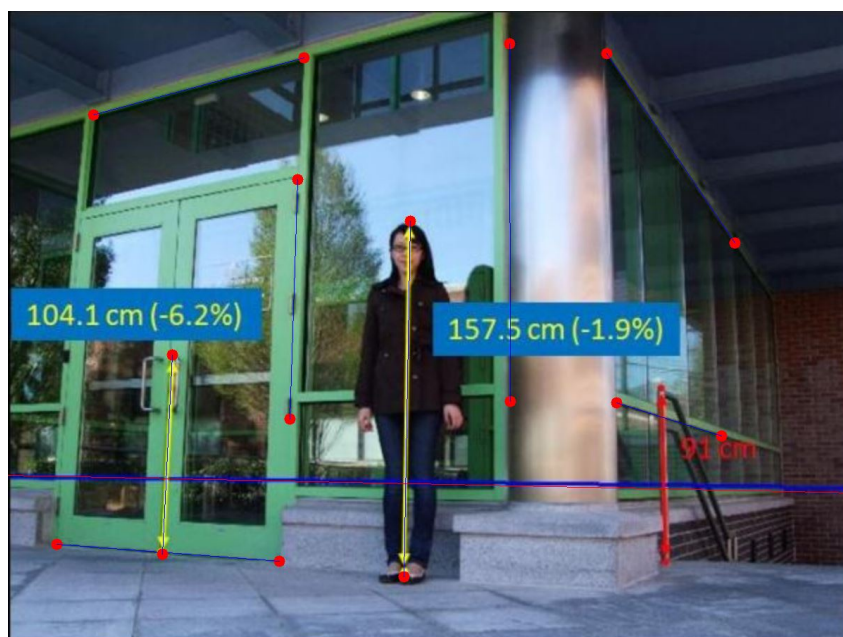
A partir de uma altura conhecida Z_r , pode-se encontrar o α , como descrito no Estado da Arte. Através do α calculado, utiliza-se a equação com outros dois pontos no mesmo plano, chegando assim na sua altura. Podemos ver na figura 19, retirada de (SUN, 2011) a determinação

Figura 18 – *Vanishing Line* da imagem



da altura da mulher, usando a altura da maçaneta. Pelo processo ser manual, há uma pequena variância em relação a altura desejada.

Figura 19 – Medição altura no mesmo plano de referência



Com o código utilizado se chegou a uma altura muito próxima a vida real, de 157.18 cm. Podemos ver na imagem que para este cálculo necessita-se de 16 pontos.

Para ter uma noção melhor da precisão das medidas, foram realizados outros testes em cenários diferentes, como observa-se nas figuras 20a e 20b.

Figura 20 – Determinação de altura no mesmo plano.



(a) Teste realizado na varanda.



(b) Teste realizado em uma bancada.

No caso da figura 20a, o resultado obtido para a altura representada pela reta vertical vermelha da direita foi de 94,7 cm, sendo que a medida real é de 90 cm (erro de 5,2%). Já para a figura 20b, o resultado obtido para a altura representada pela reta vertical vermelha da direita foi de 69,5 cm, sendo que a medida real é de 66 cm (erro de 5,3%).

4.4 MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS ENTRE PLANOS PARALELOS

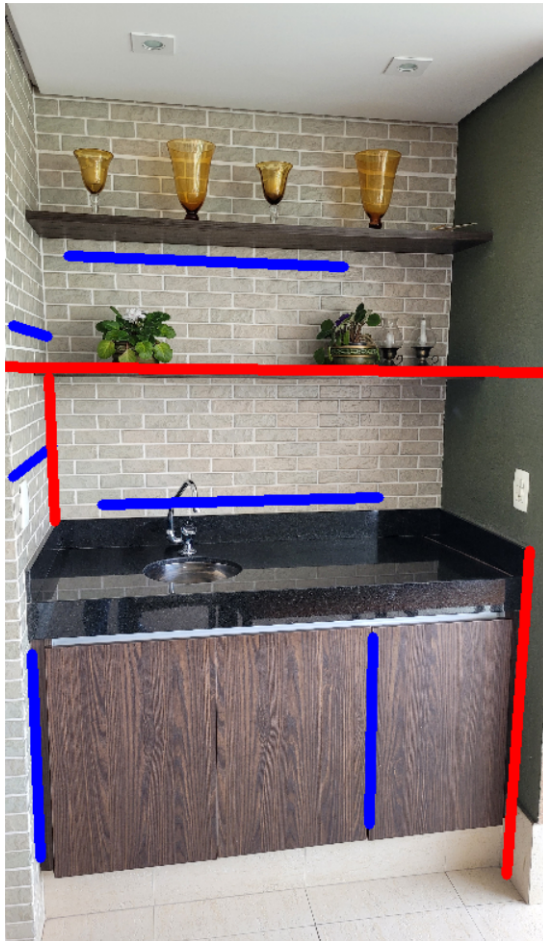
A medição em planos paralelos, segue uma metodologia muito parecida com a de mesmo plano. Através das seguintes equações podemos determinar as distâncias, através de uma distancia conhecida.

$$\rho' = \frac{p_4 \cdot x'}{1 + Z_r(p_3 \cdot p_4)} \quad (4.3)$$

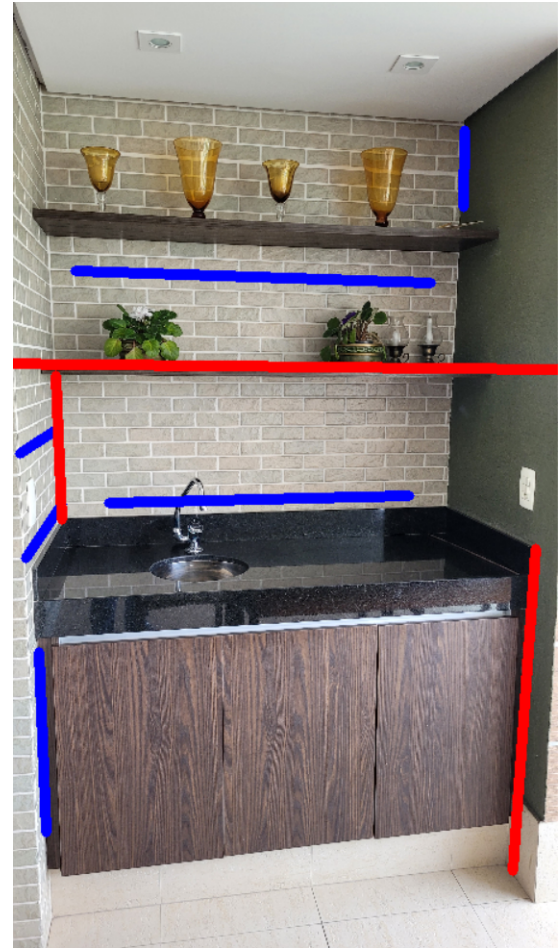
$$Z' = -\frac{||x' \times x''||}{\rho' ||p_3 \times x''||} \quad (4.4)$$

Para avaliar a precisão deste método, foram realizados alguns testes em diferentes cenários. No caso da figura 21a, o resultado obtido para a altura representada pela reta vertical vermelha da direita foi de 94,8 cm, sendo que a medida real é de 102 cm (erro de -7,1%). No caso da figura 21b, o resultado obtido para a altura representada pela reta vertical vermelha da esquerda foi de 52,3 cm, sendo que a medida real é de 48 cm (erro de 9%). Por fim, no caso da figura 22, o resultado obtido para a altura representada pela reta vertical vermelha da direita foi de 57,1 cm, sendo que a medida real é de 60 cm (erro de -4,8%).

Figura 21 – Determinação de altura em planos paralelos.



(a) Teste realizado na varanda, com a altura conhecida da bancada até a prateleira.



(b) Teste realizado na varanda, com a altura conhecida da bancada até o chão.

4.5 MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS NO MESMO PLANO

Como dito anteriormente, o cálculo das medidas em um mesmo plano se dá pela determinação da matriz de homografia (H) do plano em questão. Alguns testes foram realizados

Figura 22 – Teste realizado em um armário.



para testar a precisão deste método. Na Figura 23, pode-se notar os 4 pontos selecionados nas extremidades de uma folha A4 posicionada na parede, com distâncias entre si conhecidas e as retas das medidas que foram tomadas.

Analisando os resultados, observa-se que as medidas das linhas mais próximas da folha tiveram erros menores (-1,17% e -1,46%), enquanto as linhas mais distantes apresentaram erros maiores (-6,25%, 6,4% e 10%). Uma hipótese para essa diferença é o fato da folha ser pequena e comparação ao plano em questão, não possibilitando uma melhor correção da perspectiva da foto. Apesar disso, é uma solução de simples aplicação quando não se possui uma trena para efetuar a medição mecanicamente.

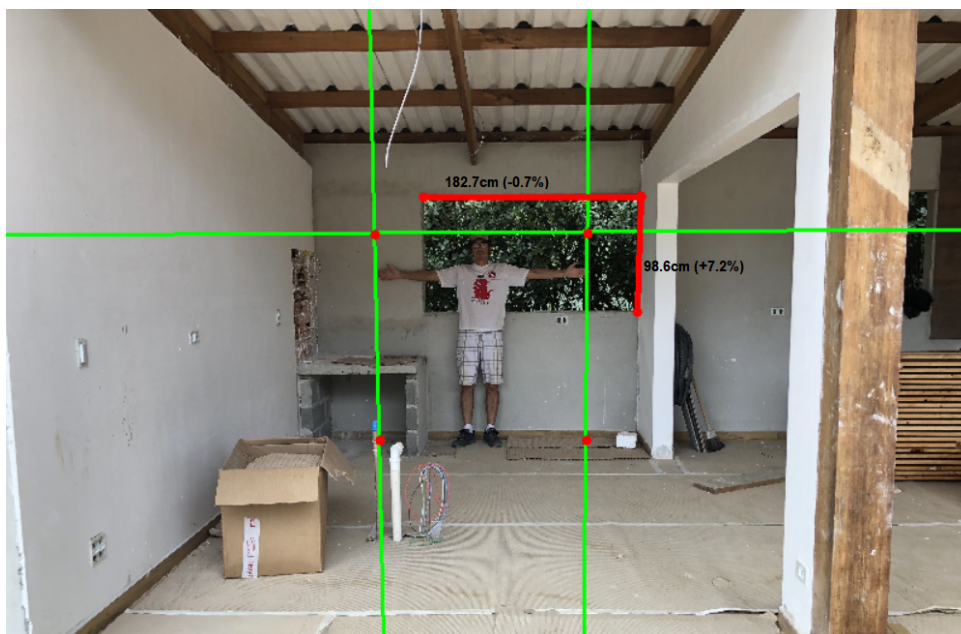
Figura 23 – Teste realizado na varanda, com as dimensões conhecidas de uma folha A4.



Uma outra solução que pode ser adotada é a representada na Figura 24, onde assumiu-se que a envergadura de uma pessoa equivale, em média, à altura dela. Neste caso, as retas verdes, que ligam o ponto selecionado aos *vanishing points*, foram traçadas para auxiliar na seleção dos 4 pontos de modo que fosse formado um quadrado, a fim de facilitar a definição das coordenadas do plano no mundo real.

Enquanto os outros dois métodos possibilitam a medição em diferentes planos, o cálculo da matriz de homografia de um plano tem a vantagem de permitir trabalhar livremente no plano em questão, sendo possível a medição em qualquer direção.

Figura 24 – Teste realizado em uma obra, com as dimensões conhecidas de altura e envergadura de um homem.



4.6 INFLUÊNCIA DO USUÁRIO NAS MEDIÇÕES E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Como grande parte do processo de medição depende da seleção manual dos pontos, foram realizados alguns testes para avaliar a influência do operador na precisão das medidas. Para isso, foi utilizada a foto da Figura 23 e estimou-se a altura da pia até a segunda prateleira, usando como referência as dimensões da folha A4. Além disso, analisando as tabelas geradas, pode-se comparar o desempenho de cada método para a situação considerada.

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos com o método de medição de distâncias a partir de um plano de referência. Para o caso em questão, este método obteve erros relativamente baixos, com pequena variação devido ao usuário. O desvio padrão de 1% foi bastante satisfatório.

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos com o método de medição de distâncias entre planos paralelos. Para o caso em questão, este método obteve erros e variação entre usuários um pouco maiores que o método anterior, mas ainda com um margem de erro (5,3%) e desvio padrão (1,8%) bastante satisfatórios.

Figura 25 – Resultados para imagem padrão

Mesmo Plano de Referência				
Usuário	Medida (cm)	Real (cm)	Erro	Desvio (cm)
1	92,2	90	2,5%	-2,2
2	93,6	90	4,0%	-3,6
3	92,6	90	2,9%	-2,6
4	94,1	90	4,6%	-4,1
5	94,7	90	5,3%	-4,7
Média	93,4	90	3,8%	-3,4
Des. Padrão	0,9	-	1,0%	-

Figura 26 – Resultados para imagem padrão

Mesmo Planos Paralelos				
Usuário	Medida (cm)	Real (cm)	Erro	Desvio (cm)
1	94,9	90	5,41%	-4,9
2	96,1	90	6,73%	-6,1
3	96,4	90	7,16%	-6,4
4	94,7	90	5,27%	-4,7
5	91,7	90	1,92%	-1,7
Média	94,8	90	5,3%	-4,8
Des. Padrão	1,7	-	1,8%	-

A Figura 27 apresenta os resultados obtidos com o método de medição em um único plano, com a determinação da matriz de homografia. Assim como o segundo método, este também obteve erros e variação entre usuários um pouco maiores em relação ao primeiro, mas ainda com um margem de erro (5,5%) e desvio padrão (4,5%) bastante satisfatórios.

A princípio, ao analisar esses dados, é possível dizer que o método de medição de distâncias a partir de um plano de referência apresentou o melhor desempenho, seguido do método de medição de distâncias entre planos paralelos e do método de medição em um único plano. Entretanto, estes resultados são de apenas um cenário, fazendo-se necessário mais testes como esse para determinar qual método é melhor para cada situação.

4.7 RELAÇÃO ENTRE ERRO NA MEDIÇÃO E O ORÇAMENTO DO MÓVEL

De acordo com os resultados apresentados neste capítulo, se a seleção dos pontos for feita com atenção, a porcentagem de erro pode variar de $\pm 1\%$ até $\pm 10\%$, sendo a média em torno de $\pm 5\%$ e o desvio padrão em torno de $\pm 2,5\%$. Apesar da existência de alguns *outliers*,

Figura 27 – Resultados para imagem padrão

Matriz H				
Usuário	Medida (cm)	Real (cm)	Erro	Desvio (cm)
1	96,8	90	7,5%	-6,8
2	97,0	90	7,5%	-7,0
3	94,6	90	5,2%	-4,6
4	99,2	90	10,2%	-9,2
5	87,4	90	-2,8%	2,6
Média	95,0	90	5,5%	-5,0
Des. Padrão	4,0	-	4,5%	-

deve-se avaliar qual a relevância destes para o objetivo principal deste *software*, ou seja, o quanto ele influencia no orçamento a ser enviado para os clientes da Modú.

Segundo representantes da empresa, a porcentagem gasta com os materiais dos móveis equivale a 30% do valor do orçamento e, se for considerado um erro médio de $\pm 5\%$ nas medidas, a porcentagem de erro no orçamento final será de aproximadamente $\pm 3\%$. Já se for considerado um erro de $\pm 10\%$ nas medidas, o erro no orçamento será de aproximadamente $\pm 6,3\%$.

Dado isso, pode-se dizer que o resultado obtido com o programa desenvolvido é bastante satisfatório, possibilitando, inclusive, que a empresa trabalhe já sabendo das margens de erro que podem ser consideradas na hora de apresentar o orçamento para o cliente.

5 CONCLUSÃO

Como apresentado neste relatório, todos os métodos de medição tiveram uma precisão relativamente alta e satisfatória para os objetivos propostos. Com isso, espera-se que com o programa desenvolvido a empresa possa cortar gastos de deslocamento durante a fase de orçamento, além de fornecer valores mais próximos dos reais.

Destaca-se, ainda, a importância do ângulo e da resolução da fotografia, uma vez que é necessária a presença de ao menos dois segmentos de retas paralelas em cada eixo do sistema de coordenada 3D para a definição dos pontos de fuga. Ademais, é importante ressaltar que para uma maior precisão nas medidas, sejam tomados como referências grandes segmentos de retas, como nos casos da altura e envergadura de uma pessoa ou uma geladeira. Quando tomados pequenos segmentos de retas como medidas de referência e/ou que se desejam estimar a dimensão, a tendência é de que o erro na medida seja maior que a média, já que um erro humano na seleção dos pontos de referência tem um peso percentual maior do que em linhas maiores. Sendo assim, recomenda-se que, nesses casos, já sejam consideradas margens mais elevadas.

Portanto, conclui-se que o programa desenvolvido será de grande utilidade para a empresa Modú, podendo ser disponibilizado para outras empresas do setor. Além disso, como dito em algumas referências para este trabalho, os métodos apresentados podem ser aplicados em outras áreas, por exemplo na investigação forense, para determinar a altura de um suspeito.

Para futuros trabalhos, seria interessante implementar uma detecção automática de segmentos de retas para o cálculo dos pontos de fuga. Além disso, a estereoscopia poderá ser empregada a fim de garantir uma reconstrução 3D de ambientes com mais detalhes e, possivelmente, permitir integração com o configurador de móveis já utilizado e visualização do móvel planejado já no ambiente a ser instalado.

REFERÊNCIAS

- CHIEN, S.-y. Camera models. p. 255–277, 2021.
- CRIMINISI, A. **Accurate Visual Metrology from Single and Multiple Uncalibrated Images**. [S.l.: s.n.], 2001.
- _____. Single-View Metrology : Algorithms and Applications. 2002.
- CRIMINISI, A.; REID, I.; ZISSERMAN, A. Single view metrology. **International Journal of Computer Vision**, v. 40, n. 2, p. 123–148, 2000. ISSN 09205691.
- FARIAS, T. S. M. C. de. Metodologia para Reconstrução 3D Baseada em Imagens. p. 175, 2012. Disponível em: <https://www.gprt.ufpe.br/grvm/wp-content/uploads/Publication/Thesis/Farias{_}TeseDoutorado{_}20>.
- FIDLER, S.; URTASUN, R. CVPR 2015 Tutorial - 3D Indoor Scene Understanding. **European Conference on Computer Vision (ECCV)**, v. 1, p. 299–313, 2015.
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision, Second Edition**. [S.l.: s.n.], 2000. ISBN 9780521540513.
- KITANI, K. 11_1_Camera Matrix.
- LAGE, P. Análise da qualidade e aplicabilidade das técnicas de reconstrução 3D baseadas em imagens. 2022.
- LAURAS, G. AUTOMAÇÃO DE PROCESSO DE DIGITALIZAÇÃO FOTOGRAFÉTRICA PARA MEDIÇÃO MECÂNICA NÃO-DESTRUTIVA DE AMOSTRAS PEQUENAS. 2020.
- MARRO, A. A. Modelo para Reconstrução 3D de Cenas baseado em Imagens. **Repositório UFRN**, v. 1, p. 1–51, 2014.
- MASSON, J. Desenvolvimento de um algoritmo para a reconstrução 3D a partir de imagens RGB. 2018.
- SEITZ, S.; HOIEM, D. Single-view metrology.
- SHU, K. **Computer Vision Project**. Disponível em: <https://www.cc.gatech.edu/classes/AY2016/cs4476{_}fall/results/proj3/html/kshu6/index.h>.
- SUN, S.-y. An Implementation of Single-View Metrology. 2011.