



**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE
POSIÇÃO DE OBJETOS NO ESPAÇO A
PARTIR DE IMAGENS DE MÚLTIPLAS
CÂMERAS**

MATHEUS JOSÉ DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE POSIÇÃO
DE OBJETOS NO ESPAÇO A PARTIR DE IMAGENS DE
MÚLTIPLAS CÂMERAS**

MATHEUS JOSÉ DE CARVALHO

ORIENTADOR: MARIO BENJAMIM BAPTISTA DE SIQUEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

BRASÍLIA/DF, 12/07/2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE POSIÇÃO DE
OBJETOS NO ESPAÇO A PARTIR DE IMAGENS DE MÚLTIPLAS
CÂMERAS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

Prof. Mario Benjamim Baptista de Siqueira, Prof. Dr. (UnB)
(Orientador)

Prof. Enes Gonçalves Marra, Prof. Dr. (UFG)
(Examinador Externo)

Prof. Rafael Castilho Faria Mendes, Prof. Dr. (UnB)
(Examinador Externo ao Programa)

BRASÍLIA/DF, 12/07/2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE CARVALHO, MATHEUS JOSÉ

Metodologia para Determinação de Posição de Objetos no Espaço a Partir de Imagens de Múltiplas Câmeras.

112p., 210x297 mm (PPGCM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, 2023.

1. Altura de nuvem.
2. Visão Computacional Estéreo
3. Câmera Olho de Peixe
4. Precisão Solar Intra-Hora.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE CARVALHO, M. J. (2023). Metodologia para Determinação de Posição de Objetos no Espaço a Partir de Imagens de Múltiplas Câmeras. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: MATHEUS JOSÉ DE CARVALHO

TÍTULO: METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE POSIÇÃO DE OBJETOS NO ESPAÇO A PARTIR DE IMAGENS DE MÚLTIPLAS CÂMERAS.

GRAU: MESTRE ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

MATHEUS JOSÉ DE CARVALHO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus e Nossa Senhora pela presença em minha vida durante toda essa jornada, me concedendo paz, saúde e orientação divina.

Ao meu estimado orientador, Professor Mario Benjamim Baptista de Siqueira, expresso minha mais profunda gratidão pelo apoio, orientação, resiliência e sabedoria que compartilhou comigo ao longo deste processo. Sou imensamente grato pela oportunidade de trabalhar em conjunto e reconheço a importância do seu apoio para o sucesso deste trabalho.

Ao apoio de toda a minha família, especialmente dos meus pais Antônio e Rachel, pelo amor, carinho, encorajamento, direcionamento e sempre estarem de mãos dadas comigo durante todo esse processo.

À Mikaelly Lobo, a pessoa que esteve o mais próximo de mim, compartilhando dos meus desafios, dificuldades, emoções, abdicando de seus momentos de lazer e descanso para estar comigo batalhando por um sonho meu. Obrigado por acreditar mais em mim do que eu mesmo.

Agradeço à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, aos membros do corpo docente e integrantes do Laboratório de Energia e Ambiente, por seus valiosos ensinamentos e pelos insights que me ajudaram a expandir meus horizontes acadêmicos. Reconheço a relevância de suas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de reconhecer o apoio financeiro concedido pela CAPES, que por meio do programa de incentivo às pesquisas de Pós-graduação, me apoiou financeiramente para o desenvolvimento deste trabalho.

À FAP-DF, que através do programa de incentivo a projetos de pesquisa científica, tecnológica e inovação apoia financeiramente o projeto número 00193.0000226/2019-72.

Aos meus colegas do programa de pós-graduação e amigos, quero expressar minha gratidão pelo apoio mútuo, pelas discussões estimulantes e pelo incentivo ao longo dessa jornada acadêmica, especialmente ao Jackson Costa por ter se empenhado em pilotar o drone e capturar as fotos aéreas utilizadas neste trabalho e principalmente ao

Dario Fantini, por ter sido meu mentor fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Sou grato pela presença de vocês e pelo compartilhamento de experiências durante esse período.

A todos os mencionados, aos colegas de trabalho e àqueles que, porventura, tenham sido esquecidos nesta lista, meu mais sincero reconhecimento e gratidão. Este trabalho não teria sido possível sem a contribuição de cada um de vocês.

Embora a jornada tenha sido desafiadora, tanto emocionalmente quanto academicamente, estou profundamente grato por ter superado as dificuldades e chegado ao fim deste mestrado. Além disso, é com imensa satisfação que expresso minha gratidão por ter a oportunidade de realizar meu sonho particular de fazer mestrado na Universidade de Brasília. Desde o início, essa instituição foi um local de inspiração e referência para mim, e estar no programa de mestrado nesta universidade foi verdadeiramente um privilégio. Sou grato por todos os recursos acadêmicos, orientação e ambiente intelectual que a Universidade de Brasília proporcionou durante o meu período de estudos.

Por fim, gostaria de expressar minha esperança de que este trabalho de dissertação possa contribuir para a área de estudo e para a comunidade acadêmica. Que este momento de conclusão seja o início de muitas realizações e sucessos em nossas vidas acadêmicas e profissionais.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais e à Mikaelly Lobo.

RESUMO

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE POSIÇÃO DE OBJETOS NO ESPAÇO A PARTIR DE IMAGENS DE MÚLTIPLAS CÂMERAS

Autor: Matheus José de Carvalho

Orientador: Mario Benjamim Baptista de Siqueira

Departamento de Engenharia Mecânica

Brasília, 12/07/2023.

A dinâmica de nuvens é relevante para diversas áreas como, por exemplo, meteorologia, agricultura e operação de aeroportos, dentre outras. Em particular, para previsão solar de curto prazo, importante para gerenciamento de usinas solares e de redes de distribuição com elevada participação de energia solar, a caracterização mais precisa do movimento de nuvens pode melhorar previsão de geração, pois a presença delas é a maior responsável pela variabilidade da irradiância em escalas de tempo intra-diárias. Assim, neste trabalho, é proposto uma metodologia que utiliza triangulação de imagens de duas câmeras com lentes olho de peixe para medir a posição de objetos no espaço, visando sua utilização em plataformas de previsão solar de curto prazo baseados em imagens do céu. Um sistema de duas câmeras, juntamente com um roteador sem fio, foi instalado na laje do Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília. A metodologia desenvolvida é baseada em um modelo de visão estéreo, usado para processar as imagens e determinar a localização de objetos visíveis nas imagens. O modelo proposto para processamento das imagens não requer a remoção de distorção da imagem afim de modificá-las para imagens planificadas, normalmente utilizado em câmeras com lente olho de peixe, nem a retificação das imagens originais, sendo essas as principais contribuições em comparação com outros modelos existentes. Para a validação do modelo, utilizou-se um drone para servir de objeto com posição conhecida. Para tal, o drone, em voo noturno estacionário, foi posicionado em vários pontos e altitudes desejadas e, com sua luz inferior acesa, capturou-se imagens do céu com as câmeras. Verificou-se então as coordenadas do drone nas imagens obtidas pelo modelo e comparou-se com as relatadas pelo drone. Os resultados mostraram um erro médio percentual em torno de 10% (em relação ao valor relatado pelo drone) em altitudes de 90

até 490 metros. Esses valores são aceitáveis para aplicação desejada, com incertezas de medição comparáveis com a altura de nuvens obtidas por ceilômetros, com a vantagem de possibilitar um campo de visão amplo, e com custos computacionais menores do que modelos tradicionais.

Palavras-chave: Altura de nuvem, Visão Computacional Estéreo, Câmera Olho de Peixe, Previsão Solar Intra-Hora.

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR OBJECT-POSITION DETERMINATION IN SPACE FROM MULTIPLECAMERAS IMAGE

Author: Matheus José de Carvalho

Advisor: Mario Benjamim Baptista de Siqueira

Mechanical Engineering Department

Brasília, 12/07/2023.

Cloud dynamics is relevant for several areas, such as meteorology, agriculture, and airport operation, among others. In particular, for short-term solar forecasting, important for the management of solar power plants and distribution networks with high participation of solar energy, a more accurate characterization of cloud motion can improve generation forecasting as their presence is the major responsible for the variability of irradiance on intra-day time scales. Thus, in this paper, a methodology is proposed that uses triangulation of images from two fisheye-lens cameras to measure the position of objects in space, aiming at its use in short term solar forecast platforms based on sky images. A two-camera system, together with a wireless router, was installed on the roof of the Energy and Environment Laboratory of the University of Brasilia. The methodology developed is based on a stereo vision model, used to process the images and determine the location of visible objects in the images. The proposed model for image processing does not require the removal of image distortion in order to modify them into planar images, normally used in fisheye cameras, nor the rectification of the original images, being these the main contributions compared to other existing models. For the validation of the model, a drone was used as an object with known position. For this, the drone, in stationary night flight, was positioned at various points and altitudes desired and, with its lower light on, images of the sky were captured with the cameras. The coordinates of the drone in the images obtained by the model were then verified and compared with those reported by the drone. The results showed an average percentage error around 10% (relative to the value reported by the drone) at altitudes ranging from 90 to 490 meters. These values are acceptable for the desired application, with

measurement uncertainties comparable to cloud height obtained by ceilometers, with the advantage of enabling a wide field of view, and with lower computational costs than traditional models.

Keywords: Cloud height, Computational Stereo Vision, Fisheye Camera, Intra-Hour Solar Forecasting.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 OBJETIVO GERAL	3
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA – MÉTODOS DE PREVISÃO SOLAR INTRA-HORA.....	6
2.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA - MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DA ALTURA DA BASE DE NUVEM UTILIZANDO CÂMERAS.....	12
2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MÉTODOS DE PREVISÃO SOLAR INTRA-HORA.....	17
2.3.1 MÉTODO DE PERSISTÊNCIA E PERSISTÊNCIA INTELIGENTE ...	18
2.3.2 MÉTODO DE SENSORIAMENTO LOCAL	19
2.3.3 MÉTODOS COM REDES NEURAS ARTIFICIAIS E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	21
2.3.4 MÉTODOS HÍBRIDOS.....	22
2.3.5 TRABALHOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL.....	23
2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DA ALTURA DA BASE DE NUVEM UTILIZANDO CÂMERAS.....	24
2.5 Síntese da Revisão da Literatura	27
3. REFERENCIAL TEÓRICO	29
3.1 FORMAÇÃO DA IMAGEM.....	30

3.2	TRANSFORMAÇÃO DE CÂMERA.....	32
3.2.1	TRANSFORMAÇÃO DO SCM PARA O SCC.....	34
3.2.2	TRANSFORMAÇÃO DE SCC PARA SCI.....	35
3.2.3	TRANSFORMAÇÃO DO SCI PARA SCP.....	36
3.2.4	TRANSFORMAÇÃO DO SCM PARA SCP.....	37
3.2.5	DISTORÇÃO DAS LENTES.....	38
3.3	PROPRIEDADE DO PONTO DE VISTA EFETIVO ÚNICO E CÂMERAS OMNIDIRECIONAIS.....	40
3.3.1	A PROPRIEDADE DO PONTO DE VISTA EFETIVO ÚNICO.....	40
3.3.2	GEOMETRIA DAS CÂMERAS OMNIDIRECIONAIS CENTRAIS....	41
3.4	GEOMETRIA EIPOLAR.....	44
3.5	RETIFICAÇÃO DE IMAGENS.....	47
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS.....	51
4.2	MODELO DE VISÃO ESTÉREO COM CÂMERAS OLHO DE PEIXE	54
4.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	61
4.4	PRINCIPAIS INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	63
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	83
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Os 10 artigos com maior número de citações e seus respectivos autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.	8
Tabela 2: Registro de quantidade de artigos por revista sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.	10
Tabela 3: Os 5 artigos mais vezes citados e seus respectivos autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.	14
Tabela 4: Registro de quantidade de artigos por revista sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.	15
Tabela 5: Especificações das câmeras.	63
Tabela 6: Coeficientes para função polinomial de aproximação para a câmera 1 e câmera 2.	69
Tabela 7: Posicionamentos do drone.	73
Tabela 8: Medições obtidas com visão estéreo com câmaras olho de peixe – Referência câmera 1.	75
Tabela 9: Medições obtidas com visão estéreo com câmaras olho de peixe – Referência câmera 2.	75
Tabela 10: Métricas globais considerando as 20 posições do drone.	78
Tabela 11: Métricas globais considerando as 20 posições do drone após correção.	80
Tabela 12: Posicionamento do drone.	81
Tabela 13: Métricas globais considerando as 10 posições do drone.	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contagem de registros publicados dos principais autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.	6
Figura 2: Registro de publicações por países sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.	9
Figura 3: Gráfico de quantidade de publicações de 2012 a 2023 sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.	9
Figura 4: Conexões entre os 236 autores dos artigos pesquisados sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.	11
Figura 5: Maior conexão dentre os artigos pesquisados sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora. São ao todo 31 autores.....	11
Figura 6: Gráfico de quantidade de publicações de 1996 a 2023 sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.....	12
Figura 7: Contagem de registros publicados dos principais autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.	13
Figura 8: Registro de publicações por países sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras. Fonte: Elaborado pelo autor.....	15
Figura 9: Conexões entre os 34 autores dos artigos pesquisados sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.....	16
Figura 10: Maior conexão dentre os artigos pesquisados sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.....	17
Figura 11: Um exemplo de um TSI.	19
Figura 12: Elementos básicos de uma câmera.	30
Figura 13: Câmera Pinhole.....	31
Figura 14: Câmera com abertura maior que um <i>pinhole</i> e sem lente.....	31

Figura 15: Exemplo de controle de convergência dos raios com a utilização de lente fina.	32
Figura 16: Sistemas de coordenadas em conjunto.....	34
Figura 17: Deformação no desalinhamento entre as linhas e colunas da matriz do sensor de formação da imagem.....	36
Figura 18: Distorção radial.....	39
Figura 19: Exemplo de câmera perspectiva <i>pinhole</i> onde satisfaz a propriedade para um sistema de projeção central.....	41
Figura 20: Câmera Onmidirecional não central.	42
Figura 21: Câmera omnidirecional com lente fina e espelho hiperbólico.....	42
Figura 22: Câmera com espelho parabólico e lente ortográfica.	43
Figura 23: Comportamento dos feixes de luz na câmera com lente olho de peixe.	44
Figura 24: Geometria epipolar.....	45
Figura 25: Geometria epipolar definida por um ponto no espaço.	45
Figura 26: Linhas epipolares e pontos correspondentes.....	46
Figura 27: Imagens estéreo sem retificar (acima) e imagens após retificação (abaixo). Fonte: Szeliski (2022), modificado pelo autor.	48
Figura 28: Modelo da lente olho de peixe.	51
Figura 29: Interface <i>Ocam_Calib</i> toolbox.....	52
Figura 30: Imagem com os vértices identificados (eixos em pixel).....	52
Figura 31: Fotos do tabuleiro em diferentes posições.	53
Figura 32: Variação da distância focal [pixel] em função do raio [pixel] (Acima). Variação do raio óptico [°] em função do raio [pixel] (Abaixo).	54
Figura 33: Sistema estéreo com câmeras olho de peixe.	57
Figura 34: Sistema estéreo olho de peixe com raios não coplanares.....	58
Figura 35: Posicionamento das câmeras no telhado do LEA.	61

Figura 36: Sobreposição das imagens desalinhadas.....	62
Figura 37: Sistema de alinhamento e nivelamento das câmeras.	64
Figura 38: Antenas direcionais instaladas no tripé sob as câmeras. Do lado esquerdo antena instalada no tripé da câmera 1 e do lado direito, na câmera 2.	65
Figura 39: Switch Ethernet instalado no quadro de equipamentos elétricos/eletrônicos do tripé da câmera 1, por estar mais próximo de um ponto de alimentação de energia.	65
Figura 40: Telêmetro Laser utilizado na montagem do equipamento.	66
Figura 41: Aferição da medida do espaçamento das câmeras.	66
Figura 42: Nivelamento das câmeras.....	67
Figura 43: Drone DJI Mavic Air 2, utilizado no projeto.	68
Figura 44: Variação da distância focal em função do raio (Acima). Variação do raio óptico em função do raio (Abaixo).....	70
Figura 45: imagem com os vértices obtidos (+ vermelho) e reprojctados (o vermelho).	71
Figura 46: Sobreposição das imagens após a rotação da imagem.	71
Figura 47: Alinhamento das câmeras utilizando a Lua como ponto de referência.....	72
Figura 48: Posicionamento do drone sobre o plano horizontal a 500 m de altura.	74
Figura 49: Sequência de fotos a 490m (magenta), 390m (amarelo), 290m (azul) e a 190m (vermelho).	76
Figura 50: Alturas medidas - Câmera 1 (esquerda), Câmera 2 (direita).....	77
Figura 51: Erro percentual de cada medição.	77
Figura 52: Alturas medidas após método de correção proposto - Câmera 1 (esquerda), Câmera 2 (direita).....	79
Figura 53: Erro percentual de cada medição após método de correção proposto.	80
Figura 54: Sequência de fotos a 90m (magenta) e 490m (amarelo).....	81
Figura 55: Alturas medidas - Câmera 1 (esquerda), Câmera 2 (direita).....	82

Figura 56: Erro percentual de cada medição após ajuste físico..... 82

LISTA DE ABREVIACÕES

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
API	Application Programming Interface
CBH	Cloud Base Height
CNN	Convolutional Neural Network
ELM	Extreme Learning Machine
GA	Genetic Algorithm
GCSE	Geometric Cloud Shadow Edge
GHI	Global Horizontal Irradiance
GPS	Global Positioning System
IA	Inteligência Artificial
IEA	International Energy Agency
IND	Irradiação Normal Direta
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LEA	Laboratório De Energia e Ambiente - Unb
LSTM	Long Short-Term Memory
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MSE	Mean Square Error
NREL	National Renewable Energy Laboratory
nRMSE	normalized Root Mean Square Error
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PSO	Particle Swarm Optimization
REMQP	Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual
RMSE	Root Mean Square Error
RNA	Redes Neurais Artificiais
RNN	Recurrent Neural Network
SCC	Sistema de Coordenadas da Câmera
SCI	Sistema de Coordenadas da Imagem
SCM	Sistema de Coordenadas do Mundo
SCP	Sistema de Coordenadas em Pixels
SODA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
SPA	Solar Position Algorithm
SVD	Singular Value Decomposition
TSC	Correlação de Séries Temporais
TSI	Total Sky Imager
UCSD	University of California, San Diego
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UnB	Universidade de Brasília
WLAN	Wireless Local Area Network

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

P	Ponto de coordenadas do ponto do objeto externo
p	Ponto de coordenadas na câmera
O	Centro da Lente
Z	Distância entre P_w e onde o feixe de luz incide no eixo óptico
f	Distância focal
z	Distância entre p e onde o feixe de luz incide no eixo óptico
P_w	Ponto da posição no sistema de coordenada do mundo
X_w	Coordenada no eixo x do ponto P_w no SCM
Y_w	Coordenada no eixo y do ponto P_w no SCM
Z_w	Coordenada no eixo z do ponto P_w no SCM
X_c	Coordenada no eixo x do ponto P_w no SCC
Y_c	Coordenada no eixo y do ponto P_w no SCC
Z_c	Coordenada no eixo z do ponto P_w no SCC
x_{cd}	Coordenada no eixo x do ponto P_w no SCI
y_{cd}	Coordenada no eixo y do ponto P_w no SCI
P_c	Ponto da posição no SCC
x_i	Coordenada no eixo x do ponto P_w no SCP
y_i	Coordenada no eixo y do ponto P_w no SCP
R	Matriz de Rotação
T	Vetor de Translação
p_i	Ponto projetado no plano de imagem em câmera pinhole
p_d	Ponto projetado no plano de imagem com câmera com lente
D	Distorção
d_x	Distorção no eixo x
d_y	Distorção no eixo y
s_x	Número de pixels por unidade de comprimento no eixo x
s_y	Número de pixels por unidade de comprimento no eixo y
τ	Tangente do ângulo formado pela deformação da matriz de pixels entre a perpendicular das linhas com as colunas
o_x	Coordenadas da projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção no eixo x
o_y	Coordenadas da projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção no eixo y
M_{int}	Matriz de parâmetros intrínsecos
E	Matriz essencial
P_1	Vetor 1 do plano epipolar
P_2	Vetor 2 do plano epipolar
F	Matriz fundamental
M_1	Matriz dos parâmetros intrínsecos da câmera 1

M_2	Matriz dos parâmetros intrínsecos da câmera 2
λ	Fator de escala que permite mapear os pontos sobre a reta definida pelo vetor P_w
\square^T	Transposto
R_{rect}	Matriz de transformação

1. INTRODUÇÃO

A alvorada da transição energética entre os de elevada emissão e não renováveis, para métodos que favorecem mais o ambiente já se iniciou. Devido à crescente demanda mundial por energia elétrica, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e a preocupação com o ambiente, originou essa busca por outros meios de geração, estipulando metas, criando incentivos, novas práticas, e até mesmo iniciativas de uso consciente e econômico de combustíveis fósseis (ABUELLA; CHOWDHURY, 2015).

Na busca por alcançar as metas de longo prazo estabelecidas por organizações como a ONU (Organização das Nações Unidas) e a IEA (Agência Internacional de Energia), com o objetivo de alcançar um cenário de desenvolvimento sustentável no sistema energético global, estão sendo exploradas novas tecnologias que permitam o uso de recursos naturais renováveis para a geração de energia. Além disso, busca-se a integração e aprimoramento das tecnologias já existentes, com o propósito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, atendendo ao aumento projetado da demanda energética futura, sem depender do aumento no uso de combustíveis fósseis. Uma evidência disso, é que questões relacionadas a geração de energia estão no cerne de três dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, a saber, sete, onze e treze (Nações Unidas, [s.d.]). Neste sentido, procura-se por novas tecnologias que permitam o aproveitamento dos recursos naturais renováveis para geração de energia com propósito de diminuir as emissões de gases do efeito estufa. Além do desenvolvimento de novas, busca-se ainda a integração das tecnologias existentes e/ou seu melhoramento, com intuito de incrementos de eficiência de conversão e operacionalidade. Problemas como controle, eficiência e custo, são os mais relevantes para a substituição de um método já em uso por outra nova tecnologia, pois são fatores que geram impacto direto na economia.

Neste cenário, o Sol é um forte candidato a ser o principal recurso aproveitado pelas tecnologias de produção de energias limpas. Entre elas, encontram-se a tecnologia fotovoltaica, pouco eficiente ainda, mas em crescente desenvolvimento tecnológico e com um aumento expressivo da potência pico instalada no mundo na última década.

Conforme IRENA (2020), até o final de 2019 a capacidade fotovoltaica instalada era de 586,434GWp no mundo e, segundo a IEA (2020a), a geração solar fotovoltaica em 2019 aumentou 22% (aprox. 131 TWh), representando o segundo maior crescimento absoluto das tecnologias renováveis, atrás da eólica e à frente da energia hidrelétrica. A

IEA (2020b) antecipou um crescimento de aproximadamente 107GWp em 2020, 117GWp para 2021 e 120GWp para 2022. Neste cenário mundial, Brasil lidera a expansão fotovoltaica na América Latina (IEA, 2020a), e o BEN (2020) indica que Brasil instalou 2,1 GWp de nova capacidade solar fotovoltaica em 2019, sinalizando um crescimento de 92,2% em relação ao 2018. Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), em seu último relatório do ano de 2022 referente à 2021, no Brasil foi ofertado um total de 16.752 GWh de energia solar fotovoltaica.

Diante do contexto de crescimento da tecnologia fotovoltaica inserida na matriz energética mundial, assim como na brasileira, existe a preocupação e o interesse de diminuir os impactos negativos que esta produz no sistema de energia elétrica, devido à elevada intermitência na geração elétrica deste tipo de tecnologia. Segundo MONTEIRO *et al.* (2013), dentre as tecnologias contemporâneas, em energia fotovoltaica, assim como a eólica, possuem um desafio relevante em relação ao controle da produção energética, pois depende das condições meteorológicas dos locais a serem instaladas. De início, a utilização de solar possui uma perspectiva favorável por se tratar de fonte abundante e de custo zero, porém é uma fonte com comportamento estocástico e intermitente, ou seja, sua variabilidade é a maior dificuldade para a integração das mesmas nas redes de distribuição.

A energia solar disponível para conversão é função da taxa de radiação solar a nível do solo, podendo variar devido à órbita terrestre (rotação e translação), que é uma variável bastante determinística, mas também devido à presença de nuvens, que tem um caráter intermitente e estocástico. Essa geração inconstante de energia gera um potencial problema para as redes de distribuição, considerando que essas trabalham em um balanço de demanda e oferta, portanto, ao faltar produção de energia devido às condições climáticas, ocasiona-se a ruptura desse equilíbrio (DAVID *et al.*, 2016; DUALBASE, 2021).

Logo, torna-se relevante estudar o problema da gestão de intermitência dessa fonte energética. Reconhecendo essa necessidade, na Espanha, assim como em alguns outros mercados de fornecimento de eletricidade, para se obter permissões de abastecimento da rede de distribuição de energia com energia proveniente do sol, é necessário apresentar a previsão de geração de eletricidade da fonte geradora (KRAAS *et al.*, 2013).

Desta forma, a previsão solar para operação de sistemas fotovoltaicos, se apresenta como uma ferramenta indispensável para acompanhar a inserção expressiva de sistemas fotovoltaicos na matriz energética, auxiliando os diferentes operadores da rede elétrica na operação diária e no processo de transição energética que atualmente acontece. Deve-se destacar ainda que os diferentes tipos de previsão solar constituem uma parte importante das redes elétricas inteligentes (smart grid) que se encontram em pleno desenvolvimento.

Reconhecendo essa problemática, no primeiro Workshop de Energia Solar Fotovoltaica (2018), organizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) no Brasil, foi destacada a apresentação do pesquisador Ênio Pereira do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que focalizou na alta complexidade da previsão solar para a geração fotovoltaica em condições entre céu aberto e fechado, devido à dificuldade no monitoramento e previsão do movimento das nuvens (comunicação pessoal, 25 de outubro de 2018). Neste mesmo encontro, Sylvio Mantelli, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), abordou a importância de monitorar o movimento das nuvens por câmera “olho de peixe” (*skycamera*) combinadas com imagens de satélites da superfície terrestre (comunicação pessoal, 25 de outubro de 2018).

Diante dos problemas expostos, observando o crescimento expressivo da energia fotovoltaica na matriz energética e devido, principalmente, ao comportamento variável da disponibilidade de radiação solar a nível do solo, o desenvolvimento de modelos e métodos confiáveis com custos que permitam instalação em larga escala se torna um desafio a ser encarado nos próximos anos. Neste contexto, se insere o presente trabalho, que pretende abordar previsão solar de curto prazo com utilização de múltiplas câmeras típicas de monitoramento de segurança com lente tipo de olho de peixe.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Implementar uma metodologia baseada em visão computacional estéreo com câmeras olho de peixe que permita determinar altura de objetos muito distantes no céu sem retificação de imagem, capaz de ser aplicado para determinar altura de base de nuvens.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Desenvolver um modelo de visão computacional estéreo com câmeras olho de peixe de fácil implementação e resultados aceitáveis;
- 2) Validar o modelo através da medição de altura de objetos visíveis e controláveis (drone);
- 3) Propor metodologia de configuração e ajuste do sistema de câmeras.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação consiste em 5 principais divisões além da introdução, assim organizados:

No item 2. Análise Bibliométrica e Revisão Bibliográfica, sobre previsão solar intra-hora ou de curto prazo e mensuração de altura de nuvens utilizando câmeras.

No item 3. Referencial Teórico, é descrito a visão computacional, formação da imagem, a transformação de câmera por diversas metodologias.

No item 4. Materiais e Métodos, é abordado a montagem física do sistema proposto, sobre o método e forma que foi feito a calibração das câmeras utilizadas e sobre o modelo de visão estéreo com câmeras olho de peixe admitido para este trabalho.

No item 5. Resultados e discussão os testes realizados com o sistema assumido e seus resultados são apresentados.

No item 6. Considerações Futuras, linhas de pesquisas futuras relacionadas ao tema são indicadas e melhorias e mudanças ao sistema apresentado para que possa ser utilizado para mensuração da altura de base de nuvens e que possa possuir uma melhor precisão são propostas.

2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de uma melhor elucidação sobre a evolução do estado da arte em relação à previsão solar, observou-se a necessidade do desenvolvimento de análises bibliométricas e bibliográficas. Nesta seção, são apresentadas duas análises bibliométricas e duas revisões bibliográficas, uma sobre previsão solar intra-hora ou de curto prazo e a outra sobre mensuração de altura de nuvens utilizando câmeras.

Nesta análise, foi possível verificar quais são os pesquisadores de maior quantidade de publicação, quais os trabalhos mais relevantes a partir da quantidade de citações, onde internacionalmente estão sendo desenvolvidas pesquisas com foco nestas áreas e em quais países estão as maiores quantidades de publicações. Por fim, também foi analisado quais são as revistas com a maior quantidade de artigos sobre os temas, e a interligação das produções científicas entre os autores por meio do programa *Vosviewer*.

Os artigos utilizados para a análise aqui proposta, foram extraídos das plataformas de bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Ambas as plataformas são referências nesta área de pesquisa abordada, pela quantidade constituinte de trabalhos relevantes presentes nas mesmas e suas frequentes atualizações. Nessas plataformas, é possível obter acesso a publicações em revistas mais importantes, cujo foco seja a engenharia empenhada em estudo da energia voltada para o meio ambiente. A fim de enfatizar trabalhos desenvolvidos no Brasil sobre o tema de previsão solar, visto que a pesquisa nas bases *Scopus* e *Web of Science* trouxe apenas uma publicação brasileira, foi feita uma pesquisa no ambiente Google Acadêmico por meio de palavras-chaves pertinentes ao tema.

Para obter êxito em refinar a pesquisa dos artigos relacionados à área de pesquisa, foi desenvolvida uma combinação de palavras-chaves para cada tema que foram utilizadas nas bases de pesquisa. A combinação utilizada para o tema de previsão solar intra-hora, foi dada por: ("*Solar* Forecast**" OR "*solar* irradia* forecast**" OR "*intra-hour forecas**") AND ("*sky camera**" OR "*sky imag**") AND ("*very-short*" OR "*ultra-short*" OR "*short-term*" OR "*in-tra-hour*"). Já a combinação de palavras-chave utilizada para o tema de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras, foi dada por: "*Cloud base height*" AND ("*Sky image*" OR "*Sky camera*").

Nas seções seguintes é possível verificar os resultados obtidos das análises propostas.

2.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA – MÉTODOS DE PREVISÃO SOLAR INTRA-HORA

Com a utilização da combinação de palavras-chave, foi possível ter o resultado de 79 diferentes artigos a serem considerados, condizentes ao tema.



Figura 1: Contagem de registros publicados dos principais autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, a contagem de registro mostrou, conforme o gráfico da Figura 1, que Kleissl J. e Feng C. possuem a maior quantidade de publicações na área específica de previsão solar de muito curto prazo e curto prazo de tempo, com um total de 15 registros, 9 e 6 registros respectivamente. Juntos seus trabalhos possuem um total de 317 citações, sendo o artigo mais citado de Kleissl J. é o intitulado *Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers*, citado 47 vezes, e o de Feng C., *Unsupervised Clustering-Based Short-Term Solar Forecasting*, citado 48 vezes. Outros autores com expressividade em publicações são, Heiser J., Hodge B.M., Kalb P. Yoo S. e Zhang J com uma contagem de 6 registros cada, sendo o artigo *3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers*, de Yoo S. e Kalb P, o segundo mais vezes citado, com um total de 114 citações. Um artigo muito relevante ao tema e o mais citado é o de Marquez, R. e Coimbra, C., intitulado *Intra-hour DNI*

forecasting based on cloud tracking image analysis, citado 279 vezes. Outros artigos relevantes segundo a quantidade de vezes citados podem ser verificados na Tabela 1.

Seguindo a análise, foi verificado quais países de origem dos trabalhos. Conforme a Figura 2, pode-se verificar que os Estados Unidos e China são os países com maior quantidade de publicações sobre o assunto, sendo 31 e 15 registros respectivamente. Na Europa, esse tema já tem se espalhado em vários países, principalmente na Espanha, Alemanha, Reino Unido e França, juntos com um total de 16 publicações. Os artigos aqui antes mencionados, de Kleissl J., Coimbra, C., Feng C. e de Yoo S. e Kalb P, são todos dos norte-americanos. Na América do Sul apenas uma publicação, no Uruguai.

Tabela 1: Os 10 artigos com maior número de citações e seus respectivos autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Autores	Título do Artigo	Citações
Marquez, R., Coimbra, C.F.M.	Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis	279
Peng, Z., Yu, D., Huang, D., Yoo, S., Kalb, P.	3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers	114
Wang, F., Zhen, Z., Liu, C., Shafie-khah, M., Catalão, J.P.S.	Image phase shift invariance based cloud motion displacement vector calculation method for ultra-short-term solar PV power forecasting	99
Mahdavi, N., Braslavsky, J.H., Seron, M.M., West, S.R.	Model Predictive Control of Distributed Air-Conditioning Loads to Compensate Fluctuations in Solar Power	97
West, S.R., Rowe, D., Sayeef, S., Berry, A.	Short-term irradiance forecasting using skycams: Motivation and development	75
Aryaputera, Aloysius W.; Yang, Dazhi; Zhao, Lu; Walsh, Wilfred M.	Very short-term irradiance forecasting at unobserved locations using spatio-temporal kriging	69
Caldas, M., Alonso-Suárez, R.	Very short-term solar irradiance forecast using all-sky imaging and real-time irradiance measurements	62
Chen, Xiaoyang; Du, Yang; Wen, Huiqing; Jiang, Lin; Xiao, Weidong	Forecasting-Based Power Ramp-Rate Control Strategies for Utility-Scale PV Systems	62
Bernecker, D., Riess, C., Angelopoulou, E., Hornegger, J.	Continuous short-term irradiance forecasts using sky images	58
Wen, H., Du, Y., Chen, X., Jiang, L., Xiang, W.	Deep Learning Based Multistep Solar Forecasting for PV Ramp-Rate Control Using Sky Images	55

Dentre os artigos pesquisados, foram levantados os periódicos mais significativos neste tema em questão, ao todo foram identificados 32 periódicos e conforme a Tabela 2, é possível verificar o quanto o periódico *Solar Energy* se destaca em relação aos outros. São 18 publicações ao todo, e o segundo, *Renewable Energy* com 5 publicações. O periódico *Solar Energy* já era esperado como principal, pois é referência por se tratar do periódico oficial da sociedade internacional de energia solar. Segundo dados tirados na página da *Elsevier*, o fator de impacto do periódico *Solar Energy* é 5.742, assim sendo classificado em 38 de 114 em Energia e Combustíveis (ELSEVIER, 2021).

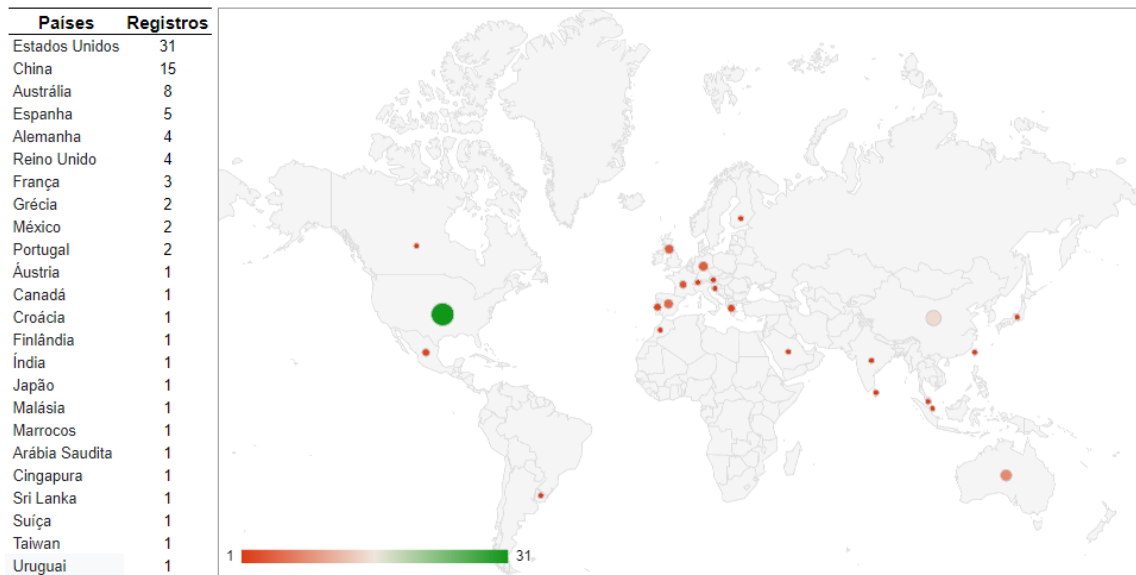


Figura 2: Registro de publicações por países sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que foi necessário verificar a quanto tempo o assunto aqui tratado vem sendo publicado e em conjunto, a sua periodicidade de publicações ao passar dos anos até os dias atuais. Conforme a Figura 3, é possível perceber que esse tema vem sendo publicado há 11 anos, e de 2018 até 2021 houve um crescente significativo e nos anos seguintes, 2022 e 2023, 6 publicações cada ano.

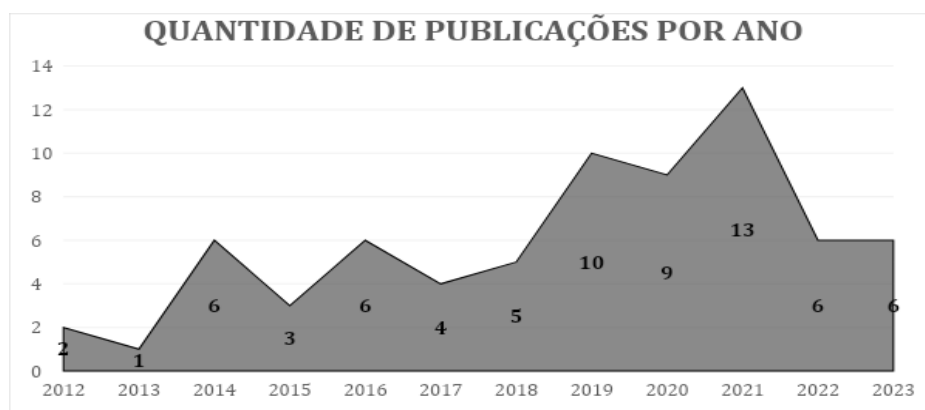


Figura 3: Gráfico de quantidade de publicações de 2012 a 2023 sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, foram verificadas as conexões entre os autores. Com essas conexões é possível distinguir os principais autores em cada linha de pesquisa. Como o tema de previsão solar se divide em diferentes métodos aplicados para fazer a previsão, conseqüentemente espera-se vários núcleos espalhados de arranjos de autores, e foi o que o primeiro gráfico obtido no software Vosviewer apresentou, como pode ser visto no gráfico da Figura 4. Neste gráfico foram considerados todos os 236 autores sem a necessidade de múltiplos trabalhos e, também, foi desconsiderada a necessidade de haver citações. É possível observar que a maioria dos núcleos de autores não possui grandes conexões, encontram-se dispersos, não obstante, é possível observar 4 núcleos que possuem mais conexões, conseqüentemente são grupos com autores mais citados e com maior quantidade de trabalhos publicados. O gráfico da Figura 5 apresenta a maior conexão fornecida pelo software Vosviewer, são ao todo 31 autores do total de 236, onde notoriamente é possível observar a relevância dos trabalhos de Kleissl, e neste caso também vale citar a relevância de Urquhart no centro, com várias conexões.

Tabela 2: Registro de quantidade de artigos por revista sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Periódicos	Registros
SOLAR ENERGY	18
RENEWABLE ENERGY	5
APPLIED ENERGY	3
PROCEEDINGS OF THE ACM SYMPOSIUM ON APPLIED COMPUTING	3
AIP CONFERENCE PROCEEDINGS	2
ELECTRONICS SWITZERLAND	2
IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS	2
METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT	2
REMOTE SENSING	2
ENERGIES	2

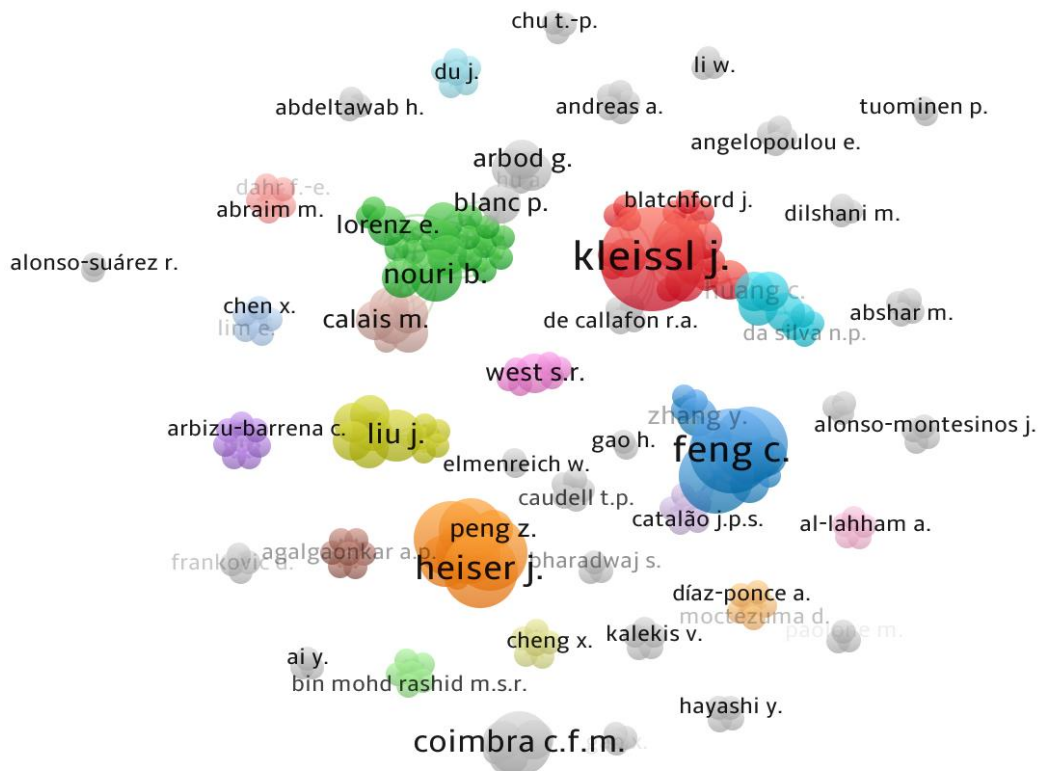


Figura 4: Conexões entre os 236 autores dos artigos pesquisados sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

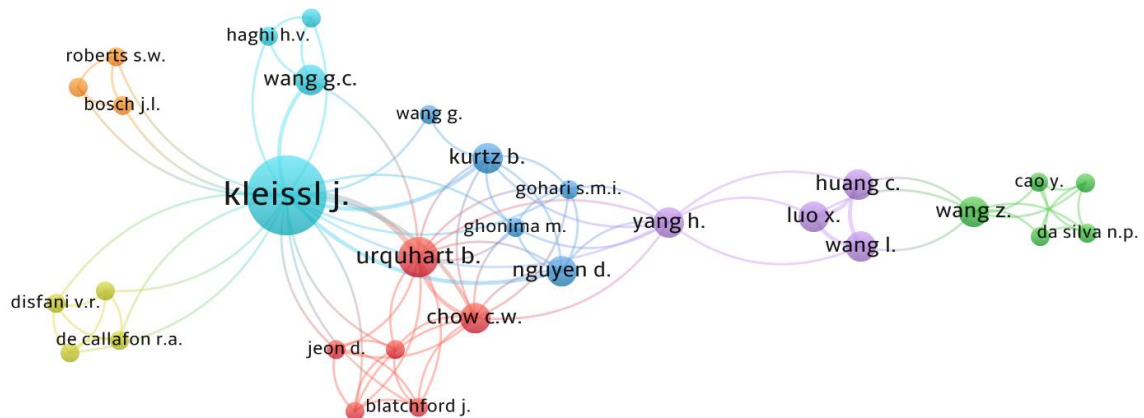


Figura 5: Maior conexão dentre os artigos pesquisados sobre o tema de métodos de previsão solar intra-hora. São ao todo 31 autores.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA - MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DA ALTURA DA BASE DE NUVEM UTILIZANDO CÂMERAS

Seguindo a mesma abordagem da análise bibliométrica de previsão solar intra-hora, utilizando a combinação de palavras-chave estipulada para este tema, levantamos um total de 21 artigos diferentes, sendo destes, 12 foram considerados para essa análise observando o tema proposto.

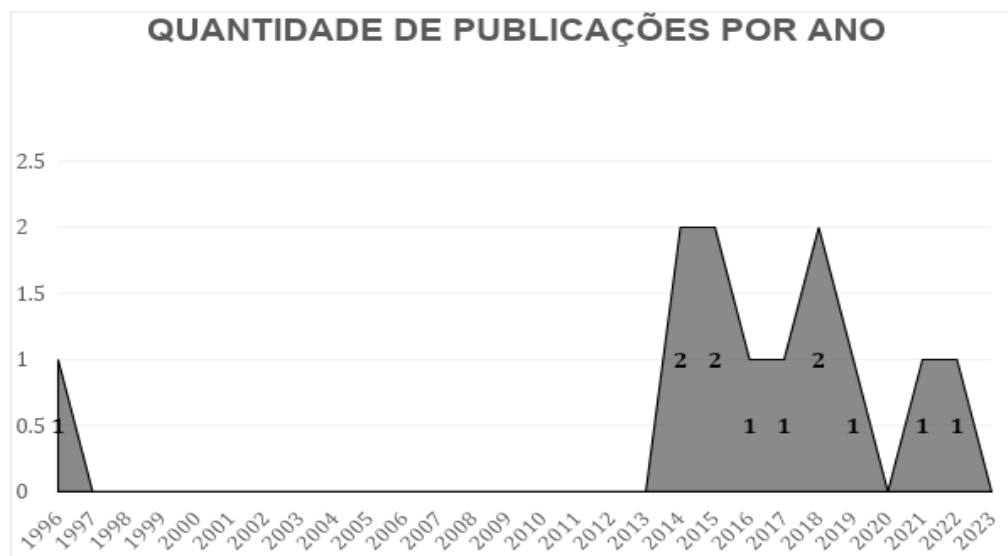


Figura 6: Gráfico de quantidade de publicações de 1996 a 2023 sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a lista de artigos deste estudo, o artigo mais antigo referente ao tema, trata-se do The computation of cloud-base height from paired whole-sky imaging cameras de Allmen, M.C. e Kegelmeyer Jr., W.P. de 1996. Após essa publicação de 1996, foram constatadas novas publicações apenas de 2014 em diante, conforme pode ser observado no gráfico da Fig. 6. Esses primeiros dados trazem a percepção de que o tema foi levantado há uns anos e está voltando a ser discutido atualmente, provavelmente pela observada crescente da utilização de energia fotovoltaica nos últimos anos.

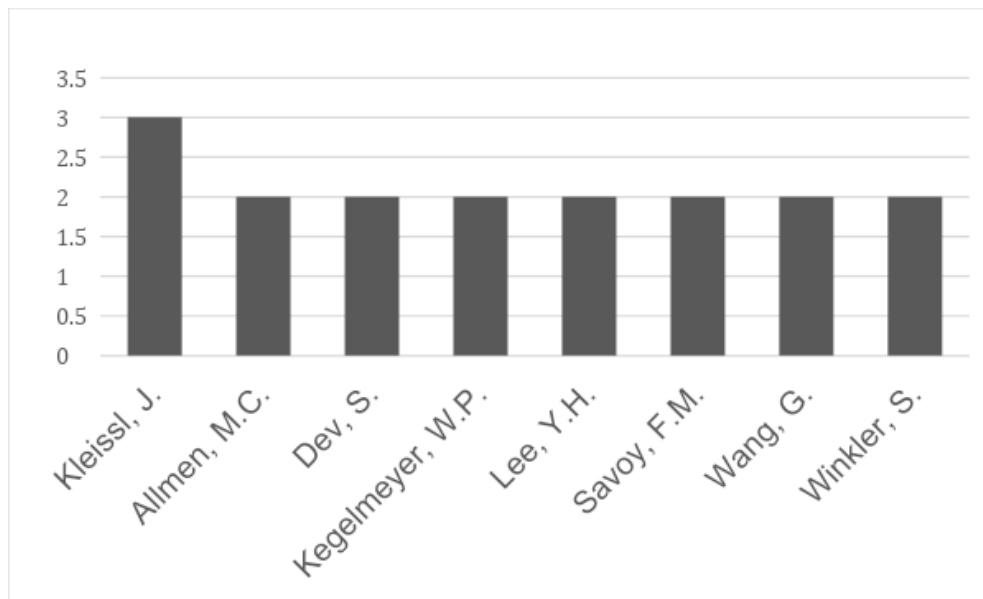


Figura 7: Contagem de registros publicados dos principais autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fazendo o levantamento da contagem de registros por autores, é possível observar conforme, Figura 7, que não houve uma grande disparidade entre a quantidade de registros, sendo Kleissl J. com a maior quantidade, assim como no levantamento feito para o tema de previsão solar intra-hora. Com 3 registros, seus trabalhos já foram citados 87 vezes, sendo o mais citado o trabalho de 2014, intitulado *Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers*, citado 47 vezes, ocupando o primeiro lugar da lista dos artigos mais vezes citados, cuja qual pode ser verificada na Tabela 1. Outro trabalho de sua autoria e de grande relevância, é o *Cloud base height from sky imager and cloud speed sensor*, sendo 31 vezes citado e ocupando o terceiro lugar da tabela. Outros autores também como Allmen, M.C., Wang G.C. e Lee Y.H. são de grande impacto, com trabalhos que juntos já foram citados 108 vezes, sendo apenas o *The computation of cloud-base height from paired whole-sky imaging cameras*, 46 vezes.

Tabela 3: Os 5 artigos mais vezes citados e seus respectivos autores segundo pesquisa levantada sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Autores	Título do Artigo	Citações
Nguyen D., Kleissl J.	Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers	47
Allmen M.C., Kegelmeyer Jr. W.P.	The computation of cloud-base height from paired whole-sky imaging cameras	46
Wang G., Kurtz B., Kleissl, J.	Cloud base height from sky imager and cloud speed sensor	31
Arbizu-Barrena C., Pozo-Vázquez D., Ruiz- Arias J.A., Tovar- Pescador J.	Macroscopic cloud properties in the WRF NWP model: An assessment using sky camera and ceilometer data	20
Savoy F.M., Lemaitre J.C., Dev S., Lee Y.H., Winkler S.	Cloud base height estimation using high-resolution whole sky imagers	16

Analisando sobre os países de origem dos trabalhos, conforme a Figura 8, é possível observar que os Estados Unidos é o país referência de pesquisadores nessa linha de pesquisa, com 8 documentos, seguido da China e Singapura com 2 documentos cada. Dentre os 5 artigos mais citados, 4 são de americanos.

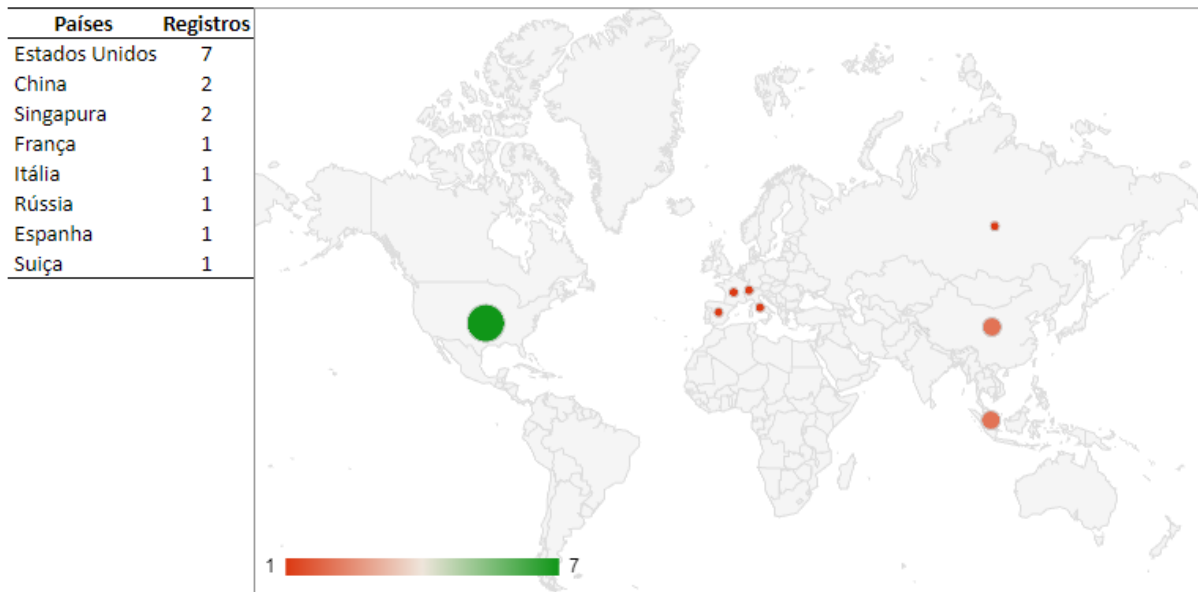


Figura 8: Registro de publicações por países sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os artigos pesquisados, foram levantados os periódicos mais significativos neste tema em questão, ao todo foram identificados 7 periódicos, cujos quais podem ser verificados na Tabela 4. O periódico *Solar Energy* se destaca em relação aos outros com 3 artigos, enquanto os demais com apenas 1 registro. Assim como mencionado na bibliometria de previsão sobra intra-hora, o periódico *Solar Energy* já era esperado como o periódico com maior quantidade de registros, vista sua relevância no assunto em questão.

Tabela 4: Registro de quantidade de artigos por revista sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Periódicos	Registros
SOLAR ENERGY	3
ATMOSPHERIC MEASUREMENT TECHNIQUES	1
INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM IGARSS	1
JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY	1
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH	1
MACHINE VISION AND APPLICATIONS	1
PROCEEDINGS OF SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING	1

Assim como na bibliometria do tema anterior, em última etapa, foram verificadas as conexões entre os autores. Com essas conexões é possível distinguir os principais em cada núcleo de pesquisa e validar dados já levantados anteriormente sobre os principais autores e trabalhos. Como o tema de mensuração de altura de base de nuvens pode ter diferentes abordagens, que serão evidenciadas na análise bibliográfica abordada na subseção seguinte, conseqüentemente espera-se alguns grupos separados. No primeiro gráfico obtido pelo *software Vosviewer*, na Figura 9, é possível verificar os vários núcleos espalhados de arranjos de autores, ao todo 9. É possível observar que a maioria dos núcleos de autores não possui grandes conexões, encontram-se dispersos, não obstante, é possível observar 1 núcleo com 6 interações e outros 2 com 5, por conseguinte são grupos com os autores mais citados e com maior quantidade de publicações. O gráfico da Figura 10 apresenta a maior conexão fornecida pelo *software Vosviewer*, são ao todo 6 autores do total de 34, onde notoriamente é possível observar a relevância dos trabalhos de Kleissl J., autor evidenciado anteriormente com a maior quantidade de registros publicados neste tema. Coincidentemente, Kleissl J., é o autor com maior quantidade de registros nos dois temas abordados nas análises bibliométricas.

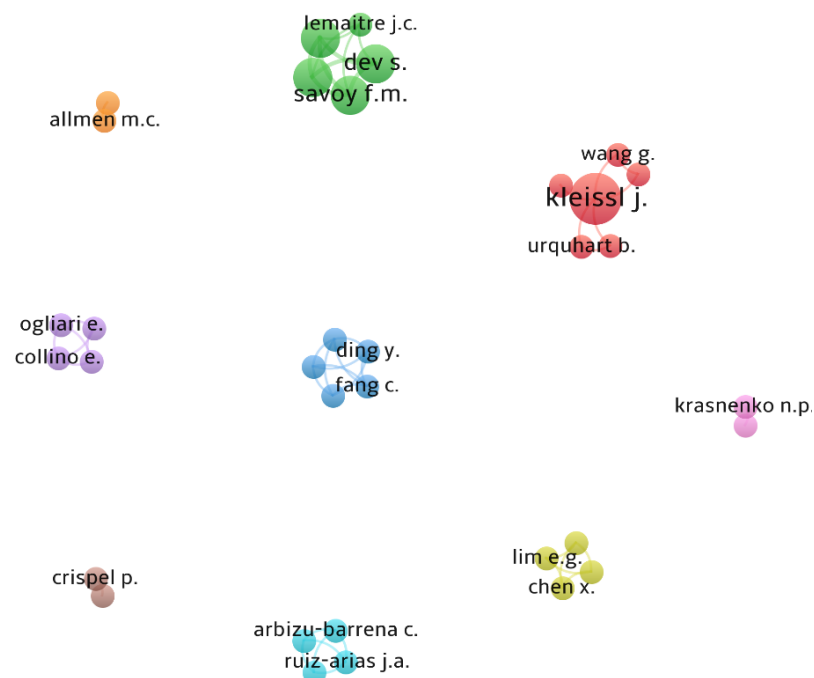


Figura 9: Conexões entre os 34 autores dos artigos pesquisados sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

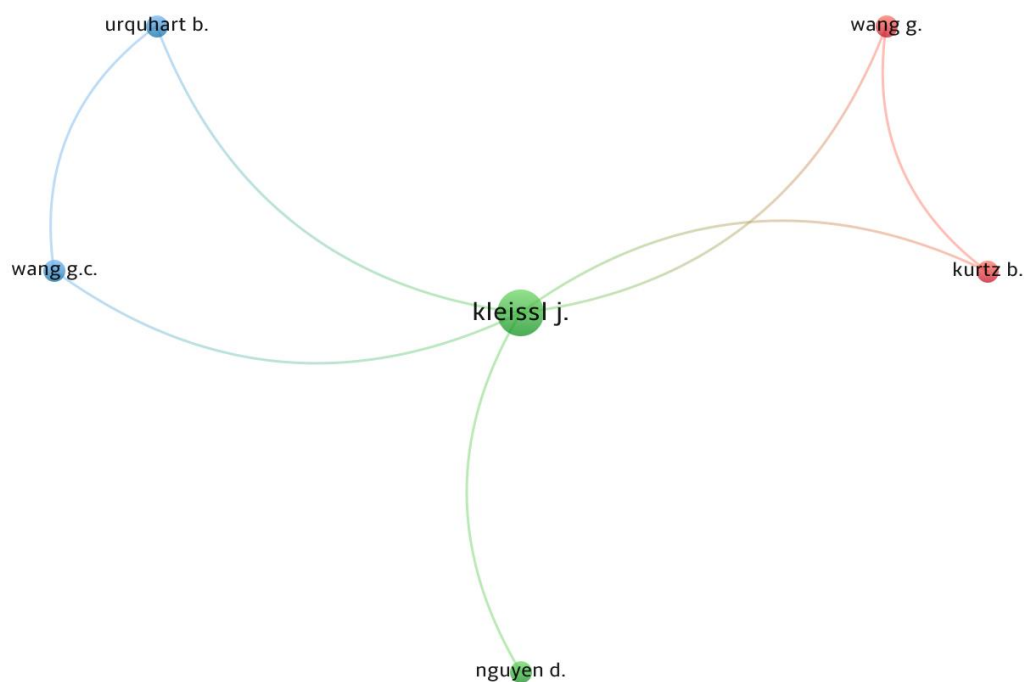


Figura 10: Maior conexão dentre os artigos pesquisados sobre o tema de métodos de mensuração da altura da base de nuvem utilizando câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MÉTODOS DE PREVISÃO SOLAR INTRA-HORA

Os métodos de previsão solar *intra-hora* são técnicas onde os horizontes de previsão são de segundos a uma hora, ou seja, são métodos de previsão para curtos horizontes de tempo. A previsão *intra-hora* ajuda a garantir a qualidade e a estabilidade da rede, bem como o agendamento preciso de reservas de turnos e resposta à demanda. As redes que mais necessitam desse horizonte temporal de previsão são as redes insulares com alta penetração solar e fontes de energia de baixa qualidade, ou seja, de baixa eficiência. Essas previsões também são necessárias para o planejamento operacional de sistemas de distribuição afim de reduzir as operações de tap em transformadores e desenvolver cotações sub-horárias para mercados de eletricidade.

Nesta seção, vamos abordar sobre os principais métodos de previsão solar *intra-hora* e evidenciar as principais publicações sobre o tema incluindo métodos desenvolvidos no Brasil.

2.3.1 MÉTODO DE PERSISTÊNCIA E PERSISTÊNCIA INTELIGENTE

Os métodos de persistência são previsões para um único ponto, e que consiste em dizer que a condição momentânea de céu limpo irá permanecer durante um dado intervalo de tempo. Esse índice de céu limpo mantido em persistência pode variar seus valores analisados em momentos diferentes. A precisão desse método diminui muito com o aumento do período de previsão, exatamente por considerar um único índice de céu limpo, sabendo que é variável no intervalo de tempo analisado (INMAN et al, 2013; DIAGNE et al, 2013). Os métodos de persistência, considerados modelos de previsão de irradiância solar mais simples, são utilizados como base comparativa para outros modelos mais complexos, com o cálculo do erro de outros métodos de previsão solar, permitindo uma comparação entre eles (MARQUEZ et al, 2013). A principal característica dos modelos de persistência é que eles apresentam resultados satisfatórios em condições de céu sem sombreamento de nuvem, ou seja, quando não há presença de nuvens. (INMAN et al, 2013). Através de uma melhoria no modelo de persistência, é obtido o novo modelo denominado modelo de persistência inteligente (*smart-persistence*). Esta melhoria consiste em usar o valor médio do índice de céu claro. Um modelo de persistência adequadamente definido produz previsões muito precisas na previsão solar de curtíssimo e curto prazo quando a variabilidade da irradiância horizontal global (GHI) é baixa, portanto, qualquer outro modelo de previsão que apresente uma melhoria sobre este, como consequência, melhorará a estimativa em relação a uma irradiância de alta variabilidade e, portanto, frequentemente servirá como a linha de base para avaliar os modelos de previsão (MARQUEZ et al, 2013; KUMLER et al, 2019).

Kumler et al. (2019) desenvolveram um modelo introduzindo melhoras ao método de persistência inteligente, com o intervalo de previsão de até uma hora e desenvolvem uma técnica de rastreamento de nuvem. Nesse modelo, os autores calculam a irradiância solar extraterrestre e o ângulo zenital com o Algoritmo de Posição Solar (SPA), do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL). Os autores comparam seu novo algoritmo, com o modelo de persistência inteligente e de persistência, em horizontes de previsão entre 5 e 60 minutos, e verificaram um desempenho superior.

2.3.2 MÉTODO DE SENSORIAMENTO LOCAL

O método de sensoriamento local é baseado em tratamento de imagens de céu, fornecidas por um gerador de imagens também conhecido como *Total Sky Imager* (TSI). Um modelo exemplo de TSI pode ser verificado na Figura 11. O TSI normalmente é instalado na região onde se deseja fazer a análise, essas imagens possuem ângulos de aproximadamente 180°. Esse método apresenta imagens de nuvens com elevada resolução, temporal e espacial comparado com métodos de imagens de satélite (KASTEN; CZEPLAK, 1980).



Figura 11: Um exemplo de um TSI.

Fonte: Imagem cortesia do departamento de medição de energia de radiação atmosférica dos Estados Unidos (ARM) (<https://www.flickr.com/photos/armgov/28109857084>. Visitado em 02/05/23).

A utilização do método em que se faz uso de TSI tem crescido, apresentando resultados promissores. Para utilizar este equipamento, é necessário o investimento de um valor elevado, porém podem ser substituídos por câmeras olho de peixe, as quais possuem um menor valor e trazem resultados satisfatórios quando comparados aos resultados

obtidos utilizando um TSI, conforme trabalhos aqui apresentados. O TSI possui um algoritmo em que detecta nuvens em diferentes densidades, porém não produz classificações, altura, direção de propagação e velocidade das nuvens, logo, apresenta oportunidade de desenvolvimento de algoritmos complementares para suprir essas necessidades melhorando assim a qualidade das previsões.

As características desse método são bastante próximas das características dos métodos de tratamento de imagens de satélite, porém, este caso é utilizado apenas para previsões de curto prazo, ou seja, para alguns minutos, no máximo uma hora, por fazerem previsões apenas no tempo em que as nuvens estiverem no campo de visão do TSI. Os horizontes de previsão variam dependendo da posição e velocidade das nuvens (KRAAS *et al*, 2013). Este método trata-se de monitoramentos localizados e opera em horizontes muito curtos, caracterizado pelo tempo em que a nuvem passa pelo campo de visão da câmera, podendo ou não passar pela “zona de perigo”. Essa zona é onde a nuvem intercepta o trajeto da radiação solar direta no local de interesse. O tempo em que a nuvem leva para passar por todo o campo de visão da câmera comumente tem ordem máxima de vinte minutos, e o sistema atualiza de dez a trinta segundos (CHOW *et al*, 2011).

Marquez *et al*. (2013) desenvolveram um trabalho, até então o mais citado a partir do levantamento realizado neste presente trabalho, usando um TSI com o intuito de prever a irradiação normal direta (G_b) média de 1 minuto para horizontes de tempo de 3 a 15 minutos. Obtendo o valor do desvio do erro quadrático médio, compararam como o mesmo valor obtido pelo método de persistência. Concluindo que as imagens do céu são úteis para horizontes de previsão de 3 a 15 minutos a frente, e ao comparar com o modelo de persistência, o modelo baseado em imagens do céu é mais preciso.

Outro trabalho utilizando este método, foi o de Peng *et al*. (2015), eles propuseram em seu trabalho acrescentar um método de classificação de nuvens e suas alturas com a utilização das imagens de vários TSIs. Verificaram a possibilidade de classificar as nuvens e detectar camadas e por fim, compararam os resultados com o método de persistência, obtendo uma melhoria de 26% em todas as previsões entre 1 até 15 minutos.

2.3.3 MÉTODOS COM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os modelos baseados em redes neurais artificiais (RNA) ou inteligência artificial (IA), são modelos que utilizam programas que se adaptam a partir de inserções de novos dados, ou seja, os algoritmos desses programas aprendem e modificam com as variações climáticas. São programas baseados em organismos vivos, como as redes neurais e podem ser aplicados utilizando imagens de satélites com intervalos de tempo inferiores a seis horas, e com imagens do céu (INMAN et al, 2013; DIAGNE et al, 2013). Esses modelos utilizam um banco de dados pré-programado de informações climáticas passadas para ser treinados e fazer as previsões (INMAN *et al*, 2013). Dois conceitos que aparecem dentro da IA são *machine learning* e *deep learning*, ambos podem ser classificados em aprendizado supervisionado e não supervisionado (RICHARDSON *et al*, 2017; VOYANT *et al*, 2017). As RNAs pertencem ao *deep learning* e são compostas pela camada de entrada, a camada de saída e aquelas definidas entre essas duas, que são camadas ocultas e que podem ser mais de uma. Essas camadas são compostas por neurônios que são os elementos básicos do processamento, cada camada pode assumir centenas deles. Em uma camada oculta, cada neurônio soma as saídas ponderadas da camada anterior e adiciona uma inclinação à soma. Em seguida, a soma é processada por uma função chamada função de ativação para gerar saídas, que são utilizadas como entradas para os neurônios da próxima camada. Vale ressaltar que existem vários tipos de funções de ativação dependendo do tipo de problema a ser resolvido (CHU et al, 2015).

Uma pesquisa baseada em RNA foi publicada por Sivaneasan *et al.* (2017), onde eles fizeram uma comparação entre modelos básicos de RNA com inserção de RNA-fuzzy e RNA-fuzzy com fator de correção de erros em relação a um método desenvolvido por eles, onde utilizam uma RNA em uma *Back Propagation* de tripla camada e o uso também de pré-processamento difuso para previsão de energia solar. Como resultado conseguiram demonstrar que o fator de correção de erro acoplado a uma RNA pura pode melhorar significativamente a precisão da previsão de irradiação solar devido à capacidade de correção de erros adaptativa. Eles constataram uma outra forma de aprimorar a precisão, que é através da incorporação de um pré-processamento de lógica difusa para classificar o índice de cobertura de nuvens, incorporando os dados de hora do dia, umidade relativa e precipitação. Pedro *et al.* (2015) mostraram um modelo de previsão solar intra-hora baseado no reconhecimento de padrões otimizados de medições

meteorológicas locais e imagens do céu, usando o método de *machine learning* k-vizinhos mais próximos (k-NN), concluindo que a inclusão de imagens do céu no modelo apresenta apenas uma pequena melhoria (menos de 5%) em relação ao modelo k-vizinhos mais próximos sem imagens. No entanto, para o caso da previsão só de irradiância normal direta (DNI), ajuda a definir os intervalos de incerteza. Castillejo *et al.* (2021), publicaram um trabalho de previsão de irradiação solar envolvendo métodos estatísticos de previsão solar e IA. Esse novo método aplicado pelos autores considera classificação de padrões de irradiância, cadeias de Markov e lógica fuzzy. O método foi aplicado por seis anos, onde não utilizaram dados prévios por não existirem, com um horizonte de previsão entre 0 e 2 horas. Comparado com o método de persistência inteligente foi consistentemente superior devido às relações das series temporais, trazendo uma eficiência superior cerca de 10% para índice de céu claro. Um dos problemas encontrados e que ocasionou alguns erros refere-se à mudanças nas condições atmosféricas entre o pôr do sol e o nascer do sol que não podem ser previstas uma vez que os dados solares não estão disponíveis, pois é baseado no estado atmosférico anterior.

2.3.4 MÉTODOS HÍBRIDOS

Os modelos híbridos são basicamente os que utilizam mais de um modelo de previsão de radiação solar. Sabendo que os modelos relacionados anteriormente possuem limitações, alguns pesquisadores fizeram a utilização de mais de um método, suprimindo a baixa eficiência que um modelo possui com outro modelo que possui elevada eficiência onde deseja ser aperfeiçoado.

Gayekhloo *et al.* (2015), desenvolveram um trabalho onde aplicam a teoria dos jogos junto com redes neurais bayesianas. Eles fizeram previsões de uma a três horas da irradiância solar e para avaliar a precisão do método, utilizaram séries temporais da irradiação solar. Os autores concluíram que ao utilizar a teoria dos jogos, o método híbrido proposto, comparado com a técnica de persistência, melhora a precisão de previsão. Outra pesquisa relevante sobre a aplicação de modelos híbridos foi a de Singla *et al.* (2021), onde eles concluíram que os modelos híbridos têm um desempenho melhor do que os modelos simples ou individuais. No entanto, destacam que os modelos híbridos são estruturas mais complexas baseadas em modelos, principalmente, de redes neurais recorrentes (RNN), rede neural de convolução (CNN), memória de longo e curto prazo

(LSTM) e máquina de aprendizagem extrema (ELM) também levam vantagem dos algoritmos de otimização como otimização por enxame de partículas (PSO), algoritmo genético (GA) e *firefly*.

2.3.5 TRABALHOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL

No Brasil, as publicações de trabalhos voltadas a previsão solar intra-hora estão em desenvolvimento, tornando-se assim de relativa dificuldade de localização. Como forma de atestar isso, na análise bibliométrica deste trabalho foi possível verificar apenas um trabalho brasileiro. Por outro lado, várias instituições nacionais desenvolvedoras de pesquisa, já desenvolvem trabalhos nesta área. Dentre as publicações brasileiras, Mendonça de Paiva *et al.* (2020) desenvolveram uma pesquisa avaliando dois algoritmos de aprendizagem de máquina, o MGGP (*multigene genetic programming*) e outro classificado como caixa branca, para previsão de irradiância solar em um horizonte de 15 a 120 minutos. Puderam constatar que o uso de variáveis meteorológicas adicionais melhora a previsão em cerca de 5,68% para MAE e 3,41% em RMSE. Os autores aplicaram os algoritmos em seis diferentes localidades de três países. Para previsões únicas e de 90 a 120 minutos, o MGGP trouxe resultados mais precisos, porém utilizando os dois métodos em conjunto, as previsões foram significativamente melhores. Outro ponto ressaltado foi que ambos os métodos trouxeram resultados satisfatórios em relação a outros métodos aplicados anteriormente nas regiões de estudo, e o fator localidade mostrou interferir na predominância do método a ser utilizado. Outra pesquisa sobre o tema foi de Mendes *et al.* (2017), onde propuseram a aplicação de RNA do tipo *Multilayer Perceptron* utilizando o software Matlab para previsão de radiação solar global em curto espaço temporal, os dados utilizados foram do SONDA. Foram quantificados dados de dois dias específicos, 08 e 26 de agosto de 2016, onde observaram para os respectivos dias o resultado do MAPE 17,83% e 12,19%, de MAE de MAE 21,34 (W/m²) e 18,69 (W/m²) e REMQP 8,38% e 5,37%. Seus resultados mais satisfatórios foram com a configuração de 10 neurônios na camada oculta. Heinen (2018) propôs uma comparação entre o método de redes neurais recorrentes, *XGBoost* (*Extreme Gradient Boosting*), e o de persistência pra previsões de radiação solar intra-hora e média diária. Para previsões intra-hora, o modelo *XGBoost*, em comparação ao de RNNs, obteve os melhores resultados com NRMSE de 12,9% em resoluções de 5 minutos. Togawa (2014)

apresentou um modelo adaptado para previsão de irradiância solar por rastreamento de nuvens utilizando uma câmera de segurança olho de peixe em substituição ao equipamento TSI. Como resultado, foi verificado que não foi possível superar as previsões utilizando o modelo de persistência em condições de céu limpo, porém em condições parcialmente encoberto o modelo proposto trouxe resultados superiores.

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DA ALTURA DA BASE DE NUVEM UTILIZANDO CÂMERAS

A mensuração da altura da base de nuvens é um aspecto importante para estudos meteorológicos, de previsão do tempo e é uma variável para previsão de radiação solar para curtos horizontes de tempo, por exemplo, previsão *intra-hora*. Uma das técnicas utilizadas para essa mensuração é a utilização de câmeras olho de peixe e a implementação da visão computacional estéreo, assunto desta dissertação. A visão computacional estéreo permite a obtenção de informações tridimensionais a partir de duas imagens bidimensionais, possibilitando a mensuração da altura da base de nuvens. Os modelos aplicados os quais utilizam câmeras, obtém a altura da base de nuvem por meio de triangulação ou correlação de imagens. Nesta seção, são evidenciados alguns trabalhos publicados sobre o tema de mensuração de altura de base de nuvem utilizando câmeras com lente olho de peixe.

Os autores Nguyen D. e Kleissl J (2014), utilizaram um método bidimensional baseado na projeção georreferenciada e correlação estatística de duas imagens do céu por um par de câmeras e aplicaram também um método 3D que utiliza a técnica epipolar para determinar o CBH para cada pixel da nuvem afim de fazer uma reconstrução de campos de nuvens 3D. O método 2D foi validado comparando com medições de CBH do ceilômetro. Os métodos foram aplicados em imagens captadas a cada 30 segundos a partir de dois geradores de imagens de alta resolução, instalados na Universidade da Califórnia San Diego, distanciados em 1230 metros um do outro. Para o método 2D aplicado, comparado com medidas feitas por um ceilômetro, foi demonstrado valores de RMSD de 206 metros (17,7%) para altitude de base de nuvem de 1.162 metros e 388 metros (7,5%), para nuvens com 5.212 metros de altitude de base. No modelo 3D foi aplicado um método aprimorado do proposto por Allmen e Kegelmeyer (1996). Com um modelo matemático generalizado usando notação vetorial para encontrar a linha epipolar, o esquema proposto

permite encontrar CBH de pixels em todos os quadrantes da imagem. O desprendimento de custo computacional para a aplicação do método 3D para a construção do campo de nuvem foi maior em relação ao 2D, sendo de 6 horas para 2 segundos, porém foi possível obter um mapa de altura detalhado das nuvens. Segundo os autores, os campos de nuvem 3D não puderam ser verificados devido à falta de técnicas de medição mensuráveis. Para os autores, conhecer a extensão vertical da nuvem e os parâmetros microfísicos da nuvem permite a assimilação de campos de nuvens 3D em modelos de transferência radiativa para obter distribuições de irradiância de superfície mais precisas, melhorando ainda mais as previsões solares de curto prazo e longo prazo.

Outros autores que propuseram um método para determinar altura de base de nuvens foram Allmen M.C., Kegelmeyer Jr. W.P (1996). Eles desenvolveram um novo método para determinar a altura da base da nuvem, com a utilização de correlação pares de imagens do céu obtida por duas câmeras com imagem de 180° separadas a uma distância de 5,54 km e foi instalado um celiometro no ponto médio entre elas. Os autores calcularam o campo de fluxo temporal para cada câmera separadamente, começando de um ponto na imagem da câmera 1 e primeiro usam restrições de projeção epipolar para restringir a região que deve ser pesquisada na imagem da câmera 2. Os pontos candidatos em ambas as imagens, as regiões locais da imagem e os campos de fluxo em torno dos dois pontos são processados para remover o efeito da distorção da lente olho de peixe. Os valores processados de dois pontos são correlacionados em quatro dimensões (nível de cinza e direção do movimento), e a correlação ao longo de toda a linha epipolar é verificada para determinar a melhor correspondência. Dessa forma, as restrições adicionais fornecidas pelo campo de fluxo são exploradas para tornar a correspondência única. Ao definir uma correspondência entre dois pontos da imagem, o cálculo da altura do fundo da nuvem procede diretamente da triangulação e do conhecimento das posições das câmeras. Como resultado, os autores mostraram como os dados emparelhados de geradores de imagens de todo o céu amplamente separados podem ser fundidos para extrair as alturas da base da nuvem. Outro ponto relevante levantado foi que olhar para fora da linha epipolar não melhora o desempenho. Por fim, comparando os resultados das medições com as medidas provenientes do celiometro, verificaram uma precisão de 5%. Segundo os autores, a precisão de 5% está totalmente dentro da precisão necessária a aplicação que desejam.

Pierre Crispel, A. e Gregory Roberts, em 2018, propuseram um novo método de identificação e geo-localização de elementos de campo de nuvens utilizando rede de

câmeras estéreo all-sky portátil (cloud field elements from a portable all-sky camera stereo network). Neste estudo foram utilizadas duas câmeras de segurança modelo olho de peixe posicionadas à uma distância de aproximadamente 150 metros e um ceilômetro. As imagens foram transmitidas a um computador por meio de uma rede WLAN local por meio de duas antenas direcionais e as respectivas posições das duas câmeras no Earth Frame foram avaliadas usando GPS e o alinhamento entre as câmeras foi obtido por um alvo vertical no corpo da câmera. O método aplicado é baseado na estéreo-foto-grametria, uma técnica de reconstrução 3D baseada na triangulação dos pixels estéreos correspondentes em imagens retificadas. Foram analisados dois casos, o primeiro caso de verificação é uma nuvem cumulus com uma altura de base de nuvem de 1500 metros acima do nível do mar. A segunda verificação foi feita em duas camadas de nuvens: uma camada de cumulus fractus com uma altitude base de 1000 m de altitude e uma camada altocumulus estratiforme a uma altitude base de 2300 m de altitude. Para validar a calibração, utilizaram a *toolbox* OcamCalib que permite calcular os parâmetros intrínsecos da câmera seguindo o modelo de Scaramuzza, onde se faz uso de um tabuleiro de xadrez utilizado para referenciar a câmera. Como resultado da calibração, ambas as câmeras all-sky obtiveram uma projeção intermediária entre as projeções equidistantes e equisólicas, com a diferença aumentando significativamente além de um ângulo de incidência de 50° (desvio de 10 px/erro angular de $0,65^\circ$). Isso mostra que o uso de um modelo e método de calibração precisos é necessário se caso deseja usar as partes periféricas da imagem de todo o céu.

Wang, et al. (2016), experimentaram dois métodos para estimar a altura da base de nuvens utilizando um gerador de imagens desenvolvido na Universidade da Califórnia, San Diego, UCSD Sky Imager (USI). O gerador de imagens utilizado nestes experimentos foi desenvolvido especificamente para aplicações de previsão de energia solar de curto tempo, cujo qual, possui uma lente olho de peixe Sigma de 4,5 mm e oferece um campo de visão de 180° com 1748×1748 pixels cobrindo o hemisfério do céu. Os métodos aplicados foram o de Correlação de Séries Temporais, denominado TSC, que é baseado na correlação entre séries temporais de irradiância global horizontal observadas a nível do solo e uma série temporal de irradiância global horizontal modelada, gerada a partir de uma sequência de imagens do céu georretificadas para um conjunto candidato de alturas de base de nuvem. A altura de base de nuvem estimada é considerada a obtém o maior coeficiente de correlação. Já o outro método é o *Geometric Cloud Shadow Edge* (GCSE), cujo qual integra um método de detecção de rampa numérica para séries

temporais de irradiância global horizontal observadas a nível do solo, com geometria solar e de nuvens aplicadas às bordas das nuvens em uma imagem do céu. A fim de validar as mensurações, as alturas de base de nuvem obtidas, são comparados com um ceilômetro. Como resultado, verificaram que os dois métodos possuíram resultados semelhantes, sendo o TSC com a diferença quadrática média normalizada de 18,9% e o GCSE com 20,8% tem desempenho semelhante ao método GCSE com NRMSE de 18,9% versus 20,8%.

2.5 Síntese da Revisão da Literatura

Com este estudo, sobre modelos de previsão solar intra-hora, foi possível verificar a deficiência em relação à avaliação da eficiência dos métodos estudados. Em sua grande maioria, a avaliação de eficiência é de forma comparativa com o método de persistência. Conseqüentemente, não são capazes de quantificar a precisão e exatidão do sistema em termos absolutos. Foi possível entender também que a hibridização dos métodos, principalmente com a inserção em conjunto dos métodos de RNA e IA, estão cada vez mais frequentes atualmente, e requerem uma análise mais detalhada sobre a validação da eficiência. Sobre a revisão bibliométrica, também sobre o tema de previsão solar intra-hora, foi possível verificar que se trata tema muito atual, considerando que a primeira publicação encontrada a partir das palavras-chave usadas foi em 2012. Verificou-se que Estados Unidos e China são os países onde se encontra maior quantidade de publicações neste tema. A análise sobre publicações por países evidenciou-se também que o tema já está se espalhando pela Europa, isso tudo indica que os estudos nessa área ainda estão no início do desenvolvimento. Ao desenvolver este trabalho foi possível perceber que pesquisas voltadas à previsão de radiação solar intra-hora no Brasil encontram-se em fase de desenvolvimento, visto a dificuldade de encontrar uma grande quantidade de trabalho; por outro lado, foi possível identificar várias instituições que estão desenvolvendo pesquisas nessa área, trazendo assim uma perspectiva de crescimento no desenvolvimento deste tema no Brasil. Sobre o tema de métodos de mensuração de altura de base de nuvens utilizando câmeras, foi constatado que existem poucos trabalhos direcionado ao tema, sendo o primeiro destes levantados, publicado em 1996 e os demais de 2013 em diante, sendo possível deduzir uma retomada sobre o tema. Sobre os autores e origens das

publicações, sua grande maioria são norte americanas, sendo o autor com maior número de publicações sobre os temas aqui levantados, é Kleissl J. Com a revisão bibliográfica sobre métodos de mensuração de altura de base de nuvens utilizando câmeras, foi possível verificar que em sua grande maioria, o método utilizado para calibração de câmeras foi o proposto por Scaramuzza, cujo qual também será aplicado no modelo apresentado nesta dissertação. Outro ponto relevante, foi que em modelos que utilizam câmeras olho de peixe, os autores realizaram o procedimento de planificação/retificação das imagens.

Os levantamentos e análises apresentados na seção 2., são importantes para o entendimento da evolução dos principais temas relacionados a este trabalho aqui apresentado como um todo e as principais técnicas utilizadas. Nesta dissertação é apresentado um modelo para mensuração de altura de objetos no espaço, com resultados satisfatórios, cujo qual pode ser utilizado para mensuração de altura de base de nuvens, onde o diferencial encontra-se na não aplicação da planificação/retificação das imagens obtidas pelas câmeras olho de peixe.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Os seres humanos com o sentido da visão, são capazes de perceber o mundo em sua estrutura tridimensional de forma detalhada com aparente facilidade. Com a visão, são capazes de distinguir pessoas, interpretar emoções, visualizar sombras, definir profundidade de imagem, contar objetos de uma cena, dentre outras qualidades, ou seja, interpretar uma imagem em vários detalhes e extrair diversas informações de forma relativamente rápida (Szeliski, 2022).

Os pesquisadores dessa área empenham esforços em trazer essa percepção da visão humana para o meio computacional, desenvolvendo técnicas matemáticas para traduzir formas tridimensionais e aparência de objetos. Esses modelos já avançaram muito nas últimas décadas, por exemplo, modelos para definir um ambiente 3D já foram desenvolvidos e possuem resultados confiáveis. São técnicas que atingem os resultados a partir inúmeras fotografias parcialmente sobrepostas onde é aplicado a correspondência estéreo. No entanto, é buscado ainda a capacidade de um computador interpretar de forma detalhada uma cena, de forma minuciosa tal qual uma criança é capaz.

A visão computacional trata-se de um problema inverso, ou seja, empenha-se em traduzir a visão do mundo real em uma ou várias imagens, trata-se em traduzir as propriedades como formas, distribuição de cores e iluminação e sendo assim, difere da computação gráfica, cuja qual modela de forma computacional animações ou cenários, sejam eles reais ou não, para o mais próximo, visualmente falando, da percepção real.

Hoje a visão computacional já pode ser vista no dia a dia das pessoas, essa tecnologia já vem ganhando espaço no meio social principalmente pelo grande avanço em seu desenvolvimento nas últimas décadas, saindo assim da fase de pesquisa e desenvolvimento para aplicações sociais já usadas em larga escala de forma efetiva. Os produtos provenientes do estudo da visão computacional podem ser vistos como por exemplo em: em sistemas de reconhecimento óptico de caracteres aplicados em reconhecimento de placas de veículos; em logística, com a entrega autônoma de pacotes e coleta de peças por manipuladores robóticos; na medicina com imagens pré-operatórias e intraoperatórias; em veículos e aviões autônomos capazes de se deslocar de um ponto a outro sem a necessidade de um condutor, visto que a visão computacional traz uma varredura do ambiente e obstáculos para o veículo. Essas são só algumas de várias outras aplicações da visão computacional já atuando de forma efetiva e satisfatória no auxílio das necessidades da sociedade (Szeliski, 2022; Fusiello et al, 2000).

Neste capítulo vamos abordar sobre os conceitos que permitem a formação da imagem computacional, formação de planos entre correlação de câmeras e correlação de imagens. Vale ressaltar que a metodologia aqui desenvolvida não requer o processo de remoção de distorção da imagem, típico das lentes olho de peixe, para imagens pinhole, nem a retificação das imagens originais, sendo está uma contribuição importante deste trabalho para a área. No entanto, os procedimentos para tal são apresentados para sua completude e também para melhor identificação desta contribuição.

3.1 FORMAÇÃO DA IMAGEM

O processo de formação de imagem em visão computacional inicia com a incidência de um raio de luz em uma câmera, onde esse raio passa por um orifício em um ângulo de abertura, atingindo uma tela ou plano de imagem onde o dispositivo fotossensível da câmera registra a intensidade da luz (Trucco et al, 1998). Os elementos básicos de uma câmera podem ser verificados na Figura 12.

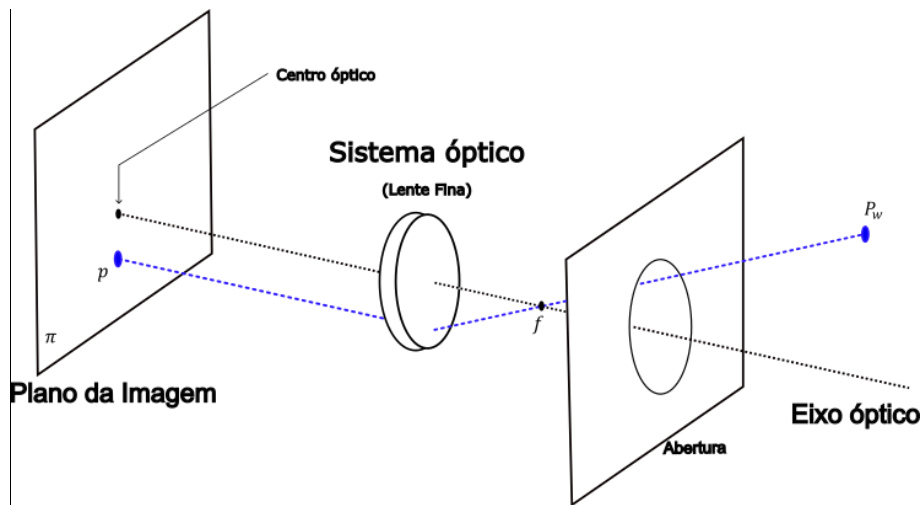


Figura 12: Elementos básicos de uma câmera.
 Fonte: Trucco; Verri (1998), modificado pelo autor.

Para que a imagem formada no plano esteja nítida, ou seja, que a imagem no plano da imagem, π , esteja em foco, todos os raios provenientes de um único ponto da cena, P_w , devem atingir um único ponto no plano da imagem, p . Caso isso não ocorra, a imagem formada estará espalhada sobre o plano de imagem e conseqüentemente gerará distorções.

Existem duas maneiras para formar imagens nítidas controlando a convergência dos raios. A primeira forma é utilizando uma câmera com o orifício de abertura reduzido a um ponto. Esse ponto, também chamado de *pinhole*, é suficiente para transpassar apenas um raio do ponto P , trazendo uma relação de um-para-um dos pontos da cena no plano. Esse sistema utilizando *pinhole* produz uma calibração ideal, porém por possuir uma abertura muito pequena ocasiona uma intensidade baixa da luz e a câmera captaria poucos raios de luz. Um exemplo de câmera *pinhole* ou perspectiva pode ser verificado na Figura 13. Caso a abertura fosse maior que o *pinhole*, o comportamento seria conforme a Figura 14. A segunda forma de controlar a convergência dos raios no plano de imagem com uma abertura maior capaz de obter uma maior incidência de feixes de luz, como pode ser verificado na Figura 15, é utilizando lentes, diafragmas, dentre outros componentes de um sistema óptico, dispostos em conjunto com o objetivo de convergir todos os raios de um mesmo ponto P da cena em um único ponto p do plano (Marques, 2007; Trucco et al, 1998).

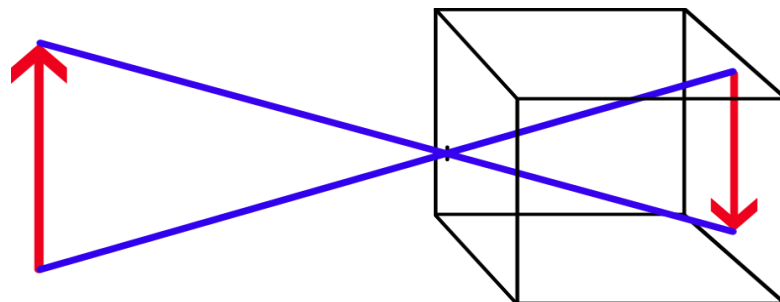


Figura 13: Câmera Pinhole.
Fonte: Elaborado pelo autor.

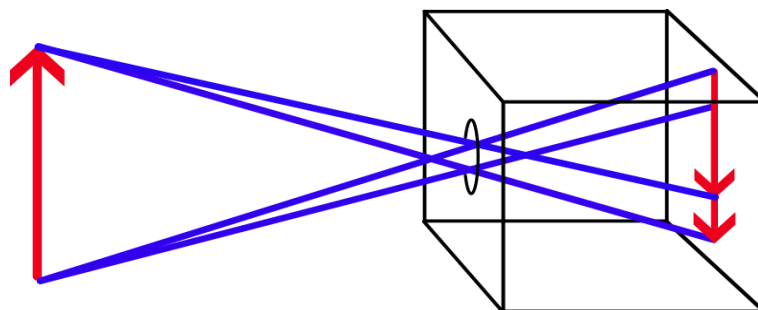


Figura 14: Câmera com abertura maior que um *pinhole* e sem lente.
Fonte: Elaborado pelo autor.

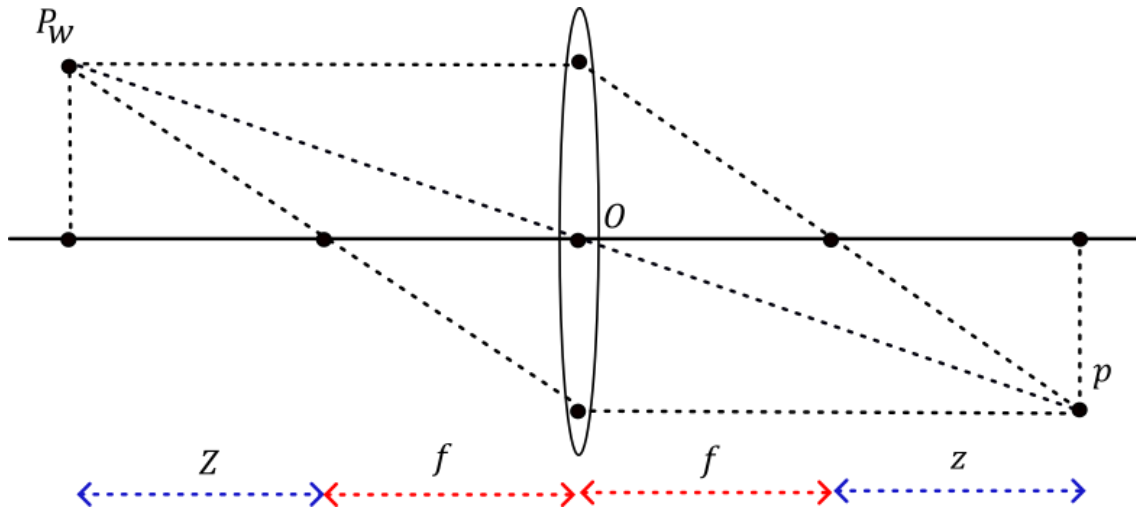


Figura 15: Exemplo de controle de convergência dos raios com a utilização de lente fina.

Fonte: Trucco; Verri (1998), modificado pelo autor.

A determinação do campo de visão, aqui definido como w , consiste na relação entre o diâmetro da lente e a distância focal, cuja qual é uma medida angular da posição do espaço 3D vista pela câmera. Onde w poder ser obtido pela seguinte relação:

$$\tan w = \frac{d}{2f} \quad (1)$$

3.2 TRANSFORMAÇÃO DE CÂMERA

O processo de transformação de câmera busca corresponder os pontos tridimensionais de uma cena real em suas respectivas projeções bidimensionais no plano da imagem. Sendo assim, é necessário fazer uma correlação entre as coordenadas 3D e suas respectivas correspondentes no plano 2D. Serão considerados 4 sistemas de coordenadas, sendo eles, o sistema de coordenadas do mundo (SCM), sistema de coordenadas da câmera (SCC), sistema de coordenadas da imagem (SCI) e o sistema de coordenadas em pixels (SCP). Nas seções futuras nas quais se explica o modelo de visão

estéreo proposto, o SCI e o SCP podem ser utilizados de forma indistinta (Marques, 2007; Trucco et al, 1998).

O SCM corresponde ao sistema descrito pelas coordenadas tridimensionais que definem uma referência espacial para o mundo real, permitindo a medição das posições e orientações dos objetos no espaço de cada ponto da cena. As coordenadas do ponto P_w neste sistema de coordenadas serão $[X_w, Y_w, Z_w]^T$.

A SCC é o sistema de coordenadas tridimensional com origem no centro óptico da câmera. As coordenadas desse sistema são $[X_c, Y_c, Z_c]^T = P_c$, onde X_c e Y_c são eixos paralelos ao plano da imagem e Z_c é coincidente ao eixo óptico.

O SCI é um sistema de coordenadas bidimensional que define a posição dos pontos na imagem capturada pela câmera, ou seja, são as coordenadas no plano de projeção. Vamos considerar $[x_c, y_c]^T$ como as coordenadas desse sistema e a sua origem é a projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção. Nesse sistema de coordenadas, serão diferenciadas as coordenadas em caso de uso das coordenadas com as distorções, $[x_{cd}, y_{cd}]^T$.

O SCP é um sistema de coordenadas bidimensional que define a posição dos pixels na imagem capturada pela câmera. Neste sistema de coordenadas, a origem é o canto superior esquerdo. As coordenadas para este sistema serão $[x_i, y_i]^T$.

Já discriminadas as coordenadas, deve ser feito as correspondências por meio de transformações desde as coordenadas do mundo até as coordenadas de pixel. Serão três transformações necessárias que serão demonstradas nas subseções seguintes e uma calibração de distorção das lentes será aplicada, visto que inicialmente trataremos de uma câmera *pinhole*. Uma ilustração de como é verificado os sistemas de coordenadas em cada ambiente pode ser verificado na Figura 16.

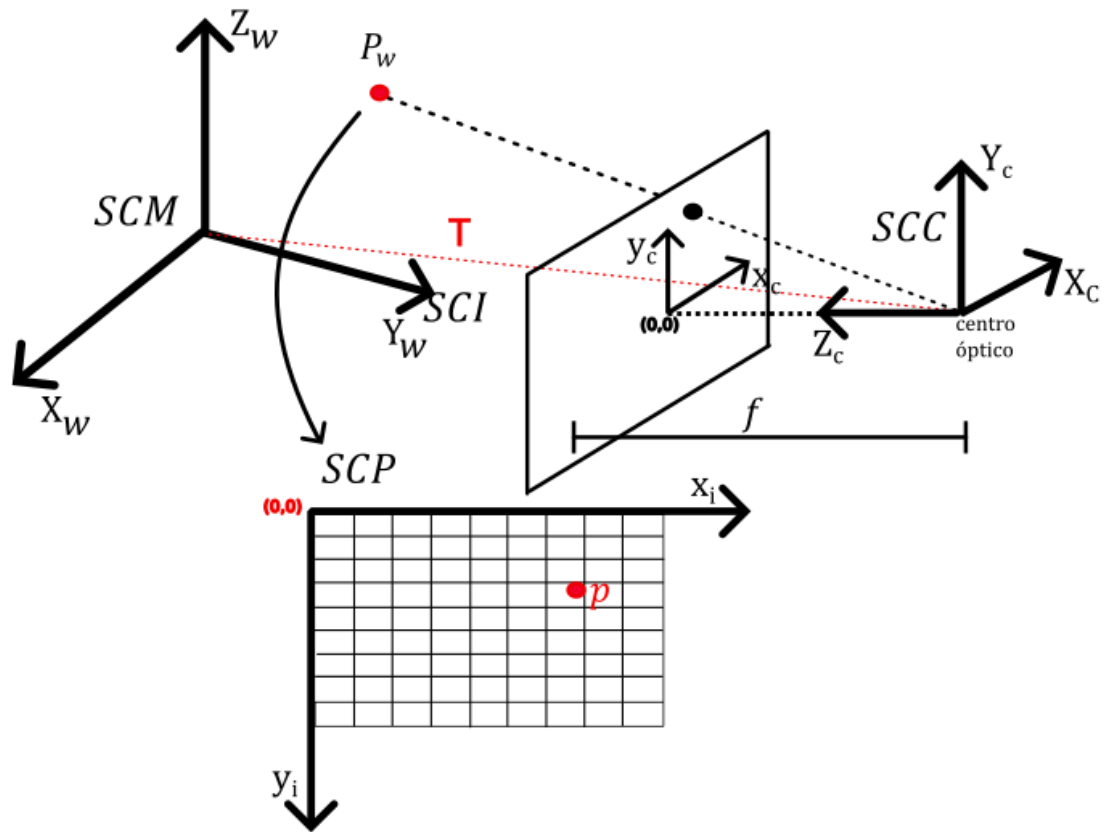


Figura 16: Sistemas de coordenadas em conjunto.
 Fonte: Marques (2007), modificado pelo autor.

3.2.1 TRANSFORMAÇÃO DO SCM PARA O SCC

A mudança do SCM para o SCC trata-se de estabelecer uma relação entre as coordenadas 3D do mundo e as coordenadas 3D da câmera. Para solucionar essa questão, é necessário fazer uma transformação de corpo rígido, composta pela matriz de rotação ortogonal R , que alinha os dois sistemas, e pelo vetor de translação T , que define a posição relativa entre as origens de ambos os sistemas (Marques, 2007; Trucco et al, 1998).

Logo, as coordenadas de um ponto P_w no SCM podem ser transformadas para o SCC pela seguinte equação matricial,

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T \quad (2)$$

ou

$$P_c = RP_w + T \quad (3)$$

onde

$$T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

e

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Os parâmetros de rotação e translação dados pelas matrizes R e pelo vetor T , são definidos como parâmetros extrínsecos, onde a matriz de rotação é 3x3 com três graus de liberdade, devido às restrições de rotação.

3.2.2 TRANSFORMAÇÃO DE SCC PARA SCI

Nesta transformação se estabelece a relação entre as coordenadas 3D da câmera e as coordenadas 2D do plano da imagem, é uma transformação projetiva de $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$, não inversível, já que um ponto da imagem poderá mapear infinidade de pontos no espaço 3D do SCC (Marques, 2007; Trucco et al, 1998).

Por semelhança de triângulos as coordenadas da imagem de uma câmera *pinhole*, podem ser definidas como

$$x_c = f \frac{X_c}{Z_c}, \quad y_c = f \frac{Y_c}{Z_c} \quad (6)$$

de forma matricial e em coordenadas homogêneas se tem,

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{Y_c}{Z_c} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde a distância focal f deverá estar em milímetros. A Equação (7) pode se escrever da seguinte forma,

$$\lambda \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

fazendo $\lambda = Z_c$ se mapeia de forma exata P_c , e mudando seu valor se mapeiam infinitos pontos localizados sobre a reta imaginaria definida pelo vetor $[x_c, y_c, f]^T$

3.2.3 TRANSFORMAÇÃO DO SCI PARA SCP

Esta transformação do tipo $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, relaciona as coordenadas no plano de formação da imagem, que corresponde ao plano do sensor que quantifica a luz refletida pelos objetos da cena da imagem de acordo com a energia luminosa por unidade de área (irradiância de imagem). Esse sensor é constituído por uma matriz retangular de sensores fotossensíveis que formam o seu plano, cujas linhas e colunas podem ter algum tipo de deformação, que produzem distorção na imagem que deve ser levado em consideração na transformação de coordenadas (Marques, 2007; Trucco et al, 1998). Essa deformação trata-se de um desalinhamento entre as linha e colunas da matriz, onde as linhas verticais não são perfeitamente perpendiculares às linhas horizontais e uma inclinação é formada conforme a Figura 17.

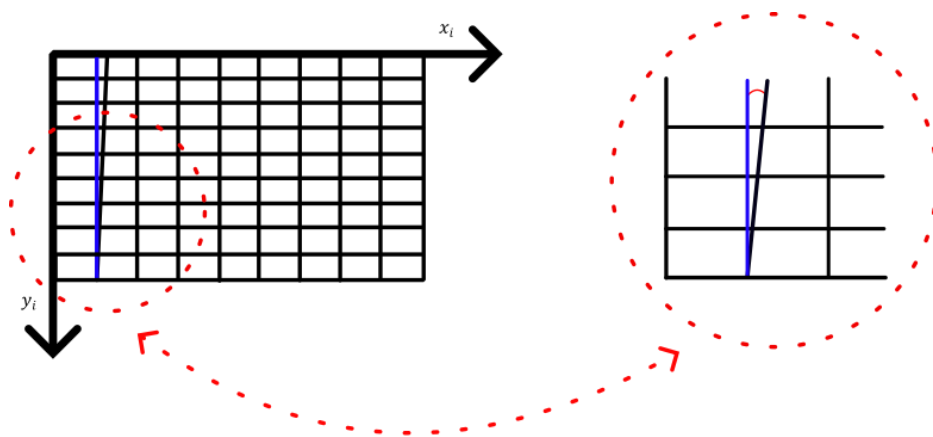


Figura 17: Deformação no desalinhamento entre as linhas e colunas da matriz do sensor de formação da imagem.

Fonte: Marques (2007), modificado pelo autor.

A relação entre o SCC e o SCI está dada por,

$$x_c = (o_x - x_i)s_x \quad e \quad y_c = (o_y - y_i)s_y \quad (9)$$

onde:

- s_x e s_y tratam-se do fator de escala que definem o comprimento do pixel no eixo x e y , definido em $\frac{mm}{pixel}$.
- τ trata-se da tangente do ângulo formado pela deformação da matriz de pixels entre a perpendicular das linhas com as colunas.
- o_x e o_y referem-se às coordenadas da projeção ortogonal do centro óptico no plano da imagem, definido em pixels.

Considerando a deformação descrita e utilizando a notação de coordenadas homogêneas, a transformação do SCI para o SCP pode ser expressa na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_x^{-1} & \tau & o_x \\ 0 & -s_y^{-1} & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.2.4 TRANSFORMAÇÃO DO SCM PARA SCP

Após definirmos as transformações dos sistemas de coordenadas nas seções anteriores, desde um ponto no SCM para o SCP, etapa por etapa, podem ser obtidas duas matrizes que permitirão mapear, de forma quase direta, um ponto P_w em um ponto de imagem em pixel, $p = [x_i, y_i, 1]^T$ (Marques, 2007; Trucco et al, 1998).

Reescrevendo a equação (2) resulta,

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

substituindo a equação (10) na equação (8) se tem,

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} -s_x^{-1} & \tau & o_x \\ 0 & -s_y^{-1} & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

e finalmente introduzindo a equação (11) na equação (12) se obtém a relação ente as coordenadas externas SCM e as coordenadas de pixel SCP.

$$\lambda \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} -fs_x^{-1} & f\tau & o_x \\ 0 & -fs_y^{-1} & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{M_{int}} \overbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix}}^{M_{ext}} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

λ pode ser considerado como o fator de normalização e, portanto, a equação (13) se reescreve como,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z = \lambda \end{bmatrix} = M_{int} M_{ext} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

assim, $x_i = x/z$ e $y_i = y/z$.

A matriz M_{int} é a matriz de parâmetros intrínsecos da câmera, a saber f, τ, s_x, s_y, o_x e o_y , estes parâmetros definem as características ópticas, geométricas e digitais da câmera.

A matriz M_{ext} é a matriz de parâmetros extrínsecos da câmera, formada pela matriz de rotação e o vetor de translação $[R|T]$.

3.2.5 DISTORÇÃO DAS LENTES

Admite-se uma câmera com uma abertura maior que a câmera *pinhole*, conseqüentemente será necessário o uso de uma lente. Essa mudança ocasiona a ruptura de uma abordagem mais simples para uma que considere as distorções ocasionadas pela lente e se aproxime de seu comportamento real. Contudo, modelar o comportamento exato de uma lente é impraticável, visto a sua complexidade, usualmente é considerado apenas as distorções radiais (Marques, 2007). Um possível comportamento de uma

distorção radial pode ser verificado na Figura 18, efeito que é intencional e muito maior nas câmeras olho de peixe.

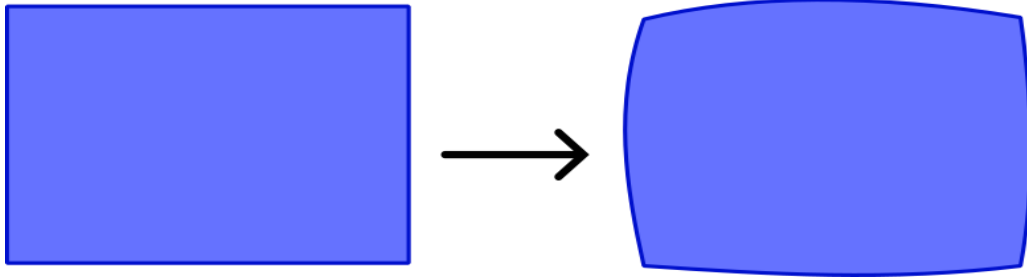


Figura 18: Distorção radial.
Fonte: Marques (2007), modificado pelo autor.

Para considerar essa distorção, onde $P_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$ era projetado no ponto $p_i = [x_i, y_i, 1]^T$, com a distorção, será projetado em $p_d = [x_{id}, y_{id}, 1]^T$.

Admitindo a distorção, p_d será representado da seguinte forma:

$$p_d = p_i + d \quad (15)$$

onde,

$$d = [d_x, d_y]^T \quad (16)$$

e,

$$d_x = x_{id}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (17)$$

$$d_y = y_{id}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (18)$$

$$r = \sqrt{x_{id}^2 + y_{id}^2} \quad (19)$$

3.3 PROPRIEDADE DO PONTO DE VISTA EFETIVO ÚNICO E CÂMERAS OMNIDIRECIONAIS

A seguinte seção está baseada no texto de Scaramuzza (2008) e Scaramuzza et al. (2006) e será abordado uma visão geral sobre a propriedade do ponto de vista efetivo único e tipos de câmeras omnidirecionais, incluindo a câmera com lentes olho de peixe, câmera utilizada para o desenvolvimento do modelo apresentado neste trabalho.

As câmeras omnidirecionais, são câmeras que possuem um campo de visão em todas as direções e que sua geometria não pode ser descrita usando o modelo convencional de *pinhole* devido à distorção proveniente dos tipos de lentes e espelhos aplicados a este sistema.

3.3.1 A PROPRIEDADE DO PONTO DE VISTA EFETIVO ÚNICO

A propriedade do ponto de vista efetivo único, pode ser observada em sistemas ópticos conhecidos como sistemas de projeção central. Nestes sistemas, todo raio óptico, que é refletido pela superfície do espelho ou lente, se cruza em um único ponto. Quando um sistema não atende a essa propriedade, ele é chamado de sistema não central. A câmera perspectiva *pinhole* é um exemplo de sistema de projeção central onde o ponto efetivo único se encontra sobre o eixo óptico, na Figura 19 se apresenta de forma gráfica este conceito.

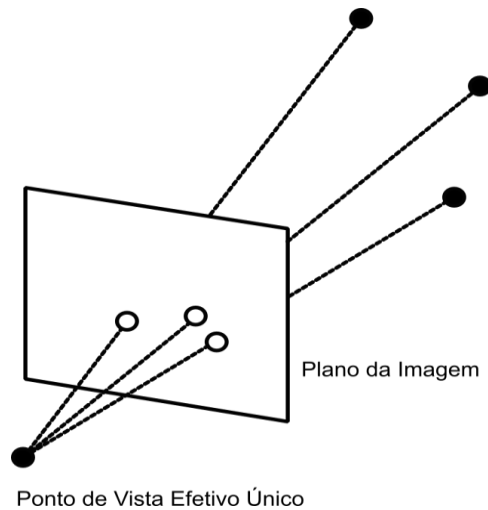


Figura 19: Exemplo de câmera perspectiva *pinhole* onde satisfaz a propriedade para um sistema de projeção central.

Fonte: Scaramuzza (2008), modificado pelo autor.

Os sistemas ópticos com projeção central, permitem a geração de imagens com câmeras omnidirecionais em perspectiva sendo geometricamente corretas, pois, devido à propriedade do ponto de vista efetivo único, cada pixel na imagem capturada mede a irradiância da luz que passa pelo ponto de vista em uma direção específica. Sabendo dessa propriedade e sabendo da geometria omnidirecional da câmera, a irradiância medida em cada pixel pode ser definida e mapeada em um plano de imagem, formando assim uma imagem de perspectiva planar. Outra característica importante de sistemas de projeção central é que nesses sistemas pode ser aplicado a teoria da geometria epipolar, teoria que será abordada na seção 3.4.

3.3.2 GEOMETRIA DAS CÂMERAS OMNIDIRECIONAIS CENTRAIS

As câmeras omnidirecionais podem ser de sistema de projeção central ou não central. Os sistemas de projeções não centrais são normalmente compostos por uma combinação de espelho e câmera perspectiva e não possui um ponto de vista efetivo único, o que significa que os raios ópticos não interceptam em um único ponto no eixo óptico. Por outro lado, o sistema de projeção central é constituído por duas classificações de câmeras, as câmeras catadióptricas e as dióptricas. As câmeras catadióptricas são câmeras que combinam espelho e lente e as dióptricas apenas lentes, por exemplo, a câmera olho de peixe.

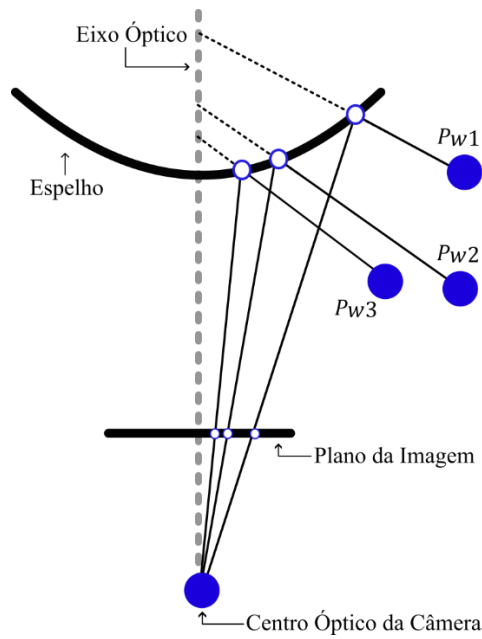


Figura 20: Câmera Onmidirecional não central.
 Fonte: Scaramuzza (2008), modificado pelo autor.

Em câmeras perspectivas de lente fina com aplicação de espelho hiperbólico em um sistema de projeção central, o centro óptico da câmera deve ser coincidente ao foco da hipérbole, garantindo assim, a reflexão dos raios para um único ponto. O exemplo do comportamento desta câmera pode ser verificado na Figura 21.

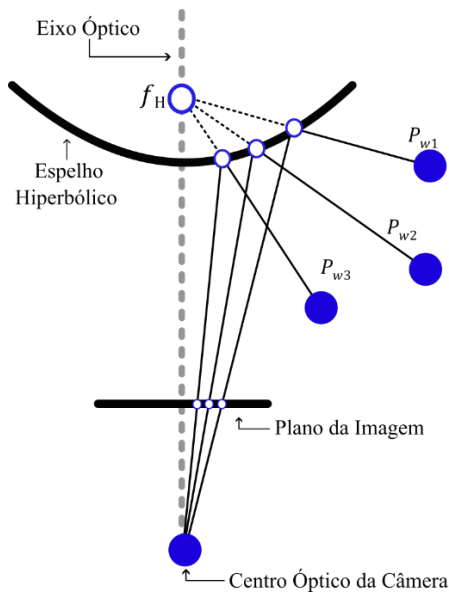


Figura 21: Câmera omnidirecional com lente fina e espelho hiperbólico.
 Fonte: Scaramuzza (2008), modificado pelo autor.

Em câmeras catadióptricas que utilizam espelho parabólico, deve ser utilizado uma lente ortográfica entre a câmera e o espelho, visto que neste caso, os raios refletidos para a câmera pelo espelho, são paralelos ao eixo óptico da câmera, sendo assim, necessário a lente para que convirja os raios para o centro óptico. Um exemplo do comportamento deste sistema pode ser verificado na Figura 22.

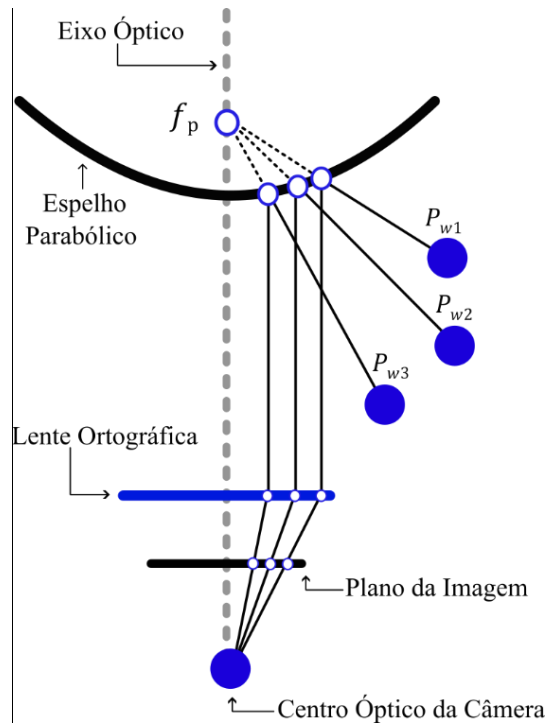


Figura 22: Câmera com espelho parabólico e lente ortográfica.
 Fonte: Scaramuzza (2008), modificado pelo autor.

Por fim, as câmeras que utilizam lentes olho de peixe são uma alternativa para obter um campo de visão amplo ou de grande angular, sem a necessidade de espelhos. Essas lentes, instaladas à cima do sensor óptico da câmera, podem trazer um campo de visão para a câmera, de até 190° de abertura. As câmeras que utilizam lentes olho de peixe não são exatamente sistemas centrais, mas seu conjunto traz resultados característicos que se aproximam muito da propriedade do ponto de vista efetivo único e, portanto, podem ser modeladas como tais. A Figura 23 apresenta uma imagem da complexa composição de lentes que podem configurar uma câmera olho de peixe. Maiores detalhes podem ser encontrados em Kumler e Bauer (2000).

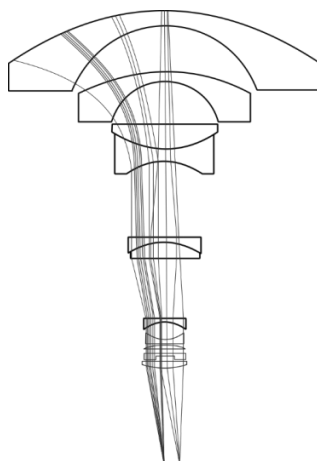


Figura 23: Comportamento dos feixes de luz na câmera com lente olho de peixe.
Fonte: Scaramuzza (2008), modificado pelo autor.

3.4 GEOMETRIA EPIPOLAR

Esta geometria é normalmente motivada pela procura de pontos correspondentes na estereoscopia. Essencialmente, a geometria epipolar entre duas vistas, é a geometria da intersecção dos planos de imagem de ambas as câmeras com os planos (feixe de planos) que têm a linha de base, a qual une os centros ópticos das câmeras, como eixo do feixe planos (Hartley e Zisserman, 2004). A Figura 24 apresenta, de forma gráfica, o conceito anterior. O **epipolo** de cada câmera é o ponto de intersecção da linha que une os centros das câmeras (a linha de base) com o plano da imagem da respectiva câmera, e pode ser interpretado como a vista do centro de uma câmera desde a outra câmera. O **plano epipolar** é um plano que contém a linha de base, e esta linha trata-se do eixo do feixe de planos epipolares que poderão ser definidos a partir de um ponto comum às câmeras (Figura 25). A intersecção de um plano epipolar com o plano da imagem definem uma **linha epipolar** e todas estas linhas se intersectam no epipolo. Um plano epipolar intersecta os planos de imagem esquerdo e direito em linhas epipolares, e define a correspondência entre as linhas (Hartley e Zisserman, 2004). Um objeto que esteja em um determinado plano epipolar aparecerá na sua correspondente linha epipolar na imagem de cada câmera (Figura 26).

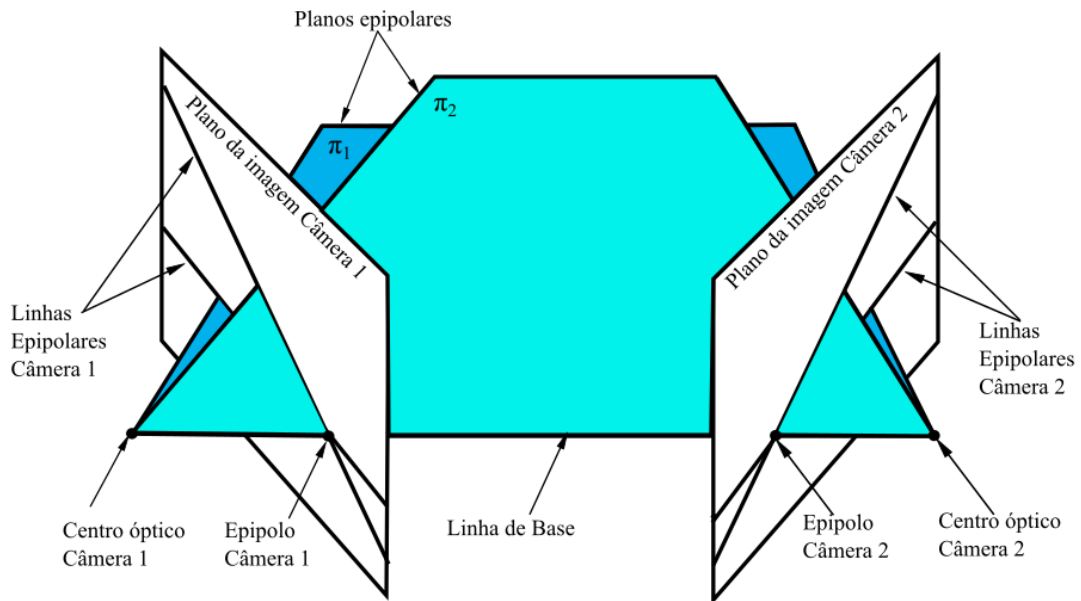


Figura 24: Geometria epipolar.
 Fonte: Hartley e Zisserman (2004), modificado pelo autor.

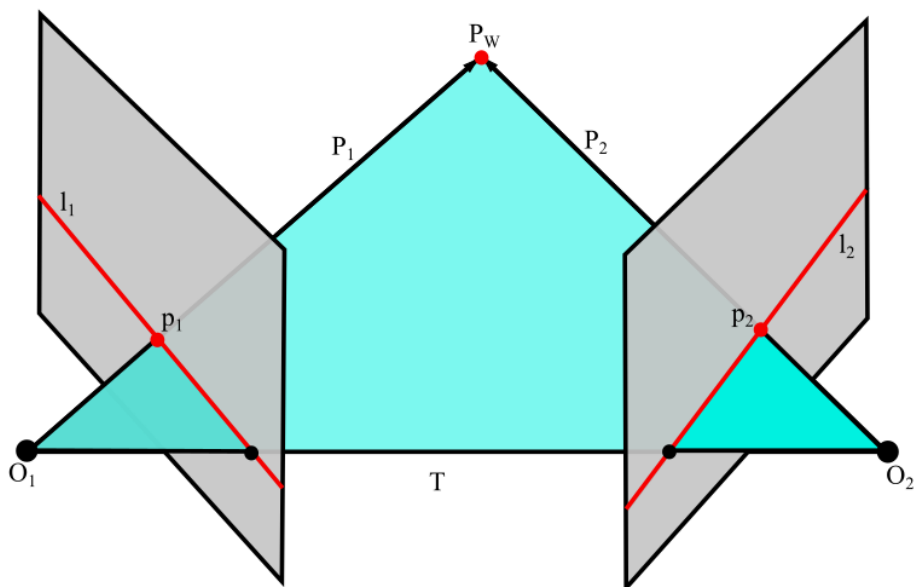


Figura 25: Geometria epipolar definida por um ponto no espaço.
 Fonte: Hartley e Zisserman (2004), modificado pelo autor.

A partir da restrição epipolar, é possível resolver o problema em 2D de correspondência de pontos em imagens de uma mesma cena de vistas diferentes (Figura 26), em um problema de procura 1D.

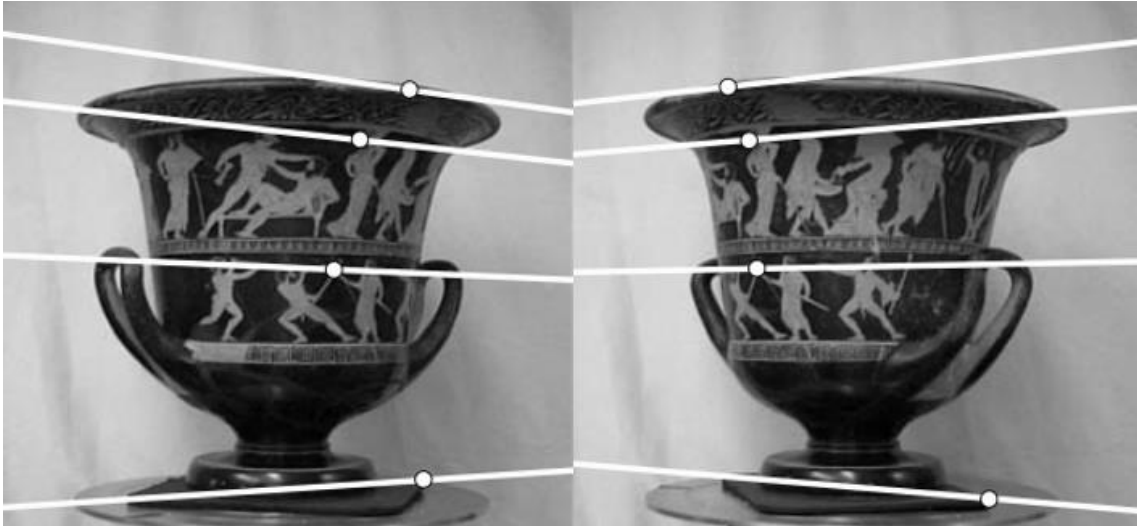


Figura 26: Linhas epipolares e pontos correspondentes.
 Fonte: Hartley e Zisserman (2004).

Para explicar de forma resumida a transformação de um problema de correspondência de pontos 2D num problema de procura 1D são apresentadas as seguintes definições que podem ser encontradas com maior detalhamento no livro de Trucco e Verri (1998).

Partindo da condição de coplanaridade entre os dois vetores definidos pelo ponto $P_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$ no espaço 3D e os centros ópticos das câmeras,

$$(P_1 - T)^T \cdot (T \times P_1) = 0 \quad (20)$$

sendo

$$P_2 = R \cdot (P_1 - T) \Rightarrow R^T \cdot P_2 = (P_1 - T) \quad (21)$$

Como a matriz de rotação trata-se de uma matriz ortogonal, sua inversa é igual sua transposta.

Assim é possível encontrar a **matriz essencial E** que define a relação entre o vetor P_1 e P_2 , e define uma relação entre os parâmetros extrínsecos (R, T) do sistema de visão estéreo e a condição de coplanaridade conforme equação (22) em unidade de mm (SCC)

$$P_2^T \cdot E \cdot P_1 = 0 \quad (22)$$

Também permite elaborar as seguintes relações entre os pontos em coordenadas de imagem ($p_{c,1}$ e $p_{c,2}$),

$$p_{c,2}^T \cdot E \cdot p_{c,1} = 0 \quad (23)$$

A matriz essencial E estabelece a relação no sistema de coordenadas de câmera, mas é necessário encontrar uma relação no sistema de coordenadas da imagem, e isso é possível através da **matriz fundamental F** dada pela relação da equação (24),

$$F = (M_2^{-1})^T \cdot E \cdot M_1^{-1} \quad (24)$$

A matriz F estabelece uma relação entre os pontos em coordenadas de pixel $p_i(p_{i,1}$ e $p_{i,2})$ e os parâmetros extrínsecos e intrínsecos (f, s_x, s_y, O_x, O_y) do sistema de visão estéreo, conforme a equação (25),

$$p_{i,2}^T \cdot F \cdot p_{i,1} = 0 \quad (25)$$

Existem vários métodos descritos em Hartley e Zisserman (2004, cap. 11) para obter a matriz F , podendo ser calculada a partir de sete ou mais correspondências de pontos entre as imagens estéreo.

3.5 RETIFICAÇÃO DE IMAGENS

Conforme descrito anteriormente, pode-se perceber que a geometria epipolar de um par de câmeras está implícita na pose relativa e nas calibrações das câmeras. Uma vez que esta geometria tenha sido computada a partir da matriz E ou F , podemos utilizar a linha epipolar correspondente a um pixel numa imagem para restringir a procura do pixel correspondente na outra imagem. Uma forma de fazer é utilizar um algoritmo de correspondência, selecionando uma janela $n \times n$ com centro no pixel de interesse de uma das imagens e correlacionar apenas as localizações ao longo da linha epipolar da outra imagem. Caso as câmeras não estejam alinhadas tanto na horizontal quanto na vertical e

com seus centros ópticos colineares (sistema estéreo simples) a procura será um problema 2D. Entretanto, pode-se obter um algoritmo mais eficiente retificando as imagens, de forma que as linhas epipolares conjugadas se transformem em linhas horizontais colineares em ambas as imagens (Trucco e Verri, 1998; Fusiello et al., 2000; Hartley and Zisserman, 2004; Szeliski, 2022), conforme apresentado na Figura 27.

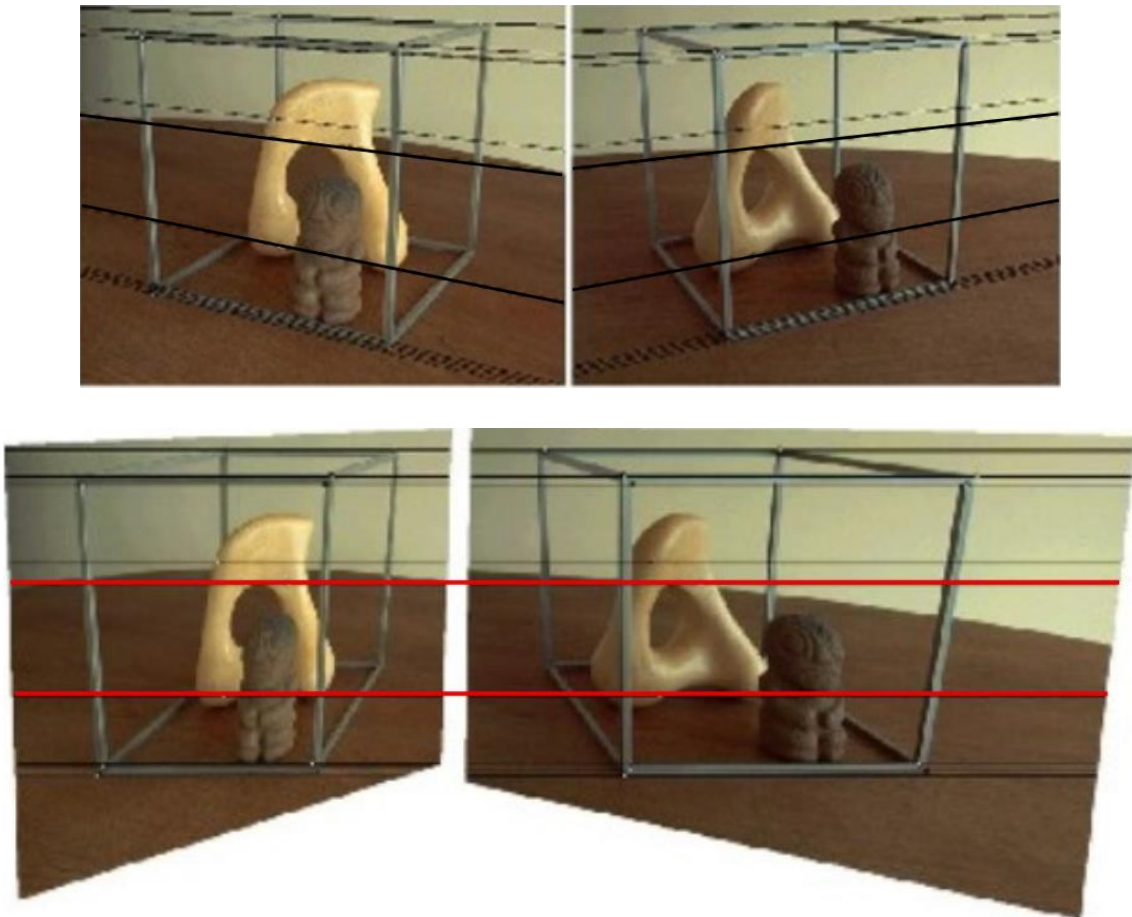


Figura 27: Imagens estéreo sem retificar (acima) e imagens após retificação (abaixo).
Fonte: Szeliski (2022), modificado pelo autor.

A questão é encontrar uma transformação projetiva da imagem que transforme o epipolo num ponto no infinito, particularmente em $[1, 0, 0]^T$ o que equivale a estar localizado sobre o eixo x , já que as retas epipolares devem ser transformadas em retas paralelas ao eixo x .

Assim a retificação das imagens pode ser computada segundo os seguintes passos:

- 1) Determinar 8 pontos correspondentes entre as duas imagens. Pode ser manualmente ou por meio de algum algoritmo de detecção de correspondências automáticos.
- 2) Utilizar o método dos oito pontos ou outro mais robusto como RANSAC (*Random sample consensus*) para calcular a matriz F.
- 3) Calcular a matriz E a partir da equação (26),

$$E = M_2^T \cdot F \cdot M_1 \quad (26)$$

- 4) Utilizar o método de decomposição em valores singulares (SVD) para decompor a matriz E em,

$$E = UDV^T \quad (27)$$

e logo teremos quatro soluções possíveis que deverão ser verificadas para achar a solução correta de R e T,

$$R_1 = UWV^T, R_2 = UW^TV^T, T_1 = U_3 \text{ e } T_2 = -U_3 \quad (28)$$

onde U_3 é a coluna 3 da matriz U resultante da decomposição de E.

W é uma matriz ortonormal,

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

A comprovação do procedimento anterior é detalhada no livro de Hartley e Zisserman (2004, cap. 9.6).

- 5) Uma vez encontrada a matriz de rotação R relativa a ambas as câmeras, deve-se rotacionar a imagem da câmera 2 ou da direita. Portanto, é necessário encontrar a matriz de transformação $R_{rect} = [e_1, e_2, e_3]$ onde os três vetores devem ser ortogonais entre si. Sendo assim, e_1 é orientado na mesma direção que o vetor de translação T, e_2 é restringido a ser ortogonal a e_1 e ao eixo óptico esquerdo da câmara e, conseqüentemente, $e_3 = e_1 \times e_2$. Assim se assume que,

$$R_{cam1} = R_{rect} \text{ e } R_{cam2} = R \cdot R_{rect} \quad (30)$$

e se aplicam ambas as transformações a todos os pontos de ambas as imagens da seguinte forma,

$$R_{cam1} \cdot [x_i, y_i, f] = [x'_i, y'_i, f'] \text{ (imagem retificada)}. \quad (31)$$

6) Finalmente, poderá ser necessário reescalar,

$$[x''_i, y''_i, f] = \frac{f}{f'} [x'_i, y'_i, f'] \text{ com } f \text{ em pixel}. \quad (32)$$

As etapas 5 e 6 deverão que ser aplicadas a imagem da câmera 2 com R_{cam2} .

A geometria retificada resultante converte o sistema de visão estéreo num problema de visão estéreo simples, onde os eixos ópticos (z) e (y) de ambas as câmeras se encontram paralelos e os eixos x colineares. Isso conduz a uma relação inversa muito simples entre as profundidades 3D $Z = h$ e a disparidades $d(x,y)$,

$$d(x, y) = \left| [x''_i - x'_i, \overbrace{y''_i - y'_i}^0] \right| = f \frac{|T|}{Z} \quad (33)$$

O modelo proposto de visão computacional estéreo com câmeras olho de peixe, que será descrito na seguinte seção, foi pensado para evitar o procedimento de retificação e o procedimento de planificação da imagem (*undistortion*), este último normalmente requerido para eliminar a distorção radial própria deste tipo de câmera, com a intenção de converter a imagem circular numa imagem retangular similar à obtida por uma câmera perspectiva ou *pinhole*. Ambos os procedimentos além de introduzir complexidade ao processamento introduzem erros, já que as novas imagens geradas serão produto de uma sequência de transformações, cujas matrizes e coeficientes são obtidos por métodos de minimização.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será abordado sobre o método para calibração das câmeras e o modelo de visão estéreo com câmeras olho de peixe, utilizados neste trabalho. Será apresentado, também nessa seção, a montagem física assumida para o sistema experimental e as especificações dos principais instrumentos que compõe todo o experimento.

4.1 CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS

Inicialmente é necessário realizar a calibração das câmeras olho de peixe, já que a diferença dos modelos *pinhole*, a lente é curva e, portanto, sua distância focal (f) mudará em função do raio, que é função das coordenadas dos pixels da imagem ($r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$). A Figura 28 mostra o modelo da lente olho de peixe de forma simplificada. Para determinar $f(r) = a_0 + a_1r + \dots + a_n r^n$ é utilizado o algoritmo desenvolvido por Scaramuzza et al. (2006).

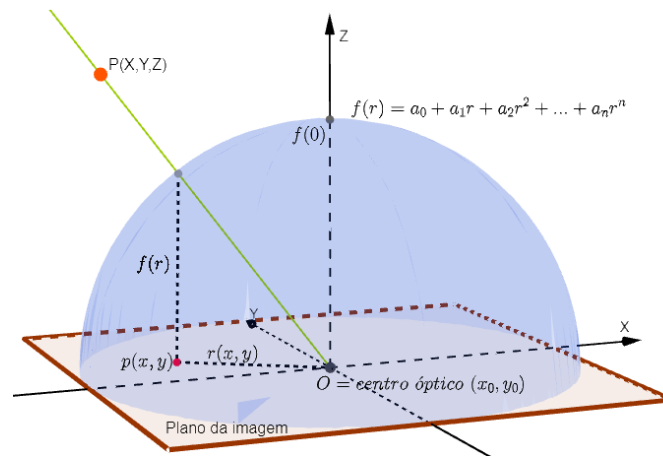


Figura 28: Modelo da lente olho de peixe.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de câmera omnidirecional de Scaramuzza (assim conhecido na literatura) aproxima a curvatura dos espelhos da câmera omnidirecional, por uma função polinomial a partir de várias fotos de um tabuleiro de xadrez em diversas posições em relação a câmera. Este modelo se encontra disponível para ser utilizado com Matlab (*OcamCalib toolbox*). Vale destacar que este permite calibrar qualquer câmara

omnidirecional central ou grande angular com um único ponto de vista efetivo, sendo assim, pode ser utilizado em uma câmera olho de peixe.

Para iniciar a Toolbox utilizada na calibração de ambas as câmeras, na “janela de comandos” do Matlab se inicializa com a chamada à função *ocam_calib*. Ao chamar a função, é apresentada a interface gráfica conforme a Figura 29. Para selecionar as fotos do tabuleiro de xadrez, deve-se escolher o botão *Read names*.

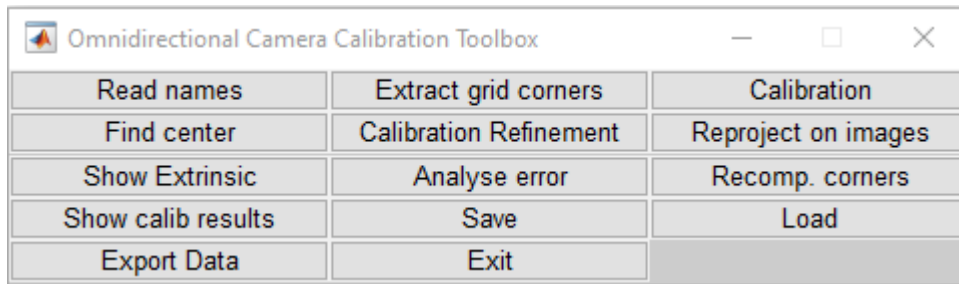


Figura 29: Interface *Ocam_Calib* toolbox.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 31 são apresentadas algumas das fotos utilizadas para a calibração das câmeras olho de peixe, no total foram 20 imagens para cada câmera. Após carregadas as imagens, utilizou-se o *Extract grid corners*. Esta função detecta os vértices dos quadriláteros do tabuleiro e descarta nas fotos nas quais não é possível serem identificados. Devem ser introduzidas as medidas em milímetros de ambos os lados dos quadriláteros. Na Figura 30 é apresentada uma das imagens na qual o modelo identificou os vértices do tabuleiro.

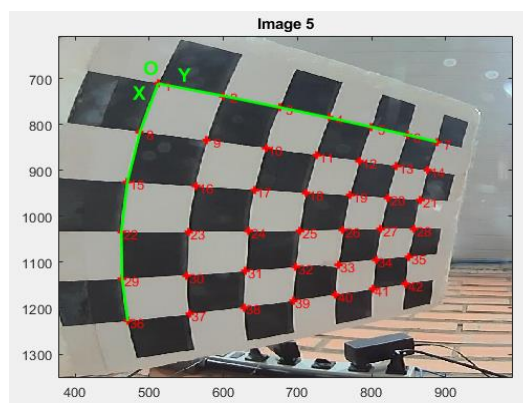


Figura 30: Imagem com os vértices identificados (eixos em pixel).
Fonte: Elaborado pelo autor.

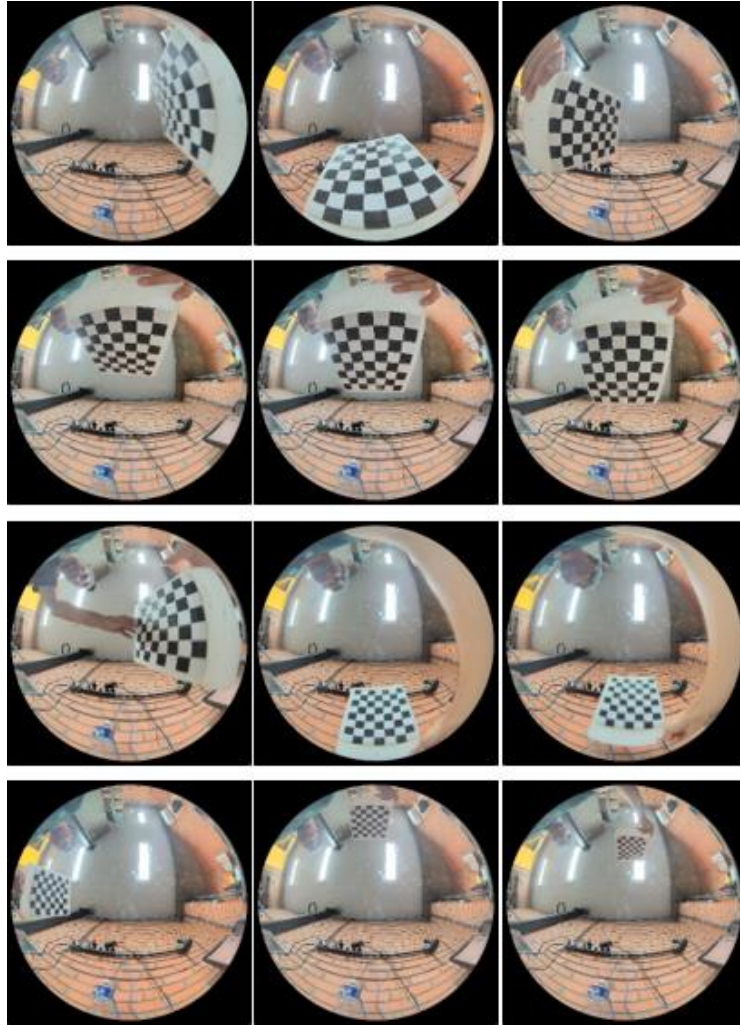


Figura 31: Fotos do tabuleiro em diferentes posições.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a extração das coordenadas em pixel dos vértices, segue-se para *Calibration*. Nesta etapa se deve escolher o grau do polinômio, sendo a 4ª ordem a sugerida pelo próprio autor, ao final retorna os 4 coeficientes. O gráfico da Figura 32, representa a curvatura da lente (considera-se que a lente é axissimétrica). Esta curvatura é côncava pois o modelo considera uma câmera catadióptrica, porém isso não afeta, só se deve fazer uma inversão de sinal nos coeficientes do polinômio $f(r)$. Ambos os gráficos da Figura 32 são expressos em função de $r(x, y)$, o primeiro indica como varia a distância focal em unidades de pixels e o segundo como varia o ângulo do raio óptico ou de forma inversa, o campo de visão em graus ($^\circ$). Observa-se que a variação da projeção do raio óptico é quase linear em função do raio. A Figura 32 se apresenta da forma original que a *toolbox* fornece, mas logo é modificada conforme a lente da câmera olho de peixe.

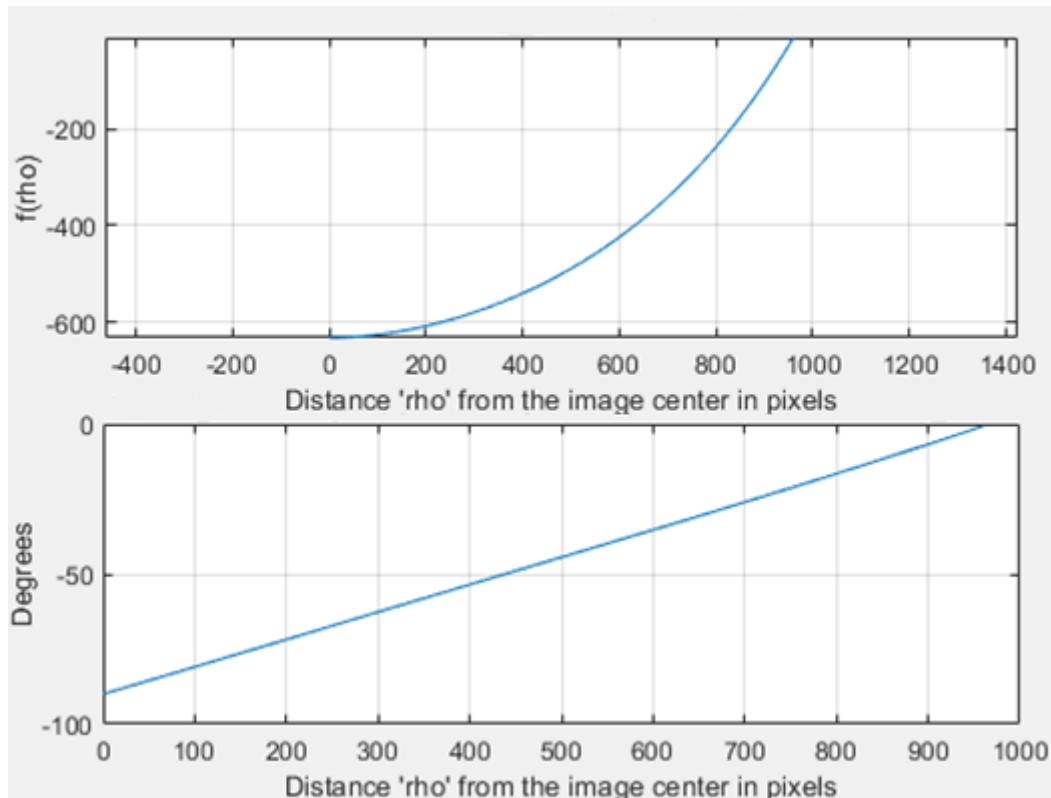


Figura 32: Variação da distância focal [pixel] em função do raio [pixel] (Acima).
 Variação do raio óptico [°] em função do raio [pixel] (Abaixo).
 Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 MODELO DE VISÃO ESTÉREO COM CÂMERAS OLHO DE PEIXE

Na literatura são encontradas diferentes abordagens sobre visão computacional estéreo, contudo, ainda são poucas envolvendo câmeras omnidirecional como é o caso específico das câmeras olho de peixe. Abraham e Förstner (2005) apresenta um modelo de retificação epipolar considerando o modelo *equi-distance* e *stereographic* como modelos de projeção olho de peixe e utilizam retificação das imagens após retirar as distorções (planificação das imagens). Khomutenko et al. (2017) propõem um método que é usado para modelar câmeras olho de peixe, projetando linhas retas em seções cônicas, cujas quais serão as curvas epipolares responsáveis por adaptar o algoritmo de correspondência Semi-Global a sistemas estéreos olhos de peixe e por fim, calcular uma correspondência estereoscópica direta densa sem distorção ou retificação olho de peixe. Cai e Qiao (2021) trazem um método de calibração de câmeras olho de peixe para sistemas estéreos onde utilizam o algoritmo de Levenberg-Marquarat para minimizar a

diferença entre 5 pontos correspondentes das duas imagens estéreo, considerando tanto os parâmetros intrínsecos quanto os extrínsecos de ambas as câmeras. Os métodos de calibração estéreo citados e, também, o proposto na API do OPENCV requerem a utilização de um padrão conhecido, como por exemplo, o tabuleiro de xadrez ou padrão de pontos, onde as dimensões destes são conhecidas. Trata-se de um procedimento similar ao de calibração das câmeras, anteriormente apresentado, mas com a diferença que neste caso o tabuleiro ou padrão de pontos, deverá ser visto simultaneamente pelas câmeras. Esta condição é difícil de atender, já que no sistema proposto, as câmeras ficarão a uma distância maior que 40 metros. Deve-se enfatizar que o modelo proposto não utiliza retificação nem planificação da imagem, o que o diferencia dos métodos mencionados.

A utilização de visão estéreo com câmeras olho de peixe aplicada à medição da altura da base de nuvens já foi utilizada com diferentes abordagens. Kassianov et al. (2005) propõe um método para encontrar o melhor alinhamento para as duas imagens do céu, assumindo uma única camada de nuvens à vista, alinhando as duas imagens do céu e em seguida, recuperar analiticamente a altura das nuvens a partir da distância em pixels entre os centros das duas imagens do céu. Na abordagem proposta por Nguyen e Kleissl (2014), os autores projetam as duas imagens em grades de céu, definidas pela latitude e longitude, com determinadas alturas e encontram a altura que alinha as duas imagens da melhor forma. Ambos os métodos, mencionados, se baseiam na correlação entre ambas as imagens o que implica assumir apenas uma camada de nuvens. Nguyen e Kleissl (2014) também propõe um método que permite determinar as diferentes alturas das nuvens utilizando correlação 2D sobre as linhas epipolares projetadas na imagem complementar estéreo, mas a correlação deverá ser realizada para achar cada ponto de interesse. Crispel e Roberts (2018) medem as alturas das nuvens, mas planificam as imagens e logo retificam as imagens das câmeras olho de peixe para obter um sistema estéreo simples de câmeras similar ao tipo de câmeras perspectivas.

Neste trabalho, se propõe um modelo de visão computacional estéreo com câmeras olho de peixe para determinar a altura das nuvens ou de objetos muito distantes, dentro de um amplo campo de visão, sobre as heurísticas de fácil implementação física e baixa complexidade computacional. Para atender estas, se optou por: i) eliminar o procedimento de retificação das imagens, que normalmente requer da transformação das imagens circulares distorcidas das câmeras olho de peixe em imagens sem distorção; ii) eliminar a projeção de linhas epipolares, mesmo que sobre as imagens originais. Assim,

foi concebida a seguinte configuração física do sistema conforme apresentado na Figura 33.

As câmeras são posicionadas de forma tal que o eixo x de ambas as câmeras fiquem colineares e os eixos ópticos (z), também de ambas as câmeras, paralelos apontando para o céu alinhados com o zênite. Na Figura 33, $P_w = [X_w, Y_w, Z_w]$, define um ponto no espaço 3D, sistema de coordenadas mundo (SCM) $[X_w, Y_w, Z_w]$, que está restrito à câmera 1 e, portanto, coincide com seu sistema de coordenadas de câmera (SCC). Esta restrição permite passar de forma direta de SCM para SCC. O plano da imagem das câmeras é definido pelo sistema de coordenadas de pixel (SCP) $[x_{1i}, y_{1i}]$ e $[x_{2i}, y_{2i}]$ para a câmera 1 e 2 respectivamente, O SCP poderá ser alternado ou referenciado como sistema de coordenadas de imagem SCI por simplicidade ou conveniência. Os centros das imagens $c_1 = [x_{10}, y_{10}]$ e $c_2 = [x_{20}, y_{20}]$ são os centros ópticos (em pixel) obtidos na calibração anterior, tal como as funções de projeção das câmeras em função dos raios ($f(r_1)_1, f_2(r_2)$), as quais se assume, são as distâncias focais variáveis. r_1 e r_2 são funções de p_{1i} e p_{2i} respectivamente, e T representa o vetor de translação da câmera 2 em relação à câmera 1.

O problema de encontrar a altura de um ponto P_w do objeto de interesse é resolvido através da triangulação entre os vetores $\overline{c_1 P_w}$, $\overline{c_2 P_w}$ e $\overline{c_1 c_2} = T$ que, obviamente, deverão ser coplanares. Em sistemas de visão estéreo simples, como resulta na maioria dos casos após eliminar a distorção das imagens e retificá-las, ou em sistemas onde ambas as câmeras vêm alinhadas e calibradas como um sistema estéreo simples, a medição da profundidade ou distância dos objetos é obtida da relação estabelecida na equação (33) resultando em,

$$Z = f \frac{|T|}{d(x)} \quad (34)$$

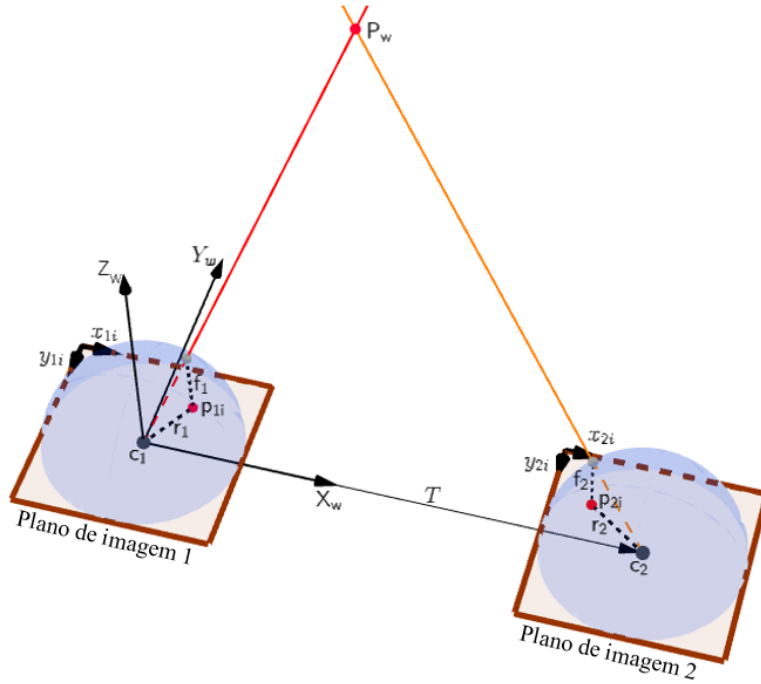


Figura 33: Sistema estéreo com câmeras olho de peixe.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Este modelo proposto é um sistema de visão estéreo simples olho de peixe, portanto, a equação (34) não pode ser aproveitada, principalmente porque se assume $f(r)$ variável e a disparidade d é função de δx_i e δy_i , que representam a diferença, em ambos os eixos, entre as imagens em unidade de pixel ($\delta x_i = x_{1i} - x_{2i}$, $\delta y_i = y_{1i} - y_{2i}$). Outro problema que se deve considerar na triangulação é o caso em que os vetores, por dificuldade no alinhamento de câmeras distantes, $\overline{c_1 P_w}$ e $\overline{c_2 P_w}$ não forem coplanares, e, conseqüentemente, não se interceptem. Isto é produto da grande quantidade de variáveis implícitas no modelo óptico (parâmetros intrínsecos) utilizado para modelar as câmeras, principalmente no tipo olho de peixe; aos parâmetros extrínsecos que aproximam as câmeras de um alinhamento ótimo entre as câmeras; aos erros próprios das câmeras e o mais crítico neste caso o erro humano na montagem física do sistema.

A Figura 34 expõe de forma gráfica o problema da não coplanaridade entre os vetores. Uma forma possível para resolver este problema é encontrar o menor segmento entre ambas as retas, equivalente a encontrar o segmento ortogonal entre ambas.

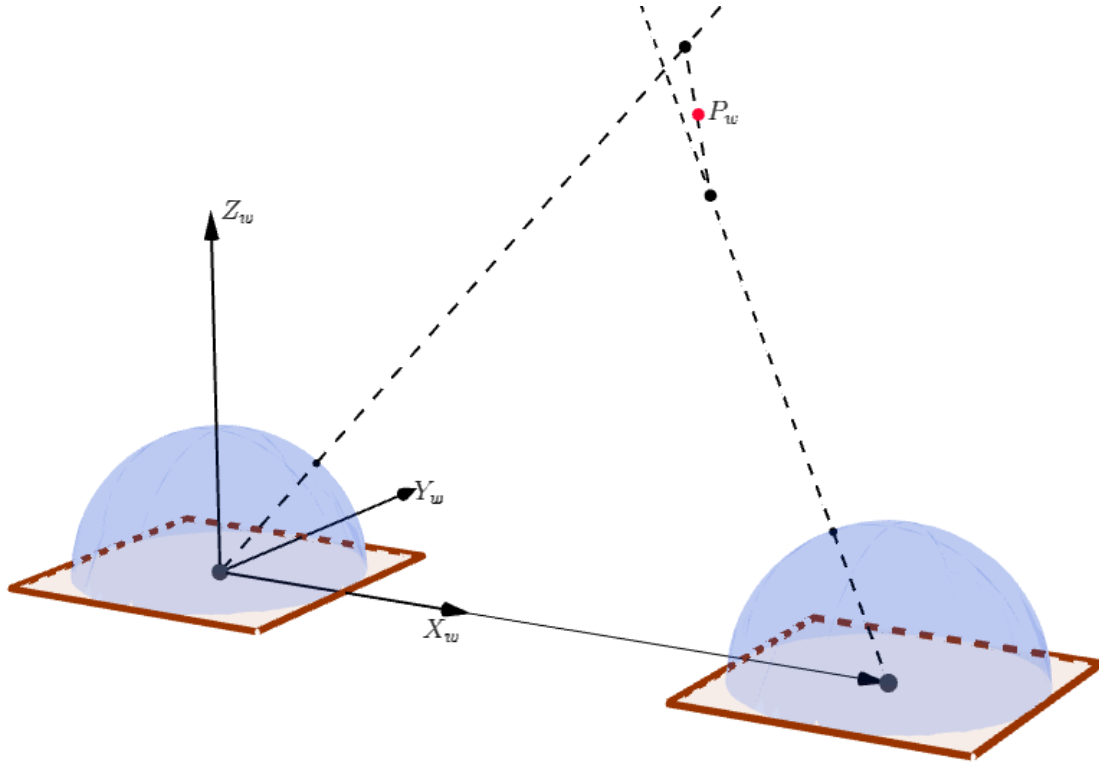


Figura 34: Sistema estéreo olho de peixe com raios não coplanares.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

A eliminação da etapa de transformação das imagens circulares em quadradas ou retangulares e da etapa de retificação das imagens têm o objetivo de reduzir o erro que nelas se produz. Para isso, se parte do modelo de câmeras omnidirecional propostos por Scaramuzza, que permite realizar uma transformação do espaço 2D para o 3D, estabelecendo a relação entre um determinado ponto na imagem e um vetor 3D que tem origem no centro da imagem. O modelo de câmera omnidirecional proposto trata o sistema como um sistema compacto único eliminando todas as lentes intermediárias que puderam existir nas câmeras,

$$P_w = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x_i - c_x \\ y_i - c_y \\ f(r) \end{bmatrix} \quad (35)$$

neste ponto, é importante enfatizar que este modelo trata P_w como um vetor no espaço 3D, portanto, este vetor é colinear ao vetor definido por $[x_i - c_x, y_i - c_y, f(r)]^T$, sendo $r = \sqrt{(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2}$ e λ um fator de escala que permitirá mapear os pontos sobre a reta definida pelo vetor P_w (Figura 33). Sendo assim, é possível estender este

modelo de câmara omnidirecional única para um modelo estéreo. Este sistema foi alinhado ao sistema de coordenadas da câmara 1, desta forma, o seguinte pressuposto é válido.

$$P_w = \lambda_1 \overbrace{\begin{bmatrix} x_{1i} - c_{1x} \\ y_{1i} - c_{1y} \\ f(r_1) \end{bmatrix}}^{C\grave{a}m\grave{e}r\grave{a} 1 \quad v_1} = \lambda_2 [R] \overbrace{\begin{bmatrix} x_{2i} - c_{2x} \\ y_{2i} - c_{2y} \\ f(r_2) \end{bmatrix}}^{C\grave{a}m\grave{e}r\grave{a} 2 \quad v_2} + [T]^T \quad (36)$$

onde $[R]$ e $[T]$ representa a matriz de rotação e o vetor de translação, respectivamente, da câmara 2 em relação à câmara 1. Contudo, $[R]$ é desconsiderada já que se assume que as câmaras estão alinhadas e niveladas em relação a seus eixos de coordenadas, onde $[T] = \frac{T [mm]}{\text{tamanho pixel}[mm]}$ deve estar em unidade de pixel. Para deixar o sistema de equações mais compacto se expressa tudo em coordenadas de imagem,

$$\lambda_1 \overbrace{\begin{bmatrix} x_{1c} \\ y_{1c} \\ f(r_1) \end{bmatrix}}^{v_1} = \lambda_2 \overbrace{\begin{bmatrix} x_{2c} \\ y_{2c} \\ f(r_2) \end{bmatrix}}^{v_2} + \overbrace{\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}}^t \quad (37)$$

reorganizando

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 x_{1c} - \lambda_2 x_{2c} \\ \lambda_1 y_{1c} - \lambda_2 y_{2c} \\ \lambda_1 f(r_1) - \lambda_2 f(r_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\overbrace{\begin{bmatrix} x_{1c} & -x_{2c} \\ y_{1c} & -y_{2c} \\ f(r_1) & -f(r_2) \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}}^\lambda = \overbrace{\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}}^t \quad (39)$$

assim, resulta em um sistema de equações lineares não homogêneo sobre determinado, e conforme apresentado na Figura 34 as retas não necessariamente se interceptam e, portanto, o problema pode ser resolvido como um problema de minimização, transformando-o em um sistema de equações homogêneo, conforme equação (21). Sabendo que b são assumira o valor 0 no caso ideal do sistema e que a solução trivial $\lambda = 0$ não interessa.

$$\overbrace{\begin{bmatrix} x_{1c} & -x_{2c} & -t_x \\ y_{1c} & -y_{2c} & -t_y \\ f(r_1) & -f(r_2) & -t_z \end{bmatrix}}^{A'} \overbrace{\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ 1 \end{bmatrix}}^{\lambda} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}^b \quad (40)$$

Este tipo de problema é de simples resolução empregando a decomposição em valores singulares (SVD, do inglês *Singular Value Decomposition*). Uma descrição aprofundada do assunto pode ser encontrada em Hartley e Zisserman (2004, Apêndice 5). Assim, dada a matriz A' , que atende a condição de números de linhas maior ou igual ao número de colunas, o objetivo é encontrar λ que minimize $A'\lambda$ restrito a $\|\lambda\| = 1$, sabendo que a SVD permite fazer isso.

$$A'_{m \times n} = U_{m \times n} D_{n \times n} V_{n \times n}^T \quad (41)$$

A matriz U é de igual dimensão que A' , e suas colunas são vetores unitários mutuamente ortogonais, assim como as colunas da matriz quadrada V . A matriz diagonal D tem seus elementos diagonais, σ_i , chamados valores singulares, tais que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \sigma_n > 0$. Sendo o $\det(A') \neq 0$ e com posto igual a 3 (máximo posto), é necessário forçar o $\det(A') = 0$ para que o posto seja igual a 2. Dessa forma se garante que existe espaço nulo da solução para um único valor singular nulo, portanto, que o método encontre a solução não trivial. Para lograr isto, após a decomposição SVD de A' o menor valor singular que se encontra na matriz diagonal D se iguala a zero (D') e se recalcula da seguinte forma:

$$A'' = U D' V^T \quad (42)$$

logo,

$$SVD(A'') = U' D'' V'^T \quad (43)$$

Finalmente se obtêm os valores para λ , os quais correspondem à última coluna de V' . Estes valores deverão ser divididos pelo último elemento do vetor coluna de V' . Neste caso fica da seguinte forma,

$$\lambda = \begin{bmatrix} v_{13} \\ v_{33} \\ v_{23} \\ v_{33} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

O λ deverá ser calculado para cada ponto P_w de interesse. Os valores obtidos até agora são em unidade de pixel e relativos a cada uma das câmeras. Para converter em unidade de distância se multiplicam os vetores pelo tamanho do pixel do sensor da câmera, neste caso $2,4\mu m \times 2,4\mu m$.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, foi utilizado duas câmeras olho de peixe que foram instaladas na parte externa do teto do Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da UnB. Como suporte das câmeras foram utilizados tripés e uma base para nivelamento e alinhamento das câmeras composta por níveis de bolha redondos. Para a conexão entre as câmeras foi utilizado um sistema de conexão sem fio composto por duas antenas e um Switch Ethernet foi instalado para que fosse criado um único ponto de acesso as câmeras a um computador. A distância entre as câmeras foi verificada por um telêmetro digital e validada por uma fita métrica. Maiores especificações sobre os instrumentos utilizados estão descritas na próxima seção.

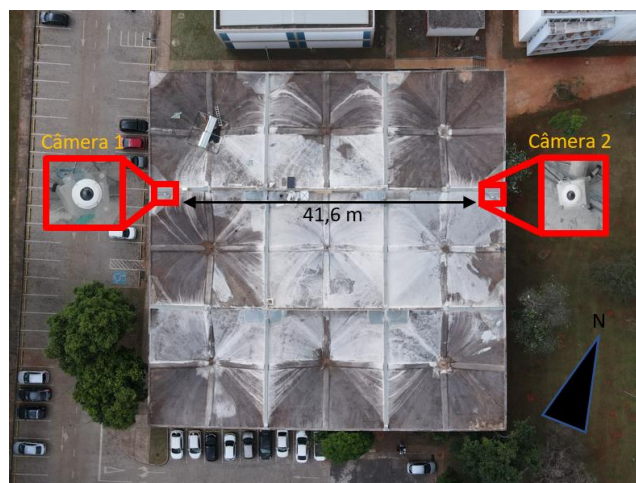


Figura 35: Posicionamento das câmeras no telhado do LEA.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez instalado, alinhado e nivelado todo o sistema, realizou-se um alinhamento do eixo x das câmeras, um em relação ao outro, aplicando uma rotação à imagem obtida pela câmera 2, utilizando como referência o Sol. Tanto o Sol quanto a Lua podem ser considerados pontos no infinito em relação às câmeras, já que estão muito distantes em relação à distância de separação existente entre elas. A calibração das câmeras em relação à rotação entre elas, sobre o plano horizontal, é o mais difícil de executar manualmente. Em contrapartida, é simples através do pós-processamento, utilizando as imagens do céu com o Sol como referência. Na imagem apresentada na Figura 36 se observa que uma imagem está rotada em relação a outra.

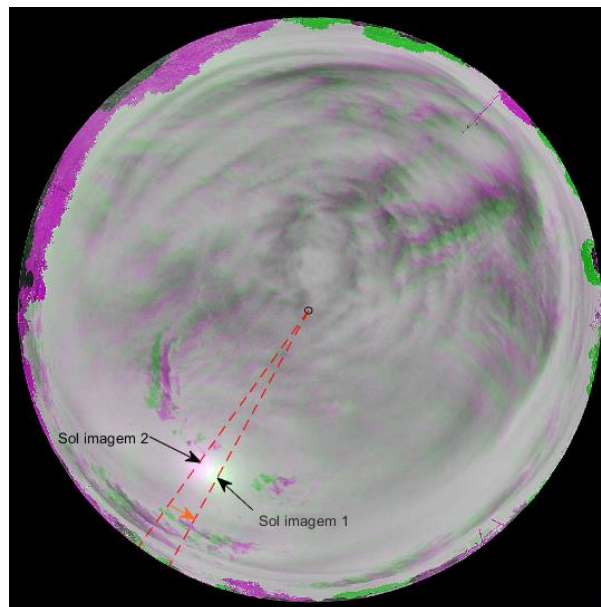


Figura 36: Sobreposição das imagens desalinhadas.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A aquisição das imagens nas duas câmeras deve ser simultânea e para atender este requerimento, utilizou-se o software MATLAB que permite a conexão via TCP/IP com as câmeras. O tempo da aquisição simultânea das imagens sucessivas é de 2 segundos, suficientemente pequeno para preservar as formas das nuvens entre imagens relativas à mesma câmera. No entanto antes de começar a aquisição das imagens é necessário realizar a calibração individual das câmeras e posteriormente do sistema estéreo.

4.4 PRINCIPAIS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Os principais instrumentos utilizados foram para o procedimento experimental foram:

- **Câmeras olho de peixe**

Na Tabela 1 são apresentadas as características técnicas mais relevantes, para este trabalho, das duas câmeras utilizadas.

Tabela 5: Especificações das câmeras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Especificações Técnicas VIVOTEK FE9381-EHV	
Sensor de imagem	1/1.8" SONY IMX178LLJ CMOS 3096 x 2080 pixels
Tamanho do pixel	2,4 μm x 2,4 μm
Resolução máxima	1920x1920 pixels
Distância focal	1,47 mm
Campo de visão	180° horizontal/vertical/diagonal
Abertura	F2.2
Grau de proteção	IP66
Dimensões	Diâmetro: 145 mm/Altura: 50 mm
Tensão	DC 12 V
Protocolo de rede	TCP/IP
Conector de rede	RJ-45

- **Bases de nivelamento e alinhamento**

Os sistemas de nivelamento possuem uma base em acrílico onde é fixado a câmera, sendo ela, fixada a um tripé por meio de um adaptador que permite o nivelamento horizontal e a rotação das câmeras conforme mostra a Figura 37.



Figura 37: Sistema de alinhamento e nivelamento das câmeras.
Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Sistema de conexão sem fio**

Este sistema, da marca Intelbras modelo CFTV IP WOM 5A MiMo, é composto por duas antenas direcionais que permitem a conexões entre dos pontos distantes até 1 km, sempre que exista linha de vista. Devem ser energizadas com 12 Vdc através dos injetores PoE (*Power over Ethernet*).

As antenas foram fixadas aos tripés, sob as câmeras, sendo uma antena virada em direção da outra, possibilitando a conexão à câmera 2 desde a o ponto de acesso, através de um switch ethernet, instalado no local da câmera 1.



Figura 38: Antenas direcionais instaladas no tripé sob as câmeras. Do lado esquerdo antena instalada no tripé da câmera 1 e do lado direito, na câmera 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

• Switch Ethernet

O switch da marca tp-link modelo TL-SF 1008D que possui 8 portas RJ-45, foi utilizado para poder criar um único ponto de acesso as câmeras. Foi instalado no tripé da câmera 1, por estar mais próxima do ponto de energia e está conectado à antena e a câmera instaladas no mesmo tripé. Uma terceira porta é utilizada para controlar e configurar as câmeras pelo computador.



Figura 39: Switch Ethernet instalado no quadro de equipamentos elétricos/eletrônicos do tripé da câmera 1, por estar mais próximo de um ponto de alimentação de energia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Telêmetro laser**

O telêmetro laser utilizado para a montagem do equipamento foi o Rangefinder modelo NP-1500-A-LI-W-E. Segundo especificações técnicas do fabricante, o equipamento afere de 5 a 1500 metros com um erro estimado de +/- 0,5 m. O medidor foi colocado em uma posição aleatória em linha reta entre as câmeras, fixado a um tripé com liberdade de giro de 360°. Foi aferido a distância deste ponto onde foi posicionado em relação à ambas as câmeras. A média das medidas foi de 41,6m, medida assumida em neste trabalho. Validamos a distância total utilizando uma fita métrica de 50 metros.



Figura 40: Telêmetro Laser utilizado na montagem do equipamento.
Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 41: Aferição da medida do espaçamento das câmeras.
Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Nível**

Para nivelar as câmeras, foram utilizados níveis de bolha redondos e um inclinômetro digital. Os níveis foram instalados nas bases onde as câmeras foram acopladas, conforme mostra a Figura 42 a seguir, logo foi utilizado o inclinômetro.



Figura 42: Nivelamento das câmeras.
Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Drone**

O drone utilizado neste trabalho, foi da marca DJI, modelo Mavic Air 2. Segundo o fabricante, este equipamento possui uma câmera de 48MP com gravação de vídeo em 4K a 60fps. Sua altitude máxima de voo é de 500 metros e possui um alcance de precisão em voo estacionário de $\pm 0,5m$ na vertical e $\pm 1,5m$ na horizontal (com posicionamento GPS), ou seja, a variação da medição da altura e posicionamento é um faixa muito pequena para ser considerada em resultados e gráficos, mas vale ressaltar que existe um intervalo de precisão de medição da altura e posicionamento nas informações fornecidas pelo drone. O Mavic Air 2 é equipado com sensores de detecção de obstáculos de todos os lados e possui um sistema de estabilização com uma velocidade máxima de controle de $100^\circ/s$, com uma faixa de vibração angular de $\pm 0,01^\circ$. Portanto, esse modelo fornece um ponto de referência extremamente confiável no espaço, para a faixa de medição utilizada neste trabalho, de 90 m a 490 m. Em sua parte inferior, possui um led para melhor localização em voos noturnos. Neste trabalho foi utilizado os dados de altura de

voo fornecidos pelas imagens do próprio drone, para comparar como os nossos resultados. O led foi de grande importância para identificarmos o drone em voo, nas nossas imagens.



Figura 43: Drone DJI Mavic Air 2, utilizado no projeto.
Fonte: Elaborado pelo autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o sistema instalado, se procede realizar a validação do modelo proposto de visão estéreo com câmeras olho de peixe, para ser aplicado em sistemas de determinação de altura de nuvens. A validação do modelo, foi utilizado um drone para gerar um ponto de altura conhecida nas imagens das câmeras. Além do drone ter capacidade de atingir uma altura de até 500 m, ele permite validar a medição da altura num campo amplo de visão devido a sua mobilidade controlada. Para o experimento, o drone foi posicionado em alturas desejadas, em cada uma destas posições foram tiradas fotos sincronizadas com a câmera do drone e com ambas as câmeras do sistema estéreo apontadas para o céu. Os experimentos foram realizados no período noturno para facilitar a identificação do drone nas imagens. As fotos obtidas com a câmera do drone possuem as informações do seu posicionamento sendo elas, altura e coordenadas geográficas, necessárias para estimar o erro da medição através do sistema de visão computacional estéreo. As fotos foram tiradas por setores no espaço, identificados com os números 1 a 5, e, para cada setor, a diferentes alturas, assinaladas nas tabelas seguintes.

Na calibração das câmeras os coeficientes retornados para a função polinomial de aproximação $f(r) = a_0 + a_1r + \dots + a_n r^n$ para cada uma das câmeras, estão listados na Tabela 6. O erro médio de retroprojeção de todos os pontos (vértices) foi de 1,09 pixels. Para câmera 1, $c_{1x} = x_{10} = 960,09$ [pixel], $c_{1y} = y_{10} = 960,31$ [pixel] e para câmera 2, $c_{2x} = x_{20} = 960,27$ [pixel], $c_{2y} = y_{20} = 960,07$ [pixel].

Tabela 6: Coeficientes para função polinomial de aproximação para a câmera 1 e câmera 2.

Câmera 1		Câmera 2	
a_{10}	630,939	a_{20}	627,381
a_{11}	0	a_{21}	0
a_{12}	$-683,907 \cdot 10^{-6}$	a_{22}	$-514,267 \cdot 10^{-6}$
a_{13}	$490,328 \cdot 10^{-9}$	a_{23}	$996,681 \cdot 10^{-10}$
a_{14}	$-509,5 \cdot 10^{-12}$	a_{24}	$-240,4 \cdot 10^{-12}$

Na Figura 44 constam as curvas das lentes de cada uma das câmeras cujas quais descrevem a variação da distância focal em função do raio (gráfico acima), e o campo de visão em função do raio (gráfico abaixo). Os coeficientes a_{11} e a_{21} são zero pois

$\frac{df}{dr} \Big|_{r=0} = 0$. O primeiro subíndice de cada um dos coeficientes faz referência à câmera 1 ou 2 respectivamente.

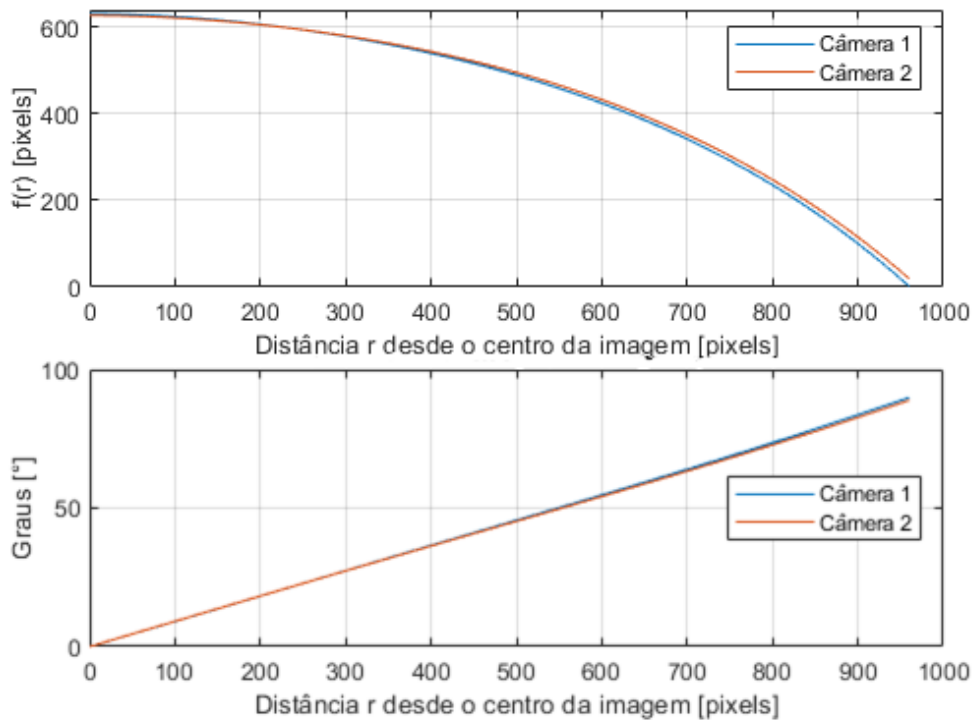


Figura 44: Variação da distância focal em função do raio (Acima). Variação do raio óptico em função do raio (Abaixo).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 45 apresenta uma imagem do tabuleiro capturada com a câmera 2. Os “+” vermelhos são os vértices identificados automaticamente e os “o” vermelhos são os vértices reprojados após a calibração da câmera, assim, é possível inferir que a robustez do modelo desenvolvido por Scaramuza, mesmo com dados de entrada (vértices) muito distantes (em pixel) da posição real (na foto), a calibração consegue realizar uma reprojeção com as posições corrigidas.

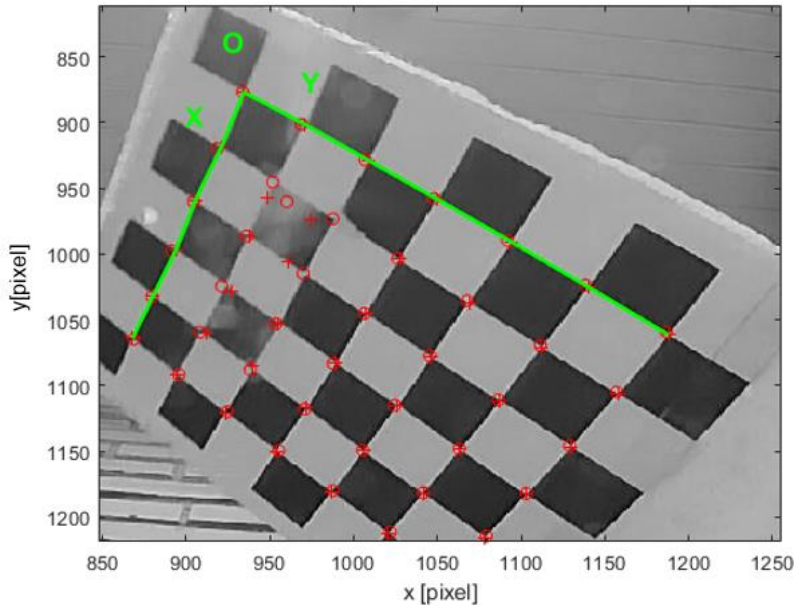


Figura 45: imagem com os vértices obtidos (+ vermelho) e reprojetados (o vermelho).
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação à sobreposição das imagens, a rotação que melhor correlacionou as duas imagens dentro da janela onde se encontra o Sol foi de $5,6^\circ$ da imagem 2 no sentido anti-horário. O resultado desta rotação pode ser visualizado na Figura 46.

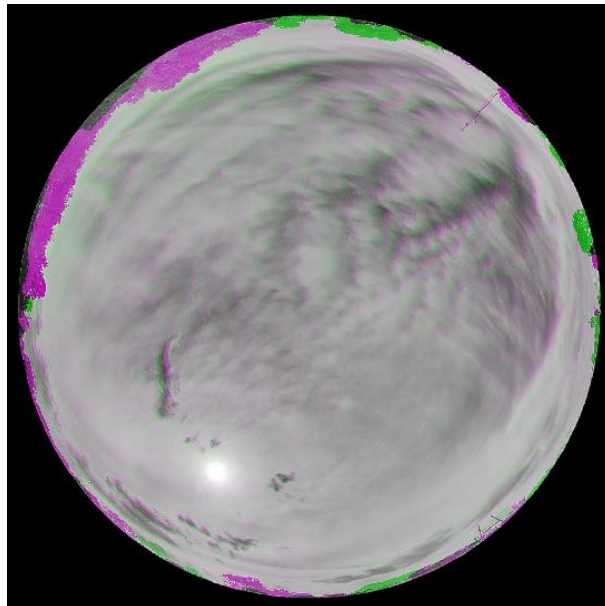


Figura 46: Sobreposição das imagens após a rotação da imagem.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi percebido que o mesmo procedimento poderia ser feito com fotos do céu à noite utilizando como referência a Lua. Desta forma, observou-se menor ruído ao redor dela, quando comparado com o ruído ao redor do Sol.

Foram obtidas 20 imagens com a Lua a cada 10 minutos, todas foram alinhadas aplicando-se lhes uma rotação de $4,4^\circ$ no sentido anti-horário, às imagens da câmera 2. Na Figura 47 se mostra o alinhamento obtido com a rotação de $4,4^\circ$ utilizando a Lua como ponto de referência.

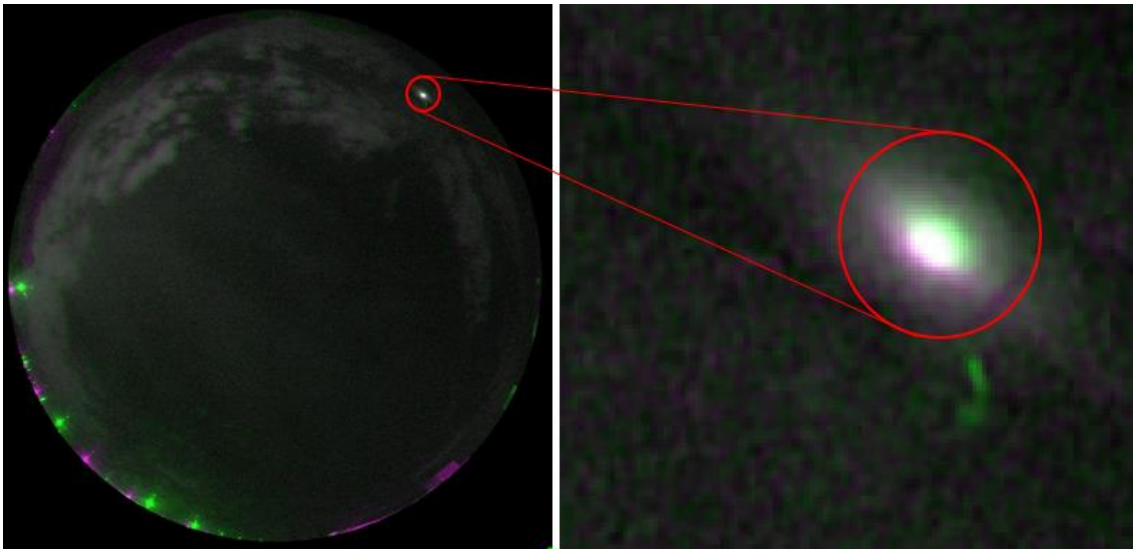


Figura 47: Alinhamento das câmeras utilizando a Lua como ponto de referência.
Fonte: Elaborado pelo autor.

No decorrer desta seção serão utilizadas as seguintes métricas para mensurar o erro:

Erro absoluto: trata-se do erro calculado pela diferença entre a altura real do objeto e a altura medida,

$$\text{Erro Absoluto} = \text{Altura objeto} - \text{Altura medida} = h_{obj} - h_{sist} [m] \quad (45)$$

Erro Médio Absoluto (MAE): calculado a partir da média das diferenças absolutas em módulo, entre os valores aferidos pelos valores reais, esta métrica evita a subestimação e seu valor é menos afetado por erros extremos pela questão da diferença absoluta. A formulação desse erro é descrita por,

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |h_{obj}(n) - h_{sist}(n)| [m] \quad (46)$$

Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE): permite expressar o MAE em percentual. A formulação deste erro é descrita por,

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{h_{obj}(n) - h_{sist}(n)}{h_{obj}(n)} \right| \times 100 [\%] \quad (47)$$

Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE): é calculado a partir da raiz quadrada do MSE (Erro quadrático médio). O MSE é usado para verificar a precisão de modelos dando um maior peso aos erros maiores, sendo ele, calculado pela média dos erros quadrados entre os valores previstos e os valores reais. Fazendo a raiz quadrada do MSE, o erro retorna para a unidade de medida original. A formulação deste erro pode descrita por,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (h_{obj}(n) - h_{sist}(n))^2} [m] \quad (48)$$

A Tabela 7 apresenta as posições do drone nas diferentes alturas com relação as câmeras do sistema. As alturas do drone relativas ao piso foram 500, 400, 300 e 200m, e como as câmeras se encontram a 10m sobre o nível do piso, as alturas resultantes em relação a elas foram as indicadas na Tabela 7.

Tabela 7: Posicionamentos do drone.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição	Latitude [°]	Longitude [°]	Altura [m]
Foto1	-15,76267908	-47,87453556	490
Foto2	-15,76046519	-47,87662422	490
Foto3	-15,75738897	-47,87442392	490
Foto4	-15,76238733	-47,87297028	490
Foto5	-15,76177733	-47,87401381	490
Foto1	-15,76254136	-47,87662294	390
Foto2	-15,76066672	-47,87669828	390
Foto3	-15,75914511	-47,87464556	390

Foto4	-15,76204642	-47,87172608	390
Foto5	-15,76192275	-47,87438372	390
Foto1	-15,76235433	-47,8763525	290
Foto2	-15,76140219	-47,87645292	290
Foto3	-15,75958436	-47,87464094	290
Foto4	-15,76253972	-47,87168206	290
Foto5	-15,76218433	-47,87375886	290
Foto1	-15,76272639	-47,87552106	190
Foto2	-15,76152817	-47,87600536	190
Foto3	-15,76013194	-47,87405722	190
Foto4	-15,76250822	-47,87202597	190
Foto5	-15,76209361	-47,87361067	190

Na Figura 48 são apresentadas as posições do drone a 500m de altura, sobre o mapa do Google *Earth*. As linhas azuis definem os eixos y_1 e y_2 das ordenadas relativos às câmeras 1 e 2 respectivamente e, também, o eixo das abscissas $x_{1,2}$ comum a ambas as câmeras, com a diferença que a origem referente à câmera 2 estará deslocada. Estes eixos permitem determinar as distâncias no plano horizontal, no sentido dos eixos indicados, entre as posições do drone e das câmeras.

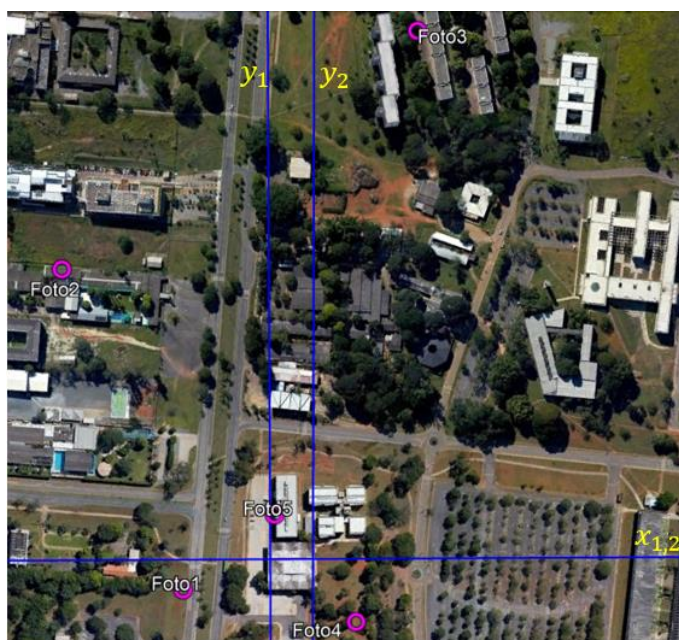


Figura 48: Posicionamento do drone sobre o plano horizontal a 500 m de altura.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando a ferramenta "régua" do software Google Earth, foram medidas as distâncias do drone para ambas as câmeras em todas as posições, sendo um total de 20 posições, 5 posições para cada altura. A incerteza desta medição não foi mensurada, já que o objetivo é ter uma estimativa para verificação dos resultados obtidos através do

código desenvolvido, cujo qual calcula automaticamente a distância entre as posições do drone e as câmeras (em relação a $x_{1,2}$, y_1 e y_2), a partir das coordenadas geográficas informadas nas imagens capturadas pela câmera do drone.

Na Tabela 8, são apresentados os valores das distâncias no plano horizontal, definidos por x_1 e y_1 , relativos à câmera 1 e na Tabela 9 os relativos à câmera 2, definidos por x_2 e y_2 .

Tabela 8: Medições obtidas com visão estéreo com câmaras olho de peixe – Referência câmera 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foto	Código			Câmera 1			Erro Absoluto		
	x[m]	y[m]	Altura[m]	x_1 [m]	y_1 [m]	Altura[m]	x[m]	y[m]	Altura [m]
1	-86,35	-30,32	490	-73,12	-17,20	445,33	13,24	13,12	-44,67
2	-215,95	282,07	490	-171,24	285,10	507,92	44,71	3,03	17,92
3	134,00	514,79	490	183,53	508,00	544,58	49,53	-6,79	54,58
4	87,76	-61,79	490	67,16	-53,58	442,49	-20,60	8,20	-47,51
5	3,43	42,76	490	6,68	38,58	464,23	3,25	-4,18	-25,77
1	-297,75	66,35	390	-250,33	81,84	378,71	47,43	15,48	-11,29
2	-231,60	264,06	390	-198,47	280,89	424,69	33,13	16,84	34,69
3	41,68	341,12	390	71,66	334,42	422,65	29,99	-6,69	32,65
4	230,45	-75,47	390	183,62	-76,09	361,51	-46,83	-0,62	-28,49
5	-40,74	42,25	390	-30,69	42,12	374,99	10,05	-0,13	-15,01
1	-262,28	75,11	290	-228,74	91,72	293,98	33,54	16,61	3,98
2	-235,14	177,98	290	-208,91	200,85	317,76	26,22	22,88	27,76
3	24,82	295,31	290	55,54	301,31	323,13	30,72	6,00	33,13
4	215,56	-128,45	290	171,59	-120,01	275,49	-43,97	8,44	-14,51
5	13,85	-9,58	290	11,86	-4,56	285,93	-1,99	5,02	-4,07
1	-190,59	3,65	190	-167,14	22,09	190,46	23,45	18,44	0,46
2	-193,62	147,23	190	-179,85	174,25	220,73	13,77	27,02	30,73
3	63,85	215,39	190	82,69	216,23	213,16	18,84	0,84	23,16
4	181,08	-111,61	190	148,25	-106,75	190,08	-32,83	4,85	0,08
5	32,82	-6,00	190	27,26	-1,88	195,22	-5,57	4,12	5,22

Tabela 9: Medições obtidas com visão estéreo com câmaras olho de peixe – Referência câmera 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foto	Código			Câmera 2			Erro Absoluto		
	x[m]	y[m]	Altura[m]	x_2 [m]	y_2 [m]	Altura[m]	x[m]	y[m]	Altura[m]
1	-128,91	-30,32	490	-114,72	-11,62	445,51	14,19	18,71	-44,49
2	-258,51	282,07	490	-212,84	292,08	503,94	45,67	10,01	13,94
3	91,44	514,79	490	141,93	508,15	544,44	50,49	-6,64	54,44
4	45,20	-61,79	490	25,56	-51,11	442,79	-19,64	10,67	-47,21
5	-39,13	42,76	490	-34,92	43,10	463,84	4,20	0,34	-26,16
1	-340,31	66,35	390	-291,93	90,21	376,81	48,38	23,85	-13,19
2	-274,15	264,06	390	-240,07	288,08	419,85	34,09	24,02	29,85
3	0,88	341,12	390	30,06	337,01	420,58	29,18	-4,10	30,58
4	187,90	-75,47	390	142,02	-75,29	361,67	-45,88	0,18	-28,33
5	-83,29	42,25	390	-72,29	47,38	374,36	11,00	5,13	-15,64
1	-304,83	75,11	290	-270,34	99,84	291,32	34,49	24,73	1,32
2	-277,69	177,98	290	-250,51	207,70	313,33	27,18	29,72	23,33
3	-17,73	295,31	290	13,94	304,10	320,51	31,67	8,79	30,51
4	173,00	-128,45	290	129,99	-119,16	275,86	-43,01	9,29	-14,14
5	-28,70	-9,58	290	-29,74	-0,92	285,97	-1,04	8,67	-4,03
1	-233,15	3,65	190	-208,74	28,97	189,54	24,41	25,32	-0,46
2	-236,17	147,23	190	-221,45	179,99	216,09	14,73	32,75	26,09
3	21,29	215,39	190	41,09	218,42	210,92	19,79	3,03	20,92
4	138,52	-111,61	190	106,65	-105,58	190,74	-31,87	6,03	0,74
5	-9,73	-6,00	190	-14,34	1,87	195,22	-4,61	7,88	5,22

Com base na análise dos erros absolutos relacionados a cada câmera, é possível inferir que existe uma inclinação negativa no sentido noroeste, sentido do 4º quadrante do sistema de coordenadas mundo definido, de uma das câmeras ou de ambas (não é possível determinar qual câmera), por causa da sobrestimação das alturas do drone nas posições das fotos 2 e 3 de todas as alturas, e da subestimação nas fotos 4 referentes às alturas 490m, 390m e 290m. Nas colunas y_1 e y_2 da Tabela 8 e Tabela 9, foram sinalizados em vermelho as distâncias entre o drone e as câmeras no sentido dos eixo y_1 e y_2 , das posições referentes às fotos 5 das alturas de 290m e 190m, com o objetivo de mostrar que as imagens podem ser alinhadas através da rotação (explicado na seção anterior). Contudo, se ambas as câmeras não tiverem seus eixos x alinhados, existirá uma diferença na medição, como pode ser observada nas tabelas anteriores, que mostram que a câmera 1 percebe o drone da foto 5 a 190m a -1,88m e a câmera 2 a 1,87 em relação ao eixo y .

Todas as posições do drone sobre o plano horizontal são mostradas na Figura 49, os diamantes vermelhos representam a altura do drone a 190m, os triângulos azuis a 290m, os quadrados amarelos a 390 e os círculos magenta a 490m.

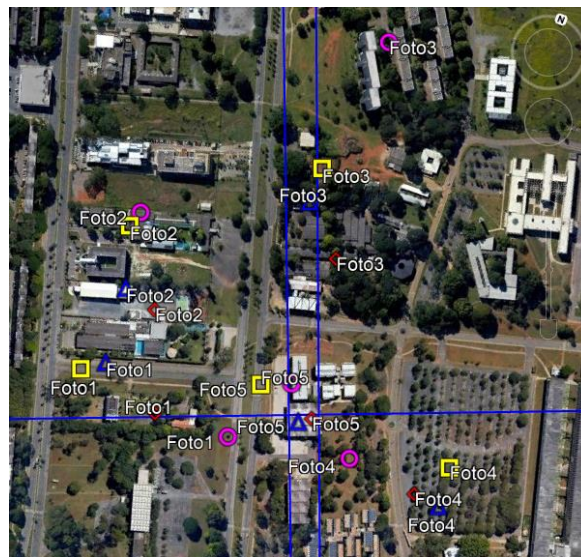


Figura 49: Sequência de fotos a 490m (magenta), 390m (amarelo), 290m (azul) e a 190m (vermelho).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os erros absolutos representados nos gráficos da Figura 50, observa-se que existe um viés de sobrestimação da altura do drone nas posições indicadas pelas Fotos 2 e 3 em quase todas as alturas, sendo a exceção a posição do drone indicada pela

Foto 2 a 490m. Observa-se também uma maior exatidão e precisão nas medições das posições indicadas pelas Fotos 5, que são as que têm maior proximidade com o centro do sistema de visão computacional. A primeira observação a inferir é que o erro está relacionado com o raio de posição do drone nas imagens, mas tal relação não foi encontrada quando se determinaram os raios de posicionamento do drone em cada foto.

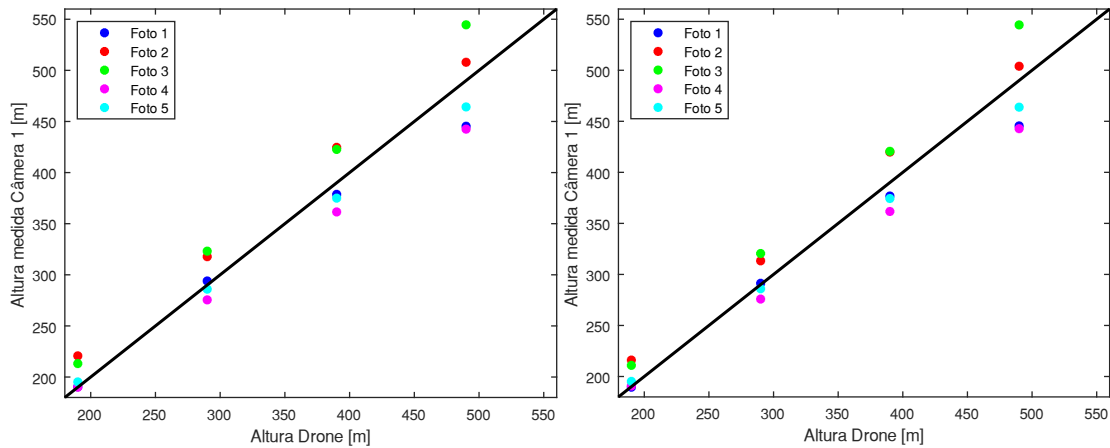


Figura 50: Alturas medidas - Câmera 1 (esquerda), Câmera 2 (direita).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os erros percentuais absolutos relativos a cada medição, conforme Figura 51, mostram que a precisão da medição aumenta com o aumento da altura, já que o erro é mais uniforme.

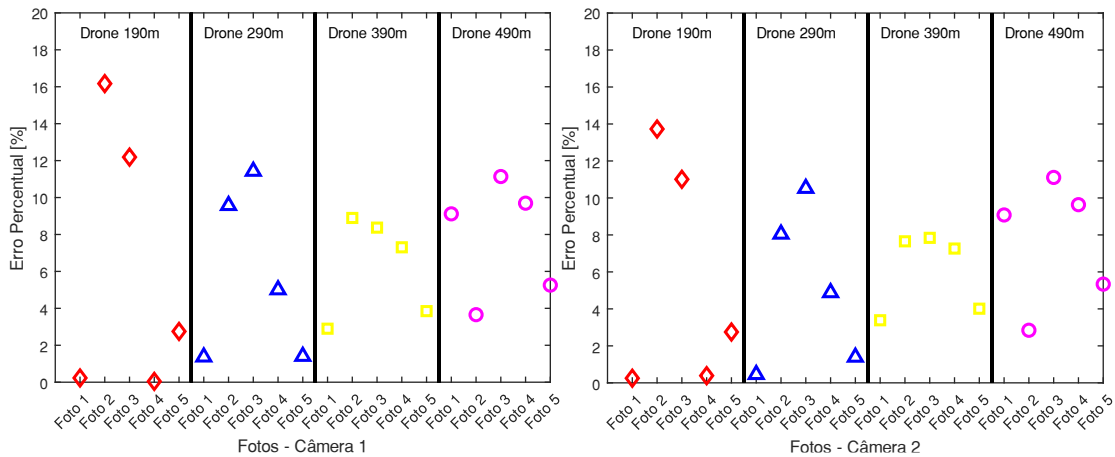


Figura 51: Erro percentual de cada medição.
Fonte: Elaborado pelo autor.

As métricas globais do sistema considerando as 20 posições fotografadas do drone são mostrados na Tabela 10. Como conclusão desta fase experimental se infere que as câmeras deverão ser alinhadas e niveladas novamente utilizando algum equipamento que

permita obter uma melhoria substancial, principalmente no que se refere ao nivelamento no plano horizontal.

Tabela 10: Métricas globais considerando as 20 posições do drone.

Fonte: Elaborado pelo autor.

ERRO	Câmera 1	Câmera 2
MAE [m]	22,78	21,53
MAPE [%]	6,52	7,34
RMSE [m]	7,86	9,70

Antes de fazer a correção de forma física no sistema, foi idealizado um procedimento de alinhamento por *software* e testado sobre os mesmos dados utilizados anteriormente. Este procedimento consiste em normalizar cada vetor $[x_i - c_x, y_i - c_y, f(r)]^T$ para módulo igual a 1, o que é equivalente a considerar que cada vetor foi definido numa semiesfera de raio unitário. É importante apontar que a imagem não será reprojeta nem convertida, só utilizaremos os vetores unitários que mantêm os ângulos dos vetores originais referentes a cada eixo da câmera. Assim, podemos considerar que estes vetores foram obtidos a partir da câmera com algum grau de desalinhamento em relação ao zênite (coincidente com o eixo óptico z das câmeras), aos eixos de longitude (coincidente com o eixo x das câmeras) e latitude (coincidente com o eixo y das câmeras) das coordenadas geográficas. A partir das coordenadas obtidas de cada uma das posições do drone, é factível obter os vetores unitários projetados sobre outra semiesfera unitária, porém, neste estágio, alinhada perfeitamente aos 3 eixos geográficos com seu centro coincidente com as coordenadas correspondentes à posição da câmera em questão. Sendo assim, é possível obter uma matriz de rotação que minimize o erro da correspondência entre os vetores projetados nas semiesferas. Isto pode ser resumido na seguinte equação,

$$\overbrace{[x'_i \quad y'_i \quad z'_i]}^{|v_{real,i}|=1} \cdot \overbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}}^{\text{matriz de rotação } R \text{ } |v_i|=1} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = 1 \quad (49)$$

Para resolver este sistema de equações foram consideradas as 10 posições do drone, 5 posições a 490 e 5 posições a 390 metros de altura. O sistema de equações final é obtido pelo produto escalar entre os vetores $v_{real,i}$, os quais representam os vetores das

posições do drone com a origem no centro óptico da câmera 1 ou 2, segundo a sua correspondência. Neste caso, é considerado que a câmera está perfeitamente alinhada com as coordenadas geográficas e o zênite. Os vetores v_i descrevem cada uma das posições do drone, com origem no centro óptico da câmera, porém com uma rotação desconhecida representada pela matriz R .

Considerando os 10 vetores, se reorganizou o sistema de equações para um sistema homogêneo na forma $Ax = 0$ e se utilizou o método SVD para resolvê-lo. O resultado foi satisfatório achando as matrizes R_1 (câmera 1) e R_2 (câmera 2), ambas com determinantes próximos a 1 ($\det(R_1) = 1,0078$ e $\det(R_2) = 1,0072$) e o produto escalar entre seus vetores próximo de 0, indicando que são matrizes quase de rotação pura. A translação das câmeras deve ser corrigida para que o eixo y de ambas as câmeras esteja alinhado com o Norte (eixo latitude) e os eixos x de cada uma das câmeras alinhados entre si.

Os valores das alturas do drone obtidas após a correção são apresentados na Figura 52, sinalizando uma aparente uniformização das medições, contudo, não houve melhora alguma com relação as medições anteriores, fato que pode ser observado na Figura 53, onde se mostram os erros percentuais absolutos relativos a cada medição.

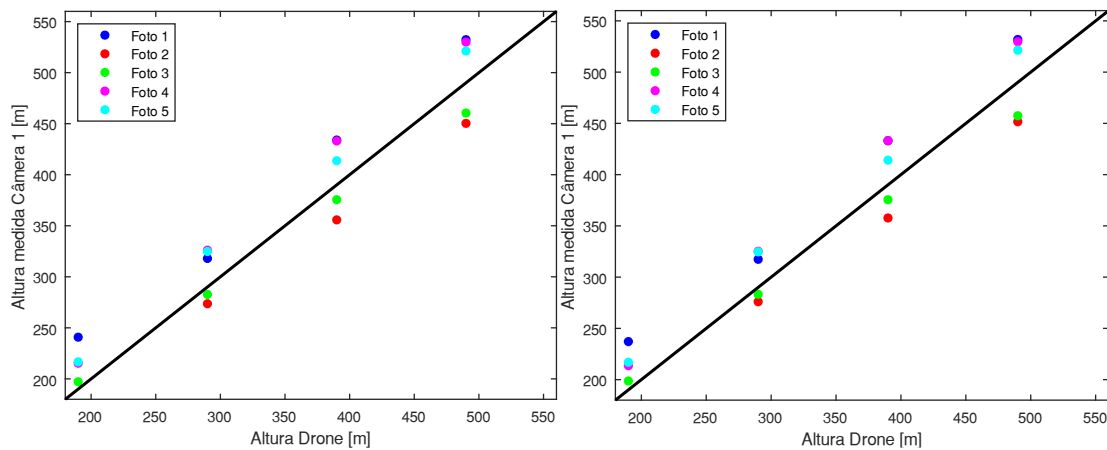


Figura 52: Alturas medidas após método de correção proposto - Câmera 1 (esquerda), Câmera 2 (direita).

Fonte: Elaborado pelo autor.

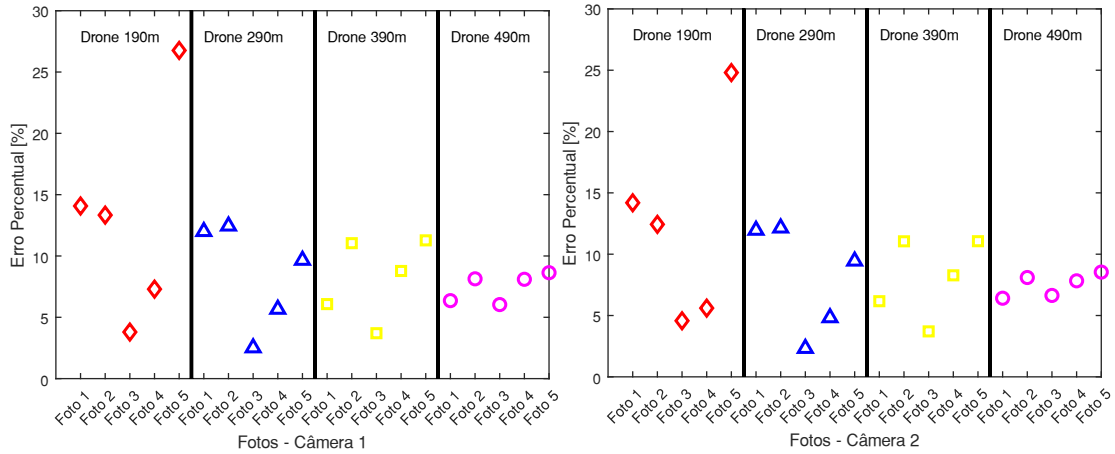


Figura 53: Erro percentual de cada medição após método de correção proposto.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

As métricas da Tabela 11 comparadas com as métricas da Tabela 10, ratificam que a correção utilizando o método proposto, não introduziu nenhuma melhora, no entanto, se observou um erro mais uniforme para o caso das alturas de 490 e 390m, as quais são as alturas utilizadas para calcular as matrizes de rotação de ambas as câmeras. Conclui-se que o método de correção deve ser apurado, restringindo a R_1 e R_2 ser puramente de rotação. Como trabalho futuro se propõe utilizar os ângulos de Euler (α , β e γ) relativos a cada eixo, transformando o problema de minimização linear num problema de minimização não linear.

Tabela 11: Métricas globais considerando as 20 posições do drone após correção.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

ERRO	Câmera 1	Câmera 2
MAE [m]	29,43	28,79
MAPE [%]	9,28	11,77
RMSE [m]	10,61	15,41

Para verificar a hipótese inferida anteriormente a respeito do desalinhamento entre as câmeras, foi realizada uma nova calibração. Foi percebido que houve um desajuste no nivelamento e alinhamento das bases, provavelmente ocasionado por agentes naturais, como ventos e tempestades. Na Tabela 12 são apresentadas as coordenadas das posições do drone relativas a cada uma das fotos. Já na Figura 54, é apresentada a distribuição do posicionamento do drone referente a cada uma das fotos. Pode-se observar que as posições do drone a 490m estão mais distantes das câmeras que as posições anteriores.

Também para verificar se o erro aumentava com a diminuição da altura, optou-se por medir a altura do drone a 90 metros ao invés de 190m.

Tabela 12: Posicionamento do drone.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição	Latitude [°]	Longitude [°]	Altura [m]
Foto1	-15,76240725	-47,87437219	90
Foto2	-15,76186958	-47,87444142	90
Foto3	-15,761267	-47,87347342	90
Foto4	-15,76258189	-47,87292617	90
Foto5	-15,762027	-47,87371481	90
Foto1	-15,76278969	-47,87700647	490
Foto2	-15,76078447	-47,87838467	490
Foto3	-15,75832403	-47,87462117	490
Foto4	-15,76341667	-47,87038256	490
Foto5	-15,7620195	-47,87352647	490

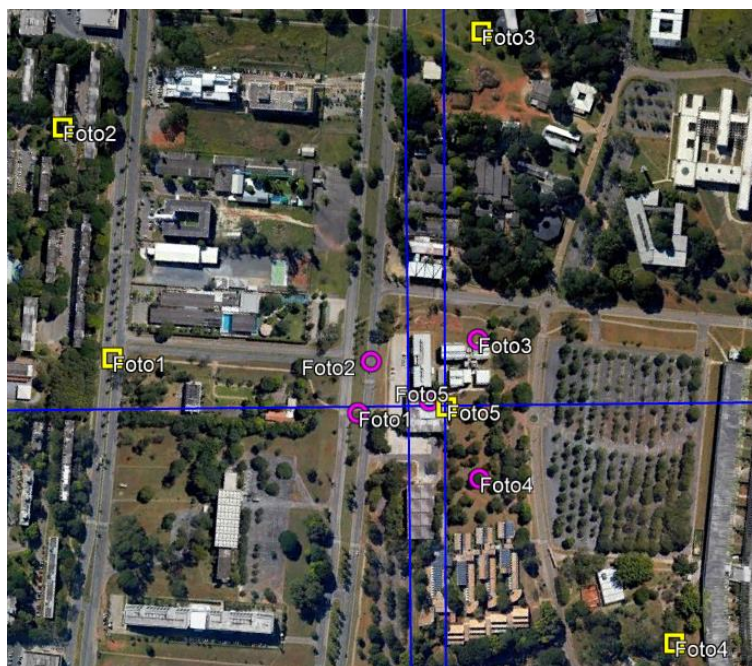


Figura 54: Sequência de fotos a 90m (magenta) e 490m (amarelo).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores das alturas medidas pelas câmeras são apresentados nos gráficos da Figura 55, onde é possível observar que há uma melhoria na precisão das medições. Esta melhora é também verificada através dos erros absolutos percentuais de cada uma das medições, os quais podem ser observados nos gráficos da Figura 56. O maior erro absoluto percentual é de 11,09% relativo à câmera 1 para a altura de 90m e de 6,86% para

a altura de 490m, também referente à câmera 1. Os resultados indicam uma melhora substancial quando comparados com os anteriores, obtidos sem a calibração física.

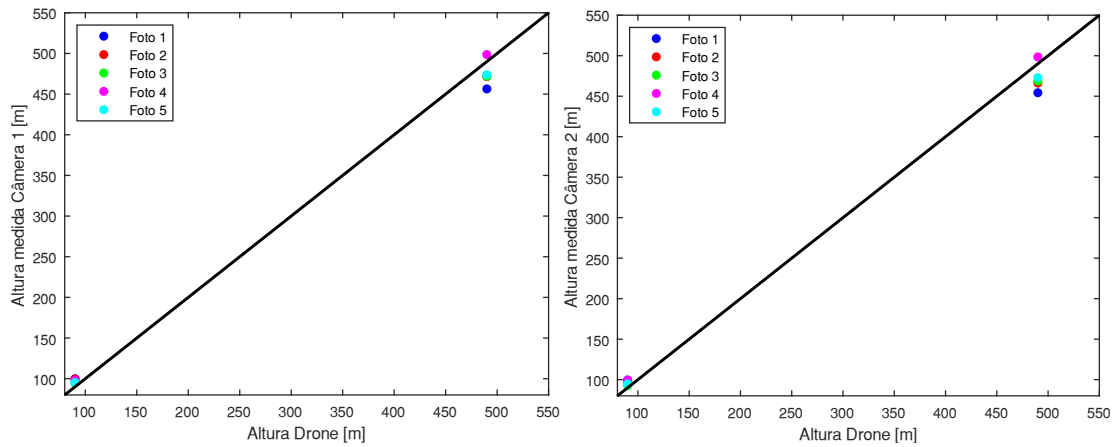


Figura 55: Alturas medidas - Câmera 1 (esquerda), Câmera 2 (direita).
Fonte: Elaborado pelo autor.

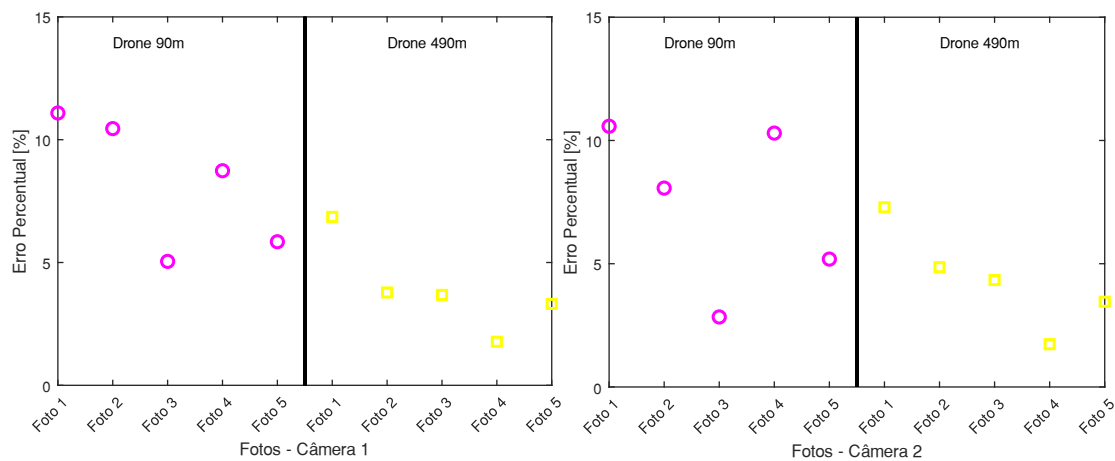


Figura 56: Erro percentual de cada medição após ajuste físico.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 13, as métricas globais do sistema, relativas a cada uma das câmeras, são mostradas e confirmam que existe uma melhora na precisão das medições.

Tabela 13: Métricas globais considerando as 10 posições do drone.

Fonte: Elaborado pelo autor.

ERRO	Câmera 1	Câmera 2
MAE [m]	13,21	13,95
MAPE [%]	6,06	5,87
RMSE [m]	6,76	6,55

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Finalmente, todo o desenvolvimento de todo o trabalho aqui apresentado, é possível deduzir as seguintes afirmações:

Segundo a análise bibliométrica, é possível afirmar que os temas levantados tanto sobre previsão solar intra-hora ou de curto prazo quanto sobre mensuração de altura de nuvens utilizando câmeras, são temas ainda pouco explorados, sendo assim, havendo espaço para desenvolvimento sobre os temas, possibilitando aprimoramentos e inovações.

O modelo de visão estéreo com câmeras olho de peixe é válido para ser implementado na medição das alturas das nuvens, porém, a distância entre as duas câmeras deverá ser maior, visto que as nuvens normalmente se localizam a alturas superiores a 1000 metros.

O modelo proposto e o método para sua validação por meio de drone trouxeram resultados satisfatórios quando comparados aos resultados de trabalhos levantados na revisão bibliográfica e às limitações de um ceilômetro. Portanto, eles se mostraram adequados para utilização na implementação, configuração e ajuste de um sistema comercial para determinação de alturas de nuvens, tanto para previsão solar de curto prazo quanto para outras aplicações onde esse dado é relevante, como por exemplo, para operação de aeroportos e para aplicações meteorológicas.

O ajuste das sobreposições das imagens durante a noite colocando a lua como referência em vez do sol, traz uma maior facilidade e melhor ajuste, visto que o ruído ao redor lua é menor, quando comparado com o ruído ao redor do Sol.

É possível estabelecer um modelo de visão estéreo com câmeras olho de peixe para ser implementado na medição das alturas das nuvens com resultados satisfatórios sem a necessidade de retificação das imagens.

Por fim, para melhorias do sistema, propõe-se empregar ao sistema uma base para cada uma das câmeras, em que possua sistemas mecânicos que possibilite uma melhor calibração de nivelamento e posicionamento e que seja mais robusta para que não permita fácil desnivelamento por forças externas. Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um modelo de previsão de irradiação solar intra-hora com a utilização da variável, altura de base de nuvens. A altura da base de nuvem pode ser definida pelo modelo aqui apresentado, visto que os resultados deste modelo para medir

altura de objetos no céu, trouxe resultados satisfatórios. Alguns ajustes deverão ser empregados, como por exemplo, a distância do posicionamento entre as câmeras, porém esses ajustes deverão ser melhor estudados em projetos futuros.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, S.; FÖRSTNER, W. **Fish-eye-stereo calibration and epipolar rectification**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 59, n. 5, p. 278–288, ago. 2005.

ABUELLA, Mohamed; CHOWDHURY, Badrul. **Solar power probabilistic forecasting by using multiple linear regression analysis**. In: SoutheastCon 2015. IEEE, 2015. p. 1-5.

AHMED, Razin et al. **A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 124, p. 109792, 2020.

ALLMEN, Mark C.; KEGELMEYER JR, W. Philip. **The computation of cloud-base height from paired whole-sky imaging cameras**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 13, n. 1, p. 97-113, 1996.

ARBIZU-BARRENA, Clara et al. **Macroscopic cloud properties in the WRF NWP model: An assessment using sky camera and ceilometer data**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 120, n. 19, p. 10,297-10,312, 2015.

ARYAPUTERA, Aloysius W. et al. **Very short-term irradiance forecasting at unobserved locations using spatio-temporal kriging**. Solar Energy, v. 122, p. 1266-1278, 2015.

BERNECKER, David et al. **Continuous short-term irradiance forecasts using sky images**. Solar Energy, v. 110, p. 303-315, 2014.

BOSCH, Juan L.; KLEISSL, Jan. **Cloud motion vectors from a network of ground sensors in a solar power plant**. Solar Energy, v. 95, p. 13-20, 2013.

CAI, C.; QIAO, R. **An Improved Calibration Method for Stereo Fisheye Vision**. Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2021. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.

CALDAS, M.; ALONSO-SUÁREZ, R. **Very short-term solar irradiance forecast using all-sky imaging and real-time irradiance measurements**. Renewable energy, v. 143, p. 1643-1658, 2019.

CASTILLEJO-CUBEROS, Armando; BOLAND, John; ESCOBAR, Rodrigo. **Short-Term Deterministic Solar Irradiance Forecasting Considering a Heuristics-Based, Operational Approach.** *Energies*, v. 14, n. 18, p. 6005, 2021.

CHEN, Xiaoyang et al. **Forecasting-based power ramp-rate control strategies for utility-scale PV systems.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 66, n. 3, p. 1862-1871, 2018.

CHOW, Chi Wai et al. **Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed.** *Solar Energy*, v. 85, n. 11, p. 2881-2893, 2011.

CHU, Yinghao et al. **Real-time prediction intervals for intra-hour DNI forecasts.** *Renewable energy*, v. 83, p. 234-244, 2015.

CRISPEL, P.; ROBERTS, G. **All-sky photogrammetry techniques to georeference a cloud field.** *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 11, n. 1, p. 593–609, 2018.

DAVID, Mathieu et al. **Probabilistic forecasting of the solar irradiance with recursive ARMA and GARCH models.** *Solar Energy*, v. 133, p. 55-72, 2016.

DIAGNE, Maimouna et al. **Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, p. 65-76, 2013.

DualBase, 2021 Visited in = 20/05/2023. URL <https://www.dualbase.com.br/produtos/RsensDB>.

Elsevier, 2021 Visited in = 20/05/2023. URL <https://www.journals.elsevier.com/solar-energy>.

FRISBY, John P.; STONE, James V. **Seeing: The computational approach to biological vision.** Mit Press, 2010.

FUSIELLO, A.; TRUCCO, E.; VERRI, A. **Machine Vision and Applications A compact algorithm for rectification of stereo pairs** *Machine Vision and Applications*. [s.l.: s.n.].

GHAYEKHLOO, M.; MENHAJ, M. B.; GHOFRANI, M. **A hybrid short-term load forecasting with a new data preprocessing framework.** Electric Power Systems Research, v. 119, p. 138-148, 2015.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision.** Second Edi ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2004.

INMAN, Rich H.; PEDRO, Hugo TC; COIMBRA, Carlos FM. **Solar forecasting methods for renewable energy integration.** Progress in energy and combustion science, v. 39, n. 6, p. 535-576, 2013.

KASSIANOV, E.; LONG, C. N.; CHRISTY, J. **Cloud-Base-Height Estimation from Paired Ground-Based Hemispherical Observations.** Journal OF Applied Meteorology, v.44, p. 1221-1233,2005.

KASTEN, Fritz; CZEPLAK, Gerhard. **Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud.** Solar energy, v. 24, n. 2, p. 177-189, 1980.

KHOMUTENKO, B.; GARCIA, G.; MARTINET, P. **Direct fisheye stereo correspondence using enhanced unified camera model and semi-global matching algorithm.** 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2016. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 31 jan. 2017.

KRAAS, Birk; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, Marion; MADLENER, Reinhard. **Economic merits of a state-of-the-art concentrating solar power forecasting system for participation in the Spanish electricity market.** Solar Energy, v. 93, p. 244-255, 2013.

KUMLER, Andrew; XIE, Yu; ZHANG, Yingchen. **A Physics-based Smart Persistence model for Intra-hour forecasting of solar radiation (PSPI) using GHI measurements and a cloud retrieval technique.** Solar Energy, v. 177, p. 494-500, 2019.

KUMLER, J. J.; BAUER, M. L. **Fish-eye lens designs and their relative performance.** (R. E. Fischer et al., Eds.) Proceedings Volume 4093, Current Developments in Lens Design and Optical Systems Engineering. Anais...24 out. 2000. Disponível em:

<<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.405226>>

LIVINGSTONE, Margaret; HUBEL, D. H. **Vision and Art: The Biology of Seeing** (New York: Abrams). ISBN 978081099554. Search in, 2008.

MAHDAVI, Nariman et al. **Model predictive control of distributed air-conditioning loads to compensate fluctuations in solar power**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 8, n. 6, p. 3055-3065, 2017.

MARQUES, Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti et al. **Um sistema de calibração de câmera**. Universidade Federal de Alagoas, 2007.

MARQUEZ, Ricardo; COIMBRA, Carlos FM. **Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis**. Solar Energy, v. 91, p. 327-336, 2013.

MARR, David. **Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information**. MIT press, 2010.

MENDES, IAN ARAUJO et al. **A utilização das redes neurais artificiais na previsão de radiação solar global**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Belém-PA. 2017.

MENDONÇA DE PAIVA, Gabriel et al. **Multiple site intraday solar irradiance forecasting by machine learning algorithms: MGGP and MLP neural networks**. Energies, v. 13, n. 11, p. 3005, 2020.

MONTEIRO, Claudio et al. **Short-term forecasting models for photovoltaic plants: Analytical versus soft-computing techniques**. Mathematical problems in engineering, v. 2013, 2013.

Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [s.d.]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: [15/12/2022].

NGUYEN, Dung Andu; KLEISSL, Jan. **Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers**. Solar Energy, v. 107, p. 495-509, 2014.

PALMER, Stephen E. **Vision science: Photons to phenomenology**. MIT press, 1999.

PEDRO, Hugo TC; COIMBRA, Carlos FM. **Nearest-neighbor methodology for prediction of intra-hour global horizontal and direct normal irradiances**. Renewable Energy, v. 80, p. 770-782, 2015.

PENG, Zhenzhou et al. **3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers.** *Solar Energy*, v. 118, p. 496-519, 2015.

REN, Ye; SUGANTHAN, P. N.; SRIKANTH, N. **Ensemble methods for wind and solar power forecasting—A state-of-the-art review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 82-91, 2015.

RICHARDSON, Walter et al. **Machine learning versus ray-tracing to forecast irradiance for an edge-computing skyimager.** In: 2017 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP). IEEE, 2017. p. 1-6.

SAVOY, Florian M. et al. **Cloud base height estimation using high-resolution whole sky imagers.** In: 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2015. p. 1622-1625.

SCARAMUZZA, D. **Omnidirectional vision: from calibration to robot motion estimation.** ETH Zurich. 2008. Tese de Doutorado. PhD thesis, 17635.

SCARAMUZZA, D.; MARTINELLI, A.; SIEGWART, R. **A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras.** IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Anais...2006b.

SINGLA, Pardeep; DUHAN, Manoj; SAROHA, Sumit. **A comprehensive review and analysis of solar forecasting techniques.** *Frontiers in Energy*, p. 1-37, 2021.

SIVANEASAN, B.; YU, C. Y.; GOH, K. P. **Solar forecasting using ANN with fuzzy logic pre-processing.** *Energy procedia*, v. 143, p. 727-732, 2017.

SZELISKI, Richard. **Computer vision: algorithms and applications.** Springer Nature, 2022.

Togawa, André. **Previsão de irradiância solar por rastreamento de nuvens utilizando imagens.** Universidade de Brasília (UNB), 2014.

TRUCCO, Emanuele; VERRI, Alessandro. **Introductory techniques for 3-D computer vision.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1998.

VOYANT, Cyril et al. **Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review.** *Renewable energy*, v. 105, p. 569-582, 2017.

WANDELL, Brian A. **Foundations of vision.** Sinauer Associates, 1995.

WANG, Fei et al. **A minutely solar irradiance forecasting method based on real-time sky image-irradiance mapping model.** Energy Conversion and Management, v. 220, p. 113075, 2020.

WANG, Fei et al. **Image phase shift invariance based cloud motion displacement vector calculation method for ultra-short-term solar PV power forecasting.** Energy conversion and management, v. 157, p. 123-135, 2018.

WANG, Guang; KURTZ, Ben; KLEISSL, Jan. **Cloud base height from sky imager and cloud speed sensor.** Solar Energy, v. 131, p. 208-221, 2016.

WEN, Haoran et al. **Deep learning based multistep solar forecasting for PV ramp-rate control using sky images.** IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 17, n. 2, p. 1397-1406, 2020.

WEST, Samuel R. et al. **Short-term irradiance forecasting using skycams: Motivation and development.** Solar Energy, v. 110, p. 188-207, 2014.