

KAROLINE CARVALHO BÜRGER

**Desenvolvimento de ferramenta computacional e seus algoritmos para o
cálculo de catálogo embarcado de estrelas em sensores estelares
autônomos**

São Paulo

2022

KAROLINE CARVALHO BÜRGER

**Desenvolvimento de ferramenta computacional e seus algoritmos para o
cálculo de catálogo embarcado de estrelas em sensores estelares
autônomos**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Fábio de Oliveira Fialho

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 7 de novembro de 2022

Assinatura do autor: Karoline Carvalho Bürger

Assinatura do orientador: Salvio O. Filho

Catálogo-na-publicação

Bürger, Karoline Carvalho

Desenvolvimento de ferramenta computacional e seus algoritmos para o cálculo de catálogo embarcado de estrelas em sensores estelares autônomos / K. C. Bürger -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

167 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.Satélites 2.Sistema de Controle 3.Sensor 4.Instrumentação (Astronomia) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

Nome: BÜRGER, Karoline Carvalho

Título: Desenvolvimento de ferramenta computacional e seus algoritmos para o cálculo de catálogo embarcado de estrelas em sensores estelares autônomos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 14 de setembro de 2022

Banca Examinadora

Prof. Dr.	Fábio de Oliveira Fialho
Instituição	EP-USP
Julgamento	Aprovada
Prof. Dr.	Agenor de Toledo Fleury
Instituição	EP-USP
Julgamento	Aprovada
Prof. Dr.	Vanderlei Cunha Parro
Instituição	CUIMT - Externo
Julgamento	Aprovada

Dedico este trabalho a Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e pela sua divina providência em me possibilitar realizar este mestrado.

À Maria Santíssima por quem recebi tantas graças, especialmente nos momentos mais difíceis.

À minha família, ao meu marido Luckas e meu filho Augusto, por todo amor e carinho, por darem um sentido mais completo a esta caminhada. Aos meus pais, Adriana e Claudinei, pelo incentivo e amor incondicional em todos os momentos da minha caminhada, por não medirem esforços para que eu pudesse chegar até aqui, sem o suporte deles com certeza este trabalho não seria possível. Ao meu irmão Matheus, por todos os conselhos acadêmicos e pelo exemplo de estudante e profissional.

Ao meu orientador Fábio Fialho, pela orientação dedicada, pelos incontáveis ensinamentos e oportunidades desde a graduação. Por toda paciência e persistência sem os quais este trabalho não existiria.

Por todos os amigos com os quais pude compartilhar os muitos momentos desta caminhada.

Por todos os professores que passaram por minha trajetória e que contribuíram para eu chegar até aqui.

“Ocupa-te dos teus deveres profissionais por Amor; leva a cabo todas as coisas por Amor, insisto, e verificarás - precisamente porque amas, ainda que saboreies a amargura da incompreensão, da injustiça, do desagrado e até do próprio fracasso humano – as maravilhas que o teu trabalho produz. Frutos saborosos, semente de eternidade!”

São Josémaria Escrivá

RESUMO

BÜRGER, Karoline Carvalho. **Desenvolvimento de ferramenta computacional e seus algoritmos para o cálculo de catálogo embarcado de estrelas em sensores estelares autônomos**. 167 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2022.

O Sistema de Controle de Atitude e Órbita (SCAO) de um satélite é composto por três principais elementos: sensores de atitude, atuadores e algoritmos de controle. Dentre os sensores de atitude disponíveis, destaca-se o sensor estelar autônomo por possuir elevada acurácia, sendo o único capaz de cumprir os requisitos de missões com alta precisão de apontamento. Um sensor estelar autônomo é um dispositivo optoeletrônico que determina de forma autônoma a orientação de um satélite. Para isso, ele executa observações estelares e as registra em forma de imagens, comparando-as a um catálogo estelar embarcado, determinando então a posição angular do engenho em seus três eixos de rotação. Portanto, uma parte fundamental no cálculo de atitude de forma autônoma em um sensor estelar é o catálogo de estrelas nele embarcado. Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional para calcular o catálogo de estrelas embarcado a qualquer sensor estelar. Tal ferramenta é de grande importância para o projeto de um sensor estelar, pois permite a simulação de diferentes cenários e missões, com os fenômenos que são observados em uma situação real. Além disso, a ferramenta realiza a análise da precisão do sensor, representado na forma de um mapa, indicando a acurácia obtida pelo sensor em cada campo estelar observado da esfera celeste. A partir deste mapa, é possível comparar o resultado obtido pela ferramenta com o desempenho de outros sensores contido na literatura, como realizado nesta dissertação com o sensor estelar denominado S3S desenvolvido por equipe canadense (ENRIGHT et al., 2010).

Palavras-chave: Catálogo Estelar. Sensor de Estrelas. Controle de Atitude

ABSTRACT

BÜRGER, Karoline Carvalho. **Development of a computational tool and its algorithms to calculate an embedded star catalog for autonomous star tracker**. 167 p. Dissertation (Master of Science) - Polytechnic School of the University of São Paulo, 2022.

The Attitude and Orbit Control System (AOCS) is composed of three main elements: attitude sensors, actuators and control algorithms. Among the available attitude sensors the autonomous star tracker has an outstanding role. It is the only one able to meeting requirements of high precision missions. An autonomous star tracker is an optoelectronic device that autonomously determines the orientation of a satellite. For this, it performs stellar observations, records them and compares to an embedded star catalog. From this comparison, the sensor determines the device angular position in its three axes of rotation. Therefore, the embedded star catalog is key to calculate the attitude autonomously. This work presents a computational tool to calculate the embedded star catalog for any stellar sensor. This tool is very important for the star tracker design because it simulates different scenarios and missions. In addition, the tool performs the analysis of the sensor's accuracy, represented in the form of a map that indicates the accuracy obtained by the sensor regarding the observed starfield from the celestial sphere.

Keywords: Star Catalog. Star Tracker. Attitude Control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de controle de atitude de um veículo espacial	28
Figura 2 - Sensor Estelar e suas partes constituintes	34
Figura 3 - Configuração de uma matriz de um detector APS.....	35
Figura 4 – Sensor de estrelas primeira geração ASTROS JPL de 1985: eletrônica de processamento à esquerda, câmera do sensor à direita.	37
Figura 5 - Sensor de Estrelas SED16-B e SED16-A.....	38
Figura 6 - Máscara opaca com fenda em “V”	38
Figura 7 - Gimbaled Star Tracker.....	39
Figura 8 - Sensor estelar de cabeça fixa	40
Figura 9 - Desenho esquemático de um sensor estelar com seus subsistemas.....	40
Figura 10 - Ilustração do funcionamento do baffle de um sensor estelar.....	41
Figura 11 - Parte mecânica, incluindo <i>baffle</i> , do sensor SED16 desenvolvido pela EADS Sodern	42
Figura 12 - Design de uma objetiva dióptrica.....	43
Figura 13 - Difração da luz ao passar por uma fenda e a posição dos mínimos de intensidade luminosa	45
Figura 14 - Função bidimensional da PSF	46
Figura 15 - Convolução de dois objetos com a PSF do instrumento	46
Figura 16 - Imagem do bloco focal do satélite CoRoT	47
Figura 17 - Estrelas no campo de visada do sensor estelar	49
Figura 18 - Submatriz $n \times m$ para o cálculo do baricentro.....	50
Figura 19 - Distância focal entre o sistema de lentes e o plano focal	51
Figura 20 - À esquerda, captura de imagem de uma câmera de filmagem no visível em voo suborbital. À direita, a mesma cena com leve deslocamento angular poucos segundos depois, após o início da entrada do Sol no campo de visada pelo canto superior direito.....	52
Figura 21 - Imagem do movimento estelar obtida com alto tempo de exposição do detector à luz. Efeito equivalente ocorre nas imagens do sensor estelar se a velocidade angular do satélite for muito elevada.....	52

Figura 22 - Linha superior: série de imagens de voo do satélite CoRoT atingidas por partículas de alta energia (tipicamente acima de $300 \text{ p} + \text{cm}2\text{seg}$) durante passagem na AAS. Linha inferior: impactos detectados nestas imagens.....	53
Figura 23 - Esquema do sensor estelar, demonstrando os componentes da eletrônica de processamento	54
Figura 24 - Fluxograma dos diferentes sistemas e softwares que compõem o desenvolvimento do sensor estelar	55
Figura 25 - Diagrama ilustrando as diferentes relações entre o software/base de dados que compõem o sensor. Em azul os elementos que se propôs implementar nesta dissertação e em cinza claro os elementos implementados em trabalhos externos	56
Figura 26 - Diagrama contendo os algoritmos envolvidos no cálculo do catálogo embarcado. Em verde estão os blocos desenvolvidos neste trabalho e em amarelo os blocos de trabalho externo a este que foram integrados a ferramenta de cálculo do catálogo.....	57
Figura 27 - Histograma da magnitude G das estrelas do Gaia. O número total de fontes é 1.069.138.714 que estão distribuídas em intervalos de $\Delta G = 0.2$	60
Figura 28 - Plot das estrelas do catálogo Gaia em função de suas coordenadas equatoriais	61
Figura 29 - Plot das estrelas do catálogo Gaia em função de suas coordenadas eclípticas.....	62
Figura 30 - Plot das estrelas do catálogo Gaia em função de suas coordenadas galácticas.....	63
Figura 31 - Mapa estelar projetado na esfera celeste	64
Figura 32 - Plot da densidade estelar (estrelas/FoV) do catálogo Gaia	64
Figura 33 - Modelo do baffle e sistema óptico do satélite CoRoT gerado no software ASAP para análise da luz dispersa	65
Figura 34 - Padrão de Airy	66
Figura 35 - Variáveis de um sistema óptico contendo abertura circular.....	67
Figura 36 - Padrão de Airy em $krsin\theta = [-10, 10]$	67
Figura 37 - Seção radial do padrão de Airy (curva sólida) e sua aproximação gaussiana (curva tracejada).....	68
Figura 38 - PSF aproximada por uma gaussiana bidimensional normalizada gerada pela ferramenta	69
Figura 39 - PSF discretizada gerada pela ferramenta com base na resolução do detector.....	69

Figura 40 – Configuração em que detector está circunscrito ao campo de visada, especificado único FoV.....	71
Figura 41 - Configuração em que detector está inscrito no campo de visada. Assim, medidas de hFoV e vFoV são diferentes de dFoV	72
Figura 42 - Esboço do posicionamento do detector em relação ao plano focal do sensor	73
Figura 43 - Curva do coeficiente de transmissão óptica do satélite CoRoT.....	74
Figura 44 - Eficiência Quântica do CCD modelo 42-80 B1, e2v, Inglaterra	75
Figura 45 - Exemplo de cálculo da resposta da câmera a partir da eficiência quântica e transmissão óptica	75
Figura 46 - Fluxos estelares do Atlas 9 para uma faixa de temperatura de 3750 a 9000K.....	76
Figura 47 - Resultados experimentais (símbolos) e teóricos (linha) da corrente de escuro gerada em um CCD típico.....	79
Figura 48 – Mapa da luz zodiacal em todo o céu que alcança o sensor em (e-/px/frame). A região branca corresponde a valores altíssimos que saturam o detector. Os contornos vermelho e verde representam a projeção do sistema óptico e de detecção do sensor no céu a partir da simulação da linha de visada	82
Figura 49 - Mapa da luz zodiacal para todo o céu considerando valor médio. Os contornos vermelho e verde representam a projeção do sistema óptico e de detecção do sensor no céu a partir da simulação da linha de visada.....	83
Figura 50 - Delimitação e estrelas do campo de visada do sensor projetadas na esfera celeste	84
Figura 51 - Representação dos sistemas de coordenadas B , FP e D	85
Figura 52 - Representação do sistema de coordenadas equatoriais e de linha de visada	86
Figura 53 - Representação do sistema de coordenadas do plano focal e os ângulos auxiliares, semelhantes às coordenadas da linha de visada	87
Figura 54 - Representação do sistema de coordenadas do plano focal e do detector	88
Figura 55 - Campo estelar visto pelo sensor com linha de visada αLoS , δLoS representado em diferentes sistemas de coordenadas	89
Figura 56 - Imagem representativa do detector	90
Figura 57 - Imagem analógica do campo de visada do sensor à esquerda e 'zoom' de uma pequena região do detector visto em 3D à direita	90
Figura 58 - Ilustração do circuito e componentes da eletrônica de proximidade.....	91

Figura 59 - Simulação pela ferramenta do valor eficaz do ruído (<i>noiseRMS</i>) à esquerda e do offset de leitura (<i>readoutoffset</i>) à direita	91
Figura 60 - Imagem analógica sem adicionar os efeitos de leitura	92
Figura 61 - Simulação do ruído de leitura à esquerda e do processo de leitura considerando o ruído e o offset à direita	92
Figura 62 - Imagem analógica considerando os efeitos simulados do processo de leitura.....	93
Figura 63 - Ganho do detector especificado pelo modelo do detector e que varia em função da temperatura	93
Figura 64 - Ganho do pré-amplificador que varia em função da temperatura e é simulado pela ferramenta	93
Figura 65 – Opções de configuração da imagem produto do processo de simulação da eletrônica de proximidade	94
Figura 66 - Simulação da resolução e range do conversor analógico-digital e ganho calculado do processo de digitalização.....	95
Figura 67 - Imagem de um frame após leitura e digitalização.....	95
Figura 68 – Ilustração do caso em que três estrelas do campo estelar são identificadas como dois alvos distintos no sensor.....	97
Figura 69 - Ilustração do caso em que quatro estrelas do campo estelar são identificadas como um único alvo no sensor, independente dos parâmetros de identificação dos aglomerados.....	98
Figura 70 - Pixels em branco são considerados conectados	99
Figura 71 - Imagem do detector com aglomerados identificados e seus respectivos baricentros	100
Figura 72 - À esquerda janela contendo aglomerado ruidoso e à direita janela processada em que são obtidos μ e σ para o cálculo da variância.....	103
Figura 73 - Mapa estelar contendo os aglomerados em toda a esfera celeste. Os pontos vermelhos referem-se aos baricentros dos aglomerados, os pontos verdes representam as estrelas que originaram os aglomerados identificados e os círculos brancos a posição das estrelas do catálogo de referência.....	105
Figura 74 – Mapa de densidade dos aglomerados identificados	106
Figura 75 – Mapa representando as estrelas que não foram identificadas no processo de varredura do céu	106

Figura 76 - Dados selecionados do catálogo final exibidos em forma de tabela.....	108
Figura 77 - Catálogo exportado em formato HDF5 visualizado na interface HDFView.....	109
Figura 78 - Representação de sistema de coordenadas fixo ao satélite.....	110
Figura 79 - Representação dos sistemas de coordenadas N e B	111
Figura 80 - Velocidade angular do satélite expressa no sistema de coordenadas B	112
Figura 81 - Ilustração da sequência (yaw-pitch-roll) dos ângulos de Euler.....	113
Figura 82 - Rotação representada por um eixo e ângulo de Euler.....	114
Figura 83 - Ilustração do teorema de Rotação Principal de Euler.....	114
Figura 84 - Hiperesfera unitária.....	116
Figura 85 - Representação dos sistemas de coordenadas inercial N , solidário ao satélite B e a trípode computada T	119
Figura 86 - Captura da interface contendo o cálculo do erro de linha de visada com base na posição das estrelas medidas e das estrelas catalogadas.....	122
Figura 87 – Cenário IA: Curva de eficiência quântica do detector CCD Photometrics Evolver 512 carregada na ferramenta.....	125
Figura 88 - Curva de transmissão óptica carregada na ferramenta.....	126
Figura 89 – Cenário I: À esquerda: PSF óptica. À direita: PSF discretizada.....	126
Figura 90 - Cenário IA: visualização das estrelas em coordenadas equatoriais.....	127
Figura 91 - Cenário IA: visualização da densidade estelar em coordenadas equatoriais.....	127
Figura 92 - Cenário IA: Luz zodiacal calculada pelo algoritmo da seção 3.3.1.....	128
Figura 93 - Cenário IA: imagem analógica do detector para LoS = (100,0)°.....	129
Figura 94 - Cenário IA: imagem digital do detector para LoS = (100,0)° contendo os aglomerados calculados.....	129
Figura 95 - Cenário IA: luz zodiacal no campo de visada do sensor para LoS = (30,0)°.....	130
Figura 96 - Cenário IA: imagem digital do detector para LoS = (30,0)° contendo os aglomerados calculados.....	130
Figura 97 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 15 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (30,0)°.....	131

Figura 98 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado ($\bar{x}, \bar{y} = (169.3, 183.3)$ e $\sigma_x, \sigma_y = (0.03001, 0.029993)$) em LoS = (30,0)°	131
Figura 99 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 26 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (100,0)°	132
Figura 100 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado ($\bar{x}, \bar{y} = (13.01, 294.0)$ e $(\sigma_x, \sigma_y) = (0.013034, 0.013032)$) em LoS = (100,0)°	132
Figura 101 – Cenário IA: Aglomerados calculados em toda a esfera celeste. Pontos vermelhos: baricentros dos aglomerados calculados. Pontos verdes: posições originais das estrelas do catálogo de referência	133
Figura 102 – Cenário IA: Visualização das estrelas do catálogo de entrada que não geraram aglomerados detectados pelo sensor	133
Figura 103 – Cenário IA: Visualização do arquivo em HDF5 contendo os dados catálogo embarcado	134
Figura 104 - Cenário IB: visualização das estrelas em coordenadas equatoriais	135
Figura 105 - Cenário IB: visualização da densidade estelar em coordenadas equatoriais	135
Figura 106 - Cenário IB: imagem digital do detector para LoS = (100,0)° contendo os aglomerados calculados	136
Figura 107 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 100 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (100,0)°	136
Figura 108 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado gerado por estrela de magnitude visual 5.9 e $(\sigma_x, \sigma_y) = (0.036948, 0.036957)$ em LoS = (100,0)°	137
Figura 109 - Cenário IB: Aglomerados em toda a esfera celeste. Pontos vermelhos: baricentros dos aglomerados calculados. Pontos verdes: posições originais das estrelas do catálogo de referência	138
Figura 110 - Cenário IB: Visualização das estrelas do catálogo de entrada que não geraram aglomerados detectados pelo sensor	138
Figura 111 - Cenário IC - Luz zodiacal aproximada por valor constante em todo céu	140
Figura 112 - Cenário IC - Ruído de leitura de 100 e-RMS/px/frame	140

Figura 113 - Cenário IC: imagem analógica do detector para LoS = (100,0)° contendo ruído da luz zodiacal.....	141
Figura 114 - Cenário IC: imagem digital do detector, considerando ruído de leitura, para LoS = (100,0)°, ilustrando o baricentro dos aglomerados calculados	141
Figura 115 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 26 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (100,0)°	142
Figura 116 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado (σ_x, σ_y) = (0.14911, 0.13361) em LoS = (100,0)°	142
Figura 117 - Cenário IC: Aglomerados em toda a esfera celeste. Pontos vermelhos: baricentros dos aglomerados calculados. Pontos verdes: posições originais das estrelas do catálogo de referência.....	143
Figura 118 - Cenário IC: Visualização das estrelas do catálogo de entrada que não geraram aglomerados detectados pelo sensor	143
Figura 119 - Cenário IA: Curva de eficiência quântica do detector Teledyne E2V APS 2000 carregada na ferramenta	144
Figura 120 - Cenário II. À esquerda: PSF óptica. À direita: PSF discretizada com $\sigma_x = \sigma_y = 3px$	145
Figura 121 - Cenário IIA: imagem analógica do detector para LoS = (100,0)°	146
Figura 122 - Cenário IIA: imagem digital do detector para LoS = (100,0)°, ilustrando o baricentro dos aglomerados calculados.....	147
Figura 123 - Cenário IIA: 'zoom in' em região de identificação de na imagem digital do detector	147
Figura 124 – Cenário IIA: Desvio padrão em x e y do baricentro dos 26 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (100,0)°	148
Figura 125 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado (σ_x, σ_y) = (0.17464, 0.15465) em LoS = (100,0)°	148
Figura 126 - Simulação da atitude do satélite em uma observação de apontamento ao zênite. Sem erro adicional no catálogo embarcado	149
Figura 127 - Simulação mostrando como os erros no catálogo gerado afetam a atitude estimada	150

Figura 128 - Simulação do sensor S3S: curva de eficiência quântica do detector MT9P031 CMOS	152
Figura 129 - Simulação do sensor S3S: curva de transmissão óptica	153
Figura 130 – Simulação do sensor S3S: À esquerda: PSF óptica. À direita: PSF discretizada com $\sigma_x = \sigma_y = 3px$	153
Figura 131 - Simulação do sensor S3S: visualização das estrelas em coordenadas equatoriais	154
Figura 132 - Simulação do sensor S3S: visualização do mapa de densidade estelar	154
Figura 133 - Simulação do sensor S3S: imagem analógica do campo de visada do sensor para LoS = (100,0)°	155
Figura 134 - Simulação do sensor S3S: 'zoom in' na imagem analógica do campo de visada do sensor, sendo possível observar a forma de dois aglomerados	156
Figura 135 - Simulação do Sensor S3S: imagem digital do detector contendo os aglomerados calculados	156
Figura 136 - Simulação do Sensor S3S: 'Zoom in' em região de aglomerado na imagem digital do detector	157
Figura 137 - Simulação do sensor S3S: desvio padrão em x e y do baricentro dos 29 aglomerados identificados no campo de visada do sensor para LoS = (100,0)	157
Figura 138 - Simulação do sensor S3S: aglomerados calculados em toda a esfera celeste	158
Figura 139 - Simulação do sensor S3S: geração do arquivo HDF5 do catálogo embarcado	158
Figura 140 - Simulação do sensor S3S: mapa de precisão da atitude calculado nos três ângulos de Euler	159
Figura 141 - Medidas de apontamento do zênite em observação noturna com o sensor S3S ..	160

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

APS	Active Pixel Sensor
AST	Autonomous Star Tracker
A/D	Conversor Analógico/Digital
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CoRoT	Convection, Rotation and planetary Transits
CTO	Coefficiente de Transmissão Ótica
EC	Esfera Celeste
ECI	Earth Centered Inertial
FoV	Field of View
GPS	Global Positioning System
GSE	Ground Support Equipment
LoS	Line of Sight
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
PLATO	PLAnetary Transits and Oscillations of stars
PRV	Principal Rotation Vector
PSF	Point Spread Function
QE	Quantum Efficiency
SCAO	Sistema de Controle de Atitude e Órbita
SCA	Sistema de Controle de Atitude

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área de abertura da pupila
c	Velocidade da luz
CB	Correção bolométrica
E	Energia
$f(\lambda)$	Fluxo
h	Constante de Planck
L	Luminosidade da estrela
L_{\odot}	Luminosidade do Sol
M_{\odot}	Magnitude Absoluta do Sol
M_{bol}	Magnitude Bolométrica
M	Magnitude Absoluta
m_v	Magnitude visual da estrela
P_s	Potência no detector
$QE(\lambda)$	Eficiência Quântica
R	Raio da estrela
τ_a	Coefficiente de transmissão ótica
t_i	Tempo de integração
T_{ef}	Temperatura Efetiva de uma Estrela
λ	Comprimento de onda
λ_{min}	Comprimento de onda mínimo de resposta do detector
λ_{max}	Comprimento de onda máximo de resposta do detector

SUMÁRIO

SUMÁRIO	25
1 INTRODUÇÃO	28
1.1 MOTIVAÇÕES	29
1.2 OBJETIVOS.....	30
1.3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	31
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	31
2 SENSOR DE ESTRELAS AUTÔNOMO	33
2.1 GERAÇÕES DE SENSORES ESTELARES	36
2.1.1 <i>Primeira geração: sensores não autônomos</i>	36
2.1.2 <i>Segunda geração: sensores autônomos</i>	37
2.2 TIPOS DE SENSORES ESTELARES	38
2.3 PARTES CONSTITUINTES DO SENSOR ESTELAR DE CABEÇA FIXA	40
2.3.1 <i>O baffle</i>	41
2.3.2 <i>O telescópio e sua objetiva dióptrica</i>	43
2.3.3 <i>O bloco focal</i>	47
2.3.4 <i>A eletrônica de proximidade</i>	48
2.3.5 <i>A eletrônica de processamento</i>	48
2.4 MODOS DE OPERAÇÃO	49
2.5 INTERRUPÇÃO DE OBTENÇÃO DA LINHA DE VISADA	51
2.5.1 <i>Presença do Sol</i>	51
2.5.2 <i>Rotação em alta velocidade</i>	52
2.5.3 <i>Ambiente radiativo</i>	53
2.6 A FERRAMENTA DE CÁLCULO DE CATÁLOGO EMBARCADO	54
3 ALGORITMOS DA FERRAMENTA DE CÁLCULO DE CATÁLOGO DE ESTRELAS EMBARCADO 57	
3.1 CATÁLOGO DE REFERÊNCIA	57
3.1.1 <i>A missão astrométrica Hipparcos</i>	58
3.1.2 <i>A missão astrométrica Gaia</i>	59
3.1.3 <i>Seleção de dados para o sensor</i>	59
3.1.4 <i>Estrelas plotadas em função das coordenadas equatoriais</i>	60

3.1.5	<i>Visualização em coordenadas eclípticas e galácticas</i>	61
3.1.6	<i>Mapa de densidade estelar</i>	64
3.2	SISTEMA ÓPTICO E DETECTOR	65
3.2.1	<i>Baffle</i>	65
3.2.2	<i>Modelagem da PSF</i>	65
3.2.3	<i>Design óptico</i>	70
3.2.4	<i>Transmissão óptica</i>	73
3.2.5	<i>Eficiência quântica do detector</i>	74
3.2.6	<i>Número de fótons</i>	76
3.2.7	<i>Ruído de fóton (photon/shot noise)</i>	78
3.2.8	<i>Corrente de Escuro</i>	79
3.3	FUNDO DE CÉU	80
3.3.1	<i>Luz Zodiacal</i>	80
3.4	CAMPO ESTELAR SOBRE O DETECTOR	83
3.4.1	<i>Identificação das estrelas do campo de visada do sensor</i>	83
3.4.2	<i>Transformação no sistema de coordenadas</i>	85
3.4.3	<i>Projeção dos alvos sobre o detector</i>	89
3.5	ELETRÔNICA DE PROXIMIDADE	90
3.6	AGLOMERADOS ESTELARES	96
3.6.1	<i>Identificação de Aglomerados</i>	99
3.6.2	<i>Cálculo de baricentro e demais informações dos aglomerados</i>	100
3.6.3	<i>Cálculo da variância do baricentro</i>	100
3.6.4	<i>Extensão do cálculo de aglomerados para toda a esfera celeste</i>	103
3.7	ARMAZENAMENTOS DOS DADOS	107
3.7.1	<i>Dados do arquivo final do catálogo</i>	107
3.7.2	<i>Formato HDF5</i>	108
3.8	LINHA DE VISADA	109
3.8.1	<i>Modelagem de atitude</i>	110
3.8.2	<i>Determinação de Atitude</i>	117
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	124
4.1	PRIMEIRO CENÁRIO	124
4.1.1	<i>Cenário IA</i>	124

4.1.2	Cenário IB.....	134
4.1.3	Cenário IC.....	139
4.2	SEGUNDO CENÁRIO.....	144
4.2.1	Cenária IIA.....	144
5	ANÁLISE DE PRECISÃO.....	149
5.1	MAPA DE PRECISÃO.....	150
5.2	VALIDAÇÃO COM SENSOR CANADENSE S3S.....	151
5.2.1	<i>Simulação do sensor S3S pela ferramenta.....</i>	<i>151</i>
5.2.2	<i>Mapa de precisão do sensor S3S obtido pela ferramenta.....</i>	<i>159</i>
5.2.3	<i>Análise comparativa de desempenho.....</i>	<i>160</i>
6	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	162
	REFERÊNCIAS.....	164

1 INTRODUÇÃO

A orientação e posição de um satélite são cruciais para a realização de qualquer que seja sua missão. Assim, é necessário que ele possua um sistema para manter sua posição e orientação controladas em relação a um referencial inercial. A posição do satélite refere-se à sua órbita, isto é, ao movimento realizado ao redor da Terra e sua orientação é chamada de atitude, sendo o sistema responsável por mantê-las estáveis denominado Sistema de Controle de Atitude e Órbita (SCAO).

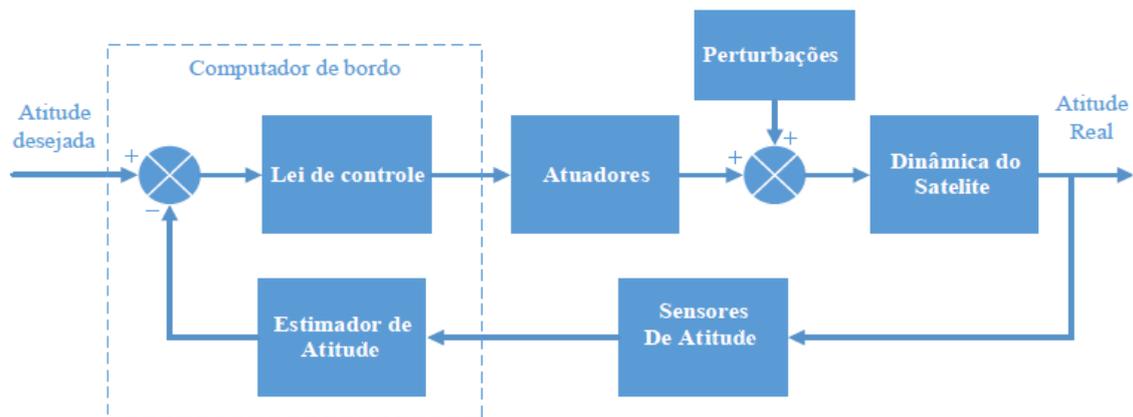


Figura 1 - Diagrama de controle de atitude de um veículo espacial

Fonte: adaptado de (SILVA, 2020)

No diagrama acima é representada uma malha de controle de atitude realizado a bordo do satélite. As informações provenientes dos sensores são processadas e utilizadas para estimação da atitude atual do veículo, que a compara, a seguir, a um valor de referência. O erro entre a atitude estimada e de referência é usado pela lei de controle para acionar o atuador de forma a eliminar ou reduzir estes erros.

De acordo com as diferentes necessidades de uma missão espacial, diferentes sistemas de controle de atitude são implementados usando sensores e atuadores especificamente escolhidos dentre as diversas opções existentes, de forma a obter um melhor compromisso entre desempenho desejado e custo do sistema. Em geral, os diferentes tipos de sensores que são empregados no Sistema de Controle de Atitude de um satélite são classificados em dois grupos:

➤ Sensores de atitude relativa: medem a mudança na atitude do veículo, isto é, a velocidade ou aceleração angular. Então, a partir do valor inicial de atitude, pode-se obter a atual atitude do satélite. Exemplos desse tipo de sensores são giroscópios e acelerômetros;

➤ Sensores de atitude absoluta: medem a posição e a orientação a partir de referenciais externos ao satélite como estrelas, campo magnético, satélites da constelação GPS.

Na tabela abaixo são descritos alguns dos principais sensores de atitude disponíveis no mercado e suas características.

Tabela 1 - Principais sensores de atitude e suas características

	Acurácia	Funcionamento	Característica
Giroscópio	0.01°/h	Conjunto de três giroscópios ortogonais mede as três componentes da velocidade angular do satélite	Seu uso contínuo requer resetar periodicamente o cálculo da atitude
Magnetômetro	1.0°(5000km alt.) ~ 5.0°(200 km alt.)	Mede a direção do campo magnético relativo ao satélite	Incertezas e variabilidade do campo magnético prejudicam a acurácia. Apresenta melhor desempenho para órbitas mais altas
Sensor Terrestre	0.05°(GEO) 0.1°(LEO)	Monitora em que direção a Terra está	Normalmente é uma câmera infravermelha executando "scanner". Incertezas no horizonte prejudicam a acurácia
Sensor Solar	0.01°-0.1°	Mede a direção do sol	Fica indisponível quando ocorre o eclipse solar
Sensor Estelar	0.001°	Mede a posição das estrelas	Fica indisponível quando seu campo de visada é bloqueado pelo Sol ou pela Terra

Em missões com requisição de alta precisão no apontamento, o sensor de estrelas é escolhido devido à sua elevada acurácia, conforme observa-se na tabela acima. Basicamente ele é composto por um telescópio, um detector e uma eletrônica de proximidade e uma de processamento. A câmera coleta a luz proveniente das estrelas observadas e a transforma em sinal elétrico, que é lido pela eletrônica de proximidade e transformado em sinal digital, isto é, uma imagem. A unidade de processamento realiza a identificação das estrelas utilizando um catálogo estelar embarcado e a partir disso calcula a atitude autonomamente. O funcionamento de um sensor estelar será apresentado com maiores detalhes na seção 2 desta dissertação.

1.1 MOTIVAÇÕES

No cenário aeroespacial nacional, o governo federal aprovou pela portaria N°224/GC3 (BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA, 2012) em maio de 2012, a implantação do Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), elaborado pelo Ministério da Defesa, através do Comando da Aeronáutica. Seu conteúdo versa sobre os anseios para as próximas décadas das

três forças militares em termos de satélites e suas funcionalidades aplicados à defesa do território nacional.

Um dos resultados esperados é que até 2025 o Brasil obtenha um índice de nacionalização de pelo menos 70% na fabricação de satélites em órbita baixa (BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA, 2018). De modo a cobrir as diferentes demandas, o País precisará desenvolver diferentes tecnologias críticas. Uma das tecnologias ainda não dominadas pelo Brasil é o SCAO.

Como dito inicialmente, dentre os componentes de um SCAO, desempenham importante papel os sensores de orientação e entre estes, por possuir elevada precisão, destaca-se o Sensor Estelar Autônomo (*“Autonomous Star Tracker”*), único sensor que possibilita alcançar os requisitos estabelecidos pelo PESE, para diversos tipos de satélites. Por exemplo, em satélites de sensoriamento remoto para a obtenção de imagens terrestres de alta resolução são necessários rigorosos requisitos de apontamento das câmeras, da ordem do segundo de arco.

Também no cenário aeroespacial internacional, dentre os sensores de atitude, os sensores estelares têm sido cada vez mais empregados, como por exemplo nos telescópios espaciais que requerem altíssima precisão de apontamento (da ordem de 0,1 segundos de arco¹). Ou ainda no contexto dos nanosatélites, considerando seu crescente emprego para cumprir os mais diferentes objetivos, os sensores estelares são os mais vantajosos, apesar da dimensão de um sensor estelar constituir um desafio face aos pequenos satélites.

Assim, todas as etapas inerentes ao desenvolvimento de um sensor estelar são cruciais para o avanço do setor aeroespacial.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho trata do desenvolvimento e algoritmos associados de uma ferramenta de cálculo do catálogo embarcado em sensores estelares. Tal ferramenta é de grande importância para o projeto de um sensor estelar, pois além do catálogo ser parte essencial para a determinação de atitude de forma autônoma, a ferramenta permite a simulação de diferentes cenários e missões, com os fenômenos que são observados em uma situação real. Assim, ela oferece robustez ao projeto de um sensor estelar, e em última instância, do controle de atitude do satélite, além de avaliar se o desempenho obtido com o projeto do sensor cumprirá com os requisitos de uma dada missão.

¹ 1 segundo de arco equivale a 1/3600 graus e 1 minuto de arco a 1/60 graus.

Tendo em vista tal necessidade, iniciou-se em março de 2014 o desenvolvimento desta ferramenta como trabalho de iniciação científica pela própria autora do presente manuscrito e posterior trabalho de conclusão de curso de graduação realizado com outros integrantes da equipe (BÜRGER; CAMELO; GOUVEIA). Desta forma, este trabalho de mestrado pretendeu concluir o desenvolvimento da ferramenta de cálculo de catálogo estelar embarcado e avaliar seu desempenho.

Com base no que foi exposto até aqui, o objetivo deste trabalho pode ser desmembrado nos seguintes objetivos:

- Estudar as características e partes constituintes de um sensor estelar e seu uso;
- Estudar os princípios de operação do sensor estelar;
- Desenvolver uma interface humano-máquina para o cálculo do catálogo estelar, integrado com os algoritmos do simulador do sensor de estrelas já desenvolvidos pela equipe do projeto;
- Analisar o desempenho do sensor estelar utilizando o catálogo, a partir do algoritmo de cálculo da linha de visada e da construção de mapa de precisão do sensor;
- Comparar o resultado obtido com o desempenho do sensor estelar denominado S3S desenvolvido por equipe canadense (ENRIGHT et al., 2010).

1.3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

No que tange à metodologia de forma ampla, a partir desses objetivos, diferentes algoritmos foram desenvolvidos utilizando-se a metodologia típica da área de astronomia espacial, limitando-a até a fase de simulação, ou seja, compreensão dos efeitos físicos envolvidos, modelagem dos mesmos e execução de simulações.

Os algoritmos e a ferramenta foram implementados utilizando o software MATLAB, cuja parte gráfica foi desenvolvida no ambiente *App Designer*.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

- *Capítulo 1*: Faz uma introdução e descreve as motivações e objetivos desta dissertação. Apresenta a metodologia de desenvolvimento do trabalho e a estrutura dos capítulos subsequentes;

- *Capítulo 2:* Apresenta uma descrição geral do sensor de estrelas e de seus principais componentes, princípio de funcionamento e modos de operação. Também são descritos os diferentes tipos de detectores e seus principais parâmetros;
- *Capítulo 3:* Apresenta o desenvolvimento dos algoritmos de importância para a ferramenta de cálculo do catálogo;
- *Capítulo 4:* Apresenta as simulações utilizando os algoritmos do capítulo 3 e os resultados obtidos nestas simulações;
- *Capítulo 5:* Apresenta a construção do mapa para analisar a precisão dos resultados obtidos pela ferramenta e a validação destes resultados com o sensor canadense S3S;
- *Capítulo 6:* Apresenta as discussões sobre os resultados obtidos, as conclusões do trabalho e as possíveis atividades futuras envolvendo a ferramenta desenvolvida.

2 SENSOR DE ESTRELAS AUTÔNOMO

Este capítulo apresenta um texto introdutório sobre sensores estelares autônomos. Ele trata das subdivisões dos sensores estelares em gerações e tipos, para subseqüentemente se concentrar no autônomo de cabeça fixa, objeto deste trabalho, apresentando suas partes constituintes, princípio de funcionamento, modos de operação e detectores a ele aplicado.

Conforme mencionado anteriormente, sensores estelares são amplamente utilizados em veículos espaciais que requerem alta precisão na determinação de sua atitude (da ordem de segundos de arco). Em satélites astronômicos, a carga útil possui um conjunto telescópio + câmera mais preciso que o próprio sensor estelar, como as missões CoRoT (CNES) (AUVERGNE et al., 2009) e PLATO (ESA) (EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2019). Nesses casos, a carga útil é o último e mais preciso estágio de configuração de malha de controle de atitude (precisão da ordem de 0,1" a 0,01"). São, tipicamente, malhas de altíssimo requisito de estabilidade que funcionam apenas em modo de apontamento inercial.

Além da precisão, o sensor estelar possui outras vantagens: baixo consumo de energia, ausência de partes móveis (aumentando a confiabilidade e vida útil), diferentes modos de operação possibilitando que um único tipo de sensor seja empregado em diferentes missões ou em diferentes fases da mesma missão, tamanho e peso reduzidos em relação aos demais tipos de sensores, maior estabilidade, pequena irregularidades nas medidas (como aquelas presentes no campo magnético da Terra que influenciam os magnetômetros ou ainda as derivas - "*drifts*" - que são inerentes aos giroscópios), entre outros, como citado em (DI GENNARO, 2016).

Conforme será detalhado mais adiante, os sensores estelares podem ser classificados em autônomos, isto é, aqueles que determinam a atitude do satélite ou em não autônomos que são aqueles que dependem de uma unidade de processamento externa para calcular a atitude.

A região de apontamento para onde o sensor observa é denominada Campo de Visada ("*Field of View*" - FoV). Com base no FoV do telescópio do sensor, o detector forma a imagem das estrelas observadas. E quanto maior o FoV, maior a quantidade de estrelas no detector do sensor estelar.

O sistema eletrônico do sensor digitaliza as imagens. A partir delas, realiza-se o cálculo do baricentro do aglomerado estelar para a determinação da posição estimada da estrela no detector. Como as posições das estrelas são bem conhecidas com base no catálogo estelar embarcado dentro do sensor, é realizada a comparação dos baricentros calculados. Então, o microcontrolador de processamento calcula a Linha de Visada do sensor ("*Line of Sight*" - LoS) e o envia ao SCAO. A Figura 2 mostra um sensor estelar e suas partes constituintes.

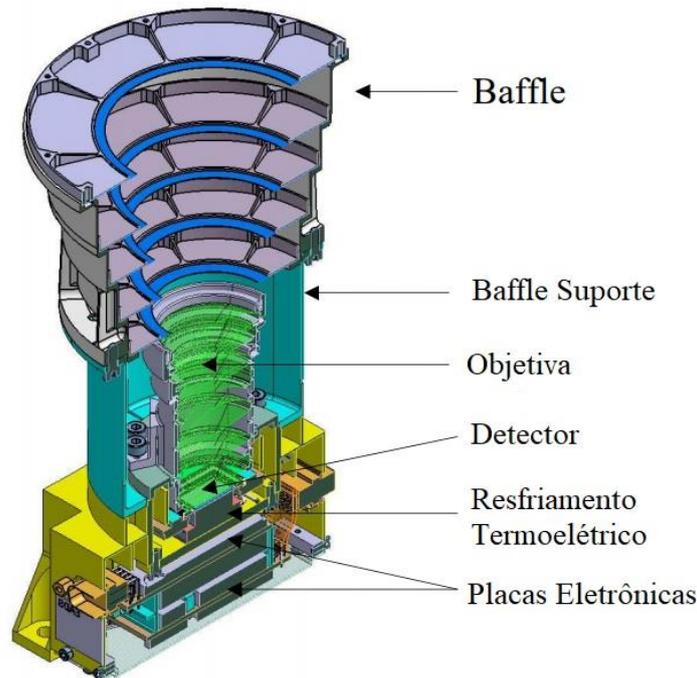


Figura 2 - Sensor Estelar e suas partes constituintes

Fonte: (MAJEWSKI et al., 2017)

Conforme pode ser observado na Figura acima, a câmara do sensor possui um detector responsável por converter os fótons que passaram pelo sistema óptico em sinal elétrico e o desempenho do sensor é fortemente influenciado pelas características deste detector. Predominam três tipos de tecnologias de detectores: CCD (*Charge-Coupled Device*), CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) e APS (*Active Pixel Sensor*).

Por muito tempo, o CCD foi a tecnologia predominante para capturar imagens de alta qualidade e baixo ruído. Porém, sua utilização perdeu espaço com o crescente avanço da tecnologia CMOS, que passou a ter um preço significativamente menor, tamanho e consumo de energia menores e maior rapidez na leitura de pixels.

Uma tecnologia atual de detectores e que se tornou bastante popular para sensores estelares são os Sensores de Pixel Ativo (APS) baseados na tecnologia do CMOS, que substituem bem os CCDs em aplicações em que o ruído de detecção não seja um requisito severo de desempenho. Ele é basicamente um circuito integrado de transistores fotossensíveis, ou seja, são fotodiodos sensíveis à fótons, que são posicionados de tal modo que formem uma matriz de pixels. Os pixels são os elementos endereçáveis em posição x e y, os quais fornecem sinal elétrico representativo da quantidade de fótons coletados durante o tempo de exposição, como representado na Figura 3. A leitura dos pixels é imediata, diferentemente do CCD, que possui uma etapa de pré-processamento até a informação ser efetivamente lida e digitalizada.

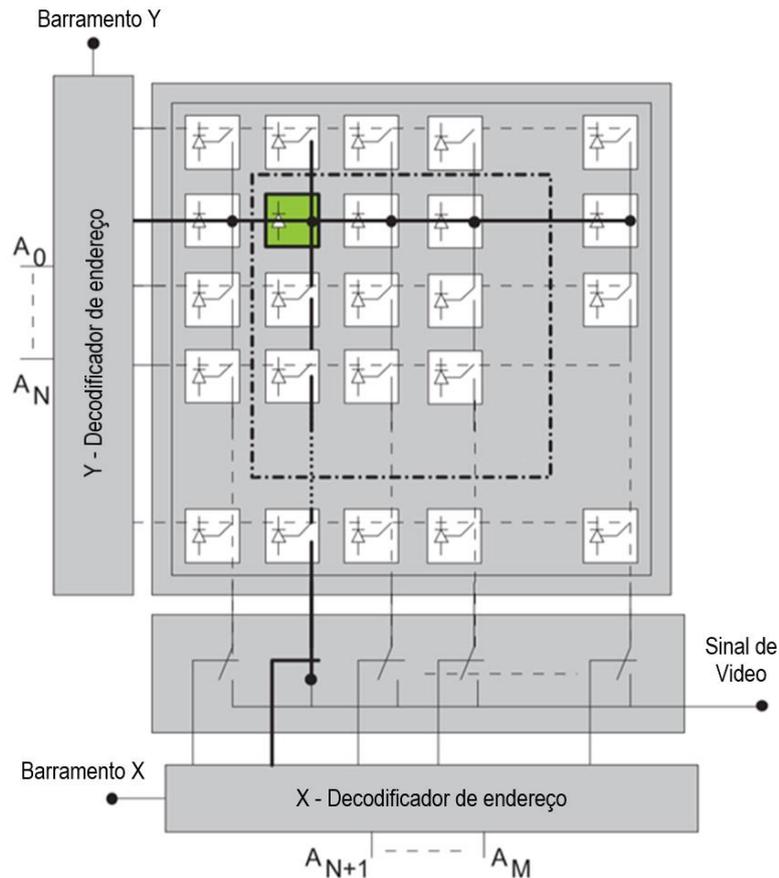


Figura 3 - Configuração de uma matriz de um detector APS

Fonte:(MAJEWSKI et al., 2017)

Dentre as principais características deste detector estão baixo consumo, menor massa, maior resistência à radiação, endereçamento direto dos pixels e menor preço. Esta tecnologia também se torna importante devido à capacidade de evolução em sua customização e minimização. Outro ponto importante é o potencial que ela possui para melhoria do processamento dedicado dos pixels.

Como exemplo, uma câmera APS inicial tinha uma matriz detectora de 256x256 pixels e um microcontrolador de arquitetura RISC de 32 bits (JU; JUNKINS, 2003). Hoje já são encontrados detectores de tamanho 1024x1024 pixels e processadores usando FPGA². Sua massa é não mais que 1 Kg e seu consumo de energia é não mais que 5W (WANG et al., 2016).

Além do detector, outras características afetam diretamente o desempenho do sensor estelar como:

² Field Programmable Gate Array (FPGA) é um circuito integrado capaz de projetar qualquer outro circuito eletrônico utilizando linguagem de programação HDL (*Hardware Description Language*).

- O campo de visada (FoV);
- O catálogo interno embarcado;
- A ótica empregada (Coeficiente de Transmissão Ótica - CTO);
- A precisão do cálculo do baricentro da estrela;
- O número de estrelas no campo de visada;
- O sinal de fundo de detecção (*Threshold*); e
- A calibração.

2.1 GERAÇÕES DE SENSORES ESTELARES

2.1.1 Primeira geração: sensores não autônomos

Os sensores de primeira geração são caracterizados por não serem capazes de realizar o cálculo de atitude do satélite internamente, dependendo, deste modo, de um sistema de processamento externo ao sensor para fazê-lo, sendo este um computador principal do satélite ou em solo. Assim, são capazes de detectar apenas algumas poucas estrelas.

O primeiro sensor desta geração foi o ASTROS (*Advanced Star and Target Referential Optical Sensor*) desenvolvido pela Nasa JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Possuía uma matriz detectora CCD de 340 colunas por 512 linhas divididas em duas áreas de 256 linhas cada e um FoV de $2.2^\circ \times 3.3^\circ$ de abertura para o detector. Sua eletrônica foi montada com um microcontrolador do tipo TI SBP 9989, com 12 Kbytes de ROM e 8 Kbytes de RAM (JU, G. AND JUNKINS, 2003). Tipicamente, o ASTROS era capaz de detectar de 1 a 3 estrelas simultaneamente e para o computador calcular a atitude do satélite, necessitava de uma informação adicional, como a orientação do sol no campo de visada. Caracterizado pelo bom desempenho, possuía uma acurácia relativa por estrela e por eixo de 0.8 segundos de arco (correspondente ao σ do valor medido de cada estrela)(EISENMAN; LIEBE, 1998).

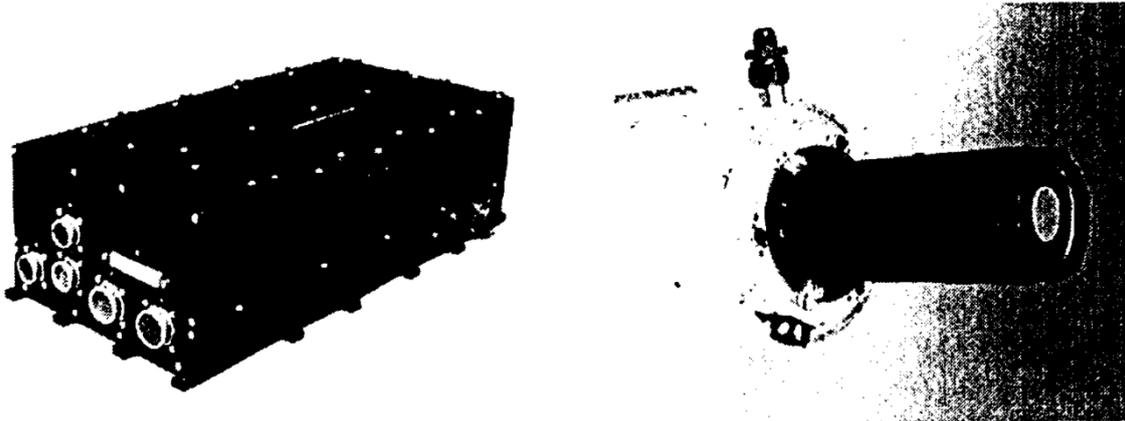


Figura 4 – Sensor de estrelas primeira geração ASTROS JPL de 1985: eletrônica de processamento à esquerda, câmera do sensor à direita.

Fonte: (EISENMAN; LIEBE, 1998)

2.1.2 Segunda geração: sensores autônomos

Já os sensores estelares de segunda geração, chamados de autônomos, realizam internamente, ou seja, no próprio sensor, o cálculo da atitude do satélite, independentemente dos outros sistemas. Para isso, possuem um catálogo estelar embarcado que é comparado às imagens adquiridas por sua câmera. Dessa forma, é capaz de operar no modo *Lost-in-Space* que não necessita de uma estimativa de atitude *a priori*.

Eles possuem uma alta precisão e maior robustez de operação, além de serem mais adaptáveis. São capazes de detectar algumas dezenas de estrelas em seu campo de visada.

O sensor estelar SED-16, desenvolvido pela *Sodern Company*, por exemplo, foi projetado para controle de atitude em três eixos em órbitas baixa, média e geoestacionária, ou ainda em *deep space*. O sensor possui um sistema óptico com 28.8 mm de comprimento focal e uma matriz detectora CCD com 1024x1024 pixels, um FoV com 25° de abertura da pupila. Sua eletrônica usa um microcontrolador SPARC de 32bits de arquitetura ASIC (circuito integrado de aplicação específica). Seu conjunto total em massa é de aproximadamente 3 Kg, incluindo o *baffle*. Detecta de 20 a 25 estrelas com magnitude visual acima de 2, contendo 9 ou 10 estrelas em modo de rastreamento (JU; JUNKINS, 2003). A acurácia típica da medida entregue por este sensor está entre 0.01° e 0.02° (3σ) (KREBS, PISSAVIN, VILAIRE, 1999).



Figura 5 - Sensor de Estrelas SED16-B e SED16-A

Fonte: (MINEC-DUBÉ et al., 2006)

2.2 TIPOS DE SENSORES ESTELARES

Em termos de tipos, os sensores estelares podem ser de varredura, de estruturas móveis ou de cabeça fixa:

- **Sensor de Varredura (“*star scanners*”)**: utiliza a própria rotação do satélite para buscar por estrelas na esfera celeste e então atingir a estabilização. Estes sensores possuem entre a objetiva e o detector uma máscara opaca com uma fenda geralmente em forma de “V”, por onde a radiação proveniente das estrelas passa. Assim, quando a radiação de uma estrela atravessa uma das pernas da fenda em “V”, o detector é sensibilizado. Estes sensores têm uma precisão típica da ordem de 0.5-30 minutos de arco (WERTZ, 1999).

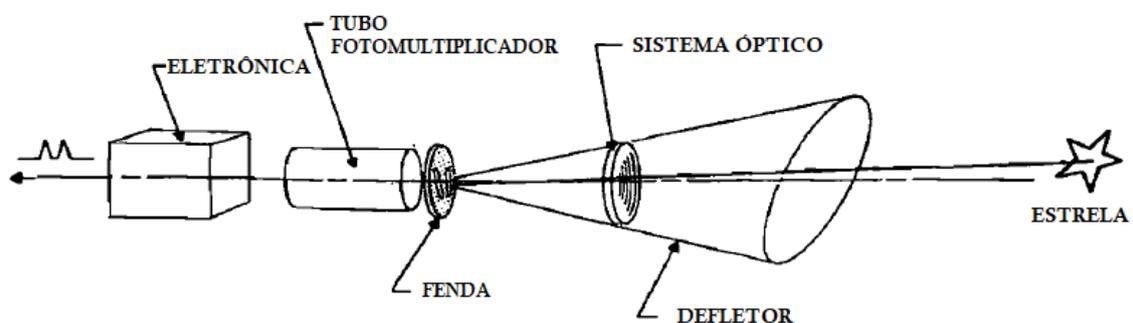


Figura 6 - Máscara opaca com fenda em “V”

Fonte: (WERTZ, 1999)

- Sensor estelar com estrutura móvel (“*gimbaled star tracker*”)**: este sensor é montado em um pivô móvel cuja base é fixada na estrutura do satélite. Geralmente busca e rastreia uma única estrela através do movimento mecânico da estrutura móvel sobre o qual a câmera está montada, tentando sempre manter essa estrela no centro do FoV. A partir da leitura do sensor angular montado na estrutura móvel, a atitude do satélite é calculada. Usualmente este tipo de sensor possui um FoV bem pequeno (da ordem de 1°), contudo sua montagem e funcionamento fornecem ao sensor um FoV efetivo muito maior (da ordem de 40°). A precisão dos sensores desse tipo é da ordem de 1 - 60 segundos de arco, excluindo os erros de alinhamento entre o sensor e o satélite (WERTZ, 1999).

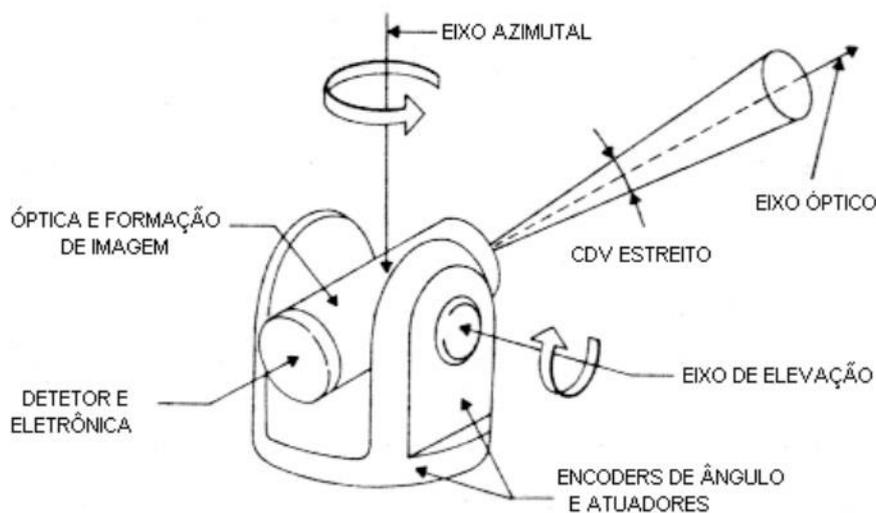


Figura 7 - Gimbaled Star Tracker

Fonte: (WERTZ, 1999)

- Sensor estelar de cabeça fixa (“*fixed head star trackers*”)**: consiste em uma câmera fixada rigidamente na estrutura do satélite e não possui parte móvel (Figura 8). É usado em satélites estabilizados em três eixos. Apresenta um FoV maior, conseguindo assim uma maior quantidade de estrelas observadas e maior precisão. A posição relativa (variação do baricentro) e a magnitude de cada uma das estrelas servem de dados de entrada para um algoritmo de identificação de padrões, capaz de fornecer a direção de apontamento do eixo óptico do sensor. Sensores comerciais deste tipo podem ter precisão da ordem de 5 ~ 10 segundos de arco, ou ainda melhor (WERTZ, 1999).

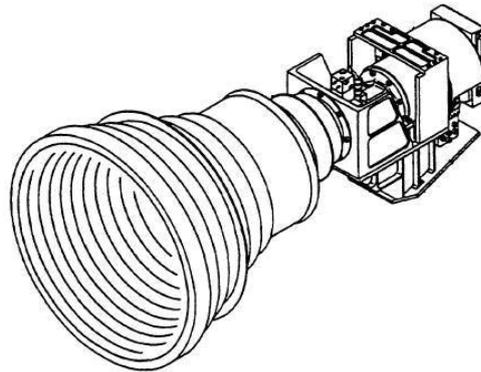


Figura 8 - Sensor estelar de cabeça fixa

Fonte: (SPACE ALLIANCE, 2010)

2.3 PARTES CONSTITUINTES DO SENSOR ESTELAR DE CABEÇA FIXA

O sensor estelar é subdividido em diferentes subsistemas adequados às diferentes áreas da engenharia e ciências na sua resolução. Assim, para simplificar a compreensão, serão considerados apenas cinco desses subsistemas, apresentados na figura a seguir.

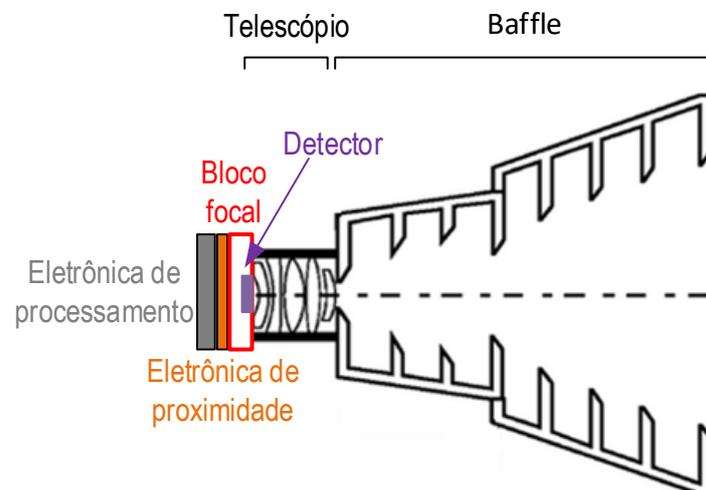


Figura 9 - Desenho esquemático de um sensor estelar com seus subsistemas

Fonte: (DI GENNARO, 2016)

Analisando a figura, identifica-se os seguintes subsistemas:

- “*Baffle*”: Filtro óptico de raios parasitas provenientes de fontes exteriores ao FoV do sensor;

- Telescópio: É constituído por um conjunto de lentes responsáveis por concentrar a luz das estrelas observadas sobre o detector;
- Bloco focal: Estrutura mecânica onde é montado o detector ou conjunto de detectores;
- Eletrônica de proximidade: Eletrônica responsável pela amplificação dos sinais elétricos medidos pelo detector, conversão em sinais digitais e armazenamento em uma memória de massa das imagens digitais completas ou de zonas de interesse do detector;
- Eletrônica de processamento: Eletrônica que realiza o processamento das imagens do campo estelar, deduzindo delas as posições das estrelas observadas, e destas a linha de visada do sensor, e conseqüentemente, do satélite.

A seguir esses subsistemas são apresentados em mais detalhes.

2.3.1 O baffle

A função do *baffle* é proteger o FoV da poluição luminosa que, eventualmente, aparece devido a estrelas parasitas e outros objetos brilhantes (Sol, Terra, satélites, detritos, estação espacial, luz zodiacal, etc) que não fazem parte da informação útil ao sensor.

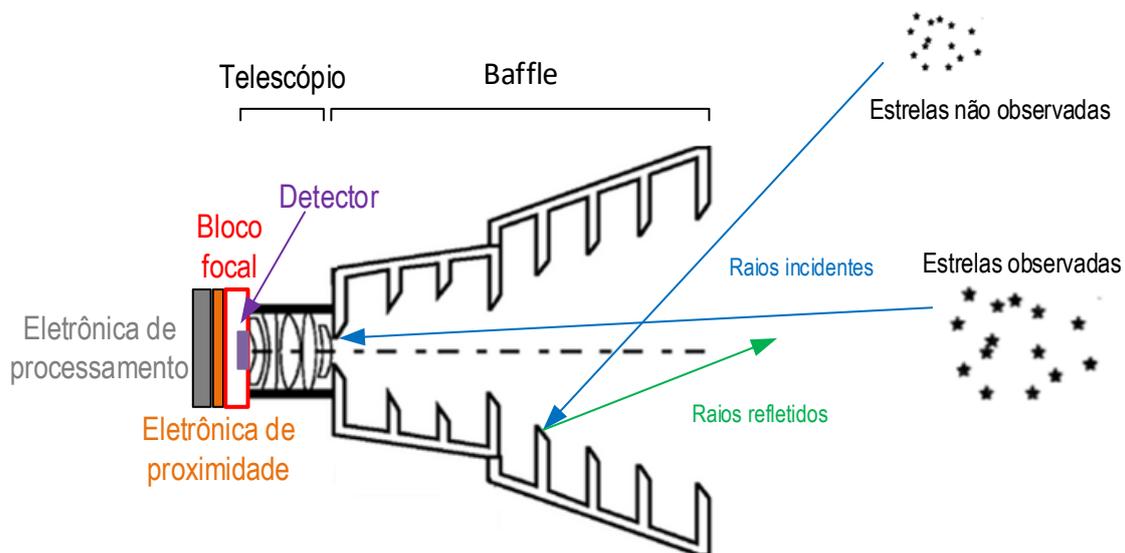


Figura 10 - Ilustração do funcionamento do baffle de um sensor estelar

Fonte: (DI GENNARO, 2016).

O *baffle* é uma estrutura em forma de anéis, com raios internos cada vez menores até a entrada da pupila, posicionados de maneira concêntrica, sendo o orifício final a entrada de luz para o conjunto de lentes. Estes anéis são divididos de modo que o disco interior tenha uma espessura muito fina (micrómetros) e isso impede os fenômenos de reflexão nas bordas. Os anéis são

projetados externamente para absorver o máximo de luz e evitar sua transmissão para o sistema óptico.

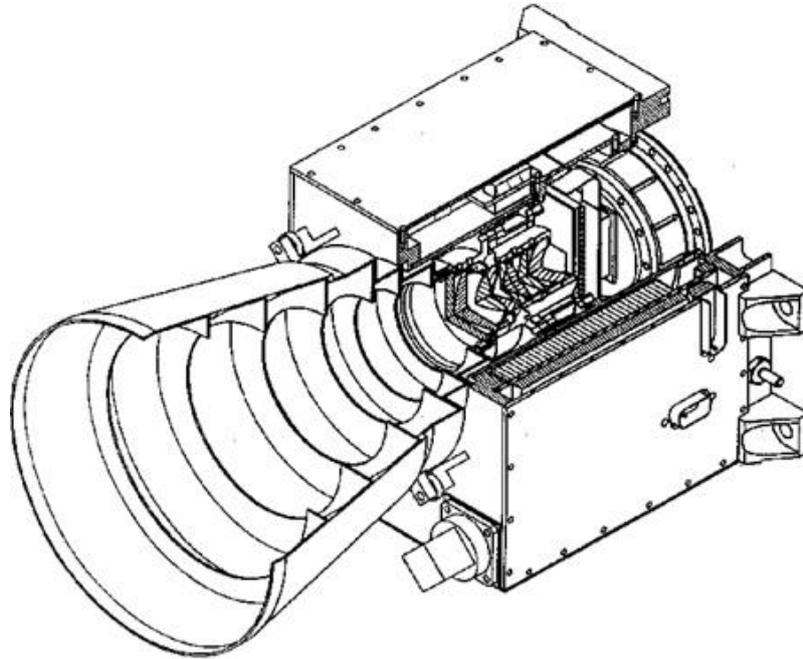


Figura 11 - Parte mecânica, incluindo *baffle*, do sensor SED16 desenvolvido pela EADS Sodern

Fonte: (ROUX; CUNHA, 2004)

O *baffle* é projetado de tal modo a definir um ângulo limite (cone de exclusão) para além do qual um objeto brilhante não degrada de forma significativa o desempenho do sensor, sendo medido através de um ganho de filtragem. Tipicamente, este ganho fica entre 10^{-5} e 10^{-7} .

O *baffle* possui as seguintes características construtivas:

- Altura h (m);
- O ângulo de vértice (radianos);
- O ângulo de campo (radianos);
- O número de vãos;
- O espaçamento entre cada vão (mm);
- O coeficiente de absorção na superfície dos vãos; e
- A espessura dos vãos (mm).

2.3.2 O telescópio e sua objetiva dióptrica³

Normalmente, num sensor estelar comercial, o telescópio é constituído de uma objetiva dióptrica, numa montagem do tipo Double Gauss⁴. O papel da objetiva é assegurar a transmissão da luz das estrelas para a matriz fotossensível do detector. Isto deve ser realizado de forma a minimizar a distorção do formato de uma estrela ou de um conjunto de estrelas. As lentes são escolhidas de modo a criar uma objetiva acromática⁵. A Figura 12 mostra um exemplo de uma montagem de telescópio.

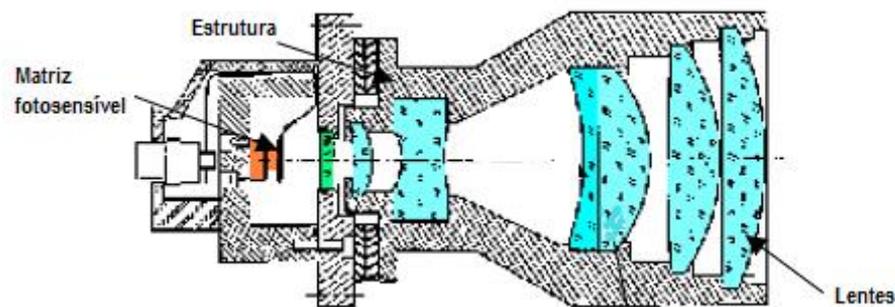


Figura 12 - Design de uma objetiva dióptrica

Fonte: adaptada de (ROUSSEAU GEORGES, 2004)

Exceção feita ao Sol, uma estrela tem uma potência luminosa muito baixa do ponto de vista de um observador no Sistema Solar. Por isso, o sistema óptico deve ter um máximo de transmissão a fim de otimizar a relação sinal/ruído. Além disso, uma estrela é um objeto pontual e a resolução de sua imagem depende do sistema óptico.

Uma técnica para se obter maior precisão na imagem obtida pelo sensor é desfocalizar o detector, isto é, desalinhar o detector com relação ao plano sobre o qual a imagem é formada. Isso provoca um espalhamento da luz das estrelas em vários pixels da matriz detectora e seus baricentros são, então, determinados com maior precisão. Tipicamente, as coordenadas dos baricentros das estrelas podem ser fornecidas com uma precisão de até centésimos de pixel. Para atingir este desempenho, o projetista deve ainda calibrar o sistema óptico da objetiva, a fim de

³ Objetiva dióptrica é o termo utilizado para designar a lente mais próxima ao objeto a se observar, do tipo convexa.

⁴ Montagem do tipo Double Gauss é composta de duas lentes duplas, sendo a lente objetiva convergente e a lente ocular divergente.

⁵ Lente acromática é uma lente projetada de forma a minimizar os fenômenos de aberração cromática e esférica.

identificar os parâmetros do polinômio de distorção óptica, que permite corrigir as aberrações geométricas da objetiva.

Os parâmetros usados para descrever o sistema óptico são dados abaixo:

- O diâmetro da pupila de entrada: P_e (mm);
- A distância focal de formação da imagem: f (mm);
- A desfocalização, ou seja, a distância da matriz detectora em relação ao plano focal: desf (mm);
- O raio da mancha imagem contendo 80% da energia luminosa: R_{80} (pixel);
- O coeficiente de transmissão óptica: $\tau(\lambda)$ (adimensional);
- A atenuação luminosa $f_0(\theta) = -\log(A_0)$ para uma fonte pontual localizada a θ° do eixo óptico; e
- O polinômio de distorção óptica.

2.3.2.1 PSF (Função de Espalhamento de Ponto)

Como resultado do projeto óptico seguindo os parâmetros acima, obtém-se a Função de Espalhamento de Ponto (“*Point Spread Function*” ou *PSF*), informação central do projeto de um sensor estelar.

Todo raio luminoso ao atravessar um sistema óptico sofre uma dispersão devido à difração da luz ao passar pela abertura circular do telescópio. Este fenômeno pode ser modelado por uma PSF.

O efeito da difração é relacionado com as propriedades ondulatórias da luz e também com o fenômeno da interferência. Assim, quando uma onda atravessa uma fenda que não é estreita, sua dispersão se dá de forma que a intensidade da luz resultante neste evento seja dependente do ângulo entre a onda e a fenda. Com isso, a maior parte da energia luminosa está no máximo central de difração. A figura abaixo ilustra este fenômeno.

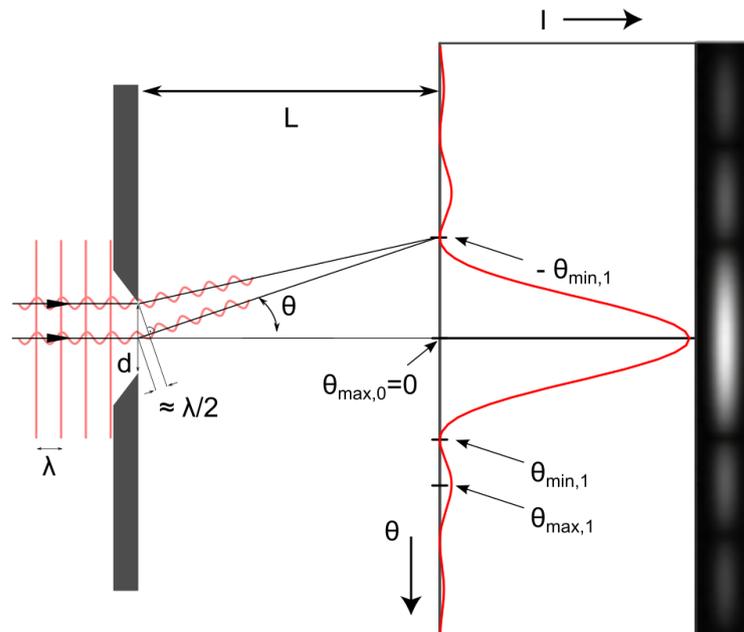


Figura 13 - Difração da luz ao passar por uma fenda e a posição dos mínimos de intensidade luminosa

Fonte: <https://www.wikiwand.com/pt/Difração>

Para modelar este fenômeno que ocorre no sistema óptico do sensor utiliza-se a PSF, que é simplesmente uma função espacial bidimensional da resposta a um impulso. Sua modelagem matemática é descrita em detalhes na seção 3.2.2.

A Figura 14 mostra um exemplo ideal de PSF bidimensional.

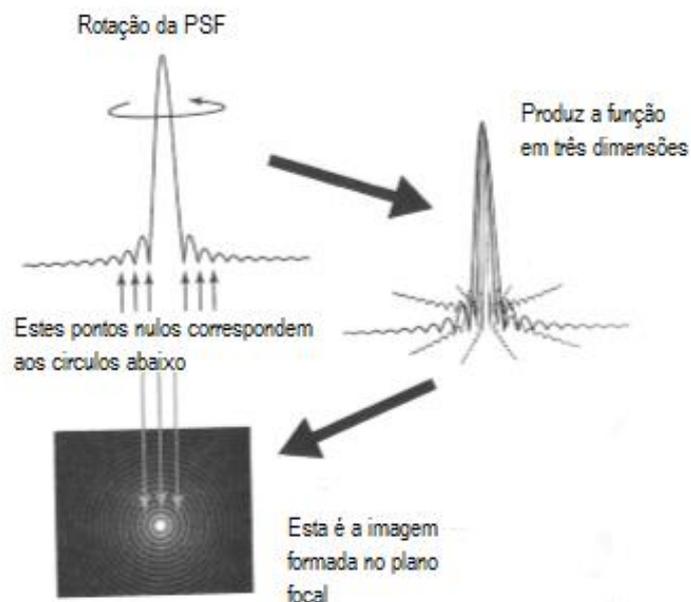


Figura 14 - Função bidimensional da PSF

Fonte: adaptada de (FLEISCH; KREGENOW, 2018)

Com isso, a imagem resultante do sistema óptico pode ser obtida pela convolução do objeto observado e a PSF do instrumento, resultando assim em uma imagem dispersa, conforme a Figura 15.

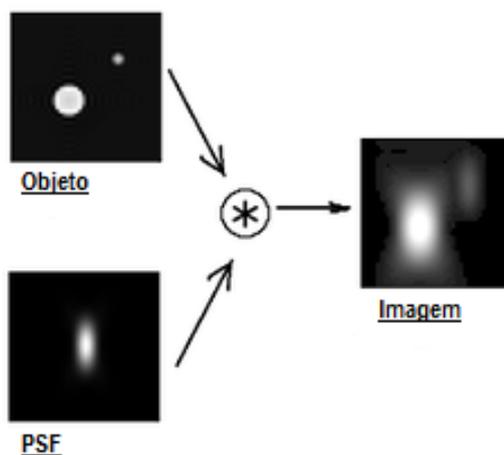


Figura 15 - Convolução de dois objetos com a PSF do instrumento

Fonte: (SCIENTIFIC VOLUME IMAGING, 2019)

Nota-se que a figura acima ilustra a observação de um objeto extenso e outro pontual. No caso do sensor estelar, os objetos observados são estrelas, isto é, fontes pontuais, logo a imagem obtida será a própria PSF desnormalizada, obtida pela convolução da PSF com um impulso. É

sobre esta imagem obtida que se baseiam os cálculos de baricentro e, por conseguinte, de linha de visada do sensor.

Além disso, durante o lançamento e a missão espacial, a ótica de um sensor estelar sofre modificações e é preciso recalibrar as PSFs via software.

2.3.3 O bloco focal

O bloco focal de um sensor estelar, como pode ser visto na Figura 16, é uma estrutura mecânica onde são montados os detectores. Nele, existe uma placa de cristal de proteção que cumpre funções importantes: isola o detector do meio, permitindo a criação de uma câmara que é preenchida com gás nitrogênio, durante a manipulação do instrumento no solo, e de vácuo, durante sua operação em voo; controle térmico por condução e radiação do detector. O bloco focal contém ainda o plano focal do sistema óptico.

Além de critérios mecânicos de montagem, interface e estabilidade face a vibrações do lançamento do satélite, o bloco focal precisa levar em conta critérios de escoamento térmico e controle de temperatura de operação do detector, interfaces elétricas e blindagem do detector contra raios cósmicos.

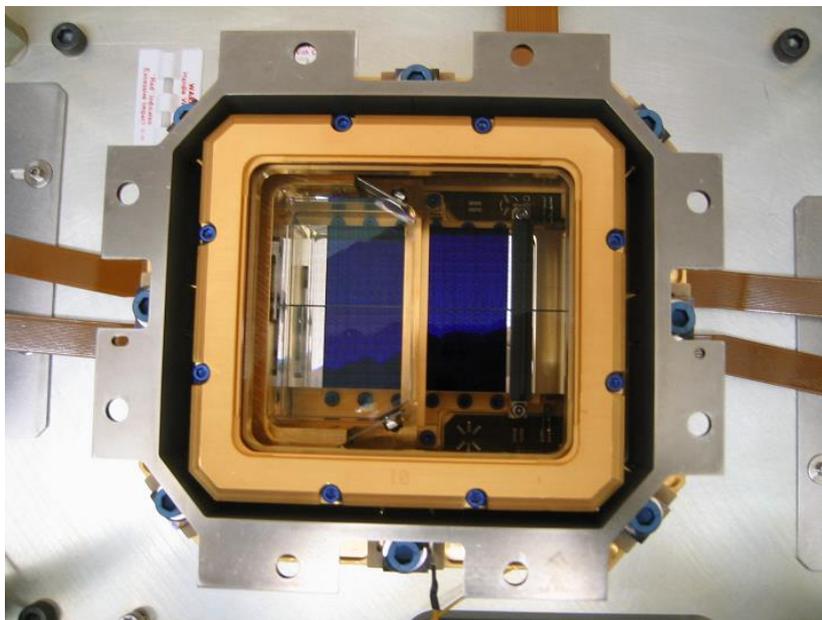


Figura 16 - Imagem do bloco focal do satélite CoRoT

Fonte: (CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALE (CNES), 2014)

2.3.4 A eletrônica de proximidade

A matriz fotossensível do detector requer numerosos sinais de controle para operar, exigindo uma eletrônica especializada e dedicada.

A eletrônica de proximidade tem as funções de controlar os ciclos de operação do detector (aquisição de fótons e leitura), estabilidade térmica, de alimentação, de nível mínimo de tensão nos pixels (ou offset), amplificação de sinais, conversão analógico-digital, pré-processamento das imagens e estocagem na memória de massa do sensor. Ela fornece ainda dados de “housekeeping”, ou seja, dados auxiliares essenciais ao pós-processamento de imagens para fins de caracterização de desempenho do sensor, caracterização do envelhecimento e correções instrumentais.

Fisicamente, a eletrônica de proximidade se caracteriza por um conjunto de circuitos eletrônicos posicionados perto da cabeça óptica do sensor. Ela tem como principais parâmetros:

- O ganho (e^-/ADU);
- O ruído eletrônico: σ_{ana} em $e^-/pixel/frame$;
- A faixa dinâmica do conversor analógico-digital (A/D) em *bits*;
- O passo de quantização: q (e^-);
- O offset da eletrônica: $offset$ (e^-); e
- O tempo de integração: T_i (*seg*).

2.3.5 A eletrônica de processamento

Uma vez obtida a imagem ou um conjunto de imagens digitais, todos os cálculos serão realizados por uma placa eletrônica de processamento digital. Esta placa deve controlar ainda todas as funções do sensor estelar, desde o barramento de dados até o controle da temperatura em que se encontra.

Esta placa pode ser ligada mecanicamente ao resto do sistema. No entanto, é preferível que a mesma seja montada em uma unidade de controle remota, dando maior flexibilidade de projeto à plataforma do satélite e ao projeto térmico do sensor.

Não existe um padrão para descrever estes tipos de dispositivos eletrônicos. No entanto, para todos os componentes eletrônicos, permanece a necessidade de se usar componentes validados para uso no espaço. Isto restringe enormemente a escolha de componentes e, por conseguinte, as possibilidades de mudanças e otimizações nas arquiteturas utilizadas.

2.4 MODOS DE OPERAÇÃO

Um sensor estelar autônomo opera tipicamente em dois modos:

- Aquisição inicial de atitude;
- Modo de rastreamento.

A diferença entre os modos, basicamente, é a função que cada um desempenha e se o conhecimento aproximado da atitude está disponível (LIEBE, 2002).

O primeiro modo de operação envolve a determinação da atitude somente pelo sensor de estrelas sem informações iniciais sobre a atitude (“*LOST IN SPACE*”). Esta função é baseada em um padrão de identificação de estrelas, que consiste em comparar a informação embarcada do catálogo estelar com a classificação das estrelas detectadas no FoV.

O segundo modo, denominado de operação normal, supõe que a atitude atual esteja perto da última atitude calculada. Desse modo, pode-se estimar a janela de pixels onde provavelmente a estrela rastreada estará contida. Os pixels dessa janela são processados e o baricentro atual é calculado.

As etapas do princípio de funcionamento do sensor estelar de cabeça fixa em modo *Lost in Space* são explicadas a seguir:

1. A luz emitida pelas estrelas que estão no campo do detector, alcança a parte foto-sensível do sensor estelar. As luzes indesejadas fora do FoV do sensor são filtradas pelo *baffle*. Esta filtragem se faz necessária, pois, os raios espúrios (fluxos luminosos das estrelas e de outras fontes espúrias que não se encontram no FoV do sensor) não deverão influenciar na leitura da imagem;

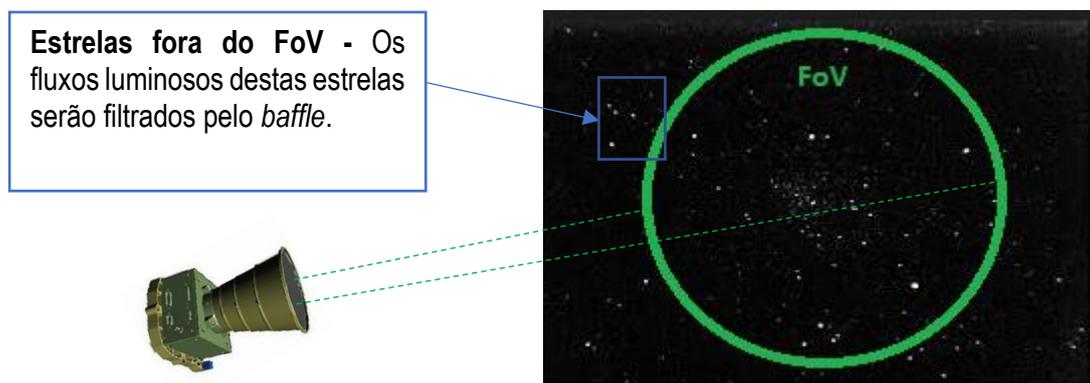


Figura 17 - Estrelas no campo de visada do sensor estelar

Fonte: (DI GENNARO, 2016)

2. Após filtragem pelo *baffle*, os fluxos luminosos das estrelas que efetivamente se encontram no campo de visada do sensor passarão pelo sistema óptico. Este sistema possui um coeficiente de transmissão óptica que indica, em porcentagem, o quanto de fluxo luminoso irá atravessá-lo em função do comprimento de onda;
3. O mesmo sistema óptico é modelado por uma função de espalhamento de ponto (*PSF*) que é a resposta óptica do instrumento para um ponto no infinito;
4. São então formadas as manchas imagens no detector do sensor estelar para cada uma das estrelas observadas no campo de visada. As manchas imagens nada mais são do que os pontos luminosos estelares espalhados nos pixels do detector;
5. A imagem é adquirida em um intervalo de tempo específico, que se denomina tempo de integração da imagem, e este determina o número de fótons que serão coletados pelo detector. Neste caso, o tempo de integração deve apresentar um compromisso quanto à observação das estrelas e à saturação dos pixels do detector. A eficiência quântica do detector determina a quantidade de fótons que irão ser convertidos em elétrons em função do comprimento de onda;
6. Depois da aquisição, são definidas n submatrizes (janelas) conforme a Figura 18, de “ n ” por “ m ” elementos centradas em cada um dos pixels de maior sinal, ou intensidade luminosa, onde se supõe detectada a presença de uma estrela para o cálculo do baricentro.

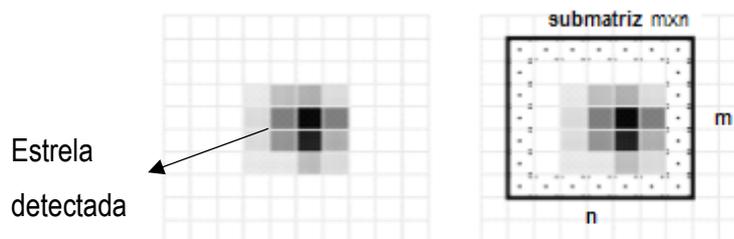


Figura 18 - Submatriz $n \times m$ para o cálculo do baricentro

Fonte: Figura adaptada de (ROUSSEAU GEORGES, 2004)

7. Conhecendo-se a distância focal f , é possível determinar a posição de cada estrela da esfera celeste em coordenadas do detector, conforme será descrito em maiores detalhes no capítulo seguinte deste trabalho;

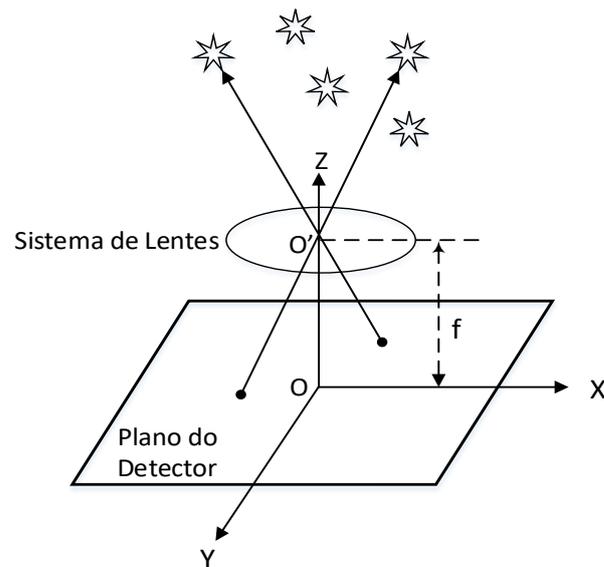


Figura 19 - Distância focal entre o sistema de lentes e o plano focal

Fonte: (DI GENNARO, 2016)

8. Dadas as posições das estrelas no detector, um algoritmo de reconhecimento de padrões processa a imagem e calcula, através de uma comparação com um catálogo embarcado, a orientação do eixo óptico do sensor, gerando assim as coordenadas de atitude.

2.5 INTERRUPÇÃO DE OBTENÇÃO DA LINHA DE VISADA

Certas condições podem levar o sensor estelar a não ser capaz de fornecer informações de atitude, tais como:

2.5.1 Presença do Sol

A passagem do Sol no campo de visada impede o funcionamento normal do sensor. Mesmo se o Sol não cobrir completamente o campo de visada, mas se estiver em uma posição em que possua um ângulo menor do que aquele para o qual o aparelho foi dimensionado, também é suficiente para que o sensor fique saturado. A presença da Terra nas mesmas condições pode levar ao mesmo resultado como mostrado na Figura 20.



Figura 20 - À esquerda, captura de imagem de uma câmera de filmagem no visível em voo suborbital. À direita, a mesma cena com leve deslocamento angular poucos segundos depois, após o início da entrada do Sol no campo de visada pelo canto superior direito.

Fonte: (SPACE X, 2014)

2.5.2 Rotação em alta velocidade

Se a cabeça óptica tiver uma velocidade muito alta pode espalhar a imagem na matriz do detector e transformar o sinal das estrelas em rastros luminosos (Figura 21). Com isso, a detecção de suas posições se torna impossível e o sensor pode não reconhecer ou mesmo não seguir as estrelas no modo de rastreamento.



Figura 21 - Imagem do movimento estelar obtida com alto tempo de exposição do detector à luz. Efeito equivalente ocorre nas imagens do sensor estelar se a velocidade angular do satélite for muito elevada.

Fonte: (DANIEL V. SCHROEDER, 2010)

2.5.3 Ambiente radiativo

Por fim, na exposição do sensor a densidades excessivas de radiação espacial (prótons de alta energia principalmente), o número de falsas estrelas pode se tornar proibitivo para a operação adequada do equipamento. Esse fenômeno varia em função do tipo de órbita (baixa, média, geoestacionária, pontos de Lagrange). Ou mesmo pode ocorrer durante eventos solares específicos (atividade solar intensa como ocorrida em 2001, por exemplo). Também, particularmente se em órbita baixa, mostra-se acentuado durante a passagem da câmera pela Anomalia do Atlântico Sul (AAS), região sobre a América Latina que contém uma anomalia no campo magnético da Terra, proteção natural contra partículas de alta energia. Alguns métodos permitem o funcionamento do sensor para uma densidade mais elevada de prótons, ao custo de maior carga de processamento. Um exemplo de imagem deste fenômeno é mostrado na Figura 22.

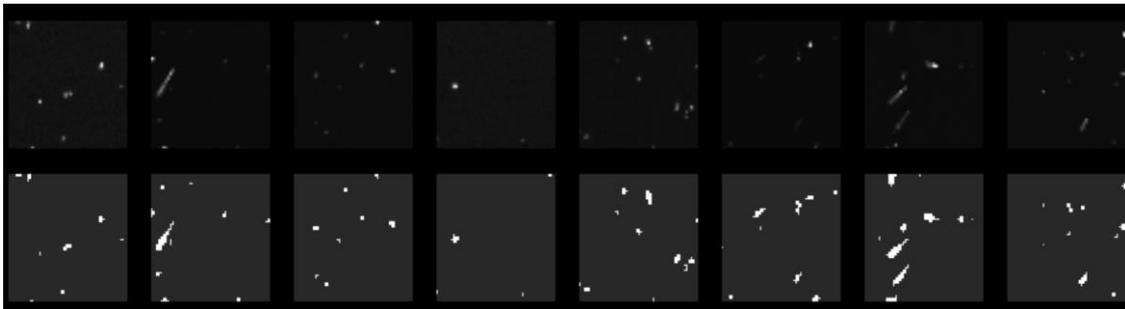


Figura 22 - Linha superior: série de imagens de voo do satélite CoRoT atingidas por partículas de alta energia (tipicamente acima de $300 p^+ / cm^2 / seg$) durante passagem na AAS. Linha inferior: impactos detectados nestas imagens.

Fonte: Figura adaptada de (PINHEIRO,2007)

2.6 A FERRAMENTA DE CÁLCULO DE CATÁLOGO EMBARCADO

Como representado na figura abaixo, as imagens digitalizadas, o catálogo estelar e o software de voo compõem a eletrônica de processamento do sensor, e esta entrega a atitude calculada para o SCA do satélite.

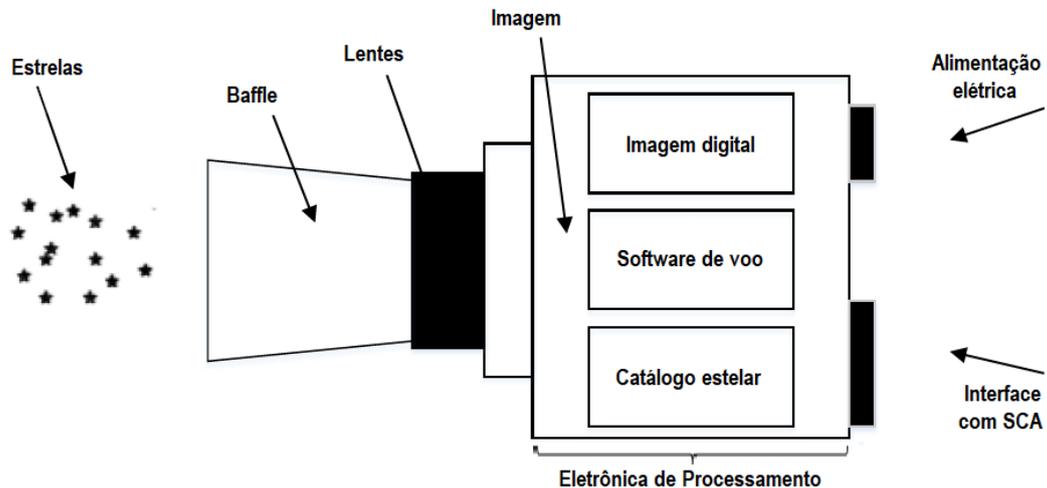


Figura 23 - Esquema do sensor estelar, demonstrando os componentes da eletrônica de processamento

Fonte: Adaptado de (DI GENNARO, 2016)

Todos estes componentes mencionados anteriormente e que serão embarcados no sensor são desenvolvidos e testados, via software, em solo. Para este fim, são criadas ferramentas de simulação e cálculo, que podem simular o ambiente espacial além de diferentes configurações de sensores estelares.

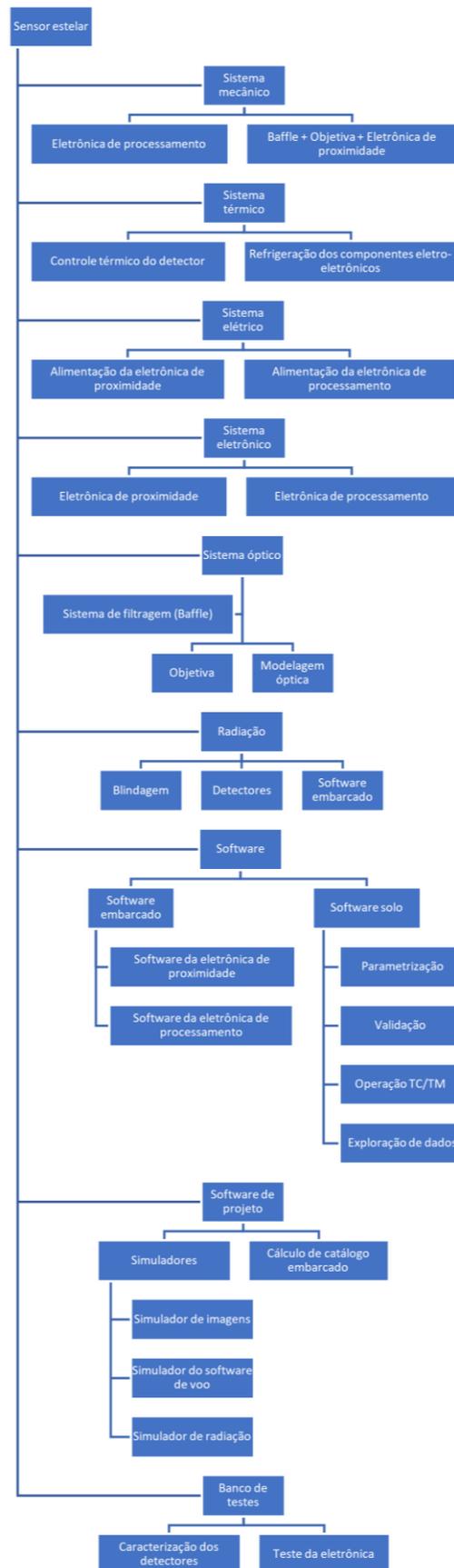


Figura 24 - Fluxograma dos diferentes sistemas e softwares que compõem o desenvolvimento do sensor estelar

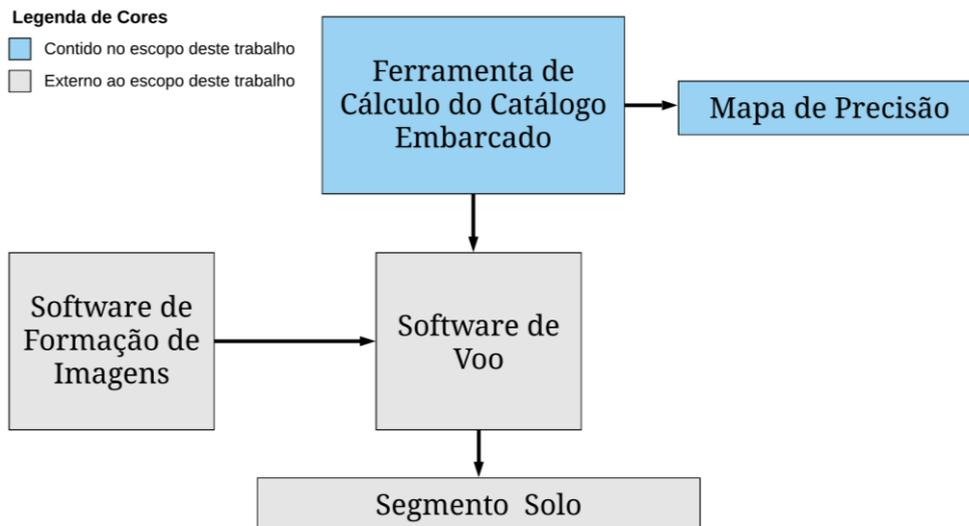


Figura 25 - Diagrama ilustrando as diferentes relações entre o software/base de dados que compõem o sensor. Em azul os elementos que se propôs implementar nesta dissertação e em cinza claro os elementos implementados em trabalhos externos

Na Figura 24, o fluxograma ilustra os diferentes e inúmeros sistemas e softwares que compõem o sensor, já a Figura 25 representa a relação entre alguns desses softwares. Assim, observa-se que para o desenvolvimento do software de voo em solo é necessário o catálogo embarcado calculado e também o software de formação de imagens (*Ground Support Equipment* ou GSE) para simular a aquisição de imagens realizada pelo hardware do sensor. Embora sejam distintos, tais softwares compartilham alguns algoritmos.

Neste trabalho de mestrado, foi construída a ferramenta que calcula o catálogo estelar. Este possui como base um catálogo de referência contendo informações astrométricas e físicas das estrelas. Na sequência, uma série de algoritmos transformam essa base de dados bruta em dados compreensíveis em nível do sensor para que ele possa se localizar autonomamente.

Estes algoritmos são integrados em uma interface gráfica de simulação, permitindo assim simular diferentes parâmetros de entrada deste cálculo e visualizar os resultados na própria interface. Além disso, foi construído um mapa de precisão do sensor com base na utilização do catálogo calculado. Tal mapa permitiu avaliar o desempenho do sensor obtido com o catálogo e compará-lo com o desempenho obtido em testes do sensor S3S desenvolvido por equipe canadense (*Sinclair-SAIL-SFL*), contido na literatura (ENRIGHT et al., 2010).

3 ALGORITMOS DA FERRAMENTA DE CÁLCULO DE CATÁLOGO DE ESTRELAS EMBARCADO

Os diferentes algoritmos que executam o cálculo do catálogo embarcado podem ser agrupados em diversas estruturas associadas aos subsistemas que compõem o sensor. A figura abaixo ilustra a organização destes subsistemas de forma sequencial para a geração do catálogo e avaliação de desempenho.



Figura 26 - Diagrama contendo os algoritmos envolvidos no cálculo do catálogo embarcado. Em verde estão os blocos desenvolvidos neste trabalho e em amarelo os blocos de trabalho externo a este que foram integrados a ferramenta de cálculo do catálogo

As subseções seguintes descrevem em detalhes cada um destes algoritmos.

3.1 CATÁLOGO DE REFERÊNCIA

Como primeira etapa para o cálculo de um catálogo embarcado em sensor estelar, deve-se tomar os dados estelares de um catálogo de referência. Então, com base nos dados das estrelas deste catálogo, diferentes algoritmos executam o cálculo das informações que ficarão embarcadas no sensor e que são compreensíveis em nível do seu processamento. Este catálogo

deve conter informações sobre diferentes parâmetros das estrelas: posição, distância, parâmetro fotométrico, variabilidade estelar, etc.

Para obtenção desses dados, utiliza-se a plataforma VizieR (CENTRE DE DONNÉES ASTRONOMIQUES DE STRASBOURG (CDS), 2020) que fornece acesso a um acervo de milhares de catálogos astronômicos publicados até hoje.

Dado que o sensor se utiliza do cálculo da posição dos baricentros estelares para a determinação da linha de visada do satélite, informações precisas das posições estelares são de extrema importância ao catálogo. Por isso, destacam-se os catálogos gerados pelas missões espaciais astrométricas, isto é, satélites cujo objetivo é justamente mapear as estrelas e seus parâmetros com maior precisão possível.

Por mais essencial que seja conhecer os parâmetros astrométricos das estrelas, como posição, paralaxe e movimento próprio, os ângulos envolvidos são muito pequenos (normalmente paralaxe e movimento próprio são medidos em milissegundos de arco), assim as medidas para quantificá-los devem ser extremamente precisas. As condições experimentadas em observatórios astronômicos terrestres, como a atmosfera perturbadora, a falta de visibilidade do céu e a flexão gravitacional e térmica dos telescópios, complicam as medições dos parâmetros de posição e dependentes do tempo. Com isso, realizar medições astrométricas a partir do espaço supera a maioria desses limites.

3.1.1 A missão astrométrica Hipparcos

Hipparcos foi a primeira missão espacial dedicada a medir a posição das estrelas. Lançado em agosto de 1989, Hipparcos mapeou com sucesso a esfera celeste por 3,5 anos antes do encerramento das operações em março de 1993. Os cálculos das observações feitas por seu instrumento principal geraram o catálogo Hipparcos de 118.218 estrelas, mapeadas com mais alta precisão. Um instrumento auxiliar identificou muito mais estrelas com precisão menor, mas ainda sem precedentes, gerando o catálogo Tycho, totalizando 1.058.332 estrelas. O catálogo Tycho-2, entregue em 2000, eleva o total para 2.539.913 estrelas e inclui 99% de todas as estrelas até magnitude 11, quase 100.000 vezes mais fraca que a estrela mais brilhante do céu, Sirius. (EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2020a)

Após o sucesso da missão espacial Hipparcos, diversas missões astrométricas foram propostas por várias agências espaciais, destacando-se a mais ambiciosa e recente missão GAIA (*Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*).

3.1.2 A missão astrométrica Gaia

Lançado em dezembro de 2013, com previsão de operação até dezembro de 2022, Gaia está fazendo um levantamento sistemático do céu, mapeando a posição, paralaxe e movimento próprio de um bilhão de estrelas, explorando cerca de 1% da população estelar de nossa galáxia. Com uma precisão astrométrica de até 0,00001 arcsec, 100 vezes mais do que Hipparcos, Gaia determinará as posições de estrelas a até 30.000 anos-luz de distância.

É previsto que no início da década de 2020, o catálogo final do Gaia seja publicado, quando desempenhará um papel central em muitos e variados campos da Astronomia. Mas até a geração final deste catálogo, estão planejados lançamentos periódicos de versões intermediárias dos dados já gerados pela missão. (EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2020b)

A versão mais recente do catálogo foi publicada em dezembro de 2020, chamada *Gaia Early Data Release 3 (Gaia EDR3)*, baseada nos dados de 34 meses da missão. Ela contém dados de estrelas até a magnitude 21 da banda G⁶, somando cerca de 1,8 bilhões de estrelas (EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2020b) (BROWN, 2018).

Estes dados estão disponíveis na plataforma VizieR e foram integrados à base de dados da ferramenta de cálculo do catálogo, sendo usados nas simulações realizadas pela ferramenta.

3.1.3 Seleção de dados para o sensor

A sensibilidade de detecção descrita em magnitude estelar refere-se à capacidade do sensor identificar estrelas mais fracas. Esta sensibilidade é um índice importante para caracterizar a capacidade de detecção de um sensor e para orientar a seleção das estrelas que formarão o catálogo embarcado. A sensibilidade de detecção de sensores é, em média, 6 de magnitude.

Mesmo dentre as estrelas as quais o sensor é capaz de identificar, quanto mais fraco é o brilho de uma estrela, menor é a relação sinal-ruído (SNR), por consequência o cálculo do seu baricentro será mais impreciso e a determinação da linha de visada ficará comprometida.

Além disso, o número de estrelas cresce exponencialmente com a magnitude, conforme pode ser observado na Figura 27. Isto gera um grande volume de dados ao trabalhar com estrelas de maior magnitude.

Como as estrelas muito fracas não são relevantes para o catálogo de referência da ferramenta, foram selecionadas apenas as estrelas que possuem magnitude visual inferior a 7.

⁶ Detalhes sobre o cálculo do brilho aparente das estrelas com base no sistema *Hipparcos* de magnitude encontram-se em (DI GENNARO, 2016)

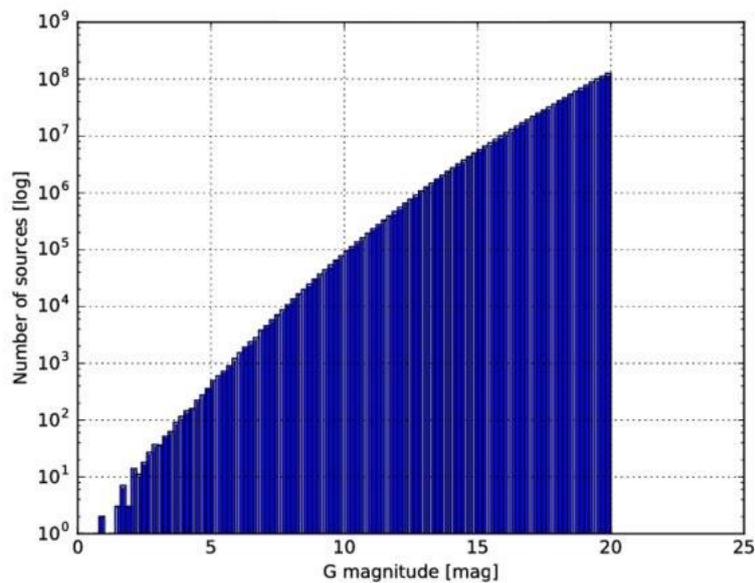


Figura 27 - Histograma da magnitude G das estrelas do Gaia. O número total de fontes é 1.069.138.714 que estão distribuídas em intervalos de $\Delta G = 0.2$

Fonte: (LURI et al., 2018)

Em contrapartida, as estrelas muito brilhantes quase sempre saturam o detector, degradando o cálculo da posição dos baricentros estelares. Assim, as estrelas com magnitude muito pequena também não são de interesse para o sensor estelar e por isso foram selecionadas apenas as estrelas com magnitude visual superior a 1 para pertencer ao catálogo de referência. A determinação precisa desse limite superior de magnitude deverá ser feita futuramente levando-se em conta o software de voo e sua precisão ao lidar com estrelas saturadas.

Uma vez selecionadas as estrelas que pertencerão ao catálogo de referência, deve-se escolher quais informações destas estrelas são mais relevantes para o cálculo do catálogo embarcado. Tais informações abordam distâncias, luminosidades, temperaturas, dentre outras. Os parâmetros mais importantes que são utilizados diretamente no cálculo do catálogo são a posição descrita em coordenadas equatoriais e a magnitude visual. Porém, outras informações que eventualmente possam ter alguma finalidade para a ferramenta foram extraídas da plataforma VizieR para compor o catálogo de referência. Além disso, conforme mencionado acima, o conjunto final de dados será decidido mais precisamente com base nos algoritmos do software de voo.

3.1.4 Estrelas plotadas em função das coordenadas equatoriais

Ao ter em mãos os dados das estrelas contidas no catálogo de referência, é importante visualizá-los, sobretudo a distribuição espacial de tais estrelas. Por isso, criou-se um algoritmo de

plot das estrelas em função de sua posição descrita em coordenadas equatoriais – ascensão reta e declinação, na época de J2000⁷, obtidas diretamente do catálogo, no qual cada estrela é representada por uma circunferência de tamanho proporcional à sua magnitude.

O sistema de coordenadas equatoriais é definido a partir do equador celeste e pólos celestes norte e sul, equivalente a tais pontos que são definidos sobre a superfície da Terra, porém sobre a esfera celeste. Dessa forma, a ascensão reta (α) é contada no sentido leste do plano do equador celeste, sendo a origem dessa contagem definida pelo ponto vernal (*ponto γ*), um dos pontos de intersecção entre o plano equatorial e o plano da eclíptica, enquanto a declinação (δ) é medida sobre o meridiano da estrela, com origem no equador e extremidade no astro.

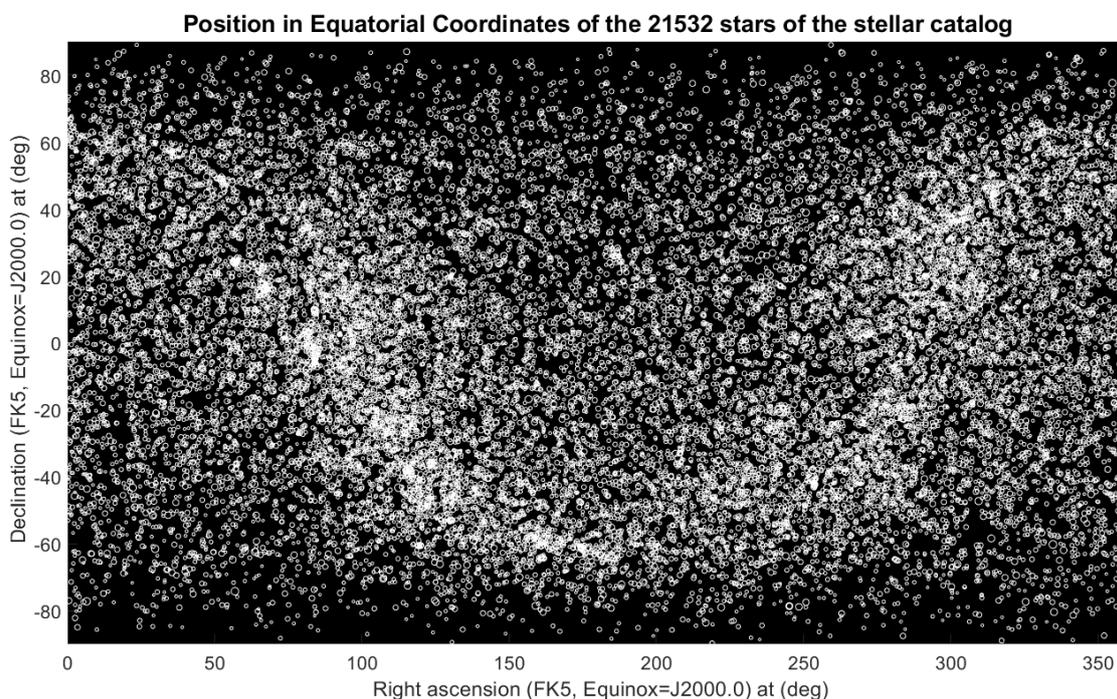


Figura 28 - Plot das estrelas do catálogo Gaia em função de suas coordenadas equatoriais

3.1.5 Visualização em coordenadas eclípticas e galácticas

Também é útil visualizar as estrelas em outros sistemas de coordenadas que não o equatorial.

O sistema de coordenadas eclípticas tem como plano de referência a eclíptica celeste e origem também o ponto vernal. Assim, a longitude eclíptica (λ) é, como a ascensão reta, medida

⁷ Corresponde às posições das estrelas na data gregoriana de 1° de janeiro de 2000, 11:58:55.816 UTC – Tempo Universal Coordenado.

a partir do ponto vernal, crescendo em direção ao Leste, enquanto a latitude eclíptica (β) é medida a partir da eclíptica, sendo positivo em direção ao polo Norte celeste.

Para converter as coordenadas equatoriais do catálogo de referência em coordenadas eclípticas foi deduzida a seguinte equação de transformação:

$$tg(\lambda) = \frac{sen(\alpha) \cdot cos(\varepsilon) + tg(\delta) \cdot sen(\varepsilon)}{cos(\alpha)} \quad (1)$$

$$sen(\beta) = sen(\delta) \cdot cos(\varepsilon) - sen(\alpha) \cdot cos(\delta) \cdot sen(\varepsilon) \quad (2)$$

Em que (α, δ) são as coordenadas equatoriais e ε é a obliquidade da eclíptica, isto é, o ângulo entre o plano do equador celeste e da eclíptica ($\varepsilon \approx 23,4^\circ$).

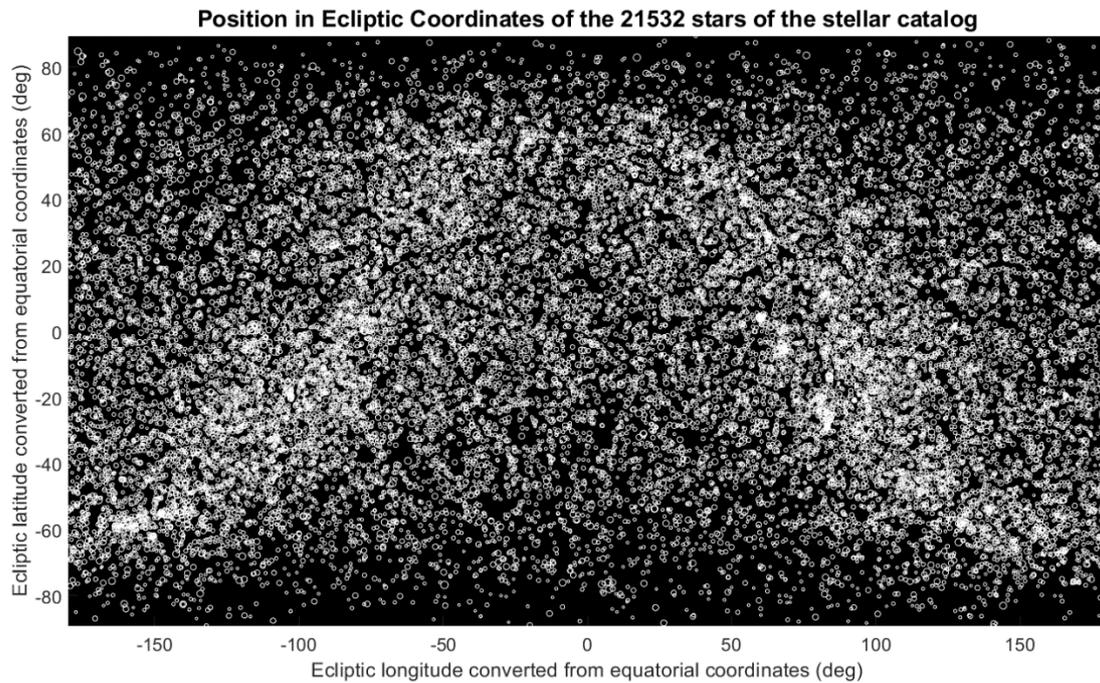


Figura 29 - Plot das estrelas do catálogo Gaia em função de suas coordenadas eclípticas

Enquanto o sistema de coordenadas galácticas tem como referência o plano do disco da Via Láctea, chamado Equador Galáctico, a origem é definida pela direção do centro galáctico, que se encontra na constelação de Sagitário. Dessa forma, a longitude galáctica (l) mede a distância angular ao longo do Equador Galáctico a partir do centro galáctico e a latitude galáctica (b) mede o ângulo entre o objeto celeste e o plano do Equador Galáctico.

A conversão de coordenadas equatoriais para galácticas também foi desenvolvida e se dá pela seguinte transformação:

$$sen(b) = cos(\alpha - \alpha_G) \cdot cos(\delta) \cdot cos(\delta_G) + sen(\delta) \cdot sen(\delta_G) \quad (3)$$

$$\text{sen}(l_{NCP} - l) = \frac{\cos(\delta) \cdot \text{sen}(\alpha - \alpha_G)}{\cos(b)} \quad (4)$$

$$\cos(l_{NCP} - l) = \frac{\text{sen}(\delta) \cdot \cos(\delta_G) - \text{sen}(\delta_b) \cdot \cos(\alpha - \alpha_G) \cdot \cos(\delta)}{\cos(b)} \quad (5)$$

Em que, $(\alpha_G, \delta_G) \approx (192,9^\circ; 27,1^\circ)$ são as coordenadas equatoriais do polo norte galáctico e $l_{NCP} \approx 122,9^\circ$ é a longitude galáctica do polo norte celeste.

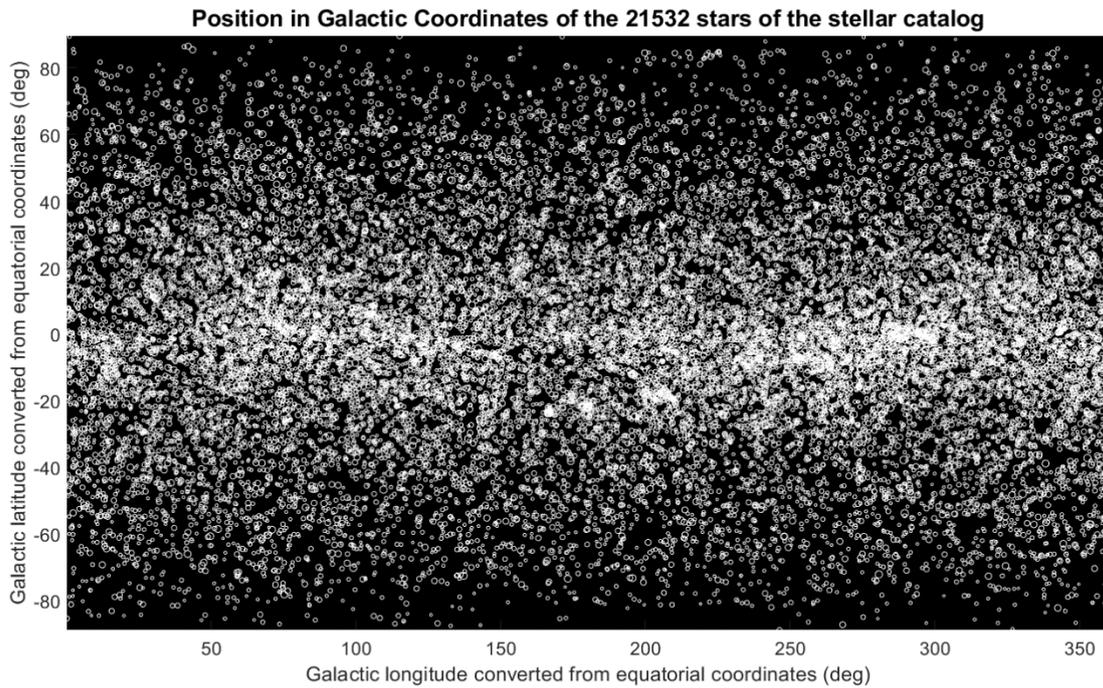


Figura 30 - Plot das estrelas do catálogo Gaia em função de suas coordenadas galácticas

Como pode-se observar na Figura 30, a maioria dos objetos celestes vistos a partir do sistema solar possuem latitude galáctica próxima a zero, isto é, se concentra no plano da Via Láctea.

Também pode ser conveniente visualizar as estrelas projetando-as na própria esfera celeste, como ilustrado na figura abaixo.

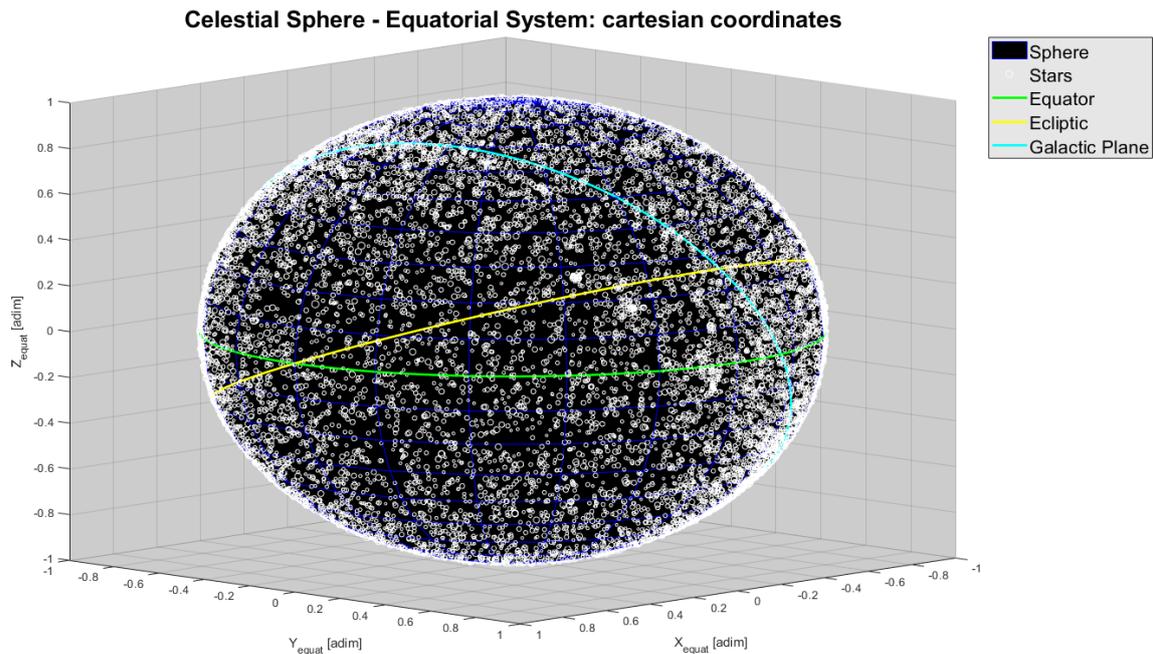


Figura 31 - Mapa estelar projetado na esfera celeste

3.1.6 *Mapa de densidade estelar*

A fim de visualizar a quantidade de estrelas contidas no catálogo e identificar as regiões mais críticas do céu devido à falta de objetos de referência, implementou-se um algoritmo de plot da densidade estelar da esfera celeste. Para isso, a esfera celeste é discretizada e em cada ponto é determinada a quantidade de alvos no interior do campo de visada do sensor, de modo a ser possível exibir esta informação em formato de mapa celeste das estrelas vistas pelo sensor.

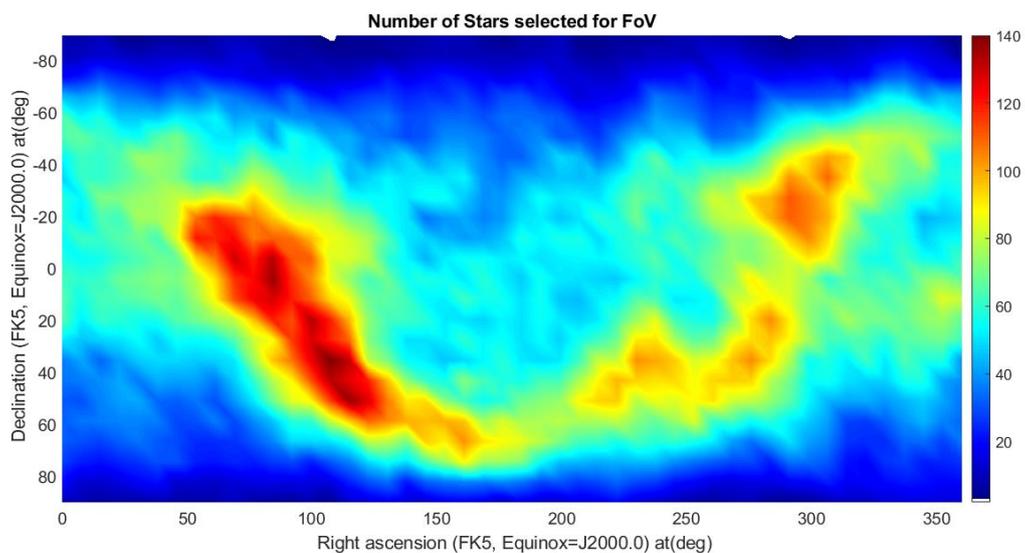


Figura 32 - Plot da densidade estelar (estrelas/FoV) do catálogo Gaia

3.2 SISTEMA ÓPTICO E DETECTOR

3.2.1 Baffle

Nem toda a luz que atinge o sensor estelar é referente aos alvos de interesse para o cálculo de atitude. Para os satélites em órbita baixa, o brilho da Terra e do Sol são as principais fontes de radiação difusa e deve-se evitar submergir a luz das estrelas com essas fontes de luz dispersa. Embora essa luz difusa não possa ser completamente eliminada, por mais rigoroso que seja o design óptico, ela pode ser reduzida a um nível que é insignificante para a maioria das direções de apontamento do sensor. Para isso, uma estrutura mecânica denominada *baffle* é acoplada ao sistema óptico para bloquear a entrada de luz que vem de fora do campo de visada do sensor (MOHAMMADNEJAD; MADINEH; NASIRI SARVI, 2012).

Sucintamente o *baffle* é uma estrutura em formato cônico, cuja abertura e saída são alinhadas com o eixo óptico, que contém fendas circulares (*vanes*) idealmente espaçadas anexas à carcaça cônica.

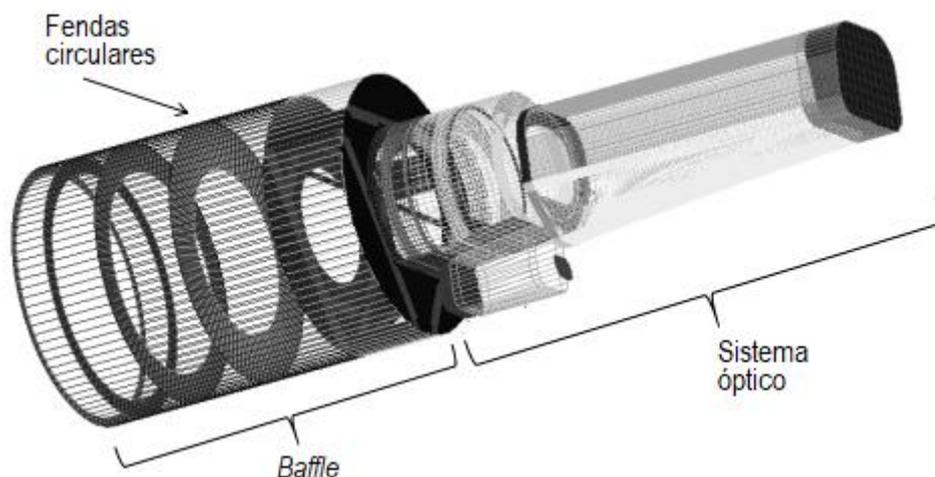


Figura 33 - Modelo do baffle e sistema óptico do satélite CoRoT gerado no software ASAP para análise da luz dispersa

Fonte: Adaptado de (PLESSERIA et al., 2003)

O algoritmo que implementa o modelo matemático do *baffle* será desenvolvido em trabalho externo a este e posteriormente integrado a ferramenta de cálculo do catálogo.

3.2.2 Modelagem da PSF

Conforme mencionado na seção 2.3.2.1, a passagem de luz por um sistema óptico provoca sua dispersão sobre o detector, devido à difração da luz ao passar pela abertura do telescópio. Este fenômeno pode ser modelado por uma PSF (*Point Spread Function*).

Quando o instrumento está instalado em solo, as distorções introduzidas pela atmosfera da Terra são maiores que a dispersão causada pelo sistema óptico. Tal fenômeno é denominado *seeing* e sua modelagem é ainda mais sofisticada. Por isso, na maioria das vezes, sua resolução angular é aproximada por um valor constante. Para instrumentos espaciais, como o caso do sensor, se considerarmos o sistema óptico ideal, a resolução espacial do objeto observado é limitada pelo efeito da difração. Então, uma modelagem mais rigorosa da PSF gerada por um sistema óptico ideal pode-se basear nas formulações da difração de Fraunhofer para uma abertura circular.

O padrão de difração resultante de uma lente perfeita com abertura circular iluminada uniformemente tem uma região central de brilho, chamada Disco de Airy e, junto com uma série de anéis concêntricos ao redor desse disco, forma o conhecido Padrão de Airy.

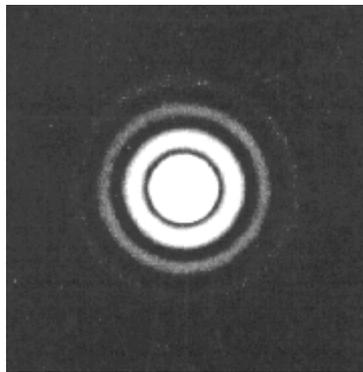


Figura 34 - Padrão de Airy

Fonte: UCLA Brain Research Institute

A fórmula matemática que descreve a intensidade do padrão de Airy é dada por:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{2J_1\left(\frac{2\pi r}{\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{2\pi r}{\lambda} \sin\theta} \right]^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(x)}{x} \right]^2 \quad (6)$$

Em que I_0 é a máxima intensidade do padrão no centro do disco, J_1 é a função de Bessel de primeira ordem, λ é comprimento de onda da fonte de luz, r é o raio da abertura circular e θ é o ângulo de observação,

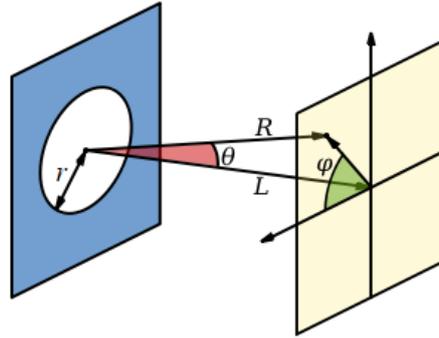


Figura 35 - Variáveis de um sistema óptico contendo abertura circular

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Airy_disk

Os zeros da função de Bessel $J_1(x)$ que correspondem aos pontos de mínima intensidade (interferência completamente destrutiva no padrão de difração) estão em $x \approx 3,8317; 7,0156; 10,1735 \dots$, sendo $x = \frac{2\pi r}{\lambda} \sin\theta$. Assim, o primeiro disco do padrão de difração ocorre em:

$$\frac{2\pi r}{\lambda} \sin\theta = 3,8317 \rightarrow \sin\theta = \frac{3,8317\lambda}{2\pi r} \rightarrow \sin\theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (7)$$

sendo $d = 2r$ o diâmetro da abertura circular. Conforme pode ser deduzido da Figura 35, o raio q_1 deste disco no plano focal do sistema óptico é dado por:

$$q_1 = R \sin\theta \approx R 1,22 \frac{\lambda}{d} = 1,22 \frac{\lambda}{2A} \quad (8)$$

em que A é a abertura numérica do sistema óptico, dada por:

$$A = \frac{r}{R} = \frac{r}{\sqrt{f^2 + r^2}} = \frac{1}{\sqrt{4N^2 + 1}} \quad (9)$$

em que $N = \frac{f}{D}$ representa a razão focal ou *f-number* do sistema ótico (GIANCOLI, 2014).

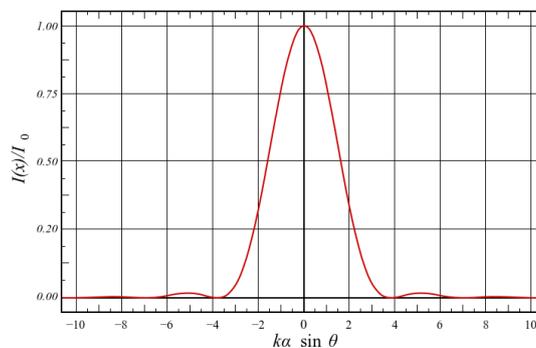


Figura 36 - Padrão de Airy em $krsin\theta = [-10, 10]$

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Airy_disk

A maior parte da intensidade luminosa do padrão concentra-se nos primeiros discos, de forma que as energias totais contidas dentro do primeiro, segundo e terceiro discos são 83,8%, 91,0% e 93,8% respectivamente (AIRY, 1835). Assim, uma alternativa à modelagem da intensidade é desconsiderar os anéis externos e aproximarmos o lobo central a uma gaussiana, que é dada por:

$$I(q) \approx I_0' \exp\left(\frac{-q^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

Sendo I_0' a irradiância no centro do padrão, q o raio do lobo central e σ o desvio-padrão da gaussiana em uma dimensão.

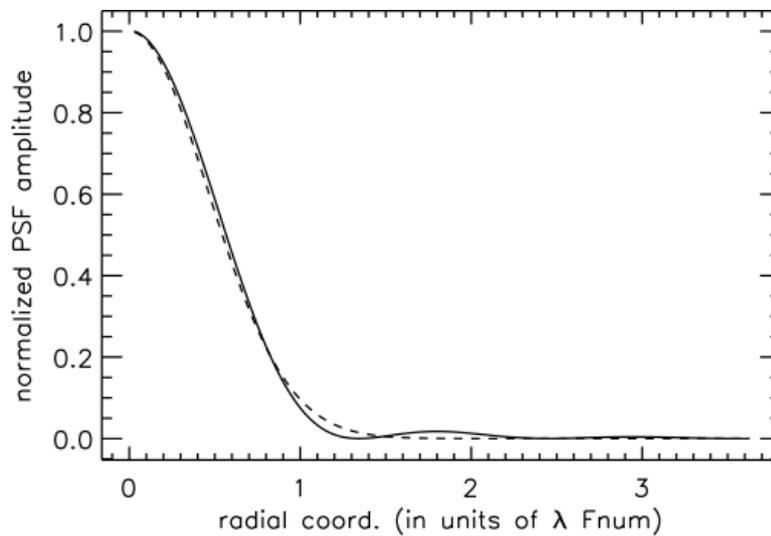


Figura 37 - Seção radial do padrão de Airy (curva sólida) e sua aproximação gaussiana (curva tracejada)

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Airy_disk

Dessa forma, uma primeira aproximação da PSF gerada pelo sistema óptico do sensor foi descrita como uma gaussiana bidimensional normalizada:

$$f_{PSF_{gaussiana}}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-x_0}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right]} \quad (11)$$

Em que $f_{PSF_{gaussiana}}(x, y)$ representa a intensidade normalizada de luz no ponto (x, y) , (x_0, y_0) é a coordenada do centro da estrela e (σ_x, σ_y) é o desvio padrão nas duas direções, simulando a dispersão de luz do sistema óptico.

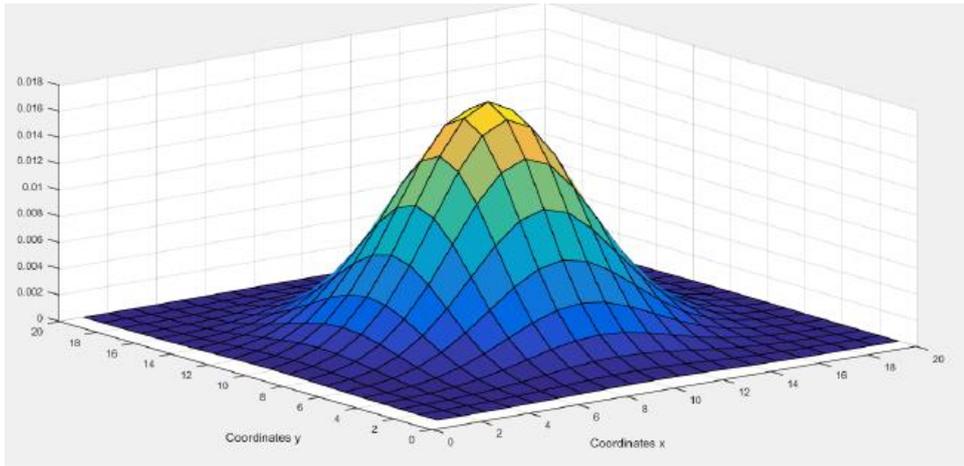


Figura 38 - PSF aproximada por uma gaussiana bidimensional normalizada gerada pela ferramenta

Fonte: (BÜRGER, K. C; CAMELO, P. S; GOUVEIA, 2018)

3.2.2.1 Discretização e posicionamento sobre o detector

A imagem capturada pelo detector não é exatamente a PSF instrumental modelada acima, mas é sua função amostrada pelo detector, isto é, uma PSF discretizada. Então, a PSF efetivamente vista também é descrita em função da dimensão e quantidade de pixels do detector. (ANDERSON; KING, 2010)

Sendo (i_c, j_c) o centro da estrela em coordenadas do detector, a função que descreve a intensidade luminosa normalizada capturada pelo pixel (i, j) é dada por:

$$f_{PSF_{discretizada}}(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_i^2 + \sigma_j^2)}} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{i-i_c}{\sigma_i}\right)^2 + \left(\frac{j-j_c}{\sigma_j}\right)^2\right]} \quad (12)$$

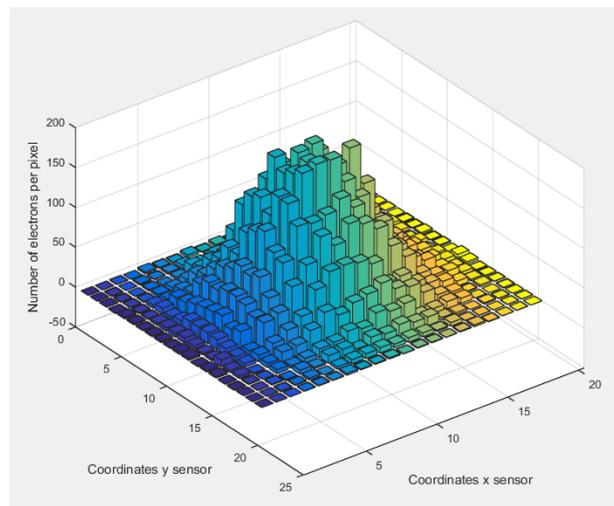


Figura 39 - PSF discretizada gerada pela ferramenta com base na resolução do detector

Fonte: (BÜRGER, K. C; CAMELO, P. S; GOUVEIA, 2018)

A Figura 39 ilustra uma PSF discretizada desnormalizada pois sua função normalizada é multiplicada pelo número de fótons referente à estrela observada, resultante da seguinte função:

$$f_{PSF_{estrela}} = N_{elétrons} \cdot f_{PSF_{discretizada}}(i, j) \quad (13)$$

Sendo o número $N_{elétrons}$ calculado conforme a equação (8) da subseção 3.2.6 mais à frente.

3.2.3 Design óptico

Dentre os parâmetros que compõem o design óptico do sensor estelar estão o tamanho do campo de visada (FoV), a abertura da sua pupila (A_0), a configuração do detector em relação ao campo de visada (inscrito ou circunscrito) e a posição do bloco focal em relação às lentes do sensor (comprimento focal). Tais parâmetros interferem diretamente na quantidade e qualidade de informação que pode ser obtida de uma imagem do campo estelar detectada pelo sensor, além do projeto de tais parâmetros estarem intrinsecamente relacionados entre si.

O FoV normalmente é especificado em sua abertura horizontal ($hFoV$) e vertical ($vFoV$), a depender de sua configuração em relação ao detector, ou ainda pelo seu diâmetro ($dFoV$).

Quando o detector é circunscrito ao campo de visada, configuração mais comum entre os sensores, a abertura do campo de visada normalmente é especificada apenas em um único FoV , uma vez que $hFoV$, $vFoV$ e $dFoV$ são iguais.

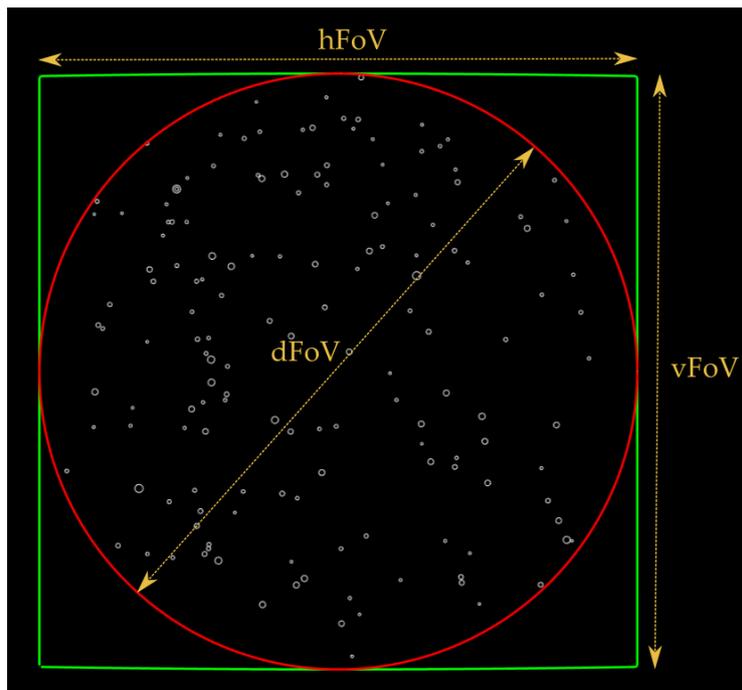


Figura 40 – Configuração em que detector está circunscrito ao campo de visada, especificado único FoV

Enquanto que a configuração em que o detector está inscrito no campo de visada, as medidas da abertura horizontal e vertical são diferentes do diâmetro da abertura. Assim, o $hFoV$ e $vFoV$ referem-se à medida angular do detector e o $dFoV$ à medida do diâmetro do campo de visada.

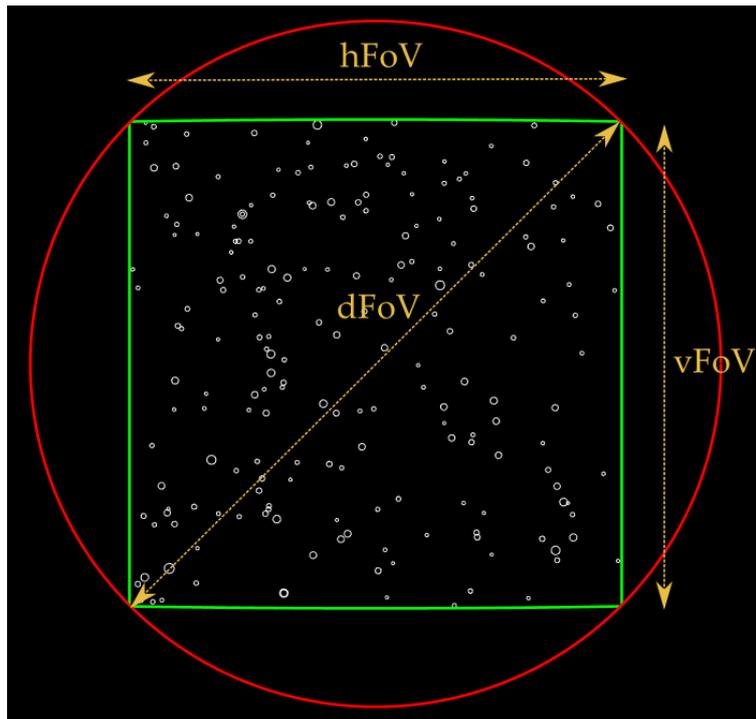


Figura 41 - Configuração em que detector está inscrito no campo de visada. Assim, medidas de hFoV e vFoV são diferentes de dFoV

Em comparação com os telescópios espaciais, a abertura angular do campo de visada de um sensor de estrelas quase sempre é bem maior, para que assim o sensor tenha mais estrelas em seu campo de visada e a região do céu onde o sensor não tenha estrelas suficientes para o cálculo da linha de visada seja menor. Isso aumenta a distorção óptica na imagem projetada no detector e demais aberrações, que podem ser em partes corrigidas na fase de processamento de imagem. Como essas distorções dependem da linha de visada atual do sensor, não foram consideradas no cálculo do catálogo embarcado.

O tamanho da abertura da pupila (A_0) é um parâmetro bastante importante no design do sensor pois determina a quantidade de radiação que entra no sistema óptico. Relacionado ao tamanho do FoV , é definido na fase de projeto do sensor.

A partir da definição da configuração e tamanho do detector e do campo de visada, pode-se calcular o comprimento focal do sistema óptico, considerando que o detector deva ser posicionado no plano focal do sensor.

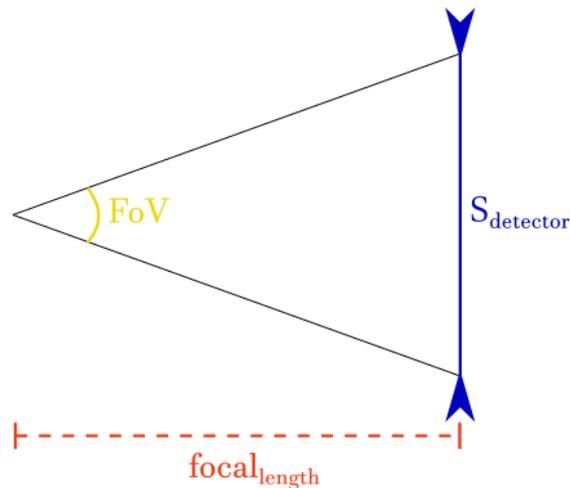


Figura 42 - Esboço do posicionamento do detector em relação ao plano focal do sensor

Pelo esboço da figura, pode-se deduzir a seguinte expressão do comprimento focal:

$$focal_{length} = \frac{S_{detector}}{2 \cdot \tan\left(\frac{FoV}{2}\right)} \quad (14)$$

em que $S_{detector}$ é o tamanho físico do detector e é calculado multiplicando a quantidade de pixels em uma dimensão do detector pelo tamanho de cada pixel ($S_{detector} = resolução_{detector} \cdot S_{pixel}$).

Na ferramenta de cálculo do catálogo é possível especificar a configuração do detector, o tamanho do FoV, o diâmetro da pupila e, conseqüentemente, o comprimento focal.

3.2.4 Transmissão óptica

A óptica do sensor também é modelada em função da sua área coletora de fótons (abertura do instrumento) e seu coeficiente de transmissão óptica. Este último descreve a relação da quantidade de luz incidente $I_0(\lambda)$ pela quantidade de luz $I(\lambda)$ que atravessa o sistema óptico e atinge o detector. Seu valor varia entre 0 e 1. Quanto maior o coeficiente, mais transparente o sistema óptico será e maior será a quantidade de luz que o atravessa (DI GENNARO, 2016).

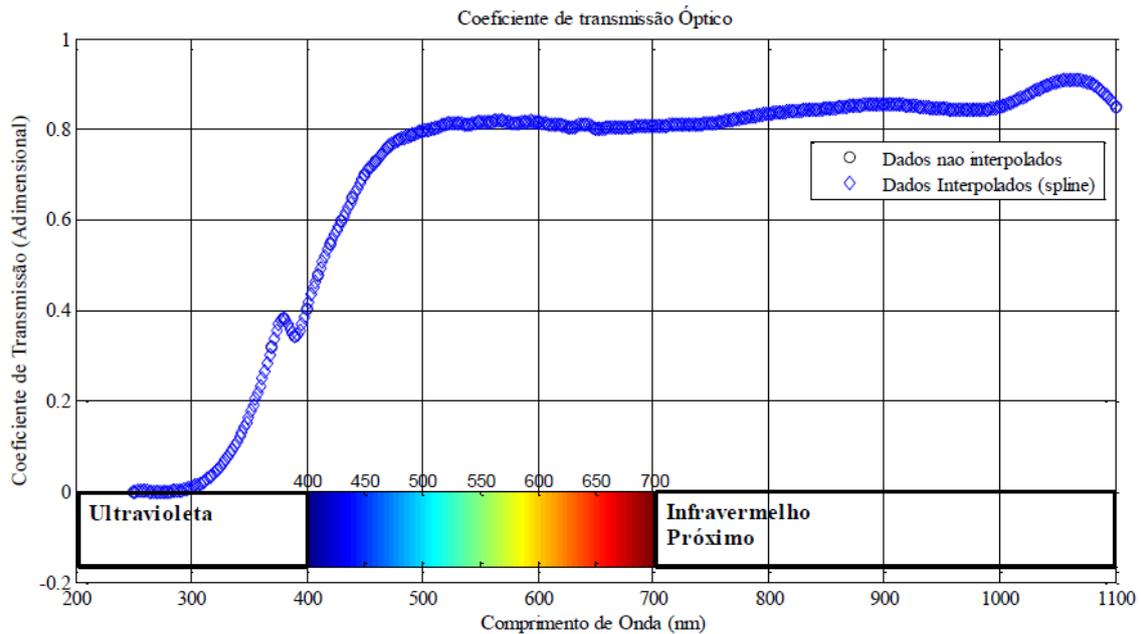


Figura 43 - Curva do coeficiente de transmissão óptica do satélite CoRoT

Fonte: (DI GENNARO, 2016)

Para efeito de simulação, a ferramenta do catálogo carrega curvas de transmissão óptica do satélite CoRoT contidas no banco de dados do simulador do sensor de estrelas. Todavia, a curva de qualquer sistema óptico pode ser carregada desde que esteja em formato conveniente.

3.2.5 Eficiência quântica do detector

O desempenho do sensor estelar também depende da eficiência quântica do detector, isto é, a sensibilidade do sensor em relação à luz que o atinge. A eficiência quântica é uma propriedade da resposta fotovoltaica do detector, definida como o número de elétrons criados e lidos satisfatoriamente pelo dispositivo para cada fóton coletado pelo sistema óptico.

Dessa forma, a escolha do modelo do detector levará em conta sua eficiência quântica.

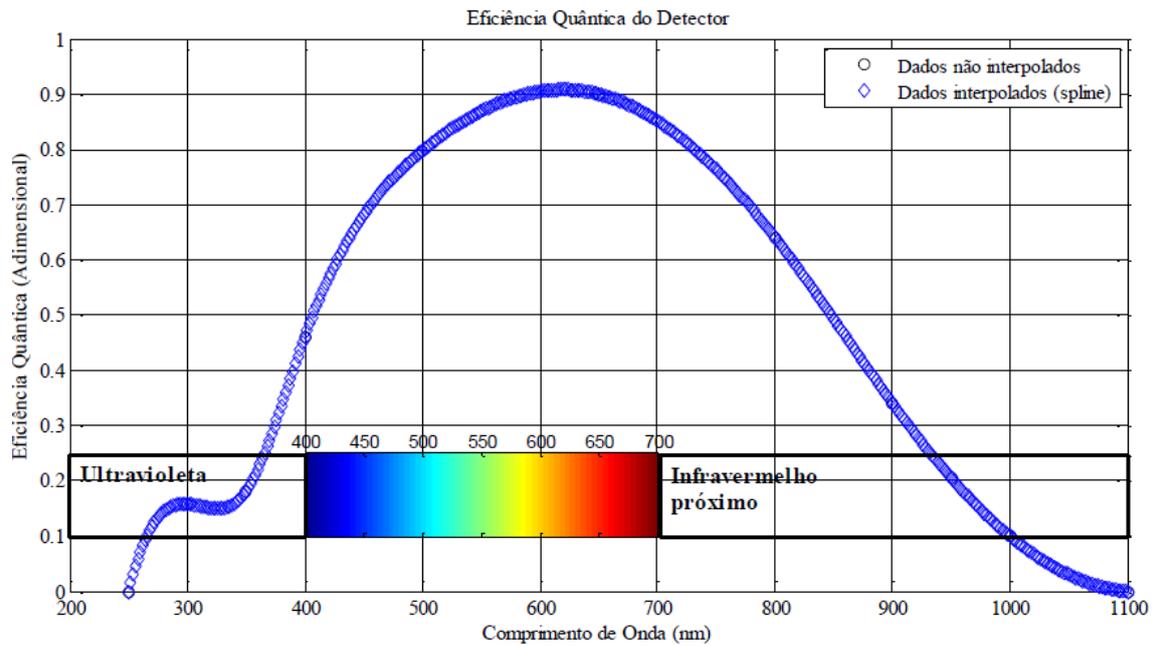


Figura 44 - Eficiência Quântica do CCD modelo 42-80 B1, e2v, Inglaterra

Fonte: (DI GENNARO, 2016)

Para efeito de simulação, a ferramenta carrega curvas de eficiência quântica de detectores CCD e APS fabricados pela Teledyne E2V contidas no banco de dados do simulador do sensor de estrelas.

A medida da resposta da câmera do sensor é um importante parâmetro de um sensor estelar e é obtida pela multiplicação da transmissão óptica pela eficiência quântica do detector, conforme observado na Figura 45.

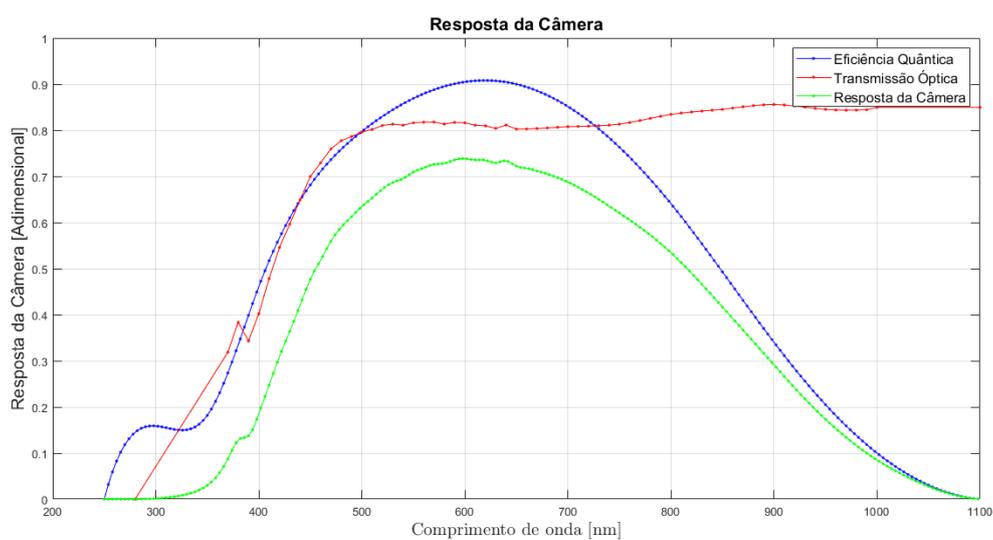


Figura 45 - Exemplo de cálculo da resposta da câmera a partir da eficiência quântica e transmissão óptica

3.2.6 Número de fótons

A quantidade de elétrons lida pelo detector não depende apenas do sistema óptico e de detecção, mas também evidentemente do fluxo de fótons gerado por cada estrela. Assim, a determinação do número de fótons que atinge o sistema óptico é um parâmetro importante na identificação de estrelas e conseqüentemente na determinação da linha de visada do satélite.

O algoritmo que determina o número de fótons gerado por cada estrela e lido pelo detector foi desenvolvido em trabalho de mestrado realizado pelo aluno Thiago di Gennaro (DI GENNARO, 2016) e foi integrado na ferramenta de cálculo de catálogo embarcado.

Este algoritmo determina o fluxo estelar, fator dependente de diversos parâmetros das estrelas como temperatura efetiva, magnitude, metalicidade e gravidade. Para este cálculo, o algoritmo utiliza os modelos atmosféricos estelares contidos no Catálogo Atlas 9 (INSTITUTE SPACE TELESCOPE SCIENCE (STSCI), 2004).

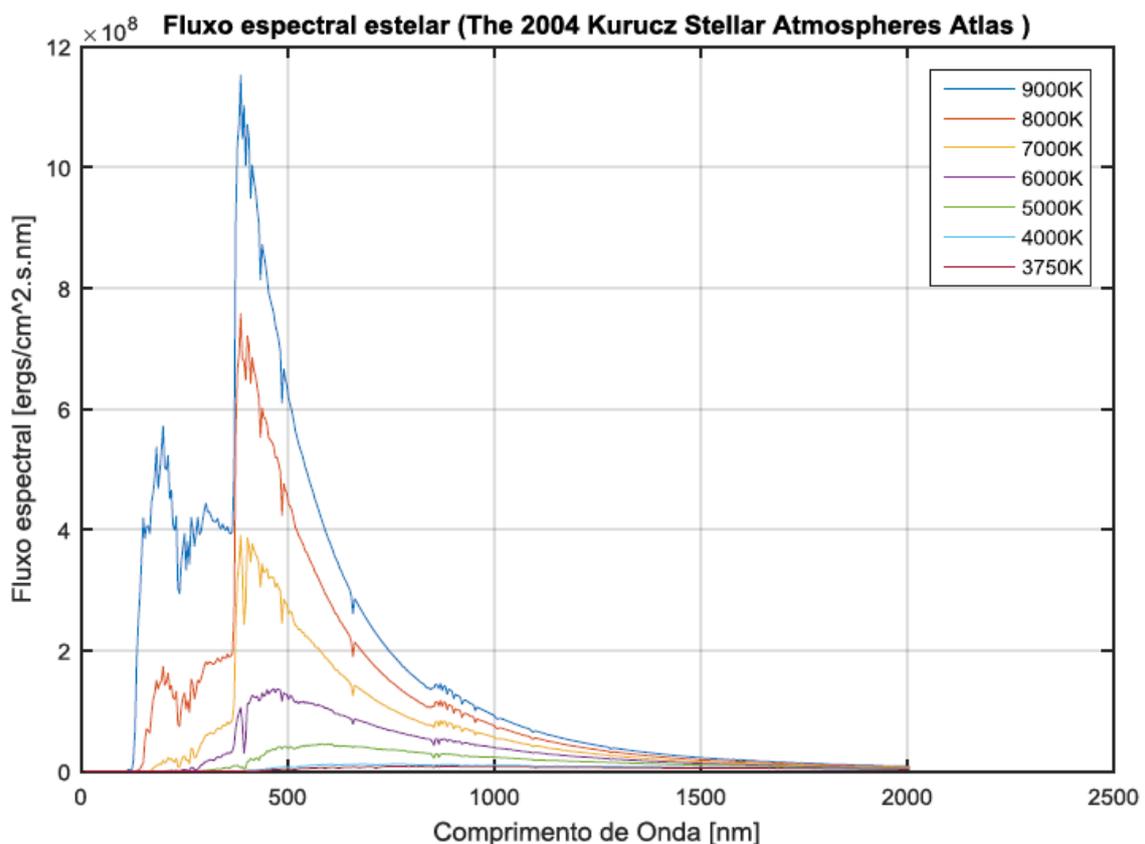


Figura 46 - Fluxos estelares do Atlas 9 para uma faixa de temperatura de 3750 a 9000K

Fonte: (DI GENNARO, 2016)

Então, a partir do fluxo estelar, magnitude visual e parâmetros construtivos do sensor pode-se obter uma expressão geral para a quantidade de fótons que atinge o detector:

$$f\acute{o}tons = A_0 t_i f(m_v, f_\lambda, T_{ef}) \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f_\lambda(\lambda) \tau_a(\lambda) QE(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (15)$$

Onde:

- A_0 é a área de abertura da pupila do sensor (cm^2);
- t_i é o tempo de exposição da foto (s);
- λ é o comprimento de onda (nm);
- f_λ é o fluxo estelar gerado pelo Atlas 9 (erg/cm^2sA);
- τ_a é o coeficiente de transmissão ótica;
- QE é a eficiência quântica do detector;
- m_v é a magnitude visual;
- $\frac{\lambda}{hc}$ é o inverso da energia do fóton (erg);
- λ_{min} e λ_{max} são os limites inferior e superior em comprimento de onda da resposta espectral do sensor (nm).

Conforme a equação acima, o cálculo do número de fótons é feito em função da magnitude visual da estrela, parâmetro fotométrico que é medido considerando a emissão luminosa da estrela na banda de comprimento de onda visível, de acordo com o chamado sistema fotométrico de magnitudes Johnson V (JOHNSON, H. L. & MORGAN, 1953).

O catálogo de referência *Hipparcos* contém as medidas de magnitude na banda V (medidas entre 500 e 600nm). Já o Gaia, catálogo mais atual que foi usado como referência nas simulações da ferramenta, disponibiliza apenas a magnitude das estrelas medida em relação à banda G (comprimento de onda da luz verde). Embora o espectro centrado no visível seja muito semelhante ao centrado na banda G, seus valores não são exatamente os mesmos. Neste trabalho, o algoritmo implementado na ferramenta considera os dois valores como equivalentes, e assim o número de fótons é calculado em função da magnitude G. Trabalhos futuros a este poderão ser realizados para estudar tais diferenças no sistema métrico de magnitudes e posteriormente integrar estes resultados na ferramenta de cálculo do catálogo (EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2020c) (MARCHIORI et al., 2019).

Este algoritmo de cálculo do número de fótons, devido à necessidade de se carregar diversos modelos estelares para todas as estrelas do catálogo, consome muito tempo. Por isso, trabalhos futuros a este poderão desenvolver otimizações neste algoritmo, tornando mais viável o seu uso pela ferramenta. Por hora, uma alternativa à otimização deste cálculo foi a aproximação do número de fótons em função da magnitude visual de cada estrela por um espectro do tipo solar.

3.2.6.1 Aproximação do número de fótons a partir de uma estrela do tipo solar

Pode-se obter o valor aproximado do número de fótons a partir de uma estrela de tipo solar (tipo G) com magnitude aparente $m_v = 0$. Como se trata de um tipo abundante de estrelas

na via Láctea, faz-se, portanto, a hipótese de que qualquer estrela observada pelo sensor terá um espectro de emissão de luz do tipo solar.

Sendo $fótons_{G0}$, o número médio de fótons em $fótons/seg/cm^2$ que atinge o sensor para uma estrela do tipo solar (tipo G) e magnitude $m_v = 0$, na faixa de sensibilidade da câmera, calculamos C :

$$C = 2.5 \cdot \log(fótons_{G0}) \quad (16)$$

Com $fótons_{G0} = 6.390.000 \text{ fótons/seg/cm}^2$

Para uma estrela de magnitude mv qualquer, vale que:

$$fótons_* = 10^{\left(\frac{mv-C}{-2.5}\right)} \quad (17)$$

Sendo $fótons_*$, o número médio de fótons em $fótons/seg/cm^2$ que atinge o sensor para uma estrela do tipo solar e magnitude mv , na faixa de sensibilidade da câmera.

Por fim, o número de elétrons (ou fótons) $N_{elétrons_{detec}}$ que é detectado pela câmera por imagem será dado por:

$$N_{elétrons_{detec}} = fótons_* \cdot A_0 \cdot t_i \cdot OE \quad (18)$$

Com $N_{elétrons_{detec}}$ expresso em $e - /imagem$ e OE a eficiência ótica (*Optical Efficiency*), uma porcentagem representando a resposta média da câmera $\tau_a \cdot QE$.

A partir do número de fótons calculados para cada estrela, pode-se obter PSFs desnormalizadas associadas às estrelas, descrevendo finalmente a estrela vista no detector em função do fluxo estelar, sistema óptico e de detecção, conforme descrito na seção 3.2.2.

3.2.7 Ruído de fóton (*photon/shot noise*)

O processo de contagem de fótons-elétrons em um detector possui um ruído associado, de forma que cada fóton esperado no detector calculado pela equação (18) acima pode ser detectado ou não. Além disso, a detecção de um fóton é independente de outros fótons detectados em quaisquer intervalos de tempo e a probabilidade de um fóton ser detectado duas vezes é nula. Logo, o número de fótons detectados segue uma distribuição de Poisson, sendo esta uma extensão da distribuição binomial no caso de um grande número de eventos.

A probabilidade de um fóton ser detectado é:

$$f(k, \mu_N) = \frac{e^{-\mu_N} \mu_N^k}{k!} \quad (19)$$

E a variância é dada por:

$$\sigma^2(k) = E(k^2) - (E(k))^2 \quad (20)$$

sendo $E(k^2) = \mu_N^2 + \mu_N$. Então:

$$\sigma^2(k) = \mu_N^2 + \mu_N - \mu_N^2 \rightarrow \sigma^2(k) = \mu_N \quad (21)$$

Em que μ_N é o número esperado de fótons detectados calculado pela equação acima.

Logo, se detectarmos N fótons, o desvio padrão será de $\sigma = \sqrt{N}$.

3.2.8 Corrente de Escuro

Todo material a uma temperatura muito acima do zero absoluto estará sujeito a ruído térmico. Em especial, a geração térmica de elétrons no silício de um CCD é uma forte função da temperatura, razão pela qual o uso astronômico deste detector geralmente exige alguma forma de resfriamento (HOWELL, 2006).

A figura a seguir mostra uma curva típica da corrente de escuro de um CCD em função de sua temperatura operacional.

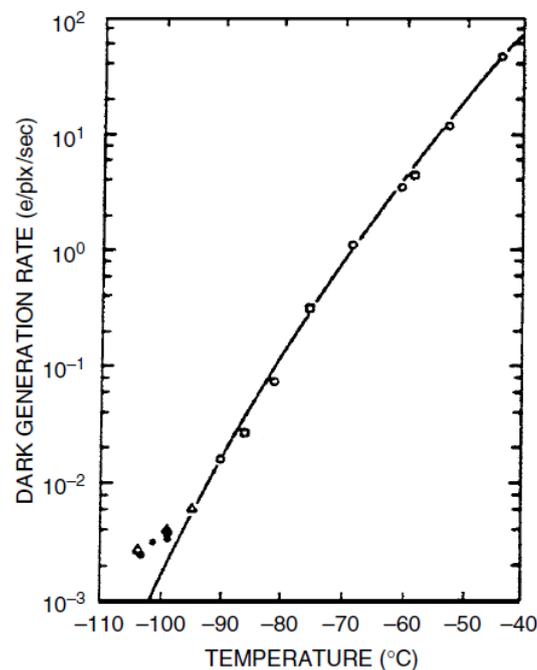


Figura 47 - Resultados experimentais (símbolos) e teóricos (linha) da corrente de escuro gerada em um CCD típico

Fonte: Adaptado de (HOWELL, 2006)

Corrente de escuro (*dark current*) é usualmente especificada como o número de elétrons térmicos gerado por segundo por pixel ($e^-/pixel/sec$). Assim, foi implementada a função que determina o valor da corrente de escuro a partir de um valor simulado da temperatura de operação

do sensor. Integrando este valor com o tempo de exposição do sensor, também simulado na ferramenta, foi adicionada a quantidade de elétrons por pixel gerada no detector a cada imagem captada.

3.3 FUNDO DE CÉU

O fundo de céu refere-se à luminosidade do céu aparentemente vazio, isto é, que não é originada de nenhum objeto astronômico especificamente. Para instrumentos de observação espacial, como no caso do sensor estelar, que são livres de ruídos causados pela atmosfera, as principais causas da luminosidade de fundo de céu são a luz zodiacal e a luminosidade de albedo terrestre.

Na ferramenta do catálogo, para simular o efeito do fundo de céu, foi integrado o cálculo da luz zodiacal desenvolvido em trabalho de doutorado do aluno Victor Marchiori (MARCHIORI et al., 2019).

3.3.1 Luz Zodiacal

A luz zodiacal é caracterizada como um brilho fraco, difuso e que se estende na direção do Sol e das constelações do Zodíaco, abrangendo o plano da eclíptica. Ela é formada pela luz solar espalhada por pequenas partículas de poeiras existentes no sistema solar, chamada poeira interplanetária (DUMONT; LEVASSEUR-REGOURD, 1981).

Em geral a luz zodiacal é bastante fraca quando comparada à maioria das estrelas vistas pelo sensor estelar, porém, este ruído aumenta quando o satélite aponta para perto do Sol (WANG et al., 2017). MARCHIORI et al., 2019 apresenta o cálculo para a luz zodiacal que detalharemos a seguir.

Comumente, a luz zodiacal é expressa na unidade S_{10} , que é o número de estrelas do tipo solar de magnitude visual 10 por grau quadrado (deg^2 , ou o equivalente no SI $3,046 \times 10^{-4} \text{sr}$) necessárias para produzir tal brilho. Partindo desta definição e do cálculo da magnitude visual, pode-se deduzir o equivalente a esta unidade no SI em função do espectro solar, denotado por $F_{\odot}(\lambda)$.

$$MV_{S10} = -2,5 \log \left(\frac{F_{S10}(\lambda)}{F_{ref}} \right); MV_{\odot} = -2,5 \log \left(\frac{F_{\odot}(\lambda)}{F_{ref}} \right) \rightarrow$$

$$MV_{S10} - MV_{\odot} = -2,5 \log \left(\frac{F_{S10}(\lambda)}{F_{\odot}(\lambda)} \right) \rightarrow 10^{MV_{S10} - MV_{\odot}} = \left(\frac{F_{S10}(\lambda)}{F_{\odot}(\lambda)} \right)^{-2,5} \rightarrow$$

$$F_{S_{10}}(\lambda) = 10^{-0,4(MV_{S_{10}}-MV_{\odot})} F_{\odot}(\lambda) \quad (22)$$

Considerando que o Sol possui magnitude visual igual a $MV_{\odot} = -26,74$ e $MV_{S_{10}} = 10$ e que 1 deg^2 é equivalente a $3,046 \times 10^{-4} \text{ sr}$ no SI:

$$1 S_{10} = \frac{F_{S_{10}}(\lambda)}{1 \text{ deg}^2} \rightarrow 1 S_{10} = 6,61 \times 10^{-12} F_{\odot}(\lambda) \text{ sr}^{-1} \quad (23)$$

LEINERT et al., 1998 tabelou o brilho da luz zodiacal visto a partir da Terra no comprimento de onda de 500nm em função do ângulo de alongação em relação ao Sol ($\lambda - \lambda_o$), expresso por f_{ZL} e em unidades S_{10} . Com isso, a expressão para calcular o brilho zodiacal que atinge o sistema óptico e é detectado pelo sensor é a seguinte, conforme (MARCHIORI et al., 2019):

$$f_{ZL}^P = f_{ZL}(6,61 \times 10^{-12} \text{ sr}^{-1})(hc)^{-1} \Omega \theta f_{L2} \times \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_{\odot}(\lambda) f_{red}(\lambda) S(\lambda) \lambda d\lambda \quad (24)$$

Em que os parâmetros da equação estão descritos abaixo:

- f_{ZL} : dado tabelado da luz zodiacal visto a partir da Terra [(LEINERT et al., 1998) S_{10}]
- h : constante de Planck [$6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$]
- c : velocidade da luz [$2,99 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}$]
- Ω : ângulo sólido do FoV por pixel [$2\pi \times (1 - \cos(\frac{dFoV}{2SensorSize})) \text{ sr} \cdot \text{px}^{-1}$]
- θ : área da pupila de entrada [cm^2]
- f_{L2} : fator de correção do ponto L2 [0,975⁸]
- $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$: limites inferior e superior em comprimento de onda da resposta espectral do sensor [nm]
- $F_{\odot}(\lambda)$: irradiância espectral do Sol [$dados E - 490 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$]
- $f_{red}(\lambda)$: fator de correção de vermelhidão [(LEINERT et al., 1998)]
- $S(\lambda)$: resposta espectral da câmera [Figura 45]

O espectro solar $F_{\odot}(\lambda)$ pode ser obtido dos dados de referência de irradiância solar extraterrestre ASTM E-490 (ASTM, 2000).

⁸ O valor de $f_{L2} = 0,975$ só é válido quando o satélite está no ponto L2 de sua órbita

Neste cálculo implementado na ferramenta, considera-se que o Sol está na posição $(\alpha, \delta) = (0,0)^\circ$ em coordenadas equatoriais, ou seja, que o Sol está no ponto vernal, referente ao equinócio de 21 de março.

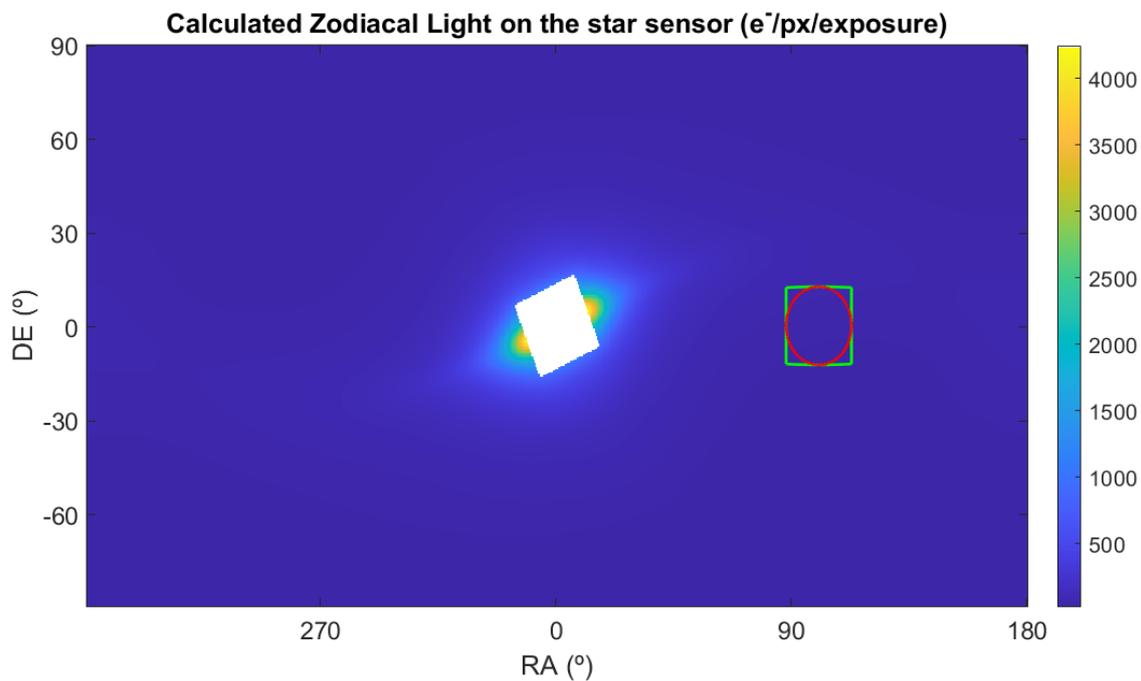


Figura 48 – Mapa da luz zodiacal em todo o céu que alcança o sensor em (e-/px/frame). A região branca corresponde a valores altíssimos que saturam o detector. Os contornos vermelho e verde representam a projeção do sistema óptico e de detecção do sensor no céu a partir da simulação da linha de visada

Na ferramenta também existe a opção de simular um valor médio de brilho do fundo de céu para toda a esfera celeste, conforme a Figura 49.

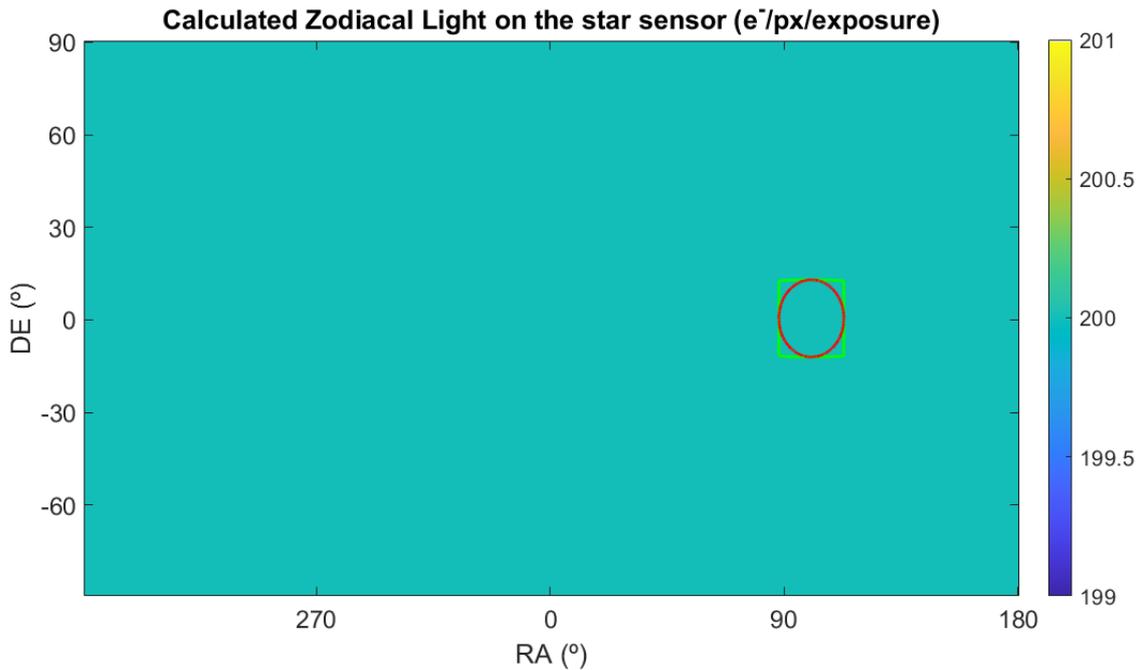


Figura 49 - Mapa da luz zodiacal para todo o céu considerando valor médio. Os contornos vermelho e verde representam a projeção do sistema óptico e de detecção do sensor no céu a partir da simulação da linha de visada

Outros efeitos, como o albedo terrestre, também adicionam ruído de fundo de céu no sensor estelar, porém não foram modelados e implementados na ferramenta.

3.4 CAMPO ESTELAR SOBRE O DETECTOR

Por meio dos algoritmos descritos anteriormente, pode-se obter a imagem esperada de cada estrela da esfera celeste observada pelo sensor. Agora, deseja-se obter a imagem esperada de um campo de visada estelar visto pelo sensor em qualquer região do céu. Para isso, determinam-se as estrelas do catálogo de referência que serão vistas em um dado momento pelo sensor, calcula-se a imagem esperada destas estrelas e as projeta sobre o detector.

3.4.1 Identificação das estrelas do campo de visada do sensor

O primeiro passo para simular a imagem do campo estelar visto pelo sensor é identificar quais estrelas do catálogo de referência estão no campo de visada do sensor. Por exemplo, a Figura 50 mostra a projeção da delimitação do sensor na esfera celeste a partir da linha de visada simulada em $\alpha_{LOS} = 200^\circ$, $\delta_{LOS} = 40^\circ$.

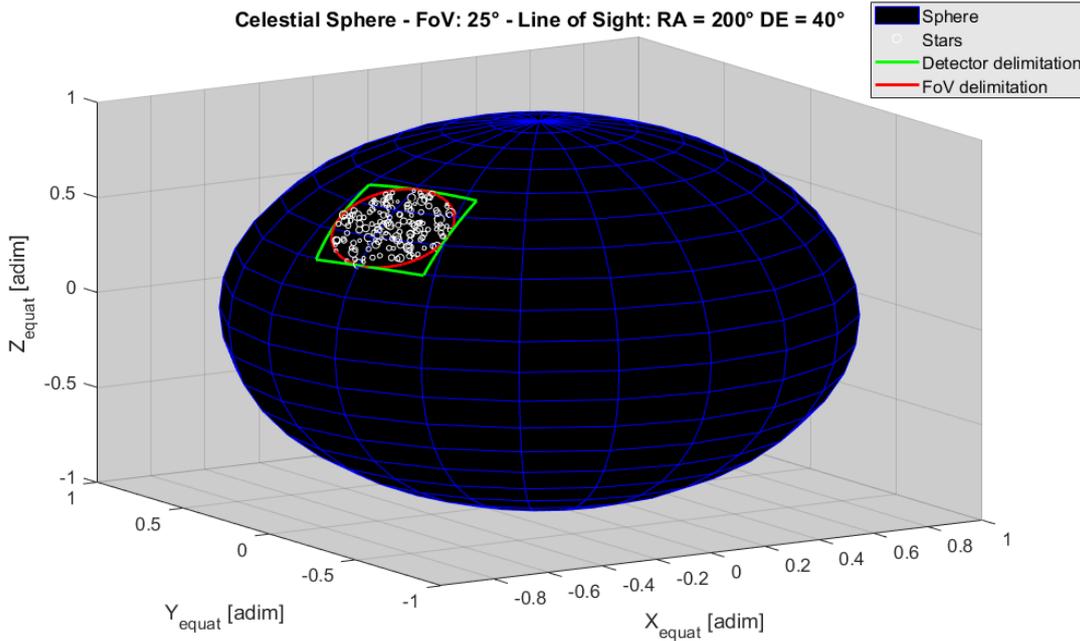


Figura 50 - Delimitação e estrelas do campo de visada do sensor projetadas na esfera celeste

A partir das coordenadas de linha de visada ($\alpha_{LoS}, \delta_{LoS}$) e do cálculo da menor distância entre dois pontos na esfera, dado pela fórmula de Haversine (WERTZ, 1999), conforme expresso nas equações 25 e 26, é possível identificar as estrelas do campo de visada.

Como descrito na seção 3.1 Catálogo de referência, normalmente a posição das estrelas está descrita no sistema de coordenadas equatoriais. Assim, seja (α_*, δ_*) a posição da estrela em coordenadas equatoriais, se $R_* \leq FoV$, então a estrela estará contida no campo de visada do sensor, sendo que:

$$R_* = \text{sen}^{-1}(\sqrt{\text{hav}\theta_*}) \quad (25)$$

$$\text{hav}\theta_* = \text{hav}(\delta_{LoS} - \delta_*) + \cos(\delta_{LoS}) \cos(\delta_*) \text{hav}(\alpha_{LoS} - \alpha_*)$$

E por definição:

$$\text{hav}(x) = \text{sen}^2\left(\frac{x}{2}\right) \quad (26)$$

Uma vez identificadas as estrelas do catálogo de referência pertencentes ao campo de visada estelar, deve-se realizar a transformação no sistema de coordenadas das posições estelares.

3.4.2 Transformação no sistema de coordenadas

Para obtermos a imagem vista pelo sensor, a posição das estrelas deve estar descrita num sistema de coordenadas inerente ao detector. No catálogo de referência, a posição das estrelas está descrita no sistema de coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação). Assim, é necessário realizar a transformação do sistema de coordenadas equatoriais para o sistema de coordenadas do detector. Nesta transformação, foram adotados os seguintes sistemas de coordenadas:

- $\{E\}$: sistema de coordenadas equatoriais [$^{\circ}$];
- $\{B\}$: sistema de coordenadas da linha de visada (*boresight*) [$^{\circ}$];
- $\{FP\}$: sistema de coordenadas do plano focal [μm];
- $\{D\}$: sistema de coordenadas do detector [px].

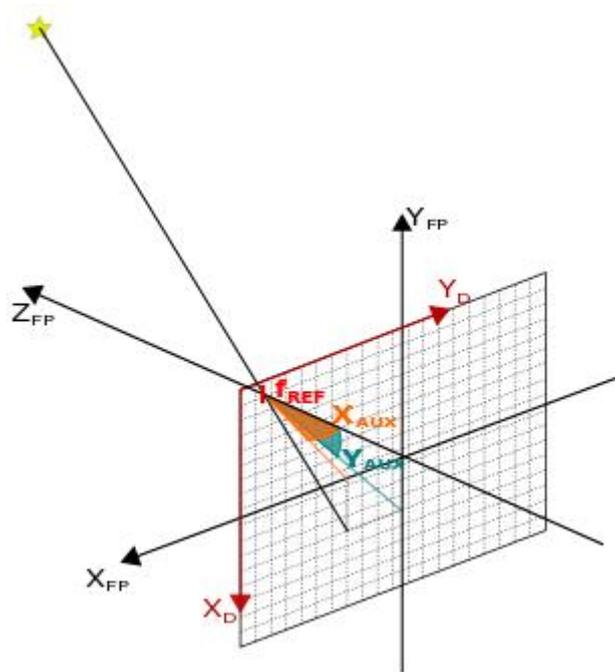


Figura 51 - Representação dos sistemas de coordenadas $\{B\}$, $\{FP\}$ e $\{D\}$

Cada transformação linear acima é realizada a partir da matriz de transformação homogênea, definida pela matriz de rotação entre os sistemas e do vetor de translação da origem dos sistemas.

Dados dois sistemas ortonormais genéricos $\{A\}$ e $\{B\}$, temos que:

$${}^A R_B = [{}^A \hat{X}_B : {}^A \hat{Y}_B : {}^A \hat{Z}_B] : \text{matriz de rotação do sistema } B \text{ para } A;$$

$${}^A O_B : \text{origem do sistema } B \text{ em relação ao sistema } A;$$

$${}^A P = {}^A R_B \cdot {}^B P + {}^A O_B \rightarrow {}^A P = {}^A T_B \cdot {}^B P \quad (27)$$

em que: ${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A O_B \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$ é a transformação do ponto $\{P\}$ descrito em $\{B\}$ no

sistema $\{A\}$.

(1) Transformação entre os sistemas $\{E\} \rightarrow \{B\}$

O sistema de coordenadas da linha de visada (*boresight*) é usado para descrever a posição das estrelas com relação ao apontamento do sensor. Este sistema é definido então pela linha de visada atual do satélite ($\alpha_{LOS}, \delta_{LOS}$) e seu ângulo de inclinação θ com relação aos eixos equatoriais.

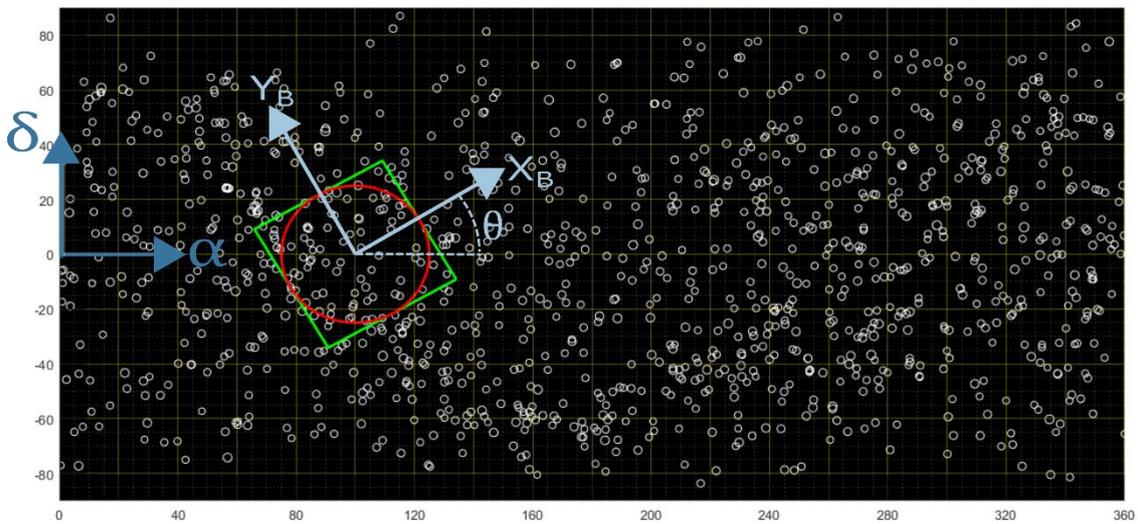


Figura 52 - Representação do sistema de coordenadas equatoriais e de linha de visada

Seja ${}^{eq}P_*$ a posição da estrela no sistema de coordenadas equatoriais descritos em coordenadas retangulares, isto é:

$${}^{eq}P_* = \begin{cases} {}^{eq}X_P = \cos({}^{eq}\delta_P) \cos({}^{eq}\alpha_P) \\ {}^{eq}Y_P = \cos({}^{eq}\delta_P) \sen({}^{eq}\alpha_P) \\ {}^{eq}Z_P = \sen({}^{eq}\delta_P) \end{cases} \quad (28)$$

A transformação entre os sistemas de coordenadas é obtida pelas rotações entre eles, considerando a origem do sistema de coordenadas *boresight*:

$${}^B P_* = R_Y(-\delta_{LOS}) R_Z(\alpha_{LOS}) {}^{eq} P_* \quad (29)$$

Em que R_Y e R_Z são as matrizes de rotação sobre os eixos Y e Z .

$$R_Y(-\delta_{LOS}) = \begin{bmatrix} \cos(-\delta_{LOS}) & 0 & \sen(-\delta_{LOS}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sen(-\delta_{LOS}) & 0 & \cos(-\delta_{LOS}) \end{bmatrix}; \quad (30)$$

$$R_Z(\alpha_{LOS}) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{LOS}) & -\text{sen}(\alpha_{LOS}) & 0 \\ \text{sen}(\alpha_{LOS}) & \cos(\alpha_{LOS}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) Transformação entre os sistemas $\{B\} \rightarrow \{FP\}$

A próxima transformação deve ser para um sistema de coordenadas relativo ao plano focal do sensor. Este sistema refere-se ao plano do sistema óptico onde a imagem é formada. Habitualmente o detector é posicionado neste plano focal. A imagem é formada a uma distância f (*comprimento focal*) do “ponto pinhole” (ponto de origem do sistema de referência) e o eixo Z corresponde ao eixo óptico do sensor. A Figura 53 ilustra as coordenadas do plano focal e os ângulos de um sistema auxiliar, que são semelhantes aos ângulos do sistema de linha de visada.

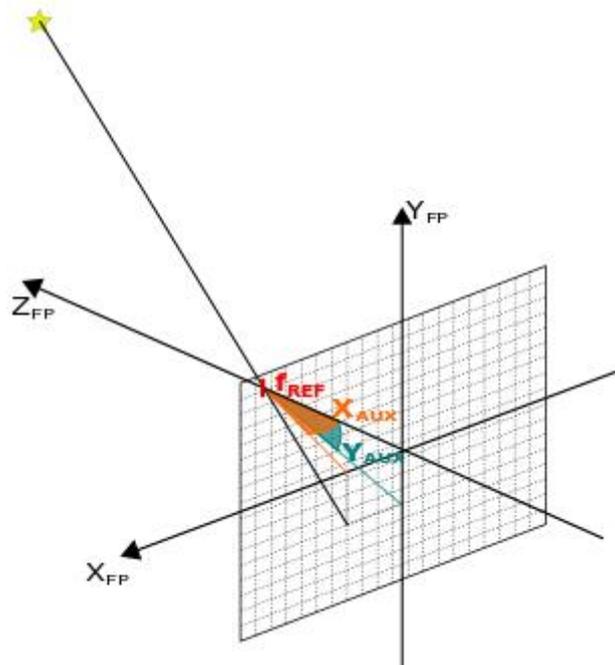


Figura 53 - Representação do sistema de coordenadas do plano focal e os ângulos auxiliares, semelhantes às coordenadas da linha de visada

Considerando que a distância focal f é expressa em milímetros, a posição das estrelas projetadas no plano do bloco focal é dada por:

$${}^{FP} \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = -\frac{f}{B Z_P} {}^B \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} \quad (mm) \quad (31)$$

(3) Transformação entre os sistemas $\{FP\} \rightarrow \{D\}$

Considerando que o detector está no plano focal do instrumento, os eixos X e Y do sistema de coordenadas do detector estão no plano onde a imagem é formada e sua origem é deslocada para a extremidade superior oeste do detector com sentido dos seus eixos oposto aos eixos do plano focal (escolhido arbitrariamente), conforme se observa na representação da Figura 54.

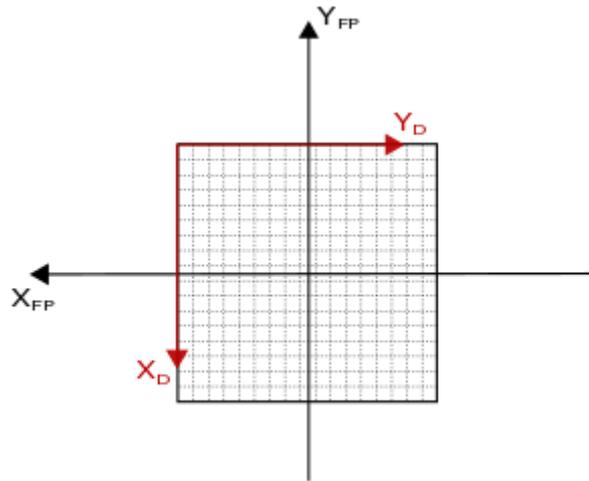


Figura 54 - Representação do sistema de coordenadas do plano focal e do detector

A equação 33 calcula esta transformação:

$$\begin{bmatrix} {}^D X_P \\ {}^D Y_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \frac{S_X^{det}}{2} \\ 0 & -1 & 0 & \frac{S_Y^{det}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{FP} X_P \\ {}^{FP} Y_P \\ {}^{FP} Z_P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Em que (S_X^{det}, S_Y^{det}) é o tamanho do detector, expresso nas mesmas unidades do sistema de coordenadas do plano focal. Usualmente, as coordenadas no sistema do detector são expressas em unidades de pixels. Assim, as coordenadas calculadas pela equação 32 são divididas pelo tamanho do pixel, de acordo com a equação a seguir:

$${}^D P_*[px] = \frac{1}{PixelSize[mm]} {}^D P_*[mm] \quad (33)$$

A Figura 55 ilustra as estrelas vistas pelo campo de visada do sensor e suas posições representadas nos diferentes frames descritos acima, indo desde o sistema de coordenadas equatoriais até o sistema de coordenadas associado ao detector.

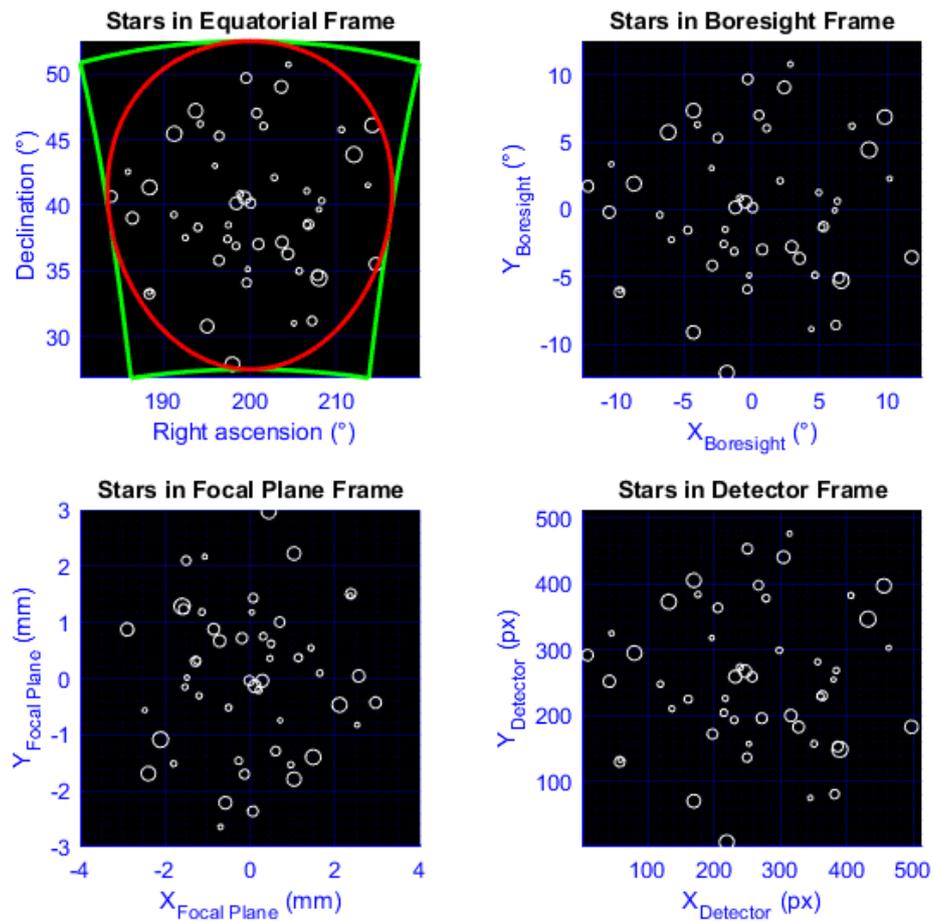


Figura 55 - Campo estelar visto pelo sensor com linha de visada ($\alpha_{LoS}, \delta_{LoS}$) representado em diferentes sistemas de coordenadas

3.4.3 *Projeção dos alvos sobre o detector*

Uma vez que as estrelas contidas no campo de visada do sensor têm suas posições descritas no sistema de coordenadas do detector, as PSFs de tais estrelas são calculadas e adicionadas à matriz representativa do detector, conforme se observa na Figura 56 e na Figura 57.

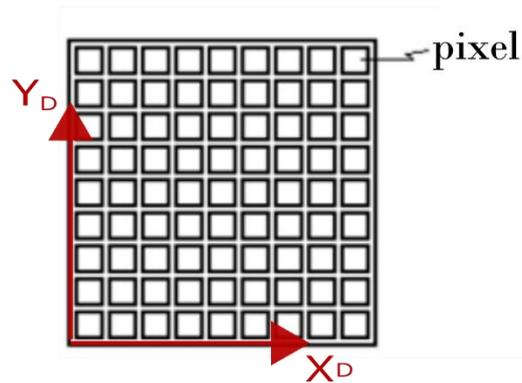


Figura 56 - Imagem representativa do detector

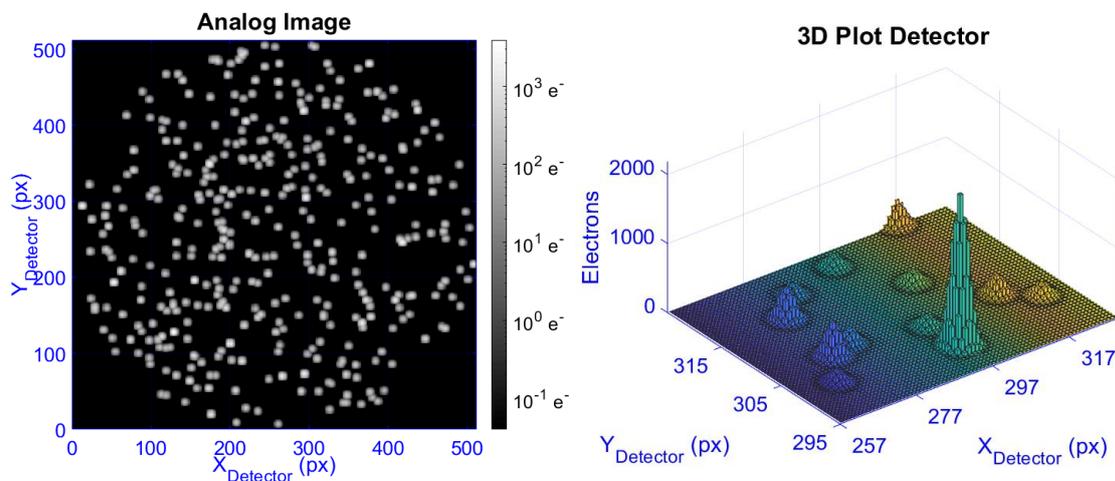


Figura 57 - Imagem analógica do campo de visada do sensor à esquerda e 'zoom' de uma pequena região do detector visto em 3D à direita

Para finalmente compor a imagem do campo estelar do sensor, são adicionados à matriz os ruídos associados ao sistema de detecção, como o fundo de céu. E então, o próximo passo é simular a leitura e digitalização de tal imagem analógica.

3.5 ELETRÔNICA DE PROXIMIDADE

Conforme descrito na seção 2.3.4, a eletrônica de proximidade tem as funções de controlar os ciclos de operação do detector (aquisição de fótons e sua leitura), a estabilidade térmica, de alimentação, de nível mínimo de tensão nos pixels (ou *offset*), amplificação de sinais, conversão analógico-digital, pré-processamento das imagens e estocagem na memória de massa do sensor (SILVA, 2020).

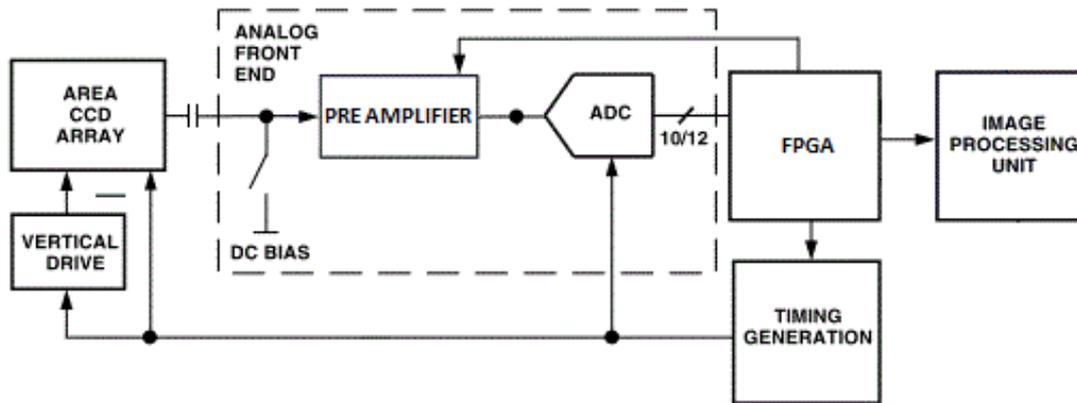


Figura 58 - Ilustração do circuito e componentes da eletrônica de proximidade

Fonte: adaptado de (BUCKLEY, 2000)

A etapa de leitura do detector pode ser simulada pela ferramenta, de forma que este processo é modelado por uma variável de distribuição normal ($readout_{noise}$) com média nula e sigma igual ao valor eficaz do ruído (RMS) simulado e uma variável, referente ao *offset*, ($readout_{offset}$) de valor médio simulado.

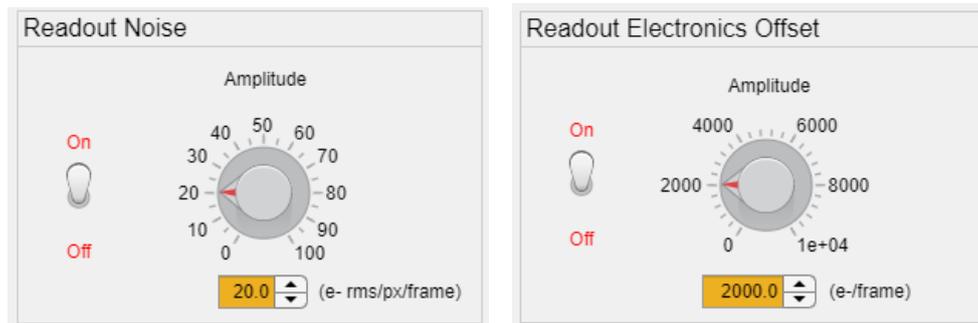


Figura 59 - Simulação pela ferramenta do valor eficaz do ruído ($noise_{RMS}$) à esquerda e do offset de leitura ($readout_{offset}$) à direita

Assim, no processo de leitura é adicionado um offset na imagem analógica, conforme descrito a seguir:

$$\begin{aligned}
 \text{imagem_analógica}_{lida} \\
 = \text{imagem_analógica} + readout_{noise} + readout_{offset}
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

Em que:

$$readout_{noise} \sim N(0, noise_{RMS})
 \tag{35}$$

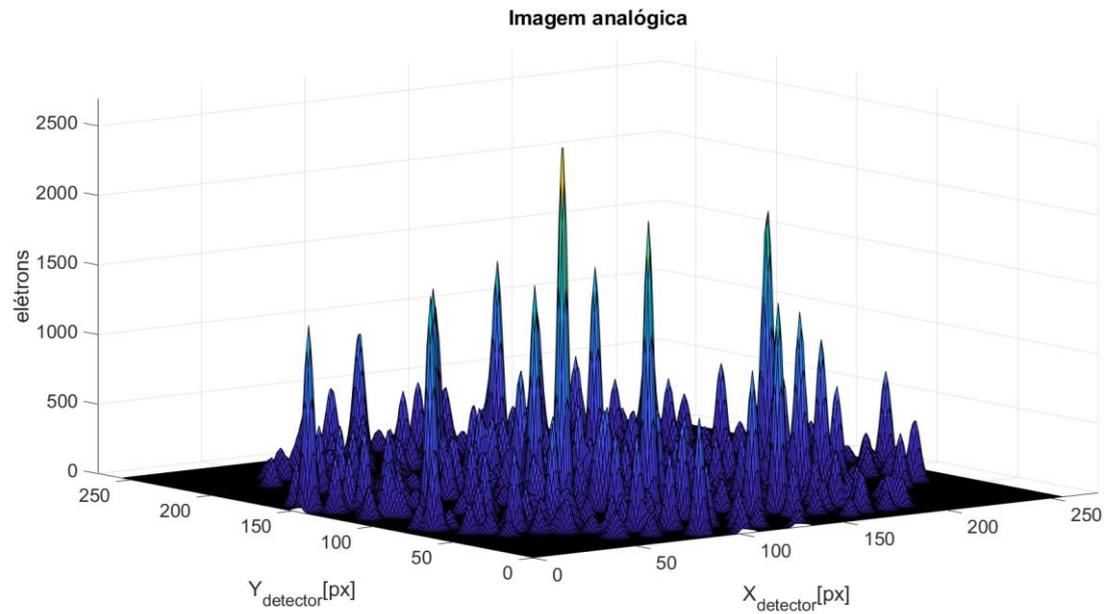


Figura 60 - Imagem analógica sem adicionar os efeitos de leitura

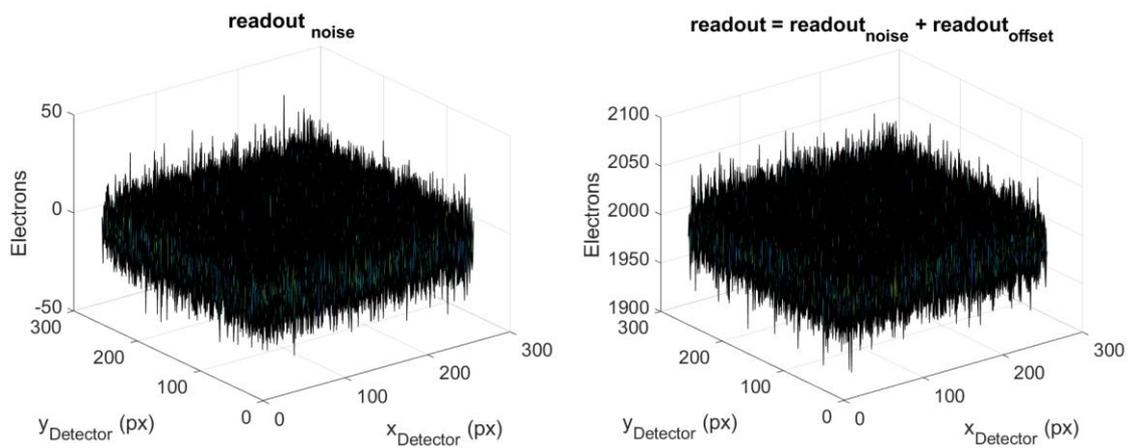


Figura 61 - Simulação do ruído de leitura à esquerda e do processo de leitura considerando o ruído e o offset à direita

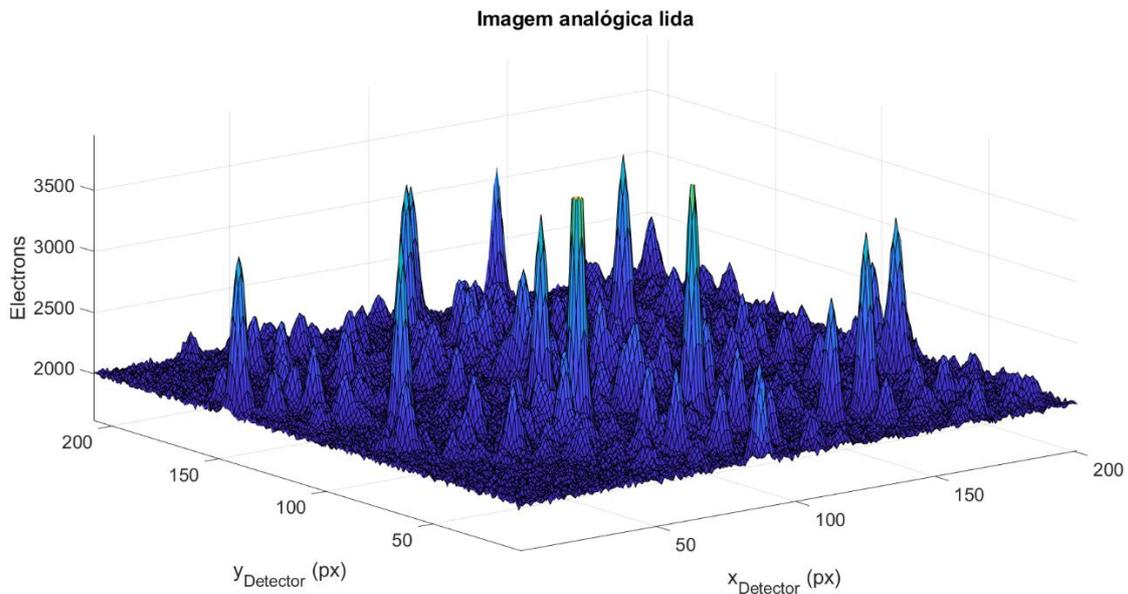


Figura 62 - Imagem analógica considerando os efeitos simulados do processo de leitura

Após a leitura e antes de passar pelo conversor analógico-digital, a imagem é multiplicada ainda pelo ganho representativo do detector $G_{detector}(T_{detector})$, expresso em $[\mu V/e^-]$, que é dado em função de sua temperatura, e também pelo ganho representativo do pré-amplificador $G_{pré-amplificador}(T_{pré-amplificador})$, expresso em $[V/V]$.



Figura 63 - Ganho do detector especificado pelo modelo do detector e que varia em função da temperatura



Figura 64 - Ganho do pré-amplificador que varia em função da temperatura e é simulado pela ferramenta

A etapa do conversor A/D é necessária para transformar um sinal analógico em sinal digital, que consiste em transformar os elétrons coletados pelo detector e já expressos em tensão em unidades ADUs (Analog-to-Digital Unit) que um computador consiga interpretar e processar.

Este processo de conversão analógico-digital é caracterizado por um ganho, expresso em $\left[\frac{ADU}{V}\right]$, conforme descrito a seguir:

$$G_{ADC} = \frac{(2^{n^{bits}} - 1)}{range} \quad (36)$$

Em que n^{bits} é a resolução de bits do conversor e $range$ é o intervalo entre a tensão mínima de entrada e a tensão máxima de entrada.

Dessa forma, o processo de digitalização pode ser descrito por um ganho global, expresso em $\left[\frac{ADU}{e^-}\right]$:

$$G_{digitalização} = G_{detector}(T_{detector}) \cdot G_{pré-amplificador}(T_{pré-amplificador}) \cdot G_{ADC} \quad (37)$$

Com isso, a imagem digital é obtida multiplicando a imagem analógica lida pelo ganho de digitalização acima. As imagens digitais estocadas na memória de massa do sensor não possuem unidades físicas. Porém, para processamento e utilização da informação nelas contida, é necessário que as unidades sejam físicas. Deste modo, ADUs são transformados em elétrons no software de voo do sensor, ou seja, a imagem em ADUs é multiplicada por $(G_{digitalização})^{-1}$, que é expresso em $\left[\frac{e^-}{ADU}\right]$, obtendo assim a imagem digitalizada descrita em elétrons para posterior processamento. Por isso, habitualmente o processo de digitalização é expresso diretamente em $\left[\frac{e^-}{ADU}\right]$, calculado como a seguir:

$$G_{digitalização} = \frac{1}{G_{detector}(T_{detector}) \cdot G_{pré-amplificador}(T_{pré-amplificador}) \cdot G_{ADC}} \quad (38)$$

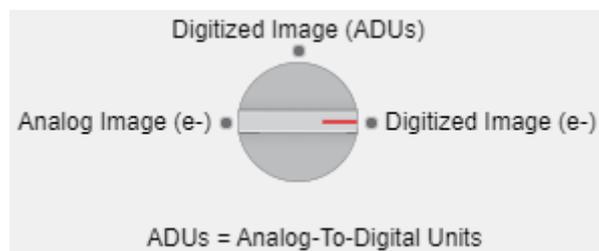


Figura 65 – Opções de configuração da imagem produto do processo de simulação da eletrônica de proximidade

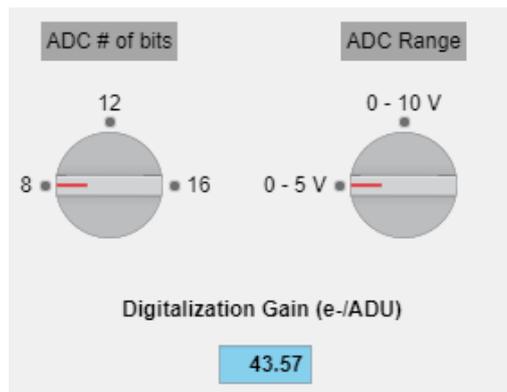


Figura 66 - Simulação da resolução e range do conversor analógico-digital e ganho calculado do processo de digitalização

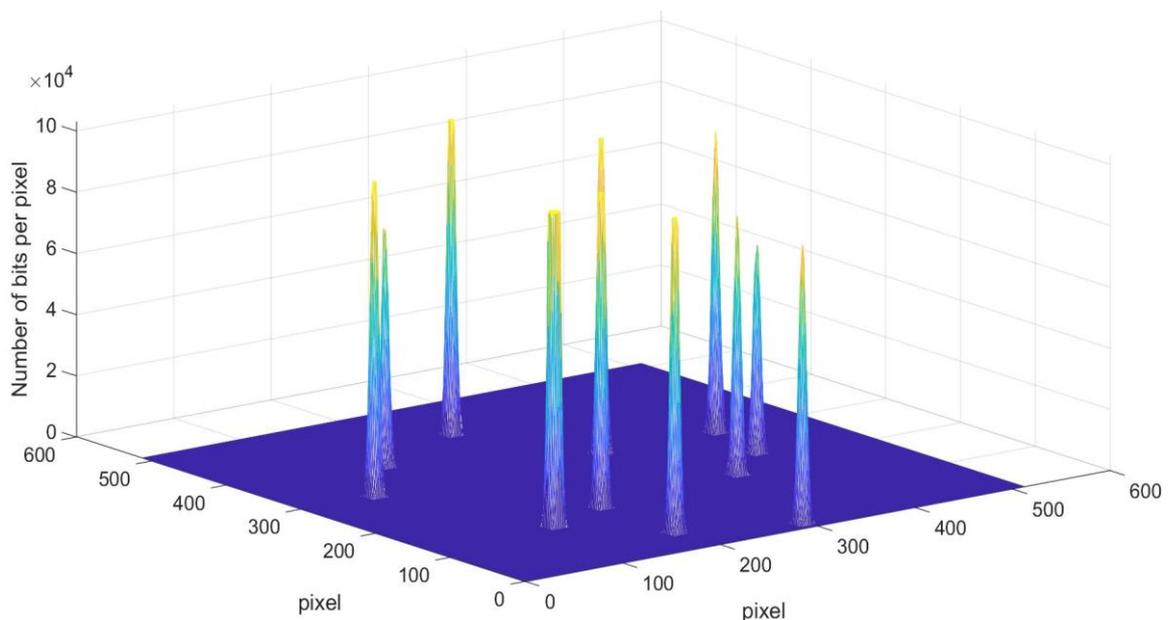


Figura 67 - Imagem de um frame após leitura e digitalização

Fonte: (SILVA, 2020)

A Figura 67 mostra o fluxo de fótons coletado durante um período de exposição do detector e convertido em ADU. Entretanto, os pixels podem sofrer saturação e causar transbordamento para os vizinhos. Neste caso, utilizou-se um limite de saturação sobre os pixels. Assim, as estrelas que superam a saturação são limitadas até este ponto. Como visto na figura acima, a estrela mais brilhante tem seu pico ceifado. O efeito de transbordamento não está sendo simulado.

A partir da imagem digital lida pelo detector, a próxima etapa é realizar seu processamento, calculando finalmente as informações que são utilizadas diretamente na determinação da linha de visada pelo sensor, como os aglomerados estelares.

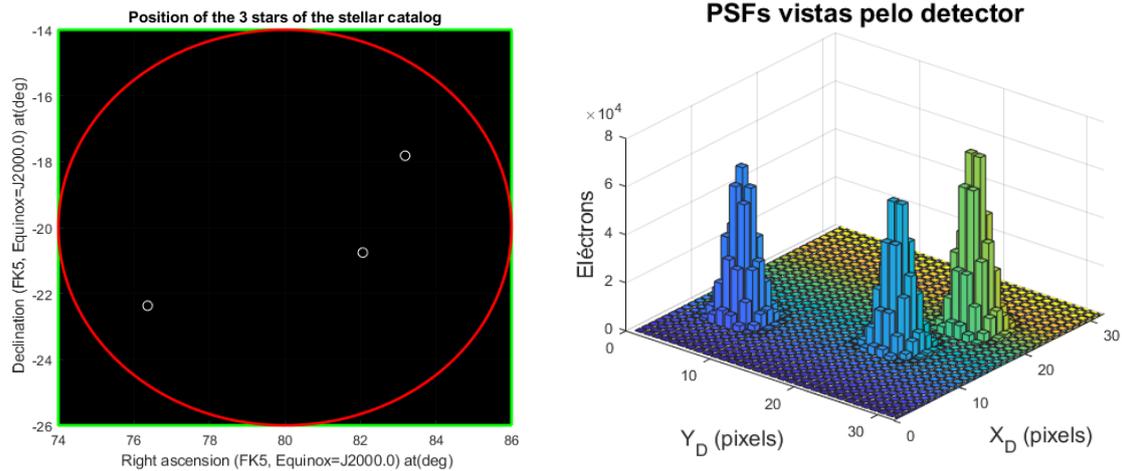
3.6 AGLOMERADOS ESTELARES

A existência de sistemas estelares binários ou múltiplos pode introduzir imprecisões na determinação de atitude, uma vez que a separação angular entre os componentes de um sistema múltiplo pode ser menor do que o poder de resolução do sensor estelar e o sensor não conseguir identificar as estrelas que originaram tal sistema estelar. Para evitar isto, estes casos devem ser considerados na geração do catálogo embarcado, para que a base de dados que serve como base de identificação do campo estelar esteja em conformidade com as capacidades do sensor que o utiliza.

O poder de resolução de um sensor é relacionado à PSF gerada pelo instrumento, conforme descrito na seção 3.2.2. Mas em média, a resolução de um sensor de estrelas com um largo campo de visada é da ordem de alguns minutos de arco, enquanto existem muitas estrelas binárias cujos componentes são separados por ângulos no intervalo de alguns segundos de arco, conforme mencionado em (FIALHO, 2017). Estes sistemas são observados pelo sensor como um único objeto, o qual é denominado aglomerado.

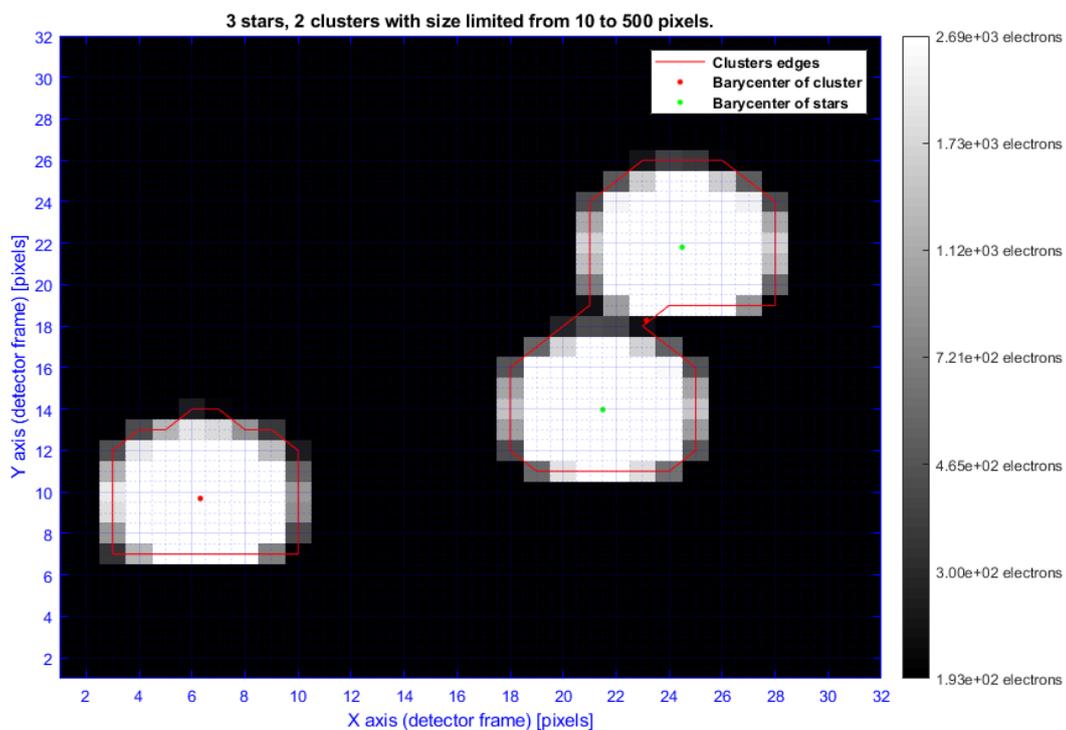
Também existem os casos de sistemas “ópticos” binários ou múltiplos, que são estrelas que não estão fisicamente relacionadas e muitas vezes estão muito distantes, mas que parecem muito próximas umas das outras do ponto de vista do sistema óptico e assim são reconhecidos como um único aglomerado também.

As figuras abaixo ilustram um caso em que a separação angular de duas estrelas distintas contidas no catálogo de referência é menor do que a resolução do sensor, que é dada em função da PSF do sistema óptico, da resolução do detector e demais aspectos construtivos do sensor e de processamento. Como observa-se, as três estrelas estão separadas, mas apenas dois aglomerados são detectados pelo processamento do sensor.



a) Estrelas em coordenadas equatoriais de acordo com catálogo de referência

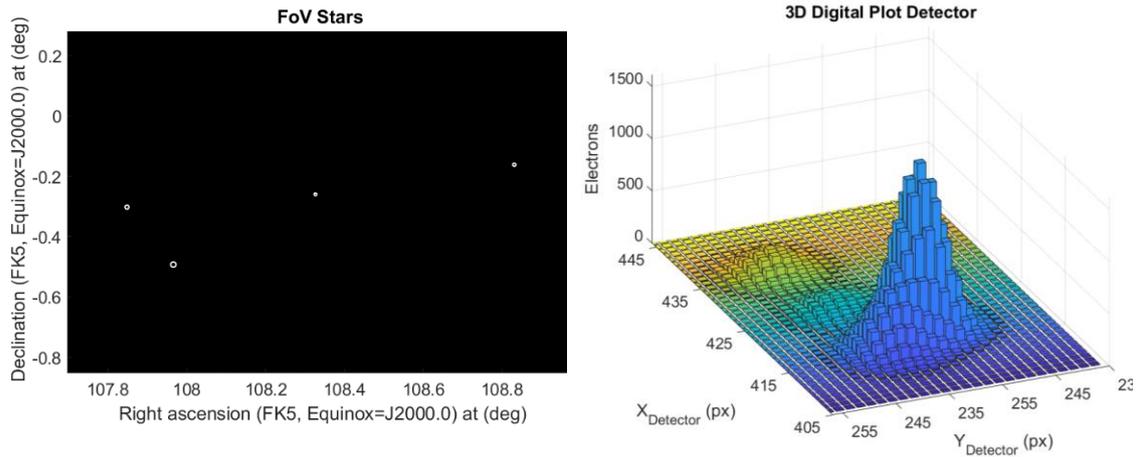
b) Imagem das estrelas vistas pelo detector



c) Aglomerados identificados pelo sensor

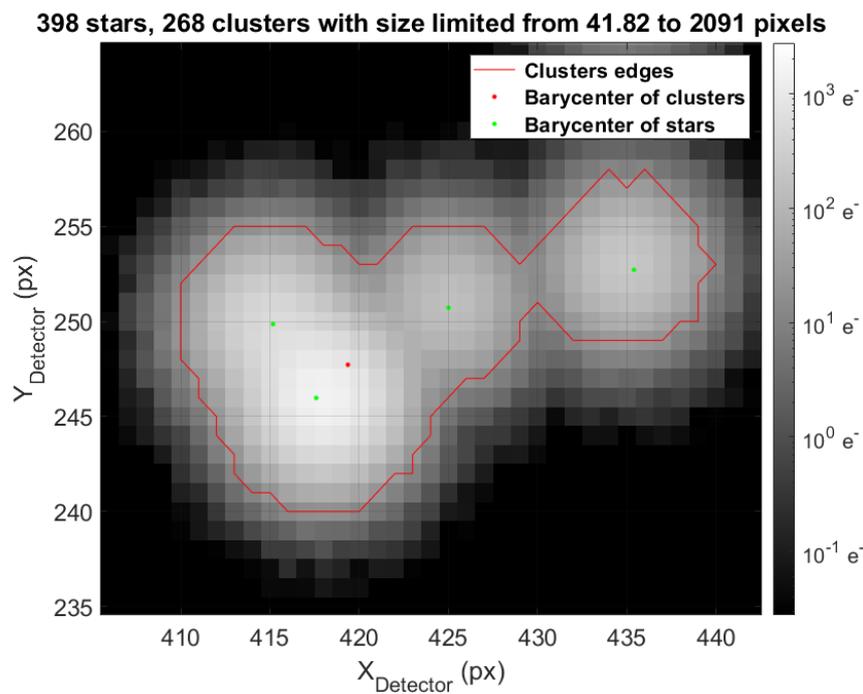
Figura 68 – Ilustração do caso em que três estrelas do campo estelar são identificadas como dois alvos distintos no sensor

Neste caso, ao se refinar alguns parâmetros de processamento para identificação de aglomerados, como o valor de *threshold*, conforme será detalhado a seguir, as três estrelas poderiam ser identificadas. Porém, há casos em que independente do processamento do sensor, a identificação de um único aglomerado no lugar de um único alvo é inevitável, conforme representado nas figuras a seguir.



a) Estrelas em coordenadas equatoriais de acordo com catálogo de referência

b) Imagem das estrelas vistas pelo detector



c) Aglomerados identificados pelo sensor

Figura 69 - Ilustração do caso em que quatro estrelas do campo estelar são identificadas como um único alvo no sensor, independente dos parâmetros de identificação dos aglomerados

Por isso, se faz necessário um algoritmo que identifica quais são os aglomerados detectados pelo sensor e na sequência calcule informações importantes destes aglomerados, como posição de seu baricentro, amplitude e número de pixels. As subseções seguintes descrevem estes cálculos.

3.6.1 Identificação de Aglomerados

A identificação dos aglomerados é realizada a partir das imagens digitais do detector, que são calculadas conforme descrita nas seções anteriores. Inicialmente é aplicado um valor de *threshold* em todo detector, isto é, um valor limite de elétrons que filtra os pixels com baixa intensidade. Dessa forma, ruídos e pixels energéticos que não são associados a alguma estrela são filtrados. Nesta filtragem, é gerada uma matriz booleana, na qual os pixels com energia acima do *threshold* recebem valor verdadeiro e os com energia abaixo recebem valor falso.

Os pixels energéticos, ou seja, aqueles associados a um valor verdadeiro da matriz de filtragem, que estão conectados a outros em sua vizinhança são considerados pertencentes a um mesmo aglomerado. Na implementação deste algoritmo, são classificados como conectados os pixels com grau de conectividade quatro, ou seja, pixels vizinhos de forma adjacente na horizontal e na vertical. Então, para cada aglomerado é associado um número identificador.

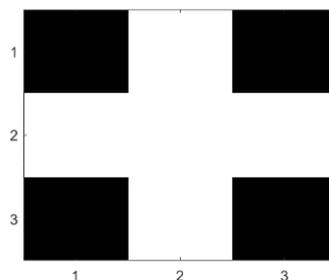


Figura 70 - Pixels em branco são considerados conectados

Uma vez reconhecidos quais os pixels pertencentes a um possível aglomerado, o algoritmo verifica se a quantidade total de pixels deste candidato a aglomerado está dentro de um intervalo definido via interface da ferramenta. Isto pois, aglomerados muito pequenos em sua maioria não são referentes a estrelas, mas a partículas do meio espacial. Já aglomerados com grande quantidade de pixels correspondem a regiões de saturação do detector, as quais não são de interesse para o cálculo da atitude, já que os baricentros calculados possuem baixa precisão em casos de saturação. Por isso, tais casos extremos são descartados e somente os aglomerados que possuem número de pixels dentro do intervalo $[n_{min}; n_{max}]$ são identificados como tal e adicionados no catálogo embarcado.

3.6.2 Cálculo de baricentro e demais informações dos aglomerados

A posição (x_{bar}, y_{bar}) do baricentro dos aglomerados é calculada como média ponderada em função da quantidade de elétrons de cada pixel, através das equações seguintes:

$$x_{bar} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n i \cdot N_e(i, j)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_e(i, j)} ; y_{bar} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n j \cdot N_e(i, j)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_e(i, j)} \quad (39)$$

Sendo (i, j) os índices de cada pixel na direção (x, y) e $N_e(i, j)$ o número de elétrons contido no respectivo pixel.

Para cada aglomerado também é computada a quantidade total de elétrons obtida pela soma da energia de todos os seus pixels, parâmetro denominado de amplitude, e também a quantidade de pixels que o compõe, conforme já mencionado na subseção acima, para verificar se seu tamanho está dentro do intervalo de interesse.



Figura 71 - Imagem do detector com aglomerados identificados e seus respectivos baricentros

3.6.3 Cálculo da variância do baricentro

Como descrito na equação 39, a posição do baricentro dos aglomerados é calculada a partir da média ponderada pela quantidade de elétrons em cada pixel. Devido aos diversos efeitos instrumentais que detalhamos nas seções anteriores, a posição calculada do baricentro contém

incertezas. Assim, uma importante informação para a estimação da acurácia obtida pelo sensor no cálculo da linha de visada é a variância da posição do baricentro calculada. Para isso, foi implementado o cálculo da sua variância baseado na modelagem da estimação do baricentro, conforme será detalhado na sequência, realizado em trabalho externo a este (AYKROYD, 2021).

Seja $B = \{b_i \in \mathbb{R}^3\}$ a posição do baricentro medido pelo sensor em um sistema de coordenadas anexo ao satélite, isto é, o sistema de coordenadas do *boresight* conforme descrito na subseção 3.4.2, e seja $\{a_i \in \mathbb{R}^3\}$ a posição real do baricentro em sistema de coordenadas inercial. Seja R a transformação que mapeia o sistema de coordenadas do *boresight* para o sistema de coordenadas inercial onde a posição dos baricentros no catálogo está descrita. Esta transformação pode ser modelada pela equação a seguir:

$$B_i = R(a_i) + W_i \quad (40)$$

Em que $W = (W_1, \dots, W_n)$ representa o ruído da medida do baricentro, que pode ser modelado por um vetor aleatório de média zero e variância $\sigma^2 = (\sigma_1^2, \dots, \sigma_N^2)$. Este ruído interfere diretamente na estimação do baricentro do aglomerado, de forma que quanto maior for a variância do vetor W , menor é a acurácia do cálculo do baricentro e, conseqüentemente, menor a acurácia na medida de atitude do sensor.

Conforme modelo desenvolvido em (AYKROYD, 2021), seja (I_p) um vetor aleatório que representa a intensidade de elétrons no pixel p e que segue uma distribuição gaussiana: $I_p \sim N(\mu_p, \sigma_p^2)$.

Para derivar a variância da estimação do baricentro, podemos aplicar as propriedades dos vetores que seguem distribuição gaussiana. Assim, seja $S = \sum_p I_p$ uma variável aleatória que representa a intensidade total de elétrons nos pixels de uma janela que, como I_p , também segue uma distribuição gaussiana do tipo $S \sim N(\mu_{total} = \sum_p \mu_p, \sigma_{total}^2 = \sum_p \sigma_p^2)$ ⁹.

A partir disso e conforme desenvolvido em detalhes em (AYKROYD, 2021), a variância do cálculo do baricentro é descrita pela equação seguinte:

$$Var(\hat{r}) = (K_2 + K_1^2) \mathbb{E} \left[\frac{1}{S^2} \right] - K_1^2 \mathbb{E} \left[\frac{1}{S} \right]^2 \quad (41)$$

⁹ Ao tomarmos a intensidade de elétrons em cada pixel, além do valor médio de distribuição gaussiana, há também ruído de Poisson associado. Porém, ao tomarmos a intensidade total de elétrons nos pixels de uma janela, como a quantidade de pixels somados é grande, isto é, $n \gg 1$, podemos aproximar a somatória deste valor ruidoso de uma distribuição gaussiana.

Em que K_1 e K_2 são variáveis definidas como:

$$K_1 = \sum_p r_p \left(\mu_p - \mu_0 \frac{\sigma_p^2}{\sigma_{total}^2} \right) \quad (42)$$

$$K_2 = \sum_p r_p^2 \sigma_p^2 - \sum_{p,q} r_p r_q \frac{\sigma_p^2 \sigma_q^2}{\sigma_{total}^2} \quad (43)$$

E os momentos inversos da equação 42 podem ser calculados usando as séries seguintes:

$$\mathbb{E} \left[\frac{1}{S} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{total}} \sum_{s \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{s} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{s - \mu_{total}}{\sigma_{total}} \right)^2} \quad (44)$$

$$\mathbb{E} \left[\frac{1}{S^2} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{total}} \sum_{s \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{s^2} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{s - \mu_{total}}{\sigma_{total}} \right)^2} \quad (45)$$

Este modelo foi implementado na ferramenta de forma que para cada aglomerado identificado é calculada também a variância do seu baricentro, informação crucial para o cálculo da acurácia da atitude entregue pelo sensor.

A figura abaixo mostra uma janela do detector contendo um aglomerado ruidoso (com ruído de fundo de céu e de leitura) e ao lado a janela processada, em que apenas os pixels considerados pertencentes ao aglomerado são utilizados no cálculo do baricentro (observa-se os pixels periféricos ao centro com energia nula), e o desvio padrão do baricentro calculado de forma analítica, descrita acima.

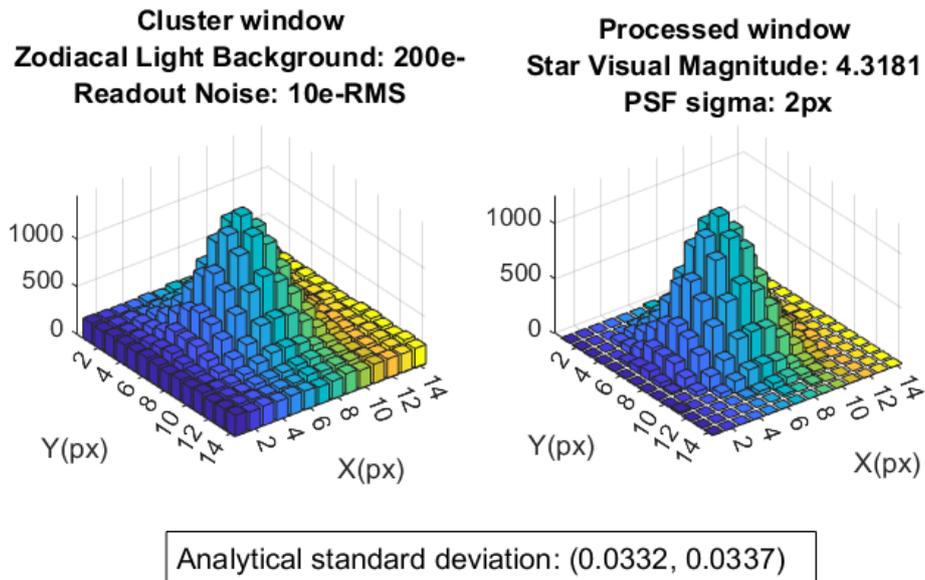


Figura 72 - À esquerda janela contendo aglomerado ruidoso e à direita janela processada em que são obtidos μ e σ para o cálculo da variância

3.6.4 Extensão do cálculo de aglomerados para toda a esfera celeste

A princípio, a ferramenta calcula os aglomerados e suas informações apenas para a imagem do campo estelar vista pelo sensor em um dado momento, conforme detalhado anteriormente. Dado que o catálogo de estrelas será embarcado no sensor, sua versão final deve conter os dados de toda a esfera celeste independente da linha de visada atual do sensor. Por isso, o cálculo dos aglomerados precisa ser estendido para todo o céu.

Para isso, é realizada uma varredura do céu, de forma que a esfera celeste é discretizada em intervalos definidos pelo usuário via interface ($step_{RA}$, $step_{DE}$) e o campo estelar de visada é computado tomando cada um desses pontos como linha de visada. Em cada campo estelar, os aglomerados são calculados em coordenadas do detector e transformados para coordenadas equatoriais (a partir do valor de linha de visada do ponto em questão), transformação inversa à descrita na seção 3.4.2.

Uma vez que os aglomerados do campo estelar de todos os pontos da esfera celeste foram calculados, é realizada uma verificação se existem aglomerados que foram calculados mais de uma vez. Isso tende a ocorrer com mais frequência nas simulações em que o intervalo de discretização é bem menor que o campo de visada do sensor. O reconhecimento de aglomerados repetidos é realizado associando o aglomerado calculado com as estrelas do catálogo de referência que o originou a partir de um número de identificação, sendo que os aglomerados repetidos são desconsiderados e contados apenas uma vez.

A imagem abaixo mostra o mapa de toda a esfera celeste contendo os aglomerados identificados, sendo $step_{RA} = step_{DE} = 30^\circ$, $FOV = 25^\circ$ e o catálogo de referência contém as estrelas com magnitude aparente menor que 5.

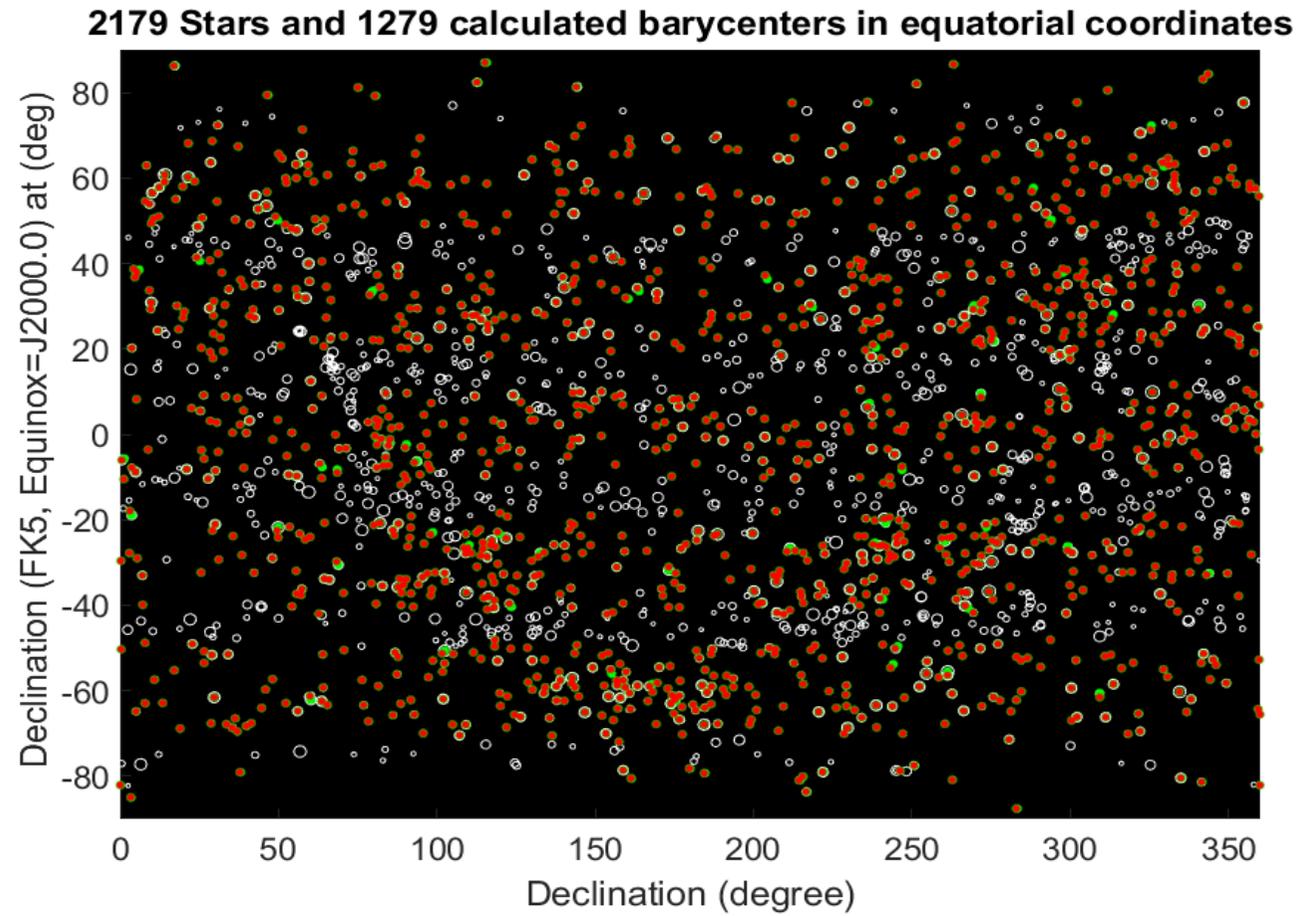


Figura 73 - Mapa estelar contendo os aglomerados em toda a esfera celeste. Os pontos vermelhos referem-se aos baricentros dos aglomerados, os pontos verdes representam as estrelas que originaram os aglomerados identificados e os círculos brancos a posição das estrelas do catálogo de referência

Neste caso, como o passo de discretização é maior do que o campo de visada do sensor, alguns intervalos da esfera celeste não são calculados, como podemos observar mais notadamente nos mapas de densidade de aglomerados calculados e de estrelas não identificadas.

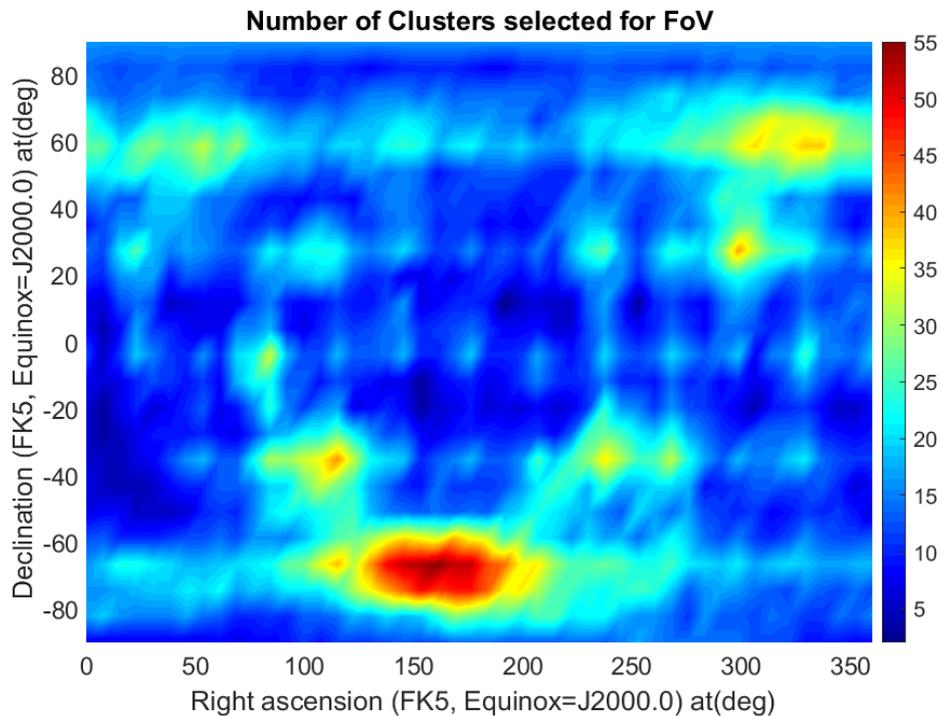


Figura 74 – Mapa de densidade dos aglomerados identificados

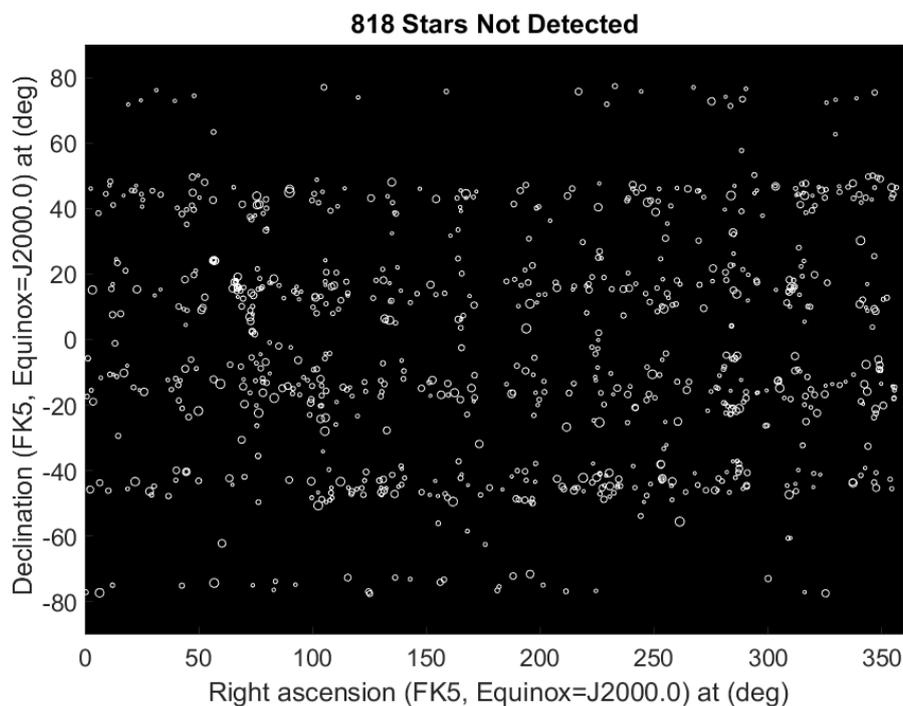


Figura 75 – Mapa representando as estrelas que não foram identificadas no processo de varredura do céu

3.7 ARMAZENAMENTOS DOS DADOS

Uma vez que os algoritmos de cálculo do catálogo foram aplicados às estrelas de toda a esfera celeste, se faz necessário armazenar os dados gerados em formato adequado, sendo esta a base do arquivo do catálogo que ficará embarcado no sensor estelar.

3.7.1 *Dados do arquivo final do catálogo*

Os principais dados contidos num catálogo embarcado são os aglomerados, a posição de seus baricentros, sua amplitude, isto é, sua quantidade total de elétrons e a posição em coordenadas equatoriais equivalentes dos seus baricentros.

Informações referentes aos baricentros dos aglomerados são cruciais, pois é a partir da comparação dos baricentros dos aglomerados do catálogo e daqueles reconhecidos pelo sensor que o cálculo da atitude do satélite é realizado.

Outra informação relevante é reconhecer quais estrelas do catálogo de referência deram origem a cada aglomerado. Assim, o algoritmo de armazenamento também associa o número identificador dos aglomerados ao número identificador das estrelas.

Em resumo, os dados armazenados no catálogo são: número identificador do aglomerado, a posição em coordenadas equatoriais, ascensão reta e declinação dos baricentros, a quantidade de estrelas que deu origem ao aglomerado e o número total de pixels que compõe o aglomerado. Além disso, na interface da ferramenta há uma tabela que associa o identificador de aglomerados com o identificador de estrelas.

Computed Embedded Catalogue

Cluster ID	Cluster RA (°)	Cluster DE (°)	Cluster Amplitude	Nb of px in the cluster	Nb of Stars	Cluster ID	Star ID	Star RA (°)	Star DE(°)
1	179.8112	-78.2287	2.0751e+04	145	1	1	15177	179.9056	-78.2219
2	13.3986	-62.8872	3.3521e+04	150	1	2	14015	13.4078	-62.8714
3	17.0577	-55.2505	3.2903e+04	152	1	3	14482	17.0962	-55.2458
4	22.7844	-49.0840	6.3368e+04	176	1	4	14505	22.8129	-49.0727
5	26.5126	-50.7974	2.5994e+04	145	1	5	14486	26.5249	-50.8163
6	26.5170	-53.5263	1.7057e+04	138	1	6	14480	26.5261	-53.5220
7	28.9723	-51.6205	7.4541e+04	177	1	7	14527	28.9894	-51.6089
8	28.7078	-67.6399	3.0102e+04	150	1	8	13985	28.7339	-67.6473
9	29.6872	-61.5870	1.4119e+05	192	1	9	14022	29.6922	-61.5698
10	33.5215	-67.8508	2.0601e+04	144	1	10	13973	33.5606	-67.8414
11	35.3996	-68.6768	4.2361e+04	162	1	11	13971	35.4373	-68.6594
12	37.0076	-69.5409	1.9531e+04	141	1	12	13970	36.9452	-69.5240
13	36.3079	-66.4924	1.8301e+04	141	1	13	13981	36.3602	-66.4940
14	34.0999	-51.5051	6.8846e+04	177	1	14	14524	34.1275	-51.5122
15	39.8388	-68.2789	4.0897e+04	165	1	15	13976	39.8973	-68.2669
16	44.6536	-64.0638	1.8447e+04	142	1	16	14038	44.6992	-64.0713
17	48.1314	-57.2987	2.7046e+04	145	1	17	14063	48.1382	-57.3215
18	52.2945	-62.9414	2.5272e+04	145	1	18	13923	52.3445	-62.9375
19	25.5449	-32.3513	1.8464e+04	180	1	19	14700	25.5359	-32.3270
20	29.1477	-22.5479	3.0853e+04	186	1	20	14958	29.1675	-22.5268
21	29.9887	-21.0296	1.1510e+05	301	2	21	14961	30.0013	-21.0778
22	31.1378	-29.3005	2.3839e+04	183	1	22	14962	29.9425	-29.8245
23	35.6488	-23.8164	1.7408e+04	179	1	23	14968	31.1227	-29.2968
24	38.4610	-28.2496	1.8459e+04	179	1	24	14926	35.6358	-23.8168
25	42.2780	-32.4210	3.8336e+04	195	1	25	14803	38.4613	-32.2323
26	20.9947	-8.1769	8.8678e+04	181	1	26	14791	42.2726	-32.4059
27	22.5500	6.1265	3.3514e+04	161	1	27	7473	21.0059	-8.1833
28	25.3482	5.4727	4.6846e+04	173	1	28	7662	22.5463	6.1438
29	25.6913	-3.7058	2.6250e+04	149	1	29	7657	25.3579	5.4876
30	26.3333	9.1803	4.5008e+04	172	1	30	7483	25.6813	-3.8902
31	26.4815	-5.7256	2.1924e+04	145	1	31	7683	26.3484	9.1578
32	27.7477	-10.4284	1.0423e+05	318	2	32	7479	26.4969	-5.7333
33	28.4127	3.1712	3.2249e+04	156	1	33	7426	27.3963	-10.6864
34	30.0992	-8.5205	4.8976e+04	174	1	34	7428	27.8652	-10.3350

Save Catalogue

Figura 76 - Dados selecionados do catálogo final exibidos em forma de tabela

3.7.2 Formato HDF5

Hierarchical Data Format é o nome de um conjunto de formato de arquivos usados para organização e armazenamento de grandes quantidades de dados numéricos, de forma que seu conteúdo seja facilmente manipulado. Suas vantagens são diversas: estrutura de dados hierárquica, suporte para estruturas complexas, tamanho ilimitado de dados, armazenamento flexível e otimizável, dentre outras. Por isso, este formato está sendo muito empregado no armazenamento de conjunto de dados científicos, substituindo o formato FITS, popular entre os astrônomos (PRICE; BARSDILL; GREENHILL, 2015).

Dessa forma, uma vez calculados os dados do arquivo final do catálogo, a ferramenta exporta tais dados em formato HDF5.

ClusterID	RA_deg	DE_deg	Amplitude	Nb_of_Pixels	Nb_of_Stars
0	1.0	179.81117	-78.228681	20750.505	145.0
1	2.0	13.398620	-62.887205	33520.538	150.0
2	3.0	17.057653	-55.250531	32903.126	152.0
3	4.0	22.784411	-49.083985	63367.670	176.0
4	5.0	26.512613	-50.797430	25993.548	145.0
5	6.0	26.516999	-53.526269	17057.481	138.0
6	7.0	28.972307	-51.620483	74541.198	177.0
7	8.0	28.707753	-67.639935	30102.282	150.0
8	9.0	29.687155	-61.586997	141191.04	192.0
9	10.0	33.521472	-67.850819	20600.906	144.0
10	11.0	35.399648	-68.676794	42360.896	162.0
11	12.0	37.007648	-69.540933	19530.742	141.0
12	13.0	36.307910	-66.492369	18300.713	141.0
13	14.0	34.099938	-51.505073	68845.663	177.0
14	15.0	39.838840	-68.278907	40897.238	165.0
15	16.0	44.653567	-64.063822	18446.634	142.0
16	17.0	48.131405	-57.298731	27046.371	145.0
17	18.0	52.294489	-62.941395	25271.731	145.0
18	19.0	25.544878	-32.351277	18464.165	180.0
19	20.0	29.147734	-22.547854	30852.577	186.0
20	21.0	29.988712	-21.029600	115097.36	301.0
21	22.0	31.137774	-29.300501	23839.062	183.0
22	23.0	35.648834	-23.816407	17408.127	179.0
23	24.0	38.461032	-28.249602	18459.159	179.0
24	25.0	42.277967	-32.420975	38336.053	195.0
25	26.0	20.994741	-8.1769181	88678.266	181.0
26	27.0	22.549979	6.1264708	33514.416	161.0
27	28.0	25.346233	5.4726559	46846.476	173.0
28	29.0	25.691295	-3.7057739	26249.864	149.0
29	30.0	26.332553	9.1802885	45007.634	172.0
30	31.0	26.481488	-5.7255565	21923.613	145.0
31	32.0	27.747741	-10.428443	104233.20	318.0
32	33.0	28.412689	3.1712289	32248.989	156.0
33	34.0	30.098188	-8.5205225	48975.608	174.0
34	35.0	30.498126	2.7765037	37055.220	161.0
35	36.0	30.942236	-4.1107836	19362.228	145.0
36	37.0	33.271027	8.8453562	40323.288	167.0
37	38.0	35.490507	0.3953583	30156.367	151.0

ClusterID	StarID	Star_RA_deg	Star_DE_deg
0	1.0	15177.0	179.90563
1	2.0	14015.0	13.407823
2	3.0	14482.0	17.096180
3	4.0	14505.0	22.812944
4	5.0	14486.0	26.524857
5	6.0	14480.0	26.526097
6	7.0	14527.0	28.989400
7	8.0	13985.0	28.733883
8	9.0	14022.0	29.692244
9	10.0	13973.0	33.560597
10	11.0	13971.0	35.437252
11	12.0	13970.0	36.945164
12	13.0	13981.0	36.360227
13	14.0	14524.0	34.127454
14	15.0	13976.0	39.897339
15	16.0	14038.0	44.699161
16	17.0	14063.0	48.138169
17	18.0	13923.0	52.344493
18	19.0	14700.0	25.535926
19	20.0	14958.0	29.167513
20	21.0	14961.0	30.001289
21	21.0	14962.0	29.942499
22	22.0	14998.0	31.122692
23	23.0	14926.0	35.635847
24	24.0	14803.0	38.461253
25	25.0	14791.0	42.272590
26	26.0	7473.0	21.005861
27	27.0	7662.0	22.546312
28	28.0	7657.0	25.357890
29	29.0	7483.0	25.681294
30	30.0	7683.0	26.348438
31	31.0	7479.0	26.498918
32	32.0	7426.0	27.396265
33	32.0	7428.0	27.865165
34	33.0	7546.0	28.388999
35	34.0	7437.0	30.111744
36	35.0	7556.0	30.511758
37	36.0	7501.0	30.918703

IDs (1648, 2)
Compound/Vdata, 1363
Number of attributes = 0

Log Info Metadata

Figura 77 - Catálogo exportado em formato HDF5 visualizado na interface HDFView

3.8 LINHA DE VISADA

Com as informações contidas no catálogo embarcado, o sensor já é capaz de calcular a atitude do satélite. Além disso, conforme exposto na seção 3.6.3, a partir da variância da posição dos baricentros é possível estimar a acurácia da linha de visada calculada.

Inicialmente, para realizar o cálculo da linha de visada, é necessário adotar um sistema de coordenadas para descrever a atitude. Na sequência, diferentes algoritmos podem ser empregados para comparar os aglomerados detectados pelo sensor com os aglomerados do catálogo e, assim, determinar a atitude.

Na sequência diferentes formas de modelagem de atitude de um satélite são descritas, também o problema de determinação de orientação de um corpo rígido é modelado e finalmente algumas abordagens de cálculo da atitude são propostas, como o algoritmo Horn, solução implementada na ferramenta.

3.8.1 Modelagem de atitude

Coordenadas ou parâmetros de atitude são um conjunto de coordenadas que descrevem a orientação de um objeto em relação a um sistema de coordenadas de referência, normalmente inercial. Há uma variedade de conjuntos disponíveis, sendo que cada um apresenta vantagens e desvantagens.

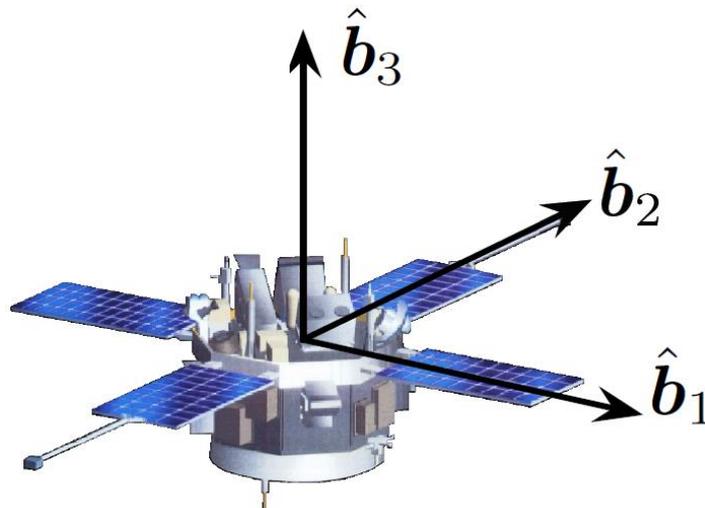


Figura 78 - Representação de sistema de coordenadas fixo ao satélite

Fonte: (SCHAUB, 2019)

Escolher a melhor descrição de orientação de um corpo rígido para um determinado sistema é muito importante. Uma boa escolha na descrição da orientação pode simplificar a matemática envolvida em seu controle, evitar singularidades geométricas ou mesmo equações diferenciais fortemente não lineares. Da mesma forma que escolhas não tão apropriadas de conjuntos de coordenadas de atitude podem limitar artificialmente o intervalo operacional do sistema controlado, como por exemplo ser necessário que o objeto opere sempre dentro de um intervalo não singular dos parâmetros de atitude.

Para a descrição da atitude de um objeto é requerido um mínimo de três coordenadas, de forma que qualquer conjunto mínimo contendo apenas três coordenadas apresenta pelo menos uma orientação geométrica singular, ou seja, uma orientação onde pelo menos duas coordenadas são indefinidas ou não únicas (HANSPIETER SCHAUB; JOHN L. JUNKINS, 2009).

Na sequência estão descritos os conjuntos de coordenadas de atitude mais importantes para o escopo deste trabalho, assim como a justificativa para a escolha do conjunto adotado.

3.8.1.1 Matriz de Rotação

A orientação de um corpo rígido é descrita como uma sequência de rotações entre dois sistemas de coordenadas de referência, normalmente um referencial inercial e outro sistema fixo ao corpo rígido.

Sejam dois sistemas de coordenadas: $\{N\}$ associado a um sistema inercial e $\{B\}$ associado ao corpo rígido. Tais sistemas são definidos como um conjunto de vetores ortonormais.

$$\{N\} = \begin{bmatrix} \hat{n}_1 \\ \hat{n}_2 \\ \hat{n}_3 \end{bmatrix}; \{B\} = \begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \\ \hat{b}_3 \end{bmatrix} \quad (46)$$

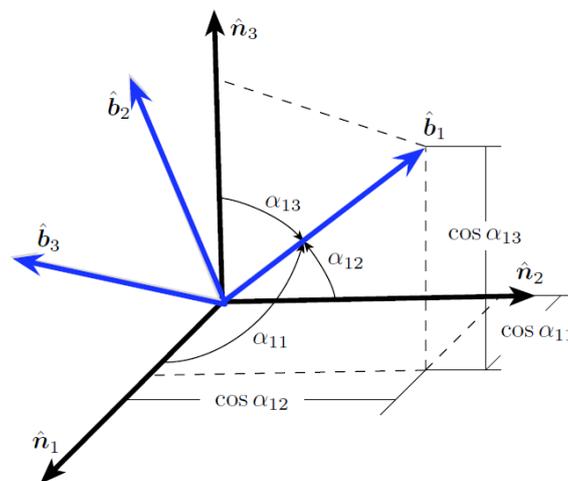


Figura 79 - Representação dos sistemas de coordenadas $\{N\}$ e $\{B\}$

Fonte: (SCHAUB, 2019)

A transformação entre estes sistemas de coordenadas pode ser efetuada a partir de uma matriz de rotação C :

$$\{\hat{b}\} = C\{\hat{n}\} \quad (47)$$

Sendo:

$$C = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{11} & \cos \alpha_{12} & \cos \alpha_{13} \\ \cos \alpha_{21} & \cos \alpha_{22} & \cos \alpha_{23} \\ \cos \alpha_{31} & \cos \alpha_{32} & \cos \alpha_{33} \end{bmatrix} \quad (48)$$

A matriz C acima é denominada matriz de rotação ou DCM (*Direction Cosine Matrix*).

Tal matriz é a mais fundamental representação de uma orientação. Porém, ela é altamente redundante, uma vez que possui nove parâmetros, portanto seis coordenadas extras para a descrição de uma orientação com três graus de liberdade angular.

3.8.1.2 Ângulos de Euler

Mais popular conjunto de coordenadas de atitude, os ângulos de Euler são descritos através de três rotações sequenciais ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$). Observe que a ordem da rotação é crucial na representação das coordenadas neste sistema.

Por convenção, o conjunto de ângulos de Euler descrito pela sequência ($i - j - k$) denota que primeiro o corpo rígido é rotacionado em torno do eixo i fixo ao seu corpo, segundo em torno do eixo j e em terceiro do eixo k .

Frequentemente, no domínio aeronáutico e aeroespacial é utilizada a sequência dos ângulos de Euler ($3 - 2 - 1$) ou (*yaw - pitch - roll*).

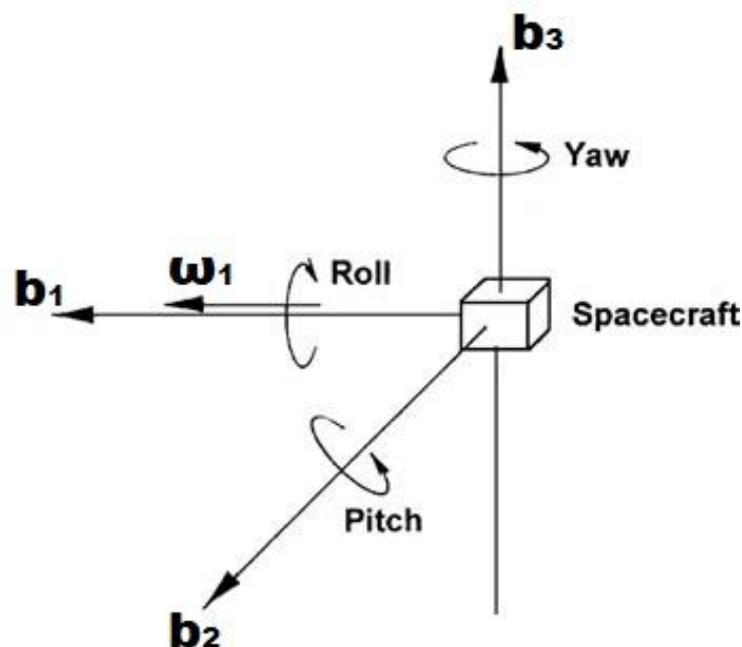


Figura 80 - Velocidade angular do satélite expressa no sistema de coordenadas $\{B\}$

Fonte: (SCHAUB, 2019)

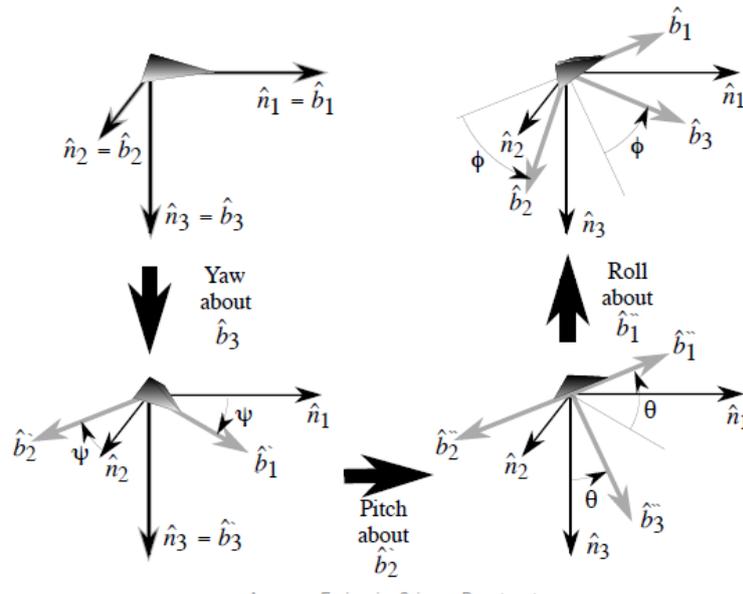


Figura 81 - Ilustração da sequência (yaw-pitch-roll) dos ângulos de Euler

Fonte: (HANSPETER SCHAUB; JOHN L. JUNKINS, 2009)

A matriz de rotação da seção anterior pode ser parametrizada em termos dos ângulos de Euler. Seja $M_i(\theta)$ a matriz de rotação em torno do eixo i do corpo rígido. Considerando a sequência de rotações (3 – 2 – 1) e os ângulos de Euler ($\alpha - \beta - \gamma$).

$$M_1(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \text{sen}\theta \\ 0 & -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$M_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\text{sen}\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$M_3(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (51)$$

Então, a matriz de rotação fica:

$$C(\alpha, \beta, \gamma) = M_1(\gamma)M_2(\beta)M_3(\alpha) \quad (52)$$

Tal conjunto sofre de singularidades geométricas, isto é, em uma dada atitude pode haver dois ângulos que não são definidos de forma única. Por exemplo, para a sequência (3 – 2 – 1), se o satélite tiver um ângulo $pitch = \pm 90^\circ$, não é possível diferenciar os ângulos yaw e $roll$. Além disso, pode haver uma descontinuidade ao mover os ângulos no espaço delimitado por $\pm\pi$, no qual um dos parâmetros muda repentinamente em resposta a pequenas mudanças na rotação.

3.8.1.3 Vetor de Rotação Principal (PRV)

Este conjunto de coordenadas é a base para o desenvolvimento de muitos outros conjuntos de coordenadas de atitude.

Tal conjunto origina-se no teorema de rotação de Euler, descrito a seguir: “A orientação de um corpo rígido descrita a partir de uma orientação inicial arbitrária pode ser obtida por meio de uma única rotação em torno de um eixo principal \hat{e} e por um ângulo principal φ .”

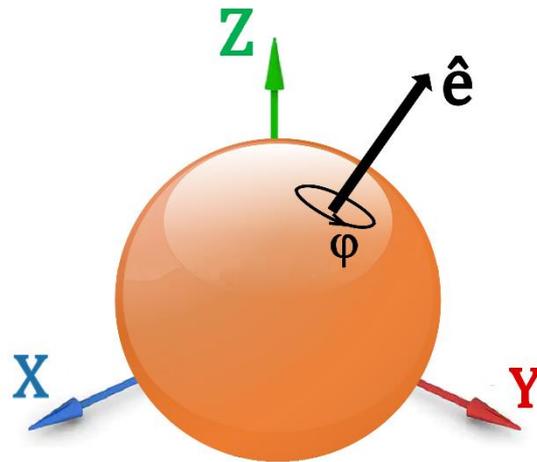


Figura 82 - Rotação representada por um eixo e ângulo de Euler

Seja o vetor unitário principal \hat{e} escrito nos sistemas de coordenadas $\{B\}$ e $\{N\}$:

$${}^B\hat{e} = e_{b1}\hat{b}_1 + e_{b2}\hat{b}_2 + e_{b3}\hat{b}_3 \quad (53)$$

$${}^N\hat{e} = e_{n1}\hat{n}_1 + e_{n2}\hat{n}_2 + e_{n3}\hat{n}_3 \quad (54)$$

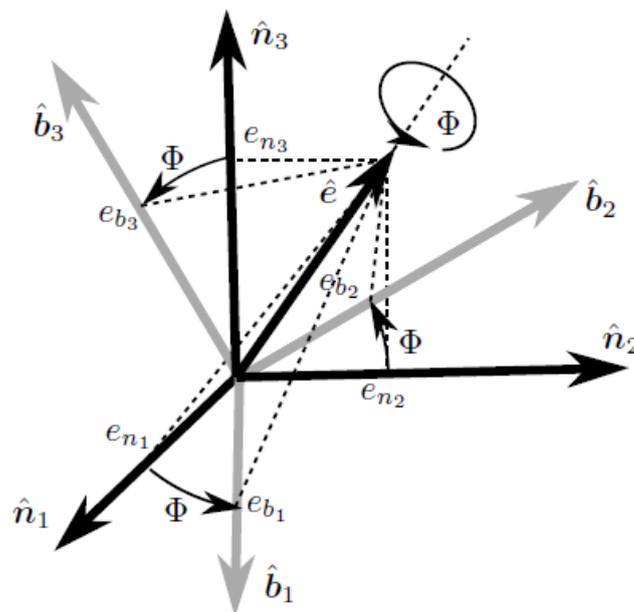


Figura 83 - Ilustração do teorema de Rotação Principal de Euler

Fonte: (SCHAUB, 2019)

A partir do teorema exposto acima, fica implícito que o vetor \hat{e} tem os mesmos componentes vetoriais nos sistemas de coordenadas $\{B\}$ e $\{N\}$, isto é, $e_{bi} = e_{ni} = e_i$, portanto ${}^B\hat{e} = {}^N\hat{e} = \hat{e}$.

Analisando a relação dos parâmetros (\hat{e}, φ) , observando as implicações do teorema e a matriz de rotação C , podem ser deduzidas as seguintes relações:

$$\cos\varphi = \frac{1}{2}(C_{11} + C_{22} + C_{33} - 1) \quad (55)$$

$$\hat{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sin\varphi} \begin{bmatrix} C_{23} - C_{32} \\ C_{31} - C_{13} \\ C_{12} - C_{21} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Em que C_{ij} é o elemento da i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz de rotação C (HANSPETER SCHAUB; JOHN L. JUNKINS, 2009).

3.8.1.4 Quaternions

Outro conjunto de coordenadas de atitude muito popular são os Quaternions, também conhecidos como Parâmetros de Euler. Descritos por um conjunto de quatro coordenadas (q_0, q_1, q_2, q_3) fornecem uma descrição de atitude não singular, mas redundante.

As coordenadas de quaternions são definidas em termos dos parâmetros (\hat{e}, φ) do conjunto de coordenadas do Vetor de Rotação Principal (PRV):

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos(\varphi/2) \\ q_1 &= e_1 \sin(\varphi/2) \\ q_2 &= e_2 \sin(\varphi/2) \\ q_3 &= e_3 \sin(\varphi/2) \end{aligned} \quad (57)$$

Por definição do conjunto de coordenadas PRV, sabe-se que $e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 = 1$. Da mesma forma, as coordenadas q_i satisfazem a restrição holonômica seguinte:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad (58)$$

Esta restrição descreve geometricamente uma esfera unitária de quatro dimensões, conforme pode-se observar na ilustração seguinte:

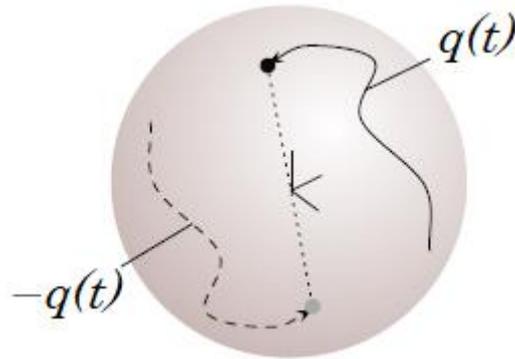


Figura 84 - Hiperesfera unitária

Fonte: (SCHAUB, 2019)

Dada uma certa atitude, existem dois conjuntos de quaternions que descrevem tal orientação. Isto ocorre pois as coordenadas PRV não são únicas, de forma que os conjuntos PRV seguintes (\hat{e}, φ) e $(-\hat{e}, -\varphi)$ determinarão o mesmo conjunto de quaternions (q_0, q_1, q_2, q_3) .

Usando as identidades trigonométricas:

$$\begin{aligned} \sin\varphi &= 2\sin(\varphi/2)\cos(\varphi/2) \\ \cos\varphi &= 2\cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) - 1 \end{aligned} \tag{59}$$

A seguinte relação entre os quaternions e a matriz de rotação C pode ser deduzida:

$$\begin{aligned} q_0 &= \pm \frac{1}{2} \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33} + 1} \\ q_1 &= \frac{C_{23} - C_{32}}{4q_0} \\ q_2 &= \frac{C_{31} - C_{13}}{4q_0} \\ q_3 &= \frac{C_{12} - C_{21}}{4q_0} \end{aligned} \tag{60}$$

Por estas equações, sobretudo pelo sinal \pm em q_0 , é fácil verificar que os conjuntos q e $-q$ descrevem a mesma orientação.

Embora os ângulos de Euler sejam amplamente utilizados por causa de sua representação física minimalista (3 parâmetros para 3 graus de liberdade) e intuitiva, eles exibem o fenômeno conhecido como *Gimbal Lock*, resultando em uma singularidade na representação de atitude. Isto pois neste sistema de coordenadas há o intuito de representar a orientação como três rotações

apenas, ou seja, três valores separados e relacionados. Assim, uma forma de contornar o *Gimbal Lock* é evitar o uso dos ângulos de Euler.

A utilização dos quaternions é uma boa escolha de conjunto de atitudes. Embora seja um conjunto redundante, é não-singular, qualquer sequência de rotações pode ser representada por uma trajetória contínua de quaternions e que não sofram descontinuidade como no caso dos ângulos de Euler. Também se mostra bem menos custoso computacionalmente em comparação com a representação por nove parâmetros da matriz de rotação (HANSPETER SCHAUB; JOHN L. JUNKINS, 2009).

Por isso, no desenvolvimento dos algoritmos que envolvem descrição de atitude, optou-se pela representação da atitude em ângulos de Euler na comunicação com o SCA, isto é, na descrição do valor de referência de atitude desejada do satélite e da exibição do seu valor atual na interface. Já na implementação do cálculo da atitude optou-se pela representação em quaternions. Para facilitar a transformação entre estas diferentes representações, a atitude também estará sempre disponível na descrição em matriz de rotação.

3.8.2 Determinação de Atitude

A abordagem para o cálculo da atitude pode ser separada em duas classes. A primeira refere-se à determinação estática de atitude em que se considera que todas as medidas entregues pelos sensores são tomadas ao mesmo tempo, de forma que a determinação de atitude se torna apenas uma solução geométrica das medidas tomadas. A segunda classe refere-se à determinação dinâmica de atitude em que são consideradas medidas ao longo do tempo. Para isso, as medições precisam ser otimamente combinadas, habitualmente utilizando um filtro de Kalman, constituindo assim um problema muito mais complexo que o primeiro (MARKLEY; CRASSIDIS, 2014).

Este trabalho aborda apenas o problema de determinação estática de atitude. Para isso, deve-se assumir também conhecida a posição do satélite em sua órbita.

Além disso, são necessárias ao menos duas medidas de observações. Isto, pois, cada vetor de observação entregue pelo sensor é um versor de três dimensões, logo contém dois graus de liberdade. Por isso, para que o sensor seja capaz de calcular a atitude, devem haver ao menos duas estrelas em seu campo de visada.

Para exemplificar o cálculo da atitude, considere duas estrelas vistas pelo sensor: a primeira estrela descrita pelo versor \hat{s}_1 e a segunda por \hat{s}_2 . Suas posições estão descritas no catálogo embarcado em coordenadas equatoriais J2000 (ascensão reta e declinação), sendo este

o referencial inercial (ECI) utilizado no cálculo da orientação. Representa-se este sistema de coordenadas por $\{N\}$. A posição das estrelas vistas pelo sensor é descrita no próprio sistema de coordenadas fixo ao satélite, conforme ilustrado na Figura 78. Representa-se este sistema por $\{B\}$.

Versores conhecidos: ${}^N\hat{s}_1$ e ${}^N\hat{s}_2$

Versores medidos: ${}^B\hat{s}_1$ e ${}^B\hat{s}_2$

Para calcular a orientação do satélite deseja-se mapear a posição da estrela descrita no referencial inercial $\{N\}$ para o referencial fixo ao satélite $\{B\}$:

$$\begin{aligned} {}^B\hat{s}_1 &= \tilde{B}N{}^N\hat{s}_1 \\ {}^B\hat{s}_2 &= \tilde{B}N{}^N\hat{s}_2 \end{aligned} \tag{61}$$

Dessa forma, calcula-se a matriz de rotação $\tilde{B}N$. Observe que a referência ao sistema de coordenadas fixo ao satélite é feita por $\{\tilde{B}\}$, pois as posições entregues pelo sensor contêm erros de medidas, logo a matriz de rotação mapeada não é exatamente BN e por isso é descrita como $\tilde{B}N$ (SCHAUB, 2019).

3.8.2.1 Algoritmo TRIAD

Uma primeira abordagem para este problema de cálculo de atitude determinístico é o método TRIAD (*TRI-axial Attitude Determination*) que usa exatamente dois vetores de observação. A ideia é determinar a matriz de rotação $\tilde{B}N$, introduzindo um terceiro sistema de coordenadas (três vetores ortonormais ou tríades), denotado por $\{T\}$.

Assim, inicialmente assume-se como primeiro versor da tríade \hat{t}_1 a direção do vetor de observação mais preciso. O segundo versor \hat{t}_2 como sendo ortogonal ao plano formado pelos dois vetores de observação. E o terceiro versor \hat{t}_3 como sendo ortogonal aos dois primeiros versores da tríade. No exemplo citado acima, consideremos que a observação \hat{s}_1 é mais precisa que a observação \hat{s}_2 .

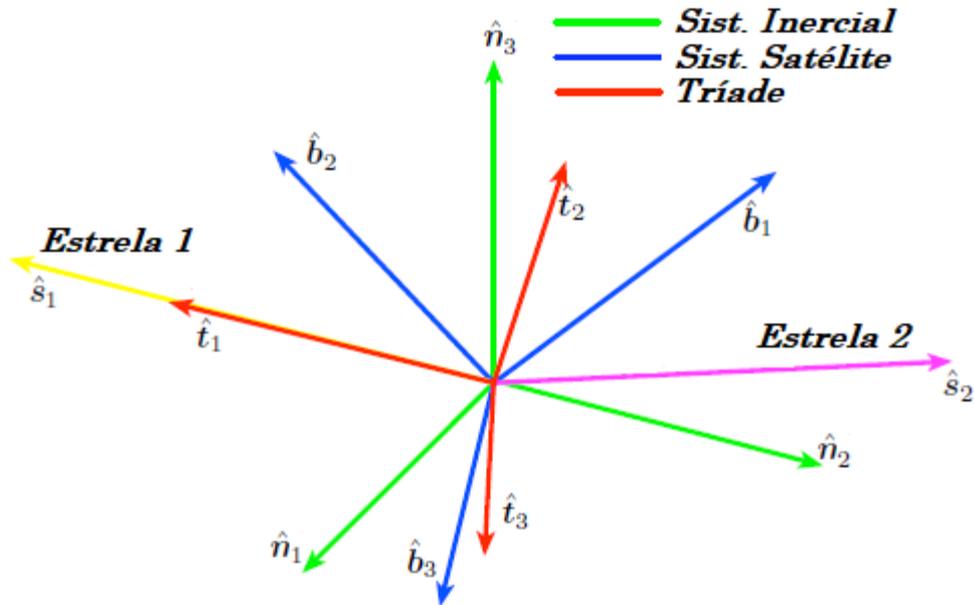


Figura 85 - Representação dos sistemas de coordenadas inercial $\{N\}$, solidário ao satélite $\{B\}$ e a triade computada $\{T\}$

Fonte: adaptado de (SCHAUB, 2019)

A triade $\{T\}$ pode ser computada pelas observações medidas no referencial inercial $\{N\}$ ou pelas observações no referencial do satélite $\{B\}$. Na ausência de erros de medidas, ambas as triades, $\{^N T\}$ e $\{^B T\}$, seriam iguais. Seja a triade computada a partir do referencial $\{N\}$:

$$\begin{aligned} {}^N \hat{t}_1 &= {}^N \hat{s}_1 \\ {}^N \hat{t}_2 &= \frac{{}^N \hat{s}_1 \times {}^N \hat{s}_2}{|{}^B \hat{s}_1 \times {}^B \hat{s}_2|} \\ {}^N \hat{t}_3 &= {}^N \hat{t}_1 \times {}^N \hat{t}_2 \end{aligned} \quad (62)$$

A matriz de rotação do referencial $\{N\}$ para o referencial $\{^N T\}$ é dada por: ${}^N T = [{}^N \hat{t}_1 \quad {}^N \hat{t}_2 \quad {}^N \hat{t}_3]$.

Seja a triade computada a partir do referencial $\{B\}$:

$$\begin{aligned} {}^B \hat{t}_1 &= {}^B \hat{s}_1 \\ {}^B \hat{t}_2 &= \frac{{}^B \hat{s}_1 \times {}^B \hat{s}_2}{|{}^B \hat{s}_1 \times {}^B \hat{s}_2|} \\ {}^B \hat{t}_3 &= {}^B \hat{t}_1 \times {}^B \hat{t}_2 \end{aligned} \quad (63)$$

A matriz de rotação do referencial $\{\tilde{B}\}$ para o referencial $\{^B T\}$ é dada por: ${}^B \tilde{T} = [{}^B \hat{t}_1 \quad {}^B \hat{t}_2 \quad {}^B \hat{t}_3]$.

Finalmente, a matriz de rotação $\tilde{B}N$ que descreve a orientação do satélite pode ser calculada por:

$$\tilde{B}N = \tilde{B}T (NT)^T \quad (64)$$

3.8.2.2 O Problema de Wahba

O método TRIAD determina a matriz de orientação de forma determinística e relativamente simples, porém para isso ele se utiliza apenas de dois vetores de observação, sendo que apenas um deles é usado diretamente no cálculo.

Em geral, há mais de duas observações disponíveis para o cálculo da atitude, seja no caso do sensor estelar que possui mais de duas estrelas no seu campo de visada, ou mesmo os satélites que comumente possuem mais de um sensor.

Em 1965, a matemática Grace Wahba propôs a seguinte questão que modela este problema de determinação de atitude. Conhecido como problema de Wahba, o objetivo é encontrar uma matriz de rotação entre dois sistemas de coordenadas a partir de um conjunto ponderado de observações vetoriais.

Assim, assume-se que o satélite possui n medidas de observação, sendo $n > 1$. As observações medidas no sistema fixo ao satélite $\{B\}$ são descritas como:

$${}^B\hat{v}_k = (BN)^N \hat{v}_k, \text{ sendo } k = 1, \dots, n \quad (65)$$

Então, o objetivo deste problema é encontrar a matriz de rotação $\tilde{B}N$ que minimiza a seguinte função custo:

$$J(\tilde{B}N) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n w_k \| {}^B\hat{v}_k - (\tilde{B}N)^N \hat{v}_k \|^2 \quad (66)$$

Se todas as medidas fossem perfeitas, ${}^B\hat{v}_k = (\tilde{B}N)^N \hat{v}_k$, logo $J(\tilde{B}N) = 0$.

Os valores escalares descritos por w_k são pesos que são atribuídos de acordo com a precisão do respectivo vetor de medida, permitindo assim que as medidas menos precisas não afetem tanto o cálculo da matriz de rotação. Na prática, porém, a maioria dos métodos de solução propostos consideram todas as medidas com mesmo peso, por isso em muitas formulações deste problema a variável w_k não aparece.

Uma vez modelado o problema de determinação de atitude como acima, diferentes métodos de otimização podem ser aplicados no cálculo da matriz de atitude $\tilde{B}N$. Tais métodos podem utilizar a representação de atitude em matrizes de rotação ou diretamente em quaternions.

Embora existam inúmeros algoritmos para a solução do problema acima, com suas vantagens e desvantagens a depender da aplicação, apenas será detalhado a seguir o algoritmo Horn, que foi implementado na ferramenta.

3.8.2.3 Algoritmo Horn

Conforme desenvolvido por (HORN, 1987) e descrito em (AYKROYD, 2021), analisando o problema descrito acima, ele pode ser sintetizado na equação:

$$J(\tilde{B}N) = \min_{\tilde{B}N} \sum_{k=1}^n \left\| {}^B\hat{v}_k - (\tilde{B}N)^N \hat{v}_k \right\|^2 \quad (67)$$

Expandindo a norma l^2 da equação acima:

$$J(\tilde{B}N) = \min_{\tilde{B}N} \sum_{k=1}^n \left(\left\| {}^B\hat{v}_k \right\|^2 + \left\| (\tilde{B}N)^N \hat{v}_k \right\|^2 - 2(\tilde{B}N)^N \hat{v}_k \cdot {}^B\hat{v}_k \right)$$

Observando que a rotação aplicada por $\tilde{B}N$ é isométrica, isto é, mantém a distância entre os pontos:

$$\begin{aligned} J(\tilde{B}N) &= \min_{\tilde{B}N} \sum_{k=1}^n \left(\left\| {}^B\hat{v}_k \right\|^2 + \left\| {}^N\hat{v}_k \right\|^2 - 2(\tilde{B}N)^N \hat{v}_k \cdot {}^B\hat{v}_k \right) \\ &= \max_{\tilde{B}N} \sum_{k=1}^n (\tilde{B}N)^N \hat{v}_k \cdot {}^B\hat{v}_k \end{aligned}$$

A matriz de rotação $\tilde{B}N$ pode ser reescrita em termos de quaternions. Seja o quaternion definido como vetor $\tilde{\mathbf{q}} = (q_0, q_1, q_2, q_3)$, $\tilde{\mathbf{q}}^*$ seu conjugado e um vetor qualquer em \mathbb{R}^3 : $\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix}$. A rotação deste vetor é dada pelo seguinte produto de quaternions: $B\tilde{N}\epsilon = \tilde{\mathbf{q}}\epsilon\tilde{\mathbf{q}}^*$. Com

isso, a equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J(\tilde{\mathbf{q}}) = \max_{\tilde{\mathbf{q}}} \sum_{k=1}^n (\tilde{\mathbf{q}}^N \hat{v}_k \tilde{\mathbf{q}}^*) \cdot {}^B\hat{v}_k = \max_{\tilde{\mathbf{q}}} \sum_{k=1}^n (\tilde{\mathbf{q}}^N \hat{v}_k) \cdot ({}^B\hat{v}_k \tilde{\mathbf{q}})$$

Como o produto de quaternions pode ser descrito na forma matricial, pode-se obter:

$$J(\tilde{\mathbf{q}}) = \max_{\tilde{\mathbf{q}}} \sum_{k=1}^n (\overline{N}_k \tilde{\mathbf{q}}) \cdot (B_k \tilde{\mathbf{q}}) = \max_{\tilde{\mathbf{q}}} \sum_{k=1}^n \tilde{\mathbf{q}}^T \left(\overline{N}_k^T B_k \right) \tilde{\mathbf{q}}$$

$$J(\tilde{q}) = \max_{\tilde{q}} \tilde{q}^T \left(\sum_{k=1}^n \overline{N}_k^T B_k \right) \tilde{q} \quad (68)$$

Sendo que as matrizes \overline{N}_k e B_k são definidas como:

$$\overline{N}_k = \begin{bmatrix} 0 & -N v_x & -N v_y & -N v_z \\ N v_x & 0 & N v_z & -N v_y \\ N v_y & -N v_z & 0 & N v_x \\ N v_z & N v_y & -N v_x & 0 \end{bmatrix} \text{ e } B_k = \begin{bmatrix} 0 & -B v_x & -B v_y & -B v_z \\ B v_x & 0 & -B v_z & B v_y \\ B v_y & B v_z & 0 & -B v_x \\ B v_z & -B v_y & B v_x & 0 \end{bmatrix}$$

A maximização de uma equação da forma $q^T M q$ em que $\|q\| = 1$, como na equação acima, é um problema conhecido. Seu ponto máximo é atingido por um autovetor correspondente ao maior autovalor de M . Assim, o quaternion \tilde{q} que maximiza a equação corresponde ao autovetor unitário associado ao maior autovalor da matriz $(\sum_{k=1}^n \overline{N}_k^T B_k)$.

Este algoritmo foi implementado e integrado na ferramenta para o cálculo do erro da linha de visada em relação ao seu valor de set-point, conforme descrito na seção 3.6.3 Cálculo da variância do baricentro. Assim, a matriz B_k é construída com base nos vetores da posição ruidosa das estrelas (vetor B_i , conforme equação 41) e a matriz \overline{N}_k com base nos vetores da posição de referência das estrelas (vetor a_i , conforme equação 41).

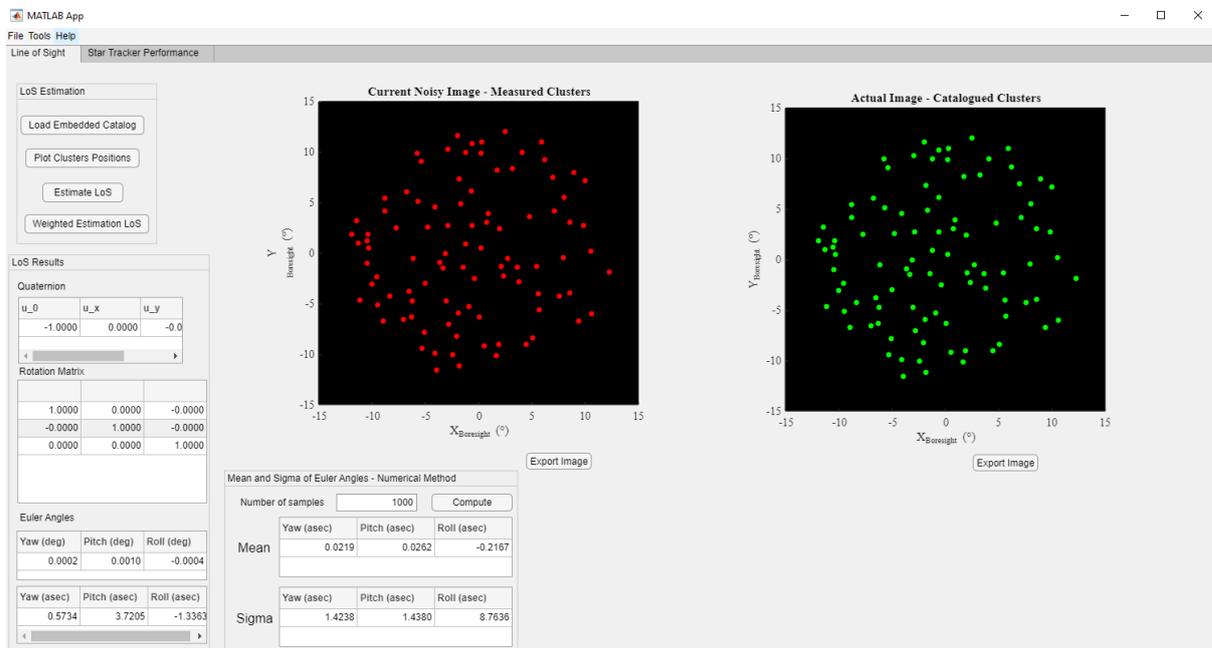


Figura 86 - Captura da interface contendo o cálculo do erro de linha de visada com base na posição das estrelas medidas e das estrelas catalogadas

Conforme pode se observar na Figura 86, o erro do cálculo expresso em matriz de rotação é aproximado da matriz identidade, assim como em quaternion contém apenas um componente

próximo de 1 e os demais são nulos. Isso, pois, o erro realmente é bastante pequeno, da ordem de segundos de arco, conforme pode-se observar.

A partir deste cálculo do erro da determinação de linha de visada, foi possível construir o mapa de precisão da atitude entregue pelo sensor e analisarmos sua precisão.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A ferramenta de cálculo de catálogo embarcado é um software que, a partir de diversos parâmetros construtivos do sensor, calcula os dados do catálogo que será embarcado no sensor. Com isto, é possível gerar diversos catálogos diferentes, avaliando sua precisão em função dos parâmetros de entrada da ferramenta.

A seguir são apresentados diferentes cenários de simulação e os respectivos resultados obtidos pela ferramenta.

4.1 PRIMEIRO CENÁRIO

4.1.1 *Cenário IA*

Descreveremos a seguir os principais parâmetros dos quais dependem o cálculo do catálogo embarcado utilizados neste primeiro cenário de simulação, como as características do detector e do sistema óptico, o catálogo de entrada e o nível de ruído considerado.

4.1.1.1 *Sistema de Detecção*

CCD Photometrics Evolve 512	
Resolução de pixels ativos	512 x 512
Tamanho do pixel	16 x 16 μm

A partir dos dados contidos no datasheet, tomamos a seguinte curva de eficiência quântica:

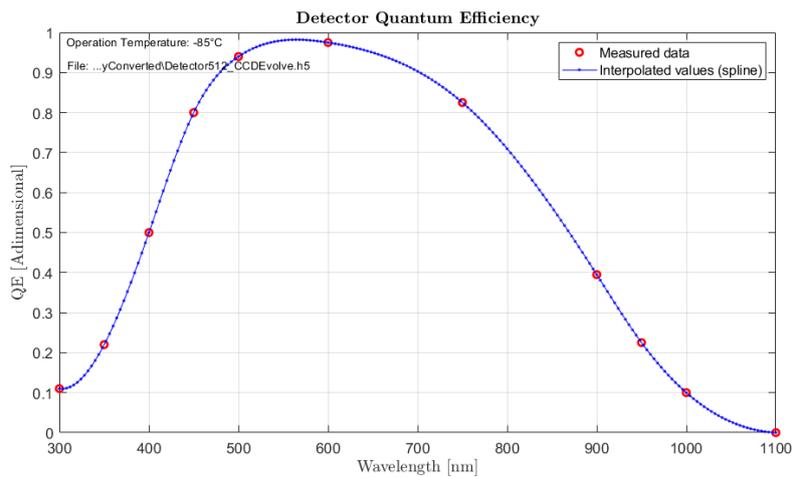


Figura 87 – Cenário IA: Curva de eficiência quântica do detector CCD Photometrics Evolver 512 carregada na ferramenta

4.1.1.2 Sistema Óptico

Sistema Óptico	
Campo de visada	25° x 25°
Comprimento focal	18,5mm
PSF sigma	2 x 2 px
Resolução janela PSF	40 x 40 px
Área de abertura da pupila	7,069cm ²
Tempo de exposição	0,1s

E a seguinte curva de transmissão óptica foi considerada:

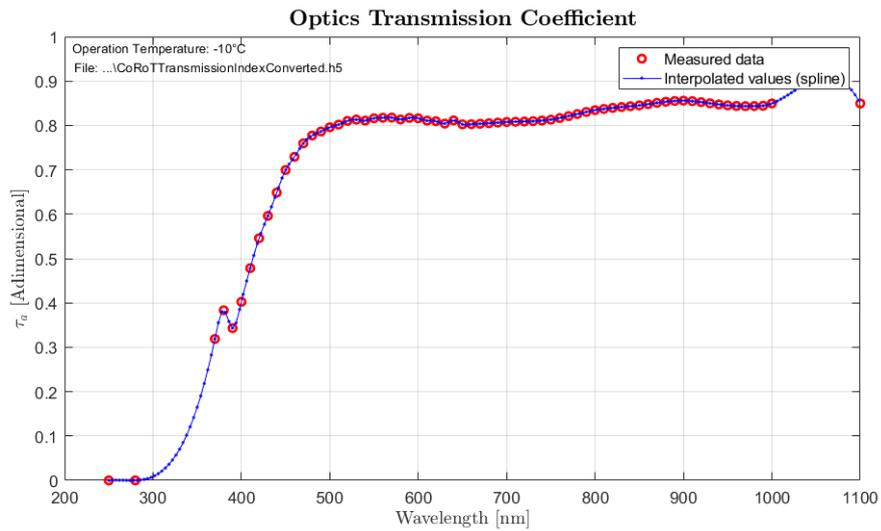


Figura 88 - Curva de transmissão óptica carregada na ferramenta

A partir dos parâmetros ópticos e de detecção, obtemos as seguintes PSF simuladas pela ferramenta:

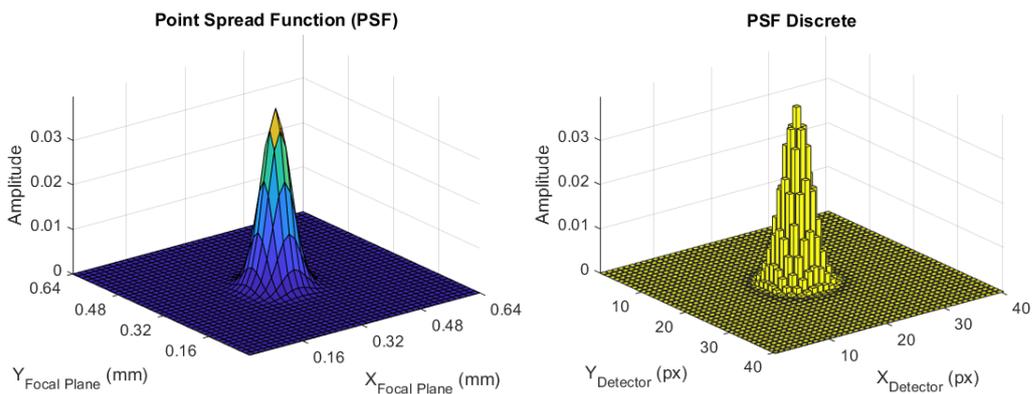


Figura 89 – Cenário I: À esquerda: PSF óptica. À direita: PSF discretizada

4.1.1.3 Catálogo de Entrada

Catálogo de Entrada	
Versão	GAIA DR2
Magnitude visual limite	5
Número de estrelas	2179

Assim, temos o seguinte mapa estelar do catálogo de entrada:

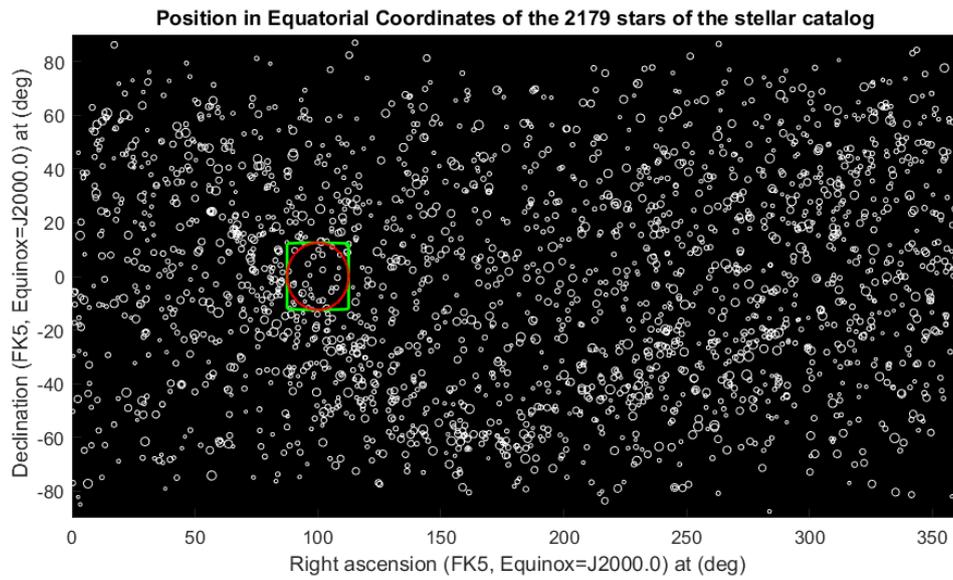


Figura 90 - Cenário IA: visualização das estrelas em coordenadas equatoriais

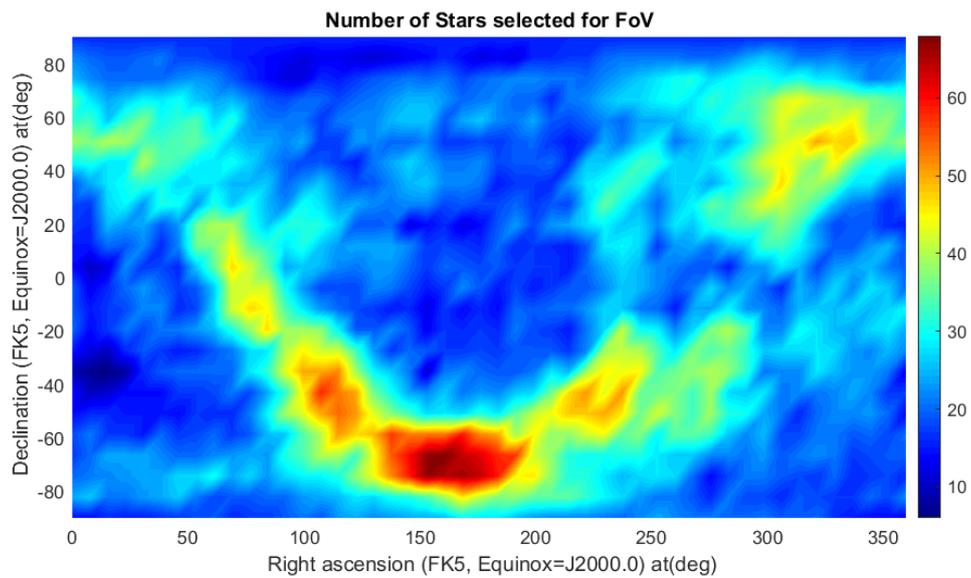


Figura 91 - Cenário IA: visualização da densidade estelar em coordenadas equatoriais

4.1.1.4 Ruídos: Luz zodiacal e eletrônica de proximidade

Ruídos	
Luz zodiacal de fundo de céu	Algoritmo seção 3.3.1
Ruído de leitura da eletrônica de proximidade	nenhum

Foi considerada a luz zodiacal calculada a partir do algoritmo descrito na seção 3.3.1, no qual a região próxima à localização do Sol possui ruído capaz de saturar o detector e nas demais regiões o ruído é da ordem de $10e^-/px/frame$.

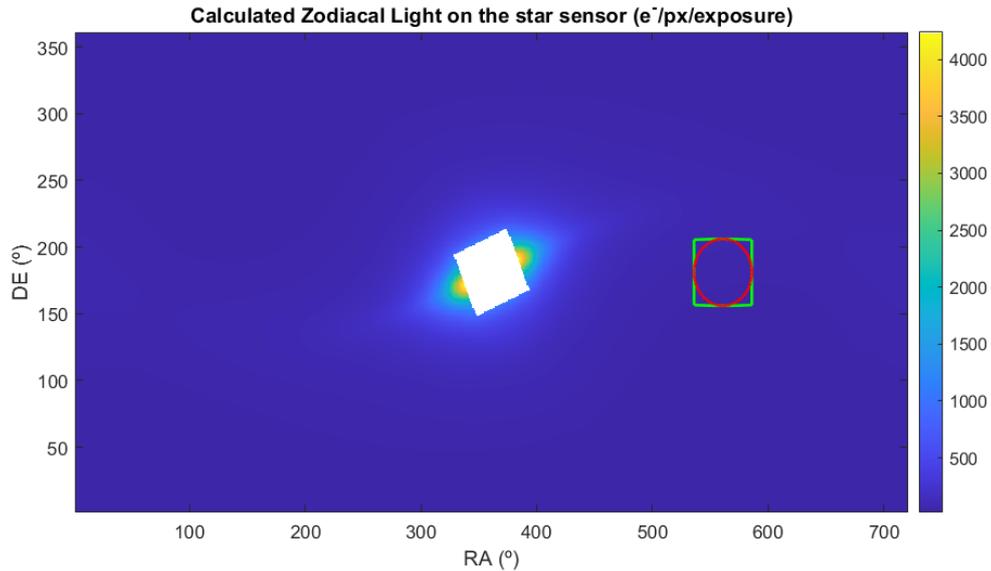


Figura 92 - Cenário IA: Luz zodiacal calculada pelo algoritmo da seção 3.3.1

Neste primeiro cenário, simulando um ambiente mais próximo do ideal, consideramos que a eletrônica de proximidade não adicionou qualquer ruído ao catálogo calculado.

4.1.1.5 Resultados intermediários: imagem do campo de visada e aglomerados

Considerando a linha de visada atual do sensor como $(\alpha, \delta) = (100, 0)^\circ$ em coordenadas equatoriais, obtemos as seguintes imagens do detector:

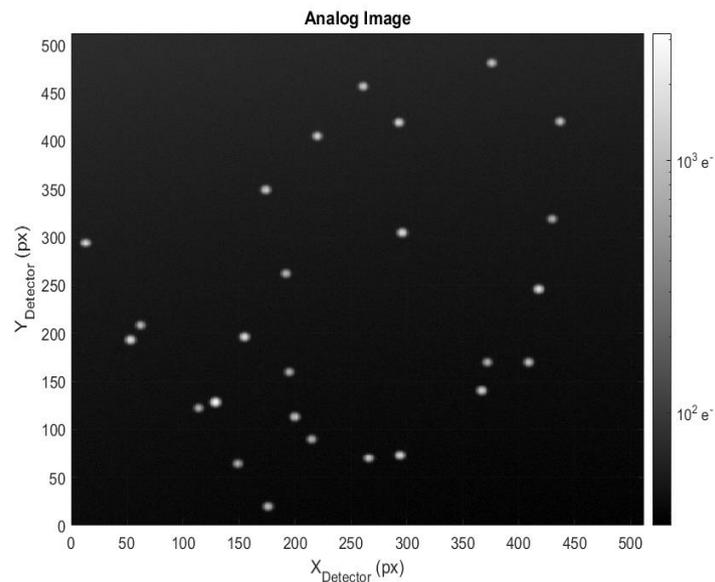


Figura 93 - Cenário IA: imagem analógica do detector para LoS = (100,0)°

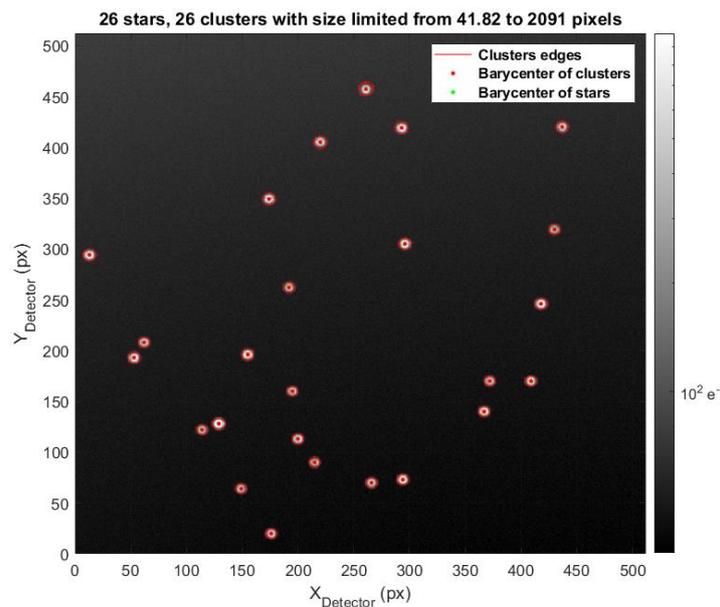


Figura 94 - Cenário IA: imagem digital do detector para LoS = (100,0)° contendo os aglomerados calculados

Como nenhum ruído foi adicionado pela eletrônica de proximidade, a imagem digital é praticamente a mesma da imagem analógica (com exceção da saturação envolvida no processo de digitalização) e o nível médio de ruído no fundo da imagem que se deve ao efeito da luz zodiacal. Para a linha de visada simulada, o nível de threshold que inicialmente é aplicado no processo de identificação de aglomerados na imagem digital do detector, conforme descrito na seção 3.6.1, é suficiente para eliminar o efeito do ruído na identificação e cálculo dos aglomerados.

Porém, se o campo de visada do sensor estiver um pouco mais próximo da direção do Sol, o cálculo dos aglomerados fica comprometido.

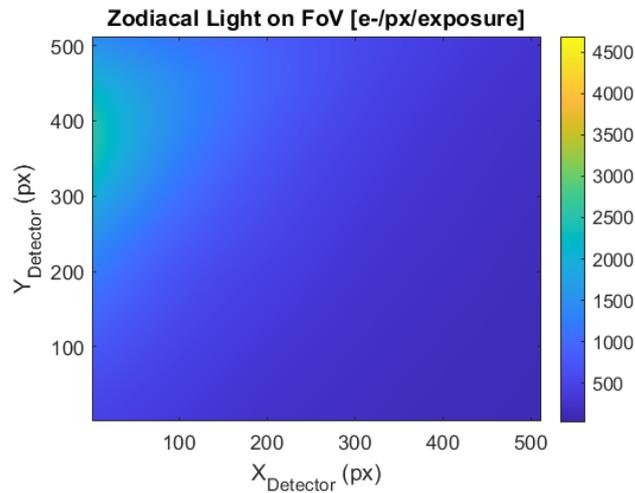


Figura 95 - Cenário IA: luz zodiacal no campo de visada do sensor para LoS = $(30,0)^\circ$

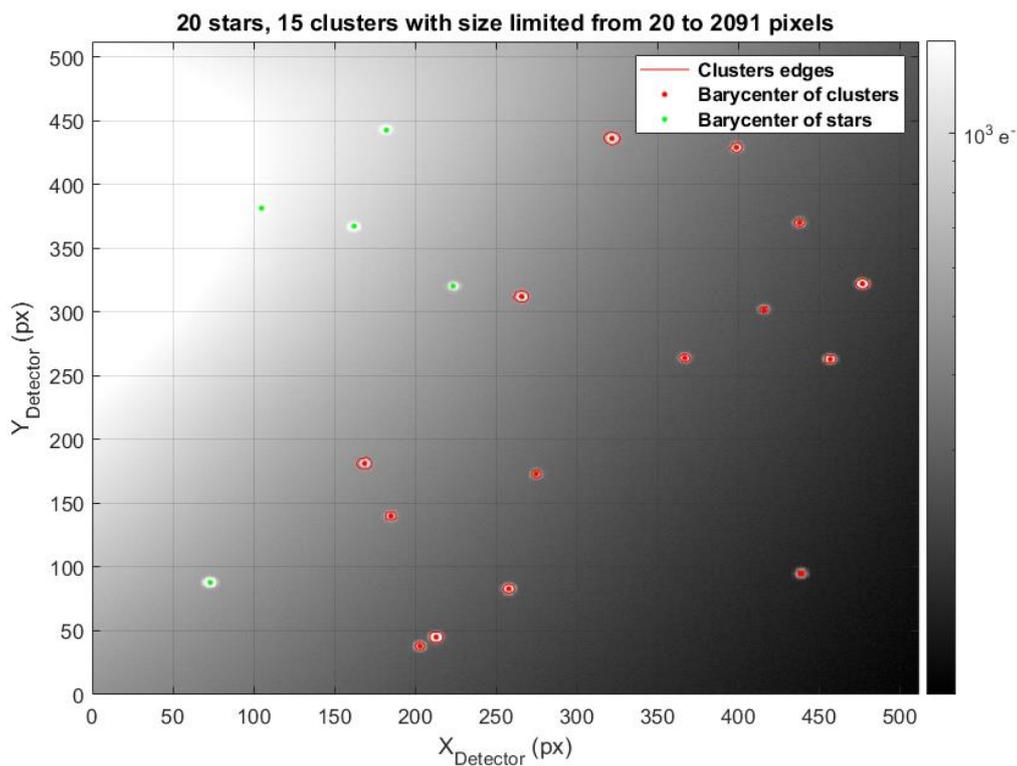


Figura 96 - Cenário IA: imagem digital do detector para LoS = $(30,0)^\circ$ contendo os aglomerados calculados

Para o caso de LoS = $(30,0)^\circ$, conforme ilustrado nas imagens acima, a região do campo de visada do sensor recebeu maior exposição da luz zodiacal do que para LoS = $(100,0)^\circ$, assim

alguns aglomerados não puderam ser identificados, pois ficaram imersos no ruído de fundo de céu.

Mesmo para os aglomerados que foram identificados neste campo de visada do sensor, a precisão do cálculo do seu baricentro foi afetada pelo efeito do ruído, como podemos observar nas figuras abaixo, ao compararmos o desvio padrão dos baricentros do campo de visão mais próximo à região solar (para $LoS=(30,0)^\circ$) ao mais distante (para $LoS=(100,0)^\circ$).

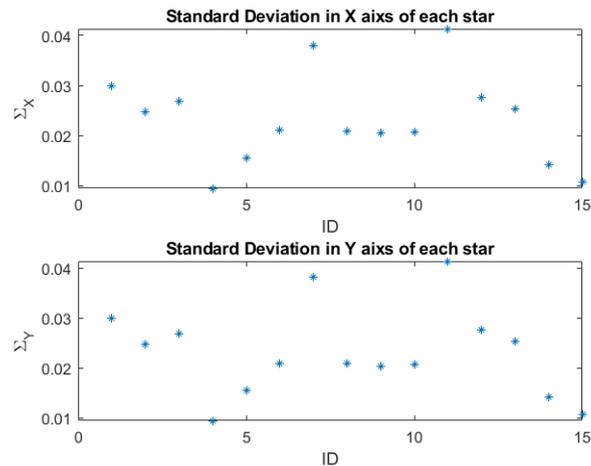


Figura 97 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 15 aglomerados identificados no campo de visada para $LoS = (30,0)^\circ$

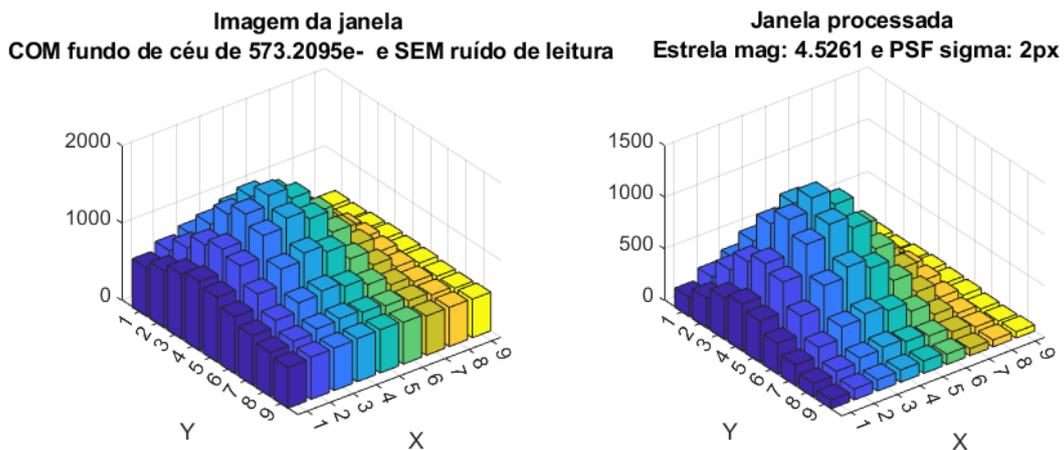


Figura 98 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado

$$((x_{bar}, y_{bar}) = (169.3, 183.3) \text{ e } (\sigma_x, \sigma_y) = (0.03001, 0.029993)) \text{ em } LoS = (30,0)^\circ$$

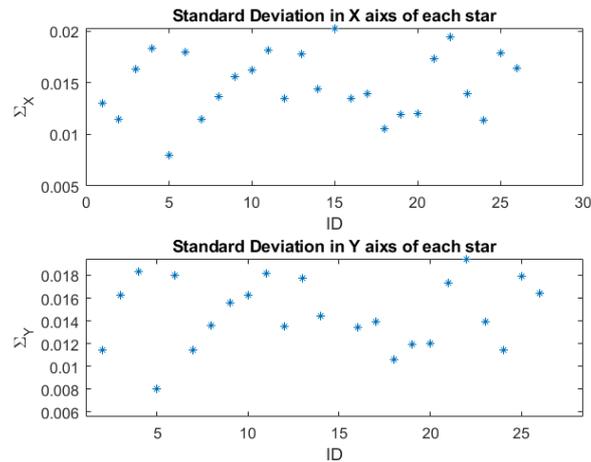


Figura 99 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 26 aglomerados identificados no campo de visada para $LoS = (100,0)^\circ$

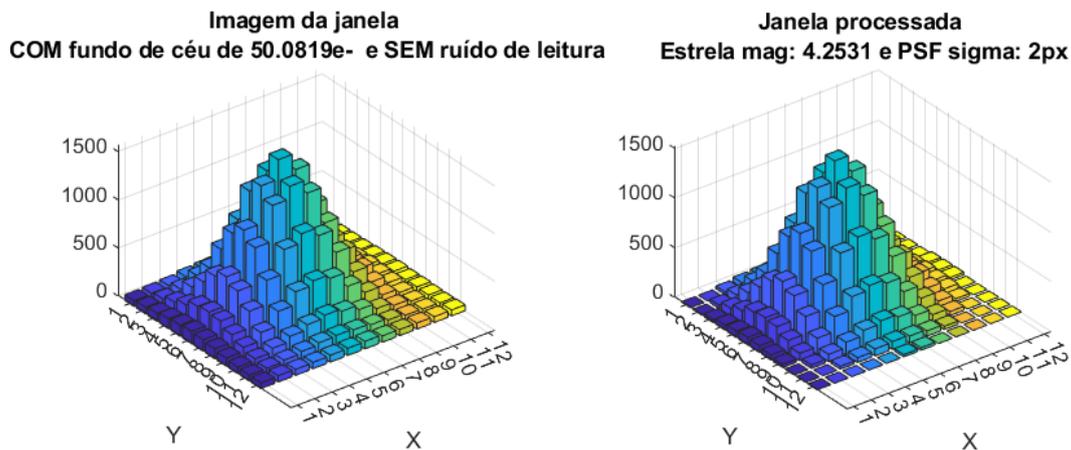


Figura 100 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado $((x_{bar}, y_{bar}) = (13.01, 294.0)$ e $(\sigma_x, \sigma_y) = (0.013034, 0.013032)$) em $LoS = (100,0)^\circ$

Vale notar também que se o Sol entrar no campo de visada do sensor, este torna-se inoperante, por isso o efeito da luz zodiacal na posição onde se encontra o Sol é ignorado, sendo considerado apenas seu efeito nas regiões vizinhas.

4.1.1.6 Resultados finais: aglomerados calculados para toda esfera celeste e construção do catálogo embarcado

A partir desse cenário, foram calculados os aglomerados em toda a esfera celeste, obtendo os resultados ilustrados a seguir.

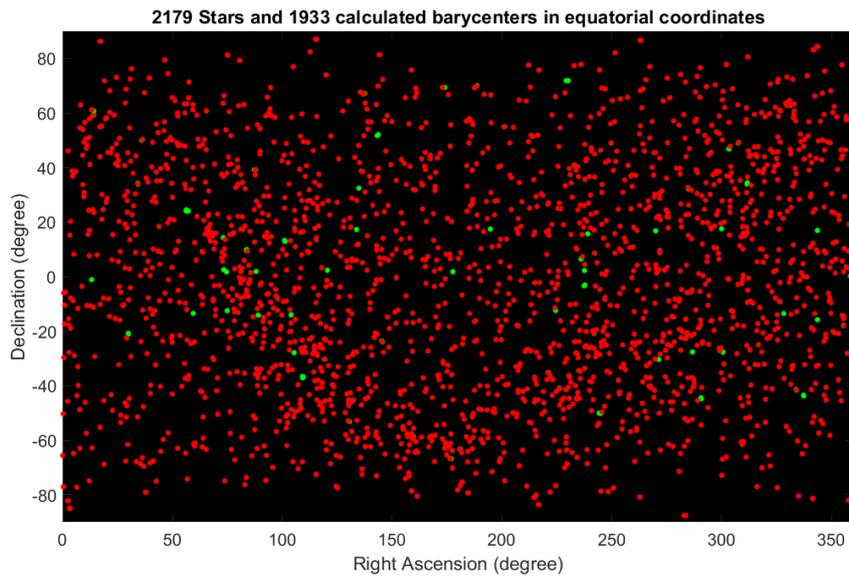


Figura 101 – Cenário IA: Aglomerados calculados em toda a esfera celeste. Pontos vermelhos: baricentros dos aglomerados calculados. Pontos verdes: posições originais das estrelas do catálogo de referência

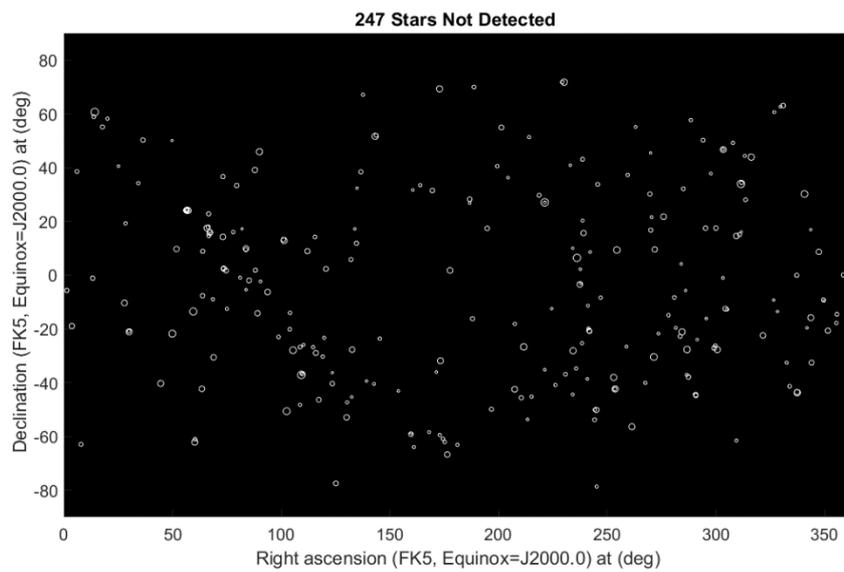


Figura 102 – Cenário IA: Visualização das estrelas do catálogo de entrada que não geraram aglomerados detectados pelo sensor

ClusterID	RA_deg	DE_deg	Amplitude	Nb_of_Pixels	Nb_of_Stars	
0	1.0	28.679027...	-67.659117...	54373.125...	62.0	1.0
1	2.0	33.485148...	-67.831755...	33373.388...	44.0	1.0
2	3.0	41.378292...	-67.623844...	27625.690...	37.0	1.0
3	4.0	4.9632028...	-64.854326...	88567.349...	93.0	1.0
4	5.0	13.369064...	-62.865830...	62369.852...	69.0	1.0
5	6.0	29.743121...	-61.584743...	172039.80...	81.0	1.0
6	7.0	26.531410...	-53.510228...	26575.205...	37.0	1.0
7	8.0	17.054981...	-55.241739...	41419.659...	45.0	1.0
8	9.0	18.822616...	-45.531324...	34633.088...	45.0	1.0
9	10.0	22.080692...	-43.342343...	200727.19...	91.0	1.0
10	11.0	22.849881...	-49.091060...	79592.785...	61.0	1.0
11	12.0	26.532684...	-50.803221...	29791.010...	37.0	1.0
12	13.0	28.437853...	-46.289242...	117378.22...	69.0	1.0
13	14.0	30.400593...	-44.696714...	31489.347...	37.0	1.0
14	15.0	14.652459...	-29.353087...	77819.422...	91.0	1.0
15	16.0	25.548005...	-32.333300...	17976.350...	25.0	1.0
16	17.0	21.385260...	-14.614791...	39650.446...	45.0	1.0
17	18.0	23.991309...	-15.412682...	17801.328...	25.0	1.0
18	19.0	26.022305...	-15.956012...	112353.83...	69.0	1.0
19	20.0	11.036611...	-10.617796...	40939.714...	45.0	1.0
20	21.0	12.523549...	-10.627823...	23807.086...	34.0	1.0
21	22.0	14.007650...	-11.262921...	28380.002...	37.0	1.0
22	23.0	17.132464...	-10.203939...	122894.47...	69.0	1.0
23	24.0	18.614088...	-7.9186247...	17252.284...	24.0	1.0
24	25.0	20.981899...	-8.1848085...	107117.84...	69.0	1.0
25	26.0	25.690920...	-3.7003523...	29204.354...	37.0	1.0
26	27.0	12.172638...	7.5898354...	79106.314...	69.0	1.0
27	28.0	15.744188...	7.8901073...	64080.623...	60.0	1.0
28	29.0	17.843329...	21.058336...	78598.745...	95.0	1.0
29	30.0	22.878992...	15.356902...	108373.91...	69.0	1.0
30	31.0	13.799548...	24.554144...	31338.891...	43.0	1.0
31	32.0	14.301433...	23.428672...	60656.209...	61.0	1.0

Figura 103 – Cenário IA: Visualização do arquivo em HDF5 contendo os dados catálogo embarcado

Como podemos observar, poucas são as estrelas que não puderam ser identificadas pelo sensor neste cenário. Este efeito se deve ao baixo nível de ruído considerado na simulação. Além disso, como o catálogo de entrada é formado apenas pelas estrelas com magnitude visual até 5, a maioria dos alvos puderam ser distinguidos pelo sensor, isto é, a maioria dos aglomerados são formados por uma única estrela. Desta forma, a maioria das estrelas que não foram detectadas se deve às lacunas existentes no próprio processo de extensão dos algoritmos para toda esfera celeste.

4.1.2 Cenário IB

Consideramos agora o mesmo sistema de detecção, sistema óptico e ruídos simulados e alteramos apenas o catálogo de entrada.

4.1.2.1 Catálogo de Entrada

Catálogo de Entrada	
Versão	GAIA DR2
Magnitude visual limite	6
Número de estrelas	6752

Podemos visualizar as estrelas deste catálogo nas figuras a seguir:

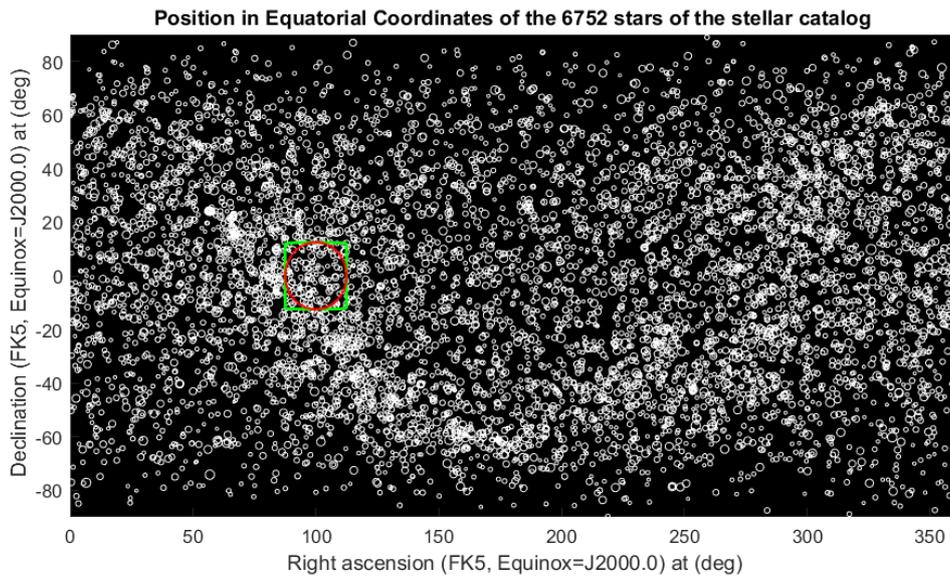


Figura 104 - Cenário IB: visualização das estrelas em coordenadas equatoriais

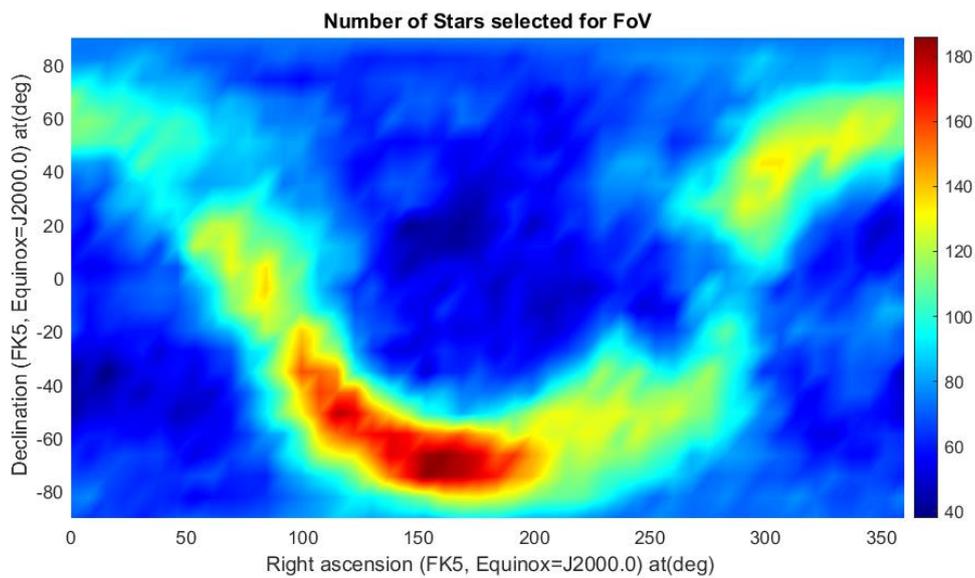


Figura 105 - Cenário IB: visualização da densidade estelar em coordenadas equatoriais

4.1.2.2 Resultados intermediários: aglomerados calculados

Neste cenário, partindo de um catálogo de entrada maior e considerando a mesma linha de visada da simulação anterior, isto é, para $LoS = (100,0)^\circ$, obtemos a seguinte imagem digital e aglomerados calculados:

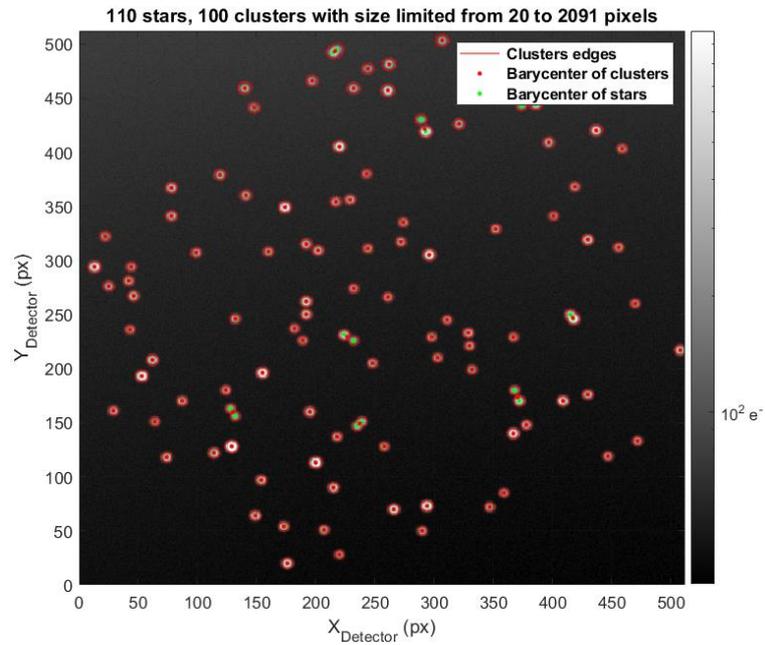


Figura 106 - Cenário IB: imagem digital do detector para LoS = (100,0)° contendo os aglomerados calculados

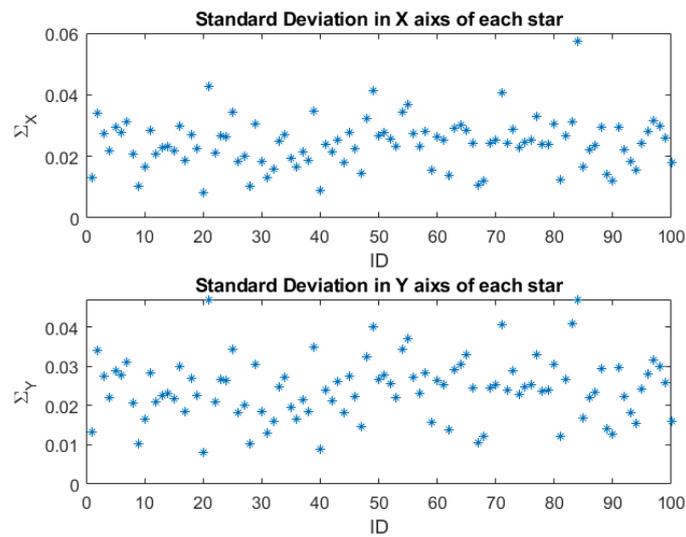


Figura 107 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 100 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (100,0)°

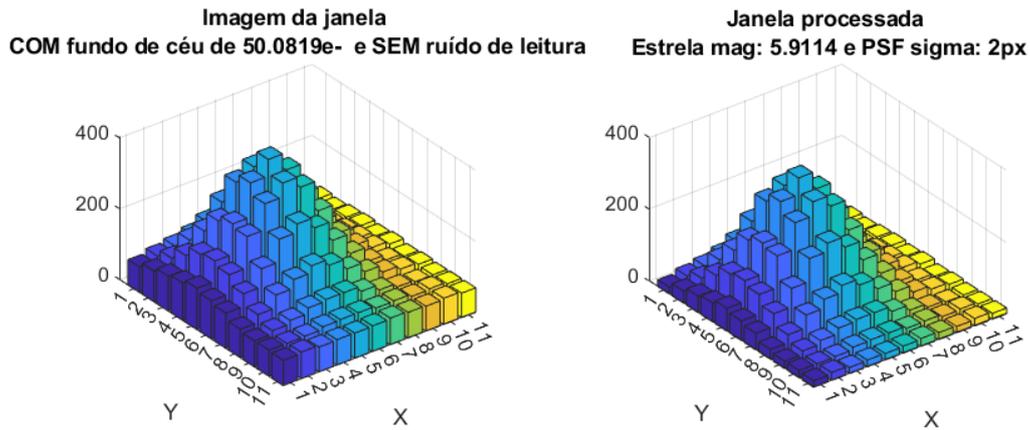


Figura 108 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado gerado por estrela de magnitude visual 5.9 e $(\sigma_x, \sigma_y) = (0.036948, 0.036957)$ em LoS = $(100,0)^\circ$

Como vemos, pela maior quantidade de estrelas detectadas pelo sensor em seu campo de visada, há aglomerados múltiplos identificados, isto é, aglomerados formados por mais de uma estrela. Além disso, o desvio padrão do cálculo do baricentro do aglomerado é função da intensidade de elétrons pertencente ao aglomerado, assim, quanto maior a magnitude visual da estrela, maior o desvio padrão do baricentro. Por isso observamos uma amplitude maior no plot do desvio padrão da Figura 107 acima em comparação com a Figura 99, que contém estrelas com magnitude visual menor que 5.

4.1.2.3 Resultados finais: aglomerados calculados para toda esfera celeste

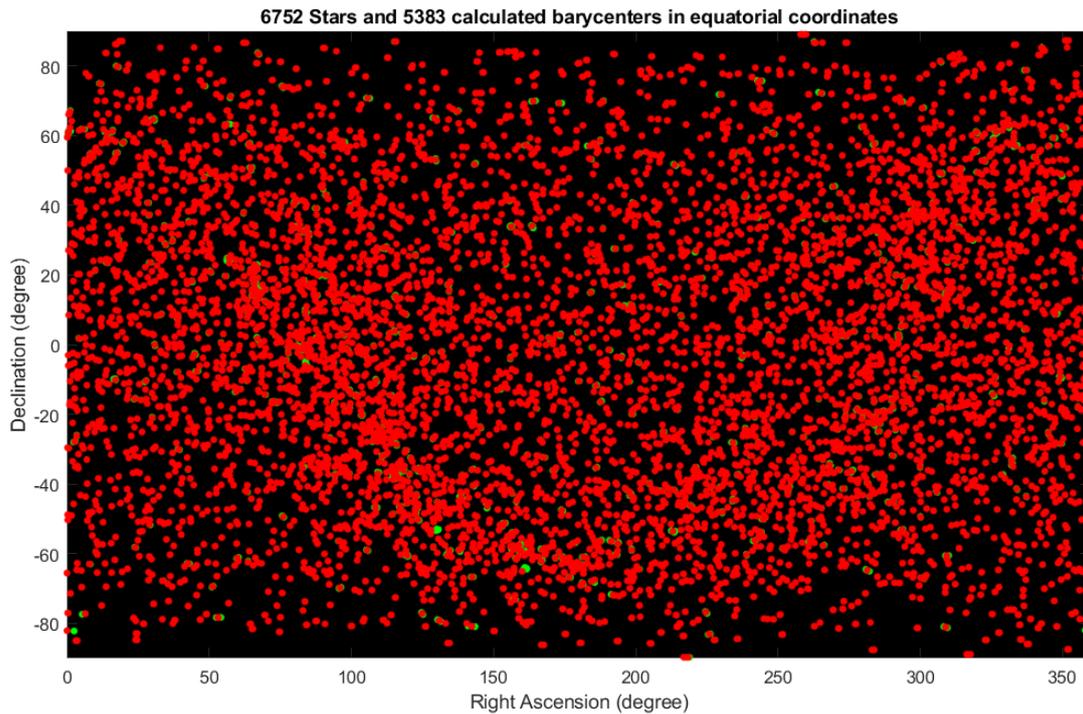


Figura 109 - Cenário IB: Aglomerados em toda a esfera celeste. Pontos vermelhos: baricentros dos aglomerados calculados. Pontos verdes: posições originais das estrelas do catálogo de referência

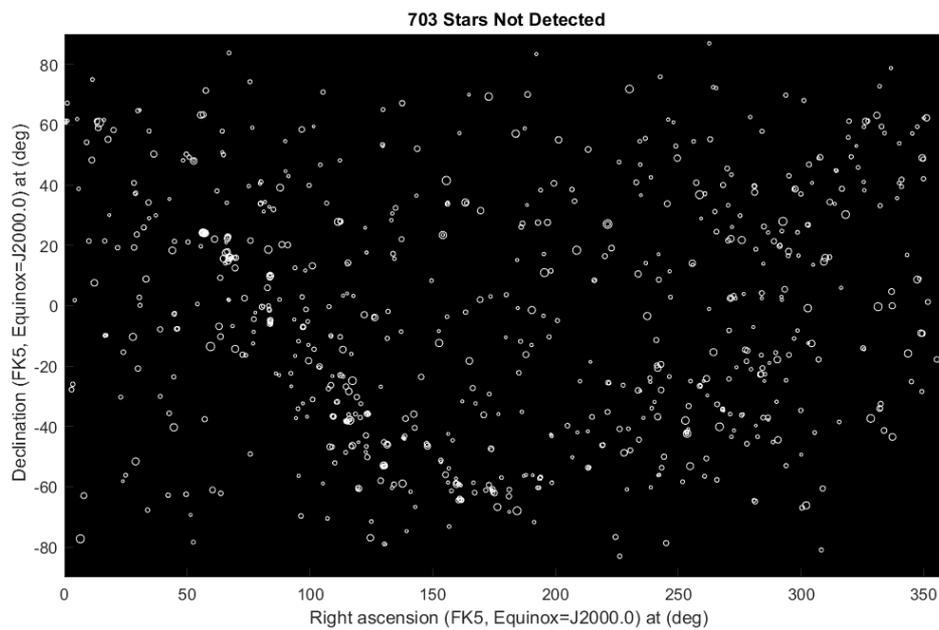


Figura 110 - Cenário IB: Visualização das estrelas do catálogo de entrada que não geraram aglomerados detectados pelo sensor

Pelas figuras acima, observamos que a partir das 6752 estrelas do catálogo de entrada, 703 não foram identificadas pelo sensor. E a partir das 6049 estrelas identificadas, foram originados 5383 aglomerados.

4.1.3 Cenário IC

Consideramos agora o mesmo sistema de detecção e sistema óptico anteriores, porém com o catálogo de entrada menor, como no cenário IA, e maiores ruídos adicionados no processo de cálculo do catálogo.

4.1.3.1 Catálogo de Entrada

Catálogo de Entrada	
Versão	GAIA DR2
Magnitude visual limite	5
Número de estrelas	2179

4.1.3.2 Ruídos

Ruídos	
Luz zodiacal de fundo de céu	200e-/px/s (constante)
Ruído de leitura da eletrônica de proximidade	100e-RMS/px/frame

Neste cenário, a luz zodiacal foi aproximada por um valor constante para todo o céu e o ruído de leitura da eletrônica de proximidade é adicionado, conforme ilustrado nas figuras abaixo.

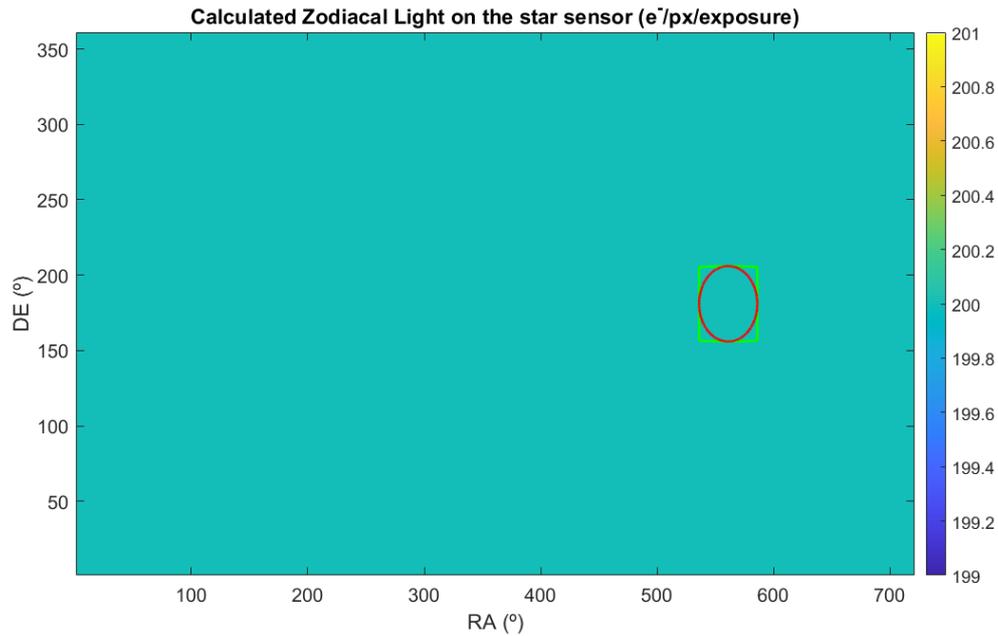


Figura 111 - Cenário IC - Luz zodiacal aproximada por valor constante em todo céu

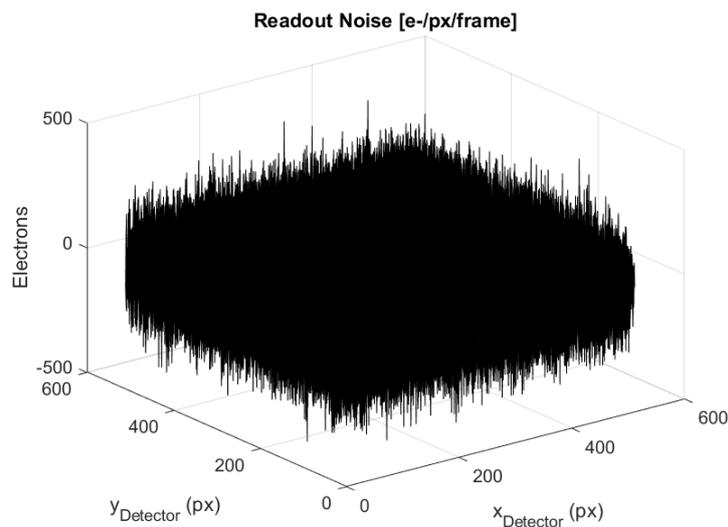


Figura 112 - Cenário IC - Ruído de leitura de 100 e-RMS/px/frame

4.1.3.3 Resultados intermediários: imagem do campo de visada e aglomerados

Considerando $LoS = (100,0)^\circ$, ao compararmos a imagem analógica do detector com a imagem digitalizada expressas nas figuras abaixo, podemos observar mais nitidamente o efeito do ruído de leitura no processo de cálculo dos aglomerados.

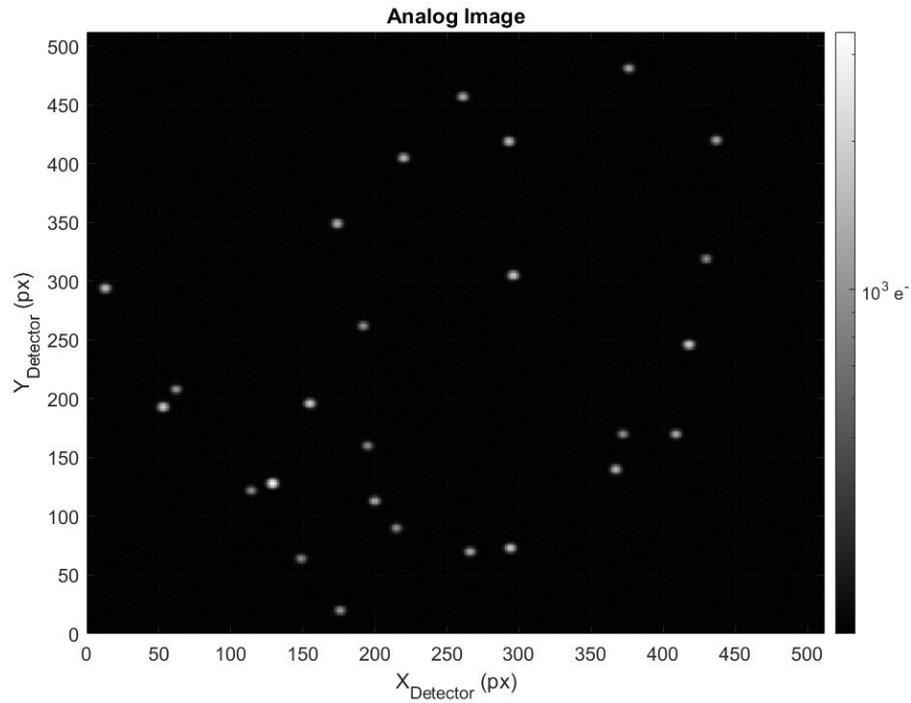


Figura 113 - Cenário IC: imagem analógica do detector para LoS = $(100,0)^\circ$ contendo ruído da luz zodiacal

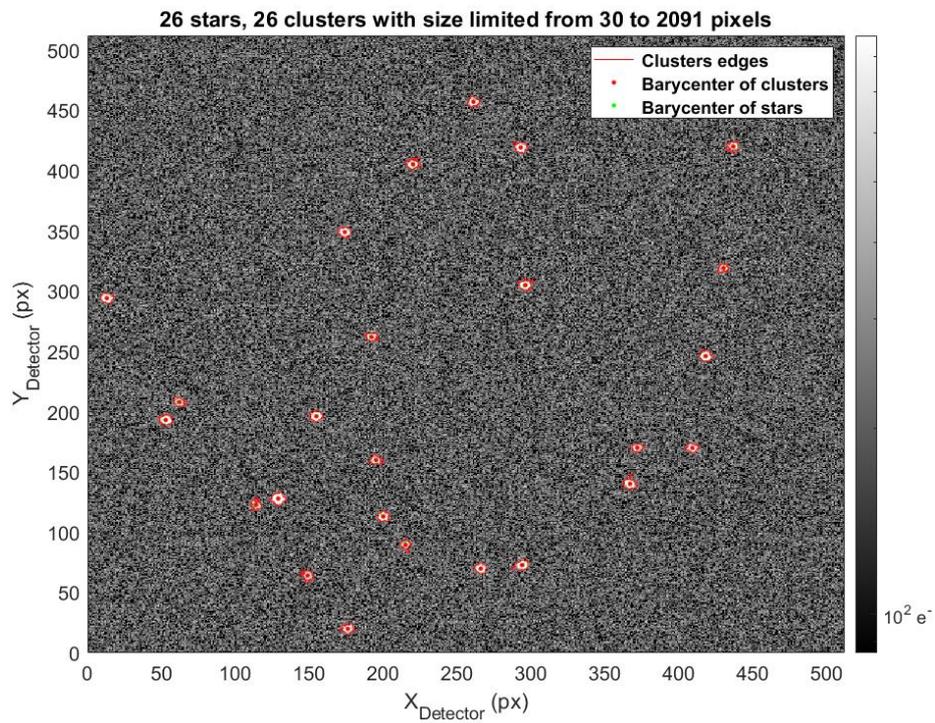


Figura 114 - Cenário IC: imagem digital do detector, considerando ruído de leitura, para LoS = $(100,0)^\circ$, ilustrando o baricentro dos aglomerados calculados

Da mesma forma que as simulações do cenário IA, (Figura 94), todas as 26 estrelas do campo de visada foram identificadas, porém podemos observar também a precisão bem menor no cálculo dos aglomerados devido ao ambiente mais ruidoso, conforme ilustrado nas figuras abaixo.

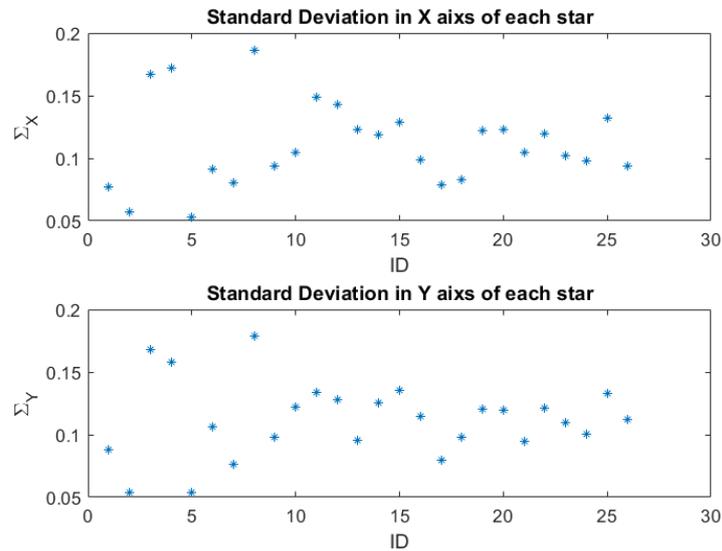


Figura 115 - Desvio padrão em x e y do baricentro dos 26 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (100,0)°

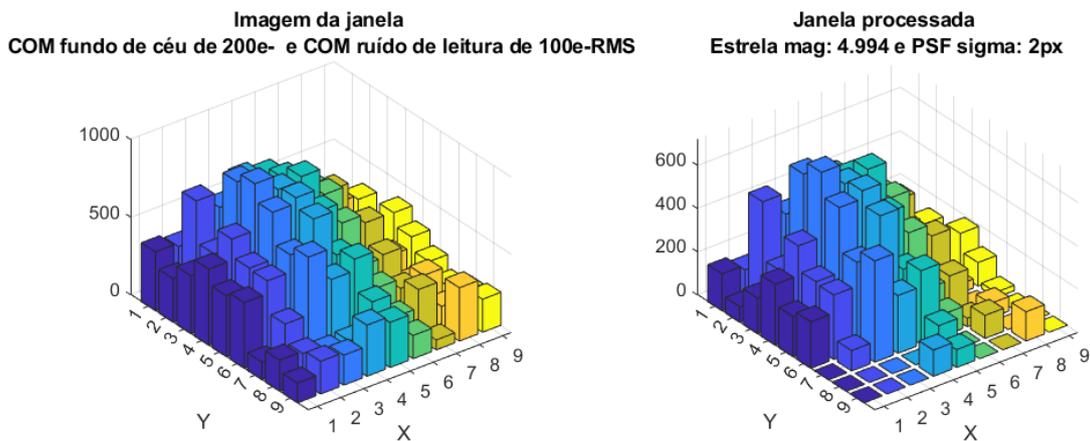


Figura 116 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado $(\sigma_x, \sigma_y) = (0.14911, 0.13361)$ em LoS = (100,0)°

4.1.3.4 Resultados finais: aglomerados calculados para toda esfera celeste

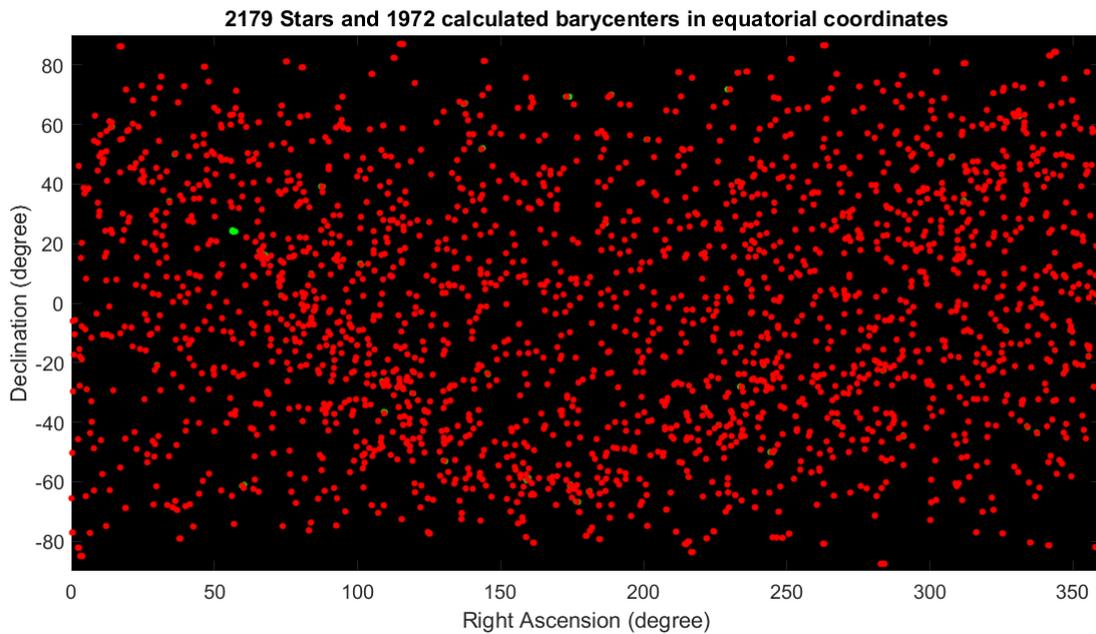


Figura 117 - Cenário IC: Aglomerados em toda a esfera celeste. Pontos vermelhos: baricentros dos aglomerados calculados. Pontos verdes: posições originais das estrelas do catálogo de referência

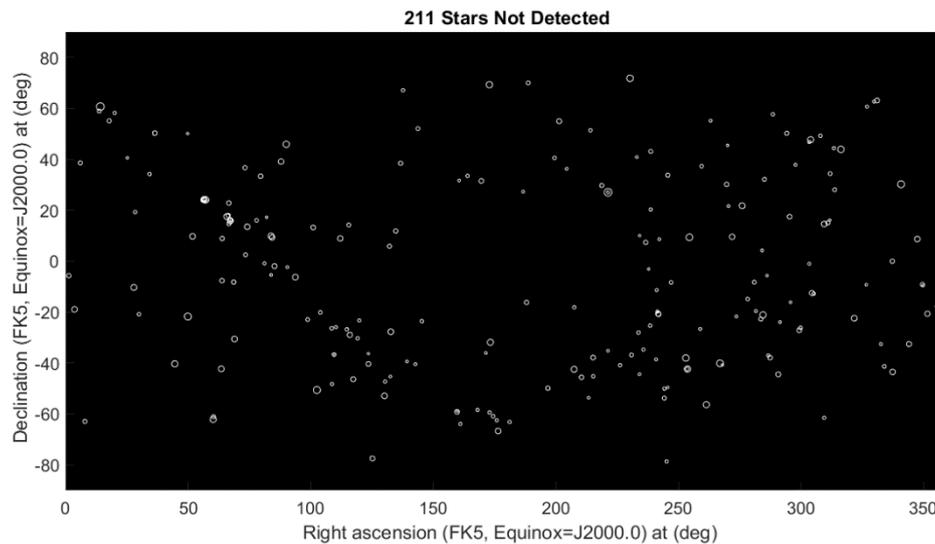


Figura 118 - Cenário IC: Visualização das estrelas do catálogo de entrada que não geraram aglomerados detectados pelo sensor

Neste caso, apesar do ambiente ruidoso, grande parte das estrelas puderam ser identificadas.

A partir dessas simulações, pudemos observar como o nível de ruído das imagens modifica a precisão do cálculo do baricentro. Além disso, observamos como o intervalo de magnitudes às quais o sensor é sensível, parâmetro que determina a quantidade de estrelas que

compõe o catálogo de entrada, dá origem a aglomerados formados por mais de uma estrela. Mesmo nestes casos, no processo de identificação de aglomerados o sensor consegue detectar a maioria destas estrelas que compõem o catálogo.

4.2 SEGUNDO CENÁRIO

Neste segundo cenário, o sistema óptico e de detecção foram alterados. Foi adotado um detector com maior resolução e menor tamanho de pixel, em relação ao primeiro cenário e no sistema óptico, foi usada uma PSF com maior dispersão, de forma a compararmos a relação de alguns dos principais parâmetros do sistema óptico e de detecção na capacidade de identificação e precisão de cálculo dos aglomerados.

4.2.1 Cenária IIA

4.2.1.1 Sistema de detecção

Teledyne E2V APS 2000	
Resolução de pixels ativos	2000 x 2000
Tamanho do pixel	12 x 12 μm

Utilizamos a seguinte curva de eficiência quântica:

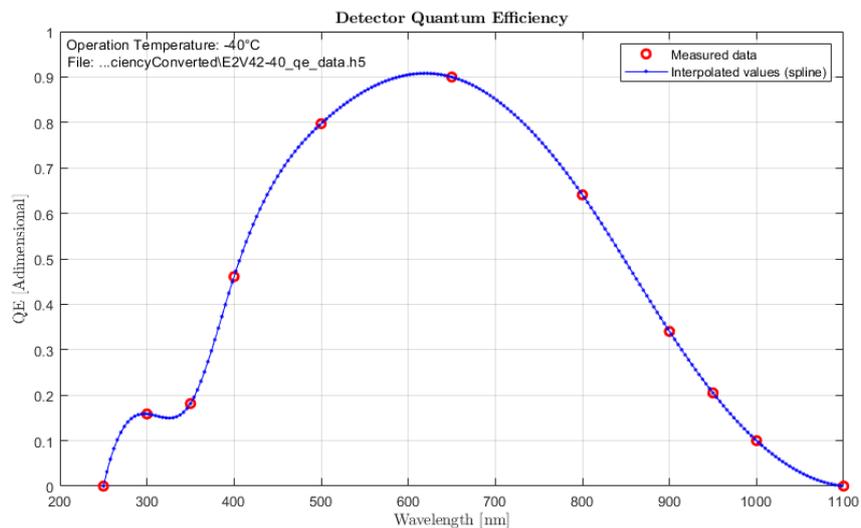


Figura 119 - Cenário IA: Curva de eficiência quântica do detector Teledyne E2V APS 2000 carregada na ferramenta

4.2.1.2 Sistema óptico

Sistema Óptico	
Campo de visada	25° x 25°
Comprimento focal	18,5mm
PSF sigma	3 x 3 px
Resolução janela PSF	40 x 40 px
Área de abertura da pupila	7,069cm ²
Tempo de exposição	0,1s

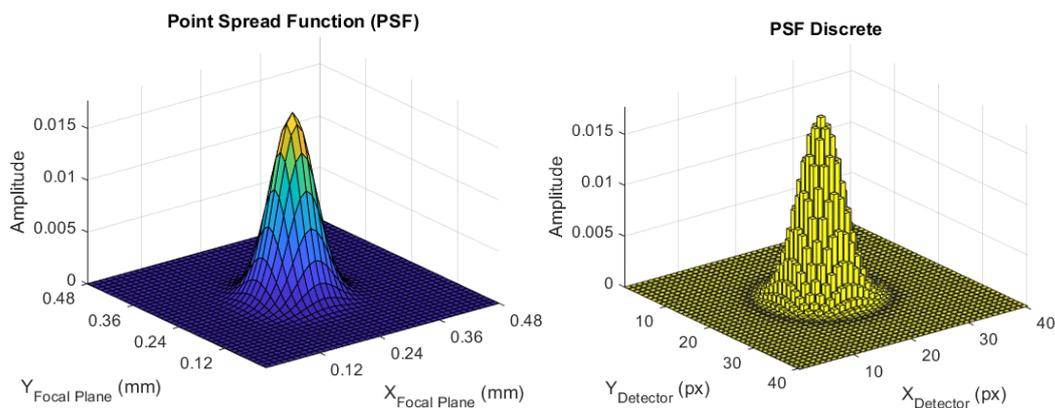


Figura 120 - Cenário II. À esquerda: PSF óptica. À direita: PSF discretizada com $\sigma_x = \sigma_y = 3px$

Ao observarmos a PSF discretizada na figura acima, vemos que seu diâmetro ocupa cerca de 15 pixels, ao contrário da PSF do primeiro cenário, com sigma cujo diâmetro ocupa cerca de 10 pixels, conforme ilustrada na Figura 89.

4.2.1.3 Catálogo de Entrada

Utilizamos o catálogo com menor número de estrelas, como no cenário IA.

Catálogo de Entrada	
Versão	GAIA DR2
Magnitude visual limite	5
Número de estrelas	2179

4.2.1.4 Ruídos

Consideramos um ambiente mais ruidoso, com efeito de luz zodiacal em todo o céu e adição do ruído de leitura.

Ruídos	
Luz zodiacal de fundo de céu	200e-/px/s (constante)

4.2.1.5 Resultados Intermediário: imagem analógica e aglomerados calculados

Conforme pode ser observado na figura abaixo, apesar das estrelas ocuparem maior quantidade de pixels devido à maior dispersão da PSF, elas ficam menos nítidas na imagem analógica do campo de visada devido à maior resolução do detector.

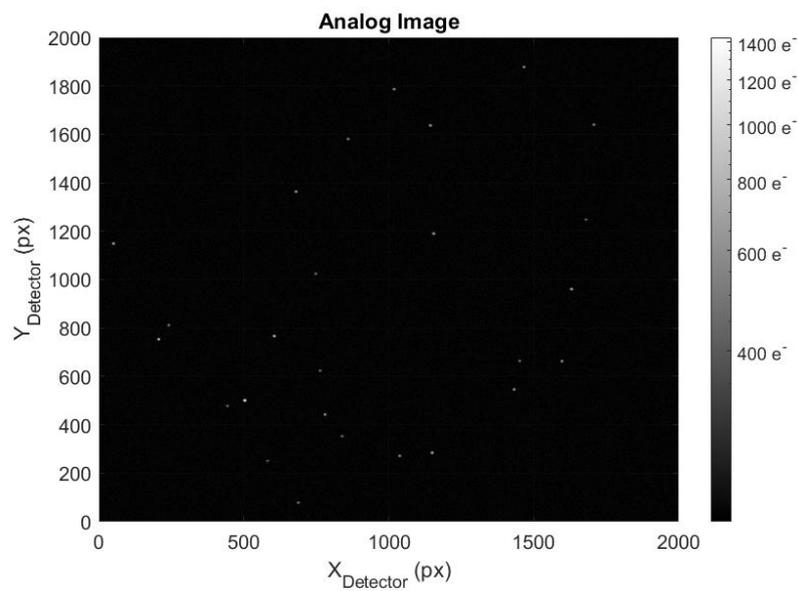


Figura 121 - Cenário IIA: imagem analógica do detector para LoS = (100,0)°

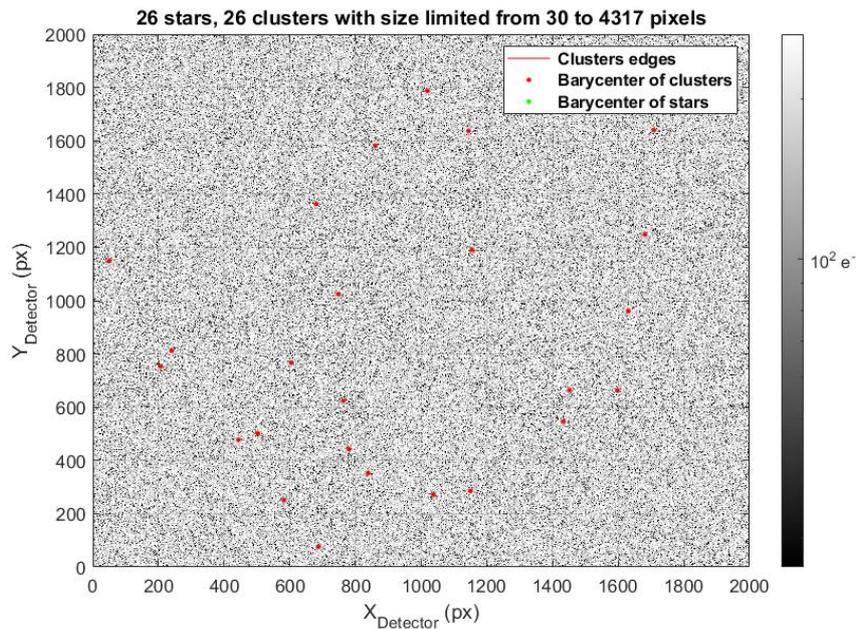


Figura 122 - Cenário IIA: imagem digital do detector para LoS = $(100,0)^\circ$, ilustrando o baricentro dos aglomerados calculados

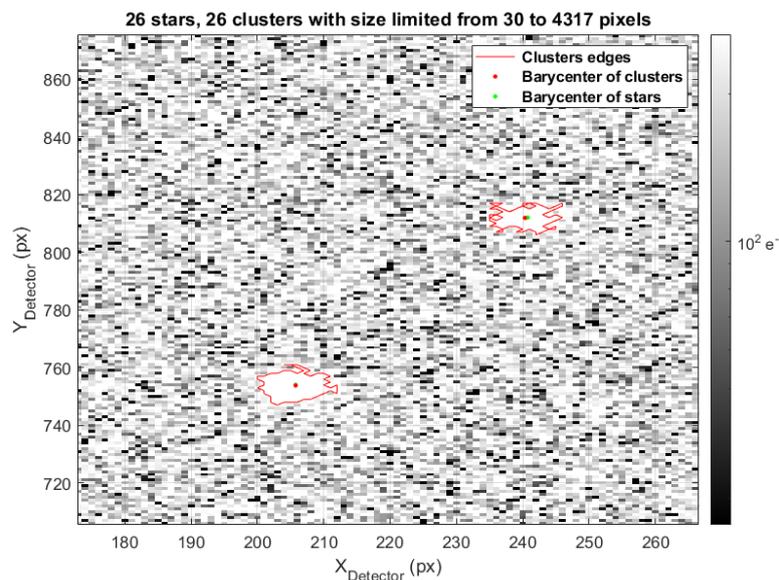


Figura 123 - Cenário IIA: 'zoom in' em região de identificação de na imagem digital do detector

Apesar da simulação considerar um maior nível de ruído, todas as estrelas do campo de visada foram identificadas, assim como ocorreu com a simulação em ambiente ruidoso no cenário IC. Porém, ao compararmos o desvio padrão do baricentro ilustrado das figuras abaixo com o obtido no cenário anterior, conforme Figura 115, observamos que a precisão do cálculo diminuiu devido à maior dispersão da PSF.

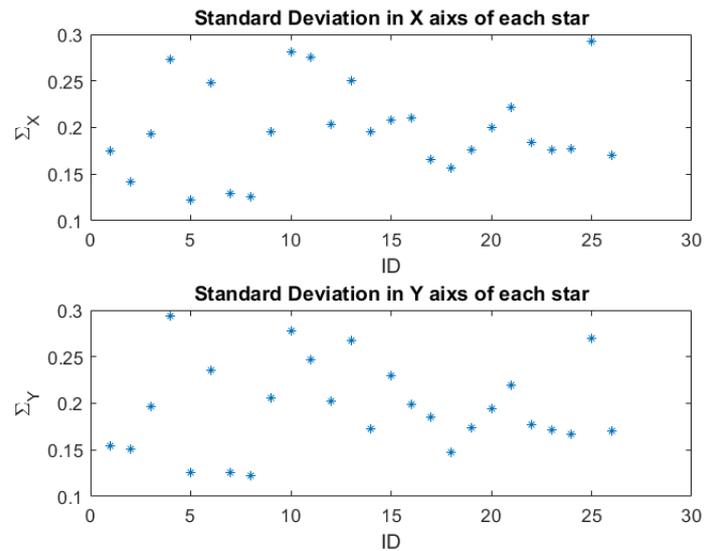


Figura 124 – Cenário IIA: Desvio padrão em x e y do baricentro dos 26 aglomerados identificados no campo de visada para LoS = (100,0)°

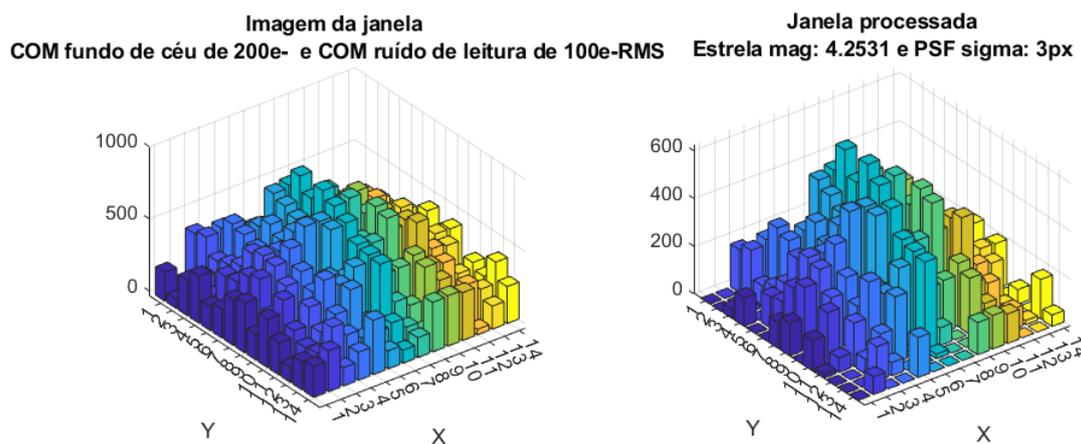


Figura 125 - Exemplo de processamento para cálculo do baricentro e desvio padrão do aglomerado $(\sigma_x, \sigma_y) = (0.17464, 0.15465)$ em LoS = (100,0)°

A partir dessas simulações, pudemos observar que a modificação do sistema óptico e de detecção, principalmente os parâmetros relacionados à PSF, alteram mais significativamente a precisão do baricentro dos aglomerados e não modificam tanto a quantidade de aglomerados que podem ser identificados pelo sensor.

5 ANÁLISE DE PRECISÃO

A precisão da determinação da linha de visada depende de vários fatores, não só do catálogo. Neste texto, são descritos alguns destes fatores, como: ruídos eletrônicos, variações nos componentes mecânicos do sensor, erros de calibração, erros de aproximações dos algoritmos, dentre outros. Porém, erros no catálogo embarcado ocasionam erros diretos na determinação de atitude do sensor.

Para ilustrar este efeito, a pesquisa que analisa a acurácia de um sensor estelar (LIEBE, 2002) introduziu um erro de 52 segundos de arco na posição de uma única estrela no catálogo embarcado. A acurácia resultante desta simulação do cálculo da atitude foi de 2,8 segundos de arco (RMS) para os eixos da linha de visada do satélite (ascensão reta e declinação) e 22 segundos de arco (RMS) para a rotação (roll). Enquanto a simulação utilizando o catálogo sem a adição do erro artificial gerou uma acurácia de 1,8 segundos de arco (RMS) de declinação e 14 segundos de arco (RMS) para a rotação (roll). Os resultados destas simulações são mostrados abaixo.

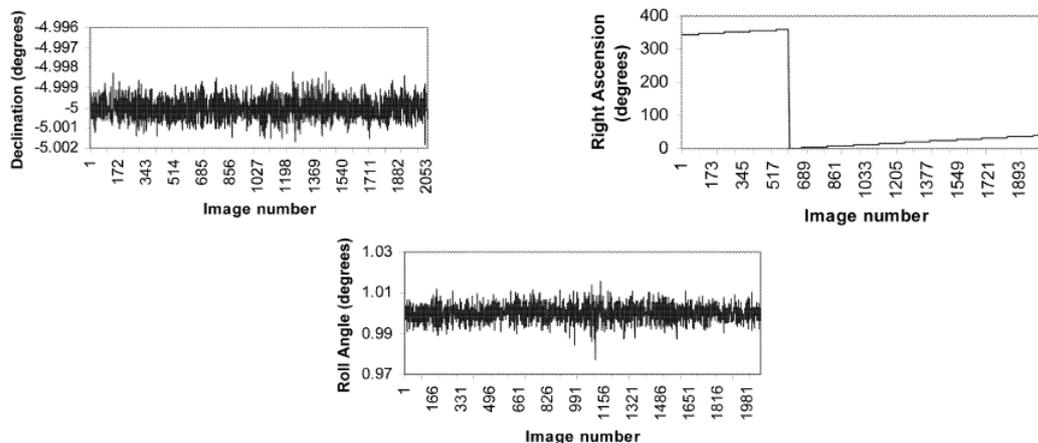


Figura 126 - Simulação da atitude do satélite em uma observação de apontamento ao zênite. Sem erro adicional no catálogo embarcado

Fonte: (LIEBE, 2002)

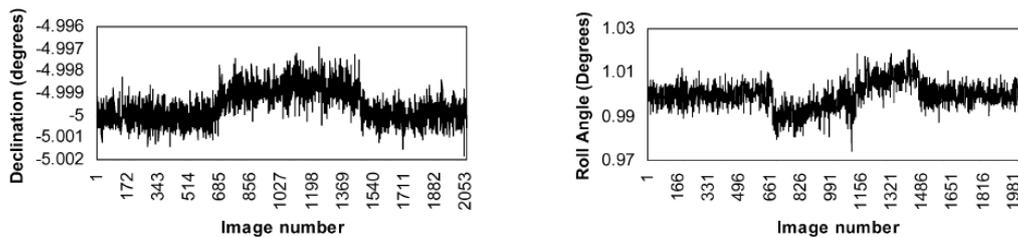


Figura 127 - Simulação mostrando como os erros no catálogo gerado afetam a atitude estimada

Fonte: (LIEBE, 2002)

Conforme mencionado em LIEBE, 2002 e observado na seção anterior, diferentes algoritmos de determinação da atitude responderão diferentemente aos erros no catálogo, contudo esta simulação demonstra a influência dos erros nele contidos.

Assim, uma vez que o catálogo embarcado foi gerado, é importante avaliar a precisão da determinação da linha de visada ao utilizá-lo como referência. Esta análise é de extrema importância, pois dependendo dos requisitos de precisão de apontamento da missão, seu uso pode ser inviabilizado e assim, considerando a atual fase de desenvolvimento do simulador do sensor de estrelas, seus parâmetros construtivos podem ser ajustados para se adequar aos requisitos exigidos.

5.1 MAPA DE PRECISÃO

Com a implementação dos algoritmos do cálculo de atitude do satélite descritos anteriormente, pode-se simular uma certa atitude do satélite e comparar com seu valor estimado a partir do catálogo, determinando assim a acurácia da estimativa de atitude.

Dependendo da quantidade de aglomerados identificados pelo sensor em seu campo de visada e da precisão da determinação do seu baricentro em relação ao referencial inercial, conforme visto na seção 4, a acurácia da estimativa de atitude do satélite varia. Logo, a acurácia da atitude do sensor varia em relação à região do céu de apontamento do satélite. Assim, o mapa de densidade dos aglomerados estelares, como ilustrado na Figura 32, deve ser próximo da distribuição observada no mapa de precisão do sensor. Com isso, a exibição da acurácia do sensor em forma de um mapa celeste permite que o sensor seja avaliado em todos os cenários de sua missão.

Para a construção do mapa da acurácia do sensor foi realizada a varredura de toda a esfera celeste, da mesma forma descrita na seção 3.6.4 para calcular os aglomerados de todo o

céu, de forma a estimar a atitude do sensor a partir dos aglomerados identificados no catálogo e, assim, determinar a acurácia da estimativa de atitude em cada passo da discretização do céu.

Conforme observa-se na literatura e nos sensores comerciais, a precisão do sensor normalmente é expressa pelo seu desvio padrão (σ) ou então por três vezes o seu valor (3σ). Assim, para cada passo da discretização do céu, a precisão do sensor é calculada a partir do desvio padrão da linha de visada obtida numericamente, e assim, um mapa é gerado para cada um dos eixos dos ângulos de Euler.

5.2 VALIDAÇÃO COM SENSOR CANADENSE S3S

A fim de fazer uma validação da precisão alcançada com a ferramenta de cálculo do catálogo foi realizada uma análise comparativa com dados do sensor *S3S Nanosatellite Star Tracker*, desenvolvido para nanosatélites em colaboração entre a empresa e os laboratórios canadenses *Sinclair Interplanetary*, *UTIAS SFL* e *Ryerson SAIL*.

O artigo (ENRIGHT et al., 2010) descreve os estudos e simulações para que o SCA utilize-o como único sensor de atitude. Nele, são detalhados os parâmetros construtivos do sensor. Além disso, foram realizados testes de observação do céu noturno e a atitude calculada pelo sensor foi registrada, assim como o desvio padrão de tais medidas.

Então, foram introduzidos na ferramenta os mesmos parâmetros do sensor S3S e a partir dos resultados obtidos por esta simulação, o mapa de precisão do sensor foi gerado e comparado com seu desempenho real.

5.2.1 Simulação do sensor S3S pela ferramenta

A seguir serão descritos os principais parâmetros simulados e os resultados obtidos pela ferramenta.

5.2.1.1 Sistema de detecção

MT9P031 CMOS Detector	
Resolução de pixels ativos	2592H x 1944V
Tamanho do pixel	2,2 x 2,2 μm

No datasheet do detector MT9P031 CMOS, os dados da eficiência quântica são informados separadamente nos três diferentes espectros: vermelho, verde e azul. Para integrá-lo na ferramenta, foi tomada a soma das três curvas, resultando na curva a seguir

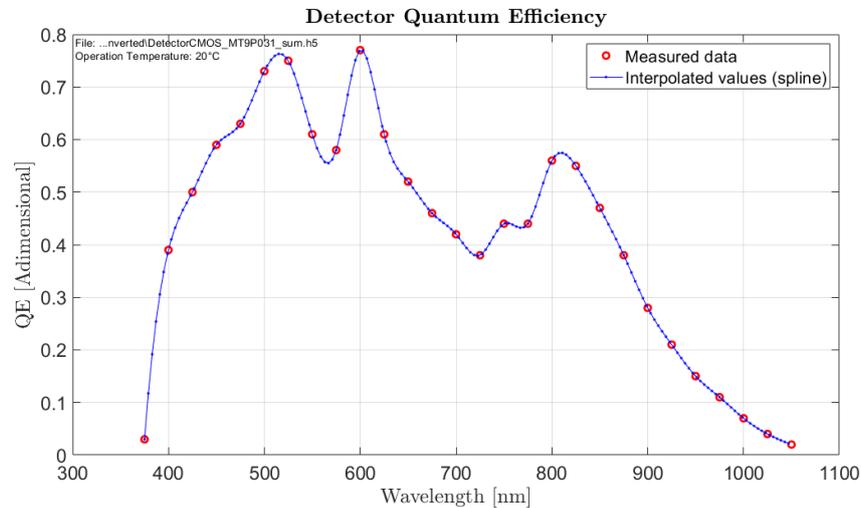


Figura 128 - Simulação do sensor S3S: curva de eficiência quântica do detector MT9P031 CMOS

5.2.1.2 Sistema óptico

Sistema Óptico	
Campo de visada	15° x 20,2°
Comprimento focal	16,2mm
PSF sigma	2 x 2 px
Resolução janela PSF	40 x 40 px
Área de abertura da pupila	7,069cm ²
Tempo de exposição	0,1s

Como não foi possível obter os dados do coeficiente de transmissão óptica do sensor S3S, foi utilizada uma PSF ideal gaussiana, já que não dispomos dos detalhes construtivos das lentes para simular uma PSF através de softwares ópticos.

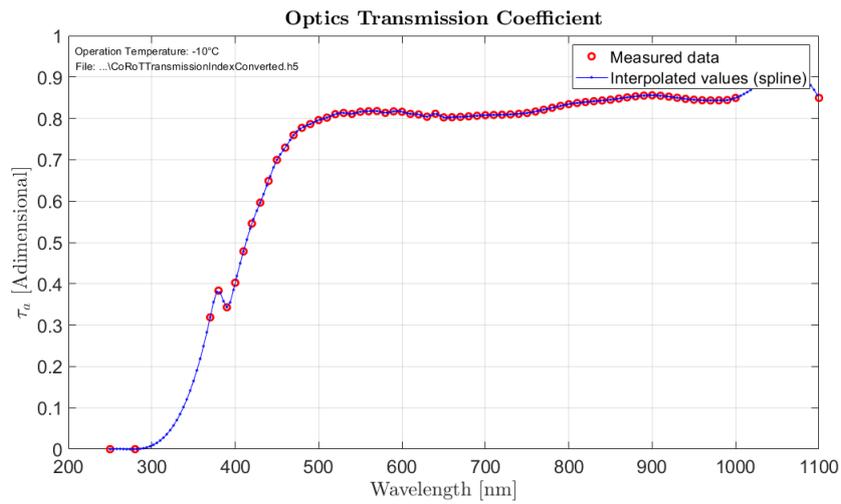


Figura 129 - Simulação do sensor S3S: curva de transmissão óptica

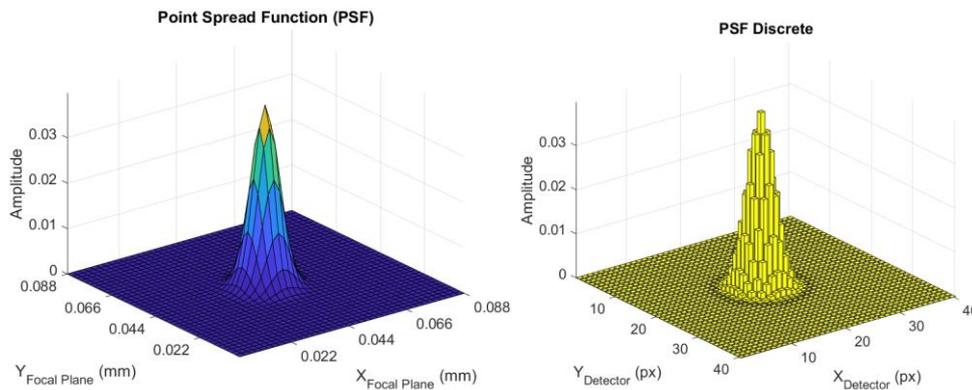


Figura 130 – Simulação do sensor S3S: À esquerda: PSF óptica. À direita: PSF discretizada com $\sigma_x = \sigma_y = 3px$

5.2.1.3 Catálogo de entrada

Catálogo de Entrada	
Versão	GAIA DR2
Magnitude visual limite	5,75
Número de estrelas	5144

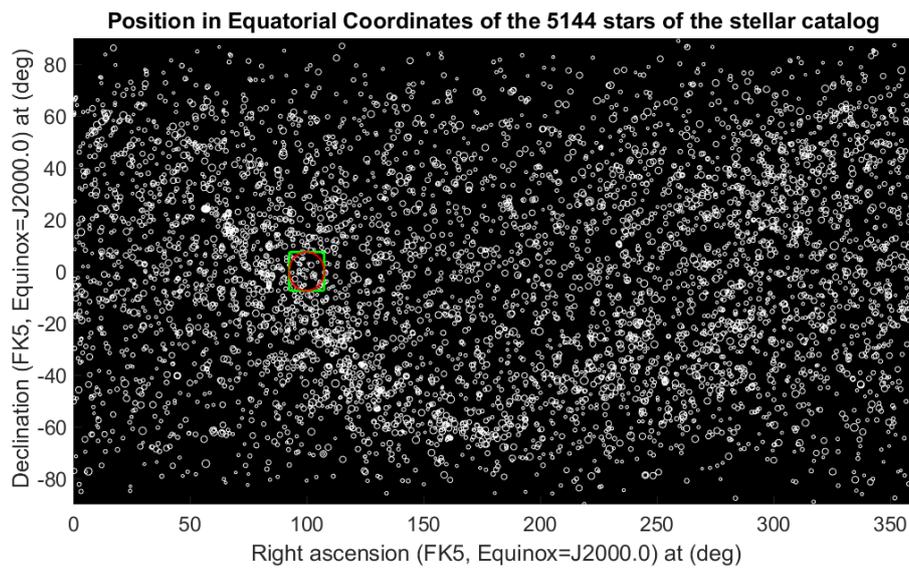


Figura 131 - Simulação do sensor S3S: visualização das estrelas em coordenadas equatoriais

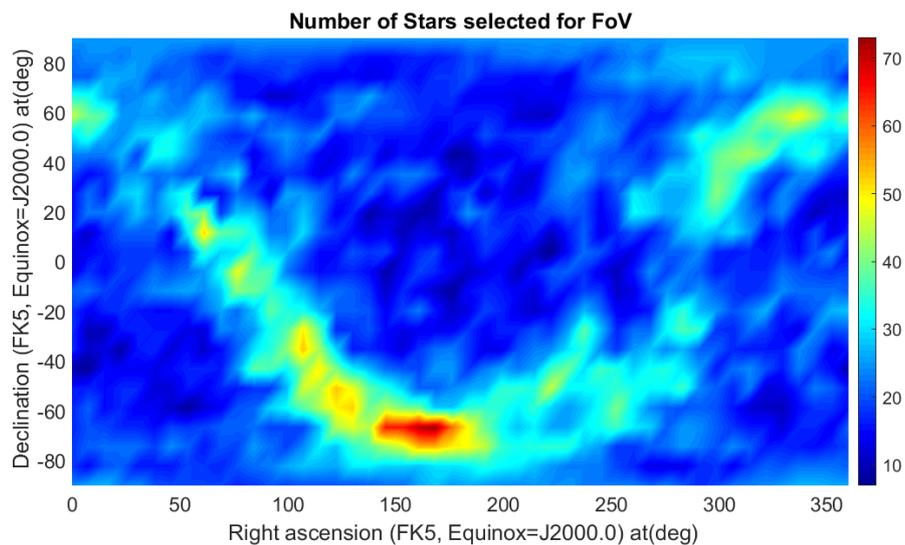


Figura 132 - Simulação do sensor S3S: visualização do mapa de densidade estelar

5.2.1.4 Ruídos

A propósito da análise comparativa do desempenho do sensor, simulou-se um cenário mais ruidoso, tornando o ambiente mais próximo dos quais os dados do sensor S3S foram coletados.

Ruídos	
Luz zodiacal de fundo de céu	200e-/px/s (constante)
Ruído de leitura da eletrônica de proximidade	100e-RMS/px/frame

5.2.1.5 Resultados intermediários

Ao simularmos LoS = $(100,0)^\circ$ em coordenadas equatoriais, obtemos a seguinte imagem analógica do sensor:

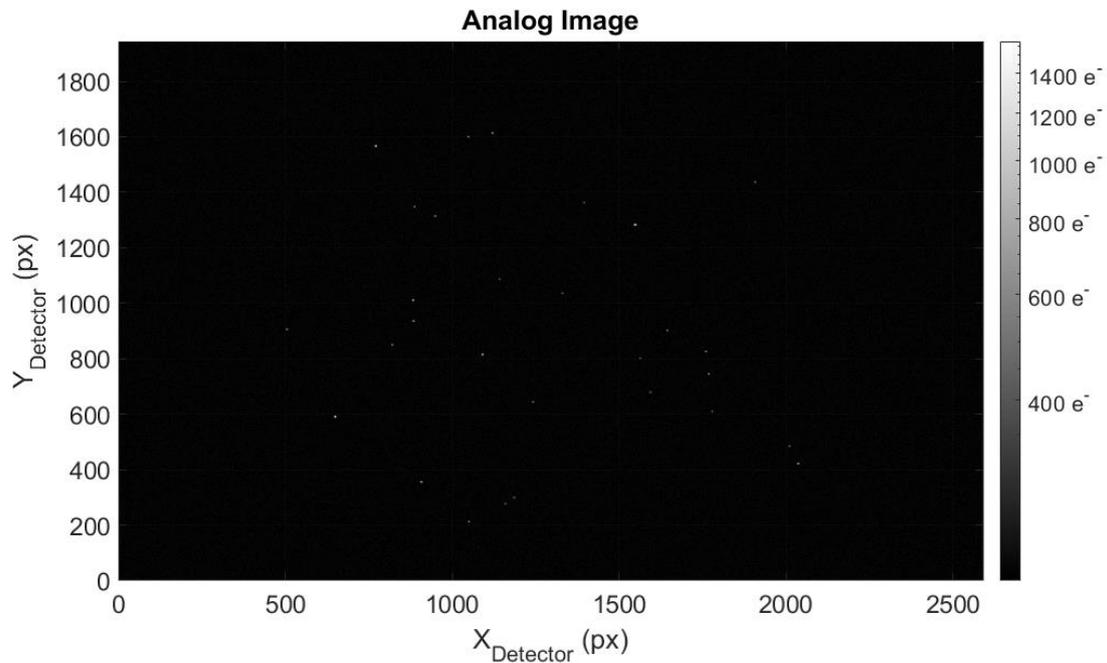


Figura 133 - Simulação do sensor S3S: imagem analógica do campo de visada do sensor para LoS = $(100,0)^\circ$

Como a área do detector é relativamente grande se comparada ao tamanho de cada aglomerado (levando em conta que foi utilizada PSF sigma igual a 2px), é difícil de visualizar as estrelas, sendo notável apenas o ruído de fundo de céu na imagem acima. Mas se aplicarmos 'zoom in' nas regiões que contêm estrelas é possível visualizar sua forma em meio ao ruído de fundo.

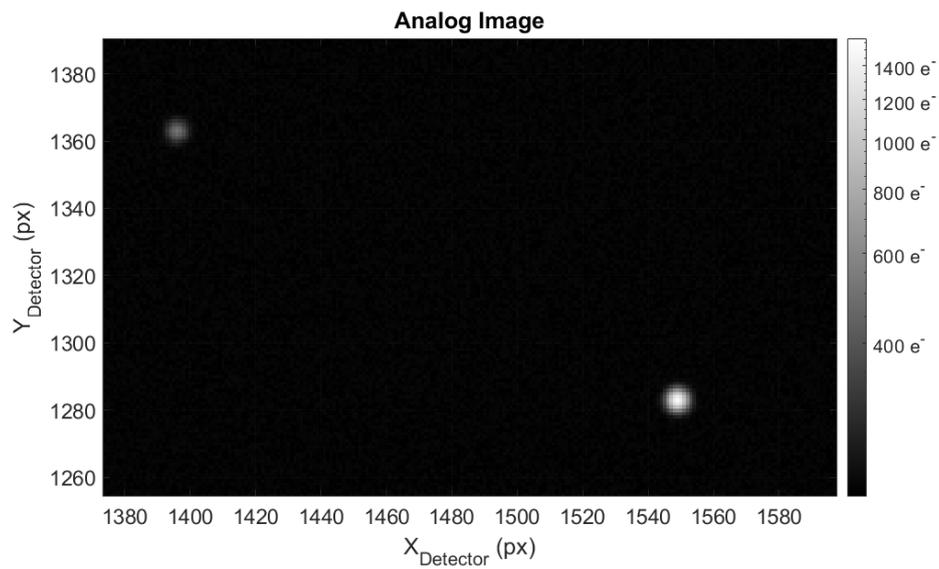


Figura 134 - Simulação do sensor S3S: 'zoom in' na imagem analógica do campo de visada do sensor, sendo possível observar a forma de dois aglomerados

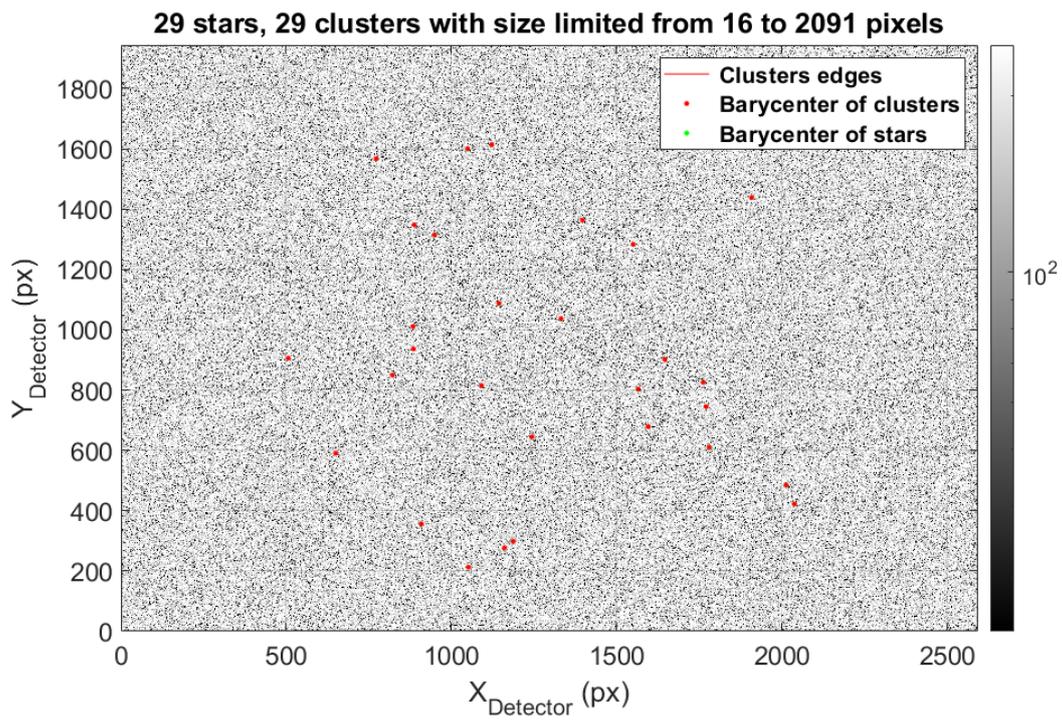


Figura 135 - Simulação do Sensor S3S: imagem digital do detector contendo os aglomerados calculados

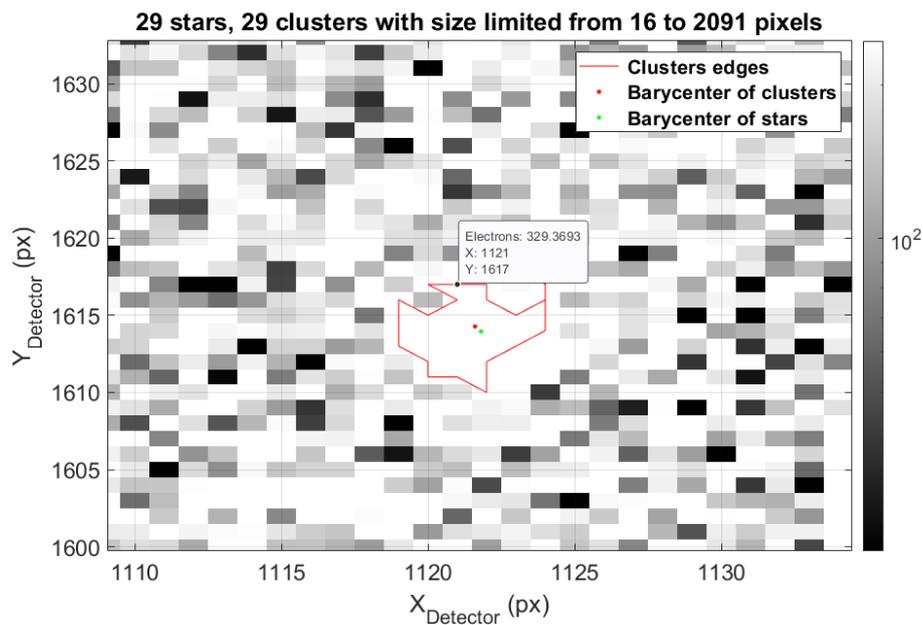


Figura 136 - Simulação do Sensor S3S: 'Zoom in' em região de aglomerado na imagem digital do detector

A precisão do cálculo desses baricentros identificados está representada na figura abaixo.

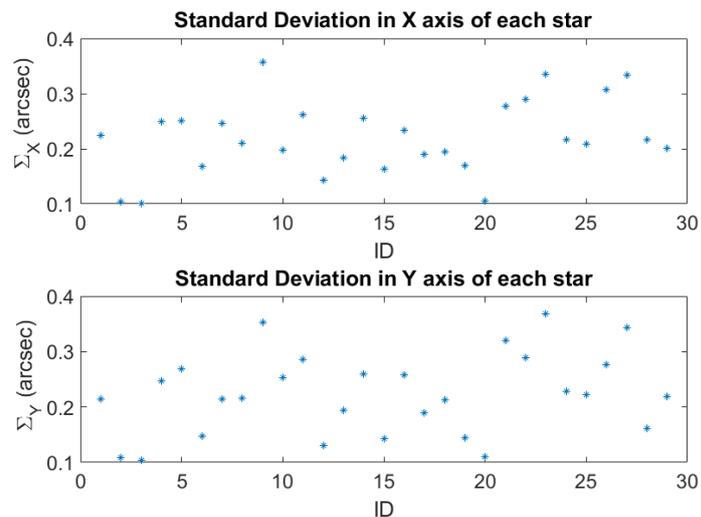


Figura 137 - Simulação do sensor S3S: desvio padrão em x e y do baricentro dos 29 aglomerados identificados no campo de visada do sensor para LoS = (100,0)

Devido o ambiente mais ruidoso, a precisão do baricentro calculado é pior em relação a um ambiente com menor nível de ruído, conforme já observamos nos diferentes cenários simulados na seção 4.

5.2.1.6 Resultados finais

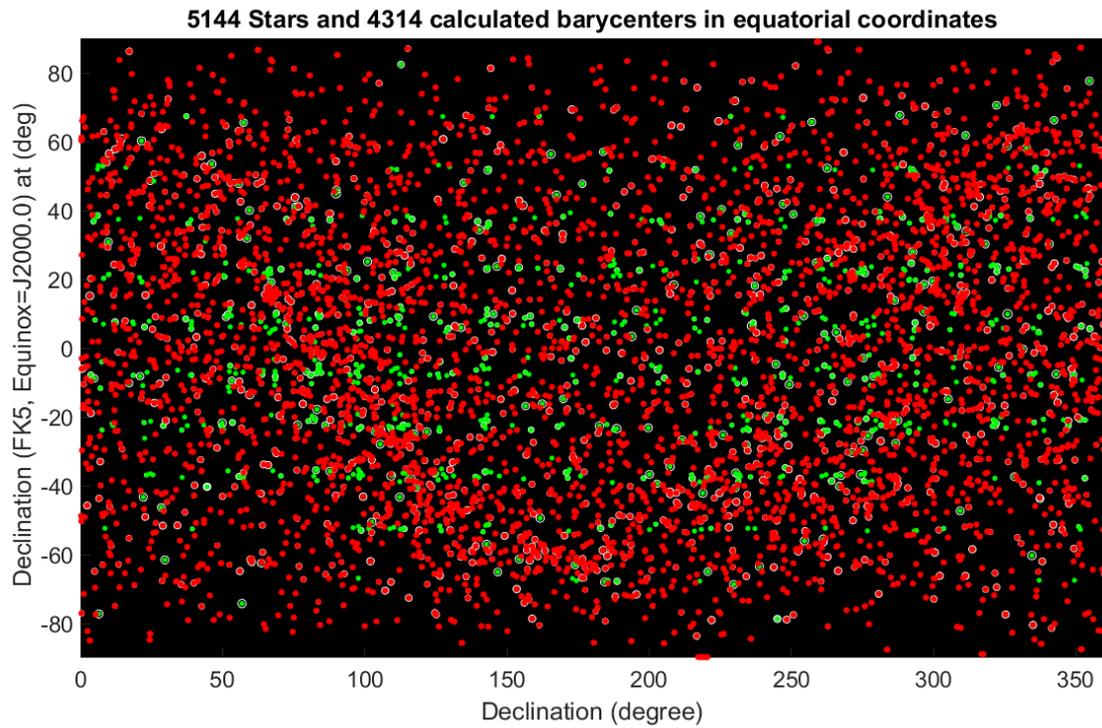


Figura 138 - Simulação do sensor S3S: aglomerados calculados em toda a esfera celeste

Computed Embedded Catalogue

Cluster ID	Cluster RA (°)	Cluster DE (°)	Cluster Amplitude	Nb of px in the cluster	Nb of Stars	Cluster ID	Star ID	Star RA (°)	Star DE (°)
1	179.8112	-78.2287	2.0751e+04	145	1	1	15177	179.9056	-78.2219
2	13.3986	-62.8872	3.3521e+04	150	1	2	14015	13.4078	-62.8714
3	17.0577	-55.2505	3.2903e+04	152	1	3	14482	17.0962	-55.2458
4	22.7844	-49.0840	6.3368e+04	176	1	4	14505	22.8129	-49.0727
5	26.5126	-50.7974	2.5994e+04	145	1	5	14486	26.5249	-50.8163
6	26.5170	-53.5263	1.7057e+04	138	1	6	14480	26.5261	-53.5220
7	28.9723	-51.6205	7.4541e+04	177	1	7	14527	28.9894	-51.6089
8	28.7078	-67.6399	3.0102e+04	150	1	8	13985	28.7339	-67.6473
9	29.6872	-61.5870	1.4119e+05	192	1	9	14022	29.6922	-61.5698
10	33.5215	-67.8508	2.0601e+04	144	1	10	13973	33.5606	-67.8414
11	35.3996	-68.8768	4.2361e+04	162	1	11	13971	35.4373	-68.8594
12	37.0076	-69.5409	1.9531e+04	141	1	12	13970	36.9452	-69.5240
13	36.3079	-66.4924	1.8301e+04	141	1	13	13981	36.3602	-66.4940
14	34.0999	-51.5051	6.8846e+04	177	1	14	14524	34.1275	-51.5122
15	39.8388	-68.2789	4.0897e+04	165	1	15	13976	39.8973	-68.2669
16	44.6536	-64.0638	1.8447e+04	142	1	16	14038	44.6992	-64.0713
17	48.1314	-57.2987	2.7046e+04	145	1	17	14063	48.1382	-57.3215
18	52.2945	-62.9414	2.5272e+04	145	1	18	13923	52.3445	-62.9375
19	25.5449	-32.3513	1.8464e+04	180	1	19	14700	25.5359	-32.3270
20	29.1477	-22.5479	3.0853e+04	186	1	20	14958	29.1675	-22.5268
21	29.9887	-21.0296	1.1510e+05	301	2	21	14961	30.0013	-21.0778
22	31.1378	-29.3005	2.3839e+04	183	1	22	14962	29.9425	-20.8245
23	35.6488	-23.8164	1.7408e+04	179	1	23	14998	31.1227	-29.2968
24	38.4610	-28.2496	1.8459e+04	179	1	24	14926	35.6358	-23.8168
25	42.2780	-32.4210	3.8336e+04	195	1	25	14803	38.4613	-28.2323
26	20.9947	-8.1769	8.8678e+04	181	1	26	14791	42.2726	-32.4059
27	22.5500	6.1265	3.3514e+04	161	1	27	7473	21.0059	-8.1833
28	25.3462	5.4727	4.6846e+04	173	1	28	7462	22.5463	6.1438
29	25.6913	-3.7058	2.6250e+04	149	1	29	7657	25.3579	5.4876
30	26.3333	9.1803	4.5008e+04	172	1	30	7483	25.6813	-3.6902
31	26.4815	-5.7256	2.1924e+04	145	1	31	7683	26.3484	9.1578
32	27.7477	-10.4284	1.0423e+05	318	2	32	7479	26.4969	-5.7333
33	28.4127	3.1712	3.2249e+04	156	1	33	7426	27.3963	-10.6864
34	30.0992	-8.5205	4.8976e+04	174	1	34	7428	27.8852	-10.3350

Save Catalogue

Figura 139 - Simulação do sensor S3S: geração do arquivo HDF5 do catálogo embarcado

Observamos que a partir das 5144 estrelas do catálogo de referência, o sensor identificou 4314 alvos que estarão contidos no catálogo embarcado. Alguns destes aglomerados são

formados por mais de uma estrela e também pequenas regiões do céu não foram varridas, uma vez que o passo utilizado na discretização do céu foi de 15° , igual à menor dimensão do campo de visada do sensor.

5.2.2 Mapa de precisão do sensor S3S obtido pela ferramenta

A partir dos resultados de simulação expressos anteriormente e conforme descrito na seção 5.1, foram gerados os seguintes mapas de precisão nos três eixos dos ângulos de Euler.

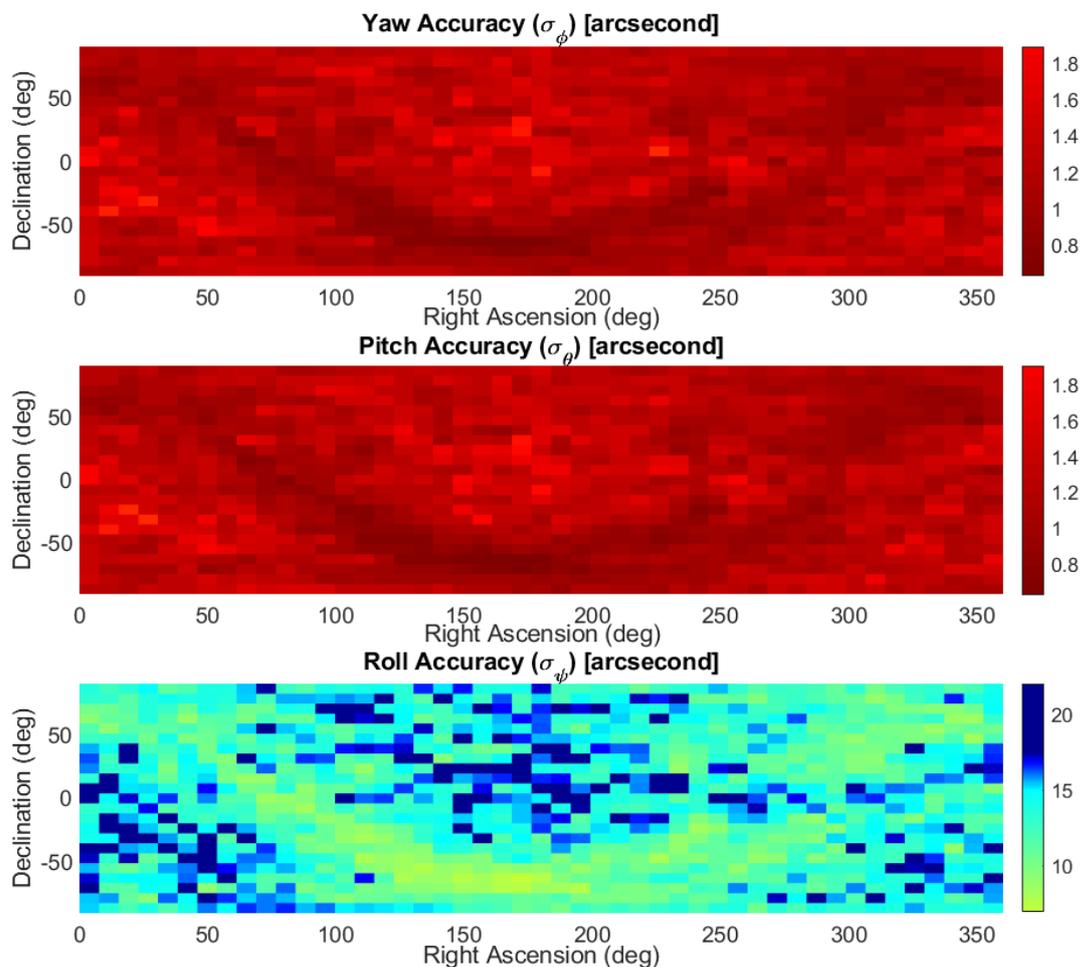


Figura 140 - Simulação do sensor S3S: mapa de precisão da atitude calculado nos três ângulos de Euler

Como mencionado anteriormente, o mapa de acurácia é semelhante à distribuição obtida no mapa de aglomerados estelares, uma vez que nas regiões onde possuem menos aglomerados para o cálculo de atitude obtém-se menor acurácia (maior σ) na atitude calculada. Além disso, conforme justificado em (LIEBE, 2002), o eixo das coordenadas de atitude descrita em ângulos de Euler que apresenta menor acurácia é o *roll*. Isto pois a dimensão do comprimento focal, que é

paralelo ao eixo *roll*, é maior do que o plano focal do sensor. E é justamente o que é observado no mapa de acurácia da Figura 140, o eixo *roll* possui cerca de 10 vezes menos acurácia que os outros dois eixos, *yaw* e *pitch*.

5.2.3 Análise comparativa de desempenho

As medidas obtidas pelo sensor S3S no teste de observação noturna são apresentadas na Figura 141. O desvio-padrão dessas medidas (1σ) foi de $0,002^\circ$ na declinação (equivalente a 7,2 segundos de arco em σ_φ e σ_θ) e $0,018^\circ$ no roll (64,8 segundos de arco em σ_ψ).

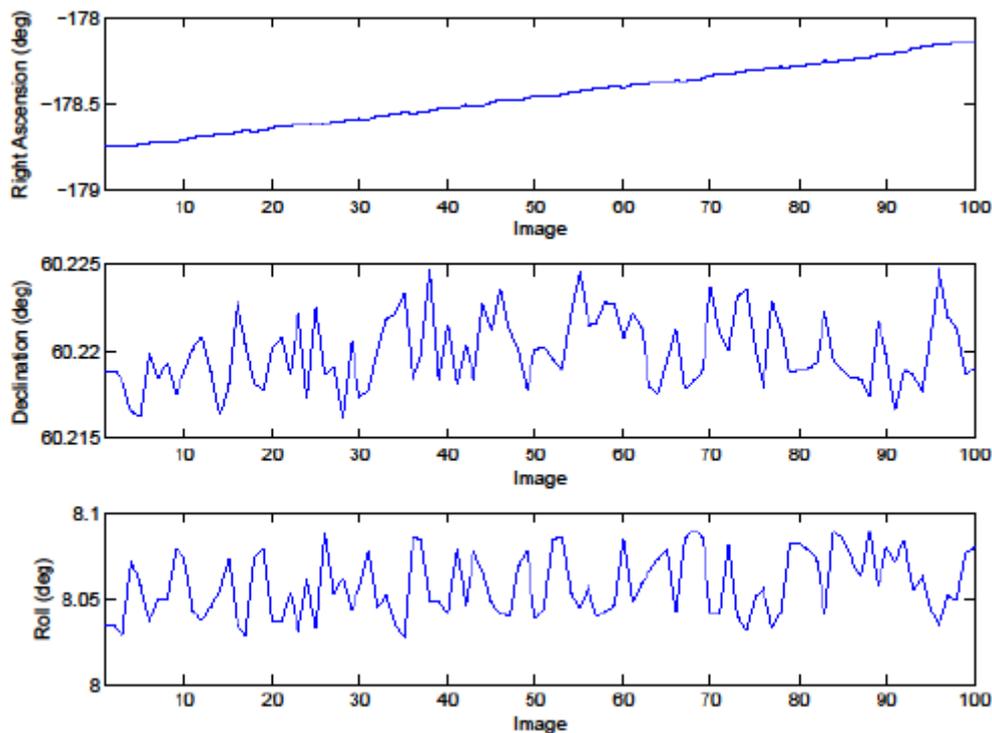


Figura 141 - Medidas de apontamento do zênite em observação noturna com o sensor S3S

Fonte: (ENRIGHT et al., 2010)

Ao compararmos tais resultados com o mapa de precisão gerado pela ferramenta, descrito na Figura 140, verificamos que a amplitude da acurácia obtida pela ferramenta para o mesmo cenário de observação foi de cerca de 4 vezes maior. Esta verificação fica mais evidente ao observarmos a amplitude dos valores da paleta de cores do mapa. Por exemplo, no ângulo *roll* (σ_ψ) vemos que os valores exibidos no mapa variam de aproximadamente 10 a 20 segundos de arco, ou seja, cerca de 4 vezes menor que a precisão de 64,8 segundo de arco do sensor S3S.

Como as medidas do sensor S3S foram obtidas em observação noturna sujeita a diferentes formas de ruído não simuladas pela ferramenta, como a presença da atmosfera ou

seeing, já era previsto que o desempenho obtido a partir das simulações na ferramenta fosse maior que o descrito em (ENRIGHT et al., 2010). Porém, esta diferença se apresenta de forma muito consistente, uma vez que as acurácias obtidas tanto pela ferramenta quanto pela observação com o sensor apresentam a mesma ordem de grandeza e possuem valores condizentes com o desempenho encontrado em demais sensores estelares autônomos.

6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os algoritmos que simulam os principais subsistemas do sensor, como detector, sistema óptico e eletrônica de proximidade foram implementados na ferramenta. Como são sistemas que possuem relativa independência entre seus parâmetros (embora alguns parâmetros importantes do sistema óptico e de detecção estejam correlacionados, como por exemplo o comprimento focal), o usuário consegue combinar diferentes subsistemas de forma que a própria ferramenta calcule seus parâmetros relacionados. Além disso, as especificações destes subsistemas podem ser carregadas na ferramenta a partir de um arquivo HDF5, de forma a facilitar a execução de simulações e o registro de diferentes subsistemas no banco de dados do projeto.

Foram implementados na ferramenta diferentes modelos de fenômenos importantes para a simulação de um sensor estelar, desenvolvidos em trabalhos externos a este, como o cálculo do número de fótons de cada estrela vista pelo sensor (DI GENNARO, 2016), o cálculo do ruído referente à luz zodiacal (MARCHIORI et al., 2019), cálculo da variância do baricentro estimado (AYKROYD, 2021), e seus impactos na geração do catálogo embarcado puderem ser analisados. Com isso, este trabalho buscou simular e associar os mais diversos efeitos envolvidos no funcionamento de um sensor estelar, obtendo uma ferramenta de simulação o mais completa possível e um catálogo de estrelas embarcado fiel em relação ao observado pelo sensor em voo, e por conseguinte maior precisão na medida entregue pelo sensor.

Por fim, as funcionalidades de análise das informações do catálogo, sobretudo a construção do mapa de precisão do sensor, permitem uma visualização global dos resultados de desempenho atingidos com o catálogo e a identificação de eventuais pontos a serem otimizados no sensor simulado. Além de que, permite a comparação com os resultados de outros sensores contidos na literatura, como realizado com o trabalho de (ENRIGHT et al., 2010).

A partir da ferramenta já desenvolvida e descrita por este trabalho de Mestrado, diferentes melhorias e funcionalidades poderão ser integradas a ela.

Mais efeitos poderão ser modelados e implementados, como o efeito que o feixe luminoso sofre ao passar pelo *baffle*, o ruído de fundo de céu referente ao albedo terrestre, o fenômeno de *flat field* do detector, a integração e utilização de modelos de PSFs específicos para um dado sistema óptico (calculados a partir de software de modelagem óptica), a consideração do dia do ano para o cálculo da luz zodiacal (que foi calculada apenas considerando o satélite no ponto vernal) e demais processos que podem ocasionar ruídos no sensor.

Além disso, muitos algoritmos implementados na ferramenta podem ser otimizados, principalmente aqueles que envolvem a extensão do cálculo de informação para toda a esfera celeste e que ainda consomem bastante tempo, como a extensão do cálculo de aglomerados para todo o céu, o cálculo do mapa de precisão do sensor e o cálculo do número de fótons de todas as estrelas do catálogo de referência. Também pelo fato de a ferramenta ser uma interface gráfica desenvolvida em Matlab, composta por diferentes funcionalidades associadas a diversas janelas, sua utilização ainda está limitada a máquinas com bom desempenho de processamento. Assim, conforme novas versões do software Matlab forem surgindo, a interface poderá ganhar novos designs e execuções que não demandem tanto poder computacional.

REFERÊNCIAS

AIRY, G. B. On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, p. 283, 1835.

ANDERSON, J.; KING, I. R. Toward High-Precision Astrometry with WFPC2. I. Deriving an Accurate Point-Spread Function. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 112, n. 776, p. 1360–1382, 2000.

ASTM. **2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>>. Acesso em: 20 set. 2021.

AUVERGNE, M. et al. The CoRoT satellite in flight: description and performance. **Astronomy & Astrophysics**, v. 506, n. 1, p. 411–424, 5 out. 2009.

AYKROYD, C. **PLATO SATELLITE ONGROUND LINE OF SIGHT RESTITUTION**. Undergraduate Thesis. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA. **Portaria Normativa nº 224/GC3, de 10 de maio de 2012**. **Diário Oficial da União** Brasília, DF, Brasil. Ministério da Defesa: Aprova o Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), 2012. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/36939430/dou-secao-1-14-05-2012-pg-143>>. Acesso em: 28 fev. 2020

BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA. **Portaria Normativa nº 41/MD, de 30 de julho de 2018**. **Diário Oficial da União** Brasília, DF, Brasil. Aprova o Programa Estratégico de Sistemas Espaciais - MD20-S-01 (1a Edição/2018).2, , 2018. Disponível em: <https://www.defesa.gov.br/arquivos/legislacao/emcfa/publicacoes/doutrina/md20_s_01_programa_estrategico_de_sistemas_espaciais_pese_ed-2018.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2020

BROWN, A. G. A. Gaia Data Release 2. **Astronomy & Astrophysics**, v. 616, p. A1, 10 ago. 2018.

BÜRGER, K. C; CAMELO, P. S; GOUVEIA, G. P. **Desenvolvimento de ferramenta de cálculo de catálogo embarcado de estrelas para sensores estelares autônomos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica - Controle e Automação). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.

CENTRE DE DONNÉES ASTRONOMIQUES DE STRASBOURG (CDS). **VizieR database**. Disponível em: <<http://vizier.u-strasbg.fr/>>. Acesso em: 1 fev. 2020.

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALE (CNES). **COROT: Le Bloc Focal**.

Disponível em: <https://corot.cnes.fr/fr/COROT/Fr/bloc_focal.htm>. Acesso em: 24 mar. 2020.

DANIEL V. SCHROEDER. **Understanding Astronomy: Motion of the Stars**. Disponível em: <<https://physics.weber.edu/schroeder/ua/StarMotion.html>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

DI GENNARO, T. M. **Desenvolvimento de algoritmos de simulador de imagens para avaliação tecnológica de sensores estelares autônomos utilizados na determinação de atitude de satélites em órbita baixa**. 2016. 95 p. Dissertação (Mestrado): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

DUMONT, R.; LEVASSEUR-REGOURD, A. C. Zodiacal light and space observation of faint objects. **Advances in Space Research**, v. 1, n. 8, p. 127–130, jan. 1981.

EISENMAN, A. R.; LIEBE, C. C. The advancing state-of-the-art in second generation star trackers. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, v. 1, p. 111–118, 1998.

ENRIGHT, J. et al. Towards Star Tracker Only Attitude Estimation. In: Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 24. **Proceedings...** [s.l.], 2010.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **PLATO (PLANETARY TRANSITS AND OSCILLATION STARS): SPACECRAFT**. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/42279-spacecraft>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **The Hipparcos Space Astrometry Mission**. Disponível em: <<https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos>>. Acesso em: 24 mar. 2020a.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Gaia**. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/gaia/>>. Acesso em: 24 mar. 2020b.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Gaia Mission: Expected Nominal Mission Science Performance**. Disponível em: <<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/science-performance>>. Acesso em: 24 mar. 2020c.

FIALHO, M. A. A. **Improved Star Identification Algorithms And Techniques For Monochrome Color Star Trackers**. 2017. 226 p. Doctorate Thesis in Engineering and Space Technologies - São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

FLEISCH, D.; KREGENOW, J. **A Student's Guide to the Mathematics of Astronomy**. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

GIANCOLI, D. C. **Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics**. 4. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2014.

HANSPETER SCHAUB; JOHN L. JUNKINS. **Analytical Mechanics of Space System**.

2 ed. ed. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2009.

HOWELL, S. B. **Handbook of CCD Astronomy**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2006.

INSTITUTE SPACE TELESCOPE SCIENCE (STSCI). **The Castelli AND Kurucz 2004 Stellar Atmosphere Models**. Disponível em: <<http://www.stsci.edu/hst/instrumentation/reference-data-for-calibration-and-tools/astronomical-catalogs/castelli-and-kurucz-atlas>>. Acesso em: 11 set. 2014.

JOHNSON, H. L. & MORGAN, W. W. Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas. **Astrophysical Journal**, v. 117, p. 313, 1953.

JP. KREBS, P. PISSAVIN, D. VILAIRE, E. SED 16 Autonomous Star Tracker. 4th ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems. **Proceedings...** [s.l.], 1999.

JU, G. AND JUNKINS, J. L. Overview of Star Tracker Technology and its Trends in Research and Development. **Advances in the Astronautical Sciences, The John L. Junkins Astrodynamics Symposium**, v. 115, p. 461–478, 1 mar. 2003.

LEINERT, C. et al. The 1997 reference of diffuse night sky brightness. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 127, n. 1, p. 1–99, 1998.

LIEBE, C. C. Accuracy performance of star trackers - A tutorial. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 38, n. 2, p. 587–599, 2002.

LURI, X. et al. Gaia Data Release 2: Using Gaia parallaxes. **Astronomy and Astrophysics**, v. 616, n. June, 2018.

MAJEWSKI, L. et al. Hydra multiple head star sensor and its in-flight self-calibration of optical heads alignment. **International Conference on Space Optics**, v. 10566, n. October 2008, p. 44, 2017.

MARCHIORI, V. et al. In-flight photometry extraction of PLATO targets. **Astronomy & Astrophysics**, v. 627, p. A71, 2 jul. 2019.

MARKLEY, F. L.; CRASSIDIS, J. L. **Fundamentals of spacecraft attitude determination and control**. New York: Springer, 2014.

MOHAMMADNEJAD, S.; MADINEH, A. B.; NASIRI SARVI, M. Baffle simulation and design with the aim of use in space cameras. **Proceedings of the 2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CSNDSP 2012**, 2012.

PINHEIRO, L. **Caractérisation Instrumentale appliquée à la Photométrie de Très Haute Précision dans le cadre de la Mission Spatiale CoRoT**. 2006. 123 p. PhD Thesis:

Université de Toulouse III, France, 2006.

PLESSERIA, J.-Y. et al. **Optical and mechanical design of a straylight rejection baffle for CoRoT.** (D. R. Coulter, Ed.) Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting. **Anais...**San Diego: 21 nov. 2003

PRICE, D. C.; BARSDELL, B. R.; GREENHILL, L. J. HDFITS: Porting the FITS data model to HDF5. **Astronomy and Computing**, v. 12, p. 212–220, set. 2015.

ROUSSEAU GEORGES, L. **Restitution d'attitude d'un satellite a haute manoeuvralite par un viseur stellaire a matrice APS. Amelioration de l'autonomie et de la robustesse par couplage gyrometrique.** 2004. 155 p. PhD Thesis.: L'Université de Rouen, Vernon, 2004.

ROUX, Y.; CUNHA, P. DA. The GNC Measurement System For The Automated Transfer Vehicle. **18th International Symposium on Space Flight Dynamics**, v. 548 of ESA, p. 111–117, 2004.

SCHAUB, H. (**Lecture Notes**) **Kinematics: Describing the Motions of Spacecraft** Coursera: Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado Boulder, , 2019. Disponível em: <<https://svi.nl/Convolution>>. Acesso em: 30 out. 2019

SCIENTIFIC VOLUME IMAGING. **Convolution.** Disponível em: <<https://svi.nl/Convolution>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

SILVA, L. H. I. DA. **Desenvolvimento de algoritmos do simulador de formação de imagens de sensores estelares autônomos.** 2020. 125 p. Dissertação (Mestrado): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

SPACE ALLIANCE. **Star Tracker Assembly - Introduction.** Disponível em: <<http://www.spacealliance.ro/articles/view.aspx?id=201002250904>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

SPACEX. **SpaceX Channel,** 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/user/spacexchannel>>

WANG, G. et al. Optimization method of star tracker orientation for sun-synchronous orbit based on space light distribution. **Applied Optics**, v. 56, n. 15, p. 4480, 20 maio 2017.

WANG, P. et al. Design of a Miniature CMOS APS Star Tracker. **International Journal of Electronics and Electrical Engineering**, v. 4, n. 1, p. 84–90, 2016.

WERTZ, J. R. **Spacecraft Attitude Determination and Control (Astrophysics and Space Science Library 73).** Dordrecht: Dordrecht: Springer Netherlands, 1999.