

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Cezar Augusto Bastianello Vaz

**SISTEMA AUTÔNOMO DE SENSORIAMENTO REMOTO ESPAÇO-
TEMPORAL DO CÉU POR IMAGENS E SUA APLICAÇÃO EM
SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DE ENERGIA**

**Santa Maria, RS, Brasil
2020**

Cezar Augusto Bastianello Vaz

**SISTEMA AUTÔNOMO DE SENSORIAMENTO REMOTO ESPAÇO-TEMPORAL
DO CÉU POR IMAGENS E SUA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DE
ENERGIA.**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção de título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Orientadora: Dr^a Luciane Neves Canha

**Santa Maria, RS, Brasil
2020**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Vaz, Cezar Augusto Bastianello Vaz

SISTEMA AUTÔNOMO DE SENSORIAMENTO REMOTO ESPAÇO-TEMPORAL DO CÉU POR IMAGENS E SUA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DE ENERGIA. / Cezar Augusto Bastianello Vaz

Vaz.- 2020.

139 p.; 30 cm

Orientadora: Luciane Neves Canha Neves Canha
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa

Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2020

1. Sistemas distribuídos 2. Energia solar 3. Sensoriamento remoto de imagens 4. Cobertura de nuvens 5. Smart grids I. Neves Canha, Luciane Neves Canha II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Cezar Augusto Bastianello Vaz. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Cesar Trevisan, 1043, Residencial Parque das Oliveiras, Alameda Áustria, Lote B19, Bairro Tomazzetti, Santa Maria, RS, 97065060

Fone: (55)991463767; Endereço eletrônico: cezarvaz19@gmail.com

Cezar Augusto Bastianello Vaz

**SISTEMA AUTÔNOMO DE SENSORIAMENTO REMOTO ESPAÇO-TEMPORAL
DO CÉU POR IMAGENS E SUA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DE
ENERGIA.**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado
do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 17 de dezembro de 2020:



Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM), Brasil
(Presidente/Orientadora) (Videoconferência)



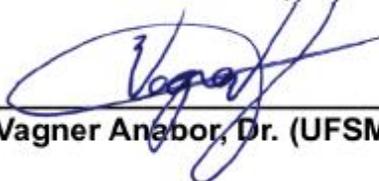
Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM), Brasil (Videoconferência)



Josué Campos do Prado, Dr. (WSUV), EUA (Videoconferência)



Rodrigo Alonso Suárez, Dr. (Udelar), Uruguai (Videoconferência)



Vagner Anebor, Dr. (UFSM) (Videoconferência)

Santa Maria, RS, Brasil
2020

À minha Família

AGRADECIMENTOS

Desejo exprimir os meus agradecimentos a todos aqueles que, ao longo do tempo, de alguma forma, contribuíram com este trabalho.

Primeiramente aos meus pais Elói e Ilma, por acreditarem no meu estudo e terem buscado as condições para que eu pudesse iniciar a crescer por meio dele, sempre pautado por seu amor, que preenche todos os dias de minha vida.

À minha querida esposa Habaly Vaz, ao seu amor e dedicação a mim, por caminhar ao meu lado, em todas as dificuldades que enfrentamos juntos, e vencemos. Pela sua incansável busca pelo bem das pessoas e dedicação à família. Você é minha inspiração pra tudo.

A Prof. Dr^a. Luciane Neves Canha, minha orientadora, pela forma aplicada, generosa e incentivadora, que sempre dedicou em me ajudar no direcionamento do trabalho. Agradeço o trato simples, correto e científico que sempre abordou nas nossas reuniões de trabalho, meu muito obrigado de coração.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, em especial ao competente grupo do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP) na pessoa dos professores: Dr^a. Alzenira da Rosa Abaide, Dr. Daniel Pinheiro Bernardon, Felix Alberto Farret PhD. e Dr. Mauricio Sperandio, cujas aulas que junto com a Dr^a. Luciane Neves Canha, proporcionaram o crescimento acadêmico e profissional que certamente contribuíram com uma educação privilegiada e diferenciada.

Aos meus irmãos e suas famílias: Angelina, Samantha e George Spoth; Jader e Bruna; Leonardo, Priscila e Miguel, que Deus nos abençoe para que sempre estejamos juntos em família buscando nossos ideais.

Meu reconhecimento e agradecimento a todos os colegas e funcionários da Universidade Federal de Santa Maria.

Rogo à Deus que a educação esteja acessível à muitas outras pessoas, para que possamos ter a chance e a satisfação de estudar e mudar o mundo para melhor.

A Deus por ter me dado este trabalho, obrigado!

RESUMO

SISTEMA AUTÔNOMO DE SENSORIAMENTO REMOTO ESPAÇO-TEMPORAL DO CÉU POR IMAGENS E SUA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DE ENERGIA.

AUTOR: Cezar Augusto Bastianello Vaz

ORIENTADOR: Luciane Neves Canha

A instabilidade da cobertura de nuvens é o principal fator de impacto e incerteza em relação à previsão de energia gerada em sistemas fotovoltaicos. O estabelecimento de métricas de controle e confiabilidade na previsão da potência fotovoltaica gerada, ante à variabilidade e incerteza climática, exige a garantia de prospecção de dados confiáveis para viabilizar metodologias eficazes de tomada de decisão, diante aos cenários complexos do mercado de energia e da economia global. Além disso, a inclusão massiva da geração fotovoltaica no sistema elétrico mundial exige previsões precisas e de curto prazo da energia gerada, tornando-se um importante desafio científico na atualidade.

Este trabalho descreve um instrumento capaz de medir a altura da base de nuvens (ABN) e definir áreas de cobertura de nuvens e céu claro sobre grandes áreas de resolução espacial da geração de energia fotovoltaica, o imageador de céu de cobertura de nuvens, do inglês, *Cloud Coverage Sky Imager* (CCSI). Este sistema de rastreamento autônomo alinha o sol ao centro da câmera, de acordo com os ângulos solares. Ao varrer o movimento do sol no horizonte, captura imagens do céu e as projeta sobre uma área de interesse.

A metodologia desenvolvida emprega um conjunto de técnicas de engenharia de rastreamento solar, sistemas eletrônicos, processamento de imagens, sistemas de informações geográficas e calibração de câmeras omnidirecionais, permitindo a funcionalidade do dispositivo e a validação da metodologia empregada. O sistema de imagem usa triangulação estéreo com duas câmeras e correspondência de pixels para reconstruir imagens do céu.

Os resultados da validação da estereografia comparados às alturas medidas pelo ceilômetro e utilizadas para mensurar o a altura da base da nuvem, mostraram níveis de acurácia com correlação próxima à unidade, significância menor que 0,05 e linearidade entre os dados. O sistema foi capaz de projetar a sombra de nuvens sobre a área de interesse a partir de um sistema de informações geográficas, cobrindo áreas de raio de até 6 km em solo.

A técnica contribui para o estado da arte com um rastreador solar autônomo que pode monitorar o céu em um cone de imagem de 120° e obter a cobertura da superfície refletida para qualquer local do mundo. Esta nova técnica é capaz de monitorar a cobertura de nuvens e seu impacto sobre grandes áreas territoriais. Conclui-se que essa abordagem fornece, na prática, uma base fundamental para o entendimento da cobertura de nuvens e seu impacto na geração fotovoltaica, além de contribuições valiosas aos trabalhos que se seguirão.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos, cobertura de nuvens, sensoriamento de imagens, energia solar.

ABSTRACT

AUTONOMOUS SPACE-TEMPORAL REMOTE SENSING SYSTEM FROM THE SKY BY IMAGES AND ITS APPLICATION IN DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS

AUTHOR: Cezar Augusto Bastianello Vaz

ADVISOR: Luciane Neves Canha

Cloud cover instability is the main impact and uncertainty factor on the forecast of energy generated in photovoltaic systems. Establishing reliable metrics for large-scale photovoltaic (PV) power forecasting models while considering the uncertainty of climatic variables requires efficient and rapid response models to satisfy the requirements imposed by the complex energy market scenarios and the global economy. However, the massive inclusion of photovoltaic generation in the world electrical system requires accurate and short-term forecasts of the energy generated.

This work describes an instrument capable of measuring the cloud base height (ABN) and defining areas of cloud cover and clear-sky over large areas of spatial resolution of the photovoltaic energy generation, the cloud cover sky imager (CCSI). This autonomous tracking system aligns the sun to the center of the camera, according to solar angles. As it scans the sun's movement on the horizon, it captures images of the sky and projects them over an area of interest.

The developed method employs a set of engineering techniques of solar tracking, electronic systems, image processing, global positioning and information systems, and omnidirectional camera calibration enable the functionality of the device and validation of method employed. The imaging system uses stereo triangulation with two cameras and pixel matching for sky images reconstruction.

The results of stereography validation compared to heights measured by ceilometer and used to measure ABN, showing levels of accuracy with correlation close to the unit, significance below 0.05 and linearity between the data. The system was able to project the shadow of clouds over the area of interest from a geographic information system, covering areas of 6 km on the ground.

The technique contributes to the state-of-the-art with a standalone solar tracker that can monitor the sky in a 120° image cone and obtain the reflected surface coverage for any location in the world. This novel technique involves the ability to recognize cloud cover and its impact in large territorial areas. We conclude that this approach provides in practice a fundamental basis for understanding cloud cover and its impact on photovoltaic generation, in addition to valuable contributions to the works that will follow from this.

Keywords: photovoltaic systems, cloud cover, image sensing, solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro da radiação solar composta de luz visível, infravermelha radiação ultravioleta que atinge atingem a superfície terrestre.....	35
Figura 2.2 - Circuito equivalente ideal da célula fotovoltaica e curva de corrente.	37
Figura 2.3 - Radiação solar refletida e incidente na atmosfera.....	43
Figura 2.4 - Radiação Direta, Radiação Difusa e Radiação Refletida.....	43
Figura 3.1 - Total Sky Imager (TSI)	49
Figura 3.2 - <i>Whole Sky Imager</i> (WSI).....	50
Figura 3.3 - Distorção da imagem de uma nuvem por uma câmera omnidirecional.....	51
Figura 4.1 - Simulação de uma imagem do céu capturada pelo campo de visão de uma câmera omnidirecional e sua projeção sobre a área de captação da PV.	61
Figura 4.2 - Fluxograma de projeção de cobertura de nuvens e céu claro sobre a área de interesse da PV pelo Processamento de imagens e o Sistema de Informação Geográficas.....	62
Figura 4.3 - Área particular de nuvem monitorada a uma altura H pelo sensor de uma câmera.	64
Figura 4.4 - Projeção de nuvem de, sombra de nuvem e céu claro definidos na direção dos raios solares de Asky sobre a área de terra do APV	67
Figura - 4.5 Modelo de projeção da câmera pinhole.	69
Figura 4.6 - Projeção da câmera omnidirecional	72
Figura 4.7 - Processo de retirada da distorção de uma imagem	77
Figura 4.8 - projeção de uma grade de imagem do céu sobre uma área em terra.	78
Figura 4.9 - Definição de geometria epipolar.....	80
Figura 4.10 - Posicionamento dos CCSI em relação ao ceilômetro.....	82
Figura 5.1 Fluxograma de sequência de funcionamento do rastreador solar ...	87
Figura 5.2 - Protótipo do CCSI com os principais componentes do aparelho. ...	91
Figura 5.3 - Projeto em CAD 3D do CCSI com suas partes destacadas.	92
Figura 5.4 - Etapas de produção de peças 3D a. Design em CAD, b. Fatiamento e c. impressão 3d.	94
Figura 5.5 - Shields de comunicação do C ² SI.	95
Figura - 5.6 Projeto C ² SI.	96
Figura 6.1 - Calibração das lentes das câmeras do CCSI pelo método de Scaramuzza com a combinação de 7 imagens do tabuleiro padrão sobre o campo de visão de uma das câmeras.....	99

Figura 6.2 - Posição de cada tabuleiro de xadrez em relação ao referencial da câmera omnidirecional.	99
Figura 6.3 - Extração dos cantos da grade de uma imagem com a posição dos cantos do tabuleiro de xadrez com a origem do eixo de coordenadas x e y. ...	100
Figura 6.4 - Erro médio entre os pontos 2D detectados e os estimados pela projeção 3D.....	100
Figura 6.5 - Estimativa automática indicando a origem dos eixos x, y; resultado gráfico da distância 'rho' do centro da imagem em pixels e o ângulo do raio óptico como função da distância do centro do círculo (pixels) e distância 'rho' ao centro da imagem em pixels	101
Figura 6.6 Taxonomia de curvas de projeção rectilínear, estereográfica, equidistante e ortográfica e projeção equisólida de uma das câmeras do CCSI.	103
Figura 6.7 Nuvens em oitavas de acordo com o tipo da nuvem <i>I-Cirrus or cirruncumulus, II-Cirrustratus, III-Altocumulus, IV-Altostratus, V-Stratocumulus, VI-Stratus, VII-Cumulus, VIII-Cumulus Tower, IX-Cumulonimbus</i> , representação dos dias de observação do mês de agosto de 2019 e alturas de nuvens no eixo y em metros.	105
Figura 6.8 Medidas em ordem crescente de altura para diferentes condições de altura de nuvens, com a comparação da mensuração do ceilômetro e pontos as obtidas por estereografia.....	106
Figura 6.9 - a. Imagens originais, b. Imagens sem distorção c. imagens do mapa de profundidade.	109
Figura 6.10 Tela inicial do SIG com área de abrangência do sistema no raio.	111
Figura 6.11 - Área de telhados da cidade	112
Figura 6.12 - Centroide da área de telhado monitorada relacionado à rede elétrica de distribuição	112
Figura 6.13 - Imagens de céu com cobertura de nuvens à esquerda e à direita o recorte da área sobre o território de monitoramento.....	114
Figura 6.14 - Áreas de telhado com captura da irradiação solar incidente a partir de áreas de céu claro.....	116
Figura 6.15 - Área de monitoramento da campanha executada na área leste da cidade.	117
Figura 6.16 Relação entre imagens e dados meteorológicos.	119
Figura 6.17 - CCSI e estação meteorológica Davis Instruments Vantage Pro 2 usadas em conjunto.	120
Figura 6.18 Imagens da campanha realizada no dia 14 de agosto de 2019, com a captação de imagens do CCSI.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Estudos de fundo de algoritmos de recuperação de cobertura de nuvens	58
Tabela 4.1 - Representação das funções de seno e tangente na forma clássica	76
Tabela 4.2 a. Imagens em cores, b. tons de cinza, c. threshold em cinza e ...	85
Tabela 6.1 - Parâmetros intrínsecos da câmera e erro de reprojeção	102
Tabela 6.2 - Análise de erro entre as medidas de estereografia e ceilômetro.	108
Tabela 9.1 National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA (2016) Equações	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Imagens tridimensionais
ABN	Altura da Base da Nuvem
ADI-H	Ambiente de Desenvolvimento Integrado – Hardware
AM0	Massa de ar nula
AM1	Massa de ar unitária
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials Terrestrial Reference Spectra</i>
BDC	Banco de Dados Climatológicos
CCSI	<i>Cloud Coverage Imager Sensor</i>
CEESPE	Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência
COVID-19	Vírus Sar-cov-2 da família do vírus corona
<i>Davis 7440</i>	<i>Davis instruments 7440 weather 5 vantage pro</i>
<i>DHI</i>	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i>
<i>DNI</i>	<i>Direct Normal Irradiance</i>
FAB	Força aérea brasileira
<i>FF</i>	<i>Fill Factor</i>
<i>FOV</i>	<i>Field of View</i>
<i>GHI</i>	<i>Global Horizontal Irradiance</i>
<i>GMM</i>	<i>Gaussian Mixture Models</i>
<i>GPS</i>	<i>Global System Position</i>
IB	Índice de Brilho
IC	Índice do Céu
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>IOT</i>	<i>Internet of the things</i>
IP 65	Norma proteção à jatos de água
IV	Infravermelho
<i>MatLab</i>	<i>Mathematical Laboratory</i>
<i>MRF</i>	<i>Markov Random Fields</i>

<i>NCM</i>	<i>Normalized Cut Method</i>
<i>NOAA</i>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<i>NRMSD</i>	<i>Normalized Root-Mean-Square Deviation</i>
<i>ONU</i>	<i>Organização das Nações Unidas</i>
<i>PC-LAHE</i>	<i>Perform Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization</i>
<i>PFETM</i>	<i>Polynomial Fisheye Transform Model</i>
<i>PV</i>	<i>Photovoltaic systems</i>
<i>RBR</i>	<i>Red-Blue Ratio</i>
<i>RGB</i>	<i>Red, Green and Blue</i>
<i>RMSD</i>	<i>Root-Mean-Square Deviation</i>
<i>SIO</i>	<i>Scripps Institution of Oceanography</i>
<i>STC</i>	<i>Condições padrão de teste</i>
<i>SVDA</i>	<i>Servos Motores por Deslocamento Ativo</i>
<i>TSI</i>	<i>Total Sky Imager</i>
<i>USD</i>	<i>University of California, San Diego</i>
<i>UV</i>	<i>Ultravioleta</i>
<i>V</i>	<i>Faixa do visível humano</i>
<i>WEBMET</i>	<i>Sistema Automatizado de Registro e Gerenciamento das Observações Meteorológicas</i>
<i>WMO</i>	<i>World Meteorological Organization</i>
<i>WSI</i>	<i>Whole Sky Imager</i>
<i>YES</i>	<i>Yankee Environmental Systems, Inc.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére
A	Plano 2D
A_{nuvem}	Elemento de área da nuvem (pixels)
A_{sky}	Área de céu (km ²)
A_{PV}	Área de projeção em terra (km ²)
a,b	Direções dos pixels
C_x, C_y	Coordenadas do centro de distorção
C_L, C_R	Centro óptico das câmeras
d	Distância de A_{nuvem} da câmera (m)
d	Disparidade
d_{ref}	Mapa de disparidade
dx e dy	Componentes cartesianas
E	Matrix essencial
e_L, e_R	Epipolos
f	Distância focal da lente (°)
f	Funções polinomial da lente de câmeras
G	Irradiação em 1000 W/m ²
G_{ref}	Irradiação sob condições de teste padrão (STC)
F	Função câmera
f	Função polinomial de grau n
g	Função não linear
κ	Fator de escala de pixel
K	Graus Kelvin
K_c	Matriz de parâmetros intrínsecos
ϵ	Alinhamento de linhas epipolares
M	Linha de base (m)
H	Altura orthogonal (m)

I_d	Corrente de saturação reversa do diodo
I_f	Fotocorrente proporcional à radiação solar
$I(\beta)$	Intensidade de insolação terrestre no plano inclinado em β graus
I_{PH}	Intensidade de insolação do feixe terrestre em plano horizontal
I_L, I_R	Planos direito e esquerdo
M	Linha de base (m)
n	Grau polinomial
n_{pixels}	Densidade de pixels (pixels)
n_r	Número de dados
NS	Horário do nascer do sol
P	Mapeamento geométrico de um ponto
P	Matriz de projeção
P	Pressão local (Pa)
P_0	Pressão ao nível do mar (Pa)
PS	Horário do pôr do sol
Π	Plano epipolar
r	Raio de A_{nuvem} (pixel)
r'	Funções de seno e tangente na forma clássica
R	Matriz de rotação
s	Parâmetro skew
t	Vetor de translação
u, v	Coordenadas da imagem (m)
u_0, v_0	Coordenadas principais da imagem (pixels)
u_L, u_R	Coordenadas do ponto de projeção (pixels)
u_0, v_0	Coordenadas da imagem plana (pixels)
u', v'	Coordenadas do plano sensor (pixels)
u'', v''	Coordenadas da transformação afim
u_{search}	Correspondência de pixels
u_{ref}	Referência de pixels
X	Ponto de projeção 3D

x_u, y_u	Coordenadas de retirada da distorção da imagem
x_d, y_d	Coordenadas da distorção da imagem (pixels)
X, Y, Z_{cam}	Coordenadas X, Y e Z das câmeras
X, Y, Z_{world}	Coordenadas X, Y e Z do mundo

Símbolos gregos

α	Meio-ângulo ($^\circ$)
ΔT	Varição de temperatura
λ	Fator de profundidade
ρ''	Distância radial do eixo do sensor (m)
μ_{SC}	Coefficiente de temperatura de corrente de curto-circuito (A/K)
θ	Ângulo de incidência ($^\circ$)
Θ	Ângulo a partir do eixo óptico ($^\circ$)
θ_{sun}	Ângulo de zênite solar ($^\circ$)
φ_{sun}	Ângulo de azimute solar ($^\circ$)
φ	Ângulo de azimute da nuvem ($^\circ$)
Ω	Cone circular cônico (sr)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÃO.....	20
1.2	JUSTIFICATIVA.....	25
1.3	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	27
1.4	HIPÓTESE.....	27
1.5	SOLUÇÃO PROPOSTA.....	28
1.6	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	29
1.6.1	Objetivo geral.....	29
1.6.2	Objetivos específicos.....	29
1.7	CONTRIBUIÇÕES E INOVAÇÃO.....	30
1.8	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	32
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	34
2.1	IRRADIAÇÃO EM SISTEMAS DE PV DISTRIBUÍDOS COM BASE NA OBTENÇÃO DE IMAGENS DO CÉU.....	34
2.2	A ÁREA DE CAPTAÇÃO EM <i>PIXELS</i> DE IMAGEM.....	38
2.3	SÉRIES HISTÓRICAS DE IRRADIANCIA ASSOCIADAS A IMAGENS..	40
2.4	A RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DE ZÊNITE E A ÁREA DE COBERTURA DE IRRADIANCIA SOLAR DIRETA.....	41
2.5	AS RELAÇÕES DE INCLINAÇÃO DE SUPERFÍCIES E A IRRADIAÇÃO SOLAR.....	42
2.6	RESUMO DO CAPÍTULO.....	44
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	46
3.1	SENSORIAMENTO DA IRRADIAÇÃO SOLAR E SUAS APLICAÇÕES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	47
3.1.1	Imagens do céu obtidas em solo.....	48
3.2	CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS.....	50
3.3	OBTENÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR, CLASSIFICAÇÃO E POSIÇÃO DAS NUVENS.....	52
3.4	MEDINDO A ALTURA DA BASE DA NUVEM.....	53
3.5	OCCLUSÃO SOLAR.....	55
3.6	ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS DO CÉU.....	56
3.7	RESUMO DO CAPÍTULO.....	59
4	METODOLOGIA	61
4.1	A CALIBRAÇÃO DA CÂMERA OMNIDIRECIONAL.....	68
4.1.1	A câmera Pinhole.....	69
4.1.2	A câmera omnidirecional.....	71

4.2	CORREÇÃO DA DISTORÇÃO	74
4.2.1	Calibração stereo e correspondência de imagens do céu	78
4.2.2	Geometria epipolar	79
4.3	POSICIONAMENTO DOS APARELHOS	81
4.4	MÉTRICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE IMAGENS COM PRESENÇA DE NUVENS	83
4.5	RESUMO DO CAPÍTULO	86
5	O SISTEMA DO CCSI.....	87
5.1	O PROJETO <i>UPGRADE</i> DO CCSI: O C ² SI.....	93
5.2	RESUMO DO CAPÍTULO	98
6	RESULTADOS ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	99
6.1	CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS	99
6.2	CURVA DE PROJEÇÃO.....	102
6.3	VALIDAÇÃO DA ALTURA DAS NUVENS POR ESTEREOGRAFIA	103
6.4	ERROS DE ANÁLISE.....	107
6.5	COBERTURA DE NUVENS E ENERGIA SOLAR NO TERRITÓRIO DE INTERESSE DA PV	109
6.6	ESTUDO DE CASO E APLICAÇÃO DO MÉTODO	110
6.7	PROJEÇÃO DE ÁREAS DE IRRADIAÇÃO.....	113
7	CONCLUSÕES.....	122
7.1	TRABALHOS FUTUROS	123
8	BIBLIOGRAFIA.....	127
9	ANEXO A - CÁLCULO DA POSIÇÃO SOLAR.....	137

1 INTRODUÇÃO

O avanço exponencial na exploração das energias renováveis na atualidade exige a combinação várias áreas do conhecimento para a compreensão e aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis da geração distribuída. A captura de imagens do espaço aéreo para monitorar a área coberta por nuvens é uma destes recursos. Este trabalho estuda estas relações inerentes à obtenção da energia solar disponível sobre a geração distribuída com base nos conceitos da geração fotovoltaica (PV) e do impacto de sua intermitência sobre a rede elétrica a qual está conectada. O conceito da utilização de imagens vem sendo atualmente estudado como ferramenta de previsão das parcelas de energia devido à alta resolução temporal e alta definição dos dados captados por imagens, sendo útil para a definição da cobertura de nuvens e a irradiação solar incidente sobre grandes áreas territoriais, abastecidas ou propensas ao abastecimento de energia. Também é adaptável a outras tecnologias de geração distribuída, que dependem das condições atmosféricas, tais como na definição do direcionamento e velocidade das nuvens na geração eólica, que podem ser previstos a partir de imagens de câmeras. Esta metodologia facilita a antecipação de eventos climáticos e do seu efeito sobre o balanceamento do ciclo de energia nas redes elétricas, as quais estão sujeitas à intermitência da PV. Não obstante, suscita a adaptação da PV na rede em face aos processos dinâmicos do clima, pois torna possível conhecer de forma localizada, os eventos atmosféricos sobre a região geográfica de interesse da captação de energia. Esta afirmativa também condiz com as características de inclusão de segurança, resiliência e eficiência das redes elétricas inteligentes *Smart Grids* (SG). O planejamento das SG é fortemente vantajoso quando atrelado ao conhecimento de causa-efeito de como os ativos da rede vão se comportar sob o efeito da intermitência em um evento de nuvem sobre a usina de PV. O que leva a possibilidade de definir ações de contramedidas para a proteção dos elementos estruturais da rede ou mesmo no dimensionamento da rede elétrica, mitigando ou mesmo erradicando estes efeitos danosos ainda na fase de planejamento.

Analisando pelo viés econômico, as condições de como se dá a geração de energia é de grande interesse nas transações de compra e venda do mercado *spot* de energia, principalmente nos mercados de transações intra-hora e da hora seguinte, regulados por variações independentes de quantidade e preço do produto, pois são sazonais e dependentes da energia disponível “*on-time*”.

O desenvolvimento dos recursos de geração de energia por meios renováveis levou a um grande interesse pela obtenção de dados em curto prazo destes recursos. Esta condição desencadeou a sujeição da busca por respostas rápidas e resolutas, ante ao impacto da expansão exponencial da geração distribuída no sistema elétrico, bem como de indagações sobre sua confiabilidade, principalmente por estar à mercê da incerteza do clima. Estas diretivas alinham-se com a hipótese em tese e a literatura abrangente, na busca por meios providenciais e resolutivos ao problema proposto, “grifo do autor”:

“A estimativa da geração máxima fotovoltaica a partir de medições em tempo real é um fator chave para permitir a definição de esquemas de controle robustos capazes de reforçar a operação segura de redes de distribuição de energia em plantas fotovoltaicas densamente agrupadas”(LIU et al., 2008) e (BERNSTEIN et al., 2015)

“O conhecimento do potencial de geração fotovoltaica em tempo real é um aporte importante para estratégias de autoconsumo (SOSSAN et al., 2013) e (RASMUS LUTHANDER et al., 2015),

[...] “controle local de sistemas de energia (MOUSAZADEH et al., 2009) e (SCOLARI et al., 2018),

[...] “e criação de conjuntos de dados históricos [...]”;

[...] “Esses conjuntos de dados são amplamente utilizados tanto para o treinamento de modelos de previsão baseados em dados (LIU et al., 2008),

[...] quanto para inferir o comportamento local da geração fotovoltaica a partir de informações com maior resolução espacial e temporal (VAZ; CANHA, 2018).”

1.1 MOTIVAÇÃO

A obtenção de dados fidedignos acerca da energia solar de curto prazo é um dos fatores críticos para a expedição rápida de energia na rede elétrica quando aportada pelos sistemas de geração distribuída. Além disso, é extremamente importante para as estratégias de backup e contramedidas para mitigar a intermitência da PV, contudo esta previsão perpassa pelo conhecimento

das condições climáticas, o que necessita de apropriação do conhecimento acerca dos efeitos atmosféricos que ocorrem concomitantemente à geração.

Entre os processos que são altamente impactados pela restrição de tempo de previsão de energia estão controle de geração, programação de serviços ancilares e a operação em tempo real. Atualmente, o armazenamento de energia (ARIYARATNA; MUTTAQI; SUTANTO, 2018) e a resposta da demanda (SIVANEASAN et al., 2018) representam fortemente a garantia da confiabilidade da rede em oposição às flutuações de PV. Flutuações significativas na tensão e frequência geradas no PV, devido à alta taxa de rampa (TRAN et al., 2019), geralmente levam à instabilidade no sistema de energia, além de colapso e blecautes (OMAR; MAHMOUD, 2019 e ZHENG et al., 2019). Nesse sentido, o conhecimento prévio da magnitude e frequência da intermitência solar permite regular o perfil de flutuação de tensão (CHAUDHARY; RIZWAN, 2018) dos alimentadores de distribuição (ARIYARATNA; MUTTAQI; SUTANTO, 2018), sobretensões em períodos de geração (HUO; GRUOSSO, 2019) ou subtensões em eventos de cobertura de nuvens. O planejamento para compensar essas flutuações envolve sistemas de armazenamento de energia (AKBARI et al., 2019), tais como supercapacitores (MASAKI; ZHANG; XIA, 2019), controle de potência ativa e reativa (ISMAEL et al., 2019), além de soluções híbridas destas em resposta às flutuações. Estes processos, dependentes das flutuações climáticas, se entendidos de maneira prévia antecipados em informações de imagens podem ser especializados para incorporar em seus procedimentos o reconhecimento estado da rede, prevendo o impacto da intermitência da PV no planejamento e estabelecendo respostas para a operação do sistema.

As SG se beneficiam pelo conhecimento prévio da quantidade esperada de energia produzida e sua variabilidade, em várias escalas espaciais e temporais (ELSINGA; VAN SARK, 2017). Portanto, o fornecimento de energia fotovoltaica disponível, quando garantido pelo alto grau de confiança das previsões, favorece as SG, principalmente na antecipação de medidas de adaptação (resiliência) e também nas ações de contramedidas para recuperação imediata do sistema elétrico (autocorreção).

Prever a influência da cobertura de nuvens no PV com a associação de imagens e sistemas de informação geográfica favorece o planejamento antecipado das parcelas de energia distribuídas entre os alimentadores, amplia as alternativas de reconfiguração na rede de comutadores e religadores. Portanto, minimiza o impacto em eventos de falhas do sistema e previne o desabastecimento em um número maior de consumidores na rede de distribuição (DILEEP, 2020), pois o conhecimento pontual da energia gerada permite a transferência coordenada de energia, por exemplo, nas micro redes. Monitorar e estimar a curva de energia fotovoltaica diária por intervalos temporais é útil para antever e responder ao efeito do perfil de carga líquida diária (curva do pato) (HOU et al., 2019), agregando maior conhecimento acerca da dinâmica destas relações de equilíbrio de energia à rede, ao longo do dia e da hora, pela sua associação a imagens. Além disso, esta presciência, corrobora com a resposta ágil, síncrona e otimizada para compensar a demanda horária de eletricidade, principalmente pelo aumento massivo da penetração de sistemas de geração na modalidade fotovoltaica no lado do consumidor.

O conhecimento da cobertura de nuvem associada ao PV em sincronia com informações sobre cargas gerenciáveis, como estações de carregamento de veículos elétricos, facilita o ciclo de destino dos recursos disponíveis, que podem ser transferidos localmente, com base na antecedência da energia gerada pela distribuição de painéis.

Obter dados de insolação sobre o território para o gerenciamento de energia fotovoltaica no lado da demanda oferecem informações importantes para o planejamento e operação para o lado da concessionária, estreitando as relações de mercado entre o serviço prestado e a participação de seus clientes (KIPTOO et al., 2020), além de reverter para a própria demanda os ativos transacionados no mercado financeiro, consolidando o ciclo sincronizado e diligente da eletricidade gerada e consumida. Estas questões refletem diretamente sobre os padrões do mercado de produção de energia, segundo a *Solarpower Europe* (2018).

As transações financeiras dependem fortemente de estimativas confiáveis e seguras para atender a modalidades de negócios de curto e muito curto prazo. Como resultado, a previsão solar adquiriu grande importância como ferramenta

de inteligência de mercado (WEST et al., 2014), alterando seu design e criando novos paradigmas, ao vincular a adaptação da energia fotovoltaica ao regime regulatório do mercado de energia. Os acordos intra-dia e intra-hora no mercado à vista, baseados em previsões de curto e muito-curto-prazo, aumentaram sua importância em termos de volumes de ativos na economia mundial (MACIEJOWSKA; NITKA; WERON, 2019). Nesta condição as transações de mercado suscitaram garantias de viabilidade de geração, aumentando os desafios para a previsão de energia e do portfólio de estruturas de geração, buscando a organização do mercado para obter os benefícios e oportunidades oferecidos pela monetização máxima desses ativos no mercado. Esta afirmativa expõe uma avanço considerável em termos de tecnologia que este trabalho trata em sua investigação, pois a obtenção de informações climáticas, advindas de dados de imagens, passa a servir de informação às transações do mercado de energia.

Estas constatações são de grande motivação ao estudo de um aparelho capaz de proporcionar estas condições de aporte de dados para o conhecimento acerca do potencial de energia a ser gerada.

Buscar alternativas de não interferir na dinâmica da natureza e manter a raça humana em sua progressão é um tema, que na atualidade depende da união de esforços da engenharia, da física, da química, dos sistemas de informação e muitos outros segmentos que devem entender, planejar, prover e proteger por ações a busca do equilíbrio de como a energia elétrica é adquirida na natureza e de como ela deve ser utilizada.

Neste sentido este trabalho busca integrar:

- As interações entre o clima e a obtenção de energia pelas tecnologias renováveis;
- Definir esta interação por imagens de câmeras associando-as a dados de meteorologia;
- Construir uma metodologia baseada em algoritmos de mecânica do movimento do sol, sistemas eletrônicos;

- Cruzar as informações oriundas da metodologia com a área de interesse da captação solar, além de associá-las a dados de estruturas de redes elétricas de distribuição, sistemas de informação geográfica;
- Definindo a área de insolação sobre da geração PV, aviltando recursos para a definição da energia gerada localmente a área de interesse.

Também foi estabelecida uma revisão bibliográfica incisiva sobre o tema e uma série de projetos e testagens de protótipos, além de um plano de estudo com uma grade curricular de disciplinas técnicas utilizados como aporte sólido para tratar o problema proposto.

Ainda há uma gama de perguntas que necessitam de resposta para a concepção plena de modelos de previsão de energia disponível à demanda que proporcionem não só a resposta em tempo hábil para a tomada de decisão, mas que também sejam adaptáveis aos processos dinâmicos do clima em aplicações que envolvam sistemas distribuídos de energia. Contribuir para estas estratégias científicas com um instrumento meteorológico que associa eventos ao longo do céu e seus efeitos em terra é o fator de grande motivação deste estudo e, por si só, o desafio de um trabalho gratificante.

Como não poderia deixar de registrar num trabalho desenvolvido no ano de 2020, eventos inesperados podem prejudicar o avanço destas tecnologias, tais como o impacto sem precedentes que ocorreu durante o ano de 2020 no setor energético devido aos impactos que a doença da covid-19 (vírus Sar-CoV-2 da família do vírus corona) causou a essa parcela do mercado e na expansão do mercado mundial de PV a partir de 2020. O bloqueio devido à pandemia, prevê a retração de 18% das instalações planejadas para 2020 de 129,5 GW para 106,4 GW (WOOD MACKENZIE; SEIA, 2020). Este acontecimento não só influenciou nas projeções do avanço da tecnologia, mas também prejudicou o andamento das pesquisas acerca do tema em todo o globo, grifo do autor.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica a necessidade de estabelecer uma nova tecnologia de presciência da energia solar disponível aos sistemas de geração distribuída. Este campo científico necessita de avanços no que tange às tecnologias de aquisição de dados robustos, com alta resolução espaço-temporal, envolvendo variáveis climatológicas, e que seja adaptável às diversas metodologias que utilizam estes dados. A metodologia do CCSI contribui com o intento de abordar uma lacuna importante no estado da arte, que está relacionada à definição expedita do impacto da cobertura de nuvens sobre a geração distribuída. Para cumprir com o objetivo foram estabelecidas métricas e postulados para investigar do problema proposto. A metodologia visa ampliar a sistemática de obtenção das parcelas de energia, baseando-se em imagens classificadas do céu, e seu uso no campo das previsões de energia renovável.

Os sistemas existentes na atualidade tais como o radar de nuvens são dispendiosos, ao passo que, instrumentos como o ceilômetro verificam a posição da nuvem somente sob o foco do seu laser acima de sua instalação. Sistemas de satélite não possuem a resolução temporal como os aparelhos de sensoriamento a partir da terra para o sensoriamento de sombra de nuvens sobre micro redes. Contudo, a associação destas tecnologias pode ampliar sobremaneira o conhecimento das características das nuvens, o que pode ser facilitado se ambos os instrumentos possam fazer o monitoramento em sincronia, como é o caso do CCSI (*Cloud Coverage Sky Image*) que pode atuar em conjunto com a tecnologia de satélites.

O sistema do CCSI é de custo relativamente baixo, em comparação aos existentes no mercado, pois baseia-se em câmeras adquiridas comercialmente, com considerável resolução de imagens, demonstrando-se extremamente eficaz na obtenção de imagens caracterizadoras do céu.

Os aparelhos para este fim são montados sobre espelhos em conjunto com câmeras ou somente câmeras fixas, o que prejudica o tratamento da ofuscação do sol sobre a lente e o sensor da câmera, dificultando a obtenção de uma imagem mais nítida, ao passo que dependente de tratamento por processamento computacional ainda na fase de obtenção da imagem. Este

trabalho justifica a necessidade de um aparelho capaz de estabelecer uma eficácia maior na relação imagem-território, incluindo a movimentação da câmera em relação ao sol além de vários tipos de sensores. O CCSI (*Cloud Coverage Imager Sensor*) possui funções autônomas de geo-posicionamento, rastreamento do sol e de leitura do impacto de eventos do céu, em grandes áreas de céu e sobre grandes áreas em terra.

As condições pré-estabelecidas ao projeto técnico desta inovação tecnológica permitiram a produção de um instrumento compacto, produzido por meios modernos, com protótipos do instrumento fabricados em materiais em acrílico e impressão 3D. Sua qualificação técnica foi concebida para que sirva de instrumento meteorológico robusto às condições de intempéries que possa ser exposto, agregando informações de imagem para especializar as metodologias de previsão de energia disponível para a geração distribuída, bem como para diversos fins aos quais a tecnologia pode ser aplicada.

Os protótipos do CCSI apresentam um avanço considerável em relação aos aparelhos comumente utilizados na literatura, pois utiliza um pequeno aparato para proteger a câmera da ofuscação do sol, esta modificação incluída nos protótipos, em relação aos demais aparelhos com a mesma finalidade, diminui a obstrução da imagem da câmera em cerca de 14% do TSI (Yang et al., 2014) para 5% no primeiro protótipo do CCSI, e também proporcionou a remodelação do projeto para que a obstrução da imagem fosse retirada, ou seja de 5% para 0% para o segundo protótipo, chamado C²SI. Isto foi possível ao agregar uma segunda câmera, dedicada ao monitoramento da região circunsolar, livrando a imagem de obstruções em 100% para o processamento de imagens.

O rastreamento do sol pelo sistema de servos motores por deslocamento ativo com a adição de redutores planetários coloca o sol ao centro da imagem. Esta modificação importante aos métodos tradicionais, permite fixar áreas de raios de 6 a 8 km de monitoramento perpendiculares ao ângulo de incidência do sol. Com a inclusão desta função, o aparelho fornece dados de posição das nuvens, servindo, portanto, de dados para a previsão do deslocamento, velocidade e área da nuvem aos algoritmos de previsão. Em paralelo também define de maneira “*on time*” o que acontece na área de abrangência do

monitoramento, remetendo os dados de posicionamento para um sistema de informação geográfica.

A vantagem adquirida com a inclusão do aparato junto à região circunsolar é representada pela exclusão da saturação da imagem ao redor desta área. Ao seguir o sol o aparelho possibilita a leitura da área de projeção da sombra de nuvens, pois capta uma imagem perpendicular aos raios solares, em uma área conhecida da imagem, pois é relacionada à escala de pixels à área de monitoramento em solo.

Estas condições tornam o CCSI um instrumento diferenciado no estado da arte e ao fim ao qual ele se aplica.

Justifica-se a sistemática da metodologia pelo posicionamento georreferenciado de nuvens no céu e sua projeção em terra.

A associação da obtenção de imagens por câmeras, o processamento de imagens, a utilização de bancos de dados de redes de energia elétricas e o cadastro multifinalitário das cidades permite a análise de vários fluxos de energia, e sua conjunção, e evidencia a inovação da tese proposta como imprescindível na concepção de *Smart grids* e *Smart Cities*.

1.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A incerteza da geração fotovoltaica devido a imprevisibilidade do clima, sua relação com a variação tempo-sazonal das nuvens e sua localização geograficamente sobre os sistemas distribuídos, representam as dificuldades impostas na prospecção de dados fidedignos aos modelos de obtenção da energia solar disponível. A disponibilização da energia gerada em fontes primárias intermitentes requer a associação de variáveis climáticas para definir critérios de planejamento e operação. Associação esta, que pode gerar alto grau de complexidade às metodologias para o tratamento deste problema.

1.4 HIPÓTESE

A hipótese confirmatória desta tese estabelece a possibilidade do monitoramento de grandes áreas do céu, normais ao eixo de uma câmera

omnidirecional. Para tanto, o seu direcionamento em relação à posição do sol no horizonte é obtido por meio de servos motores de azimute e elevação. A validação envolvida no sistema é então obtida pelos seus parâmetros essenciais para tratar as imperfeições da lente sobre a imagem distorcida gerada. A distinção entre nuvens e céu claro é obtida por processamento de imagens. Estas condições formam a sistemática necessária para projetar as áreas distintas de geração da energia solar sobre o território. Ao se confirmar a hipótese qualificada, o aparelho se torna eficaz na associação de eventos ocorridos no céu e sua interferência sobre a energia gerada em sistemas distribuídos.

1.5 SOLUÇÃO PROPOSTA

A solução proposta está em cumprir as exigências da hipótese confirmatória, por meio da confecção de um aparelho seguidor solar de dois eixos (azimute e elevação), utilizando câmeras de alta resolução espacial de imagens em conjunto com algoritmos de processamento de imagens com alta frequência de resolução temporal (10 a 20 segundos) de captação de *frames* de imagens

A validação é verificada com a utilização de metodologias consagradas oriundas do estado da arte.

Como direcionamento da solução ao problema proposto foi estabelecida uma relação de rebatimento entre a imagem do céu e seu par em terra, definindo a insolação sobre os painéis fotovoltaicos, com base em um sistema de informações geográficas, aliando a este um banco de dados de elementos da rede de energia elétrica, estabelecendo condições para que o aparelho seja no futuro para previsão de curtíssimo espaço de tempo. Por fim, protótipos de aparelhos foram projetados e executados para proporcionar o uso da tecnologia no desenvolvimento futuro de aplicações em Smart Grids.

1.6 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.6.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese foi desenvolver um sistema autônomo de sensoriamento remoto espaço-temporal, baseado nas informações de sensores meteorológicos e imageadores do céu, para servir de instrumentação à modelos de previsão de curtíssimo espaço de tempo do potencial de geração distribuída.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Desenvolver um novo equipamento autônomo captação de imagens do céu, baseado em terra, sua validação e aplicação prática em uma sistemática de interação nuvem-irradiância a partir das imagens do equipamento para definição da energia disponível em sistemas distribuídos de energia.

2. Validação da metodologia empregada por meio de técnicas de análise de distorção de câmeras omnidirecionais, técnicas de estereografia em conjunto com dados de ceilômetro e mensuração por estação total, além da calibração dos aparelhos.

3. Modelagem do impacto de eventos do céu sobre a superfície de interesse em terra com a detecção e classificação de nuvens, utilizando variadas técnicas de estabelecimento da altura das camadas nuvens, sua extensão e projeção sobre a área de cobertura da captação fotovoltaica.

4. Desenvolver um sistema de rastreamento com base na orientação solar utilizando conceitos de mecânica do movimento solar, eletrônica de controle e automação, em ação conjunta às tecnologias de sensores de imagens e sensores meteorológicos;

5. Estabelecer uma análise espaço-temporal da cobertura de nuvens ao nível de redes primárias de distribuição em cenários de alta penetração de geração fotovoltaica, com a possibilidade de leituras da captação solar em tempo diminuto em áreas pontuais ou de grandes extensões;

6. Desenvolver e adaptar uma metodologia que sirva de gerador de dados de entrada para algoritmos dedicados à previsão de geração distribuída,

buscando encurtar o tempo de resposta do sistema elétrico diante as variações sazonais e da imprevisibilidade do clima;

7. Proporcionar meios para a antever os ativos financeiros advindos da geração distribuída para buscar o real potencial de geração, no menor espaço de tempo possível e com uma maior confiabilidade.

1.7 CONTRIBUIÇÕES E INOVAÇÃO

À medida que a hipótese é investigada, a possibilidade de esclarecer as incertezas dos efeitos do clima sobre a geração fotovoltaica se torna factível. Consequentemente possibilita o entendimento, a estimativa e a previsão das parcelas de energia circulantes na rede de captação de energia fotovoltaica e disponível para a rede elétrica. O efeito desta afirmação implica em especializar as metodologias atuais do estado da arte, o planejamento e a operação das redes de distribuição, além de prospectar ações de resiliência e confiabilidade aos projetos de *Smart Grids*.

São as contribuições do trabalho proposto por meio de depósito de patente nº 00451-PI/2019 com documentos constantes de:

- CN103605171 revela um método de monitoramento automatizado de nuvem, a fim de avaliar e fornecer dados a respeito desta,
- WO2015160604 revela um algoritmo de previsão de posicionamento de nuvem, partindo de dados coletados da posição atual desta e do sol, fornecendo também outros dados relativos à nuvem,
- US9781363 revela um sistema de captura de imagens para formação de imagem do céu, com medição de radiação e irradiação, e um método de rastreamento de nuvens, em que se faz uso de imagens captadas por um sensor em uma frequência constante e determinada para se analisar a presença ou ausência delas.

O trabalho propõe inovar:

- Contribuindo com as técnicas de simulação da transformação de energia fotovoltaica ao monitorar, em tempo real a irradiação solar e sua transformação em energia elétrica gerada definindo as áreas de captação de energia pelo rebatimento da área de céu sobre o território de interesse;
- Possibilitando aos métodos de previsão a localização, sobre a área de geração de energia, das parcelas de irradiação com base nas características do clima e da rede de distribuição. Independentemente da região onde se aplica o método, por se tratar de um aparelho de geo-posicionamento autônomo e rastreamento automático da posição e movimento do sol.
- O método tenderá a promover sua adaptação a algoritmos empregados em várias metodologias atuais para previsão da irradiação solar e em outros temas, como a geração eólica, auxiliando na especialização da validação e robustez nas respostas destes métodos.
- Na originalidade, representada na contribuição do trabalho como método expedito de medição de energia em sistemas distribuídos e em *Smart Grids*. Sistemas de medição tais como os *Smart Meters* interpretam o comportamento da captação de energia solar à jusante da fonte de energia. Porém, o método aqui proposto atua no comportamento à montante da geração distribuída, que é independente ao comportamento do sistema elétrico e dependente das variações climato-temporais.
- Impulsionar propostas alternativas a partir da hipótese investigada na antecipação de ativos financeiros transacionados no mercado de energia pela melhoria do grau de certeza dos montantes de energia disponíveis para negociação.
- Além de outras possibilidades, as quais, advirem desta inovação.

1.8 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A apresentação desta tese inicia expondo os objetivos e a motivação para o trabalho aqui apresentado.

Capítulo 1: Introdução. Apresenta o viés científico e econômico no avanço exponencial na exploração das energias renováveis na atualidade, com a concepção das *Smart Grids*, e da necessidade da obtenção em curto prazo de informações acerca dos recursos renováveis. Relaciona os objetivos, a hipótese a ser investigada e a motivação na concepção de um modelo de obtenção de dados de energia, baseado nos processos dinâmicos do clima.

Capítulo 2: Fundamentação teórica. Discute a transferência de radiação na atmosfera e a obtenção de energia elétrica por meio da transformação de radiação solar luminosa pelo efeito fotovoltaico. Relaciona conceitos díspares de captação de imagens e séries históricas de variáveis climáticas, correlacionando-os indiretamente para obter as previsões de energia.

Capítulo 3: Revisão bibliográfica. Neste capítulo foram apresentadas as revisões acerca da capacidade de unir várias áreas do conhecimento, em prol de uma metodologia de aporte à previsão solar de curto prazo, expondo as estratégias para mitigar a intermitência da PV, suas aptidões nas transações financeiras, na inteligência de mercado e garantias de viabilidade de geração. Contextualiza o trabalho por meio do estado da arte acerca de estruturas de imageadores do céu, sobre a calibração de câmeras, a detecção de nuvens com base na projeção de sombras, a obtenção da altura da base da nuvem e algoritmos de processamento de imagem.

Capítulo 3: Metodologia. Apresenta a teoria e os detalhes do portfólio do CCIS. A base do estudo é apresentada por meio dos postulados que estabelecem os conceitos teóricos acerca da área de varredura do céu para definir o impactos dos eventos no céu e seu efeito em terra. A calibração das câmeras foi instituída pela teoria da determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos para orientação da câmera do mundo real 3D para uma imagem 2D. Na sequência propõe a metodologia para a correção da distorção das imagens devido as características das lentes dos aparelhos, aplicando um modelo de

mapeamento da imagem e a calibração stereo, obtendo imagens planas que são utilizadas na *a posteriori* nos métodos de processamento de imagens.

Capítulo 4: Um sistema imageador do céu: O CCSI. Apresenta os projetos técnicos dos protótipos do CCIS com as partes eletrônicas e mecânicas constituintes para imageamento, comunicação e movimentação dos servos motores de azimute e elevação, para seguir o movimento do sol. Ao final do capítulo uma nova concepção de projeto baseada no primeiro protótipo é apresentada como um item aparte que trata do C²SI, constando das melhorias agregadas ao equipamento.

Capítulo 5: Resultados Análises e discussões. Apresenta os resultados da calibração dos aparelhos, a taxonomia das curvas de projeção, a retirada da distorção das imagens e a comparação com as medidas da base de nuvens obtidas pela estereografia, sua validação por um ceilômetro e a demonstração dos cálculos dos erros de análise inseridos no sistema. A cobertura de nuvens sobre o território de interesse foi apresentada em um estudo de caso, em experimentos de campo na cidade de Santa Maria localizada Centro Geográfico do Rio Grande do Sul, Brasil.

Capítulo 6: Conclusões. As principais conclusões do estudo foram reunidas neste capítulo, analisando os teste do protótipo do CCSI proposto demonstrando que o estudo conseguiu agregar conceitos importantes para o tema em foco e ao estado da arte de imageadores do céu. Demonstrou também que é importante como metodologia inovadora, em relação aos métodos tradicionais de obtenção de dados da irradiação sobre a PV. Evidenciou sua necessidade ao conjunto de ferramentas robustas para prospecção da estimativa da irradiação solar sobre o território em larga escala de PV. Demonstra que a tecnologia está alinhada com a modelagem de Smart-Grids, e a possibilidade de atuar junto à outras áreas do conhecimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

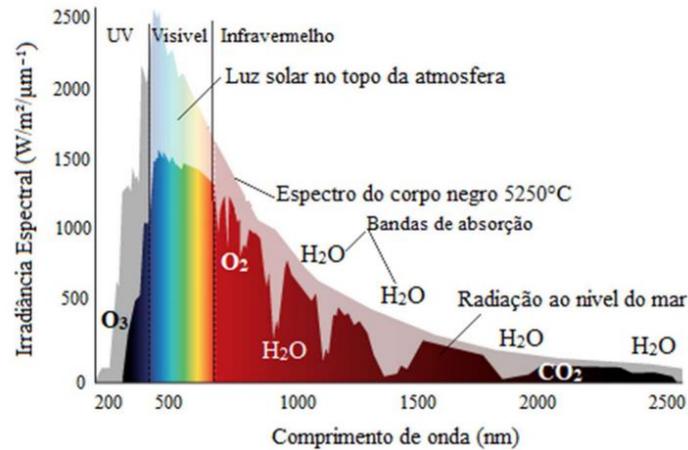
2.1 IRRADIAÇÃO EM SISTEMAS DE PV DISTRIBUÍDOS COM BASE NA OBTENÇÃO DE IMAGENS DO CÉU

A transferência de radiação na atmosfera é possível devido a energia solar que é recebida na terra resultante de uma reação massiva de fusão termonuclear no interior do sol. À medida que a luz do sol atravessa a atmosfera da Terra, ela pode ser absorvida, dispersa ou refletida pela superfície da Terra. O vapor de água, o ozônio, o oxigênio e o dióxido de carbono desempenham um papel importante na absorção da luz solar, seja ela visível, infravermelha ou ultravioleta (STANDARDS, 2007). A Figura 2.1 mostra o espectro de radiação para a luz direta no topo da atmosfera da Terra (amarelo) e no nível do mar (vermelho) para focalizar a faixa de interesse utilizada pelo CCSI.

A radiação solar no topo da atmosfera é significativamente alterada até alcançar o nível do mar. À medida que a luz atravessa a atmosfera, alguns fótons são absorvidos pelos gases com bandas de absorção específicas (na figura em azul). Essas curvas são baseadas na *American Society for Testing and Materials Terrestrial Reference Spectra* (ASTM), e são padrões adotados pela indústria fotovoltaica para garantir condições de teste consistentes dos aparelhos com funções destinadas a este fim. As principais regiões da irradiação percebida são a ultravioleta (UV), faixa do visível (V) humano e Infravermelho (IV). A radiação ao variar de 760 nm a 1 mm é uma radiação não ionizante localizada "abaixo do vermelho", isto é, adjacente à parte vermelha da faixa de radiação visível e estendendo-se até a faixa de micro-ondas. A região espectral de infravermelho é arbitrariamente dividida de acordo com o comprimento de onda em sub-regiões do infravermelho próximo na faixa entre 760 e 3000 nm, infravermelho médio entre 3000 e 30.000nm e o infravermelho distante entre 30.000 nm e 1 mm. A radiação infravermelho próximo do sol é seletivamente filtrada pela água atmosférica. Nesta conformação a informação necessária para a metodologia empregada utiliza a faixa do visível compreende o espectro captado pela visão humana. Esta faixa varia do azul para o vermelho (ROMANO et al., 2018). A figura 2.1 apresenta o espectro da radiação da luz por meio de cores, com o azul

escuro representando a parcela da UV, o visível em tonalidades do azul para o laranja e o infravermelho em tonalidades do vermelho.

Figura 2.1 - Espectro da radiação solar composta de luz visível, infravermelha radiação ultravioleta que atingem a superfície terrestre.



Fonte: Adaptado de (LAW et al., 2014).

Uma série de condições físico-químicas acerca desta transformação foram levadas em consideração nos projetos do CCSI e serão discutidas nos subitens deste tópico de maneira a cumprir os requisitos técnicos de engenharia e de aptidão às normas específicas da produção de aparelhos meteorológicos da *World Meteorological Organization* (WMO). Para isso apresentamos o uso de imagens para cumprir a meta em paralelo aos conceitos básicos da transformação da energia fotovoltaica em energia elétrica, de maneira a relacionar os conceitos. A primeira condição imposta à metodologia empregada no CCSI trata-se do efeito de absorção a nível atômico nas células fotovoltaicas e de como podem ser relacionadas às imagens do céu.

Para estabelecer as condições de trabalho do CCSI o conceito primaz é o da transformação fotoelétrica. Esta transformação é dada pelo efeito resultante da capacidade de absorção de energia contida nos fótons da radiação luminosa incidente sobre o PV. O efeito fotovoltaico não pode ser expresso diretamente com base em uma imagem. Isto é feito de maneira indireta, por associação com medidas de caracterização da intensidade e iluminância da imagem com outras grandezas capazes de serem medidas e associadas a ele. Uma associação deste tipo pode ser definida pela intensidade do pixel quando a célula é exposta

à radiação solar (evento de céu claro) e, por conseguinte, relacionado ao efeito de campo elétrico de uma junção de materiais do tipo p - n .

A associação de séries históricas de variáveis climáticas é comumente utilizada para poder estabelecer níveis de irradiação a partir de imagens. Podemos afirmar razoavelmente que uma transformação à nível molecular pode ser atrelada à dados históricos de intensidade das imagens em conjunto com leituras paralelas de irradiação solar, pressão atmosférica, temperatura e umidade, advindos, por exemplo de estações meteorológicas em um sistema de equivalência, para extrair esta relação intensidade e iluminância de uma imagem com a energia produzida:

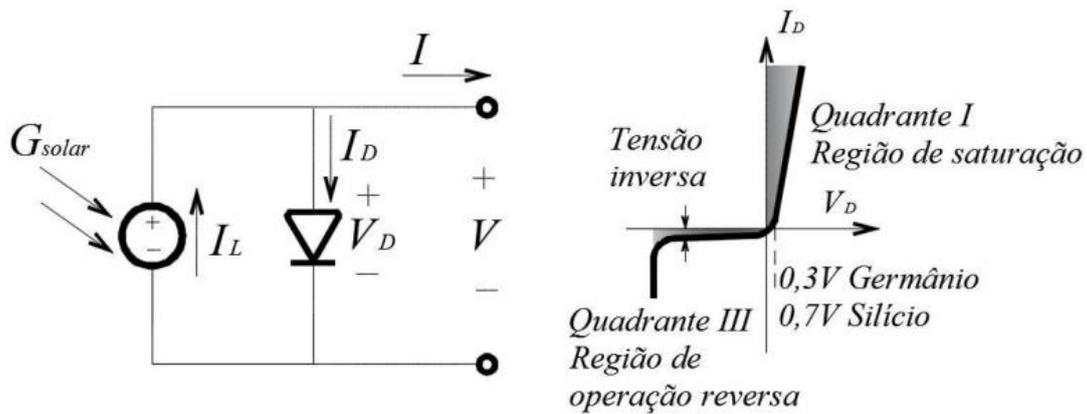
A modelagem de funções de transferência de radiação deve ser estabelecido para que as imagens do hemisfério do céu sejam capazes de corresponder às componentes da irradiância solar de superfície (CHOW et al., 2011).

Essas funções de transferência costumam a ser implementadas em algoritmos de inteligência artificial, tais como pela diferenciação entre o fundo do céu claro (YANG et. al, 2016) ou Redes Neurais Convolucionais (RNC), (MASUDA et. al, 2019) entre outros.

A transferência de radiação pode ser dada pela compatibilização de dados e de segmentação das imagens por meio da informação de limiares de luminância do pixel.

A potência de saída resultante do efeito fotovoltaico nos módulos fotovoltaicos, localizados geograficamente nas áreas de cobertura do estudo desta tese, utiliza a modelagem do circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica para compor a transformação de energia solar em elétrica. Utiliza primeiramente o conceito básico do modelo da célula fotovoltaica ideal. A célula ideal, especificamente a junção p - n, pode ser representada por um diodo. A Figura 2.2 representa o circuito equivalente ideal da célula fotovoltaica, sendo que o gráfico da direita mostra a curva de corrente versus tensão da junção p - n do diodo, e serve da definição para interpretar fotocorrente que é proporcional à radiação solar.

Figura 2.2 - Circuito equivalente ideal da célula fotovoltaica e curva de corrente.



Fonte: O Autor.

A célula fotovoltaica se comporta primeiramente segundo as condições do primeiro quadrante do diodo. Quando não há irradiação solar, a célula se comporta como um diodo não polarizado com mínimo fluxo de corrente. À medida que a corrente vai aumentando a curva se direciona para o terceiro quadrante. Com o aumento das parcelas de irradiação solar, a célula começa a se comportar como gerador e ocorre o aumento da corrente inversa no sentido da carga e do deslocamento da curva. A corrente gerada na célula fotovoltaica varia de acordo com o nível de radiação a qual ela é exposta. A corrente de saída I é obtida pela lei Kirchhoff:

$$I = I_f - I_d, \quad (2.1)$$

Aqui, I se refere à corrente de saída da célula fotovoltaica, I_f é a fotocorrente proporcional à radiação solar que é convertida diretamente em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, I_d é a corrente de saturação reversa do diodo na ausência de radiação solar ou a impossibilidade de gerar portadores minoritários além dos termicamente gerados na junção p - n do diodo. Estruturando a equação da lei Kirchhoff com base no modelo ideal do diodo têm-se:

$$I = I_f - I_d \left[e^{\left(\frac{qV}{\alpha kT}\right)} - 1 \right], \quad (2.2)$$

Na equação define-se q como a carga de elétrons, V a tensão de saída da célula fotovoltaica, α o fator de idealidade de diodo, que varia entre 1 e 2 para o silício cristalino, k a constante de Boltzmann e T a temperatura de junção p - n

de 298,15 K (25°C). Nesta condição a associação de equipamentos meteorológicos como o piranômetro é necessária para a leitura de temperatura associado à obtenção concomitante de um *frame* de uma imagem para associar o valor de um pixel ao aumento de temperatura nas junções p - n em uma área específica de um painel fotovoltaico, que é representada pelo pixel lido na imagem. Da mesma forma, aliando um sistema de leitura volt-ampère que guarda as leituras do aumento da corrente fotogerada I_f , e que pode ser armazenado em séries temporais de dados de luminância do pixel de uma imagem, são os dados necessários para a entrada em softwares para a sua correlação e a simulação do efeito fotovoltaico por meio de imagens. A introdução de perdas ao modelo de obtenção da irradiação solar por meio de imagens se justifica para dar condições de atrelar o modelo à realidade dos sistemas fotovoltaicos por meio das resistências série R_s e a resistência shunt R_p . A Equação 2.1 passa a ter a formação da Equação 2.3.

$$I = I_f - I_d - I_p, \quad (2.3)$$

Sendo I_p a corrente de fuga do resistor em paralelo. A corrente de saída passa a ser escrita por:

$$I = I_f - I_d \left[e^{\left(\frac{qV}{akT}\right)} (V + IR_s) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (2.4)$$

Nesta formação V representa a tensão de saída, I a corrente de saída, da célula fotovoltaica, R_s representa a resistência série e as perdas ôhmicas do material e contatos metal condutor e R_p representa a resistência shunt das correntes parasitas intrínsecas à célula na sua parte plana bem como nas bordas ou internas oriundas de impurezas. Nota-se, pela Equação 2.4, que ao associarmos medidas indiretas de variáveis climáticas em séries compostas por imagens, estamos associando variáveis dependentes da fabricação do painel fotovoltaico.

2.2 A ÁREA DE CAPTAÇÃO EM PIXELS DE IMAGEM

A área do painel fotovoltaico pode ser localizada geograficamente e atrelada à área de um pixel da imagem por frações de metro quadrado. Com isso, o computo de irradiação solar em um conjunto de pixels de uma imagem

representa, em escala geográfica ampliada, a área de um conjunto de painéis fotovoltaicos que sofrem o efeito da cobertura de nuvens ou de céu claro.

Expandindo estas relações indiretas à efeitos como da temperatura, torna-se possível, de maneira generalizada, observar na leitura pontual discriminatória de cada pixel da imagem, surge a necessidade de incluir a eficiência elétrica de um painel fotovoltaico, de acordo com as características de cada fabricante, o que leva à prever a energia gerada com base em informações reais.

Uma condição importante para a averiguação destas medidas em grandes áreas, como cidades, está relacionada à variação na fabricação de equipamentos. Sendo assim uma relação importante que deve ser levada em consideração é a eficiência dos painéis ao longo da área de interesse. Em escala econômica, não basta simplesmente informar a energia que está sendo gerada, mas também qual é o desempenho do sistema na sua forma espalhada. Uma metodologia que exprime uma relação linear na forma da eficiência ideal elétrica da PV é dado por:

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})], \quad (2.5)$$

Onde, $\eta_{T_{ref}}$ corresponde às eficiências da célula solar na temperatura da célula e na temperatura ambiente, respectivamente, β_{ref} é o coeficiente de temperatura de ($0,004 \text{ K}^{-1}$), T_c e T_{ref} são a temperatura celular e a temperatura de referência da célula solar, respectivamente. T_{ref} é normalmente fornecido pelo fabricante do painel fotovoltaico. Todavia, em condições em que se torne precária a obtenção de todas as características do sistema monitorado, podem ser usadas temperaturas para um dado fluxo de radiação solar β_{ref} pela razão da equação:

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_o - T_{ref}}, \quad (2.6)$$

Sendo T_o a máxima temperatura para qual a eficiência do módulo fotovoltaico cai para zero. Para células solares de silício cristalino, esta temperatura é 270°C . O valor real do coeficiente de temperatura, em particular, depende não apenas do material fotovoltaico, mas também do T_{ref} . A quantidade

$(T_c - T_{ref})$ aumenta com a temperatura da célula e consequentemente a eficiência diminui.

Verifica-se na prática que estes valores devem estar inseridos na informação dos pixels ao longo da área de interesse para estabelecer, em conjunto com dados de estações meteorológicas posicionadas na região de cobertura dos painéis fotovoltaicos, a função de transformação de energia. Outras informações se referem à degradação óptica dos painéis, degradação elétrica, a falta de manutenção e o próprio intemperismo do clima.

2.3 SÉRIES HISTÓRICAS DE IRRADIANCIA ASSOCIADAS A IMAGENS

Finalmente, com a interação entre as variáveis climáticas e a teoria dos circuitos podemos vincular a foto corrente como dependente da irradiação e da temperatura. Mantendo o foco sobre a Equação 2.4, que conceitua I_f como a fotocorrente proporcional à radiação solar, podemos defini-la na prática por:

$$I_f = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \mu_{SC} \cdot (\Delta T)), \quad (2.7)$$

Sendo G a irradiância em 1000 W/m^2 , G_{ref} a irradiância sob condições de teste padrão (STC)¹, que correspondem a uma irradiância solar de 1000 W / m^2 com espectro de massa de ar de 1,5 na temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. A variação de temperatura é:

$$\Delta T = T_c - T_{c,ref}, \quad (2.8)$$

Sendo $T_{c,ref}$ a temperatura real da célula em $\text{STC} = 25 + 273 = 298 \text{ K}$, T_c é a temperatura real da célula em Kelvins e μ_{sc} o coeficiente de temperatura de corrente de curto-circuito (A/K), fornecido pelo fabricante e $I_{ph,ref}$ a fotocorrente (A) em condições padrão de teste (STC).

¹ A padronização do setor com o qual os módulos fotovoltaicos são classificados e podem ser comparados é chamado de STC (Standard Test Conditions). STC é um conjunto de testes realizados em laboratórios com condições pré-definidas que se assemelham as condições em que os painéis solares ou módulos fotovoltaicos podem ser usados. Os principais fatores avaliados pelo STC são a Irradiância (intensidade ou potência de luz solar), em watts por metro quadrado, que caem sobre uma superfície plana: O padrão de medição é de kW por metro quadrado. ($1.000 \text{ watts / m}^2$) (IBRAHIM; ANANI, 2017).

Pela análise das variáveis das Equações 2.7 e 2.8 é possível discernir que G e T_c são as variáveis meteorológicas as quais o painel é submetido. Estas variáveis também podem ser associadas em séries históricas, o que possibilita o cruzamento de dados para obter padrões, associando plenamente as imagens do céu ao efeito fotovoltaico em terra.

2.4 A RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DE ZÊNITE E A ÁREA DE COBERTURA DE IRRADIANCIA SOLAR DIRETA

Podemos partir do princípio de que da radiação solar que atinge a superfície da Terra cerca de 54,3% da energia solar incidente é composta de infravermelho, enquanto as contribuições de radiação UV e da luz visível são de 6,8 e 38,9%, respectivamente (I. E. KOICHEVAR, 2012). Para uma atmosfera plana e sem anisotropia, um conceito introdutório ao entendimento acerca da luz no topo da atmosfera é comumente referida como massa de ar nula (AM0) em relação ao nível do mar como massa de ar unitária (AM1). A intensidade da radiação solar é reduzida de 1367 W/m^2 , valor da constante solar para a terra, para aproximadamente 1000 W/m^2 , de AM0 para AM1, uma diferença de quase 30% (R. MESSENGER, et al., 2018). A AM é calculada de acordo com a diferença de pressão e o ângulo do zênite da equação:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \left[\frac{P}{P_0} \right], \quad (2.9)$$

Sendo AM a massa de ar, θ_z o ângulo zenital, P a pressão local e P_0 a pressão ao nível do mar em unidades de Pascal (Pa). Desta equação podemos verificar como a irradiação sofre mudanças até chegar no seu valor de referência no solo.

O monitoramento do ângulo de zênite da Equação 2.9 pode expressa em uma área ortogonal aos raios solares, pela a integral da densidade de potência durante um período, tipicamente em um dia, ou seja, a densidade de energia gerada diariamente. Portanto, esta equação em particular, demonstra uma associação entre o zênite e a área exposta à intensidade da irradiação. Quanto maior for o ângulo de θ_z , menor a irradiância solar extraterrestre em um plano

horizontal. A lei do Cosseno de Lambert mostra essa relação entre a Irradiância solar e θ_z da seguinte forma:

$$I_{rad} = Q \cdot Fn \cdot \cos(\theta_z), \quad (2.10)$$

Sendo Fn o fator orbital que modela a distância variável Terra-Sol, Q a constante solar dado por $Q = 1360 \text{ W/m}^2$, sendo ainda definido o cosseno de θ_z por:

$$\cos(\theta_z) = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h, \quad (2.11)$$

Sendo ϕ a latitude (0 a $\pm 90^\circ$), δ a declinação solar (0 a $\pm 23,45^\circ$):

$$\delta = 23,45 \sin [(360/365) \cdot (NDA - 80)], \quad (2.12)$$

NDA representa o número de dias do ano em relação à janeiro e h o ângulo horário em graus:

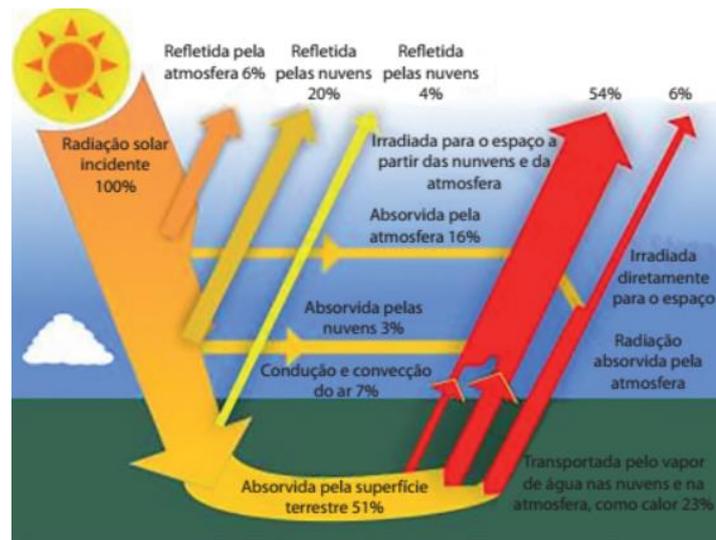
$$h = [(Hora \text{ solar local} - 12)/15], \quad (2.13)$$

Esta condição também representa, de maneira indireta, que a irradiância em W/m^2 associada à uma imagem normal ao ângulo de zênite e da declinação dos raios solares que podem estar ou não expostos ao efeito de barreira das nuvens.

2.5 AS RELAÇÕES DE INCLINAÇÃO DE SUPERFÍCIES E A IRRADIAÇÃO SOLAR

Da radiação transmitida na forma de energia que é transmitida pelo sol e refletida nos diferentes materiais de acordo com seus albedos, estima-se que a radiação que atinge que penetra na atmosfera é refletida ou irradiada em cerca de 20% pelas nuvens, Figura 2.3. Este percentual se torna importante devido à necessidade do conhecimento da cobertura de nuvens e, por conseguinte, da sombra projetada e seu impacto sobre a geração por PV.

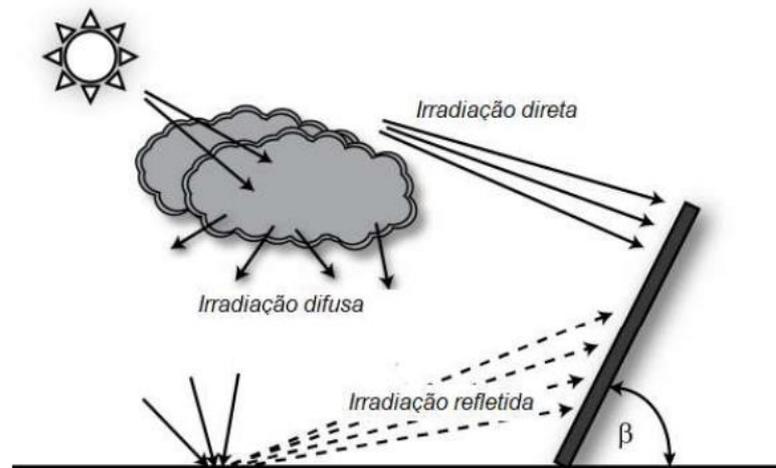
Figura 2.3 - Radiação solar refletida e incidente na atmosfera.



Fonte: Portal das Energias Renováveis (2020).

Para encontrar a irradiação em uma superfície inclinada a radiação solar incidente é decomposta em parcelas da Radiação Direta, Radiação Difusa e Radiação Refletida de acordo com o albedo² terrestre e ajustadas para o ângulo do módulo fotovoltaico. A intensidade de insolação terrestre num plano inclinado em β graus em relação à superfície horizontal é representada pela Figura 2.4.

Figura 2.4 - Radiação Direta, Radiação Difusa e Radiação Refletida



Fonte: DA SILVA; ALVES MACIEL; FRANÇA, 2017, (ADAPTADA).

A equação que se dedica a demonstrar a decomposição da irradiação terrestre para planos inclinados, levando em conta a radiação direta, é dada por:

² A quantidade de energia solar que chega, por unidade de tempo e por unidade de área, a uma superfície perpendicular aos raios solares, à distância média Terra-Sol.

$$I(\beta) = I_{PH} \cdot \cos(\theta_i) + I_D \cdot R_D + I_{IH} \cdot R_A, \quad (2.14)$$

Sendo $I(\beta)$ a irradiância global, em um plano inclinado para β dado em graus em relação à superfície horizontal, I_{PH} a irradiância direta no plano horizontal, θ_i o ângulo de incidência da radiação no plano inclinado, I_D a componente de irradiância difusa num plano horizontal, $R_D = (1 + \beta) / 2$, I_{IH} se refere à intensidade total de irradiação, e R_A o coeficiente de reflexão (ou albedo) para um plano intitulado, no caso para efeito do cálculo da radiação sobre módulos fotovoltaicos. A radiação total incidente em um plano durante um dia inteiro é representada pela integral da intensidade de insolação terrestre num plano inclinado em β graus em relação à superfície de interesse. Esta integração é relacionada ao tempo de captação dos módulos fotovoltaicos, usando os horários entre o nascer e do pôr do sol como limites:

$$H(\beta) = \int_{NS}^{PS} I(\beta) dt, \quad (2.15)$$

Sendo, $H(\beta)$ a radiação total incidente e $I(\beta)$ a intensidade de insolação terrestre num plano inclinado em β graus em relação à superfície horizontal em W/m^2 , ainda NS corresponde ao horário do nascer do sol e PS ao pôr do sol.

A informação de β deve também ser associada à informação do pixel da imagem, para que seja possível representar a projeção da sombra da nuvem de acordo com a inclinação dos raios solares. Além da inclinação do zênite, a ocorrência de elementos de sombra (prédios e árvores), lindeiros aos painéis também devem ser levados em consideração para simular sua influência, de acordo com o horário do dia, na projeção da sombra por estas barreiras ou no computo da irradiação difusa.

Apresentada a fundamentação teórica e as relações de transformação da energia radiante, cabe apresentar a revisão bibliográfica que fundamenta a metodologia empregada no CCSI.

2.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Nas seções anteriores buscou-se definir o princípio norteador da obtenção de irradiação solar em áreas concentradas localmente ou distribuída aleatoriamente em grandes áreas de PV para poder definir geograficamente a

energia gerada. A hipótese apresentada neste trabalho é factível pela compreensão de como uma imagem pode corroborar como meio de leitura e de estimativa da irradiação sobre grandes áreas. Desta maneira, a consolidação entre o meio que é a imagem e o resultado que é a irradiação solar devem ser rigorosamente interligados por um método de transferência de radiação.

Este capítulo direcionou a pesquisa aliando o conhecimento acerca dos princípios das condições de atmosfera em que se dão as alterações da irradiação ao atravessá-la, e a maneira com que as relações nuvem e irradiação são necessárias à interligação de conceitos e ao projeto do CCSI.

Apresentou também a transformação da energia fotoelétrica a partir do diodo ideal para poder manter relações entre a imagem, o conjunto de séries históricas de variáveis meteorológicas e a angularidade dos feixes solares para relacionar a transformação e o balanço de energia antes e após a célula fotoelétrica.

Por fim relacionou estas conjunções à unidade de imagem, o pixel, e , em seguida à superfície de interesse do PV em terra.

As informações deste capítulo favorecem as condições de viabilidade do projeto do CCSI, corroborando para o portfólio de projetos que advirem destas condições, sendo vinculada às bases referenciais do estado da arte que serão apresentadas no próximo capítulo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto embarcados em satélites, celulares, automóveis e recursos como *IOT (Internet Of the Things)*, além dos recursos modernos das *Smart Grids* e *Virtual Power Plants*, é de se esperar que, também para o futuro próximo, que uma série de novos equipamentos e métodos surjam para prever a energia elétrica disponível à humanidade oriunda recursos energéticos renováveis intermitentes.

A capacidade de unir várias áreas do conhecimento, em prol de um tema originalmente sequencial ao estado da arte é o que faz este trabalho dar um passo em direção ao ineditismo a que muitos grupos de pesquisa, assim como o PPGEE da UFSM, buscam diariamente. Breves relatos, expostos na sequência, de cunho significativo na escolha do tema, demonstram sua importância. Sendo, portanto, escolhido e acolhido pelo grupo de pesquisadores do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESPE), Grifo do autor:

“A capacidade Alta resolução a curto prazo (segundos a alguns minutos à frente) a previsão solar local, baseada em imagens do céu, é uma tecnologia chave, onde a irradiação solar é uma questão crítica, por exemplo, ao operar redes elétricas com alta penetração de sistemas fotovoltaicos ou *Photovoltaic Systems* (PV). Especificamente em redes remotas (fora da rede), a integração de uma parcela maior de geração fotovoltaica é limitada principalmente pelas flutuações de energia fotovoltaica causadas pela passagem de nuvens” (WEST et al., 2014).

“Portanto, os métodos precisos de previsão solar são de interesse para os operadores de redes de eletricidade remotas. Métodos de previsão bem conhecidos, baseados em modelos numéricos de previsão de tempo ou imagens de satélite, no entanto, não possuem resolução espacial e temporal para resolver e detectar estruturas de nuvens de pequena escala, necessárias para previsões precisas e de alta resolução” (SCHMIDT et al., 2015).

“Por outro lado, os métodos estatísticos baseados em séries temporais não são capazes de prever eventos de rampa. A previsão de curtíssimo prazo baseada em imagem do céu fornece alta resolução temporal (segundos) e espacial (metros) juntamente com altas taxas de atualização (poucos segundos)” (WEST et al., 2014).

“A capacidade de detectar e rastrear nuvens no campo de visão da lente da câmera permite aos usuários prever os eventos da nuvem pouco antes de ocorrerem. Céu claro, condições de nuvens nubladas ou dispersas podem ser identificadas e usadas para fornecer informações sobre a saída de energia dos sistemas fotovoltaicos no futuro próximo (por exemplo, em relação à sua constância ou de forma altamente variável). Os operadores da rede serão capazes de tomar

medidas para melhorar a estabilidade da rede na situação prevista, iniciando uma geração mais despachável, gerindo ou reduzindo a geração fotovoltaica, cargas móveis ou elementos de armazenamento de carga e descarga”, (D. PETERS ET AL., 2016).

“Com foco na integração de PV em sistemas remotos de eletricidade com geradores a diesel, avaliamos o desempenho da previsão quanto à capacidade do modelo de previsão de prever irradiação solar nos próximos 2 a 5 minutos, permitindo iniciar e sincronizar um típico gerador a diesel. A previsão precisa de mudanças na irradiação solar na janela de tempo crítico acima mencionada é importante, em vez de prever com exatidão a irradiância em um ponto específico no tempo e no espaço. A principal questão a ser respondida é: quão confiável é a previsão de que não haverá evento de nuvem na janela de tempo de interesse?” (SCHMIDT et al., 2015).

3.1 SENSORIAMENTO DA IRRADIAÇÃO SOLAR E SUAS APLICAÇÕES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os imageadores do céu por câmeras omnidirecionais³ são uma solução promissora para horizontes de obtenção de dados de curto prazo (CHOW; BELONGIE; KLEISSL, 2015, CALBÓ; SABBURG, 2008, e SCOLARI et al., 2018) e também para os problemas apresentados na seção de motivação.

A alta resolução espacial das câmeras omnidirecionais, quando usadas no monitoramento do céu, detalha a geometria da nuvem e permite a averiguação do espelhamento de sua sombra sobre o solo. A utilização de softwares especializados de georreferenciamento, em conjunto com esta tecnologia, possibilita antever o impacto da nuvem sobre o sistema fotovoltaico em uma área geograficamente localizada, a partir da velocidade tamanho e distância da nuvem em relação à PV.

Com base nas experiências de diferentes projetos, este trabalho investigou uma revisão das tendências históricas das tecnologias de imageadores do céu e apresentada as diferenciações do CCSI em relação às metodologias que foram empregadas em diversos trabalhos, bem como dos imageadores do céu existentes no mercado.

³ Um sistema de visão omnidirecional permite a aquisição de imagens com um campo de visão de 360 graus. Este tipo de sistema pode ser obtido através da combinação das imagens provenientes de uma única câmera que gira em torno de um eixo, de imagens oriundas de diversas câmeras ou através da combinação entre uma câmera e um espelho (Chow et al., 2011).

3.1.1 Imagens do céu obtidas em solo

Os avanços na tecnologia das câmeras permitiram o uso de imageadores do céu por vários grupos de pesquisa, tais como Chow et al. (2011), Gohari et al. (2014) e Marques e Coimbra (2013). Várias metodologias usam a câmera omnidirecional como um gerador de imagens do céu para rastrear nuvens e efeitos ópticos da profundidade dos aerossóis, dentre eles os trabalhos de Calbó et al. (2017) e Kuhn et al. (2019a), prevendo irradiância direta entre a atmosfera e a superfície, Dev et al. (2019), Elsinga e Van Sark (2017), Marquez e Coimbra (2013) na estimativa de cobertura e classificação de nuvens e Blanc et al. (2017) para grandes varreduras espaciais e em intervalos de tempo curtos. Todos estes sistemas foram baseados na instalação fixa de câmeras.

Várias estruturas de imageadores do céu instalados em terra foram desenvolvidas ao longo dos anos. Para exemplificar, dividimos os sistemas, de acordo com suas estruturas de montagem, em catadióptricos e dióptricos:

- Segundo Long et al. (2006) os sistemas catadióptricos usam uma câmera digital posicionada verticalmente apontando um espelho curvo (dome) que captura imagens do céu. O *Total Sky Imager* (TSI), desenvolvido pela *Yankee Environmental Systems, Inc.* (YES), usa esse tipo de montagem (YANG et al., 2014 e DU et al., 2018). O sistema óptico-catadióptrico tem resolução espacial radiométrica⁴ relativamente baixa e pouco controle sobre as configurações de captura da câmera (URQUHART et al., 2012), Figura 3.1.

⁴ A resolução radiométrica de uma imagem é a capacidade de discriminar pequenas diferenças na energia. Um sensor de alta resolução radiométrica é capaz de detectar pequenas diferenças na energia refletida ou emitida (AIDES et al., 2020).

Figura 3.1 - Total Sky Imager (TSI)



Fonte: *Yankee Environmental Systems, Inc. (YES)*

- Sistemas dióptricos possuem um gerador de imagens do céu inteiro, como o Whole Sky Imager (WSI) implantado pela primeira vez em 1984 no trabalho de Calbó e Sabburg (2008) pela *Scripps Institution of Oceanography (SIO)*, usando uma câmera com dispositivo de carga acoplada⁵ e lente olho de peixe virada para o céu, com a oclusão do sol produzido por um dispositivo de bloqueio (KLEISSL, 2013). Outro exemplo deste tipo é o imageador de céu da Universidade da Califórnia, em San Diego (USD) nos Estados Unidos, que usa um dispositivo de carga acoplada com uma câmera omnidirecional para capturar imagens em alta resolução e compressão (YANG et al., 2018), Figura 3.2.

⁵ Dispositivo de carga acoplada ou CCD (charge-coupled device) é um sensor semicondutor para captação de imagens formado por um circuito integrado que contém uma matriz de capacitores acoplados (SNYDER; WHITE; HAMMOUD, 1993).

Figura 3.2 - *Whole Sky Imager (WSI)*

Fonte: *Scripps Institution of Oceanography (SIO)*

Verifica-se na figura 3.2 que o aparelho apresenta a barreira sobre o foco da câmera, o que reduz consideravelmente a imagem captada. Para mitigar esta condição o CCSI posicionou um aparato de barreira da ofuscação do sol sobre a lente que reduz para 5% a barreira sobre a imagem, em contraponto aos 14% da faixa de sombra no TSI. A nova concepção do CCSI, pretende anular o percentual da barreira do aparato com a inclusão de câmeras que inspecionam a região circunsolar.

Os protótipos do CCSI utilizaram câmeras CMOS que também são tecnologias empregadas para obtenção de imagens do céu. Estes dispositivos serão apresentados no decorrer dos capítulos.

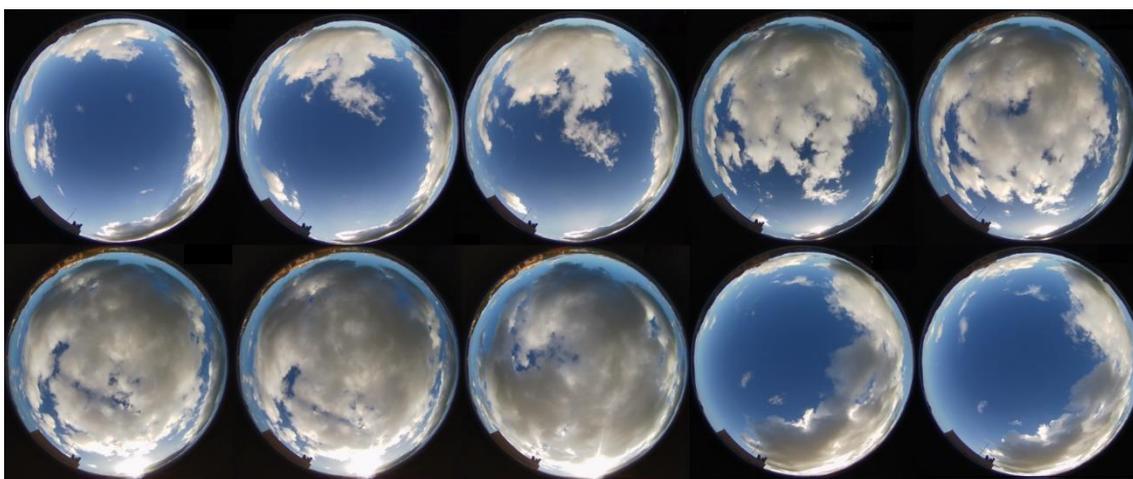
3.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS

Estabelecer o modelo de calibração da câmera é o primeiro passo para definir as características de distorção da lente omnidirecional. A definição precisa das características físicas da câmera e suas lentes influenciam a capacidade de capturar séries temporais de imagens do céu hemisférico a uma alta taxa de *frames* (MATSUKI et al., 2018; MAZHAR et al., 2017; NOU et al., 2018; OMAR;

MAHMOUD, 2019; RAN et al., 2017a). Aliado a isso, a alta resolução favorece a classificação das nuvens (BEEKMANS et al., 2016) com mais detalhes.

A distorção radial da lente e seu efeito na imagem, como no exemplo da Figura 3.3, com a distorção da imagem de uma nuvem obtida por imagens de uma câmera omnidirecional, a distorção é comumente conhecida como efeito de Barrel e necessita de tratamento por algoritmos para retirada da distorção. Os algoritmos comumente executam a retirada da distorção da imagem com base em reprojeção a partir de polinômios de segunda, terceira ou quarta ordem (TZAFESTAS, 2013).

Figura 3.3 - Distorção da imagem de uma nuvem por uma câmera omnidirecional.



Fonte: O autor.

Essas metodologias recuperam uma matriz de homografia⁶ das leituras de imagens orientadas por quadros de grade, como o tabuleiro de xadrez. As propostas para obter os coeficientes de um polinômio para descrever a distorção geralmente usam o método dos mínimos quadrados em conjunto com o algoritmo Levenberg Marquardt e suas variações tais como em Yao Gavin (2019) e Yu et al. (2016). Essas técnicas foram usadas para calibrar as câmeras dos CCSI, com base em Scaramuzza et al. (2006, 2017) que apresenta uma toolbox do Matlab[®] de algoritmos para a calibração de câmeras omnidirecionais.

⁶ A relação entre a posição de um ponto em um cenário planar e sua posição na imagem é dada por uma matriz $h_{3 \times 3}$ denominada homografia.

3.3 OBTENÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR, CLASSIFICAÇÃO E POSIÇÃO DAS NUVENS

A obtenção da irradiação intra-hora é importante para avaliar a cobertura de nuvens nos sistemas fotovoltaicos, devido à velocidade com que as nuvens podem se movimentar e impactar sobre a geração distribuída.

O foco deste monitoramento é a irradiância horizontal global (GHI) dividida em seus componentes, a irradiância normal direta (DNI), que viaja diretamente para o PV e é significativamente afetada pelas nuvens, já a irradiância horizontal difusa (DHI) é definida pelos raios de sol refletidos (LAW et al., 2014) e está associada à irradiação de acordo com a superfície refletora. O CCSI monitora os espaços de céu aberto (céu claro), portanto seu funcionamento está intrinsicamente relacionado à obtenção da DNI, ou seja, a irradiância perpendicular aos raios do sol. Para esse fim, as câmeras são extremamente hábeis em rastrear eventos que ocorrem no céu, para prever o movimento das nuvens usando imagens terrestres do céu (PENG et al., 2015; WACKER et al., 2015). As previsões de curto prazo do nível do solo do DNI foram exploradas com valores médios do DNI de 1 minuto em horizontes temporais que variaram de 3 a 15 minutos (CHOW; BELONGIE; KLEISSL, 2015; YANG et al., 2014). Semelhante a isso, mapas estereoscópicos do céu obtidos por câmeras foram produzidos para séries temporais de 1 minuto de mapas DNI decamétricos (dez metros) em Blanc et al. (2017).

Câmeras digitais comerciais podem ser usadas para estimar a cobertura e classificação das nuvens (KAZANTZIDIS et al., 2012). As imagens fornecem uma estimativa da velocidade e posição das nuvens (CRISPEL; ROBERTS, 2018), rastreando o céu em intervalos de alta frequência de *frames* por minuto ou menos. Em Kazantzidis et al (2012) e Oikonomou et al. (2019), verificou-se a introdução de câmeras digitais comerciais na estimativa automática da cobertura e classificação total de nuvens. Para o projeto do CCSI, câmeras omnidirecionais foram utilizadas com os mesmos preceitos de Kazantzidis et al. (2012) com resoluções de 6 e 12 *megapixels*.

West e seus colaboradores (2014) usaram câmeras Vivotek (Mobotix Q24 FE8172V) para gerar imagens de nuvens de alta resolução, combinando um

banco de dados e redes neurais para classificação de pixels. Em suas aplicações, usaram o método de fluxo óptico denso para estimar o movimento das nuvens. Nguyen et al. (2016) propuseram um método para melhorar os estudos de capacidade de um alimentador, usando perfis de geração fotovoltaica e imagens de alta resolução a partir de imageadores do céu para simular um sistema de distribuição com um aparelho passivo de captação de imagens. O CCSI atribui esta sistemática ao monitoramento da câmera com a inclusão de um banco de dados das redes de energia aliado à um cadastro multifinalitário da cidade onde é monitorada a área de interesse do céu. Esta condição estabelece a conexão de vários fluxos de energia e seu transporte ao longo da área de interesse.

Sun et al. (2015) apresentaram um sistema de previsão de irradiância baseado na oclusão do sol devido a nuvens. Para esse fim, a previsão de cobertura de nuvem combinou banco de dados de imagens do céu, rastreamento de nuvens, localização do sol e segmentação de imagens nuvens. Embora este trabalho tenha conseguido bons resultados, a oclusão do sol na imagem se manteve como fator prejudicial à captação da imagem. Este trabalho em específico incentivou a proposição de inserir movimento à câmera do CCSI aliando também a questão de minimizar o efeito do aparato sobre a câmera. O que levou ao projeto de um seguidor solar aliado à uma câmera omnidirecional.

3.4 MEDINDO A ALTURA DA BASE DA NUVEM

Para obter a influência da sombra das nuvens e adicionalmente prever sua movimentação e velocidade sobre a área de captação de energia, dois fatores são importantes:

1. Obter a altura da base da nuvem (ABN), e;
2. Obter a área de projeção das nuvens sobre o solo.

Instrumentos ativos como o ceilômetro podem medir a ABN no ponto diretamente acima do sensor (NOURI et al., 2019) e são comumente usados para validar a medição da profundidade da imagem pelas câmeras. Várias metodologias como Crispel e Roberts (2017, 2018), Vaz e Canha (2018), consideram que a precisão depende da qualidade da câmera, dos algoritmos de

reconstrução além da qualidade da reconstrução estéreo e do método de calibração. Essas condições também impactam na obtenção da distância entre a nuvem e o observador.

As ferramentas para validação da altura da nuvem, como radares, lidars e ceilômetros, apresentam altos custos de aquisição. Devido ao baixo custo, manutenção e instalação dos dispositivos, a ABN determinada por dois ou mais CCSI pode ser facilmente determinada. Entre os trabalhos que utilizaram câmeras fixas para definir a ABN, estão os trabalhos de Beekmans et al. (2016), Crispel e Roberts em (2017, e 2018), Yamashita e Yoshimura (2012) que utilizaram a fotogrametria⁷ estéreo por câmeras de todo o céu para identificar e localizar geograficamente elementos do campo de nuvens orientado pelo ângulo do zênite solar. Uma característica importante do CCSI é representada aqui em relação aos outros aparelhos. Com a função de movimentação em relação aos ângulos solares, dois ou mais CCSI conseguem, por estereografia medir não só as distâncias no eixo Z, como o ceilômetro. Esta tecnologia também está capacitada para medir a distância entre uma nuvem em particular e o solo, à medida que segue esta nuvem. O que pode ser implementado pelo reconhecimento de padrões da imagem a partir do sistema de processamento de imagens.

A velocidade e a posição da nuvem podem ser adquiridas em conjunto com a medição da ABN por estarem associadas à análise das sequências de *frames* e ao reconhecimento dos padrões de imagem (CRISPEL; ROBERTS, 2018; KATAI-URBAN et al., 2018). Para determinar a distância a ABN ou a profundidade da imagem da nuvem, a estereografia, é utilizada como metodologia na literatura. Essa técnica combina duas ou mais câmeras obtendo imagens tridimensionais (3D) para encontrar a localização dos alvos no céu, usando imagens estéreo trianguladas (CRISPEL; ROBERTS, 2018). Duas ou mais câmeras fixas a uma certa distância capturam imagens simultâneas. O mesmo efeito pode ser alcançado com uma câmera em movimento (paralaxe⁸) instalada em uma aeronave ou em um satélite. Trabalhos como Katai-Urban et

⁷ A Fotogrametria é definida na ciência aplicada como a técnica e a arte de extrair de fotografias métricas, com a forma, as feições, as dimensões e as posições dos objetos nelas contidos.

⁸ Paralaxe é a diferença na posição aparente de um objeto em relação a um plano de fundo, tal como visto por observadores em locais distintos ou por um observador em movimento.

al. (2018) apresentaram metodologias alternativas para obter a profundidade (ou distância) entre nuvens e o solo usando uma metodologia baseada em textura, os chamados estereogramas⁹ piramidais de pontos aleatórios no espaço tridimensional, com a inserção de ruídos intencionais para medir e avaliar estatísticas de reconstrução.

Várias abordagens na literatura usam conjuntos de dois, três ou mais imageadores do céu. Alguns utilizam dois TSI como em Nguyen e Kleissl (2014), Peng et al. (2015) e três TSI em Katai-Urban et al. (2018), entre outros.

Durante a validação das metodologias do CCSI foram utilizados dois aparelhos para medir a distância de profundidade das nuvens, sendo comparados com trabalhos da literatura. A seção de resultados demonstra a comparação com estes resultados.

Uma questão importante abordada no trabalho de Kuhn et al. (2019) foi a determinação da distância ideal entre as câmeras (linha de base) associada à resolução dos sensores de 3 megapixels para medições da ABN, apresentando um estudo para dimensionar essas relações. O CCSI utilizou esta mesma sistemática para dimensionar a linha de base para a distância entre os aparelhos na estereografia, a validação neste caso também apresentou resultados semelhantes aos obtidos pelos outros métodos.

3.5 OCLUSÃO SOLAR

Outra questão importante, ao usar esse tipo de dispositivo, é a dispersão dos feixes de luz na região ao redor do sol devido a aerossóis que saturam a imagem do céu. A dispersão dos feixes de luz aumenta a degradação da qualidade da imagem, difração, reflexos internos e saturação do sensor da câmera, que devem ser considerados na obtenção de imagens nítidas. Todos estes fatores são de igual importância (KLEISSL, 2013; URQUHART et al., 2015), principalmente quando associamos as áreas de imagem do céu ao seu par refletido geograficamente. A degradação da imagem depende do design óptico da lente e requer processamento de imagem por software especializado

⁹ Um estereograma é uma técnica de ilusão de óptica, onde a partir de duas imagens bidimensionais complementares, é possível visualizar uma imagem tridimensional.

para mitigar os efeitos de imperfeições. Os filtros aplicados à lente da câmera do CCSI contribuíram com a atenuação desses efeitos. A oclusão do sol usada no TSI e no WSI mitigam esse efeito com dispositivos (aparatos) que impedem a luz solar intensa na câmera. No entanto, estes dispositivos podem bloquear a imagem consideravelmente, por exemplo, no TSI; a faixa de sombra cobre 14% do espelho (KLEISSL, 2013), como já relatado o CCSI tende a excluir este efeito da imagem por meios físico antes do processamento da imagem.

3.6 ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS DO CÉU

Os algoritmos de processamento de imagens que usam câmeras para capturar e definir a cobertura de nuvens e usam técnicas para detectar a proporção vermelho-azul (RBR) entre os *pixels* da imagem. Comumente utilizam a dispersão Rayleigh, que define o céu claro, que dispersa mais a luz azul que luz vermelha, devido às partículas suspensas constituintes da atmosfera. Nas nuvens, as moléculas de água dispersam a luz azul e vermelha quase igualmente.

A dificuldade técnica do processo reside na separação das variações no tom da cor entre o céu e as nuvens. As técnicas de separação de imagens binárias em escala de cinza favorecem essa distinção entre nuvens e céu. No entanto, a análise para separação também é realizada particionando os componentes R, G e B. As pesquisas neste sentido, usaram bancos de dados de imagens contendo imagens de céu claro, juntamente com ângulos de elevação solar e de azimute como em Ghonima et. al. (2018), para definir regiões de céu claro e nuvens perto do sol. A dispersão da luz visível por aerossóis e condições de neblina confundem o reflexo da luz do sol nas câmeras nesta região e podem ser confundidas com nuvens pelo algoritmo de processamento da imagem.

As metodologias ainda incluem a detecção de nuvens com base no canal verde das imagens visíveis, tais como Yang et al. (2015), na previsão da irradiância solar de curto prazo para identificar e rastrear nuvens no espaço tridimensional em Peng et al. (2015), detecção de nuvens, rastreamento de movimentos e projeção de sombras nas nuvens em Schmidt et al. (2016); e

frações estimadas de nuvens com observações de câmera e telhados em Kuji et al. (2018), Vaz e Canha (2018).

Também foram utilizadas combinações de tecnologias, tais como a análise de infravermelho visível no trabalho conjunto de Klebe, Blatherwick e Morris (2014), as frações de nuvens estimadas com observações do céu com câmeras e ceilômetro em Kuji et al. (2018) e fração de nuvem determinada por infravermelho térmico de Aebi, Gröbner e Kämpfer (2018).

Para detectar as nuvens na imagem, após a retirada da distorção da imagem uma série de medidas foram utilizadas para obter uma classificação bem definida do que é nuvem e céu claro no projeto do CCSI. Como estas condições variam conforme o local de monitoramento as ações incluíram a classificação binária de cada pixel da imagem e a utilização do *red-blue-ratio* (RBR) criado pela *Scripps Institution of Oceanography* (SIO), além da utilização de lentes em tons de azul e cinza para melhor definição entre nuvens e céu claro.

A caracterização da cobertura de nuvens ou do céu claro apresenta uma certa complexidade para os algoritmos de processamento de imagens, devido à luminosidade, tipos de nuvens, tonalidades do céu e efeitos de ruído, que também estão presentes na imagem. Estes efeitos ainda podem ser aumentados pela proximidade do pixel na região circunsolar da imagem, efeitos sazonais de inverno e verão, nascer do sol e ocaso, entre outros.

Outra técnica usa a divisão do céu em três categorias: sem nuvens, parcialmente nublado e nublado para determinar combinações de canais em RGB e HSV¹⁰ em Kazantzidis et al. (2012) e Blanc et al. (2017).

Procedimentos de supervisionamento, baseado em aprendizado de máquina por redes neurais foi também é bastante relacionado na literatura, sendo eficaz para a separação em *pixels* em cores, neste sentido cita-se os trabalhos de Scolari et al. (2016) e Scolari et al. (2018) e para estimar a irradiação em conjunto com imagens históricas de uma câmera variáveis meteorológicas. Algoritmos de detecção de nuvem nesta condição utilizaram uma combinação

¹⁰ HSV é a abreviatura para o sistema de cores formadas pelas componentes hue (matiz), saturation (saturação) e value (valor). O HSV também é conhecido como HSB (hue, saturation e brightness — matiz, saturação e brilho, respectivamente).

de imagens de banco de dados em Yabuki et al. (2014) para validar o treinamento de uma rede neural.

A Tabela 3.1 sintetiza estudos de fundo de algoritmos de recuperação de cobertura de nuvens de uma câmera diurna de céu visível (M. Lothon et al., 2019).

Tabela 3.1 Estudos de fundo de algoritmos de recuperação de cobertura de nuvens

Característica	Princípio básico	Diagnostico	Referência
Cor	<i>Thresholding</i>	<i>RBR</i>	Shields et al. (1990)
Cor	<i>Thresholding, perturbation RBR</i>	<i>RBR</i>	Koehler et al. (1991)
Cor	<i>Thresholding</i>	<i>RBR</i>	Long and DeLuisi (1998, 2006)
Cor	<i>Thresholding</i>	<i>RBR, GBR</i>	Kim et al. (2016)
Cor	<i>Thresholding</i>	<i>Saturation</i>	Souza-Echer et al. (2006)
Cor	<i>Adaptive thresholding</i>	<i>Normalized BRR</i>	Li et al. (2011)
Cor	<i>Adaptive thresholding, contrast enhancing</i>	<i>Normalized saturation value ratio</i>	Jayadevan et al. (2015)
Cor	<i>Adaptive thresholding, background subtraction</i>	<i>G</i>	Yang et al. (2015)
Cor	<i>Cloud-free sky library, thresholding</i>	<i>RBR</i>	Ghonima et al. (2012)
Cor	<i>Clear-sky modeling, background subtraction</i>	<i>Normalized RBR</i>	Chauvin et al. (2015)
Cor	<i>Clear-sky modeling, background subtraction</i>	<i>G</i>	Yang et al. (2016)
Cor	<i>Clear-sky modeling, background subtraction</i>	<i>B, G, BRR</i>	Yabuki et al. (2014)
Cor	<i>Adaptive filtering of Mie scattering contribution</i>	<i>Grayness rate index</i>	Krinitzkiy and Sinitsyn (2016)
Cor	<i>Color transformation, K-means segmentation</i>	<i>RGB and luminosity</i>	Blazek and Pata (2015)
Cor	<i>Neural network</i>	<i>RGB</i>	Taravat et al. (2015)
Cor	<i>Neural network, neighborhood</i>	<i>R, G, B, all ratios</i>	Cazorla et al. (2008)
Cor	<i>Multiscale neighborhood and multiple learning</i>	<i>RGB, HSV, YCbCr</i>	Cheng (2017)
Cor e textura	<i>Superpixel segmentation, thresholding</i>	<i>R-B</i>	Liu et al. (2015)
Cor e textura	<i>Symmetry of sky</i>	<i>R, B</i>	Roman et al. (2017)
Cor e textura	<i>Neighborhood, support vector machine</i>	<i>R, G, B, RBR, luminance</i>	Peng et al. (2015)
Cor e textura	<i>K-nearest neighbor</i>	<i>R, B</i>	Kazantzidis et al. (2012)

Fonte M. Lothon et al. (2019).

A metodologia apresentada para a obtenção e o processamento das imagens do CCSI, assim como os apresentados na literatura buscou utilizar algoritmos que capturam séries temporais de imagens hemisféricas no céu com uma alta taxa de *frames* para poder, da mesma forma, incutir velocidade ao algoritmo de processamento de imagens. Alinhados a esta afirmação, estudos de Kuhn et al. (2019a), Matsuki et al. (2018) e Nou et al. (2018) mostraram que capturar imagens do céu em uma alta taxa de quadros é uma questão importante para prever a cobertura de nuvens e a irradiância.

A revisão da literatura sobre imageadores de céu aqui é sintetizada, mas pode ser complementada em trabalhos como Gueymard et al. (2019) e Kuhn et al. (2018, 2019).

As limitações do estado da arte em relação ao tema proposto estão representadas pela projeção controlada, dentro de uma área específica pré-determinada, da radiação solar incidente sobre os painéis da PV, haja vista a necessidade de conhecer a localização, antecipada ou não, da posição da sombra da nuvem sobre o solo. Estas condições são estabelecidas como metas do trabalho proposto e são expostas nos próximos capítulos.

3.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Foram apresentados os conceitos e trabalhos inerentes ao tema proposto com as motivações que levaram à aplicação do estudo levando em consideração as restrições da previsão de energia por imagens, as restrições de tempo inerentes ao controle de geração e as garantias necessárias à confiabilidade da rede em oposição às flutuações de PV.

Apresentou-se, pela pesquisa ao estado da arte, as vantagens da avaliação do impacto das nuvens sobre o PV, e as contramedidas para tratar estas flutuações frente aos desafios de incluir a PV junto com os mais variados sistemas da rede elétrica, tais com cargas gerenciáveis e as exigências do mercado de transação de ativos em curto espaço de tempo.

As bases científicas sobre os imageadores do céu foram inseridas de maneira a correlacionar suas características e vantagens ao objetivo principal da tese, estabelecendo os conceitos de calibração das câmeras, sua capacidade de obtenção da previsão da irradiância solar e a medição da altura da base da nuvem a partir de conceitos tais como a fotogrametria.

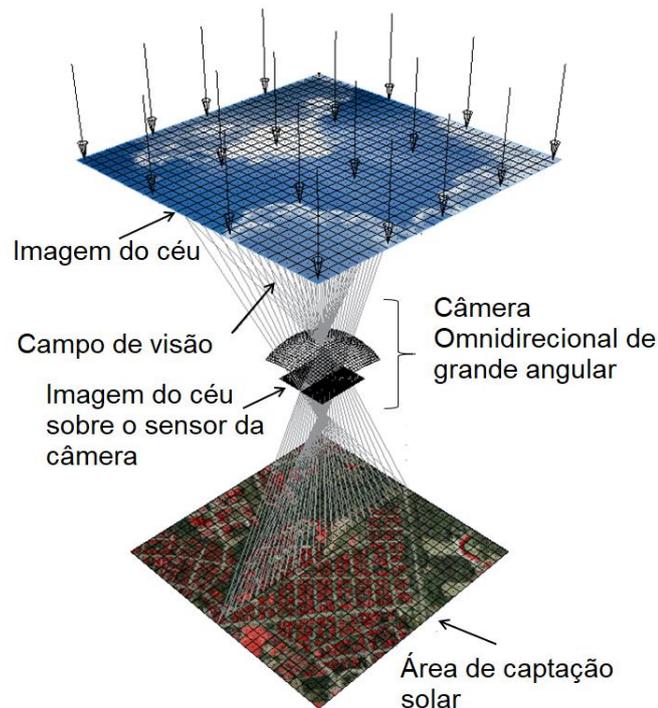
Condições técnicas de projeto foram buscadas na literatura para delinear o projeto do imageador do CCSI analisando conceitos da oclusão solar, processamento de imagens, algoritmos de particionamento entre nuvens e céu claro.

A pesquisa do estado da arte aqui apresentada formulou as bases para a tecnologia do CCSI apresentada no capítulo seguinte: Metodologia.

4 METODOLOGIA

O esquema operacional do CCSI é sucintamente mostrado na Figura 4.1. Basicamente o sistema usa uma câmera omnidirecional de grande angular que associa imagens do céu ao seu respectivo par em terra, pelas lentes do seu campo de visão ou *field of view* (FOV) sobre a área do sensor de imagem.

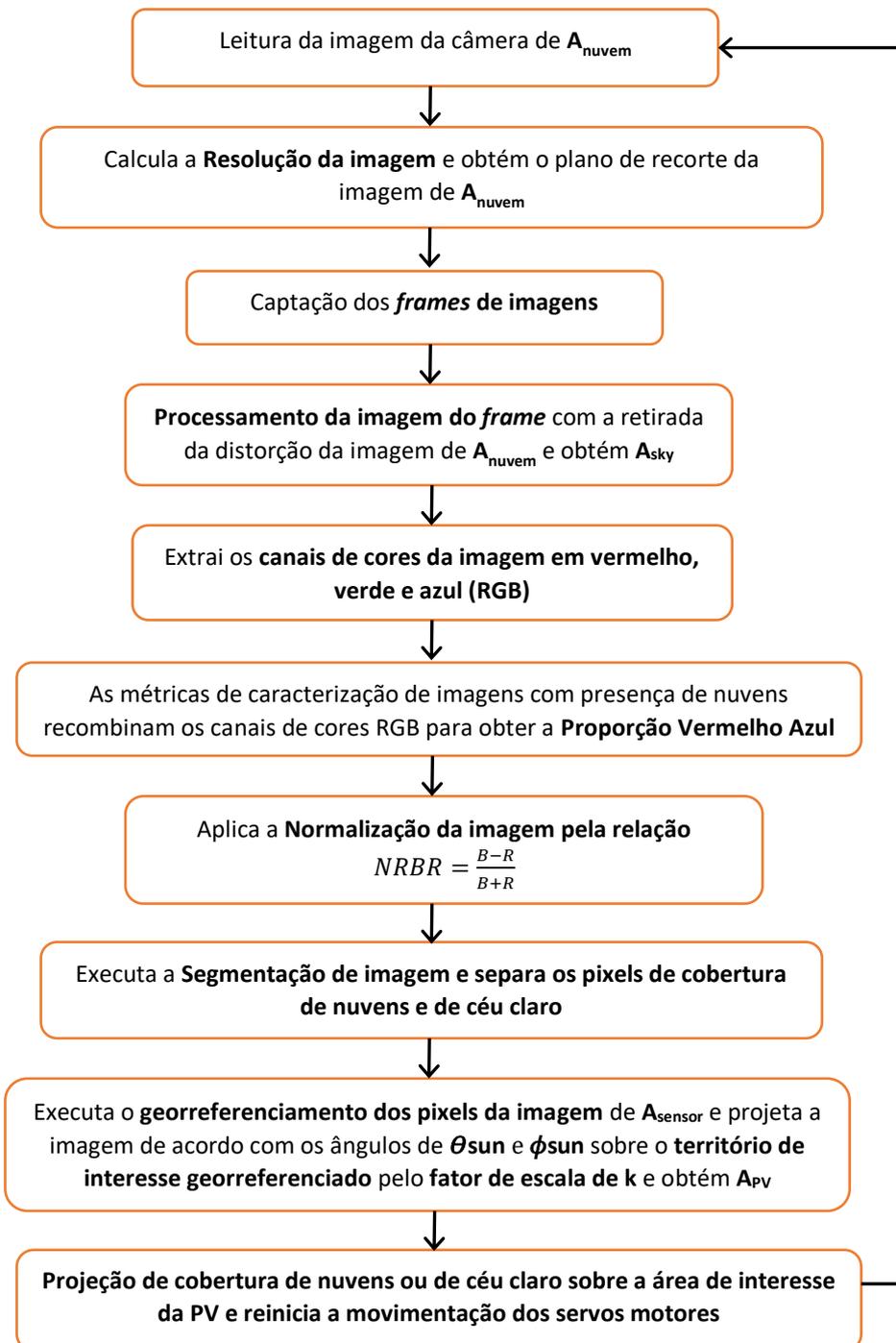
Figura 4.1 - Simulação de uma imagem do céu capturada pelo campo de visão de uma câmera omnidirecional e sua projeção sobre a área de captação da PV.



Fonte: O Autor.

O dispositivo captura a imagem do céu de maneira semelhante a um painel solar direcionado por um rastreador solar de dois eixos, ou seja, posicionado a câmera na normal aos raios do sol. Nesta configuração, a câmera, de maneira similar ao painel fotovoltaico, recebe a irradiação solar direta máxima (DNI). O fluxograma da figura 4.2 apresenta a evolução, na forma como os procedimentos da etapa de obtenção da imagem de céu executadas pelo software de processamento de imagens e o sistema de informações geográficas para obter o rebatimento da área de céu sobre o território de interesse da PV.

Figura 4.2 - Fluxograma de projeção de cobertura de nuvens e céu claro sobre a área de interesse da PV pelo Processamento de imagens e o Sistema de Informação Geográficas



Fonte: O Autor.

Para definir a metodologia que captura a imagem de um ponto no céu, usamos o conceito de resolução espacial da câmera a partir de um elemento da

área de imagem capturando A_{nuvem} , posicionada em um ponto no espaço 3D real (na superfície periférica da nuvem), observado na altura H (CHOW et al., 2011; YANG et al., 2014, 2014). Assim, H é definido como a altura da base de nuvem (ABN). Na Figura 4.3, uma área circular A_{nuvem} particular e posicionada a uma altura H é capturada por um cone circular sólido (Ω) é representada em um pixel do sensor de imagem da câmera. A porção de área A_{nuvem} observada por um pixel do sensor da câmera é definida pelo campo de visão (FOV) e o meio ângulo (α) do cone em esteradianos (sr) da imagem de A_{nuvem} . O eixo do cone forma um ângulo de incidência (θ) paralelo aos raios do sol e ao eixo óptico da lente, que está posicionado ao centro de origem da lente da câmera (KUHN et al., 2019b; SCHMIDT et al., 2016; URQUHART et al., 2015).

Variando o ângulo de abertura α , definimos a forma do cone Ω pela equação:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha \sin \alpha \, d\alpha = 2\pi(1 - \cos\alpha), \quad (4.1)$$

A definição de A_{nuvem} pode ser dada por α , θ e H . Ilustramos estas relações na Figura 4.3, em que o raio (r) é definido pela distância d e pela tangente do meio ângulo α :

$$r = d \cdot \tan(\alpha), \quad (4.2)$$

A distância d , por sua vez, é definida pela secante do ângulo de incidência θ em relação a H :

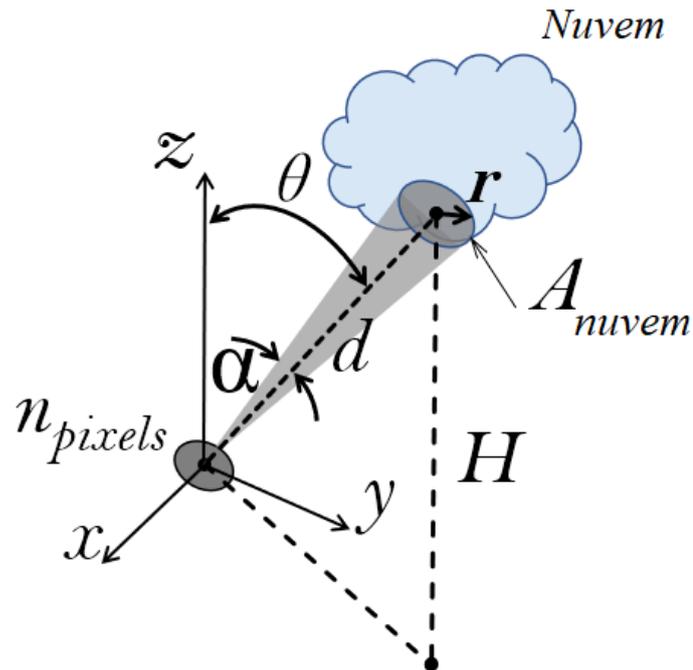
$$d = H \cdot \sec(\theta), \quad (4.3)$$

Para efeito de cálculo a área de A_{nuvem} foi definida como circular, sendo dada por $\pi \cdot R^2$. Assim, incorporando as Equações 4.2 e 4.3, A_{nuvem} pode ser definida da seguinte forma:

$$A_{\text{nuvem}} = \pi \cdot (H \cdot \sec(\theta) \cdot \tan(\alpha))^2, \quad (4.4)$$

Uma observação importante é que a porção A_{nuvem} se monitorada por uma câmera omnidirecional poderá estar sob o efeito da distorção da imagem, o que necessita ser tratada antes de ser rebatida sob o solo.

Figura 4.3 - Área particular de nuvem monitorada a uma altura H pelo sensor de uma câmera.



Fonte: O Autor.

Esta formulação é comumente usada para lentes de grandes angulares. Assim, a relação entre α e a densidade de pixels n_{pixels} no sensor de imagem da câmera que capta a imagem do céu, considerando um hemisfério de 2π esteradianos, passa a ser dada por:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{1}{d_{pixels}}\right), \quad (4.5)$$

A relação na Equação 4.5 também define a escala de pixels da projeção do céu no sensor de imagem. Ou seja, uma concentração maior de pixels do sensor para monitorar o cone da imagem fornecida por α implica em uma maior resolução de imagem e maior definição da área do céu monitorada.

Para definir a sombra da posição da nuvem sobre o território de uma área de interesse predeterminada para a PV, usamos os preceitos das Equações 4.1 a 4.5 para projetar as funcionalidades do CCSI, com os seguintes postulados:

- *Primeiro postulado: A área normal de monitoramento.* Um rastreador solar mantém uma área de monitoramento normal aos raios do sol posicionando sua câmera, por meio do deslocamento

dos motores planetários, de acordo com os respectivos ângulos de azimute e elevação solar.

- Segundo postulado: **O cálculo dos ângulos de zênite e de elevação para posicionamento dos motores planetários¹¹**. Os cálculos dos ângulos de azimute e elevação do sol foram baseados em NOAA, 2016 e NOAA, 2020. Este posicionamento calcula a posição do sol e mantém a imagem de A_{nuvem} em ângulo normal à incidência da irradiação solar, com o sol no centro da imagem. Um algoritmo, por meio de uma interface eletrônica, posiciona os motores, coordenados por um sistema de interface de automação que calcula as posições de acordo com o dia, hora, minutos e segundos estabelecidos previamente.
- Terceiro postulado: **A área de varredura do céu**. O campo de visão ou FOV da câmera é regulado de maneira a capturar a imagem do céu de maneira temporal-espacial controlada. À medida que varia o ângulo α em sua abertura o campo de visão da câmera aumenta. O raio r pode ser estipulado por georreferenciamento ou por meio de caminhamento por estação total, definindo um raio de varredura de uma área conhecida. Estas relações proporcionam, por exemplo definir o diâmetro de uma área circular de interesse de 12.000 m que é representada no sensor por uma linha de 12000 pixels, ou seja, cada pixel representa 1m^2 de imagem de céu.
- Quarto postulado: **A relação pixel e a área geográfica**. A densidade de pixels n_{pixels} e a resolução do sensor da câmera podem então associar uma área em escala de A_{nuvem} à um pixel no sensor de imagem. Um exemplo prático desta constatação pode ser dada da seguinte forma: Seja, um sensor de 6 MP com uma matriz de pixels linha-coluna de 2450 pixels de resolução. A captura de uma imagem de raio r em campo de 2,5 km de diâmetro no seu

¹¹ Motores planetários são equipamentos constituídos por um motor de passo que movimenta seu eixo pela excitação de uma bobina com pólos que giram à razão de $1,8^\circ$. Ao acoplar a estes motores redutores planetários formados por um conjunto de engrenagens que diminuem o ângulo do passo à uma razão n , diminuindo o ângulo do passo para conferir maior exatidão ao movimento dos ângulos de azimute e elevação do aparelho. (fonte: O Autor).

campo de visão sob um ângulo de 120° , representa em cada pixel do seu sensor o monitoramento uma área de céu de imagem de 2 m^2 .

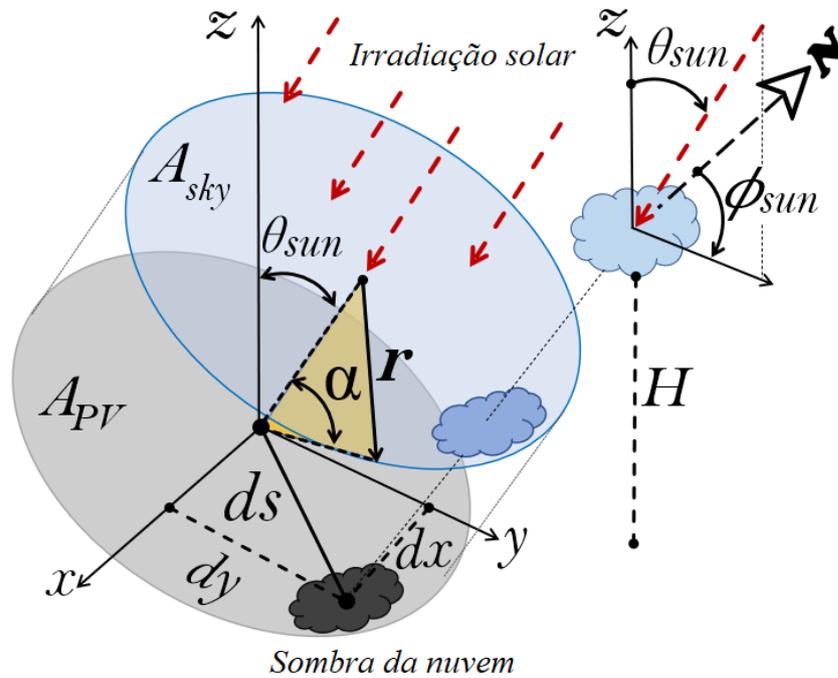
Antes de relacionar a área de A_{nuvem} ao seu par em solo, O ângulo α máximo para definir a região de menor efeito da distorção da lente deve passar por uma etapa de calibração da câmera de acordo com a função de projeção mais apropriada para as câmeras omnidirecionais utilizadas. Na seção 4.2 é apresentada a maneira de como a distorção é removida da imagem por um algoritmo baseado no polinômio de calibração para câmeras omnidirecionais.

Ampliando o conceito da figura 4.3 e ilustrando os postulados definidos, podemos estabelecer a sistemática de funcionamento do CCSI. A figura 4.4 mostra uma área plana, ou seja, excluídas a distorção da imagem da câmera omnidirecional de A_{nuvem} , a imagem tratada de A_{sky} de raio de varredura r , passa a refletir sua área com base em um ângulos de azimute e elevação solar, ou seja, perpendicular aos raios solares, sobre uma área de interesse A_{PV} .

A projeção da sombra de uma nuvem é então captada pela área do sensor da câmera e projetada por um fator de escala sobre um sistema de coordenadas geodésicas em um SIG, capaz de localizar a distância da posição desta nuvem em relação ao centro da área de monitoramento pelas coordenadas dx e dy rebatidas do céu, localizadas no sensor da câmera e escalonadas para o território. A área de A_{PV} está relacionada à área de projeção no sensor da câmera pelos n_{pixels} que monitoram A_{sky} sob a varredura de α e r , definindo a área da imagem por escala de pixels. O cone Ω define também a distância do centro óptico da câmera ao centro de A_{sky} , e corresponde ao centro da área de captura fotovoltaica em A_{PV} .

Em termos diretos, a cobertura de nuvens e céu limpo em de A_{sky} é projetada sobre a área de captura da PV (A_{PV}), definindo a posição, inclinação, bordas e áreas de céu claro e sombra de nuvens.

Figura 4.4 - Projeção de nuvem de, sombra de nuvem e céu claro definidos na direção dos raios solares de Asky sobre a área de terra do APV



Fonte: O Autor.

As coordenadas geométricas da posição da sombra da nuvem são comumente calculadas em relação ao centro da câmera pelos ângulos de azimute solar (ϕ_s), zênite (θ_s) ao redor do horizonte hemisférico norte e aumentam para o leste (FISHER, 2013; LUO; TRISHCHENKO; KHLOPENKOV, 2008). Na figura 4.4 extrai-se que a altura H da nuvem é uma variável desconhecida e pode ser medida por aparelhos como o ceilômetro¹² e por meio de estereografia. As componentes cartesianas d_x e d_y da figura são então definidas por:

$$d_x = H \cdot \tan(\theta_s) \cdot \sin(\phi_s) + H \cdot \tan(\theta_s) \cdot \sin(\theta_s), \quad (4.6)$$

$$d_y = H \cdot \tan(\theta_s) \cdot \cos(\phi_s) + H \cdot \tan(\theta_s) \cdot \sin(\phi_s), \quad (4.7)$$

A distância entre o centro óptico da câmera e a sombra do pixel A_{nuvem} é dada pela relação trigonométrica entre as Equações 4.6 e 4.7:

¹² Um ceilômetro é um dispositivo que usa um laser ou outra fonte de luz para determinar a altura de um teto ou base de nuvem. Ceilômetros também podem ser usados para medir a concentração de aerossol na atmosfera. Quando baseado em laser, é um tipo de lidar atmosférico.

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} . \quad (4.8)$$

Com base na Figura 4.4 e nas condições apresentadas, ao posicionar a câmera na direção do sol, o ângulo de incidência θ e o ângulo do zênite (θ_{sun}) tornam-se paralelos e concordantes, uma vez que a projeção da nuvem e do céu claro é definida pela direção dos raios solares e, por conseguinte de A_{nuvem} sobre a área terrestre do A_{PV} , como referendado anteriormente. O céu definido por A_{nuvem} é projetado sobre a área do sensor de imagem do A_{sensor} com base nos ângulos de posição do sol:

$$A_{sensor} = A_{nuvem} \cdot \cos(\theta_{sun}) \cdot \cos(\phi_{sun}), \quad (4.9)$$

Assim, o A_{PV} , agora com base em um fator escalar de pixels relaciona a área de cada pixel do sensor à uma área geograficamente localizada no mundo sendo definido por:

$$A_{PV} = k \cdot A_{sensor}, \quad (4.10)$$

O fator (k) depende do raio adotado r , do meio ângulo α e de sua relação com a densidade de n_{pixels} , além da concordância dos postulados.

Estas relações espaciais nos permitem estimar a irradiação solar capturada de maneira localizada conforme o capítulo de materiais e métodos, usando um SIG para geoespacializar a distribuição das parcelas de energia injetadas na rede elétrica de interesse e por fim estabelecer condições de factibilidade à tese definida na proposta do trabalho.

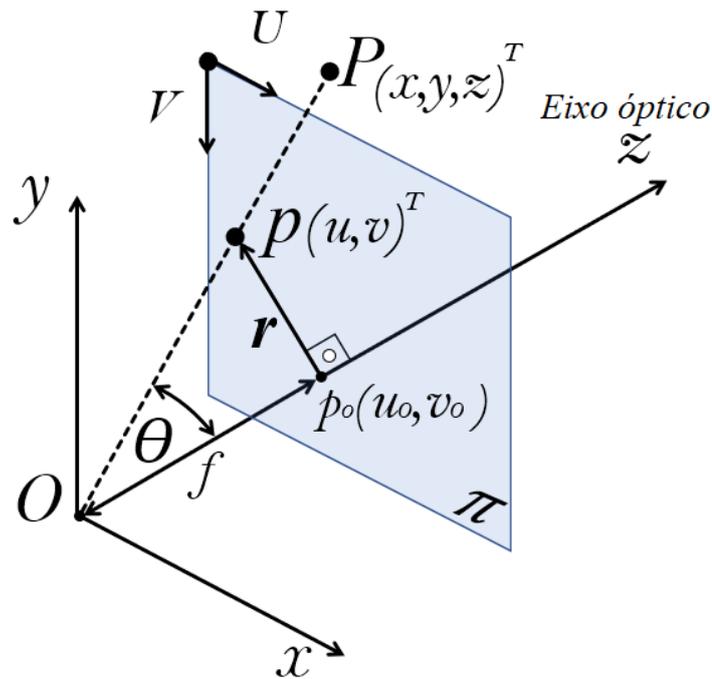
4.1 A CALIBRAÇÃO DA CÂMERA OMNIDIRECIONAL

A definição das zonas de céu claro por imagens com base em imagens está representada pela validação eficaz das câmeras utilizadas e na capacidade de dirimir a distorção de suas lentes. Um conceito amplamente usado para definir e explanar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras omnidirecionais é o da câmera pinhole.

4.1.1 A câmera Pinhole

Os sistemas de visão estéreo usam o conceito de projeção em perspectiva da câmera de Tzafestas (2013) que define uma relação linear entre a direção de um feixe de luz que passa pelo centro óptico da câmera em direção à posição do ponto de imagem. A figura 4.5 mostra o modelo da câmera pinhole para a projeção do ponto $P(x, y, z)^T$.

Figura - 4.5 Modelo de projeção da câmera pinhole.



Fonte: O Autor.

O modelo de projeção em perspectiva feito por uma câmera pinhole é dado por:

$$r = f \tan(\theta), \quad (4.11)$$

Onde (θ) é o ângulo entre o raio recebido e o eixo óptico, f é a distância focal e r a distância entre o ponto da imagem e o ponto principal. O ponto de interseção do plano da imagem com o eixo óptico $p_o(u_o, v_o)$ é chamado de ponto principal. Na figura, uma simetria central é aplicada para que o plano da imagem e a cena fiquem do mesmo lado em relação ao centro óptico. O eixo óptico é colinear com o eixo Z_c de um sistema de coordenadas 3D. O mapeamento

geométrico (projeção em perspectiva) de um ponto $P (X, Y, Z)^T \in \mathbb{R}^3$ e sua projeção $(u, v)^T \in \mathbb{R}^2$ no plano da imagem Π sendo dados por:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}^T = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}^T, \quad (4.12)$$

A distância r perpendicular ao eixo z entre p e o ponto principal $p_o (u_o, v_o)$, que é o ponto de inserção do eixo óptico na imagem, é dada pela Equação (4.11). A calibração da câmera é um processo de duas etapas:

(1) pela determinação dos parâmetros intrínsecos para transportar as coordenadas do objeto físico projetando-as no plano da imagem, e;

(2) pela determinação dos parâmetros extrínsecos na orientação da câmera no mundo 3D por meio de uma transformação composta por uma rotação (R) e translação (t).

Os parâmetros intrínsecos são representados por uma matriz (K) que inclui o ponto principal (u_o, v_o) , além das distâncias focais da câmera em termos de dimensões de pixel nas direções u e v (α, β), e o parâmetro de inclinação (s) (SCARAMUZZA, 2007; SCARAMUZZA; MARTINELLI; SIEGWART, 2006). As relações de transformações são dadas por:

$$Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_o \\ 0 & \beta & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}^T, \quad (4.13)$$

A equação (4.13) pode ser apresentada por suas matrizes na forma:

$$\lambda \mathbf{p}^T = K[R \ t] \mathbf{P}^T, \quad (4.14)$$

Com λ em substituição à Z para definir a profundidade em relação ao plano de imagem.

Denotamos, para simplificação do método que a projeção em perspectiva da câmera pinhole é dada por uma função \mathcal{F} :

$$\mathbf{r}(\theta)_{pinhole} = \mathcal{F}(f, (u_o, v_o)), \quad (4.15)$$

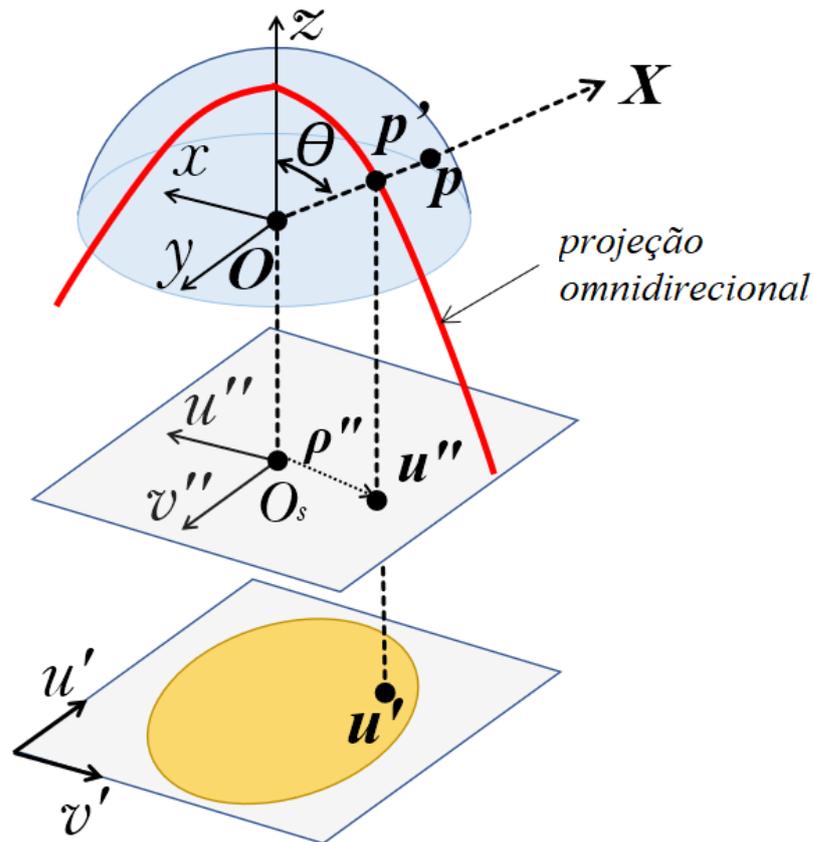
4.1.2 A câmera omnidirecional

As câmeras omnidirecionais possuem um modelo de projeção radialmente simétrico com ângulo de visão extremamente mais amplo em relação à pinhole, além do que produzem distorção geométrica na direção radial. As diferentes características de construção das câmeras omnidirecionais requerem diferentes modelos de projeção de sua simetria radial, os mais utilizados são a projeção estereografica ($r = 2.f \cdot \tan(\theta/2)$), projeção equidistante ($r = f \cdot \theta$), projeção equisolidada ($r = 2.f \cdot \sin(\theta/2)$), e projeção ortogonal ($r = f \cdot \sin(\theta)$).

A validação dos parâmetros das câmeras utilizadas pelo CCSI utilizou o modelo geométrico de Scaramuzza; Martinelli e Siegwart (2006) e Scaramuzza (2007) para estabelecer as matrizes de parâmetros intrínsecos e extrínsecos de seus equipamentos. A Figura 4.6 representa a projeção radial de uma câmera dióptrica¹³ a partir do modelo de câmera catadióptrica (MIČUŠIK; PAJDLA, 2003). Na figura o plano de imagem da câmera (u', v') em coordenadas de pixels, e o plano de sensor (u'', v'') em coordenadas métricas são expressas no sistema de coordenadas com centro em O. O eixo do sensor é alinhado com o eixo Z. O ponto $\mathbf{u}'' = [u'', v'']^T$ é a projeção de $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ no plano do sensor, e $\mathbf{u}' = [u', v']^T$ a imagem no plano da câmera. Ambos os sistemas são relacionados por uma transformação afim $\mathbf{u}'' = \mathbf{A}\mathbf{u}' + \mathbf{t}$, para $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ e $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ por uma translação (SCARAMUZZA, 2007).

¹³ Um conceito simples de uma câmera dióptrica é a câmera fotográfica que direciona seu foco para a cena, enquanto a catadióptrica utiliza um espelho convexo para capturar a cena por uma câmera.

Figura 4.6 - Projeção da câmera omnidirecional



Fonte: O Autor. (Adaptado de Scaramuzza, 2017)

A relação entre o ponto de cena X e o ponto \mathbf{u}' (em pixels) é dado por:

$$\lambda \cdot \mathbf{p} = \lambda \cdot g(\mathbf{u}'') = \lambda \cdot g(A\mathbf{u}' + \mathbf{t}) = \mathbf{P}\mathbf{X}, \quad (4.16)$$

Sendo λ é um fator de escala de profundidade maior que zero, $X \in \mathbb{R}^4$ em coordenadas homogêneas e $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ é a matriz de projeção em perspectiva. Calibrar a câmera implica em estimar A , \mathbf{t} , e a função não linear g para satisfazer a equação:

$$g(u'', v'') = (u, v, f(u, v))^T, \quad (4.17)$$

A função f pode ser descrita em forma polinomial:

$$f(u'', v'') = a_0 + a_1 \rho'' + a_2 \rho''^2 + \dots + a_n \rho''^n, \quad (4.18)$$

Na equação $\rho'' = \sqrt{u''^2 + v''^2}$ representa a distância euclidiana radial do eixo do sensor, n define o grau do polinômio e os a_i , $i = 0, 1, 2, \dots, n$ os coeficientes de calibração do sistema. Reescrevendo as equações e reduzindo o número de parâmetros de calibração e as definições de f , que guardam espelhos

hiperbólicos, parabólicos e as câmeras omnidirecionais, conforme Scaramuzza (2007), e satisfazendo à relação $\frac{df}{d\rho}|_{\rho=0}$ assume-se por fim que $a_1 = 0$ na Equação 4.18. Finalmente, f passa à forma polinomial da equação:

$$f(u'', v'') = a_0 + a_2\rho''^2 + \dots + a_n\rho''^n, \quad (4.19)$$

A figura 4.5 destacada em vermelho a representação ilustrada da projeção omnidirecional, a partir dela denotamos que a projeção em perspectiva da câmera omnidirecional é dada por uma função \mathcal{F} :

$$\mathbf{r}(\theta)_{omnidirecional} = \mathcal{F}(f, (u'', v''), a_0, a_1, \dots, a_n), \quad (4.20)$$

Para calibrar as câmeras do CCSI utilizamos o método Scaramuzza chamado OCamCalib que contém uma toolbox MATLAB® para calibração de câmeras omnidirecionais.

A ferramenta utiliza uma série de imagens captadas pela câmera de um plano padrão (tabuleiro de xadrez) em orientações variadas, com o intuito de captar os pontos de intersecções entre as quadrículas pretas e brancas. A origem das coordenadas é captada em um dos cantos do tabuleiro. A função de projeção é descrita em uma expansão de uma série de Taylor e os coeficientes da função \mathcal{F} são estimados resolvendo um problema de minimização linear de mínimos quadrados de dois passos (SCARAMUZZA; MARTINELLI; SIEGWART, 2006).

O processo inicia com a extração dos cantos de grade do padrão plano. O tamanho número de quadrículas nas direções x e y são dados de entrada do sistema e são também utilizados para localizar o centro do padrão plano. O algoritmo calibra a câmera por meio da extração automática de cantos.

A fase de calibração estabelece um polinômio de ordem n para executar a aproximação da projeção de cada pixel no espaço 3D. Experimentos do algoritmo definiram uma ordem polinomial n de grau 4 para os melhores resultados na literatura. A calibração é então executada por uma etapa de minimização linear de mínimos quadrados.

Os resultados da calibração apresentam a função F do polinômio particular de cada câmera em função do ângulo θ por um vetor 3D em correspondência à sua relação na direção da aproximação ao horizonte. Na sequência é definida a posição do centro da imagem omnidirecional obtida por

um método iterativo que minimiza o erro de reprojeção. O algoritmo do Ocamcalib calcula o erro médio de reprojeção de todos os cantos e também o quadrado da soma dos erros. Os coeficientes do polinômio de grau n são então definidos. Ainda, um refinamento não linear dos parâmetros de calibração usando o algoritmo Levenberg-Marquadt (GAVIN, 2019; RANGANATHAN, 2004) também está disponível nas funções do algoritmo, podendo ser acionado. Por fim as imagens são reprojctadas com os cantos e as origens dos eixos x e y correspondentes, obtendo os coeficientes do polinômio e calibrando a projeção da lente das câmeras.

Com a definição dos parâmetros da função $r(\theta)_{omnidirecional}$ com os coeficientes resultantes da calibração pelo algoritmo OCamCalib ocorre a aproximação da projeção das câmeras omnidirecionais em projeções planas ou como referido anteriormente na área plana A_{sky} para ser refletida em A_{PV} pelo sistema do CCSI, ou seja, os parâmetros calculados pelo algoritmo possibilitam a execução da etapa de correção da distorção da imagem radial em plana.

4.2 CORREÇÃO DA DISTORÇÃO

A correção da distorção aplica um modelo de mapeamento da imagem circular distorcida de pontos e sua transformação para pontos de uma imagem retilínea. Um ponto de imagem não distorcida é obtido a partir de um ponto distorcido pela tupla de equações:

$$\begin{aligned} x_u &= x_d + (x_d - c_x) \cdot (1 + k_1 r_d^2 + \dots + k_i r_d^n), \\ y_u &= y_d + (y_d - c_y) \cdot (1 + k_1 r_d^2 + \dots + k_i r_d^n) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Onde (C_x, C_y) são as coordenadas do centro de distorção e $r^2 = x_d^2 + y_d^2$. O processo envolve o cálculo das coordenadas normalizadas da imagem a partir das coordenadas de pixel, relacionando-as com o centro óptico a distância focal em pixels em um algoritmo do toolbox do Matlab® (TORRES-GONZÁLEZ; MARTÍNEZ-DE DIOS; OLLERO, 2017).

A retirada de distorção de uma imagem estabelece a correção de uma imagem baseada nos parâmetros da lente da câmera convexa (TARDIF et al., 2009; TARDIF; STURM; ROY, 2007). Para o caso das lentes do CCSI a especificação de valores possibilita parametrizar, por meio dos parâmetros de

correção, uma imagem esférica para uma imagem plana. De posse dos parâmetros cada segmento da imagem é analisado como uma medida de distorção que é então minimizada na transformação em uma imagem plana (KANG et al., 2016).

A sistemática de retirada da distorção, conforme a necessidade relatada nas seções anteriores, consiste em estabelecer ações de relacionamento de um ponto 3D global para uma imagem 2D com a transformação baseada nos parâmetros extrínsecos e intrínsecos da câmera. Uma maneira suscita de formular um algoritmo para tal finalidade pode ser dado sob duas ações:

1. A primeira ação consiste em uma rotação e translação em coordenadas da câmera, usando os parâmetros extrínsecos em relação à origem ou centro óptico da câmera. As coordenadas do mundo são mapeadas para as coordenadas da câmera por:

$$\begin{pmatrix} X_{Cam} \\ Y_{Cam} \\ Z_{Cam} \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} X_{world} \\ Y_{world} \\ Z_{world} \end{pmatrix} + t, \quad (4.22)$$

Onde X_{cam} , Y_{cam} e Z_{cam} são as coordenadas de projeção no plano de imagem, X_{world} , Y_{world} e Z_{world} são as coordenadas do ponto no mundo, R a rotação e T a Translação baseados na matriz de parâmetros extrínsecos.

2. A segunda condição trata de utilizar os parâmetros intrínsecos de Crispel e Roberts (2018). Esta representação pode ser estabelecida de acordo com a equação dos parâmetros intrínsecos da câmera:

$$\begin{pmatrix} X_{Cam} \\ Y_{Cam} \\ Z_{Cam} \end{pmatrix} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ a_0 + a_1\rho^n + a_2\rho^{n^2} + \dots + a_n\rho^{n^n} \end{pmatrix}, \quad (4.23)$$

As definições dos parâmetros intrínsecos definem a distorção projetada pela dilatação da imagem sobre a lente da câmera ao mesmo tempo que mapeia o alinhamento e a localização do centro óptico sobre o plano de imagem.

Um algoritmo baseado nas funções de Scaramuzza (2007), em Matlab®, foi utilizado para proceder à retirada da distorção. As projeções para os mais variados tipos de câmera podem ser arranjadas na forma polinomial das expressões da Tabela 4.1 que representam as funções de seno e tangente na

forma clássica para obtenção da distância r' (THOBY, 2018 e SCHWALBE, 2005).

Tabela 4.1 - Representação das funções de seno e tangente na forma clássica

Projeção da distorção	Distância radial	Formulação trigonométrica clássica
Rectilinear	$r' = f \tan \theta$	$\sim f. (\theta + k1. \theta^3 + k2. \theta^5 + k3. \theta^7)$
Estereográfica	$r' = 2. f \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\sim f. \left(\left(\frac{\theta}{2}\right) + k1. \left(\frac{\theta}{2}\right)^3 + k2. \left(\frac{\theta}{2}\right)^5 + k3. \left(\frac{\theta}{2}\right)^7 \right)$
Equidistante	$r' = f \theta$	$\sim f. \left(\left(\frac{\theta}{2}\right) + k1. \left(\frac{\theta}{2}\right)^3 + k2. \left(\frac{\theta}{2}\right)^5 + k3. \left(\frac{\theta}{2}\right)^7 \right)$
Ângulo equisólido	$r' = 2f \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\sim f. \left(\left(\frac{\theta}{2}\right) - k1. \left(\frac{\theta}{2}\right)^3 + k2. \left(\frac{\theta}{2}\right)^5 - k3. \left(\frac{\theta}{2}\right)^7 \right)$
Orthográfico	$r' = f \sin \theta$	$\sim f. (\theta - k1. \theta^3 + k2. \theta^5 - k3. \theta^7)$

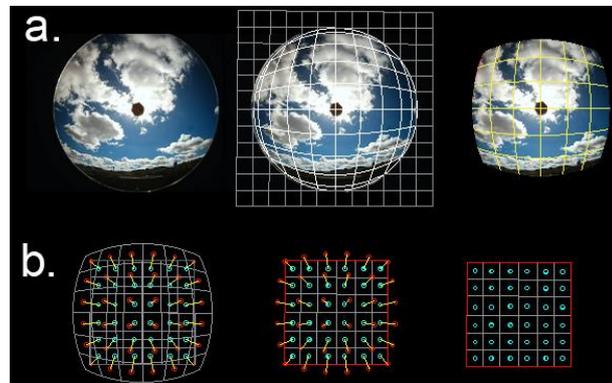
Fonte: Thoby, (2018)

A tabela 4.1 utilizada na definição do tipo de projeção para a câmera do CCSI com base nos coeficientes de $k1$, $k2$ e $k3$ e segue o *Polynomial Fish-Eye Transform Model* (PFETM), utilizado para a correção da distorção em lentes omnidirecionais de Basu e Licardie (1995). Este modelo tem tido bons resultados na sua versão de quarta ordem pois simula o deslocamento radial introduzido pelas lentes omnidirecionais. O desvio radial representado pela distância r' em relação a uma projeção arbitrária, ao longo do raio da imagem representa a lente convexa do CCSI, para verificar o modelo mais eficaz para representação da lente do CCSI nos cinco tipos de projeções. As distorções da imagem da câmera do CCSI foram tratadas pelo algoritmo “*undistort Image*” do Matlab® para remoção da distorção de uma imagem usando os parâmetros da câmera pelo software *OcamCalib* de Scaramuzza (2007), com dados de entrada por meio de uma matriz de parâmetros intrínsecos e dos valores auferidos da distorção radial.

A Figura 4.7a mostra o processo de retirada da distorção da imagem de uma das câmeras do CCSI da esquerda para direita apresenta-se uma imagem do céu distorcida, a imagem do centro foi acrescida de uma grade para evidenciar a distorção por meio de quadrículas, na foto da esquerda foi delimitada uma área de quadrículas para proceder à retirada da distorção da

grade. A figura 4.7b mostra respectivamente da esquerda para direita o processo de focalizar no espaço 3D as coordenadas de centro de cada pixel da imagem distorcida, a imagem ao centro mostra o procedimento de tratamento da imagem pelo algoritmo para a retirada da distorção. A figura 4.7b da direita finalmente forma uma matriz de pixels com em coordenadas planas e sem distorção.

Figura 4.7 - Processo de retirada da distorção de uma imagem



Fonte: O Autor.

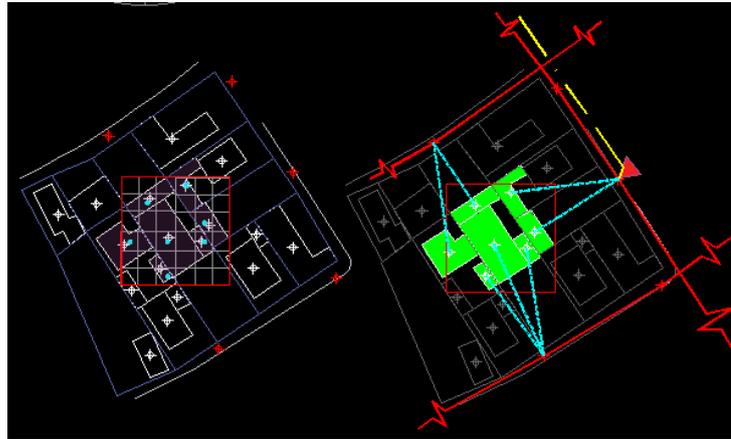
As imagens captadas pelos CCSI são georreferenciadas o que possibilita associar a área de pixel com a área correspondente da imagem em sistemas georreferenciados. Estes processos levam em conta obter dois objetivos:

1. A retirada da distorção em conjunto com a associação de pontos de coordenadas do mundo real às coordenadas não distorcidas do plano do sensor da câmera, e por conseguinte, e;
2. por meio de um processo escalar obter o par refletido de coordenadas em terra.

A Figura 4.8 demonstra uma simulação da imagem de coordenadas planas à esquerda quando associada à um sistema georreferenciado. Na direita da figura a grade de pixels é refletida sobre uma área georreferenciada. Esta técnica torna possível projetar sobre os telhado das habitações, propensos à instalação de painéis fotovoltaicos, todos os eventos climáticos que podem interferir sobre áreas pré-estabelecidas em um sistema de captação de PV. A área em verde claro, que representa um telhado com painéis fotovoltaicos é associado o despacho de energia sobre as redes elétricas lindeiras à área de captação, conceito este que pode ampliar o conhecimento de várias

condicionantes da rede, tais como a própria intermitência gerada pela inclusão da PV.

Figura 4.8 - projeção de uma grade de imagem do céu sobre uma área em terra.



Fonte: O Autor.

Com a correção da distorção das imagens e a obtenção das imagens planas torna-se possível executar a validação do aparelho com o cálculo das distâncias em profundidade ou distância entre os aparelhos e a barreira das nuvens, esta técnica é a calibração stereo.

A calibração stereo é uma exigência constante na validação nas metodologias deste tipo de experimento no estado da arte e na revisão bibliográfica da tese, sendo, portanto, também aqui abordada.

A mensuração da ABN por estereografia foi incorporada para estudos relacionados à movimentação de nuvens e define a calibração estéreo como segunda validação da metodologia do CCSI.

4.2.1 Calibração stereo e correspondência de imagens do céu

As técnicas de visão em profundidade usam duas câmeras separadas focando o mesmo objeto, a uma distância precisa entre elas, a linha de base (KUHN et al., 2019a). As tecnologias comumente usadas para medir o alvos no céu incluem radiossonda, ceilômetro, *Doppler Light Detection And Ranging* (LIDAR), radar de nuvem e câmeras estereográficas (TAPAKIS; CHARALAMBIDES, 2014; YANG et al., 2014). A metodologia é baseada na estereofotogrametria que é a técnica de reconstrução tridimensional com base na triangulação dos pixels estéreo correspondentes em imagens retificadas

(CRISPEL; ROBERTS, 2017). A calibração stereo é baseada na geometria epipolar.

4.2.2 Geometria epipolar

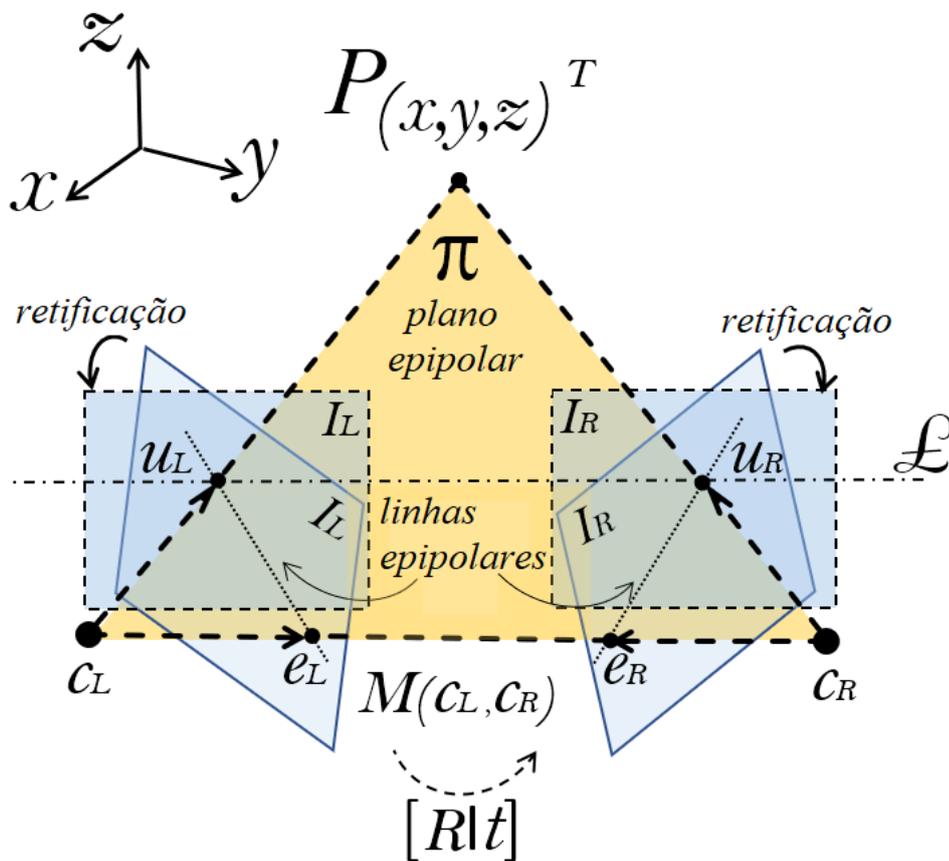
A geometria epipolar está definida pela Figura 4.9. Nela os centros ópticos das câmeras c_L e c_R , um ponto $P(X,Y,Z)^T$ no espaço tridimensional e suas imagens são coplanares ao plano epipolar π . Uma linha de base $M(c_L, c_R)$ une os dois centros.

O ponto $P(X,Y,Z)^T$ no espaço tridimensional é projetado nos planos esquerdo I_L e direito I_R da imagem da câmera nos pontos u_l e u_r . As linhas epipolares são desenhadas de u_L e u_R ao longo dos planos da imagem até a linha de base $M(c_L, c_R)$ entre os pontos focais da câmera c_L e c_R . Essas linhas cruzam $M(c_L, c_R)$ nos epipoles e_L e e_R . Todos os pontos definidos na projeção são coplanares ao plano epipolar π .

Para obter o alinhamento das linhas epipolares, denotadas como ξ na figura, a retificação da imagem torna-se necessária sendo o processo responsável em movimentar imagens para simular um plano de imagem paralelo. Para a movimentação da imagem, com a ideia de seu paralelismo em I_L e I_R , utiliza o conceito da matriz essencial que executa o movimento de rotação R e translação t dos planos I_L e I_R . A matriz essencial (E) é descrita como uma matriz 3×3 que mapeia $u_l \rightarrow u_r$ pela equação epipolar geométrica de Longuet-Higgins:

$$u_r^T [R|t] u_l = u_r^T E u_l = 0, \quad (4.24)$$

Figura 4.9 - Definição de geometria epipolar.



Fonte: O Autor

Após a retificação da imagem, procedemos à definição da profundidade na combinação das duplas de imagens, a chamada disparidade que inicia com duas filtragens nas imagens:

(1) A equalização do histograma para distribuir os níveis de intensidade para a normalização do brilho e aumento do contraste da imagem utilizando o método *Perform Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE), (K. Zuiderveld, 1994).

(2) O alisamento Gaussiano na redução do ruído das imagens. Ambas implementadas pelo toolbox do Matlab®.

Com a definição da linha de base por meio de georreferenciamento ou caminhamento por estação total e a distância focal obtida na validação da câmera a disparidade nas duas imagens passa a reconstruir o mapa de profundidade. Disparidade é, por definição, a distância horizontal entre dois pixels correspondentes, considerando u_L e u_R como pixels em cada uma das

imagens captadas pela diferença na direção e na direção da mudança de coordenadas:

$$u_{search} = u_{ref.} + s \cdot d_{ref.}(u_{ref.}, y), s = \pm 1, \quad (4.25)$$

A disparidade entre o ponto pesquisado u_{search} é dada pelo mapa de disparidade d_{ref} de acordo com a direção (s). O mapa de disparidade define a distância de pixel horizontal para cada coordenada de pixel da imagem. Pela Figura 4.9, verifica-se que a distância de disparidade ou profundidade, ou seja, a distância entre o ponto $P(X, Y, Z)^T$ e a linha de base é dada por:

$$d = u_l - u_r = f \left(\frac{X+l}{Z} - \frac{X-l}{Z} \right) = \frac{2fl}{Z}, l = M/2. \quad (4.26)$$

Para obter o mapa de profundidade das imagens dos CCSI utilizamos o um algoritmo de correspondência estéreo, baseada em segmentação usando propagação stereo e uma medida de dissimilaridade auto adaptável de Klaus, Sormann e Karner (2006), nominado pelos autores por *AdaptingBP*, também implementado em Matlab®. O algoritmo atribui um plano de disparidade a cada segmento de pixels. As imagens retificadas são inseridas e:

- (1) recebem uma segmentação por cores,
- (2) um método de correspondência local baseado em janela determina disparidades de pontos confiáveis,
- (3) uma técnica de ajuste de planos obtém planos de disparidade que são considerados como um conjunto de rótulos, e;
- (4) a atribuição de plano de disparidade ideal é aproximada usando otimização gulosa ou de cortes de gráfico.

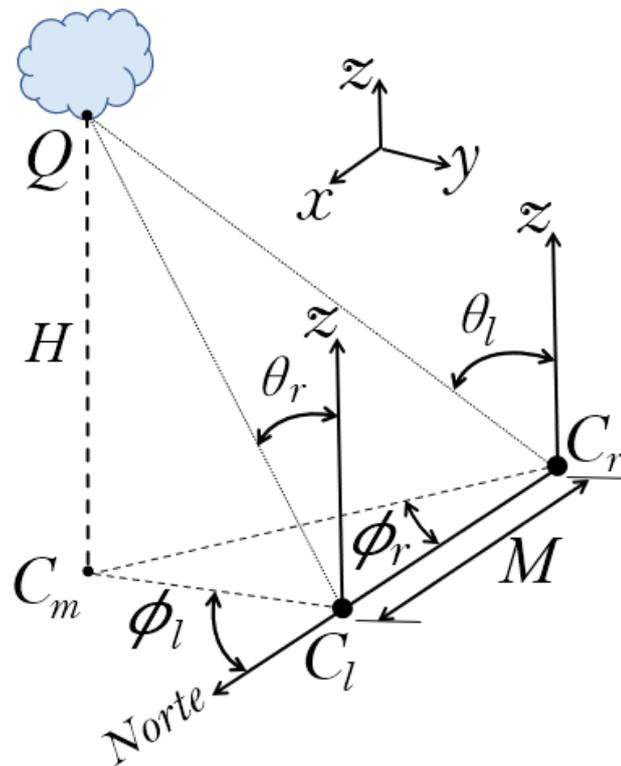
Finalmente, os resultados da reconstrução tridimensional das imagens do céu são comparadas aos dados de um ceilômetro para validação da altura de nuvens.

4.3 POSICIONAMENTO DOS APARELHOS

Os aparelhos foram instalados de acordo com a linha de base $M(C_L, C_R)$ calculada colocando ambos os aparelhos na função “*fixed point*” que alinha frontalmente os eixos ópticos de ambos os aparelhos com o eixo vertical a partir

do centro da lente. A distância ideal da linha de base entre as câmeras tem importância significativa na obtenção da base da altura da nuvem, sendo associada à resolução das câmeras, ângulo de visão, posição da nuvem em relação geometria da imagem e o eixo óptico das câmeras (KUHNER et al., 2019a). A Figura 4.10 ilustra o posicionamento geométrico dos dois CCSI, com base na figura 4.9. Na figura, as relações de definição da posição do ponto Q, que representa um ponto de imagem captado em pixels nas câmeras, medido à uma altura H na linha do laser do ceilômetro C_m . Estas grandezas são relacionadas por trigonometria aos ângulos de posição (θ_l , θ_r , ϕ_l , ϕ_r), definidos nas seções anteriores, em relação ao ponto medido no ponto Q e as coordenadas dos centros ópticos C_l e C_r .

Figura 4.10 - Posicionamento dos CCSI em relação ao ceilômetro.



Fonte: O Autor.

Para garantir medições mais precisas, as localizações dos dispositivos através de seus centros ópticos C_l e C_r foram determinadas pelo alinhamento horizontal dos eixos das câmeras em relação ao norte conforme Bradski e Kaehler (2008). As distâncias entre os CCSI foram implantadas por estação total pela técnica de caminhamento e alinhadas em relação ao horizonte. As

coordenadas geográficas X, Y e Z e suas posições em relação ao norte serviram de base para a trigonometria e triangulação dos planos de projeção estereográfica. Utilizamos esta configuração para a estereografia por não dispormos de um ceilômetro capaz de acompanhar o movimento do CCSI, que é capaz de medir distâncias em horizontes angulares de $360^\circ/180^\circ$. Sendo assim, medições do ceilômetro foram comparadas com as medidas de altura da base da nuvem resultantes da estereografia imediatamente acima do ceilômetro.

Uma maneira alternativa para este método, baseado na movimentação $360/180^\circ$ do CCSI e sem a utilização do ceilômetro, que possibilitam também a validação da profundidade em focar objetos à longas distâncias conhecidas em terra, é a validação da estereografia focando alvos à longas distâncias, tais como prédios, torres e outros.

4.4 MÉTRICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE IMAGENS COM PRESENÇA DE NUVENS

As imagens de diferenciação entre nuvens e céu claro necessitam passar inicialmente por um processo de detecção de nuvens orientada pela definição do céu azul pela *Rayleigh Scattering*. O método de RBR apesar de bastante difundido na literatura, possui limitações para diferentes condições de luminosidade durante o dia, na definição de nuvens pouco espessas ou escuras. Também não é adequado para a região brilhante em torno do sol e para altos ângulos de zênite nas metodologias de segregação entre céu e nuvens, apresentada em conforme os trabalhos de Yamashita e Yoshimura (2012) e Zelinsky (2009). O RBR é dado como razão entre o canal vermelho e azul da imagem:

$$RBR = \frac{R}{B} = 1 + \frac{R-B}{B}. \quad (4.27)$$

A RBR varia entre os valores de 0 a 1, à medida que a razão se aproxima de 1, temos a imagem do céu claro (azul). Esta base de detecção foi amplamente utilizada nos trabalhos de Yang et al.(2014), Chow, Belongie e Kleissl (2015) e Ran et al. (2017).

Como o CCSI capta imagens durante o dia em diferentes horários e em vários locais a RBR apresentou-se pouco homogênea quando distribuída no todo o campo de visão da câmera do CCSI, além das condições baixa definição de nuvens em cinza escuro. Como a RBR é muito afetada pelo brilho do sol na proximidade da região circunsolar, o aparato e lentes planas com filtros de cor pré-determinados de cinza e azul conseguiram mitigar este efeito, porém foi necessário utilizar um método mais abrangente para resolver estas limitações, o NRBR.

Na classificação de imagens os *thresholds* variam à medida que a luminosidade das fotos se modifica. Esta variância pode ser analisada na forma de uma regressão, baseada na mediana dos canais RGB representando a variável dependente do *threshold* do canal, incluídas na toolbox do Matlab®. O algoritmo a partir disso detecta as nuvens pela opacidade extraíndo os comprimentos de onda em canais RGB, recombina as métricas e obtêm a proporção vermelho para o azul. Em seguida aplica a normalização pelo NRBR que é definida por:

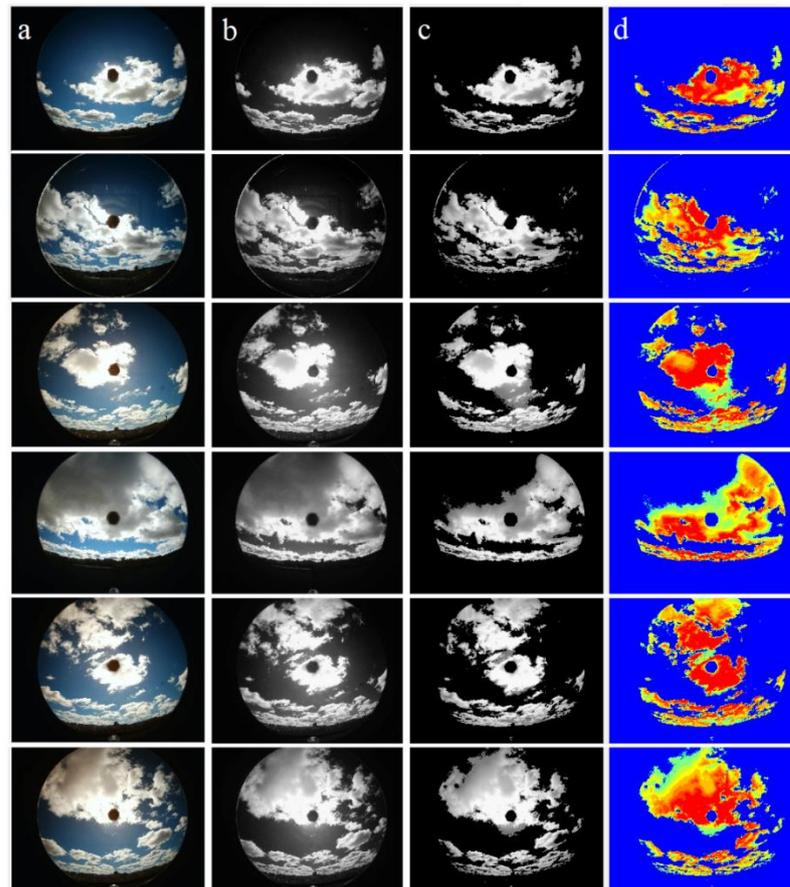
$$NRBR = \frac{R-B}{R+B}, \quad (4.28)$$

Sendo R e B os canais vermelho e azul da imagem.

A utilização desta metodologia apresenta resultados superiores à RBR, pois remove ruídos que atuam sobre o resultado do *threshold* durante as várias mudanças nas intensidades de cores durante o dia ou de diferentes lugares em que é instalado o CCSI.

A Figura 4.2 mostra o resultado da separação de nuvens e céu claro para diferentes situações. As figuras de 4.2a demonstram a imagem original em diferentes horários do dia. Em 4.2b, a mesma imagem em tons de cinza. A figura 4.2c as com a aplicação de *threshold em cinza*. Em 4.2d o *threshold em cores* por meio de NRBR. Estas imagens foram captadas pelo CCSI.

Tabela 4.2 a. Imagens em cores, b. tons de cinza, c. threshold em cinza e d. threshold em cores por meio de NRBR.



Fonte: O Autor.

O CCSI centra a lente da câmera na direção do sol (azimute e elevação) utilizando o aparato de proteção da irradiação direta sobre a câmera de maneira a obstruir ao mínimo a imagem, o que leva à uma retirada da ofuscação direta do sol facilitando a detecção das nuvens e do céu pela NRBR.

O CCSI também utiliza filtros em lentes planas para tratar a intensidade do brilho solar, sem prejudicar a imagem captada, o que facilita estabelecer valores diferenciados no levantamento de NRBR em nuvens de baixa profundidade óptica tais como *cirrus*, *cirrocumulus* e *altocumulus*. Os métodos de NRBR por processamento de imagens são bastante robustos para a detecção de nuvens e céu claro (HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010; WACKER et al., 2015).

4.5 RESUMO DO CAPÍTULO

O capítulo apresentou as metodologias empregadas na condição de utilizar uma imagem do céu e projetá-la em terra. Notavelmente, essa associação torna possível projetar coordenadas de pontos do céu sobre coordenadas de pixel do sensor da câmera, expandindo-as, em escala de pixels, para coordenadas do território, em outras palavras, torna possível projetar a sombra das nuvens e áreas de céu claro ou de irradiação sobre a área de interesse da PV.

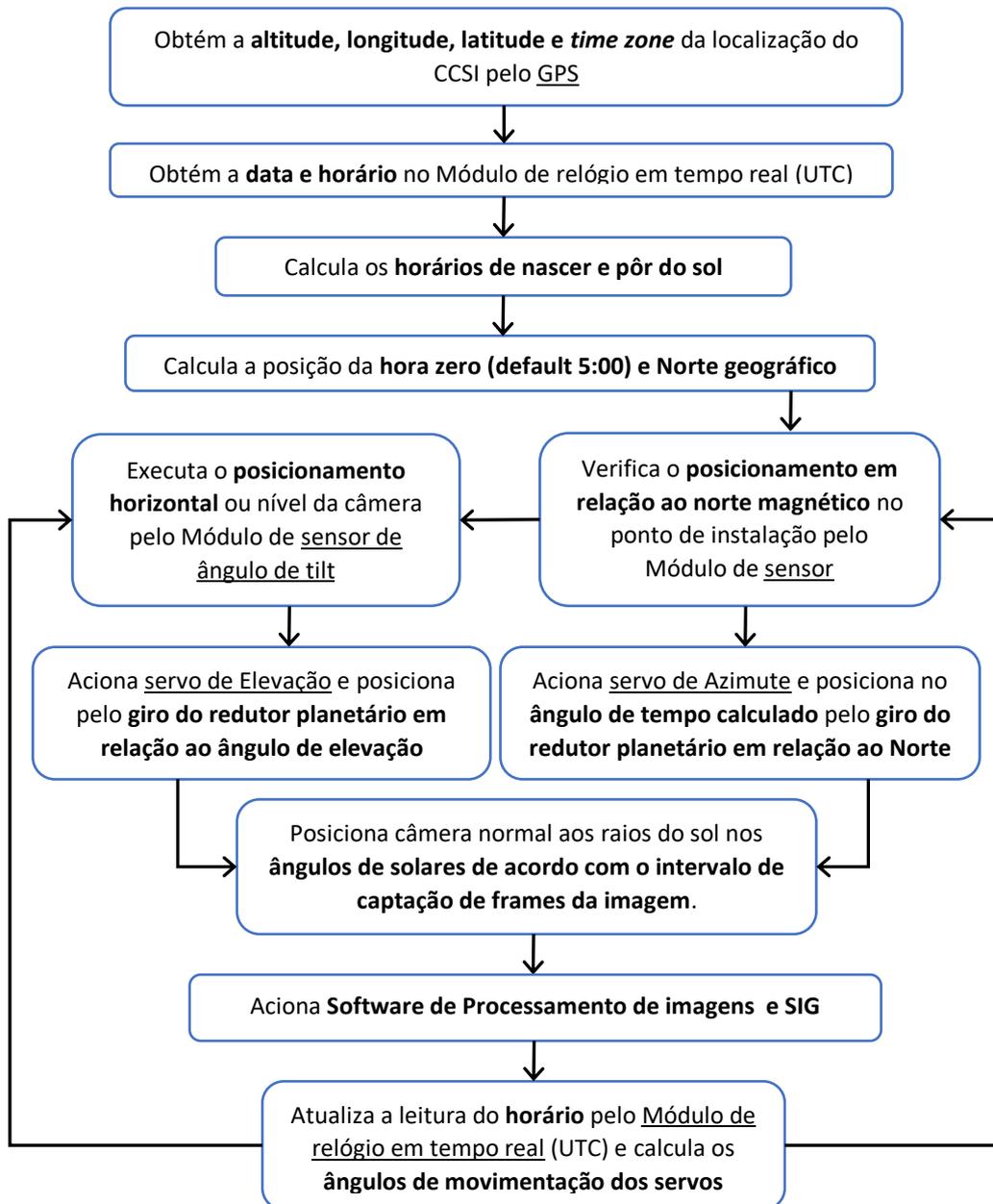
Os postulados apresentados são a formalização das ações de obtenção factível do espelhamento do céu sobre o território. Como apresentado no texto: “Em termos diretos, a cobertura de nuvens e céu limpo em de Asky é projetada sobre a área de captura da PV (A_{PV}), definindo a posição, inclinação, bordas e áreas de céu claro e sombra de nuvens”.

A calibração das câmeras foi apresentada como um instrumento de validação do método, pois partindo de conceitos básicos da câmera pinhole e evoluindo para a câmera omnidirecional, as correções da distorção e a obtenção de imagens de grandes áreas podem ser relacionadas por meio do SIG à área de interesse da PV. Corroborando a isto a correspondência estéreo de imagens e seus produtos, a profundidade de imagens e altura da base de nuvens, são as condições que antecedem a previsão da irradiação dos métodos que se beneficiarem desta forma de anteceder a posição e a altura das nuvens pelo aparelho.

5 O SISTEMA DO CCSI

O CCSI utiliza um sistema de rastreamento direcionado à posição do sol no horizonte de acordo com o posicionamento sistemático da câmera do aparelho em alinhamento com os ângulos de azimute e de elevação solar de acordo com o esquema explicativo do rastreador solar do CCSI da Figura 5.1.

Figura 5.1 Fluxograma de sequência de funcionamento do rastreador solar



Fonte: O Autor.

Com o CCSI torna-se possível monitorar uma área normal aos ângulos de posição do sol, ou seja, posicionado o eixo óptico em relação aos ângulos de azimute e elevação solar. A imagem captada passa por processos de retirada da distorção, tratamento e vários processamentos sendo rebatida sobre o território de interesse para captação de energia onde um SIG georreferencia a imagem do céu sobre o território.

Para esta condição foi necessário projetar um sistema de seguidor solar capaz de posicionar a câmera. Este sistema é direcionado por meio de dois motores de passo em conjunto a redutores planetários capazes de posicionar a câmera em intervalos de tempo diminutos pela ação do movimento controlado de suas engrenagens. O passo original dos motores é de 1.8° , o que necessita sua subdivisão por redutores planetários, para conferir a precisão do passo para $0,072^\circ$ ($1.8^\circ/25$) e também inserindo maior sensibilidade ao movimento do sistema no posicionamento da câmera, sem a perda de torque dos motores.

O conjunto de Servos Motores por Deslocamento Ativo (SVDA) é composto por motores e sensores microcontrolados com interface eletrônica e atuadores de deslocamento. O conjunto alinha, de maneira autônoma, a câmera em relação ao eixo norte sob controle de uma bússola digital (magnetômetro de três eixos) que posiciona o eixo do sensor em relação à posição do norte magnético e na sequência direciona-o ao norte geográfico, onde inicia o movimento de seguir ao sol na hora exata do nascer do sol até o ocaso, ou pôr do sol.

O controle dos motores de passo (*step motors*) é realizado por um sistema de Ambiente de Desenvolvimento Integrado – Hardware (ADI-H) formado por placas compostas por micro controlador embarcado no sistema do CCSI, comumente conhecidos comercialmente por placas de circuito impresso Arduino e *Raspberry Pi*. O sistema é instalado sob plataformas de circuitos de entrada/saída de sinais, que pode ser facilmente conectada à um computador e programada via ADI-H, utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB. O sistema ainda conta com um computador de bordo baseado no *Raspberry Pi 4*, acessado remotamente, que é responsável pelo controle dos sistemas, bem como de

executar os algoritmos de movimentação mecânica, processamento de imagens e transmissão de dados.

O CCSI é um aparelho de funcionamento autônomo, contudo, todas as suas funções podem ser acessadas via interface remota.

A partir das coordenadas locais a interface digital/analógica por meio de um algoritmo astronômico do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) calcula o posicionamento da câmera nos raios e ângulos de giro dos motores de passo de acordo com as horas, minutos e segundos ao longo do dia entre o nascer e o pôr-do-sol para todo o ano solar. Também é programado de maneira a iniciar a movimentação e posição nos ângulos no instante em que é acionado.

O posicionamento da câmera coloca o sol ao centro da imagem. Ao posicionar o sol ao centro da câmera, torna possível o tratamento efetivo da ofuscação do sol sobre a lente com a aplicação filtros constituídos por conjuntos de lentes planas com tonalidades entre o azul e o cinza, o que aumenta sobremaneira a sensibilidade do algoritmo de detecção do NRBR. Outra finalidade dos filtros é destacar a definição do azul do céu e da tonalidade entre cinza e branca das nuvens. As combinações de lentes filtram a ofuscação do sol mantendo a imagem do círculo solar ao centro, facilitando ao algoritmo de tratamento de imagens em definir se o sol permanece visível (tonalidades de branco com alto brilho) ou encoberto por nuvens (tonalidades de cinza).

Outra opção, dependendo da finalidade do método associado, é o uso de um anteparo posicionado entre a lente da câmera e o sol (área do círculo solar) à uma distância calculada, com a mínima interferência sobre a imagem (5%), o que também possibilita analisar as condições de cobertura da imagem do sol, na região circunsolar, de acordo com tratamento da imagem e a aplicação desejada.

Os posicionamentos de zênite e azimute são calculados a partir do plano horizontal e vertical em um ponto chamado hora zero (padrão de horário das 5:00 horas, horário de Brasília, Brasil). O aparelho obedece a movimentação no ângulo entre o plano do equador e o plano orbital da Terra, chamado obliquidade da eclíptica que é variável entre $23^{\circ}27'$ em ambas as direções da linha do equador. A sincronia dos mecanismos é obtida de acordo com o posicionamento

de altitude, longitude e latitude de um *Global System Position* (GPS) incluso no CCSI.

O sistema de posicionamento por GPS atua por triangulação e obtém as coordenadas em relação aos satélites disponíveis na área de monitoramento. As coordenadas geográficas são utilizadas para posicionar o centro de monitoramento no SIG, além de servirem de parâmetros ao cálculo do posicionamento dos motores de passo nos ângulos de azimute e elevação entre os pontos de nascer e pôr do sol.

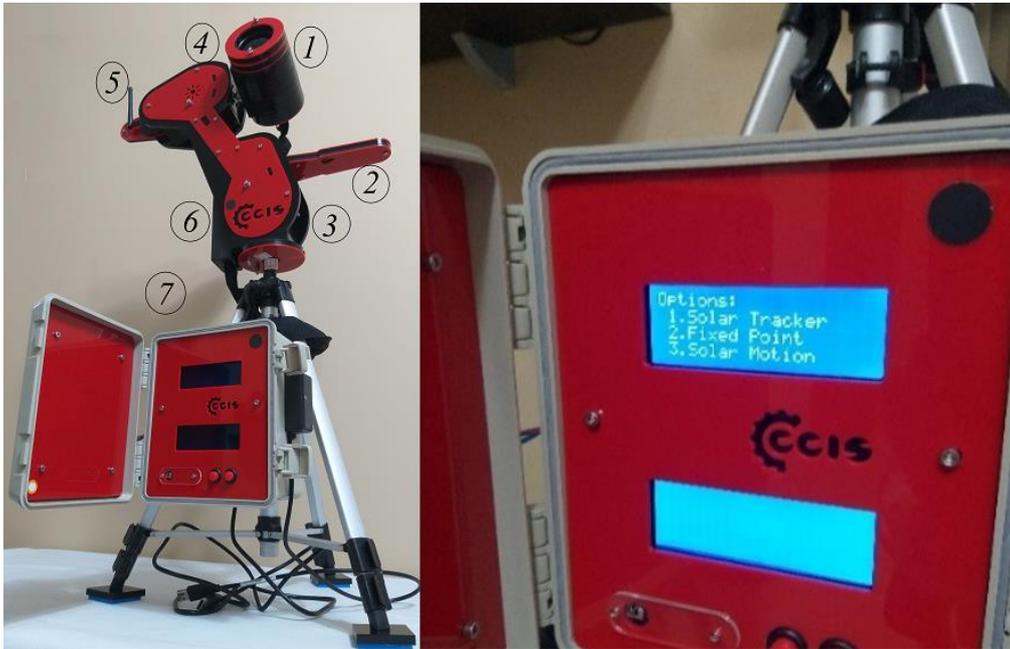
Estes movimentos são calculados em tempo pré-estabelecido com padrão de 1 minuto, podendo ser fracionados de acordo com a finalidade do uso do aparelho, possibilitando o monitoramento da área do céu em intervalos intraminuto para todos os dias do ano em qualquer posicionamento no globo terrestre. A velocidade de *frames* retirados da imagem de vídeo é controlada por um algoritmo que pode ler dados de uma estação meteorológica atrelando parâmetros externos, tal como a velocidade do vento, para conferir uma sequência de velocidade para a sequência de captação de *frames* de imagens da câmera.

Por se tratar de um sistema *open-source* o sistema do CCSI inclui na programação de seu software a possível vinculação de sua utilização com diversos métodos de análise de séries temporais de imagens em concordância com séries temporais meteorológicas.

Os cálculos de posicionamento solar são baseados nas equações de algoritmos astronômicos como o de Jean Meeus, do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), e do (US DEPARTMENT OF COMMERCE, NOAA, 2018) apresentada no anexo A. Uma revisão sobre os conceitos do rastreamento solar pode ser também ampliada também em trabalhos como o de (NSENGIYUMVA et al., 2018). A Figura 5.2 mostra o protótipo 1 do CCSI com os principais componentes do aparelho, sendo constituído na figura da esquerda, por ① Câmera CCD fisheye e proteção com lentes planas em tonalidades de cinza e azul, sensor de temperatura do invólucro para acionamento de resfriamento ou aquecimento do invólucro da câmera e sensor de nível da câmera; ② Sensor de posicionamento ao norte por magnetômetro digital, ③

Step motor para posicionamento ao norte e ângulo de azimute, ④ Step motor para posicionamento do ângulo de zênite, ⑤ Sistemas GPS e Bluetooth para transmissão de dados ou recepção de comandos, ⑥ Sistema de posicionamento global (GPS), ⑦ IDH com painel de opções de funções, informações sobre posicionamento da câmera e de funcionamento do aparelho, em detalhe na figura da direita.

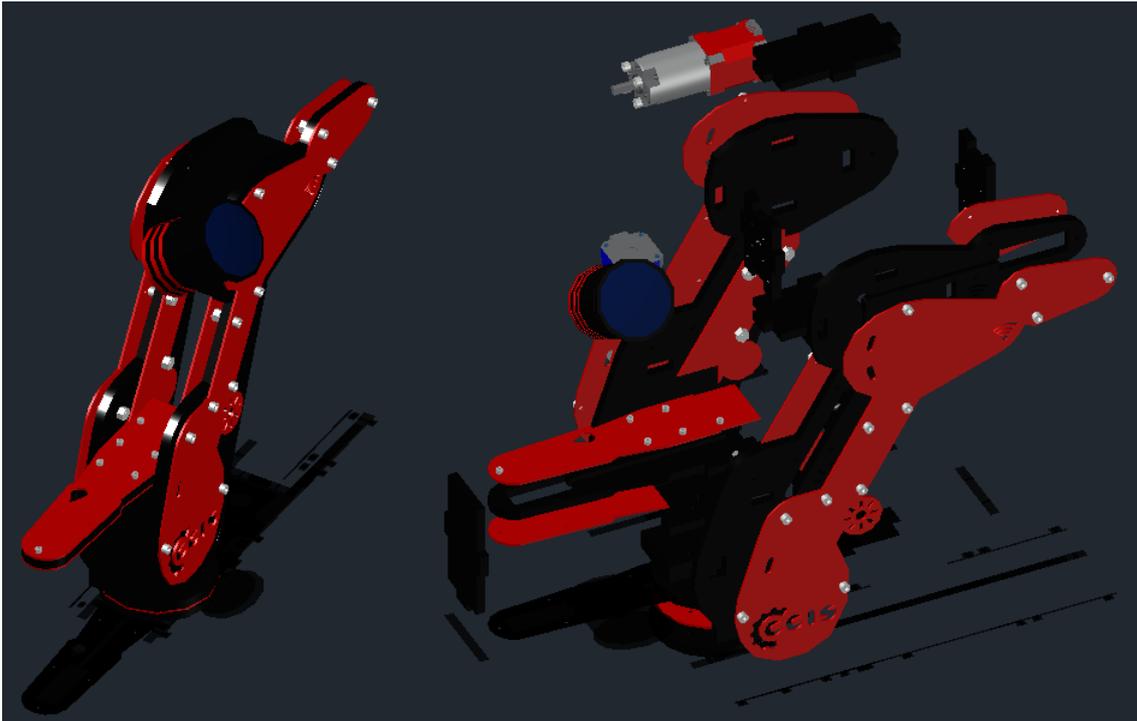
Figura 5.2 - Protótipo do CCSI com os principais componentes do aparelho.



Fonte: O Autor.

Este protótipo é uma montagem em acrílico moldado por corte a laser e suas partes foram projetadas do tipo “monte você mesmo”, o que possibilita uma montagem segura como é esboçado no seu projeto 3D da Figura 5.3.

Figura 5.3 - Projeto em CAD 3D do CCSI com suas partes destacadas.



Fonte: O Autor.

Toda a eletrônica envolvida foi projetada com peças do tipo “Shields” que poder ser adquiridas em parte no mercado brasileiro.

Os servos motores planetários são projetados e montados exclusivamente para o aparelho, devido à sua característica de relação de passo para poder movimentar os servos de azimute e elevação com maior sensibilidade. Estas características proporcionadas no projeto também foram concebidas de maneira a inserir uma fácil programação para utilização em outros métodos que virem a necessitar de uma função de seguidor diferenciada, tais como seguir um tipo de nuvem em detrimento de outra ou mesmo seguir o movimento de um satélite ou de outros corpos celestes.

O custo aproximado do CCSI, protótipo, é de aproximadamente \$ 1,500 na sua versão automatizada, ou seja, inclusos todos os sistemas referenciados neste capítulo

5.1 O PROJETO *UPGRADE* DO CCSI: O C²SI

O projeto e a validação do CCSI foram avaliados durante sua utilização em campo, para aviltar as melhoras necessárias à confecção de um modelo para um projeto de produto, com características propícias ao encaminhamento da patente do instrumento. Várias configurações do protótipo do CCSI foram necessárias para respeitar normas de industrialização e segurança de maneira a proporcionar um produto para o uso em projetos variados, dadas as aptidões do aparelho.

Uma das mudanças se refere às possibilidades de estabelecer formas com menor atrito ao aparelho devido às condições de vento observadas no protótipo 1, quando exposto às condições mais severas. Para tanto foram estudadas alternativas de proporcionar os conceitos de aerodinâmica ao projeto, e serão apresentadas em artigos dedicados a este tema específico. A forma mais satisfatória de proceder a esta condição foi estudada com modelos construído por impressoras 3D. Condições de espessuras paredes do aparelho foram estipuladas de maneira a aguentar efeitos relacionados ao intemperismo do clima, tais como a resistência à choques de granizo, rajadas laterais de vento, efeitos da umidade e temperatura interna em relação aos equipamentos eletrônicos embarcados, entre outros.

Outras alternativas mantidas entre os projetos foi a possibilidade de o instrumento manter-se compacto como no primeiro protótipo, com reduzido número de peças, e com a mesma facilidade de montagem, haja vista a necessidade de deslocamento seguro para qualquer local de monitoramento.

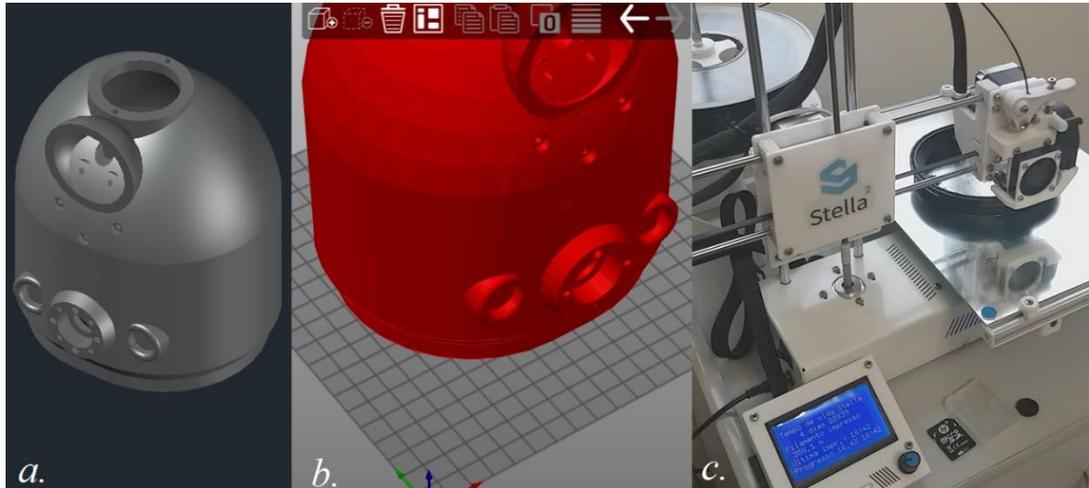
As alternativas encontradas com a impressão 3D possibilitam que o instrumento seja produzido no local de destino de sua utilização, pois o projeto envolveu o design em softwares do tipo CAD^{®14} em formas 3D totalmente aerodinâmicas. Por serem projetadas nestes softwares apresentam altíssima qualidade e precisão entre o projetado e o produzido na impressão 3D.

Estabelecido o projeto o modelo 3D é “fatiado” ou moldado em softwares especialistas chamados “*Slicers*” que preparam o modelo para a impressão 3D

¹⁴ CAD (Computed Aided Design) uma plataforma de softwares de engenharia capaz de proporcionar projetos de realidade virtual em modelos 3D.

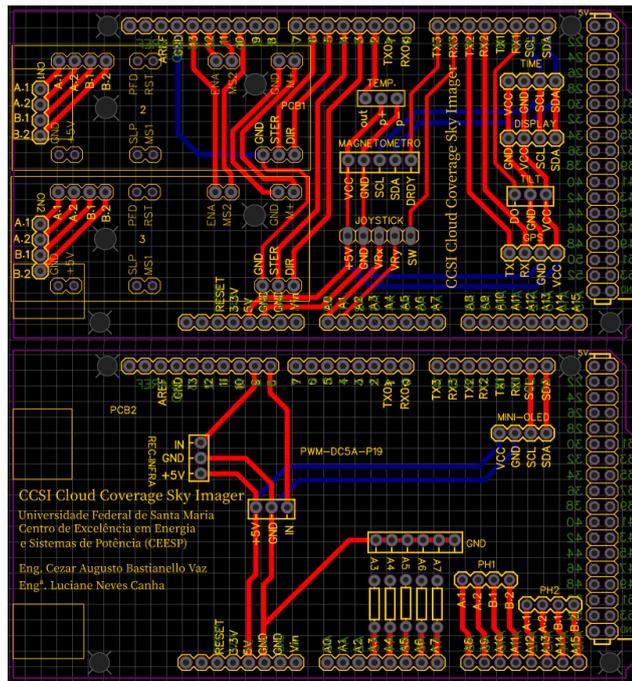
propriamente dita gerando um *G-code* que é uma linguagem de programação de controle numérico para ser interpretado pela impressora 3D. A Figura 5.4 demonstra as três etapas principais da produção do C²SI por meio do design em tecnologia CAD, fatiamento do modelo em realidade virtual e a impressão propriamente dita do modelo 3D.

Figura 5.4 - Etapas de produção de peças 3D a. Design em CAD, b. Fatiamento e c. impressão 3d.



Fonte: O Autor.

O modelo técnico do C²SI está sendo produzido e testado com as alterações e melhorias em relação ao projeto do protótipo inicial e incluirá em seus sistemas eletrônicos uma compartimentação circuitos eletrônicos em um par de *Shields*, Figura 5.5 que foi produzido de maneira a incorporar a comunicação com diversos tipos de sensores, câmeras, transmissores e receptores.

Figura 5.5 - Shields de comunicação do C²SI.

Fonte: O Autor.

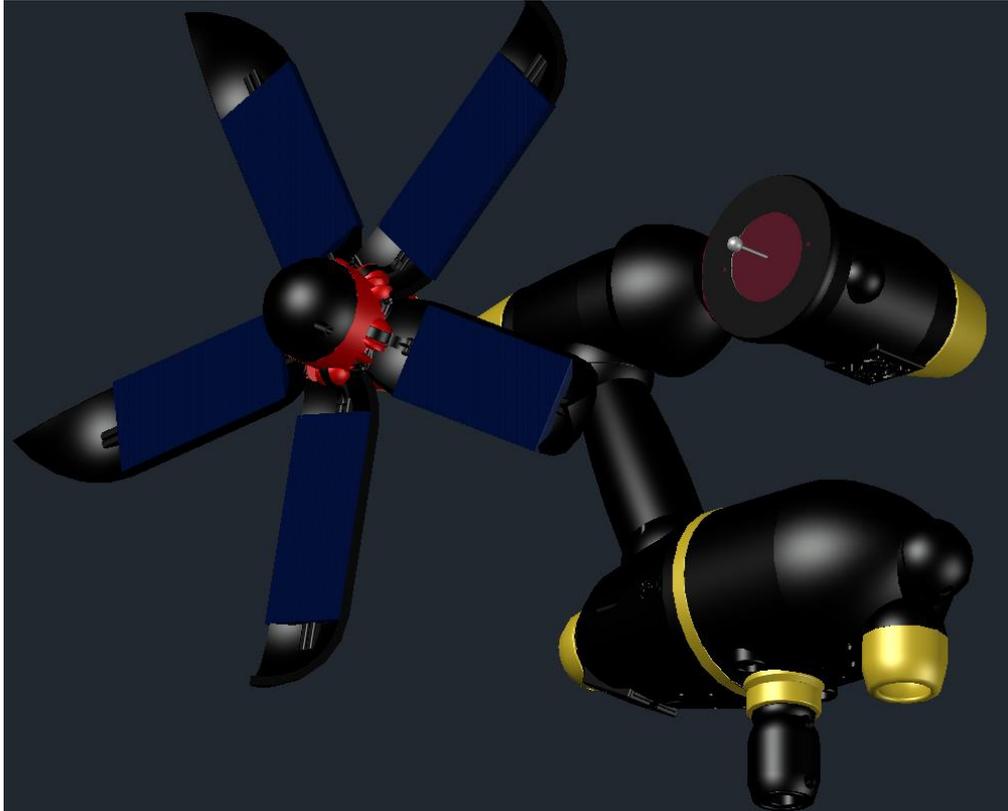
A apresentação torna possível a conexão com vários subsistemas, tais como fontes alternativas de energia, tais como a fotovoltaica, intercomunicação com sensores de temperatura, pressão atmosférica, sistemas de posicionamento global sensores de elevação, umidade, sensores da linha do horizonte, magnetômetro além de contadores de tempo e sistemas de mídia tais como displays.

Um *joystick* também foi acoplado ao sistema para proporcionar os ajustes de azimute e elevação inicial do aparelho de maneira manual, quando não houver satélites em número disponível suficiente para a triangulação do aparelho.

O projeto de circuitos do C²SI foi concebido aliando a obtenção de dados de energia solar disponível na rede pelo monitoramento da cobertura de nuvens e de céu claro para aplicações otimizadas com a demanda de modo geral, conexão à sistemas de controle de carga como veículos elétricos, sistemas eólicos, de armazenamento de energia e todos os componentes necessários ao compartilhamento de informações como as Smart grids, bem como em Smart Cities. Como o C²SI pode ser instalado em locais distantes do seu software de análise, este tipo de tecnologia é necessário, devido ao tempo de atraso na

transmissão de dados (*delay*), de acordo com o tipo de tecnologia dispensado à esta função. A Figura 5.6 mostra o projeto em CAD, 3D do C²SI.

Figura - 5.6 Projeto C²SI.



Fonte: O Autor.

Outro dispositivo em produção para ser acoplado ao C²SI trata-se da sua fonte de energia, que foi projetada para cumprir com as exigências de projetos ambientalmente eficientes. Para tanto um sistema planetário de abertura em leque de painéis fotovoltaicos foi inserido ao projeto e ligado à um sistema blindado de baterias, controlado por um sistema de circuitos de proteção de carga e descarga. O aparelho também tem a opção de abastecimento de energia por fontes externas.

O sistema de energia abre aletas com painéis fotovoltaicos no nascer do sol e fecha ao pôr do sol de acordo com o ciclo de leitura das imagens do C²SI. O sistema também tem a função de proteção aos painéis fotovoltaicos, pois para incluir segurança e durabilidade a estes, determinado patamar de temperatura, umidade e pressão para evitar danos aos painéis em eventos de chuva e granizo.

Da mesma forma na ocorrência destes eventos a câmera se posiciona na vertical com a lente voltada para baixo, visando sua proteção.

Para projeto, foram consideradas as normas de proteção da Comissão Eletrotécnica Internacional 60529 (IEC60529) nos quesitos IP 65 (Proteção à jatos de água) e da *World Meteorological Organization* nos padrões de mensuração de radiação, o que necessitou de um estudo da aplicação da impressão 3D à esse tipo de aparelho, levando à alterações nas condições de impressão 3D. Outras condições de proteção se deram devido à temperatura interna do aparelho, com a inclusão de arrefecedores (*coolers*), que são acionados pela ação da leitura de um termômetro interno monitorado pelo software de automação do aparelho, quando a temperatura tender a níveis prejudiciais aos módulos eletrônicos. Da mesma forma para temperaturas extremamente baixas um sistema de módulos de Peltier¹⁵ pode ser acionada para aumentar temperaturas internas baixas à níveis adequados.

Outra diferenciação deste protótipo tratou da inclusão de uma segunda câmera, responsável pelo monitoramento da região circunsolar, esta câmera é composta por filtros capazes de destacar a silhueta da esfera solar no horizonte e definir se o sol se encontra bloqueado por nuvens e também será apresentada em artigos destinados a este fim. Esta informação é conjugada ao processamento de imagens e proporcionará ao aparelho 100% da informação da imagem, sem aparatos de oclusão, associando ao C²SI um amplo monitoramento do horizonte de céu em 180/360°, superando a qualidade do monitoramento dos aparelhos apresentados na revisão da literatura.

O aparelho foi projetado para funcionamento de forma contínua, monitorando o ciclo do sol nos 365 dias do ano, captando imagens de qualidade, e com a possibilidade de agregação às metodologias que necessitam deste tipo de solução para a obtenção “on time” ou para a previsão da energia em sistemas distribuídos.

¹⁵ Módulos Peltier, também conhecidos como pastilhas termoelétricas, são pequenas unidades de que utilizam tecnologia de matéria condensada para operarem como bombas de calor.

5.2 RESUMO DO CAPÍTULO

Unindo as métricas de caracterização das imagens das nuvens na sequência a sua profundidade e posição, o sistema seguidor solar fecha o hall de condições que fazem do CCSI uma inovação necessária aos preceitos da previsão da energia solar sobre grandes áreas de monitoramento, além de estabelecer sua aptidão para seu uso conjunto com Smart Grids e Smart Cities, pois alinha sua tecnologia à lacuna do estado da arte apresentado no resumo da tese além de ser de fácil produção com uma montagem simples e facilitada.

6 RESULTADOS ANÁLISES E DISCUSSÕES

6.1 CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS

A calibração da câmera consistiu, conforme proposto, na captura de um conjunto de combinações de imagens de planos padrão (tabuleiro de xadrez) posicionadas sobre o FOV das câmeras. As imagens são inseridas no software de calibração de acordo com o modelo citado em Scaramuzza (2007). A Fig. 6.1 mostra um exemplo com sete imagens capturadas da grade de xadrez.

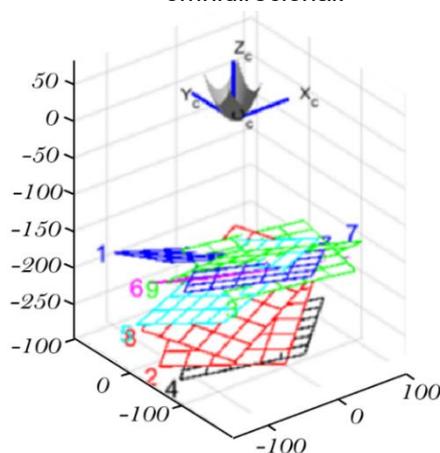
Figura 6.1 - Calibração das lentes das câmeras do CCSI pelo método de Scaramuzza com a combinação de 7 imagens do tabuleiro padrão sobre o campo de visão de uma das câmeras.



Fonte: O Autor.

A Fig. 6.2 mostra a posição do tabuleiro de xadrez em relação à câmera com a visualização da cena extrínseca das poses 3D reconstruídas do quadro de referência da grade na câmera. A câmera posicionada na origem do sistema captou as imagens numeradas pelos frames e representa suas posições e inclinações no espaço tridimensional das imagens da Figura 6.1.

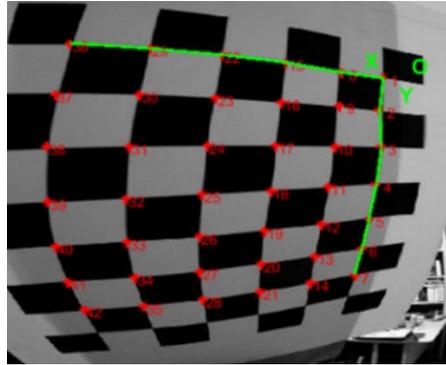
Figura 6.2 - Posição de cada tabuleiro de xadrez em relação ao referencial da câmera omnidirecional.



Fonte: O Autor.

A figura 6.3 mostra um exemplo da extração dos cantos da grade das imagens da calibração com a posição dos cantos do tabuleiro de xadrez.

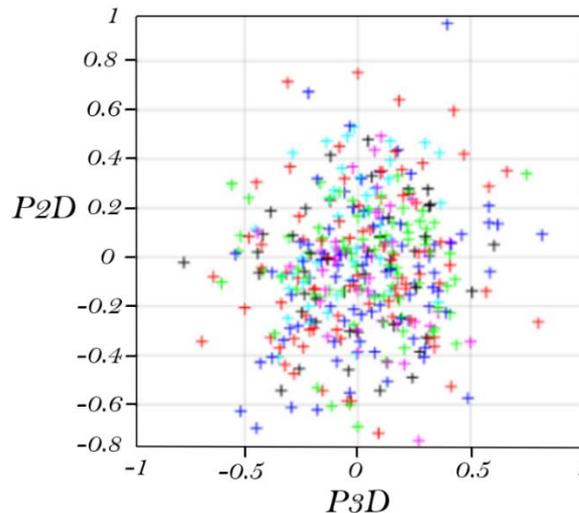
Figura 6.3 - Extração dos cantos da grade de uma imagem com a posição dos cantos do tabuleiro de xadrez com a origem do eixo de coordenadas x e y.



Fonte: O Autor.

É computado também o erro médio, entre os pontos 2D detectados e os estimados pela projeção 3D, figura 6.4.

Figura 6.4 - Erro médio entre os pontos 2D detectados e os estimados pela projeção 3D.



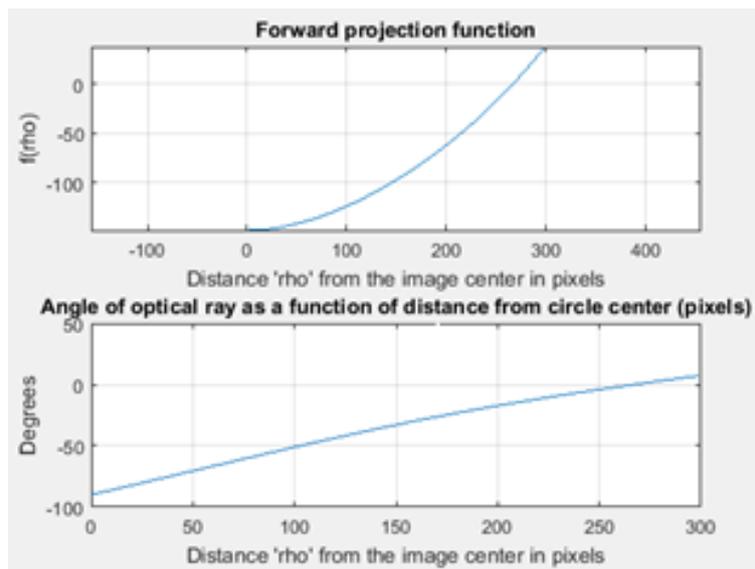
Fonte: O Autor.

O algoritmo de Scaramuzza, 2016, a partir do processamento destas imagens estabelece a ordem máxima do polinômio que aproxima a função que projeta cada pixel no espaço 3D, que para o experimento obteve um grau de $n = 4$. Este grau é também calculado e apresentado pelo método de Scaramuzza.

Na figura 6.5 o resultado gráfico da distância 'rho' do centro da imagem em pixels e o ângulo do raio óptico como função da distância do centro focal da

lente (*pixels*) que correspondente a distância em relação ao horizonte. O algoritmo também calcula a distância 'rho' ao centro da imagem em pixels. Na sequência por um processo de refinamento não linear dos parâmetros por matrizes de rotação e translação torna possível melhorar a calibração. Os parâmetros extrínsecos detectados nas câmeras viabilizam a reconstituição dos padrões no espaço 3D.

Figura 6.5 - Estimação automática indicando a origem dos eixos x, y; resultado gráfico da distância 'rho' do centro da imagem em pixels e o ângulo do raio óptico como função da distância do centro do círculo (pixels) e distância 'rho' ao centro da imagem em pixels



Fonte: O Autor com base no software OCamCalib.

O algoritmo foi usado para configurar a ordem polinomial máxima que aproxima cada pixel projetado no espaço 3D.

A Tabela 6.1 lista os parâmetros de distorção radial resultantes da calibração de câmeras CCSI usando o método de refinamento de Scaramuzza et al. (2016, 2017). A partir das diferenças entre as posições dos cantos das imagens do tabuleiro de xadrez em pixels, é calculada a raiz quadrada do erro médio de rejeição. Um total de 26 imagens foi usado para calibrações mais precisas ao obter os parâmetros da lente de cada câmera CCSI. A tabela 6.1 mostra os parâmetros resultantes das câmeras do CCSI já com o refinamento.

Tabela 6.1 - Parâmetros intrínsecos da câmera e erro de reprojeção

Câmera 1				
Coordenadas do ponto central (1.0e ⁻⁰²)				
x_c		y_c		
4,088342446079		6,08118112256		
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
-5,1298832666	0	0,000012597663	-0,000000027818	0,00000000004439
Erro de reprojeção em pixels: 0,698222				
Câmera 2				
Coordenadas do ponto central (1.0e ⁻⁰²)				
x_c		y_c		
4,088342446079		6,08118112256		
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
-4.98452318657	0	0.000010446595	-0.000000020867	0.00000000004988
Erro de reprojeção em pixels: 0,7268				

Fonte: O Autor.

O estabelecimento dos parâmetros da câmera permitiu estimar o erro de reprojeção da estimativa, para tanto foram executadas exaustivas calibrações visando uma detecção acentuada dos cantos do tabuleiro de xadrez durante as iterações do método para dar maior exatidão à obtenção dos parâmetros das lentes das câmeras utilizadas.

6.2 CURVA DE PROJEÇÃO

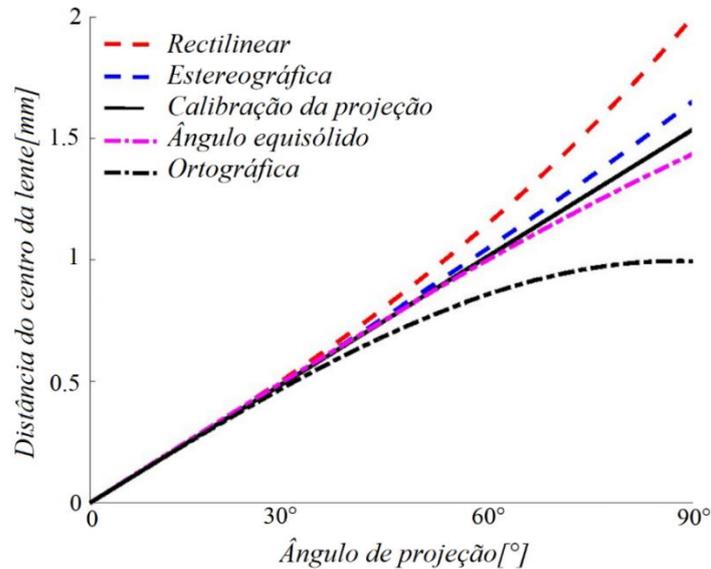
As projeções da Fig. 6.6 comparam a taxonomia de projeção usada para diferentes câmeras com a projeção resultante da calibração da câmera através da distância da imagem da lente de projeção central com o ângulo Θ (a partir eixo longitudinal da lente). A projeção da curva obtida pelos parâmetros intrínsecos de calibração da câmera aproxima-se mais das projeções equissólida e estereográfica do que dos outros tipos de projeção. A curva em projeção de quarta ordem foi dada pela equação:

$$r(\theta)_{omnidirecional} = a_0 + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4. \quad (5.1)$$

Esta curva é adequada para realizar a ação do algoritmo para remover a distorção das imagens capturadas pelo CCSI. O cone de imagem CCSI foi projetado com base nesta formulação em 75° para α , perfazendo uma varredura de 150°. Assim, a área do céu monitorada pelo CCSI foi ajustada para escanear

a imagem do céu excluindo as áreas periféricas da lente ao nível do ângulo de 75° . O corte da imagem foi estabelecido com raio r de 4 km em uma área circular de monitoramento do céu de 8 km de diâmetro.

Figura 6.6 Taxonomia de curvas de projeção retilínear, estereográfica, equidistante e ortográfica e projeção equisólida de uma das câmeras do CCSI.



Fonte: O Autor.

A base teórica do funcionamento do CCSI é que a projeção das nuvens, levando em consideração a captação de imagens sobre uma área perpendicular à projeção dos raios solares, é fundamental para a detecção precisa da nuvem e de sua “transparência radioativa resultante” para corroborar com a precisão dos algoritmos de detecção da cobertura de nuvens, objetivando estimar a irradiação disponível sobre grandes áreas de captação.

6.3 VALIDAÇÃO DA ALTURA DAS NUVENS POR ESTEREOGRAFIA

Com calibração e obtenção parâmetros intrínsecos das câmeras pelo método da seção anterior e a retirada da distorção das imagens é possível representar as distâncias e alturas em relação a pontos específicos das nuvens. O CCSI calculou a distância direta em relação à nuvem, validada pelo uso de um ceilômetro. Para verificar a relação entre as medidas obtidas pela estereografia foram realizadas várias medições em sincronia com um ceilômetro de referência.

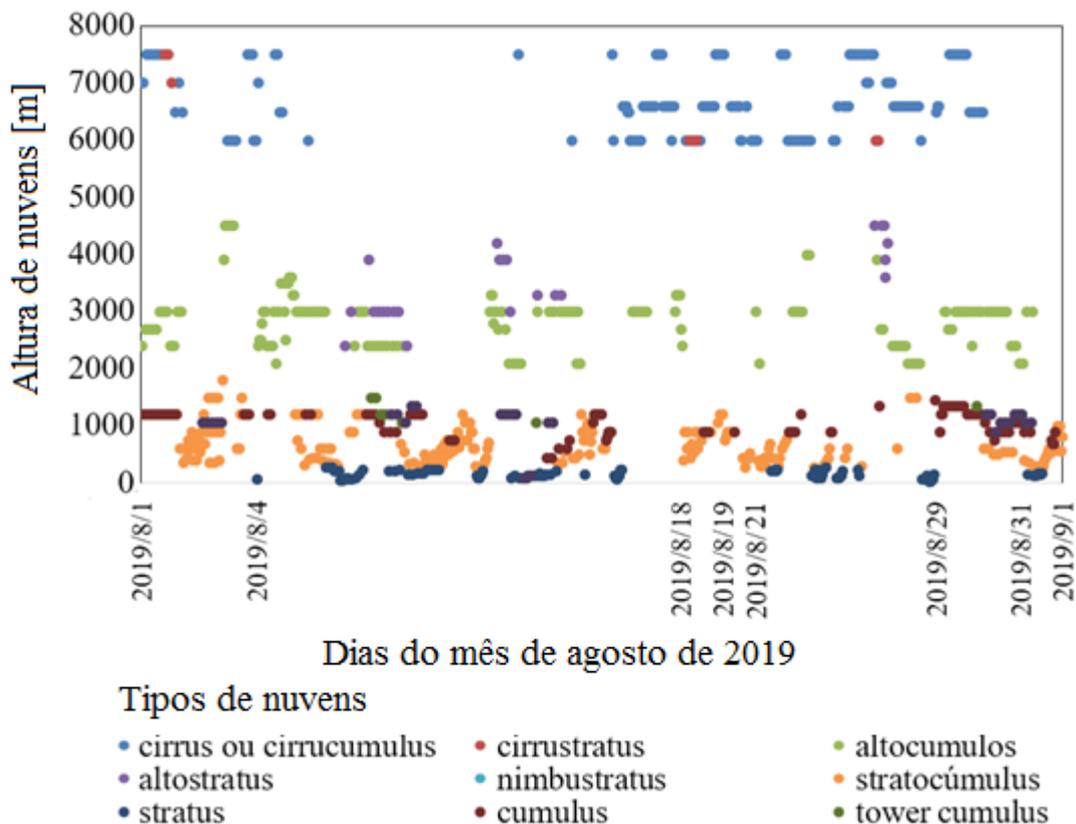
Os dados dos resultados compararam as medidas da base de nuvens obtidas pela estereografia com um ceilômetro (Vaisala CL31) instalado junto à pista de pouso e decolagem da base aérea de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. As informações de coleta de dados referem-se a trinta dias do mês de agosto de 2019. Como referido anteriormente, não possuíamos um ceilômetro capaz de se mover de acordo a varredura angular do CCSI, para isso colocamos o CCSI em sua opção de ponto fixo (eixo óptico vertical) e fizemos as medições para comparar os resultados de ambos. Para classificar as nuvens monitoradas pelos aparelhos, a Fig.6.7 mostra as informações de um observador meteorológico para cada tipo de nuvem nos dias de monitoramento foi incluída para a apresentação das medidas feitas pelo ceilômetro. Os dados de medição utilizados na comparação dos aparelhos foram realizados entre as 6h e as 19h, em dias que havia cobertura de nuvens superior a 1 octa¹⁶, inclusive.

A metodologia na obtenção dos dados de base das nuvens consistiu no levantamento das informações horárias com eventos de nuvens em oitavas de acordo com o tipo da nuvem (cor correspondente na figura) encontrado na ICA 105-7/2013, (2020), conjuntamente com a altura da nuvem em metros (m) com informações realizadas por um observador meteorologista, inseridas no Banco de Dados Climatológicos (BDC), as quais foram registradas no Sistema Automatizado de Registro e Gerenciamento das Observações Meteorológicas – WEBMET do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) e gentilmente cedidas ao projeto pela Força Aérea Brasileira (FAB) para aferição do CCSI pelo Ministério da Defesa, Comando da aeronáutica, pela solicitação do ofício nº 20/PPMA/7843 - Protocolo COMAER no 67610.008378/2019-62, com dados climatológicos da estação meteorológica de superfície de SBSM PAS 86.

¹⁶ O termo octas se refere à Nebulosidade ou fração do céu coberta pelas nuvens quando observado de uma localização em particular. Segundo as normas meteorológicas atuais, o céu é dividido em octas (ou décimas, dependendo da região). De acordo com o número de octas com cobertura total de nuvens, a nebulosidade pode ser dividida em: Céu limpo ou ensolarado, quando o céu não apresenta nenhum vestígio de nuvens (não há nenhuma octa encoberta); Céu quase limpo, quando pelo menos uma octa esta encoberta; Céu pouco nublado, quando há pelo menos duas octas encobertas; Céu parcialmente nublado, quando há pelo menos quatro octas encobertas ou aproximadamente metade do céu está encoberto pelas nuvens; Céu quase nublado, quando há no mínimo seis octas encobertas e; Céu nublado, quando as oito octas do céu estão totalmente encobertos pelas **NUVENS**.

Este trabalho foi elaborado pela Seção de Meteorologia Aeronáutica (PPMA), da Divisão de Pesquisa (DP) do ICEA, visando atender à solicitação da Universidade Federal de Santa Maria, conforme Ofício nº 002/2019/UFSM/CEESP. A metodologia adotada pelo ICEA para consistiu no levantamento das informações horárias das tabelas de nuvens e teto, no período de 1º a 31 de agosto de 2019, de acordo com a quantidade de nuvens em oitavos, o tipo da nuvem (numeral correspondente) encontrado na ICA 105-7/2013, alturas da nuvem em metros, sendo inserida uma aba contendo tabela de tipo da nuvem. Estas informações foram realizadas por um observador meteorologista.

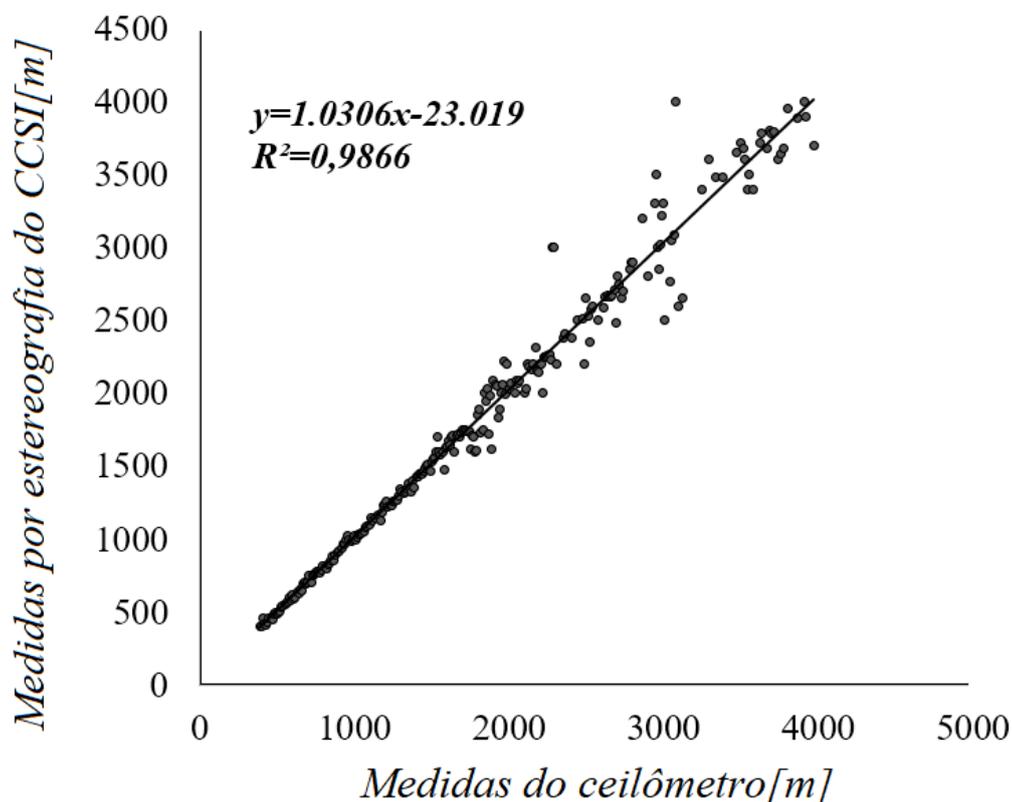
Figura 6.7 Nuvens em oitavas de acordo com o tipo da nuvem *I-Cirrus or cirruncumulus*, *II-Cirrustratus*, *III-Altostratus*, *IV-Altostratus*, *V-Stratocumulus*, *VI-Stratus*, *VII-Cumulus*, *VIII-Cumulus Tower*, *IX-Cumulonimbus*, representação dos dias de observação do mês de agosto de 2019 e alturas de nuvens no eixo y em metros.



Fonte: O Autor.

Para aferição das câmeras foram extraídas uma série de 300 medidas do levantamento da base de dados demonstrada na Figura 6.7 correspondentes à eventos de nuvens, em horários entre o nascer e o pôr-do-sol do mês de agosto de 2019 e relacionadas em ordem crescente por altura para várias condições de nuvens. A Figura 6.8 representada o diagrama de dispersão dos dados da figura 6.7 para as medidas de estereografia em comparação às medidas do ceilômetro. Na figura a linha em preto representa a mensuração do ceilômetro e os pontos as obtidas pela estereografia pela sincronia de dois CCSI.

Figura 6.8 Medidas em ordem crescente de altura para diferentes condições de altura de nuvens, com a comparação da mensuração do ceilômetro e pontos as obtidas por estereografia.



Fonte: O Autor.

O coeficiente de determinação para os dados observados atingiu uma representação de 98,66% o que indica forte correlação linear. As condições apresentadas na figura 6.8 são extremamente importantes na obtenção do conhecimento da organização espacial da cobertura de nuvens, dos mapas de velocidade e direção da nuvem, pois são responsáveis, em termos de previsão, na mensuração o tempo de chegada da frente de nuvem sobre o território de

interesse, levando em consideração a obtenção da velocidade, altura das nuvens obtida em equipamentos como o aqui apresentado.

A adoção da distância entre câmeras ou linha de base foi previamente testada por experimentos de campo, com base no trabalho de Katai-Urban et al. (2018) e Kuhn et al. (2019). A adoção de uma linha de base de 160 m possibilitou a análise da altura das nuvens com bom grau de acurácia em valores de até 2000 m. Acima desse valor, as leituras apresentam perda de acurácia, o que implica na adoção de outras distâncias de linha de base, como também na adoção de outros sensores de resolução e lentes de diferentes focos, de acordo com a necessidade da metodologia utilizada e ao fim a que se destina. Esta condição será estudada no aprimoramento do instrumento com mudanças no tipo de lente, modulação do foco, sendo esta uma questão importante para a precisão do dispositivo.

6.4 ERROS DE ANÁLISE

Os erros de análise foram aviltados usando intervalos de classe médios de 1000 m, mostrados na Tabela 6.2, por meio de:

1. *R-squared* dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_r}{SS_t}, \quad (5.2)$$

Para SS_t representando a média dos valores e a soma dos quadrados dos resíduos e SS_r a soma total dos quadrados dos valores medidos da estereografia.

2. *Root Mean Square Error (RMSE)*:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (ABN_{estereo} - ABN_{ceil})^2}, \quad (5.3)$$

Sendo $ABN_{estereo}$ e ABN_{ceil} as bases da altura das nuvens medidas por estereografia e ceilômetro, respectivamente.

3. *Standard error*,

$$\sigma_M = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (5.4)$$

Para σ temos o desvio padrão para cada intervalo de dados e N o número de medições.

4. *Normalized Residual Mean Square Difference (NRMSD)*:

$$NRMSD = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (ABN_{estereo} - ABN_{ceil})^2}}{n_r}, \quad (5.5)$$

Onde n_r é o número de dados nos intervalos. O Levantamento de erros foi verificado pela diferença de profundidade entre os dados da estereografia e do ceilômetro. As análises de erro foram calculadas com base nos 300 pontos de dados, A tabela 6.2 mostra as comparações dos erros e desvios entre os dados.

O erro padrão apresentou desvios mais pronunciados para o BN medido maior que 2.000 m, o que reforça a avaliação da distância entre aparelhos conforme o trabalho de Blanc et al. (2017) e Kuhn et al. (2019). O RMSE e NRMSD foram comparados com trabalhos da literatura que mostram concordância com o trabalho de Gohari et al. (2014), que apresentou diferenças entre as medições de 14,9% para valores de ABN com 1814 m entre o ceilômetro e a estereografia, similares aos encontrados pela comparação do CSSI com o ceilômetro.

Outra constatação, em relação a este mesmo trabalho, foi a representação de diferenças na ordem de 40 m, por exemplo, entre as medições de 1460 m (ceilômetro) e 1500 m (estereografia), também semelhantes ao CSSI.

Tabela 6.2 - Análise de erro entre as medidas de estereografia e ceilômetro.

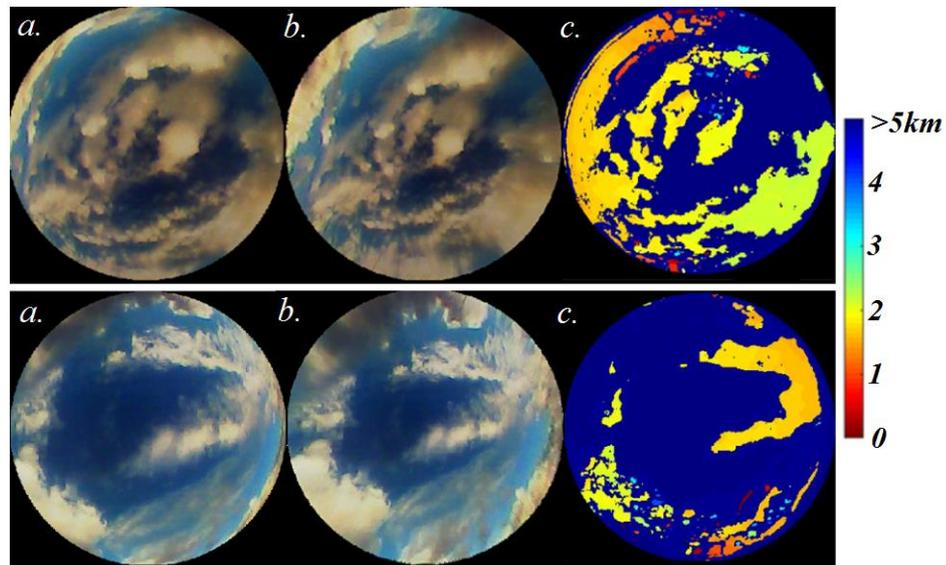
Intervalo de dados	R ²	Erro padrão	RMSE	NRMSD
100 ≤ 1000	0,998	1,75	56	15,24
1001 ≤ 2000	0,968	7,56	170	16,88
2001 ou mais	0,897	15,22	180	9,57
Médias	0,968	7,56	170	15,20

Fonte: O Autor.

As Figuras 6.9a mostram duas imagens originais de uma câmera CSSI com eixo vertical sem o dispositivo de proteção do sol; As Figuras 6.9b mostram o processo de retirada da distorção para a mesma imagem, e as Figuras 6.9c ilustram o mapa de profundidade com a altura da base da nuvem. Pode-se notar que mesmo com a utilização da linha de base de 160 metros e o Erro padrão

acima de 2000 metros calculado, que a estereografia da imagem apresentou valores concordantes em algumas regiões da figura a 3000 metros além de uma definição razoável do céu claro para as Figuras 6.9a que apresentam bastante ocorrência de nuvens esparsas.

Figura 6.9 - a. Imagens originais, b. Imagens sem distorção c. imagens do mapa de profundidade.



Fonte: O Autor.

6.5 COBERTURA DE NUVENS E ENERGIA SOLAR NO TERRITÓRIO DE INTERESSE DA PV

A cobertura de nuvens sobre o território de interesse foi definida pelo cone de imagem FOV 150° e raio de 4 km para A_{sky} , sendo assim, a sequência de obtenção das áreas de nuvem ou de céu claro sobre a área de PV é iniciada.

À medida que o CCSI posiciona suas câmeras nos ângulos solares, as imagens foram capturadas. Na sequência o algoritmo “*undistortion*” executou a retirada da distorção da imagem da lente da câmera com o ajuste de seus parâmetros, baseado na validação da curva de projeção. Então, usando a análise NRBR, ocorreu a separação dos pixels em áreas de nuvem e não nuvem. Posteriormente, a imagem classificada foi projetada na forma de pontos matriciais sobre o território georreferenciado. O estudo de caso apresenta o resultado desta projeção sobre o território de interesse.

6.6 ESTUDO DE CASO E APLICAÇÃO DO MÉTODO

Para a aplicação do método, foi utilizada uma área de referência na cidade onde foi realizado o levantamento, com o dispositivo posicionado em latitudes e longitudes reconhecidas pelo GPS do CCSI. Trata-se da área central da cidade de Santa Maria localizada Centro Geográfico do Rio Grande do Sul, no extremo sul do Brasil, com altitude média da sede de 113 m, altitude máxima de 485 m e mínima de 41 m. A temperatura média anual é de 19,2°C com clima mesotérmico e úmido, sendo bastante propenso à formação de nuvens. Os experimentos foram realizados em dois pontos distintos em uma área de 1.791,65 km² dentro das coordenadas geográficas no quadrilátero formado no extremo norte de 29°32'52" e 53°42'10" WGr¹⁷, extremo sul de 30°00'15" e 53°47'54" WGr, extremo leste de 29°43'58" e 53°30'30" WGr e extremo oeste de 29°41'33" e 54°07'39" WGr da área de cadastro do SIG, na forma de um cadastro multifinalitário das edificações inseridas na área de abrangência.

A figura 6.10 mostra a sequência de obtenção da Projeção de cobertura de nuvens ou de céu claro sobre a área de interesse da PV, pelo software de Processamento de imagens em conjunto com o Sistema de Informação Geográficas. O sistema carrega arquivos do banco de dados de Redes elétricas da região de abrangência e os dados de posição do CCSI inseridos no raio de abrangência do monitoramento. A partir disso a sequência de obtenção da imagem e de seu processamento é realizada a cada finalização do movimento do roteador solar como representado na Figura 6.10.

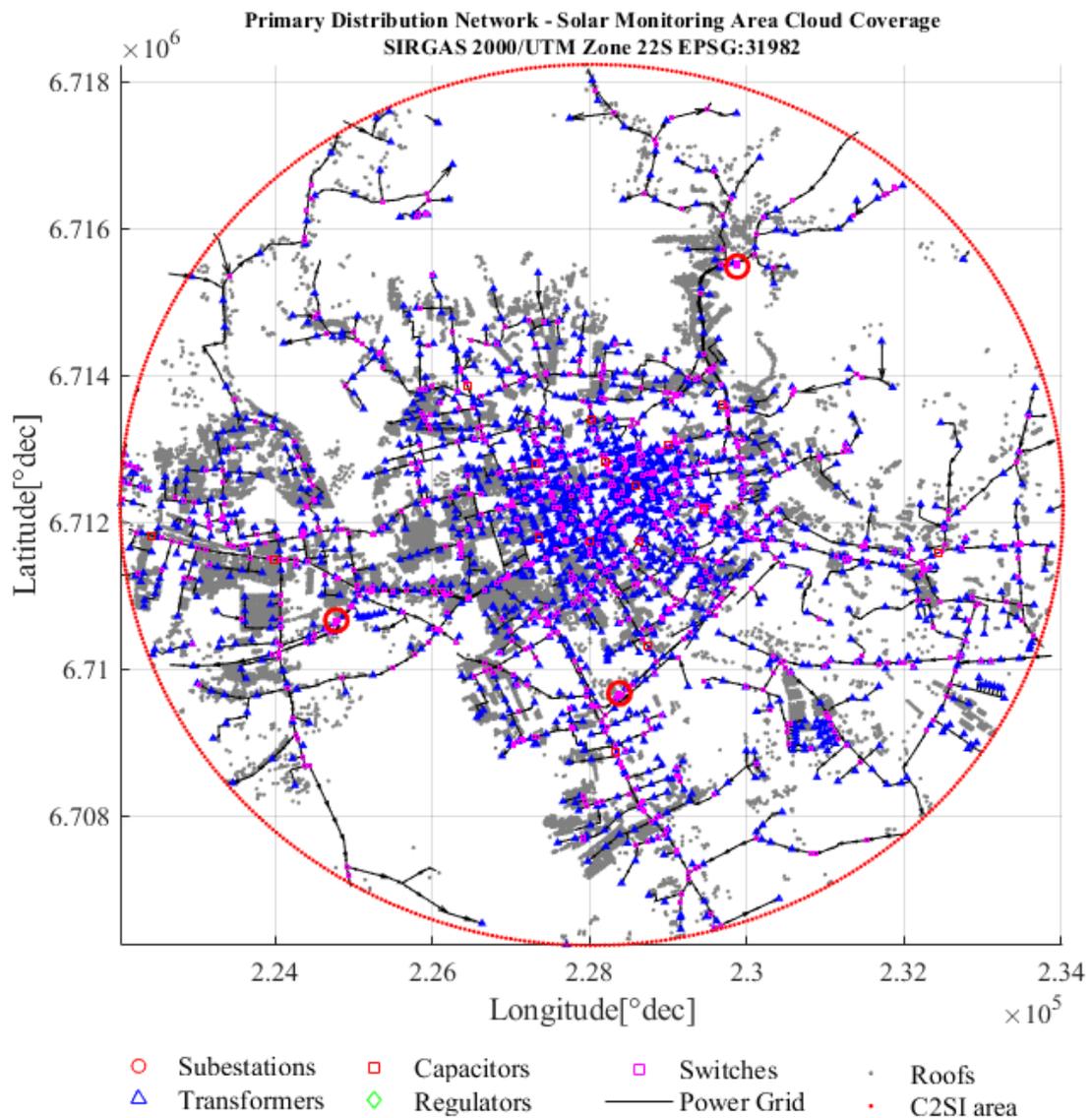
A Figura 6.11 mostra a tela de rastreamento da área central da cidade de Santa Maria com o posicionamento dos circuitos alimentadores que abastecem a área de abrangência de monitoramento. A área está georreferenciada a partir da posição da instalação ao centro da imagem de acordo com as coordenadas geodésicas representadas em Sirgas 2000 com projeção *Universal Translator Mercator* situando a zona 22S.

A figura 6.10 também mostra o primeiro ponto de rastreamento localizado no centro da cidade, e mostra a base para esta projeção de acordo com o

¹⁷ WGr representa a Longitude a partir do oeste do Meridiano de Greenwich Central, também é utilizado o termo EGr para a direção leste deste.

posicionamento do aparelho e a leitura das coordenadas do GPS do CCSI. O software demonstra o mapeamento da área de abrangência com diâmetro de 8 km, na linha pontilhada em vermelho, além de definir a posição e área dos telhados na cor cinza, as redes de distribuição (cor preta) e demais elementos da rede de distribuição tais como subestações, transformadores, capacitores, reguladores e chaves.

Figura 6.10 Tela inicial do SIG com área de abrangência do sistema no raio de varredura do CCSI.



Fonte: O Autor.

Em detalhe vermelho na Figura 6.11 os telhados com suas medidas em áreas reais e são delineados com a ortofoto ao fundo, a partir do banco de dados de origem do cadastro multifinâlitário da cidade.

Figura 6.11 - Área de telhados da cidade



Fonte: O Autor.

Estes elementos estão relacionados em um banco de dados capaz de estabelecer todas as condições de análises de fluxo de potência, por exemplo, geolocalizando as entradas da energia fotovoltaica transformada pontualmente na região de monitoramento. Também torna possível ligar a área útil de captação à rede de distribuição, de acordo com a metodologia a que for submetida. A ilustração da figura 6.13 simula esta possibilidade, relacionado o centroide da área de telhado monitorada à rede elétrica de distribuição (posteameto).

Figura 6.12 - Centroides da área de telhado monitorada relacionado à rede elétrica de distribuição



Fonte: O Autor.

O SIG é um cadastro multifinalitário da área de interesse, esta tecnologia vem aumentando sua importância na concepção de estudos de viabilidade de *Smart Cities*, haja vista ser um instrumento importante para compor a base de dados na tomada de decisão sobre cenários complexos inerentes a uma cidade.

O fluxo de energia de uma *Smart Grid* é fator providencial para este tipo de planejamento, haja vista sua importância para o planejamento controlado dos ciclos de energia e de abastecimento em paralelo ao uso inteligente dos demais fatores que compõem esta dinâmica, tais como o uso inteligente da água, logística de transportes, integração massiva da telecomunicação, adequação do lixo entre outras, que podem gerar medidas de equilíbrio às condições da qualidade de vida da população que usufrui destes serviços.

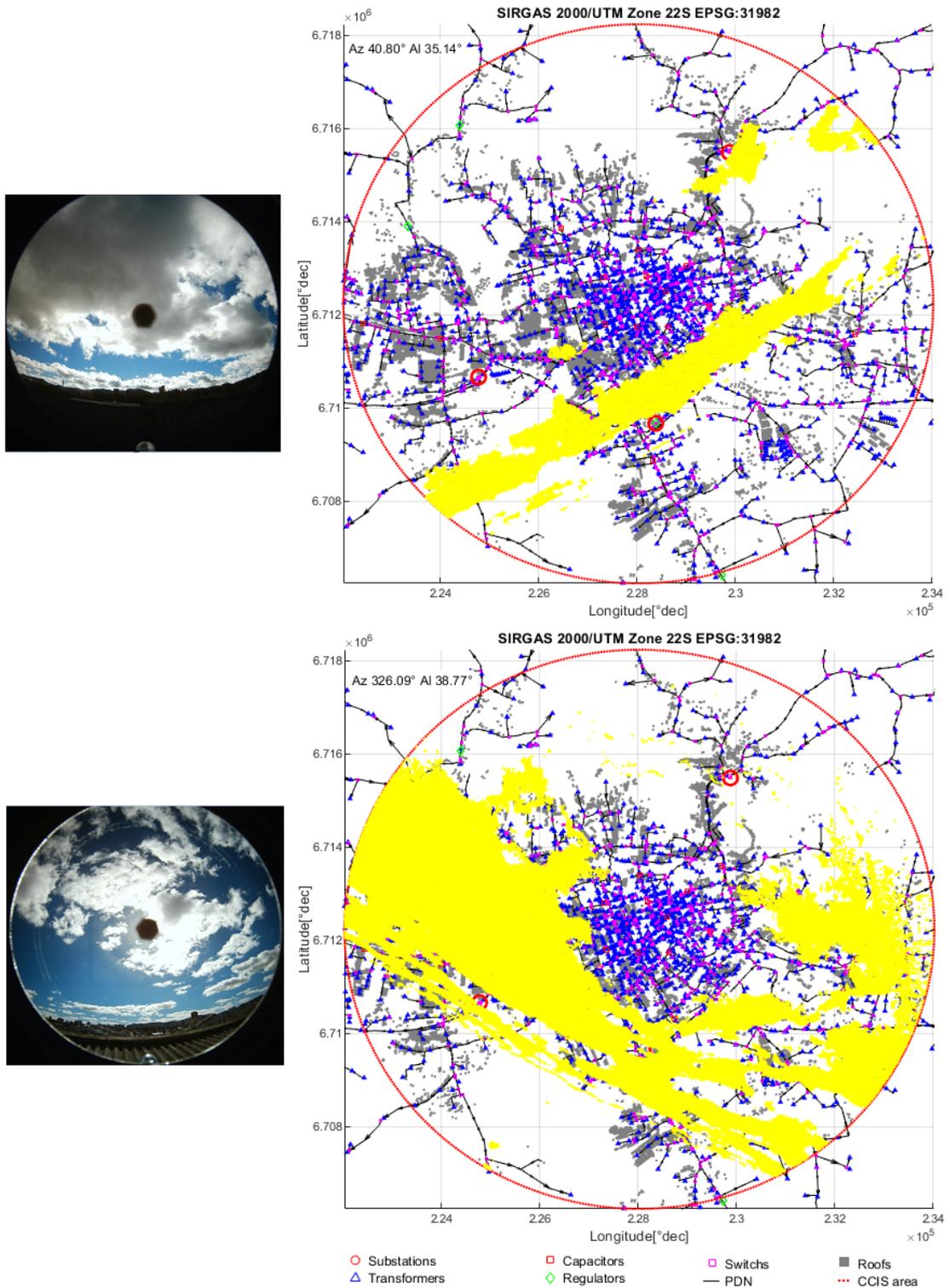
Especificamente para este trabalho o banco de dados da rede de distribuição é condicionada espacialmente aos pontos de captação nas áreas de telhado, esta condição simula, para o caso de Santa Maria, como o planejamento da inserção massiva de PV influiria sobre a rede de distribuição na forma da quantidade de energia disponível para ser associada como resposta à demanda pela própria demanda, como suscitado no capítulo de motivação do trabalho.

6.7 PROJEÇÃO DE ÁREAS DE IRRADIAÇÃO

A projeção de áreas de irradiação direta captada nas imagens do céu exclui a projeção das nuvens sobre o território geográfico. O software de SIG define uma matriz de projeção dos locais onde a energia solar não enfrentou nenhum impedimento de nuvem, conforme ilustrado na Figura 6.13. Esta figura mostra as áreas de insolação (ou seja, as áreas com irradiação solar direta) em amarelo no SIG, que são destacadas nas figuras à esquerda como céu claro. Esses números foram obtidos em 14 de agosto de 2019 às 10:26 e 14:27 horas, respectivamente. Nas figuras à direita, as áreas cinzas definem as coberturas que estão captando energia no exato momento da desobstrução de nuvens. Esta agilidade em obter a irradiação sobre os painéis pode transferir em tempo real as parcelas de energia em qualquer ponto da rede elétrica. Esta condição é possível pelo cálculo dos ângulos de azimute e elevação de acordo com o horário

estipulado pelo algoritmo de posicionamento dos servos motores e a captação coordenada das imagens.

Figura 6.13 - Imagens de céu com cobertura de nuvens à esquerda e à direita o recorte da área sobre o território de monitoramento.



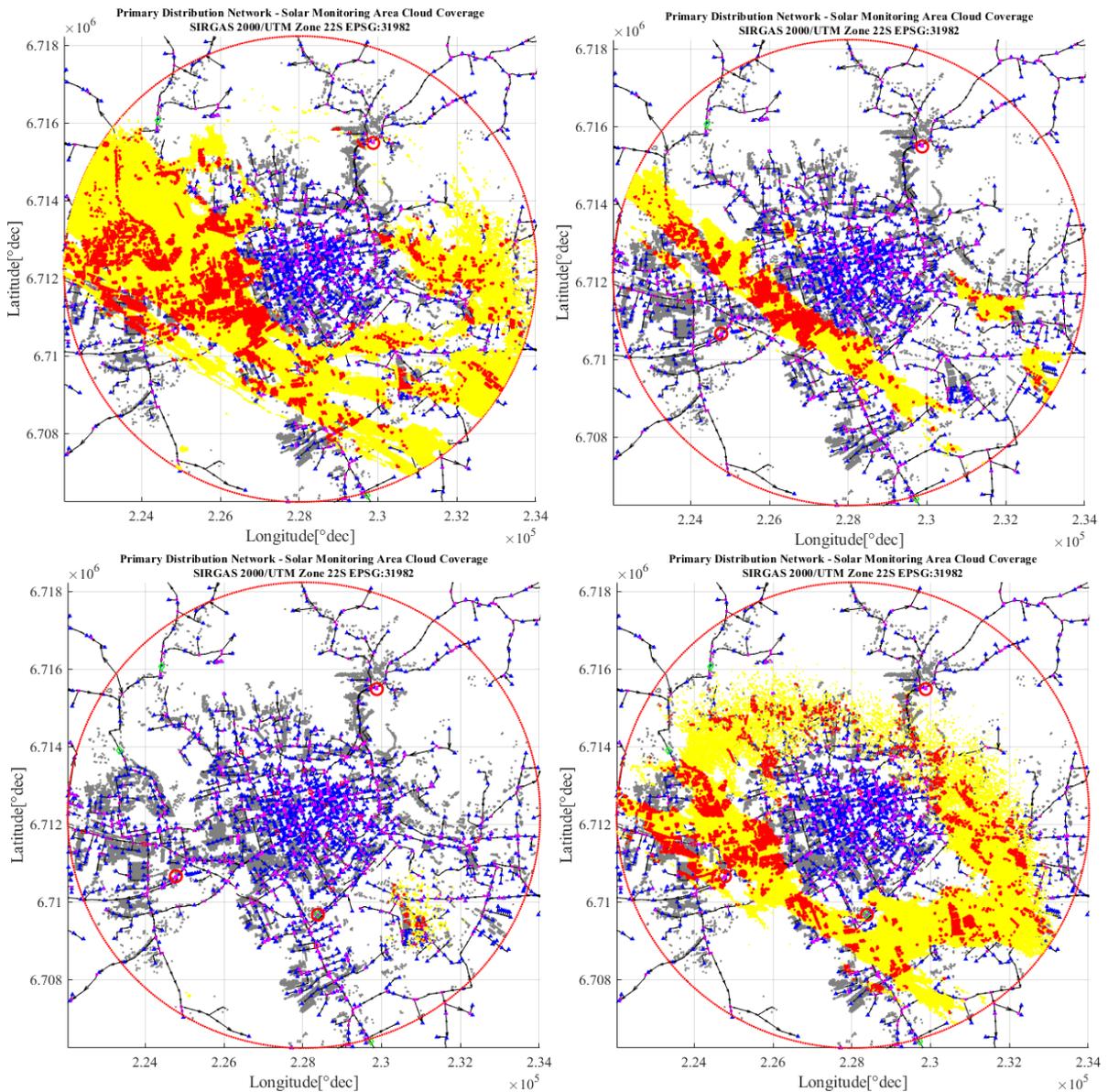
Fonte: O Autor.

Uma informação bastante específica deste tipo de tecnologia está na possibilidade em definir pela análise de imagens 3D, as áreas de sombreamento entre os prédios, isto é, dependendo da proporção e direcionamento da sombra de um prédio sobre outro a leitura da irradiação passa a ser prejudicada. Esta condição pode ser contornada incluindo no banco de dados a informação de áreas de telhado bem como sua inclinação e posição em relação ao norte diretamente na coordenada de posicionamento geográfico do pixel, associando, como foi proposto na seção de metodologia, as coordenadas geodésicas em conjunto com a própria altura de um prédio, por exemplo.

Sistemas como o LIDAR podem gerar uma maquete 3D da cidade para servir de entrada no banco de dados associado às imagens do CCSI, que pode definir com exatidão a sombra dos prédios, árvores, o modelo digital do terreno, entre outros, incluindo exatidão ao sistema de monitoramento de nuvens em sistemas que envolvam a cobertura de nuvens baseado nos ângulos solares.

A Figura 6.14 mostra exemplos de áreas que estão captando energia em seus painéis no exato momento da captura da imagem, destaque em vermelho.

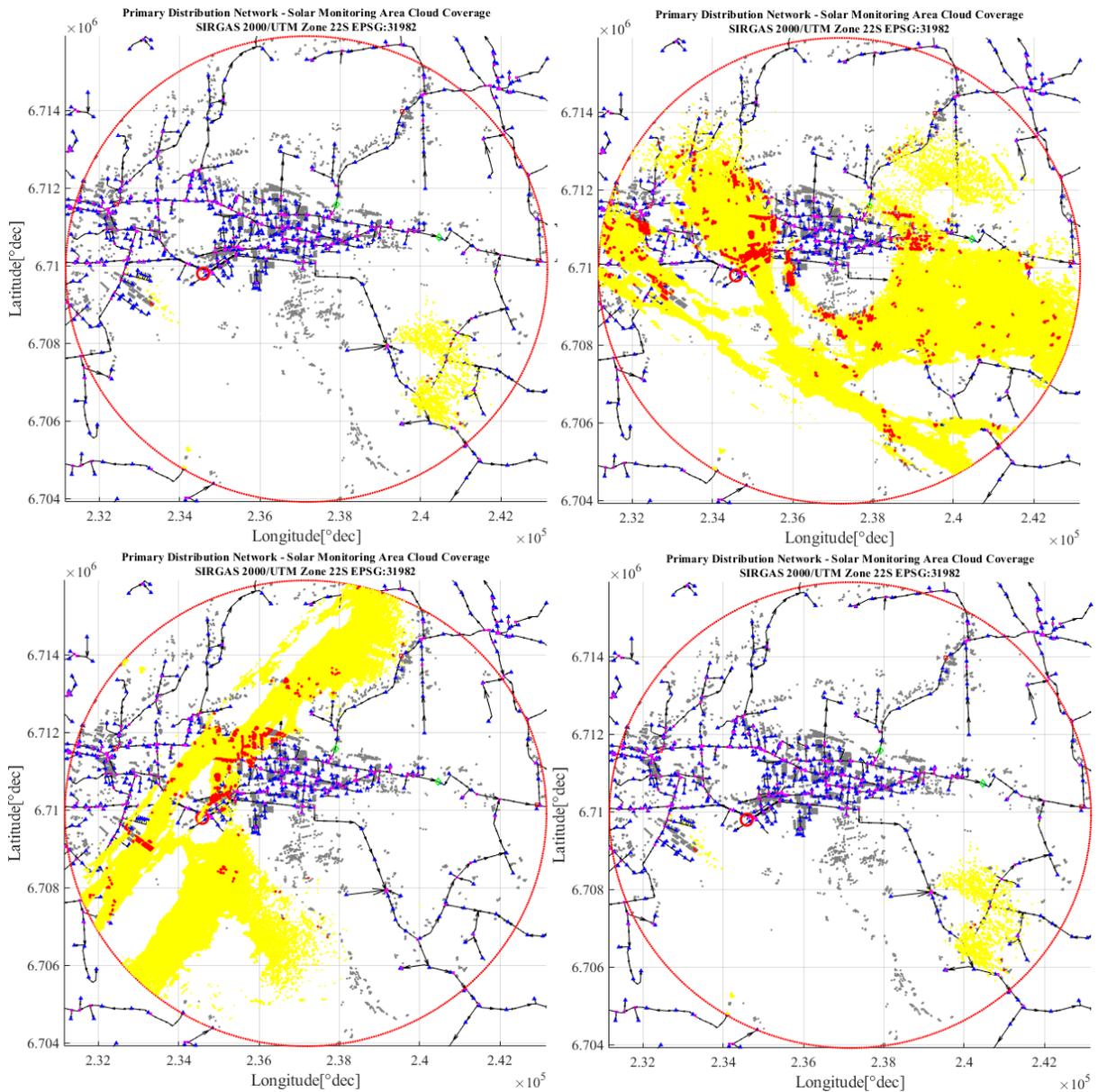
Figura 6.14 - Áreas de telhado com captura da irradiação solar incidente a partir de áreas de céu claro.



Fonte: O Autor.

Uma segunda campanha, seis dias após a execução da primeira executada na área leste da cidade é apresentada na figura 6.15. A configuração do projeto do CCSI atrelada ao banco de dados permite a utilização de uma rede de poucos aparelhos CCSI com a vantagem da cobertura de grandes áreas de interesse.

Figura 6.15 - Área de monitoramento da campanha executada na área leste da cidade.



Fonte: O Autor.

O uso de uma estação meteorológica, calibrada para atuar em conjunto com a captação da imagem do CCSI foi utilizada e seus registros foram agrupados ao conjunto de informações do SIG. Informações como Irradiação solar global pelo piranômetro da estação associaram a irradiação da área descoberta por nuvens aos painéis fotovoltaicos para a contabilização da definição das áreas insolaradas. Assim como sua conjugação à temperatura, possibilitam a obtenção da energia gerada na área de interesse.

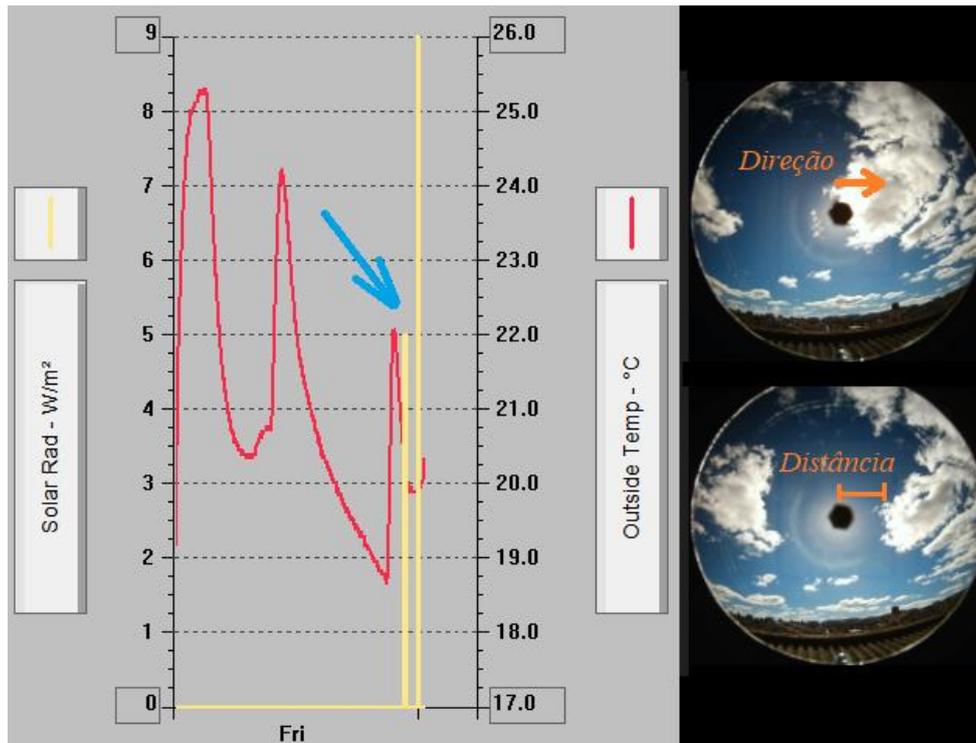
A velocidade do vento é lida pelo software atrelado ao SIG e coordena a velocidade de *frames* da câmera para dar maior sensibilidade à obtenção, por

exemplo, aos efeitos de rampa da PV sobre a rede elétrica. A Figura 6.16 mostra um gráfico, extraído do software de uma estação meteorológica utilizada em conjunto com o CCIS, nela podemos constatar as vantagens de atrelar a imagem às leituras de irradiação solar. No ponto destacado pela seta em azul vemos um aumento significativo da irradiação na região da estação meteorológica (linha em amarelo). Verifica-se nas figuras da direita o momento em que ocorre a situação de céu claro na sequência de fotos. Na mesma figura, a direção da movimentação da passagem da nuvem e a distância que pode ser extraída da sequência de imagens. Muitas informações podem ser atribuídas a esta condição. A mais visível na sequência é que por meio de análise de imagens poderá ser previsto o tempo e a distância prevista que a nuvem da esquerda da imagem levará para cobrir a área de interesse da captação, por exemplo, uma fazenda fotovoltaica. Além disso é possível obter também, pela imagem, a área de cobertura, associando-a com variáveis climáticas como temperatura lida na estação meteorológica no momento de passagem da nuvem, como destaca a linha em cor vermelha no gráfico.

Outra possibilidade que este tipo de aparelho pode agregar é a velocidade de deslocamento das nuvens, que pode ser variável ao longo das camadas de da atmosfera. A imagem neste sentido tem a vantagem de verificar o deslocamento das nuvens pelo deslocamento dos pixels na imagem. Esta condição proporciona ao CCIS, estabelecendo algoritmos de análise de imagens, definir de maneira eficaz um evento franco de rampa de energia sobre a PV.

Outra possibilidade é o monitoramento de uma nuvem específica, para antever seu efeito sobre a PV, uma análise de contorno de nuvens por imagens, considerando também o deslocamento e a velocidade pode ser implementada de maneira que o CCIS siga uma nuvem em especial por reconhecimento de padrões. Esta aplicação também é interessante também para outros fins, tais como a aproximação de nuvens em aeródromos.

Figura 6.16 Relação entre imagens e dados meteorológicos.



Fonte: O Autor.

A Figura 6.17 mostra a conjunção dos aparelhos se comunicando para obter as imagens da câmera do CCSI e uma estação meteorológica *Davis Instruments Vantage Pro 2®* que foi utilizada para a associação das imagens com dados meteorológicos.

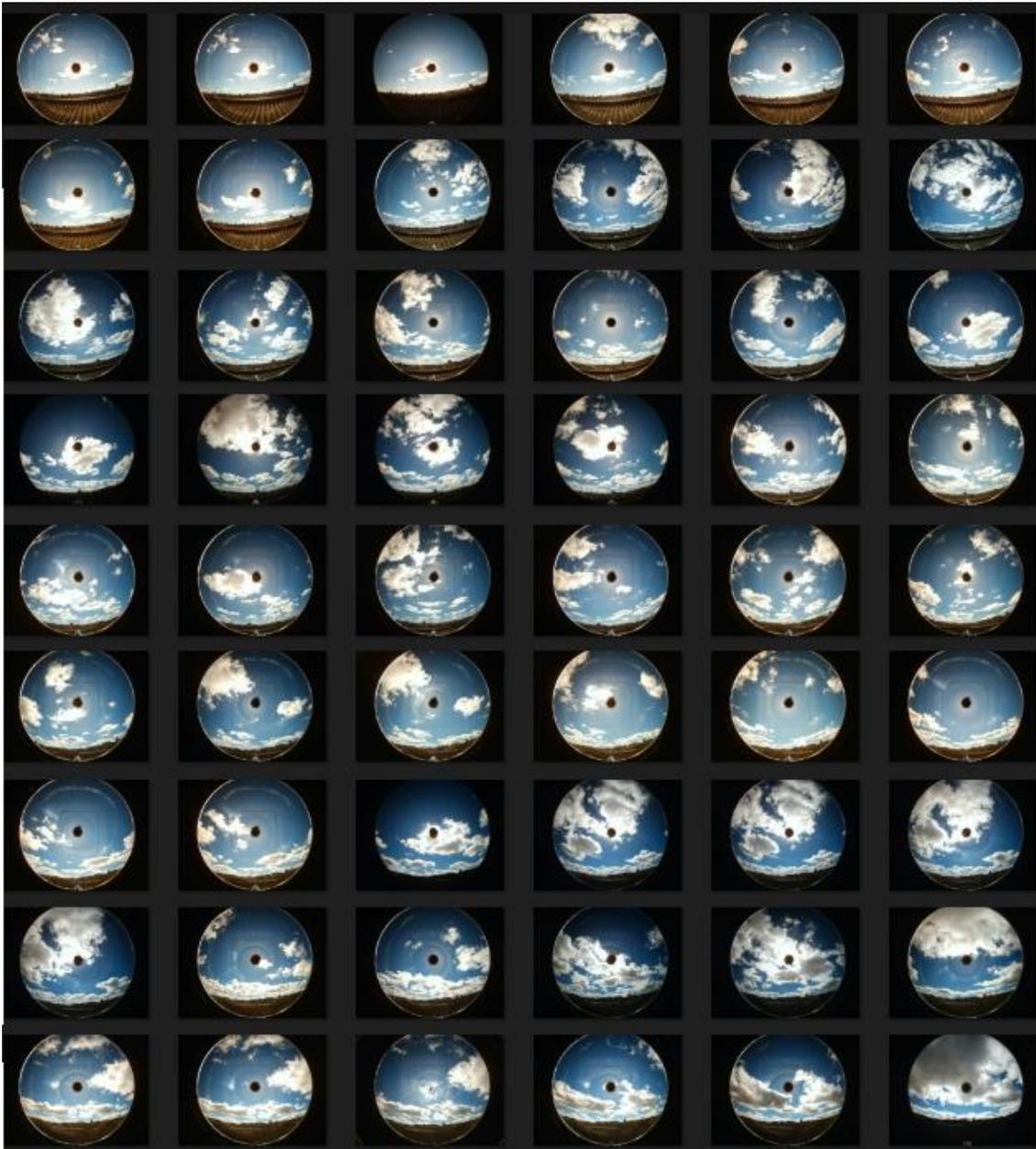
Figura 6.17 - CCSI e estação meteorológica Davis Instruments Vantage Pro 2 usadas em conjunto.



Fonte: O Autor.

A Figura 6.18 mostra uma sequência de fotos extraídas da campanha realizada no dia 14 de agosto de 2019, com a captação de imagens do CCSI. A figura mostra horários em sequência captadas do nascer ao pôr do sol.

Figura 6.18 Imagens da campanha realizada no dia 14 de agosto de 2019, com a captação de imagens do CCSI.



Fonte: O Autor.

Verifica-se pela imagem que as características projetadas para o CCSI evidenciam a cor azul do céu pela aplicação dos filtros de lentes planas nas cores azuis e cinza, apresentando uma barreira eficaz à ofuscação do sensor da câmera devido ao seu aparato, sem comprometer muito à imagem que está sendo captada.

7 CONCLUSÕES

A captura de imagens do céu para monitorar a área coberta por nuvens é imprescindível para a definição da irradiação incidente em grandes áreas territoriais onde haja o interesse na obtenção de dados da irradiação solar.

Utilizando um sensor de imagem de cobertura de nuvem baseado em terra como rastreador solar autônomo e um sistema de captação de imagens por câmeras desenvolveu-se um sistema de obtenção da cobertura de nuvens sobre a superfície.

A metodologia acrescenta uma nova maneira de obter informações importantes no estudo da compleição da intermitência gerada pelo recurso solar sobre a rede de energia, pois a delineação de postulado apresentada justifica a utilização do aparelho para cobrir eventos do céu sobre uma considerável área de território localizando a entrada de energia mesmo em pontos espalhados pela rede, com o advento de sua associação com um sistema SIG.

A validação do método, por meio de dois métodos de referência apresentou resultados bastante satisfatórios para a utilização do CCSI como instrumento apto à classificação de nuvens e de céu claro, estabelecendo um novo método de apurar as parcelas de energia que podem ser previstas para a geração distribuída, mesmo que esta rede esteja espalhada pelo território, como foi possível verificar nas projeções da área de interesse da cidade de Santa Maria.

Os resultados do teste do protótipo do CCSI proposto superam os métodos tradicionais, especialmente pelo posicionamento do eixo óptico da câmera em relação ao sol, o que facilita a obstrução dos raios diretos do sol sobre a câmera de uma maneira menos invasiva ao espaço da imagem, bem como com o uso de filtros para maior definição do céu claro e da cobertura de nuvens quando o sol é visível na imagem, corroborando com os bons resultados que foram obtidos pelo NRBR.

Foi comprovada a tese estipulada no capítulo da introdução, bem como dado um passo importante na resolução do problema proposto, haja vista que a capacidade de posicionamento da câmera em conjunto com os algoritmos de

retirada da distorção da imagem, rotação e de rebatimento da imagem sobre o território demonstraram-se ferramentas robustas para prospecção da estimativa da previsão de irradiação solar sobre o território em larga escala de PV, e adequadas à precisão da irradiação “*on time*” ou para sua utilização em sistemas de sua previsão, e serão abordadas na sequência de estudos a esta tese.

A estimativa da irradiação por esta tecnologia está alinhada com a modelagem de Smart-Grids, haja vista que pode ser utilizada em condições que não há o conhecimento das parcelas de energia transformada, devido à falta de medidores, ou ainda quando se deseja vislumbrar a resposta da demanda à medida que uma rede elétrica de distribuição de energia é projetada ou modificada, com vistas a conhecer o efeito do contra fluxo de energia gerado pela PV e seu impacto sobre o sistema.

Os protótipos do CCSI foram apresentados de maneira compacta, com a possibilidade de ser moldado por corte a laser em acrílico ou por meio de impressões 3D, utilizando módulos elétricos e servos motores encontrados no mercado nacional, além de ser possível sua montagem pelo sistema “faça você mesmo”.

Outra condição importante do uso do CCSI está relacionada à outras áreas do conhecimento tais como em agricultura estabelecer a influência da cobertura de nuvens sobre o dossel, em aeronáutica na definição da altura de nuvem utilizando um conjunto de dois CCSI, na validação de imagens de satélite das nuvens, haja vista o CCSI pode sincronizar seus ângulos de elevação e azimute com a rota dos satélites, comparando às fotos em terra com as do satélite, graças ao seu sistema seguidor.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sequência do trabalho serão estudadas metodologias de previsão da energia solar captada a partir dos dados oriundos do CCSI e C²SI para determinar as parcelas de irradiação solar direta em conjunto com os dados da rede elétrica, como a apresentada no estudo de caso, remetendo as parcelas de energia ao fluxo de potência para poder avaliar o impacto da PV sobre o fluxo de energia, a demanda e os efeitos sobre os elementos da rede elétrica.

O instrumento está apto para ser utilizado em conjunto com outros métodos, possibilitando a pré análise dos parâmetros de capacidade de energia, e a validação de metodologias que carecem deste tipo de instrumento. Os trabalhos futuros que utilizarem o CCSI como meio de resposta rápida às flutuações da PV terão também a capacidade em avaliar de antemão as necessidades de uma rede elétrica, incluindo características de resiliência e confiabilidade das redes para que seja possível seu avanço para de Smart Grids, além de aplicabilidade ao conhecimento das mudanças atmosféricas e sua influência sobre o mercado de energia.

PUBLICAÇÕES

VAZ, C. A. B.; CANHA, L. N. *Ground-based sky-imager to spatio-temporal mapping sky for photovoltaic power systems applications. Smart Grids, in Review*, 2021.

VAZ, C. A. B.; CANHA, L. N. *Metaheuristic applied to very short term dispatch microgrids based on cloud coverage. In: PROCEEDINGS OF THE 2018 IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION - LATIN AMERICA, T AND D-LA 2018 2018, Anais [...]. [s.l: s.n.] DOI: 10.1109/TDC-LA.2018.8511715.*

Um dispositivo provisório de patente BR “imageador do céu de cobertura de nuvens” resultou do trabalho relatado neste manuscrito.

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses. Os financiadores não tiveram nenhum papel no desenho do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

PATENTES REQUERIDAS

Patente requerida sob nº 00451-PI/2019 com documentos constantes de:

CN103605171 revela um método de monitoramento automatizado de nuvem, a fim de avaliar e fornecer dados a respeito desta,

WO2015160604 revela um algoritmo de previsão de posicionamento de nuvem, partindo de dados coletados da posição atual desta e do sol, fornecendo também outros dados relativos à nuvem,

US9781363 revela um sistema de captura de imagens para formação de imagem do céu, com medição de radiação e irradiação, e um método de rastreamento de nuvens, em que se faz uso de imagens captadas por um sensor em uma frequência constante e determinada para se analisar a presença ou ausência delas.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) Financiamento Código 001, CNPq PQ 1-D 917 310761/2018, INCT- GD (processo CNPq 465640/792 2014-1, processo CAPES nº 23038.000776 / 2017-54 e FAPERGS 17 / 2551-0000517-1) e Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS, Brasil. Apoio do CNPq, Conselho Nacional Brasileiro de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil e TWAS, a academia de ciências para o mundo em desenvolvimento.

8 BIBLIOGRAFIA

AEBI, Christine; GRÖBNER, Julian; KÄMPFER, Niklaus. Cloud fraction determined by thermal infrared and visible all-sky cameras. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, [S. l.], 2018. DOI: 10.5194/amt-2018-68.

AIDES, Amit; LEVIS, Aviad; HOLODOVSKY, Vadim; SCHECHNER, Yoav Y.; ALTHAUSEN, Dietrich; VAINIGER, Adi. Distributed sky imaging radiometry and tomography. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL PHOTOGRAPHY, ICCP 2020 2020, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] DOI: 10.1109/ICCP48838.2020.9105241.

AKBARI, Hoda; BROWNE, Maria C.; ORTEGA, Anita; HUANG, Ming Jun; HEWITT, Neil J.; NORTON, Brian; MCCORMACK, Sarah J. **Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems** *Solar Energy*, 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2018.03.052.

ARIYARATNA, Prabha; MUTTAQI, Kashem M.; SUTANTO, Danny. A novel control strategy to mitigate slow and fast fluctuations of the voltage profile at common coupling Point of rooftop solar PV unit with an integrated hybrid energy storage system. **Journal of Energy Storage**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1016/j.est.2018.10.016.

BASU, Anup; LICARDIE, Sergio. Alternative models for fish-eye lenses. **Pattern Recognition Letters**, [S. l.], 1995. DOI: 10.1016/0167-8655(94)00115-J.

BEEKMANS, Christoph; SCHNEIDER, Johannes; LÄBE, Thomas; LENNEFER, Martin; STACHNISS, Cyril; SIMMER, Clemens. Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye cameras. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [S. l.], 2016. DOI: 10.5194/acp-16-14231-2016.

BERNSTEIN, Andrey; REYES-CHAMORRO, Lorenzo; LE BOUDEC, Jean Yves; PAOLONE, Mario. A composable method for real-time control of active distribution networks with explicit power setpoints. Part I: Framework. **Electric Power Systems Research**, [S. l.], v. 125, p. 254–264, 2015. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.03.023.

BLANC, Philippe; MASSIP, Pierre; KAZANTZIDIS, Andreas; TZOUMANIKAS, Panagiotis; KUHN, Pascal; WILBERT, Stefan; SCHÜLER, David; PRAHL, Christoph. Short-term forecasting of high resolution local DNI maps with multiple fish-eye cameras in stereoscopic mode. *In*: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 2017, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] DOI: 10.1063/1.4984512.

BRADSKI, Gary; KAEHLER, Adrian. **Projection and 3D Vision**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1109/MRA.2009.933612.

CALBÓ, Josep; LONG, Charles N.; GONZÁLEZ, Josep Abel; AUGUSTINE, John; MCCOMISKEY, Allison. The thin border between cloud and aerosol: Sensitivity of several ground based observation techniques. **Atmospheric**

- Research**, [S. l.], 2017. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.06.010.
- CALBÓ, Josep; SABBURG, Jeff. Feature extraction from Whole-sky ground-based images for cloud-type recognition. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [S. l.], 2008. DOI: 10.1175/2007JTECHA959.1.
- CHAUDHARY, Priyanka; RIZWAN, M. **Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: A review** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.10.017.
- CHOW, Chi Wai; BELONGIE, Serge; KLEISSL, Jan. Cloud motion and stability estimation for intra-hour solar forecasting. **Solar Energy**, [S. l.], 2015. DOI: 10.1016/j.solener.2015.03.030.
- CHOW, Chi Wai; URQUHART, Bryan; LAVE, Matthew; DOMINGUEZ, Anthony; KLEISSL, Jan; SHIELDS, Janet; WASHOM, Byron. Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed. **Solar Energy**, [S. l.], 2011. DOI: 10.1016/j.solener.2011.08.025.
- CRISPEL, Pierre; ROBERTS, Gregory. All-sky photogrammetry techniques to georeference a cloud field. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, [S. l.], 2017. DOI: 10.5194/amt-2017-203.
- CRISPEL, Pierre; ROBERTS, Gregory. All-sky photogrammetry techniques to georeference a cloud field. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S. l.], 2018. DOI: 10.5194/amt-11-593-2018.
- DA SILVA, Franklin Gomes; ALVES MACIEL, Marcelo Augusto; FRANÇA, Neirivan Barros. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DE POSSIBILIDADES PARA O MUNICÍPIO DE CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA – PA. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S. l.], 2017. DOI: 10.5380/rber.v6i4.49383.
- DEV, Soumyabrata; SAVOY, Florian M.; HUI LEE, Yee; WINKLER, Stefan. Estimating solar irradiance using sky imagers. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S. l.], 2019. DOI: 10.5194/amt-12-5417-2019.
- DILEEP, G. A survey on smart grid technologies and applications. **Renewable Energy**, [S. l.], 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.092.
- DU, Juan; MIN, Qilong; ZHANG, Penglin; GUO, Jinhui; YANG, Jun; YIN, Bangsheng. Short-term solar irradiance forecasts using sky images and radiative transfer model. **Energies**, [S. l.], v. 11, n. 5, 2018. DOI: 10.3390/en11051107.
- EINSTEIN, A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. **Annalen der Physik**, [S. l.], 1905. DOI: 10.1002/andp.19053220806.
- ELSINGA, Boudewijn; VAN SARK, Wilfried G. J. H. M. Short-term peer-to-peer solar forecasting in a network of photovoltaic systems. **Applied Energy**, [S. l.], 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.115.

ELTAWIL, Mohamed A.; ZHAO, Zhengming. **Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems-A review***Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.015.

FISHER, Adrian. Cloud and cloud-shadow detection in SPOT5 HRG imagery with automated morphological feature extraction. **Remote Sensing**, [S. l.], 2013. DOI: 10.3390/rs6010776.

FORREST, Stephen R. **The limits to organic photovoltaic cell efficiency***MRS Bulletin*, 2005. DOI: 10.1557/mrs2005.5.

GAVIN, Henri P. The Levenburg-Marquardt Algorithm For Nonlinear Least Squares Curve-Fitting Problems. **Duke University**, [S. l.], 2019.

GOHARI, S. M. I.; URQUHART, B.; YANG, H.; KURTZ, B.; NGUYEN, D.; CHOW, C. W.; GHONIMA, M.; KLEISSL, J. Comparison of solar power output forecasting performance of the Total Sky Imager and the University of California, San Diego Sky Imager. *In: ENERGY PROCEDIA 2014, Anais [...].* [s.l: s.n.] DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.248.

GUEYMARD, Christian A.; BRIGHT, Jamie M.; LINGFORS, David; HABTE, Aron; SENGUPTA, Manajit. **A posteriori clear-sky identification methods in solar irradiance time series: Review and preliminary validation using sky imagers***Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.027.

HEINLE, A.; MACKE, A.; SRIVASTAV, A. Automatic cloud classification of whole sky images. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S. l.], 2010. DOI: 10.5194/amt-3-557-2010.

HOU, Qingchun; ZHANG, Ning; DU, Ershun; MIAO, Miao; PENG, Fei; KANG, Chongqing. Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: Concept, modeling, and empirical analysis in China. **Applied Energy**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.067.

HUO, Yujia; GRUOSSO, Giambattista. Hardware-in-the-Loop Framework for Validation of Ancillary Service in Microgrids: Feasibility, Problems and Improvement. **IEEE Access**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2914346.

IBRAHIM, Haider; ANANI, Nader. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature. *In: ENERGY PROCEDIA 2017, Anais [...].* [s.l: s.n.] DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.617.

ISMAEL, Sherif M.; ABDEL ALEEM, Shady H. E.; ABDELAZIZ, Almoataz Y.; ZOBAA, Ahmed F. **State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation***Renewable Energy*, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.008.

JANNUZZI, Gilberto. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação. **Relatorio da IEI PROCOPRE-UNICAMP**, [S. l.], 2009.

KANG, Lai; WEI, Yingmei; JIANG, Jie; BAI, Liang; LAO, Songyang. Rectification of curved document images based on single view three-dimensional reconstruction. **Journal of the Optical Society of America A**, [S. l.], 2016. DOI: 10.1364/josaa.33.002089.

KATAI-URBAN, Gabor; EICHHARDT, Ivan; OTTE, Vilem; MEGYESI, Zoltan; BIXEL, Paul. Reconstructing atmospheric cloud particles from multiple fisheye cameras. **Solar Energy**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1016/j.solener.2018.06.050.

KAZANTZIDIS, A.; TZOUMANIKAS, P.; BAIS, A. F.; FOTOPOULOS, S.; ECONOMOU, G. Cloud detection and classification with the use of whole-sky ground-based images. **Atmospheric Research**, [S. l.], 2012. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.05.005.

KIPTOO, Mark Kipngetich; ADEWUYI, Oludamilare Bode; LOTFY, Mohammed Elsayed; IBRAHIMI, Abdul Matin; SENJYU, Tomonobu. Harnessing demand-side management benefit towards achieving a 100% renewable energy microgrid. *In: ENERGY REPORTS 2020*, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.137.

KLAUS, Andreas; SORMANN, Mario; KARNER, Konrad. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. *In: PROCEEDINGS - INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION 2006*, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] DOI: 10.1109/ICPR.2006.1033.

KLEBE, D. I.; BLATHERWICK, R. D.; MORRIS, V. R. Ground-based all-sky mid-infrared and visible imagery for purposes of characterizing cloud properties. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S. l.], 2014. DOI: 10.5194/amt-7-637-2014.

KLEISSL, Jan. **Solar Energy Forecasting and Resource Assessment**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1016/C2011-0-07022-9.

KUHN, P. et al. Benchmarking three low-cost, low-maintenance cloud height measurement systems and ECMWF cloud heights against a ceilometer. **Solar Energy**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1016/j.solener.2018.02.050.

KUHN, P. et al. Determination of the optimal camera distance for cloud height measurements with two all-sky imagers. **Solar Energy**, [S. l.], 2019. a. DOI: 10.1016/j.solener.2018.12.038.

KUHN, Pascal et al. Shadow-camera based solar nowcasting system for shortest-term forecasts. **Meteorologische Zeitschrift**, [S. l.], 2019. b. DOI: 10.1127/metz/2019/0954.

KUJI, Makoto; MURASAKI, Atsumi; HORI, Masahiro; SHIOBARA, Masataka. Cloud fractions estimated from shipboard whole-sky camera and ceilometer observations between east Asia and Antarctica. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, [S. l.], 2018. DOI: 10.2151/jmsj.2018-025.

LAW, Edward W.; PRASAD, Abhnil A.; KAY, Merlinde; TAYLOR, Robert A. Direct normal irradiance forecasting and its application to concentrated solar thermal

output forecasting - A review. **Solar Energy**, [S. l.], 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2014.07.008.

LIU, Y.; BEBIC, J.; KROPOSKI, B.; DE BEDOUT, J.; REN, W. Distribution system voltage performance analysis for high-penetration PV. *In*: 2008 IEEE ENERGY 2030 CONFERENCE, ENERGY 2008 2008, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] DOI: 10.1109/ENERGY.2008.4781069.

LONG, Charles N.; SABBURG, J. M.; CALBÓ, J.; PAGÈS, D. Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [S. l.], 2006. DOI: 10.1175/JTECH1875.1.

LUO, Yi; TRISHCHENKO, Alexander P.; KHLOPENKOV, Konstantin V. Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], 2008. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.010.

MACIEJOWSKA, Katarzyna; NITKA, Weronika; WERON, Tomasz. Day-ahead vs. Intraday—Forecasting the price spread to maximize economic benefits. **Energies**, [S. l.], 2019. DOI: 10.3390/en12040631.

MARQUEZ, Ricardo; COIMBRA, Carlos F. M. Proposed metric for evaluation of solar forecasting models. **Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME**, [S. l.], 2013. DOI: 10.1115/1.4007496.

MASAKI, Mukalu Sandro; ZHANG, Lijun; XIA, Xiaohua. A hierarchical predictive control for supercapacitor-retrofitted grid-connected hybrid renewable systems. **Applied Energy**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.049.

MATSUKI, Hidenobu; VON STUMBERG, Lukas; USENKO, Vladyslav; STUCKLER, Jorg; CREMERS, Daniel. Omnidirectional DSO: Direct Sparse Odometry with Fisheye Cameras. **IEEE Robotics and Automation Letters**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1109/LRA.2018.2855443.

MAZHAR, Osama; JAMALUDDIN, Ahmad Zawawi; JIANG, Cansen; FOFI, David; SEULIN, Ralph; MOREL, Olivier. Design and calibration of a specialized polydioptric camera rig. **Frontiers in ICT**, [S. l.], 2017. DOI: 10.3389/fict.2017.00019.

MESSENGER, Roger A. **Photovoltaic Systems Engineering**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1201/9781315218397.

MIČUŠIK, Branislav; PAJDLA, Tomáš. Estimation of omnidirectional camera model from epipolar geometry. *In*: PROCEEDINGS OF THE IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION 2003, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] DOI: 10.1109/cvpr.2003.1211393.

MOUSAZADEH, Hossein; KEYHANI, Alireza; JAVADI, Arzhang; MOBLI, Hossein; ABRINIA, Karen; SHARIFI, Ahmad. **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output** *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2009.01.022.

NGUYEN, Andu; VELAY, Maxime; SCHOENE, Jens; ZHEGLOV, Vadim; KURTZ, Ben; MURRAY, Keenan; TORRE, Bill; KLEISSL, Jan. High PV penetration impacts on five local distribution networks using high resolution solar resource assessment with sky imager and quasi-steady state distribution system simulations. **Solar Energy**, [S. l.], 2016. DOI: 10.1016/j.solener.2016.03.019.

NGUYEN, Dung; KLEISSL, Jan. Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers. **Solar Energy**, [S. l.], 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2014.05.005.

NOAA. NOAA solar calculator. **National Oceanic & Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. Global Radiation Group.**, [S. l.], 2016.

NOAA. NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for January 2020. **Journal of Climate**, [S. l.], 2020.

NOU, Julien; CHAUVIN, Rémi; EYNARD, Julien; THIL, Stéphane; GRIEU, Stéphane. Towards the intrahour forecasting of direct normal irradiance using sky-imaging data. **Heliyon**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00598.

NOURI, B.; KUHN, P.; WILBERT, S.; HANRIEDER, N.; PRAHL, C.; ZARZALEJO, L.; KAZANTZIDIS, A.; BLANC, P.; PITZ-PAAL, R. Cloud height and tracking accuracy of three all sky imager systems for individual clouds. **Solar Energy**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2018.10.079.

NSENGIYUMVA, Walter; CHEN, Shi Guo; HU, Lihua; CHEN, Xueyong. **Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.085.

OIKONOMOU, Spiros; KAZANTZIDIS, Andreas; ECONOMOU, George; FOTOPOULOS, Spiros. A local binary pattern classification approach for cloud types derived from all-sky imagers. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1080/01431161.2018.1530807.

OMAR, Moien A.; MAHMOUD, Marwan M. Design and simulation of a PV system operating in grid-connected and stand-alone modes for areas of daily grid blackouts. **International Journal of Photoenergy**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1155/2019/5216583.

PENG, Zhenzhou; YU, Dantong; HUANG, Dong; HEISER, John; YOO, Shinjae; KALB, Paul. 3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers. **Solar Energy**, [S. l.], 2015. DOI: 10.1016/j.solener.2015.05.037.

RAN, Lingyan; ZHANG, Yanning; ZHANG, Qilin; YANG, Tao. Convolutional neural network-based robot navigation using uncalibrated spherical images. **Sensors (Switzerland)**, [S. l.], 2017. a. DOI: 10.3390/s17061341.

RAN, Lingyan; ZHANG, Yanning; ZHANG, Qilin; YANG, Tao. Convolutional neural network-based robot navigation using uncalibrated spherical images. **Sensors (Switzerland)**, [S. l.], 2017. b. DOI: 10.3390/s17061341.

RANGANATHAN, Ananth. The Levenberg-Marquardt Algorithm. **Internet httpexcelsior cs ucsb educoursescs290ipdfL MA pdf**, [S. l.], 2004.

RASMUS LUTHANDER; JOAKIM WIDÉN; DANIEL NILSSON; JENNY PALM. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. **Applied Energy**, [S. l.], v. 142, n. 142, p. 80–94, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028><http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.

ROMANO, Filomena et al. Improvement in surface solar irradiance estimation using HRV/MSG data. **Remote Sensing**, [S. l.], 2018. DOI: 10.3390/rs10081288.

SCARAMUZZA, Davide. OCamCalib: Omnidirectional Camera Calibration Toolbox for Matlab. **Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Siegwart, R., (2006). “A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras”, Proceedings to IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), Beijing China, October 7-15, 2006**, [S. l.], 2006.

SCARAMUZZA, Davide. **Omnidirectional vision: from calibration to robot motion estimation**. 2007. [S. l.], 2007. DOI: 10.3929/ethz-a-005567197.

SCARAMUZZA, Davide; MARTINELLI, Agostino; SIEGWART, Roland. A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS 2006*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] DOI: 10.1109/IROS.2006.282372.

SCHMIDT, T.; KALISCH, J.; LORENZ, E.; HEINEMANN, D. Evaluating the spatio-temporal performance of sky imager based solar irradiance analysis and forecasts. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, [S. l.], 2015. DOI: 10.5194/acpd-15-26997-2015.

SCHMIDT, Thomas; KALISCH, John; LORENZ, Elke; HEINEMANN, Detlev. Evaluating the spatiooral performance of sky-imager-based solar irradiance analysis and forecasts. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [S. l.], 2016. DOI: 10.5194/acp-16-3399-2016.

SCHWALBE, Ellen. Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera systems. *In: CAMERA 2005*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.]

SCOLARI, Enrica; SOSSAN, Fabrizio; HAURE-TOUZÉ, Mathia; PAOLONE, Mario. Local estimation of the global horizontal irradiance using an all-sky camera. **Solar Energy**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1016/j.solener.2018.08.042.

SCOLARI, Enrica; SOSSAN, Fabrizio; PAOLONE, Mario. Irradiance prediction intervals for PV stochastic generation in microgrid applications. **Solar Energy**, [S. l.], 2016. DOI: 10.1016/j.solener.2016.09.030.

SINGH, Priyanka; RAVINDRA, N. M. Temperature dependence of solar cell performance - An analysis. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], 2012. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.02.019.

SIVANEASAN, Balakrishnan; KANDASAMY, Nandha Kumar; LIM, May Lin; GOH, Kwang Ping. A new demand response algorithm for solar PV intermittency management. **Applied Energy**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.147.

SNYDER, Donald L.; WHITE, Richard L.; HAMMOUD, Abed M. Image recovery from data acquired with a charge-coupled-device camera. **Journal of the Optical Society of America A**, [S. l.], 1993. DOI: 10.1364/josaa.10.001014.

SOLARPOWER EUROPE. **Global Market Outlook For Solar Power 2018 - 2022 Global Market Outlook**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1787/key_energ_stat-2014-en.

SOSSAN, Fabrizio; KOSEK, Anna Magdalena; MARTINENAS, Sergejus; MARINELLI, Mattia; BINDNER, Henrik. Scheduling of domestic water heater power demand for maximizing PV self-consumption using model predictive control. *In: 2013 4TH IEEE/PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES EUROPE, ISGT EUROPE 2013 2013*, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] DOI: 10.1109/ISGTEurope.2013.6695317.

STANDARDS, British. **Photovoltaic devices -- Part 9: Solar simulator performance requirements**. [s.l: s.n.].

SUN, Shanhui; ERNST, Jan; SAPKOTA, Archana; RITZHAUPT-KLEISSL, Eberhard; WILES, Jeremy; BAMBERGER, Joachim; CHEN, Terrence. Short term cloud coverage prediction using ground based all sky imager. *In: 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRID COMMUNICATIONS, SMARTGRIDCOMM 2014 2015*, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] DOI: 10.1109/SmartGridComm.2014.7007633.

TAPAKIS, R.; CHARALAMBIDES, A. G. Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. **Renewable Energy**, [S. l.], 2014. DOI: 10.1016/j.renene.2013.08.001.

TARDIF, Jean Philippe; STURM, Peter; ROY, Sébastien. Plane-based self-calibration of radial distortion. *In: PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION 2007*, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] DOI: 10.1109/ICCV.2007.4409113.

TARDIF, Jean Philippe; STURM, Peter; TRUDEAU, Martin; ROY, Sebastien. Calibration of cameras with radially symmetric distortion. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, [S. l.], 2009. DOI: 10.1109/TPAMI.2008.202.

TORRES-GONZÁLEZ, Arturo; MARTÍNEZ-DE DIOS, Jose Ramiro; OLLERO, Anibal. Robot-Beacon distributed range-only SLAM for resource-constrained operation. **Sensors (Switzerland)**, [S. l.], 2017. DOI: 10.3390/s17040903.

TRAN, Viet T.; ISLAM, Md Rabiul; SUTANTO, Danny; MUTTAQI, Kashem M.

Mitigation of Solar PV Intermittency Using Ramp-Rate Control of Energy Buffer Unit. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1109/TEC.2018.2875701.

TZAFESTAS, Spyros G. **Introduction to Mobile Robot Control**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1016/C2013-0-01365-5.

URQUHART, B.; KURTZ, B.; DAHLIN, E.; GHONIMA, M.; SHIELDS, J. E.; KLEISSL, J. Development of a sky imaging system for short-term solar power forecasting. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S. l.], 2015. DOI: 10.5194/amt-8-875-2015.

URQUHART, Bryan; CHOW, Chi Wai; NGUYEN, Andu; KLEISSL, Jan; SENGUPTA, Manajit; BLATCHFORD, Jim; JEON, David. Towards intra-hour solar forecasting using two sky imagers at a large solar power plant. *In*: WORLD RENEWABLE ENERGY FORUM, WREF 2012, INCLUDING WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS XII AND COLORADO RENEWABLE ENERGY SOCIETY (CRES) ANNUAL CONFERENCE 2012, **Anais** [...]. [s.l: s.n.]

US DEPARTMENT OF COMMERCE, NOAA, Earth System Research Laboratory. **ESRL Global Monitoring Division - Global Radiation Group**. 2018.

VAZ, C. A. B.; CANHA, L. N. Metaheuristic applied to very short term dispatch microgrids based on cloud coverage. *In*: PROCEEDINGS OF THE 2018 IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION - LATIN AMERICA, T AND D-LA 2018 2018, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] DOI: 10.1109/TDC-LA.2018.8511715.

WACKER, Stefan et al. Cloud observations in Switzerland using hemispherical sky cameras. **Journal of Geophysical Research**, [S. l.], 2015. DOI: 10.1002/2014JD022643.

WEST, Samuel R.; ROWE, Daniel; SAYEEF, Saad; BERRY, Adam. Short-term irradiance forecasting using skycams: Motivation and development. **Solar Energy**, [S. l.], 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2014.08.038.

WOOD MACKENZIE; SEIA. U.S. Solar Market Insight. **Solar Energy Industries Association**, [S. l.], 2017. DOI: 10.1097/JNN.0000000000000263.

YABUKI, Masanori; SHIOBARA, Masataka; NISHINAKA, Kimiko; KUJI, Makoto. Development of a cloud detection method from whole-sky color images. **Polar Science**, [S. l.], 2014. DOI: 10.1016/j.polar.2014.07.004.

YAMASHITA, M.; YOSHIMURA, M. GROUND-BASED CLOUD OBSERVATION FOR SATELLITE-BASED CLOUD DISCRIMINATION AND ITS VALIDATION. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S. l.], 2012. DOI: 10.5194/isprsarchives-xxxix-b8-137-2012.

YANG, Dazhi; KLEISSL, Jan; GUEYMARD, Christian A.; PEDRO, Hugo T. C.; COIMBRA, Carlos F. M. History and trends in solar irradiance and PV power

forecasting: A preliminary assessment and review using text mining. **Solar Energy**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.023.

YANG, Handa; KURTZ, Ben; NGUYEN, Dung; URQUHART, Bryan; CHOW, Chi Wai; GHONIMA, Mohamed; KLEISSL, Jan. Solar irradiance forecasting using a ground-based sky imager developed at UC San Diego. **Solar Energy**, [S. l.], 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2014.02.044.

YANG, J.; MIN, Q.; LU, W.; YAO, W.; MA, Y.; DU, J.; LU, T.; LIU, G. An automated cloud detection method based on the green channel of total-sky visible images. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S. l.], 2015. DOI: 10.5194/amt-8-4671-2015.

ZELINSKY, Alex. **Learning OpenCV—Computer Vision with the OpenCV Library**IEEE Robotics and Automation Magazine, 2009. DOI: 10.1109/MRA.2009.933612.

ZHENG, Bowen; FLETCHER, John E.; LENNON, Alison; JIANG, Yu; BURR, Patrick A. Improving generation ramp rates of photovoltaic systems using module-based capacitive energy storage. **Journal of Power Sources**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.03.055.

9 ANEXO A - CÁLCULO DA POSIÇÃO SOLAR

Tabela 9.1 National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA (2016) Equações

Dados de entrada: Latitude, Longitude e TZ (Fuso horário), Tp = Hora

--

(depois da meia-noite local)

Calculismo apresentado conforme a sequência do algoritmo do CCSI:

1. **Jd (Dia Juliano)**

$$Jd = Date + 2415018.5 + Tp - TZ/24$$

2. **Jc (Século Juliano)**

$$Jc = (Jd - 2451545)/36525$$

3. **GM (Anomalia média geométrica para o sol (graus))**

$$GM = Mod(280.46646 + G2 (36000.76983 + 0.0003032 Jc), 360)(deg)$$

4. **GMA (Anomalia média geométrica do Sol)**

$$GMA = 357.52911 + Jc (35999.05029 - 0.0001537 Jc) (deg)$$

5. **EEO (Excentricidade da órbita da Terra)**

$$EEO = 0.016708634 - Jc (0.000042037 + 0.0000001267 Jc)$$

6. **SEC (Equação da excentricidade do sol)**

$$SEC = \sin(GMA)(1.914602 - Jc (0,004817 + 0,000014 Jc)) + \sin(2 GMA) \\ * (0.019993 - 0.000101 Jc) + \sin(3 GMA) * 0,000289$$

7. **STL (Longitude verdadeira do sol (graus))**

$$STL = GML + GMA$$

8. **STA (Anomalia verdadeira do sol (graus))**

$$STA = GMA + SEC$$

9. **SRV (Vetor da distância ao sol em unidades astronômicas (AUs))**

$$SRV = (1.000001018 (1 - EEO^2))/(1 + EEO \cos(STA))$$

10. **SAL (Longitude aparente do sol (graus))**

$$SAL = STL - 0.00569 - 0.00478 \sin(125.04 - 1934.136 Jc)$$

11. **MOE (Algoritmo da Obliquidade média da eclíptica (graus))**

$$MOE = 23 + (26 + ((21.448 - Jc (46.815 + Jc (0.00059 - 0,001813 Jc))))/60)/60$$

12. OC (Correção da obliquidade (graus))

$$OC = MOE + 0.00256 \cos(125.04 - 1934.136 Jc)$$

13. SRT (Ascensão correta do sol (graus))

$$SRT = \text{atan}(\cos(SLA), \cos(OC) \sin(SLA))$$

14. SD (Declinação do sol (graus))

$$SD = \text{asen}(\sin(OC) \sin(SLA))$$

15. VY (variável y)

$$VY = \tan(OC/2)^2$$

16. ET (Algoritmo do tempo em minutos)

$$ET = 4 (VY \sin(2 GML) - 2 (EEO \sin(GMA)) + 4 EEO (VY (\sin(GMA)))) \cos(2 GML) - 0,5 VY^2 \sin(4 GMA) - 1,25 EEO^2 \sin(2 GMA)$$

17. HAS (Ângulo do nascer do sol (graus))

$$HAS = (\text{acos}(\cos(90,833))/(\cos(\text{latitude}))) \cos(SD) - \tan(\text{latitude}) \tan(SD)$$

18. SNoon (Hora do do sol ao meio-dia (padrão hh:mm:ss))

$$SNoon = (720 - 4 \text{ longitude} - ET + 60 TZ)/1440$$

19. Sunrise (Hora do nascer do sol (padrão hh:mm:ss))

$$Sunrise = SNoon - 4 HAS/1440$$

20. Sunset (Hora do pôr do sol (padrão hh:mm:ss))

$$Sunset = SNoon + 4 HAS/1440$$

21. SLD (Duração da luz solar (minutos))

$$SLD = 8 * HAS$$

22. TST (True Solar Time (min))

$$TST = \text{Mod}(1440 Tp + ET + 4 \text{ longitude} - 60 TZ, 1440)$$

23. HA (Ângulo da hora)

$$HA = \begin{cases} \frac{TST}{4} < 0, \frac{TST}{4} + 180 \\ \frac{TST}{4} > 0, \frac{TST}{4} - 180 \end{cases}$$

Calculismo das informações de entrada ao sistema de automação e movimentação CCSI:**24. SZA (Ângulo Solar de Zênite (graus))**

$$SZ = (\cos(\sin(\text{latitude}) \sin(SD) + \cos(\text{latitude}) \cos(SD) \cos(HA))$$

25. SEA (Ângulo Solar de elevação (graus))

$$SEA = 90 - SZA$$

26. AAR (Algoritmo de Refração Atmosférica de Aproximação (graus))

$$\text{if}(SEA > 85); AAR = 0$$

$$\begin{aligned} \text{if}(SEA > 5); AAR \\ = 58.1/\tan(SEA) - 0,07/\tan(SEA)^3 \\ + 0,000086/\tan(SEA)^5)/3600 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{if}(SEA > -0.575); AAR \\ = 1735 \\ + SEA \left(-518.2 + SEA(103.4 + SEA(-12.79 + 0,711 SEA)) \right) \\ /3600 \end{aligned}$$

$$\text{else } AAR = -20,772/\tan(SEA)/3600$$

27. SECatm (Elevação Solar corrigida para refração atmosférica (graus))

$$SECatm = SEA + AAR$$

28. SAA (Algoritmo de cálculo do Ângulo de azimute solar (graus em relação ao norte))

$$\begin{aligned} \text{if}(AC2 > 0); SAA \\ = \text{Mod}(\cos((\sin(\text{longitude}) \cos(SZA) \\ - \sin(SD)/\cos(\text{latitude}) \sin(SZA) + 180; 360) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{else } SAA = \text{Mod}(540 - (\cos(\sin(\text{latitude}) \cos(SZA) \\ - \sin(SD)))/(\cos(\text{latitude}) \sin(SZA)); 360) \end{aligned}$$