UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Otimização dos modos de operação do sistema de aquisição do instrumento SPARC4.

Denis Varise Bernardes

Itajubá, 30 de Junho de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Denis Varise Bernardes

Otimização dos modos de operação do sistema de aquisição do instrumento SPARC4.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e sistemas elétricos industriais

Orientador: Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti Coorientador: Dr. Eder Martioli

30 de Junho de 2020 Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Otimização dos modos de operação do sistema de aquisição do instrumento SPARC4.

Denis Varise Bernardes

Dissertação aprovada por banca examinadora em 30 de Junho de 2020, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.**

Banca Examinadora: Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti Dr. Eder Martioli Dr. Luciano Fraga Prof. Dr. Mateus Augusto Faustino Chaib Junqueira

> Itajubá 2020

Denis Varise Bernardes

Otimização dos modos de operação do sistema de aquisição do instrumento SPARC4

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Itajubá, 30 de Junho de 2020:

Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti Orientador

> Dr. Eder Martioli Coorientador

Dr. Luciano Fraga

Prof. Dr. Mateus Augusto Faustino Chaib Junqueira

> Itajubá 30 de Junho do 2020

Agradecimentos

Quero agradecer a Deus, que proporcionou todos os recursos para e realização do presente projeto. Quero agradecer ao Dr. Eder Martioli, ao Dr. Luciano Fraga e ao Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti pela orientação durante o projeto. Agradeço ao Laboratório Nacional de Astrofísica por disponibilizar os equipamentos necessários para o desenvolvimento do projeto e as imagens de observações do Observatório Pico dos Dias para a execução do *software* de otimização. Agradeço ao Janderson Oliveira por disponibilizar as imagens da estrela HATS24b para a realização de simulações. Agradeço à minha família e amigos que estiveram ao me lado me apoiando, apesar dos momentos difíceis. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo recurso financeiro disponibilizado.

Resumo

Esse trabalho apresenta o método desenvolvido para a otimização da performance dos EMCCDs do instrumento astronômico SPARC4. Para tanto, foram desenvolvidas duas bibliotecas em linguagem Python para o cálculo da relação sinal-ruído e da frequência de aquisição do CCD em função do seu modo de operação. Estas bibliotecas são utilizadas para a otimização dos parâmetros do CCD. São disponibilizados três modos de otimização: (1) otimizar a relação sinal-ruído, (2) otimizar a frequência de aquisição e (3) otimizar ambos os parâmetros ao mesmo tempo. Este último utiliza o Método de Otimização Bayesiano para a determinação do modo ótimo. Foi realizada uma série de testes para validação do funcionamento do método desenvolvido. Para a realização destes testes, foi implementado um simulador imagens artificiais para simular a imagem de uma estrela adquirida pelos CCDs. Após a validação, aplicou-se o método para a otimização do modo de operação dos CCDs para uma série de dados de noites de observação realizadas no observatório Pico dos Dias. Foi possível obter uma melhora na performance dos CCDs para todas as noites analisadas. Caso este método fosse utilizado como uma ferramenta para a otimização dos CCDs, seria possível obter uma economia de tempo de telescópio de 97,17 %, 65,08 % e 77,66 % para os modos de otimização 1, 2 e 3, respectivamente. Concluiu-se que o método desenvolvido pode ser utilizado para a determinação do modo de operação dos CCDs do SPARC4, contribuindo com uma melhora na qualidade dos dados científicos obtidos no observatório, assim como na alocação de uma maior quantidade de projetos para o mesmo número de noites.

Palavras-chaves: SPARC4. Otimização. CCD.

Abstract

This work presents a methodology developed to optimize the performance of the EMCCDs of the SPARC4 instrument. It was developed two packages in Python to calculate the signal-to-noise ratio and the acquisition rate of the CCDs, according to its operation mode. Each of these packages are used in the optimization of the parameters of the CCDs. It has been developed the following three methods for optimization: (1) optimize the signalto-noise ratio, (2) optimize the acquisition rate, and (3) optimize both parameters at the same time. The latter uses the Bayesian Optimization Method to determine the optimum mode. It has been performed a series of tests to validate the method. To accomplish these tests, it has been developed an artificial image simulator to simulate a star image acquired by the cameras. After the tests, it has been applied the method to optimize the operation mode of the CCD for a series of archival data from several nights of observations carried out at the Picos dos Dias Observatory. It was possible to obtain an improvement in the CCD performance for all nights analyzed. We show that if this method was used as a tool to optimize the operation mode of the CCDs, it would have been possible to save an amount of telescope time equivalent to 97.17 %, 65.08 %, and 77.66 %, for optimizaton modes 1, 2, and 3, respectively. We conclude that this method can be used to determine the operation mode of the SPARC4 CCDs, where it can contribute to an improvement in the quality of the scientific data acquired at the observatory as well as in the allocation of larger projects for the same number of nights.

Key-words: SPARC4. Optimization. CCD.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Gráfico da relação entre uma variável x genérica e de sua predição mé- dia $f(x)$ (linha preta). A área sombreada em azul representa a incerteza relacionada à predição. São apresentadas três medidas sobre o domínio da função: $x_1, x_2 \in x^+$, sendo este último o ponto de máximo atual. Na vertical, são apresentadas três gaussianas da distribuição de probabili- dade da predição do valor ótimo da função objetiva para os pontos x_1 , $x_2 \in x_3$. A área sombreada em verde representa a melhoria esperada para o ponto x_2 . Fonte: Brochu, Cora e Freitas 2010	35
Figura 2 –	Intensidade específica monocromática I_{ν} , emitida por uma superfície dA , que incide sobre um ângulo sólido $d\omega$, na direção θ . Fonte: Palmer e Davenhall (2001)	37
Figura 3 –	Representação esquemática de um telescópio baseado no projeto Ritchey- Chrétien. Fonte: <https: en.wikipedia.org="" ritchey\$%\$e2\$%\$80\$%<br="" wiki="">\$93Chr\$%\$C3\$%\$A9tien_telescope></https:>	39
Figura 4 –	Estrutura esquemática de um píxel do CCD. Neste pixel, são repre- sentadas a camada metálica composta pelos eletrodos, uma camada de óxido metálico, uma região semicondutora tipo N e um substrato	
Figura 5 –	semicondutor tipo P. Fonte: Bernardes (2017)	40
Figura 6 –	Gráfico da Eficiência Quântica do CCD em função do comprimento de onda. São apresentadas as curvas de Eficiência Quântica para os tipos de CCD iluminado pela frente e iluminado por trás. Fonte: <http: <br="">www.aif.estt.ipt.pt/Ficheiros_PDF/SensitAnalogica_FOTO/Fichas/EQ.</http:>	40
Figura 7 –	Imagem da distribuição de contagens de uma estrela sobre os pixels do CCD. São apresentados três círculos concêntricos: um com raio de 13 pixels, outro com raio de 26 pixels e outro com raio 39 pixels. O círculo interno compreende os pixels considerados para a aquisição de dados da estrela. Os pixels dentro da região entre os círculos de raios 26 e 39 pixels são aqueles considerados para o cálculo do fluxo de fundo.	41

Figura 8 –	Painéis frontal e de configuração do <i>software</i> do sistema de controle de aquisição do SPARC4. No painel frontal, são apresentados os controla- dores e indicadores relativos à aquisição de imagens de cada canal. É apresentada, também, a opção <i>Sync Mode</i> responsável pela sincroniza- ção da aquisição entre canais. No painel de configuração, é apresentada a janela de configuração dos parâmetros de controle para um dos canais do SPARC4. Todos os outro canais possuem uma janela semelhante a	
Figura 9 –	esta	46
	<pre>com/2017/10/20/circle-or-confusion-the-airy-disk-and-diffraction-podca ></pre>	st-594/ 47
Figura 10 –	Gráfico do ruído de leitura em função do ganho EM para uma pré- amplificação 1 e binagem 1 pixel. A figura apresenta a resposta do ruído para os modos de HSS de 1 MHz (azul), 10 MHz (vermelho), 20 MHz (verde) e 30 MHz (preto) para o intervalo do ganho EM de x2 a	
Figura 11 –	x300	48
Figura 12 –	2 pixels	49
Figura 13 –	1 pixel	49
Figura 14 –	2 pixels	50
Figura 15 –	pixels (vermelho) e 1024x1024 pixels (azul)	50
	fluxo da estrela possui duas subcategorias: cálculo através da magnitude do objeto ou através da pré-imagem. A otimização pode ser dividida em três subcategorias: otimiza SNR, otimiza FA e otimiza ambos os parêmetros ao mosmo tempo	59
Figura 16 –	Exemplo da execução do Método de Otimização Bayesiano para a oti- mização do modo de operação do CCD. No gráfico, são apresentados os conjuntos de pontos para os valores de HSS 0.1 MHz (amarelo), 1	04
	MHz (roxo), 10 MHz (verde), 20 MHz (vermelho) e 30 MHz (azul)	56

Figura 17 $-$	Imagem de uma estrela artificial gerada através do simulador. O modo	
	utilizado para gerar a imagem foi Convencional, $G_{em} = 1$, HSS = 1	
	MHz, PA = 1, Bin = 1 pixel e t_{exp} = 20 s	57
Figura 18 –	Gráfico da otimização da SNR × FA em função do t_{exp} e do G_{em} obtida	
	ao longo das iterações do MOB. São apresentados os modos de HSS 1	
	MHz (roxo), 10 MHz (verde), 20 MHz (vermelho), e 30 MHz (azul)	62
Figura 19 –	Gráfico de barras da economia de tempo de telescópio ao longo das noi-	
-	tes de observação selecionadas. São apresentados os resultados obtidos	
	para a otimização da SNR (azul), FA (laranja) e SNR x FA (verde)	68
Figura 20 –	Curvas da SNR ao longo do tempo de exposição para os modos de	
	operação ótimos obtidos pelos modos de otimização 1 (vermelho), 2	
	(verde), 3 (preto) e o modo utilizado pelo usuário (azul) da noite 22-03-	
	17. Sobre as curvas, são apresentados os pontos dos tempos de exposição	
	para cada um dos modos anteriormente citados, respectivamente. No	
	canto inferior direito, é apresentado um <i>zoom</i> da região em torno do	
	modo do usuário.	70
Figura 21 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 23-03-17.	70
Figura 22 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 24-03-17. Neste caso, o modo	
	do usuário apresentou melhor performance do que o modo ótimo su-	
	gerido para a SNR e para a SNR \times FA. Contudo, este problema pode	
	ser contornado pelo fato do sistema de aquisição permitir o uso de um	
	maior t_{exp} , mantendo-se a mesma frequência de aquisição	71
Figura 23 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 14-04-17	71
Figura 24 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 15-04-17	71
Figura 25 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 16-04-17	72
Figura 26 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 03-06-17	72
Figura 27 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 02-07-17	72
Figura 28 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 13-07-17	73
Figura 29 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 08-08-17	73
Figura 30 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 24-11-17	73
Figura 31 –	Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 06-03-18	74
Figura 32 –	Gráfico da frequência de aquisição do CCD ao longo da magnitude de	
	uma estrela. São apresentadas as curvas obtidas fixando-se a SNR em $$	
	$1~(\mathrm{azul}),10~(\mathrm{vermelho}),100~(\mathrm{verde}),1000~(\mathrm{preto}).$ As linhas cheias re-	
	presentam os valores máximos para a FA obtidos para os modos de \hfill	
	sub-imagem = $(256,512)$ pixels e binagem = 2 pixels; as linhas trace-	
	jadas representam a máxima FA obtida para os modos de sub-imagem	
	= 1024 pixels e binagem $= 1$ pixel	74

Lista de tabelas

Tabela 3 –	Parâmetros de controle do modo de operação do CCD disponibiliza- dos pelo <i>software</i> de controle de aquisição. Para cada parâmetro, são	
	apresentados a sua unidade e o intervalo de valores permitidos pelo <i>software</i>	47
Tabela 4 –	Valores do ruído de leitura obtidos para a caracterização dos modos de operação convencionais do CCD iXon Ultra 9916	48
Tabela 5 –	Valores do tempo crítico (t_c) do CCD para todos os modos de operação permitidos para a frequência de aquisição	51
Tabela 6 –	Codificação utilizada para representar os parâmetros de controle do CCD.	58
Tabela 7 –	Valores ótimos obtidos para a execução do método de otimização para otimização da SNR, FA e SNR \times FA, para uma série de imagens ge-	
Tabela 8 –	radas com diferentes modos de operação	59
Tabela 9 –	valores da Tabela 7	59
	método sobre uma pré-imagem gerada com o modo de operação 2211 para cada um dos modos de otimização.	60
Tabela 10 –	10 maiores valores obtidos para a SNR para uma série de imagens com todos modos de operação que atendem ao requisito da FA mínima. Os valores de G_{em} e t_{exp} foram fixados em 300 (para os modos EM) e 0,5	
Tabela 11 –	s, respectivamente	61
10000100 11	que atendem ao requisito da SNR mínima	61
Tabela 12 –	10 maiores valores obtidos pela avaliação da função objetiva para todos os modos de operação do CCD que atendem aos requisitos da SNR e EA. Foram utilizadas 500 itorações o valores aleatórios para $C_{\rm e}$ o t	69
	ra. roram utilizadas 500 iterações e valores aleatorios para G_{em} e t_{exp} .	02

Tabela 13 – Valores da função objetiva para cada modo de otimização, para uma série de imagens com diferentes fluxos luminosos incidentes. São apresentados os resultados obtidos pelo método de otimização (R_m) e para a média da função objetiva $(R_{médio})$ ao longo do espaço de estados para 500 iterações. É apresentado o valor de R, em %, da relação entre o resultado do método e da média da função objetiva, na forma 63 Comparação dos valores da SNR teóricos e calculados pelo método de Tabela 14 – otimização para uma série de imagens geradas através do simulador com diferentes modos de operação. É apresentado o modo de operação de cada imagem, os valores da SNR obtidos por cada modo e o erro da SNR calculada em relação à teórica. 64. Informações referentes às noites de observação no Observatório Pico Tabela 15 – dos Dias selecionadas para a execução do método de otimização. São apresentados a data da observação, o modo de operação, o Tipo de Objeto (TO) (TO) observado, o número de exposições N_e , a SNR média, a FA e o tempo de observação da série de imagens. Foi utilizada a seguinte abreviatura para o tipo de objeto: BE = Binária Eclipsante $(BE), AB = An\tilde{a} Branca (AB), E = Estrela (E) e EX = Exoplaneta$ (EX). A informação do tipo de objeto foi obtida através do SIMBAD. 65Tabela 16 – Modos de operação ótimos do CCD obtidos em função da otimização da SNR das noites de observação no Observatório Pico dos Dias. A tabela apresenta o valor da SNR calculada pelo método e da relação \mathcal{R} entre as SNRs do método e do modo de operação utilizado pelo usuário. 65 Tabela 17 – Modos de operação ótimos do CCD obtidos em função da otimização da FA das noites de observação no Observatório Pico dos Dias. A tabela apresenta o valor da FA calculada pelo método e da relação \mathcal{R} entre as FAs do método e do modo de operação utilizado pelo usuário. 66 Tabela 18 – Modos de operação ótimos do CCD obtidos em função da otimização da $SNR \times FA$ das noites de observação no Observatório Pico dos Dias. São apresentados os valores da SNR e da FA calculados pelo método, assim como suas respectivas relações R_{SNR} e R_{FA} com os valores obtidos 66

- Tabela 19 Análise da economia de tempo de telescópio obtido pelos modos ótimos
sugeridos pelo método em relação aos modos do usuário. São apresen-
tados os t_{exps} para os modos de otimização 1 e 3 necessários para que a
imagem adquirida com o modo do usuário atinja a mesma SNR obtida
pelo método. A economia de tempo do modo de otimização 3 repre-
senta a soma do tempo economizado com relação à melhoria da FA e
da SNR ao mesmo tempo. No fim da tabela é apresentada a relação
entre a soma do tempo economizado e o tempo total de observação de
todas as noites para cada modo de otimização.68
- Tabela 20 Valores ótimos da função objetiva obtidos para uma série de imagens com diferentes fluxos luminosos incidentes, utilizando os algoritmos TPE e RANDOM. São apresentados os resultados obtidos utilizandose as funções objetivas do cálculo da SNR × FA e da SNR. 81

Lista de abreviaturas e siglas

Analogical-to-digital Unit	ADU
Electron Multiplying Charge Coupled Device	EMCCD
Frontiers in Optics	FiO
Full Width at Half Maximun	FWHM
Horizontal Shift Speed	HSS
Laser Science	LS
Read Noise	RN
Signal-to-noise ratio	SNR
Simultaneous Polarimeter and Rapid Camera in Four Bands	SPARC4
Sloan Digital Sky Survey	SDSS
Software Development Kit	SDK
Tree Structured Parzen Estimator	TPE
frames per second	fps
Algoritmo de Aprendizado de Máquina	AAM
Análise Discriminante Linear	ADL
Anã Branca	AB
Binária Eclipsante	BE
Economia de Tempo	ET
Eficiência Quântica	\mathbf{EQ}
Estrela	Ε
Exoplaneta	EX
Frequência de Aquisição	FA
Função de Espalhamento Puntiforme	FEP
Função Objetiva	FO
Função Substituta	\mathbf{FS}
Gradiente Ponderado de Entropia com Consideração de Ruído	GPER
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	INPE
Interface Computational Cerebral	ICC
Laboratório Nacional de Astrofísica	LNA
Modo de Operação	MOP
Modos de Otimização	MOT
Método de Otimização Bayesiano	MOB
Observatório Pico dos Dias	OPD
Processo Gaussiano	PG
Pré-amplificação	PA

Redes Neurais de Confiança Profunda	RNCP
Sistema de Controle Automático de Exposição	SCAE
Sub-Imagem	SI
Tipo de Objeto	ТО

Lista de símbolos

A	Conjunto dos pontos x amostrados sobre a função f	31
B_{in}	Valor da binagem dos pixels	57
C_E	Corrente de escuro	43
C_f	Nível de fundo para uma imagem do simulador	57
C_{E9914}	Corrente de escuro para o CCD 9914	53
C_{E9915}	Corrente de escuro para o CCD 9915	53
C_{E9916}	Corrente de escuro para o CCD 9916	53
C_{E9917}	Corrente de escuro para o CCD 9917	53
$D_{1:i}$	Conjunto dos valores x e y amostrados da função f	31
F	Densidade de fluxo	36
F_R	Fator de ruído extra do modo EM	43
F_{ν}	Fluxo de fótons para um dado valor de frequência de onda	38
G_{em}	Ganho do modo EM	23
I_{ν}	Intensidade específica monocromática	37
M_1	Espelho primário do telescópio	38
M_2	Espelho secundário do telescópio	38
M_E	Melhoria esperada	32
N_e	Número de exposições	12
N_p	Ruído de uma imagem do simulador	57
P	Distribuição de probabilidade	31
P_M	Probabilidade de melhoria	32
R	Relação entre o resultado ótimo e o resultado médio da função objetiva	61
R_m	Resultado ótimo da função objetiva	61
R_{FA}	Relação entre a FA ótima obtida pelo método e a FA do usuário	64
R_{SNR}	Relação entre a SNR ótima obtida pelo método e a SNR do usuário	64
$R_{m\acute{e}dio}$	Resultado médio da função objetiva	61
S_c	Média de fótons por pixel do céu	43
S_f	Fluxo de fundo de uma imagem	41
S_h	Fluxo de fótons da estrela HATS24-b	53
S_i	Fluxo de fótons obtido pelo i-ésimo pixel da estrela	42
$S_{c(i)}$	Média de fótons por pixel do céu para o i-ésimo pixel	43
$S_{ce(i)}$	Média dos elétrons termicamente gerados para o i-ésimo pixel	43
S_{ce}	Média dos elétrons termicamente gerados por pixel	43
Ζ	Parâmetro substitutivo para a equação da Melhoria Esperada	34
Φ	Distribuição de probabilidade cumulativa	32
Θ	Ângulo de rotação da gaussiana	57

α	Ângulo formado entre o zênite e o objeto no céu a ser observado	38
β	Constante do fluxo de luz da estrela	57
δ_x	Desvio padrão da gaussiana sobre o eixo x	56
δ_y	Desvio padrão da gaussiana sobre o eixo y	56
ϵ_i	Ruído da amostra da função f	31
γ	Por centagem dos valores f(x) menores que y [*]	30
\mathcal{A}	Amplitude do sinal da estrela	56
${\cal F}$	Frequência de aquisição do CCD	55
\mathcal{F}^M	Valor máximo da frequência de aquisição	55
\mathcal{F}^m	Valor mínimo da frequência de aquisição	55
\mathcal{N}	Distribuição normal	31
\mathcal{R}	Relação entre a performance ótima obtida pelo método e a performance	64
	do usuário	
S	Relação sinal-ruído	42
\mathcal{S}^M	Valor máximo da SNR	55
\mathcal{S}^m	Valor mínimo da SNR	55
X	Coordenada dos pixels ao longo do eixo x	56
\mathcal{X}_0	Coordenada central da estrela sobre o eixo x	56
${\mathcal Y}$	Coordenada dos pixels ao longo do eixo y	56
\mathcal{Y}_0	Coordenada central da estrela sobre o eixo y	56
A	Constante da equação de segundo grau	55
B	Constante da equação de segundo grau	55
C	Constante da equação de segundo grau	55
$\mu(x)$	Função média dos valores da função objetiva	33
ν	Frequência da onda eletromagnética	37
ϕ	Função da distribuição de probabilidade	34
σ	Desvio padrão do ruído da função f	31
σ_c	Ruído de fótons da medida do céu	42
σ_r	Ruído de leitura	42
σ_s	Ruído de fótons da medida da estrela	42
$\sigma_{ADU(i)}$	Ruído de leitura para o i-ésimo pixel	43
σ_{ADU}	Ruído de leitura em ADU	43
σ_{ce}	Ruído da corrente de escuro	42
θ	Ângulo entre o raio r e a reta normal a dA	37
ξ	Constate do balanço exploration/exploitation	32
$x_{1:i+1}$	Conjunto de valores amostrados para i+1 iterações da otimização	32
d	Dimensão do conjunto de números reais	31
dA	Elemento infinitesimal de área de uma superfície	37
dE	Elemento infinitesimal de energia que atravessa dA	37

dF_{ν}	Elemento infinitesimal para o fluxo de fótons para um valor de frequên- cia da onda	37
$d\nu$	Elemento infinitesimal de frequência da onda eletromagnética	37
$d\omega$	Elemento infinitesimal de ângulo sólido	37
dt	Elemento infinitesimal de tempo	37
f(x)	Função objetiva não-linear	30
f_n	Função de propagação puntiforme da estrela	56
a(x)	Distribuição de probabilidade para os valores $f(x) > u^*$	30
i	Índice da iteração do método de otimização	30
l(x)	Distribuição de probabilidade para os valores $f(x) < u^*$	30
m_{h}	Magnitude da estrela HATS24-b	53
max	Retorna o máximo entre dois valores	33
n	Número de amostras da função f	30
n_p	Número de pixels da estrela	42
p^{r}	Função da densidade de probabilidade	35
r	Raio entre o centro do detector e a superfície dA	37
s	Fluxo de fótons por segundo da estrela	54
s_c	Fluxo de fótons por segundo por pixel do céu	54
s_{ce}	Termoelétrons gerados por segundo por pixel pelo CCD	54
t_c	Tempo crítico de leitura	50
t_{exp}	Tempo de exposição	23
u	Função de amostragem	32
x	Valor de x sobre o domínio da função f	31
x^+	Máximo atual da função f	32
x_1	Valor amostrado sobre a função f	34
x_2	Valor amostrado sobre a função f	34
x_3	Próximo provável valor ótimo da função f	34
x_i	I-ésimo valor de x sobre o domínio da função f	30
$x_{1:i}$	Conjunto de valores amostrados para i iterações da otimização	30
x_{i+1}	Próximo valor sobre o domínio de f a ser amostrado	32
y	Amostra da função f	35
y^*	Valor de f(x) para o qual a probabilidade de f(x) < y^* vale γ	30
y_i	I-ésima amostra da função f	31
$y_{1:i}$	Conjunto de valores y amostrados de f	31
argmax	Retorna o valor que maximiza a função f	31
В	Nível de bias do CCD	43
Bin	Binagem dos pixels	23
G	Ganho do CCD	40
m	Magnitude da estrela	53

Ν	Ruído total de uma imagem	42
S	Fluxo de fótons da estrela	41
Т	Temperatura do CCD	53

Sumário

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Objetivo	23
1.2	Organização da dissertação	24
1.3	Trabalho publicado em conferência	24
2	REVISÃO	25
2.1	Revisão Bibliográfica	25
2.1.1	Otimização da performance de CCDs	. 25
2.1.2	Projetos com o uso do Método de Otimização Bayesiano	. 28
2.2	Revisão teórica	30
2.2.1	Método de Otimização Bayesiano	. 31
2.2.2	Algoritmo Tree-Structured Parzen Estimator	. 34
2.2.3	Cálculo da relação sinal-ruído	. 36
3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO	45
3.1	Caracterização do CCD	47
3.1.1	Caracterização do ruído de leitura do CCD	. 48
3.1.2	Caracterização da frequência de aquisição do CCD	. 49
4	MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	52
4.1	Simulador de imagens artificias	56
5	RESULTADOS	58
5.1	Testes do método de otimização	58
5.1.1	Convergência	. 59
5.1.2	Validação do modo ótimo	. 60
5.1.3	Performance da otimização	. 60
5.1.4	Cálculo da SNR	. 62
5.2	Otimização das noites de observação	63
5.2.1	Análise dos resultados	. 67
6	CONCLUSÃO	76
6.1	Trabalhos futuros	. 77

APÊNDICES	78
APÊNDICE A – TEMAS CIENTÍFICOS DOS USUÁRIOS DAS OB- SERVAÇÕES SELECIONADAS	79
APÊNDICE B – COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MO- DELAGEM TPE E RANDOM DO MOB	81
REFERÊNCIAS	82

1 Introdução

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em parceria com o Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) está desenvolvendo um novo instrumento astronômico chamado Simultaneous Polarimeter and Rapid Camera in Four Bands (SPARC4) (Rodrigues et al., 2012a). Este instrumento será instalado no telescópio Perkin-Elmer do Observatório Pico dos Dias (OPD), que possui um espelho primário de 1,6 m de diâmetro. O SPARC4 permitirá a aquisição simultânea de imagens fotométricas e polarimétricas para quatro regiões do espectro visível: g, r, i e z, de acordo com o sistema fotométrico Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Gunn et al., 1998). Para a aquisição de dados em cada região (canal) será utilizada uma câmera *Electron Multiplying Charge Coupled Device (EMCCD)* (Andor Technology, 2015) produzida pela empresa Andor Technology. Estes dispositivos possuem uma janela óptica e revestimento otimizados para a aquisição de fótons sobre a região que irá operar. Além disso, possuem a opção de *frame transfer*, permitindo uma taxa de aquisição de 26 frames per second (fps) full-frame (1024 x 1024 pixels); possuem, também, um amplificador *Electron Multiplying* que permite a amplificação do sinal obtido, sendo útil principalmente na aquisição de dados de objetos astronômicos de baixo brilho.

Para o controle dos CCDs do SPARC4 está sendo desenvolvido um sistema de controle de aquisição através da linguagem de programação gráfica Labview (National Instruments, 2020) em conjunto com o pacote *Software Development Kit (SDK)* (Andor Technology, 2009) disponibilizado pela Andor para a comunicação com os CCDs. Através deste sistema, será possível realizar a aquisição de imagens simultâneas e sincronizadas para os quatro canais do SPARC4. Atualmente, para cada canal, podem ser adquiridos cubos de imagens (sequência contínua de imagens) com uma Frequência de Aquisição (FA) de até 26 fps (1024 x 1024 pixels), com praticamente nenhum intervalo de tempo entre imagens. É possível, também, concatenar cubos de imagens com um intervalo de tempo entre cubos da ordem de centenas de mili segundos. Este sistema foi utilizado durante todo o projeto para a aquisição de imagens das câmeras da SPARC4.

Para a aquisição de dados é importante que a relação sinal-ruído (do inglês, *Signal-to-noise ratio (SNR)*) e a FA fornecidas por cada câmera do SPARC4 atendam aos requisitos científicos da observação. A SNR é dada pela relação entre o fluxo de fótons da estrela medido e o ruído de uma imagem, composto pelo ruído de fótons e o ruído eletrônico do CCD. Este ruído, por sua vez, compõe o limite de detecção do dispositivo. Qualquer observação astronômica precisa levar em consideração se o fluxo de fótons da estrela é suficientemente grande, de modo a superar este limite de detecção (Bernardes, 2017). A FA é dada pela quantidade de *frames* por segundo que o CCD é capaz de adquirir. Um exemplo de observação astronômica que lida com estes parâmetros são as séries temporais de fotometria. Estas séries são dadas pela medida do fluxo de luz proveniente de um objeto astronômico em função do tempo (Mattson, 2012). Dois exemplos deste tipo de observação são os trânsitos estelares e ocultações estelares. A aquisição de séries fotométricas de trânsitos estelares são realizadas em uma escala de tempo de horas (Oliveira, Martioli e Tucci-Maia, 2019). Já para o fenômeno de ocultações estelares, estas séries são geralmente realizadas durante um intervalo de tempo de minutos, ou até segundos (Camargo et al., 2018). Logo, estas observações exigem não apenas uma SNR adequada, como também, que a FA seja tal que minimize o tempo morto entre imagens e permita a devida amostragem do fenômeno.

Cada observação astronômica possui diferentes critérios para os valores de SNR e FA adequados. Podem haver casos em que a otimização de um parâmetro seja prioridade em detrimento do outro. Mas, também, podem haver casos em que ambos os parâmetros devem ser otimizados ao mesmo tempo. Para tanto, o SPARC4 permite configurar diversos parâmetros das câmeras, de forma a alterar a performance do dispositivo, são eles: tempo de exposição (t_{exp}) , Horizontal Shift Speed (HSS), Pré-amplificação (PA), ganho do modo EM (G_{em}) , Sub-Imagem (SI) e binagem (Bin) dos pixels. O parâmetro de PA influencia no fator de conversão dos fotoelétrons adquiridos pelo CCD em unidades digitais; o G_{em} é uma amplificação no fluxo de fótons adquiridos pelo CCD; ambos os parâmetros influenciam na SNR. O parâmetro SI representa o tamanho da janela de pixels utilizada para a aquisição de uma imagem e influencia na FA. O t_{exp} é o tempo em que o chip do CCD será exposto à luz; o HSS é a taxa de leitura dos pixels do CCD; o Bin é o número de pixels que serão somados nas direções vertical e horizontal durante a leitura; estes três parâmetros influenciam tanto na SNR, quanto na FA. Além disso, a escolha de um parâmetro pode influenciar nos valores permitidos para os demais. Dessa forma, determinar a configuração que otimiza a performance dos dispositivos para cada um dos canais do SPARC4 pode ser uma tarefa difícil, mesmo para aqueles usuários que possuam grande experiência em observações astronômicas. Logo, a contribuição deste trabalho visa desenvolver uma metodologia para resolver este problema.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia teórica para a otimização da performance das câmeras EMCCDs do instrumento SPARC4 em função dos requisitos científicos da SNR e da FA.

1.2 Organização da dissertação

A Seção 2 apresenta as revisões bibliográfica e teórica do trabalho. A Seção 3 apresenta o sistema de aquisição desenvolvido e seu uso para a caracterização da câmera de um dos canais do SPARC4. A Seção 4 apresenta o método de otimização. A Seção 5 apresenta os resultados e as discussões e a Seção 6 apresenta a conclusão do trabalho.

1.3 Trabalho publicado em conferência

Durante o desenvolvimento deste projeto foi publicado um trabalho do Sistema do Controle de Aquisição do Instrumento Astronômico SPARC4 (Bernardes et al., 2019) na conferência OSA Frontiers in Optics (FiO) + Laser Science (LS) APS/DLS em Washington, DC, USA, em Setembro de 2019. Este trabalho descreve como o sistema foi desenvolvido e a sua capacidade de aquisição de cubos de imagens para os quatro canais do SPARC4.

2 Revisão

Este capítulo apresenta as revisões bibliográfica e teórica realizadas para o presente trabalho.

2.1 Revisão Bibliográfica

A Seção 2.1.1 apresenta os métodos encontrados para a otimização da performance de câmeras CCDs. Os métodos apresentados utilizam uma série de algoritmos para a configuração dos parâmetros de controle das câmeras em diferentes aplicações, com a finalidade de produzir uma imagem com a maior quantidade de informação possível. Foi considerado como informação todo objeto na imagem que pudesse ser distinguido do cenário. A seleção foi feita para aqueles métodos que buscam otimizar a performance das câmeras através de parâmetros semelhantes aos utilizados no presente trabalho (t_{exp} ou ganho da câmera). A Seção 2.1.2 apresenta os projetos encontrados com o uso do Método de Otimização Bayesiano (MOB). Os projetos selecionados procuram otimizar uma função com diversos parâmetros, que podem ser contínuos e/ou discretos, de forma semelhante ao apresentado neste trabalho.

2.1.1 Otimização da performance de CCDs

Uma das aplicações de câmeras CCDs na atualidade é na aquisição de dados científicos de microscópios ópticos para rastreamento de partículas subcelulares. O estudo do tamanho, morfologia e movimento de tais partículas resulta num melhor entendimento da atividade celular em níveis moleculares. Para tanto, é necessário a aquisição de imagens de alta resolução espacial a fim de que seja possível a extração de dados com significância estatística. Um tipo de câmera geralmente utilizada para a aquisição destas imagens por estes microscópios são câmeras EMCCDs, que permitem a amplificação do sinal através do G_{em} , sendo principalmente úteis para os casos de baixa luminosidade.

Em seu artigo, Wu, Nelson e Tseng (2010) realizaram um estudo da influência do G_{em} de uma câmera EMCCD na resolução espacial de um microscópio óptico para o rastreamento de partículas subcelulares. Eles demonstraram que o aumento excessivo do G_{em} para a amplificação do sinal pode prejudicar a SNR e, portanto, a resolução espacial do instrumento. Eles derivaram a equação que descreve a relação entre a SNR de uma imagem e o G_{em} e chegaram à conclusão de que existia uma intensidade de luz à partir da qual a SNR obtida pela câmera diminuía com o aumento do G_{em} . Além disso, para os casos de aquisição de dados com baixa intensidade de luz, esta metodologia permitiu obter o valor do ganho para o qual a SNR foi otimizada. Para avaliar este resultado, os autores realizaram uma série de testes de rastreamento de 2 grupos de partículas: um grupo com um G_{em} alto e uma alta intensidade de luz e outro grupo sem amplificação do G_{em} para uma baixa intensidade de luz. O experimento mostrou que o rastreamento do segundo grupo obteve uma melhor resolução espacial.

Além do caso anteriormente citado, é comum o uso de câmeras EMCCDs na implementação de robôs baseados na visão. Estes robôs utilizam algoritmos para processamento de imagens para fins, por exemplo, de localização e reconhecimento de padrões. O devido funcionamento de tais algoritmos depende principalmente da aquisição de imagens com uma quantidade de informação que permita a distinção de diferentes objetos. Dentre algumas situações, pode-se destacar a aquisição de imagens em ambientes externos, onde verifica-se grandes variações de iluminação ao longo do tempo.

Por este motivo, Shim, Lee e Kweon (2014) apresentaram um método de autoajuste do t_{exp} de câmeras com o intuito de otimizar a quantidade de informação obtida em ambientes externos em diferentes condições de luminosidade. Neste método, foi adquirida uma imagem da cena que deveria ser otimizada. Então, foi realizado o cálculo da magnitude do gradiente dos pixels da imagem. Grandes gradientes podem ser observados nos pixels situados ao redor de objetos, possuindo, portanto, grande probabilidade de carregarem informação relevante. Quanto maior o valor do gradiente, maior a quantidade de informação. Esta mesma análise foi realizada em imagens com diferentes intensidades de brilho. Contudo, com o intuito de evitar a aquisição de uma série de imagens com diferentes t_{exp} , foi utilizada uma função de correção sobre a imagem original para o ajuste do brilho. Através da função de correção, foi gerada uma série de imagens com intensidades de brilho variando ao redor do brilho da imagem original. Os valores do gradiente obtidos para esta série de imagens foram utilizados num ajuste polinomial de 5^a ordem. O valor ótimo do t_{exp} foi aquele que maximizou o valor do gradiente.

Uma outra metodologia para otimização de performance de câmeras utilizadas em robôs baseados na visão foi apresentada pelos autores Wang (2012) e Lu et al. (2010). Ambos os autores apresentaram um método baseado no ajuste de parâmetros do dispositivo para a maximização da entropia de Shannon. Quanto maior o valor da entropia da imagem obtida, maior será a quantidade de informação armazenada.

Em seu artigo, Wang, fez uma comparação do método apresentado com o Sistema de Controle Automático de Exposição (SCAE) presente em uma câmera CCD. Ele explica que o SCAE realiza o ajuste da exposição de maneira a aproximar a intensidade luminosa média de uma imagem a um valor pré-estipulado. Contudo, existem casos em que o SCAE resulta em imagens com iluminação excessiva (superexpostas) ou com pouca iluminação (subexpostas). Tanto uma, quanto a outra, gera perda de informação. Em contraposição, o método apresentado pelo autor ajusta a exposição de uma imagem de forma a maximizar

o valor da entropia. Como forma de validação, foi realizado um teste de comparação de performance entre os dois métodos. No primeiro teste, a câmera foi submetida à uma cena de alta luminosidade. O valor da exposição e da entropia obtidos pelo método apresentado foram maior que o valor da exposição e da entropia obtidos pelo SCAE. O segundo experimento constituiu em uma cena com diminuição repentina de luz. Foi observado que a entropia obtida pelo método foi maior que aquela obtida pelo SCAE tanto antes, quanto depois da diminuição da luz.

Já os autores Lu et al. realizaram a aquisição de uma série de imagens para diferentes combinações de valores do t_{exp} e do ganho da câmera para avaliar sua influencia na função da entropia. Com este experimento, demonstraram como o gráfico da função da entropia possui uma linha de máximo ao longo de ambos os parâmetros e como esta linha varia em função da condição de iluminação do ambiente. Para a obtenção da configuração ótima da câmera, os autores procuraram o ponto de máxima entropia para a condição t_{exp} = ganho. Para validação do método, foram realizados dois experimentos. O primeiro teste foi realizado em um ambiente fechado, para uma câmera utilizada em jogos de futebol de robôs. O segundo teste foi realizado em ambiente aberto, para uma câmera utilizada em robôs baseados em visão. As imagens de ambos os testes foram pós-processadas por um algoritmo de classificação de cores. Em ambos os testes, as imagens otimizadas através do método apresentado pelos autores proporcionou melhores resultados do que as imagens não otimizadas.

Dentro do tema de sistemas baseados em visão, os autores Kim, Cho e Kim (2018) explicaram como a performance de uma câmera pode ser alterada tanto pela variação do t_{exp} , quanto do ganho. Além disso, eles explicaram como estes dois parâmetros devem ser simultaneamente levados em consideração para que a otimização da aquisição de imagens seja possível. O uso de um t_{exp} muito alto pode gerar imagens borradas, ou mesmo saturadas. O uso de um ganho muito alto adiciona ruído desnecessário na imagem.

Por este motivo, os autores apresentaram uma métrica para a avaliação da qualidade de uma imagem. Nesta métrica, foram avaliadas duas funções de custo: uma para o t_{exp} e outra para o ganho. Para a função de custo do t_{exp} , foi utilizada a equação do Gradiente Ponderado de Entropia. Esta equação avalia a qualidade da imagem em função do seu gradiente e da saturação. Para a função de custo do ganho, foi utilizada a equação da SNR da imagem. Esta equação penaliza a função de custo toda vez que o ganho adicionar ruído à imagem. A métrica dada pela soma destas duas funções de custo é chamada de Gradiente Ponderado de Entropia com Consideração de Ruído (GPER).

Dessa forma, os autores realizaram a otimização da performance da câmera através da implementação do MOB sobre a métrica GPER. Contudo, a aquisição de imagens para os diferentes valores de t_{exp} e ganho retornados pelo MOB durante a otimização pode ser temporalmente custosa, principalmente para grandes valores de t_{exp} . Para resolver este problema, foi proposta a geração de imagens sintéticas, à partir de uma imagem original. A variação de brilho da imagem foi realizada através de uma função de transferência nãolinear denominada CRF, simulando o efeito da variação do t_{exp} . A variação da amplitude do sinal foi realizada através da multiplicação direta da imagem pelo valor do ganho.

Para validar a metodologia, os autores apresentaram uma comparação do desempenho de três câmeras acopladas a um robô: uma delas utilizando o método desenvolvido (C1), uma utilizando um controle interno do t_{exp} e do ganho (C2) e uma que realiza apenas o controle do t_{exp} (C3). Foram realizados dois experimentos em ambientes fechado e aberto: no experimento em ambiente fechado, o robô realizou a aquisição de imagens passando por um corredor onde o acendimento das lâmpadas era feito de forma automática; no experimento em ambiente aberto, foi capturada uma série de imagens logo após o pôr-do-sol. Em ambos os experimentos, a câmera C1 obteve melhor performance do que as outras duas. Os autores também realizaram um experimento de mapeamento e localização. Para ambos os casos do uso das câmeras C2 e C3, houve falha no rastreamento causado pela aquisição de imagens subexpostas. Contudo, a câmera C1 obteve grande sucesso no experimento.

Em suma, foram apresentadas diversas metodologias para otimização da performance de câmeras com base no ajuste dos parâmetros de controle. Os autores Wu, Nelson e Tseng apresentaram um método que determina apenas o G_{em} que otimiza a SNR de uma imagem. Os autores Shim, Lee e Kweon e Wang apresentaram um método que se baseia apenas no controle do t_{exp} . Os autores Lu et al. e Kim, Cho e Kim apresentaram um método que se baseia no controle tanto no t_{exp} , quanto do ganho da câmera. Lu et al. exploraram apenas o caso ótimo onde t_{exp} = ganho. De forma semelhante à metodologia utilizada no presente trabalho, os autores Kim, Cho e Kim utilizaram o MOB para o ajuste do t_{exp} e do ganho da câmera. Contudo, além do controle do t_{exp} e do G_{em} , o sistema de aquisição do SPARC4 ainda permite o controle dos parâmetros de HSS, PA, Bin e SI para otimização da performance do CCD. Além disso, nenhum dos autores encontrados apresentou uma metodologia que otimizasse tanto a FA quanto a SNR da câmera.

2.1.2 Projetos com o uso do Método de Otimização Bayesiano

Os autores Bashashati, Ward e Bashashati (2016) apresentaram uma Interface Computacional Cerebral (ICC), para o reconhecimento de padrões da atividade cerebral para o controle de dispositivos. Para tanto, os autores utilizaram o MOB para o ajuste dos hiper-parâmetros de um ICC, em função dos padrões de atividade cerebral do usuário. Os hiper-parâmetros utilizados foram: o intervalo de tempo para a extração do sinal e seleção da banda de frequências do sinal do cérebro. Todo sinal adquirido era passado para um algoritmo classificador de Análise Discriminante Linear (ADL), muito utilizado para classificação em ICCs. Dessa forma, a otimização do ICC foi dada pela exatidão da classificação obtida pelo algoritmo ADL em função dos hiper-parâmetros retornados pelo MOB ao longo das iterações. O sistema final era, então, composto pela combinação de todos os classificadores treinados ao longo das iterações, utilizando uma Regressão Linear de Multi-resposta. Foi constatado que a combinação destes classificadores era mais exata que do que os classificadores individuais. Para a avaliação do método, foi utilizado o conjunto de dados 3b da competição de ICC III. Este conjunto de dados foi obtido de três pessoas e separados nas tarefas do movimento das mãos esquerda e direita. Então, foi testada a exatidão do sistema proposto pelos autores, em comparação com um sistema não otimizado. Foi constatado que o resultado obtido pelo sistema proposto foi melhor do que aquele apresentado pela literatura.

Os autores Snoek, Larochelle e Adams (2012) apresentaram o uso do MOB para a otimização de um Algoritmo de Aprendizado de Máquina (AAM), através do algoritmo de Processo Gaussiano (PG). Para tanto, foram desenvolvidas algumas metodologias para a aplicação do MOB para o caso dos AAMs. Foi desenvolvido um método para a escolha automática da função de covariância do PG, assim como seus hiper-parâmetros. Diferentes configurações dos parâmetros de um AAM, como por exemplo a taxa de aprendizagem, resultam em diferentes quantidades de tempo para o treinamento do algoritmo. Logo, o uso de métodos iterativos para a determinação dos parâmetros que otimizam o treinamento do algoritmo pode ser computacionalmente custoso. Dessa forma, os autores propuseram uma função da melhoria esperada por segundo, que incorporava não apenas a informação dos hiper-parâmetros que otimizam a função objetiva, como também, aqueles que permitiam um treinamento mais rápido do algoritmo. Como uma forma de tirar proveito da capacidade de computação muti-core atual, foi apresentada uma metodologia para paralelizar a execução do MOB. Foi utilizado do Método de Monte Carlo para gerar uma estimativa da função de aquisição do MOB para avaliações da função objetiva que ainda não foram realizadas. Como forma de validação, os autores utilizaram os algoritmos apresentados na otimização de problemas de AAMs de diferentes áreas, comparando-os com o resultado obtido por estratégias já existentes ou uma performance manual. Para tanto, realizou-se a otimização da função Branin-Hoo, da classificação de regressão logística do conjunto de dados MNIST, da otimização do modelo gráfico para documentos Latent Dirichlet Allocation, da otimização da função Max-Margin Min-Entropy (M3E) Models, e do treinamento de uma Rede Neural Convolucional de Multi-camadas. Para cada um dos casos apresentados, o método apresentado pelos autores foi capaz de melhorar um resultado anteriormente obtido, ou então, chegar à uma resposta mínima em uma menor quantidade de tempo.

Os autores Bergstra et al. (2011) apresentaram o uso do MOB com dois novos Métodos de Otimização Global baseados em Modelos Sequenciais para a otimização de Redes Neurais de Confiança Profunda (RNCP): o PG Hierárquico e o Estimador de Parzen Estruturado em Árvore (do inglês, *Tree Structured Parzen Estimator (TPE)*). No primeiro método, os autores modelaram a função objetiva f(x) através do PG. Isto foi feito através da aquisição de várias amostras $f(x_i)$ para diferentes pontos x_i sobre o domínio da função, onde i < n e n era o número de amostras obtidas até aquele momento. Para cada amostra, era ajustada uma distribuição de probabilidade dos valores da função objetiva, dado o conjunto de valores $(x_{1:i}, f(x_{1:i}))$ obtidos. Para o segundo método, os autores propuseram modelar a função a ser otimizada através do algoritmo TPE. Este algoritmo divide o conjunto de amostras obtidas para a função f(x) em dois grupos: um grupo com uma distribuição de probabilidade l(x) para a qual uma porcentagem γ , dada pelo usuário, do conjunto de amostras retornam um valor $f(x) < y^*$, onde y^* era tal que $p(f(x) < y^*) = \gamma$; o segundo grupo possuiu uma distribuição g(x) dada pelas demais amostras. Com base nestes critérios, os autores deduziram a equação da melhoria esperada utilizando o algoritmo TPE. Estes métodos foram, então, utilizados para a otimização de RNCPs para a classificação de dois conjuntos de dados, considerados como os mais difíceis apresentados no trabalho. A função objetiva a ser otimizada possuía 32 variáveis, tendo valores tanto discretos, como contínuos. Foi constatado que estes métodos obtiveram um erro menor na classificação dos dados do que aqueles obtidos utilizando uma seleção manual, ou um algoritmo de busca aleatório. Além disso, o método TPE atingiu um novo melhor resultado para ambos os conjuntos de dados, superando resultados anteriormente obtidos para as RNCPs.

Logo, foram apresentados diferentes projetos com a aplicação do MOB para a otimização da performance de uma função objetiva. Os autores Bashashati, Ward e Bashashati apresentaram um método de otimização dos hiper-parâmetros de um ICC para o reconhecimento de padrões cerebrais para o controle de dispositivos. Os autores Snoek, Larochelle e Adams apresentaram uma metodologia para o uso do MOB na otimização dos hiper-parâmetros para treinamento de AAMs, utilizando o algoritmo de PG. Os autores Bergstra et al. apresentaram o uso do MOB, junto dos algoritmos de PG Hierárquico e do TPE, para a otimização de RNCPs. Devido aos requisitos técnicos da função objetiva a ser otimizada no presente trabalho, o método apresentado por Bergstra et al. demonstra-se ser mais o indicado, uma vez que permite a otimização de uma função objetiva multi-variável com parâmetros contínuos e discretos ao mesmo tempo.

2.2 Revisão teórica

Esta seção apresenta a revisão teórica do Método de Otimização Bayesiano e do cálculo da relação sinal-ruído de uma estrela.

2.2.1 Método de Otimização Bayesiano

O Método de Otimização Bayesiano é um método baseado no aprendizado de máquina que, assim como diversos outros apresentados pela literatura, visa otimizar uma Função Objetiva (FO) não-linear f(x) desconhecida sobre um conjunto pequeno de dados A:

$$\operatorname{argmax}_{x \in A \subset \mathbb{R}^d} f(x) \tag{2.1}$$

onde o termo argmax representa o valor de x que otimiza a função f(x) e $d \le 20$ (Frazier, 2018; Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Berk et al., 2019).

Mesmo que existam diferentes métodos de otimizações disponíveis na literatura, existem casos em que o uso do MOB torna-se vantajoso. Dentre eles, pode-se citar os casos em que a FO e/ou suas primeira e segunda derivadas, são desconhecidas (caixapreta), impossibilitando o uso de métodos como o Gradiente Descendente. Outro caso ocorre quando a FO é uma função cara de avaliar. No treinamento de redes neurais, por exemplo, a FO a ser otimizada pode ser computacionalmente custosa, impedindo o uso de métodos com grandes quantidades de iterações, como o Método de Morte Carlo. Existem, também, casos em que a avaliação da FO requer recursos financeiros, ou mesmo, a realização de ensaios destrutivos, de modo que seja de grande interesse encontrar o ponto ótimo com uma quantidade mínima de iterações. Para qualquer dos casos citados acima, o MOB pode ser aplicado de forma satisfatória (Frazier, 2018; Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Berk et al., 2019).

O funcionamento do MOB pode ser dividido na determinação de um modelo estatístico Bayesiano para estimar a FO e no uso de uma função de amostragem para estimar qual o próximo melhor ponto a ser avaliado (Frazier, 2018; Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010). Na etapa da determinação do modelo Bayesiano, para cada iteração é obtida uma amostra $y_i = f(x_i) + \epsilon_i$ da FO, onde x_i é um valor escolhido para aquela iteração sobre o domínio da função e $\epsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ é um ruído com média zero e desvio padrão σ . Ao longo das iterações, o conjunto de amostras obtidas $D_{1:i} = (x_{1:i}, y_{1:i})$ são utilizadas para o cálculo de uma distribuição a priori da FO P(f). Esta distribuição é combinada com uma função de probabilidade para todas as amostras obtidas até o momento $P(D_{1:i}|f)$ para produzir uma distribuição a posteriori.

$$P(f|D_{1:i}) \propto P(D_{1:i}|f)P(f).$$
 (2.2)

Esta etapa do MOB pode ser interpretada como uma forma de estimar a FO através de uma Função Substituta (FS) (Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Berk et al., 2019). Algumas das FS mais utilizadas para modelar a FO são:

Processo Gaussiano (Frazier, 2018), Random Forest Regression (Dewancker, McCourt e Clark, 2015) e Tree-Structured Parzen Estimator (TPE) (Bergstra et al., 2011). Na etapa da função de amostragem, o objetivo é estimar qual o próximo valor x_{i+1} mais provável de ser o ponto ótimo da FO. Este valor deve ser tal que

$$\operatorname{argmax}_{x_{i+1} \in A \subset \mathbb{R}^d} u(x_{i+1} | D_{1:i}), \tag{2.3}$$

onde u é a função de amostragem escolhida (Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Berk et al., 2019). Um valor de x_{i+1} escolhido pela função de amostragem corresponde a um potencial valor que otimiza a FO. Isto pode ocorrer quando a predição ou a incerteza sobre a FO são altas, ou ambas as condições ao mesmo tempo. Esta etapa é conhecida como o balanço entre *exploitation* e *exploration*. O termo *exploitation* refere-se à avaliação de pontos sobre a FO com uma predição alta, melhorando um resultado já obtido. O termo *exploration* refere-se à avaliação de pontos sobre a FO com alta incerteza, ou seja, pontos distantes de uma medida já realizada onde se conhece pouco sobre a FO (Frazier, 2018; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Berk et al., 2019).

A escolha do próximo valor ótimo pela função de amostragem corresponde a um segundo problema de otimização. Neste caso, entretanto, a função, assim como suas primeira e segunda derivadas são conhecidas, permitindo a aplicação de métodos convencionais de otimização (Frazier, 2018; Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010). Algumas das funções de amostragem mais utilizados são a Probabilidade de Melhoria P_M e Melhoria Esperada M_E .

Probabilidade de Melhoria: segundo Kushner (1964), esta função tem como objetivo maximizar a probabilidade de melhoria do valor ótimo atual da FO $f(x^+)$, sendo $x^+ = \operatorname{argmax}_{x_{i+1} \in x_{1:i+1}} f(x_{i+1})$, de forma que

$$P_M = P[f(x_{i+1}) \ge f(x^+)] = \Phi\left[\frac{u(x_{i+1}) - f(x^+)}{\sigma(x_{i+1})}\right], \qquad (2.4)$$

onde Φ é a função da distribuição de probabilidade cumulativa e $\sigma(x_{i+1})$ é o desvio padrão da função no ponto x_{i+1} . Contudo, este procedimento visa apenas o *exploitation*: pontos que possuem grande probabilidade de serem infinitesimalmente maiores do que $f(x^+)$ terão prioridade em relação a pontos que podem oferecer um ganho maior, mas que possuem grande incerteza. Para solucionar este problema, é adicionado um termo $\xi \geq 0$ (Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Berk et al., 2019), de forma que

$$P_M = P[f(x_{i+1}) \ge f(x^+) + \xi] = \Phi\left[\frac{u(x_{i+1}) - f(x^+) - \xi}{\sigma(x_{i+1})}\right]$$
(2.5)

A escolha de ξ fica a critério do usuário. Kushner recomenda o uso de um ξ alto no início e ir diminuindo ao longo das iterações do método para realizar o balanço entre *exploitation* e *exploration*. Lizotte (2008) argumenta que não há diferença no desempenho da função entre um ξ variável ou constante.

Melhoria Esperada: esta função leva em conta não apenas a probabilidade de melhorias, mas também a magnitude da melhoria que uma amostra pode proporcionar (Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010). Mockus, Tiesis e Zilinskas (1978) propõem uma forma de maximizar a melhoria esperada em relação a $f(x^+)$. Para tanto, os autores definem a probabilidade de melhoria como

$$P_M(x_{i+1}) = \max[0, f(x_{i+1}) - f(x^+)].$$
(2.6)

o termo max indica que $P_M(x_{i+1})$ é positiva quando o valor $f(x_{i+1})$ for maior que o valor máximo atual, e vale zero quando o contrário. Portanto, o próximo ponto x_{i+1} a ser avaliado será aquele que maximiza a melhoria esperada, na forma

$$x_{i+1} = \operatorname{argmax}_{x_{1:i+1}} M_E\{\max[0, f(x_{i+1}) - f(x^+)] \mid D_{1:i+1}\}.$$
 (2.7)

Seja uma distribuição a *posteriori* da FO caracterizada por uma função média $\mu(x)$ e uma função variância $\sigma^2(x)$. A probabilidade de melhoria para esta função pode ser contabilizada através de uma função de densidade de probabilidade normal, na forma

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x_{i+1})} \exp\left\{-\frac{\left[\mu(x_{i+1}) - f(x^+) - P_M\right]^2}{2\sigma(x_{i+1})^2}\right\}.$$
 (2.8)

Logo, a melhoria esperada M_E será a integral da Equação 2.8:

$$M_E(P_M) = \int_{P_M=0}^{P_M=\infty} P_M \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x_{i+1})} exp\left\{-\frac{\left[\mu(x_{i+1}) - f(x^+) - P_M\right]^2}{2\sigma(x_{i+1})^2}\right\} dP_M.$$
(2.9)

Segundo Jones, Schonlau e Welch (1998), a integral da Equação 2.9 pode ser resolvida por partes, resultando em

$$M_E(x) = \sigma(x_{i+1}) \left\{ \frac{\mu(x_{i+1}) - f(x^+)}{\sigma(x_{i+1})} \Phi\left[\frac{\mu(x_{i+1}) - f(x^+)}{\sigma(x_{i+1})} \right] + \phi\left[\frac{\mu(x_{i+1}) - f(x^+)}{\sigma(x_{i+1})} \right] \right\}.$$
(2.10)

onde ϕ representa a função da distribuição de probabilidade. Fazendo $Z = \frac{\mu(x_{i+1}) - f(x^+)}{\sigma(x_{i+1})}$,

$$M_E(x) = \begin{cases} \left[\mu(x_{i+1}) - f(x^+) \right] \Phi(Z) + \sigma(x_{i+1})\phi(Z), & se \ \sigma(x_{i+1}) > 0\\ 0, & se \ \sigma(x_{i+1}) = 0 \end{cases}$$
(2.11)

Uma vez obtida a Equação 2.11 para a melhoria esperada da FO, é necessário que essa equação seja expressa de forma a permitir o balanço entre as opções *exploita-tion/exploration*. Para tanto, Lizotte sugere a introdução do parâmetro ξ , de forma que a Equação 2.11 possa ser reescrita como (Brochu, Hoffman e Freitas, 2010; Brochu, Cora e Freitas, 2010; Berk et al., 2019)

$$M_E(x) = \begin{cases} [\mu(x) - f(x^+) - \xi] \Phi(Z) + \sigma(x)\phi(Z), & se \ \sigma(x) > 0\\ 0, & se \ \sigma(x) = 0, \end{cases}$$
(2.12)

sendo

$$Z = \begin{cases} \frac{\mu(x) - f(x^+) - \xi}{\sigma(x)}, & se \ \sigma(x) > 0\\ 0, & se \ \sigma(x) = 0, \end{cases}$$
(2.13)

O termo ξ na Equação 2.13 é similar aquele utilizado na Equação 2.5. Lizotte sugere que um valor $\xi = 0,01$ funciona bem para a maioria dos casos.

A Figura 1 apresenta um gráfico da relação entre uma variável x genérica e da predição média f(x) (linha preta contínua) da FO a ser otimizada. São apresentadas, também, três medidas ao longo do domínio da função $f: x_1, x_2 \in x^+$. A área sombreada em azul representa o intervalo de incerteza (variância) ao redor da média. O ponto de máximo atual é representado por x^+ . Na vertical, são apresentadas três gaussianas da distribuição de probabilidade da predição do valor ótimo da função objetiva para os pontos $x_1, x_2 \in x_3$. A área da gaussiana sombreada em verde representa a medida da melhoria esperada $M_E(x)$ do ponto x_3 . É possível notar, também, que os pontos $x_1 \in x_2$ praticamente não contribuem com a melhoria do valor de $f(x^+)$.

2.2.2 Algoritmo Tree-Structured Parzen Estimator

A utilização do algoritmo *Tree-Structured Parzen Estimator* (TPE) na implementação do presente trabalho se deve pelo fato de permitir a otimização de uma FO que possua parâmetros tanto contínuos, quanto discretos, indo de encontro com a necessidade dos EMCCDs do SPARC4.

O algoritmo TPE foi primeiramente apresentado por Bergstra et al. (2011) para a otimização de Redes de Confiança Profunda. Este algoritmo busca encontrar o mínimo de uma função, através do ajuste iterativo da função de densidade de probabilidade



Figura 1 – Gráfico da relação entre uma variável x genérica e de sua predição média f(x)(linha preta). A área sombreada em azul representa a incerteza relacionada à predição. São apresentadas três medidas sobre o domínio da função: x_1, x_2 e x^+ , sendo este último o ponto de máximo atual. Na vertical, são apresentadas três gaussianas da distribuição de probabilidade da predição do valor ótimo da função objetiva para os pontos x_1, x_2 e x_3 . A área sombreada em verde representa a melhoria esperada para o ponto x_3 . Fonte: Brochu, Cora e Freitas, 2010.

p(y|x) (Kastner, Nellen e Jahn, 2019). Contudo, ao invés de modelar p(y|x) diretamente, o algoritmo TPE utiliza a Regra de Bayes na forma

$$p(y|x) = \frac{p(x|y) \times p(y)}{p(x)},$$
 (2.14)

onde p(x|y) é a probabilidade do parâmetro x ser utilizado, dado o valor da FO y (Singh, 2018). Por sua vez, p(x|y) pode ser expresso na forma

$$p(x|y) = \begin{cases} l(x), & se \ y < y^* \\ g(x), & se \ y \ge y^* \end{cases}$$
(2.15)

onde l(x) é a função de densidade de probabilidade formada pelo conjunto de pontos de $x_{1:i}$ para os quais $f(x) < y^* \in g(x)$ é a densidade dada pelos demais pontos; y^* é um valor limite ajustado pelo algoritmo, para o qual uma porcentagem γ dos dados observados

atenda à condição $p(y < y^*) = \gamma$ (Bergstra et al., 2011; Singh, 2018, Dewancker, McCourt e Clark, 2015). O valor apropriado de γ deve ser especificado pelo usuário; em seu artigo, Bergstra et al. utilizam $\gamma = 0, 15$.

Dessa forma, seja a melhoria esperada para o algoritmo TPE dada pela Equação 2.16

$$M_E(x) = \int_{-\infty}^{y^*} (y^* - y) p(y|x) dy, \qquad (2.16)$$

é possível escrever

$$M_E(x) = \int_{-\infty}^{y^*} (y^* - y) \frac{p(x|y) \times p(y)}{p(x)} dy.$$
 (2.17)

Por construção, $p(y < y^*) = \gamma$, logo,

$$\int_{-\infty}^{y^*} (y^* - y)p(x|y) \times p(y)dy = l(x) \int_{-\infty}^{y^*} (y^* - y)p(y)dy = \gamma y^* l(x) - l(x) \int_{-\infty}^{y^*} p(y)dy.$$
(2.18)

O termo p(x) pode ser escrito na forma

$$p(x) = \int_{\mathbb{R}} p(x|y)p(y)dy = \gamma l(x) + (1 - \gamma)g(x),$$
(2.19)

e, portanto, as Equações 2.18 e 2.19 podem ser substituídas na Equação 2.17:

$$M_E(x) = \frac{\gamma y^* l(x) - l(x) \int_{-\infty}^{y^*} p(y) dy}{\gamma l(x) + (1 - \gamma)g(x)} \propto \left[\gamma + \frac{g(x)}{l(x)} (1 - \gamma) \right]^{-1}$$
(2.20)

A Equação 2.20 mostra que a maximação da melhoria esperada ocorre para pontos x sobre o domínio da FO, para grandes probabilidades de l(x) e baixas probabilidades de g(x) (Bergstra et al., 2011; Kastner, Nellen e Jahn, 2019).

2.2.3 Cálculo da relação sinal-ruído

Esta seção descreve o procedimento para o cálculo da SNR de medidas fotométricas obtidas através da imagem de uma estrela por um EMCCD. Para tanto, será definido o conceito de densidade de fluxo emitido por uma estrela e como este fluxo é detectado por um dispositivo CCD, considerando as perdas ao longo do caminho óptico. Por fim, serão feitas as considerações para o cálculo da SNR.

Uma grandeza muito utilizada na aquisição de dados fotométricos de uma estrela é a densidade de fluxo F. A densidade de fluxo é a quantidade de energia emitida pela estrela, por unidade de área, por unidade de tempo que atinge o instrumento de detecção,
dada em W/m². Para a determinação de F, considere o sistema apresentado pela Figura 2. Neste sistema, uma superfície de elemento de área dA emite uma quantidade de energia denominada intensidade específica monocromática I_{ν} . Esta energia é captada por um telescópio que possui uma área dada pelo ângulo sólido $d\omega$, posicionado na direção normal ao raio r que une o centro do detector à superfície dA. Quanto mais distante o objeto de interesse dA estiver do telescópio, menor será o ângulo sólido $d\omega$. θ é o ângulo formado por r e a reta normal ao plano dA. O meio entre as duas superfícies é considerado transparente. Dessa forma, I_{ν} pode ser definida como a quantidade de energia dE que atravessa dA, em intervalo de tempo dt, dentro de um elemento de ângulo sólido $d\omega$, na direção θ , dentro do intervalo de frequência $[\nu; \nu + d\nu]$ (Kepler e Saraiva, 2000; Palmer e Davenhall, 2001), na forma



Figura 2 – Intensidade específica monocromática I_{ν} , emitida por uma superfície dA, que incide sobre um ângulo sólido $d\omega$, na direção θ . Fonte: Palmer e Davenhall (2001).

$$I_{\nu} = \frac{dE \, \cos\theta}{dA \, dt \, d\omega \, d\nu} \tag{2.21}$$

sendo I_{ν} dada em J/(m² s sr Hz). Dessa forma, o elemento da densidade de fluxo dF_{ν} obtido para o intervalo de frequência $[\nu; \nu + d\nu]$ será

$$dF_{\nu} = \frac{dE \, \cos\theta}{dA \, dt \, d\nu} = I_{\nu} \, d\omega. \tag{2.22}$$

A densidade de fluxo que atravessa o ângulo sólido, para o intervalo de comprimento de onda estudado será

$$F_{\nu} = \int I_{\nu} \, d\omega. \tag{2.23}$$

Portanto, o fluxo F pode ser obtido integrado F_{ν} sobre o espectro de frequências:

$$F = \int_0^\infty F_\nu d\nu. \tag{2.24}$$

Contudo, o fluxo que chega até a superfície atmosférica é diferente daquele obtido no foco do telescópio. Existem perdas ao longo do caminho geradas tanto pela atmosfera terrestre quanto pela própria óptica do telescópio.

Com relação às perdas atmosféricas, existem diversos fatores que interferem no fluxo de fótons da estrela, como por exemplo, a massa de ar. Mesmo para comprimentos de onda onde a atmosfera seja quase transparente, existe uma diferença de fluxo devido a quantidade de massa de ar entre o sinal que atinge a atmosfera e o telescópio. Quanto maior a massa de ar, menor será o fluxo medido. Seja o ângulo α formado pela posição do objeto no céu e o zênite (direção normal em relação ao solo). Se a atmosfera puder ser modelada como um conjunto de camadas de absorção paralelas, então, a quantidade de massa de ar varia com relação a $sec(\alpha)$ (Léna, 1988). Esta aproximação vale para $\alpha \leq 60^{\circ}$ (Budding e Willstrop, 1994). Outros fatores que também interferem no fluxo são: a perda por espalhamento pelas nuvens; deformação da fase da frente de onda devido a turbulências e variações térmicas (Léna, 1988).

Além das perdas atmosféricas, outra fonte de perda de fluxo está relacionada com a óptica do telescópio. O telescópio sobre o qual o SPARC4 será instalado foi construído segundo o projeto óptico Ritchey-Chrétien (Laboratório Nacional de Astrofísica, 2015). A Figura 3 mostra um esquemático deste tipo de projeto, onde são apresentados o espelho primário M_1 , o espelho secundário M_2 e o foco do tipo Cassegrain. Atualmente, estes espelhos são feitos sobre uma base de vidro ou cerâmica e, no caso do projeto óptico Ritchey-Chrétien, possuem um formato hiperbólico. Sua produção é feita através do desbaste da base até que se aproxime do formato desejado. Neste ponto, a base passa a ser polida para remoção de imperfeições e modelada no formato final. Esta modelagem é feita através do polimento mais severo na região onde a espessura do espelho precisa ser menor. Ao fim do processo, a base recebe uma camada metálica através da deposição de vapor em câmara de vácuo.

Apesar do desenvolvimento da técnica de produção de espelhos para uso astronômico, existe ainda uma série de fatores que contribuem para a perda de fluxo. Mesmo com o uso de um revestimento metálico (reflectância > 95%), existe perda de fluxo por reflexão nos espelhos primário e secundário. Defeitos sobre a superfície podem ser gerados durante o processo de desbaste, polimento ou modelagem. No desbaste, são geradas imperfeições como riscos ou buracos. A etapa do polimento pode não corrigir totalmente os defeitos gerados no desbaste. A modelagem pode gerar imperfeições que desviam o formato obtido do *design* de um hiperboloide (Budding e Willstrop, 1994).



Figura 3 – Representação esquemática de um telescópio baseado no projeto Ritchey-Chrétien. Fonte:

Além das falhas geradas durante o processo de produção, existem ainda outros fatores que geram perdas de fluxo no telescópio. Dentre elas, pode-se citar a perda de fluxo por obstrução devido à posição do espelho M_2 , manchas e poeira devido à exposição do espelho ou deformações devido à variação de temperatura (Budding e Willstrop, 1994).

Após este caminho, o fluxo da estrela chega ao CCD. A detecção do sinal ocorre através de um conjunto de fotodetectores, geralmente de silício, chamados pixels. Os CCDs do SPARC4 são compostos por uma matriz de 1024 x 1024 pixels (Rodrigues et al., 2012a). Quando um fóton atinge um pixel, é gerado um par elétron-buraco. O sinal obtido pode ser definido como a quantidade de pares elétrons-buracos por pixel gerados durante o intervalo de tempo em que o CCD foi exposto à luz (Bernardes, 2017).

A Figura 4 apresenta a estrutura esquemática de um pixel do CCD. Este pixel é composto por uma camada metálica sobre a superfície (eletrodos), uma camada isolante de óxido metálico, uma região semicondutora tipo N e um substrato semicondutor tipo P. Quando uma voltagem é aplicada entre a camada metálica e o semicondutor tipo P, é criado um campo elétrico dentro do pixel. A região de mínimo deste campo elétrico é chamada de poço de potencial e ocorre pela falta de elétrons abaixo do centro do pixel. Este poço de potencial serve como uma capacitor, permitindo o armazenamento de elétrons. Quando um feixe de luz incide sobre o pixel e atinge a junção PN, é gerado um par elétronburaco. O buraco é absorvido pela camada semicondutora tipo P. O elétron é direcionado para o poço de potencial, onde fica armazenado. Esta geração de elétrons continua durante o tempo que o CCD é exposto à luz. Caso a capacidade máxima de armazenamento do poço do potencial seja excedida, os fotoelétrons gerados começam a vazar para os pixels vizinhos, gerando um fenômeno chamado saturação (Bremmer, Hutcheson e Stead, 2005). Os CCDs utilizados no SPARC4 apresentam um poço de potencial de 80.000 elétrons (Andor Technology, 2020b).



Figura 4 – Estrutura esquemática de um píxel do CCD. Neste pixel, são representadas a camada metálica composta pelos eletrodos, uma camada de óxido metálico, uma região semicondutora tipo N e um substrato semicondutor tipo P. Fonte: Bernardes (2017).

Após cada exposição, será gerada uma distribuição de fotoelétrons sobre os pixels do CCD, de acordo com a incidência de luz. A digitalização das cargas ao longo de uma imagem será dada pela transferência vertical das linhas de pixels do CCD até a linha do registrador horizontal, em conjunto com a transferência horizontal de cargas do registrador até o conversor analógico-digital (vide Figura 5) (Bernardes, 2017). Neste conversor, o sinal fotoelétrico adquirido será convertido em um valor de voltagem. Este valor de voltagem será aproximado pelo conversor para a medida mais próxima em unidade digital chamada contagem, expressa em *Analogical-to-digital Unit (ADU)* (Merline e Howell, 1995). A grandeza que relaciona a quantidade média de fotoelétrons necessários para gerar 1 ADU é o ganho do CCD (G), dado em e-/ADU. O valor do ganho varia para cada modo da taxa de leitura e da pré-amplificação utilizadas (Bernardes, 2017).



Figura 5 – Representação da transferência de cargas ao longo do CCD. Fonte: Bernardes (2017).

Contudo, nem todo o fluxo que atinge o CCD é convertido em sinal. Sobre este fluxo, devem ser consideradas as perdas relacionadas à Eficiência Quântica (EQ). A EQ consiste na relação entre a quantidade de fótons que atinge o CCD e a quantidade de fótons convertida em elétrons, para um determinado comprimento de onda (vide Figura 6). Este comportamento é gerado através da estrutura dos fotodetectores. Quando um fóton atinge o CCD, ele precisa atravessar um revestimento anti-reflexivo, a camada dos eletrodos e a camada de óxido metálico. Esta é a região chamada zona morta. Para que ocorra a medição, é preciso que o fóton incidente sobre o CCD tenha energia suficiente para passar pela zona morta e chegar à região de depleção do pixel. Contudo, fótons com energia muito grande podem atravessar a região de depleção e a probabilidade média de medição tenderá à zero (Bernardes, 2017).



Figura 6 – Gráfico da Eficiência Quântica do CCD em função do comprimento de onda. São apresentadas as curvas de Eficiência Quântica para os tipos de CCD iluminado pela frente e iluminado por trás. Fonte: http://www.aif.estt.ipt.pt/ Ficheiros_PDF/SensitAnalogica_FOTO/Fichas/EQ.pdf>

Para o cálculo da SNR apresentado no presente trabalho, serão desconsideras todas as perdas externas anteriormente descritas. Será considerado como sinal apenas o fluxo medido pelo CCD integrado ao longo do tempo e dos pixels (espaço).

Para o cálculo da SNR, será considerada a Figura 7, que apresenta um exemplo da distribuição de contagens do fluxo de uma estrela sobre os pixels do CCD. Na figura, são apresentados três círculos concêntricos: um com raio de 13 pixels, outro com raio de 26 pixels e outro com raio 39 pixels. Os pixels dentro da região do círculo interno são aqueles considerados para o cálculo do fluxo total da estrela S. Os pixels dentro da região entre os círculos com raios 26 e 39 pixels (anel) são aqueles considerados para uma estimativa do fluxo de fundo S_f . Estas medidas foram obtidas utilizando o método da largura a meia altura, do inglês *Full Width at Half Maximun (FWHM)* (Markevich e Gertner, 1989), onde 99,9 % do fluxo da estrela que atinge o CCD está dentro da região do raio equivalente a três vezes o tamanho da FWHM. A quantidade de pixels considerados para o cálculo do fluxo da estrela será denominada n_p .



Figura 7 – Imagem da distribuição de contagens de uma estrela sobre os pixels do CCD. São apresentados três círculos concêntricos: um com raio de 13 pixels, outro com raio de 26 pixels e outro com raio 39 pixels. O círculo interno compreende os pixels considerados para a aquisição de dados da estrela. Os pixels dentro da região entre os círculos de raios 26 e 39 pixels são aqueles considerados para o cálculo do fluxo de fundo.

A Equação 2.25 apresenta o cálculo da relação sinal-ruído S da imagem da Figura 7:

$$\mathcal{S} = \frac{S}{N},\tag{2.25}$$

onde N representa o ruído total da imagem. S, em elétrons, é dado pela somatória do sinal S_i , em ADU, obtido pelos pixels dentro do círculo interno da Figura 7, subtraídos do fluxo de fundo S_f (Martioli et al., 2018), na forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n_p} (S_i - S_f) \times G.$$
 (2.26)

 S_f é dado pela mediana dos pixels, em ADU, dentro do anel e G representa o fator de conversão, ou ganho, em e-/ADU.

Segundo Merline e Howell (1995), dentre as fontes de ruído que compõem o ruído total N, pode-se citar: o ruído de leitura (σ_r), o ruído da corrente de escuro (σ_{ce}), o ruído da medida do céu (σ_c) e o ruído da medida do sinal da estrela (σ_s). Outras fontes de ruído do CCD são conhecidas, contudo, por aproximação, não serão consideradas neste escopo. Todo CCD possui um nível mínimo e constante de contagens para cada pixel ao longo da imagem, mesmo sem a presença de luz e para um t_{exp} mínimo. A este nível é dado o nome de bias (B), um valor positivo somado a todos os pixels do CCD para evitar contagens negativas. Uma imagem obtida nesta configuração é chamada de imagem de bias. O σ_r é um ruído Gaussiano, dado em elétrons, ao redor do nível de bias obtido através da distribuição de contagens σ_{ADU} , em ADU/pix, dos pixels de uma imagem de bias (Howell, 2000). σ_{ce} é o ruído da corrente de escuro (C_E), dado em elétrons. A corrente de escuro é composta por elétrons termicamente gerados que são contabilizados como fotoelétrons durante a leitura dos pixels (Widenhorn et al., 2002). σ_{ce} pode ser calculado através da média S_{ce} dos elétrons termicamente gerados por pixel através da corrente de escuro de uma imagem em função do t_{exp} do CCD, na forma

$$S_{ce} = C_E \times t_{exp} \tag{2.27}$$

onde C_E é dada em e-/pix/s, para a respectiva temperatura do CCD (Bernardes, Martioli e Rodrigues, 2018). σ_c é dado em fótons e pode ser obtido através da quantidade média de fótons por pixel provenientes do céu S_c , na forma

$$S_c = (S_f - B) \times G - S_{ce}.$$
(2.28)

 σ_s é dado em número de fótons e pode ser obtido através do sinal S da estrela adquirido pelo CCD. Os ruídos σ_s , σ_c e σ_{ce} são calculados através da distribuição de Poisson (Merline e Howell, 1995). Logo, a expressão para o cálculo de cada fonte de ruído apresentada será

$$\sigma_r = \sum_{i=1}^{n_p} (\sigma_{ADU(i)} \times G), \qquad (2.29)$$

$$\sigma_{ce} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} S_{ce(i)} \times G_{em}^2 \times F_R^2},$$
(2.30)

$$\sigma_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} S_{c(i)} \times G_{em}^2 \times F_R^2},\tag{2.31}$$

$$\sigma_s = \sqrt{S \times G_{em}^2 \times F_R^2},\tag{2.32}$$

onde $\sigma_{ADU(i)}$, $S_{ce(i)}$ e $S_{c(i)}$ representam o valor da distribuição de contagens por pixel, da média dos termoelétrons por pixel e o número de fótons por pixel do céu para o iésimo pixel da estrela, respectivamente. G_{em} representa o fator de multiplicação do ganho EM do CCD. Para o modo convencional, é considerado que $G_{em} = 1$. F_R é um fator de ruído extra gerado pela aplicação do G_{em} . Para um amplificador ideal, $F_R = 1$. Para um EMCCD da Andor no modo EM, $F_R = 1,41$ (Andor Technology, 2020a). Sobre as Equações 2.29 a 2.31 será considerado que $\sigma_{ADU(i)}$, $S_{c(i)}$, $S_{ce(i)}$ são constantes ao longo dos pixels, podendo-se escrever

$$\sigma_r = n_p \times \sigma_{ADU} \times G, \tag{2.33}$$

$$\sigma_{ce} = \sqrt{n_p \times S_{ce} \times G_{em}^2 \times F_R^2},\tag{2.34}$$

$$\sigma_c = \sqrt{n_p \times S_c \times G_{em}^2 \times F_R^2}.$$
(2.35)

Será considerado que estas fontes de ruído são não-correlacionadas e podem ser combinadas quadraticamente (Newberry, 1991). Logo, o ruído total N da imagem de uma estrela será

$$N^{2} = \sigma_{s}^{2} + \sigma_{c}^{2} + \sigma_{ce}^{2} + \sigma_{r}^{2}.$$
 (2.36)

Substituindo os temos das Equações 2.32 a 2.35 na Equação 2.36, tem-se

$$N^{2} = S \times G_{em}^{2} \times F_{R}^{2} + n_{p} \times \left[\left(S_{c} + S_{ce} \right) \times G_{em}^{2} \times F_{R}^{2} + (\sigma_{ADU} \times G)^{2} \right].$$
(2.37)

Substituindo a Equação 2.37 na Equação 2.25 e levando em conta a aplicação do G_{em} sobre o sinal da estrela, a SNR obtida será

$$S = \frac{S \times G_{em}}{\sqrt{S \times G_{em}^2 \times F_R^2 + n_p \times \left[(S_c + S_{ce}) \times G_{em}^2 \times F_R^2 + (\sigma_{ADU} \times G)^2 \right]}}.$$
 (2.38)

Dividindo a Equação 2.38 por G_{em} ,

$$S = \frac{S}{\sqrt{S \times F_R^2 + n_p \times \left[(S_c + S_{ce}) \times F_R^2 + (\sigma_{ADU} \times G/G_{em})^2 \right]}}.$$
 (2.39)

Dessa forma, chega-se na expressão para o cálculo da SNR, utilizada na implementação do método de otimização da performance dos CCDs. Dadas as informações do fluxo da estrela e do ruído da imagem, esta expressão foi utilizada para realizar uma estimativa do valor da SNR para diferentes modos de operação do CCD e, assim, determinar o modo ótimo de operação.

3 Sistema de aquisição

Para o controle do sistema de aquisição do SPARC4, está sendo desenvolvido um *software* através da linguagem de programação gráfica *Labview* (National Instruments, 2020), que utiliza o pacote *Software Development Kit* (SDK) (Andor Technology, 2009) disponibilizado pela Andor para a comunicação com as câmeras CCDs. Este *software* permitirá a aquisição de imagens de forma simultânea e sincronizada para os 4 canais do SPARC4. A sincronização será realizada através de um gerador de pulso digital (Highland Technology, 2019) fabricado pela empresa *Highland Technology*, com uma precisão de sincronização entre pulsos de 10 ps. Atualmente, para cada canal, é possível adquirir cubos com até 70 imagens *full-frame* com um intervalo de tempo entre imagens de aproximadamente 1,70 ms. Além disso, é possível concatenar cubos de imagens com um intervalo de tempo que varia de 160 ms a 980 ms, dependendo do tamanho do cubo. Desta forma, o sistema de aquisição permitirá a aquisição de cubos de imagens de forma simultânea para os quatro canais, uma função que não é disponibilizada pelo *software* de controle das câmeras da Andor: *Andor Solis* (Andor Technology, 2001).

A Figura 8 apresenta os painéis frontal e de configuração do *software* desenvolvido. No painel frontal, são apresentados os controles e indicadores relativos a cada canal do SPARC4. Além disso, o painel apresenta a opção Sync Mode, que habilita a função de sincronização de aquisição entre canais. Os modos de sincronização disponibilizados são contínuo e alinhado pela borda. Apesar de implementada, a sincronização entre canais ainda não foi caracterizada. O modo alinhado pelo centro ainda precisa ser terminado. O painel de configuração apresenta o conjunto de parâmetros de controle do modo de operação do CCD. Cada um dos canais do SPARC4 possui uma janela de configuração como esta. Cada um dos parâmetros de controle do CCD foram limitados de acordo com a conveniência do uso do SPARC4, ou então, para garantir a segurança do funcionamento do sistema. Dentre eles, deve-se destacar os limites estipulados para a temperatura do CCD, G_{em} , SI e Bin. A temperatura do CCD foi limitada para o intervalo de 20 °C a -80 °C, sendo estes os limites máximos permitidos pela câmera (Andor Technology, 2015). O G_{em} foi limitado para o intervalo de 2x a 300x, de acordo com as normas de segurança fornecidas pela Andor para o uso do modo EM (Andor Technology, 2020a). O SI foi limitado para três valores padrões disponibilizados pelo software Andor Solis: 256 x 256 pixels, 512 x 512 pixels e 1024 x 1024 pixels (Andor Technology, 2001). A binagem dos pixels foi limitada para 1 x 1 pixel e 2 x 2 pixels. O motivo desta limitação está relacionada com a resolução espacial permitida para as condições atmosféricas do OPD. O sinal adquirido de uma estrela por um CCD chama-se Função de Espalhamento Puntiforme (FEP). Na ausência da atmosfera, a resolução de uma imagem é dada pelo limite de difração do



Figura 8 – Painéis frontal e de configuração do software do sistema de controle de aquisição do SPARC4. No painel frontal, são apresentados os controladores e indicadores relativos à aquisição de imagens de cada canal. É apresentada, também, a opção Sync Mode responsável pela sincronização da aquisição entre canais. No painel de configuração, é apresentada a janela de configuração dos parâmetros de controle para um dos canais do SPARC4. Todos os outro canais possuem uma janela semelhante a esta.

telescópio, devido ao limite de difração de *Fraunhofer* (Léna, 1988). A imagem de uma estrela observada neste limite é espalhada em um disco de Airy (vide Figura 9) (Airy, 1835). Logo, a distinção de dois objetos pontuais ocorre quando a distância entre estes objetos é maior que os tamanho dos discos. Contudo, este limite não é alcançável na pratica devido às distorções pela turbulência atmosférica. Nesta condição, os discos de Airy são distorcidos em uma mancha maior, formando os chamados discos de *seeing*, que passam a determinar a resolução máxima permitida pelo telescópio (Kepler, 2018). Foi encontrado na literatura que um *seeing* usual no OPD é de 1,5 arcsec (Carvalho, 2011). A escala de placa proporcionada pelo SPARC4 é de 0,35 arcsec/pixel (Rodrigues et al., 2012b). Logo, os valores de binagem 1 x 1 pixel e 2 x 2 pixels do CCD podem ser utilizados sem perda de resolução, uma vez que estão limitados pelo *seeing* do OPD. A Tabela 3 apresenta esta lista de parâmetros de controle, com seus respectivos intervalos permitidos.

Com base nos critérios apresentados, realizou-se a caracterização do ruído de leitura e da frequência de aquisição do CCD para todos os modos de operação permitidos, para um dos canais do SPARC4. A aquisição de imagens foi realizada utilizando-se o sistema de aquisição apresentado. O procedimento adotado e os resultados obtidos são apresentados na seção a seguir.



- Figura 9 Imagem da função de espalhamento puntiforme de uma estrela espalhada em um disco de Airy. Fonte: https://martinbaileyphotography.com/2017/10/26/circle-of-confusion-the-airy-disk-and-diffraction-podcast-594
- Tabela 3 Parâmetros de controle do modo de operação do CCD disponibilizados pelo *software* de controle de aquisição. Para cada parâmetro, são apresentados a sua unidade e o intervalo de valores permitidos pelo *software*.

Parâmetros	Unidade	Valores permitidos
Tempo de exposição	(s)	$> 1 \times 10^{-5}$
Número de imagens do cubo		> 1
Cooler do CCD		ligado/desligado
Temperatura do CCD	(^{o}C)	de 20 a -80
Taxa de Leitura	(MHz)	0,1; 1; 10; 20 e 30
Pré-amplificação		1 e 2
Modo EM		ligado/desligado
Ganho EM		de 2 a 300
Sub-imagem	(pixels)	$256\mathrm{x},512\mathrm{x},1024\mathrm{x}$ e customizado
Binagem	(pixels)	1 e 2

3.1 Caracterização do CCD

Esta seção apresenta a metodologia desenvolvida para a caracterização do ruído de leitura (do inglês, *Read Noise (RN)*) e da FA do EMCCD iXon Ultra 888 com número de série 9916 do SPARC4.

3.1.1 Caracterização do ruído de leitura do CCD

Foi realizada a caracterização do RN do CCD para todas as combinações dos parâmetros HSS, PA e Bin de acordo com a metodologia apresentada por Bernardes, Martioli e Rodrigues (2018). Para o modo EM, foram utilizados os valores do G_{em} 2x, de 10x até 50x, com passo de 10x e de 50x a 300x, com passo de 50x. Os valores do RN obtidos para o modo convencional são apresentados na Tabela 4. Os valores sem o erro foram obtidos através do *data sheet* da câmera (Andor Technology, 2014). As Figuras 10 a 13 apresentam o RN obtido para o modo EM. Cada ponto do gráfico apresenta a média e desvio padrão para três medidas. É possível notar uma sobreposição do valor do RN encontrado entre os modos 1 MHz e 10 MHz (Figuras 12 e 13) e entre os modos 1 MHz e 20 MHz (Figura 13).

Tabela 4 – Valores do ruído de leitura obtidos para a caracterização dos modos de operação convencionais do CCD iXon Ultra 9916.

HSS	PA	Bin	RN	Erro
(MHz)		(pixels)	(e-)	(e-)
1	1	1	$6,\!67$	
1	1	2	$6,\!94$	$0,\!22$
1	2	1	4,76	
1	2	2	4,79	$0,\!93$
0,1	1	1	8,78	
0,1	1	2	8,84	$0,\!22$
0,1	2	1	$3,\!46$	
0,1	2	2	$3,\!27$	0,93



Figura 10 – Gráfico do ruído de leitura em função do ganho EM para uma préamplificação 1 e binagem 1 pixel. A figura apresenta a resposta do ruído para os modos de HSS de 1 MHz (azul), 10 MHz (vermelho), 20 MHz (verde) e 30 MHz (preto) para o intervalo do ganho EM de x2 a x300.



Figura 11 – Mesmo gráfico da Figura 10, para o modo pré-amplificação 1 e binagem 2 pixels.



Figura 12 – Mesmo gráfico da Figura 10, para o modo pré-amplificação 2 e binagem 1 pixel.

3.1.2 Caracterização da frequência de aquisição do CCD

Foi realizada a caracterização da FA da câmera para todos os modos disponíveis no SPARC4, segundo os parâmetros HSS, Bin, SI e t_{exp} . Para cada modo, mediu-se a FA do CCD ao longo do t_{exp} . Cada medida foi realizada adquirindo-se um cubo com 10 imagens. A FA era, então, calculada dividindo-se o número de imagens pelo tempo gasto com a aquisição do cubo. Devido ao tempo do projeto, esta caracterização foi repetida três vezes e o valor da FA obtida representa a média das três. Contudo, sugere-se a realização deste mesmo procedimento para diferentes valores de cubo de imagens, para um maior número de experimentos. A Figura 14 apresenta, como exemplo, o resultado da FA obtido para o modo de 1 MHz e binagem 1 pixel para todos os valores de SI. Pelo gráfico, é possível notar dois regimes diferentes da FA ao longo do t_{exp} : um regime linear e um regime de decaimento. Isto ocorre por causa da opção de frame transfer do CCD, através da qual, uma imagem é lida em paralelo com a aquisição de outra imagem (Andor Technology,



Figura 13 – Mesmo gráfico da Figura 10, para o modo pré-amplificação 2 e binagem 2 pixels.

2015). O regime linear ocorre para um t_{exp} menor que um tempo crítico t_c , dado pelo tempo de leitura da imagem somado a atrasos internos do CCD. O regime de decaimento ocorre quando t_{exp} for maior que t_c , de modo que a FA é dada simplesmente pelo inverso de t_{exp} . O ponto de inflexão entre os dois regimes apresentado pelo gráfico proporciona uma estimativa do t_c para o respectivo modo do CCD. Desta forma, ajustou-se uma curva para os regimes linear e de decaimento para os três modos apresentados no gráfico da Figura 14. O t_c de cada modo foi obtido através do ponto de intersecção entre as curvas. Este procedimento foi repetido para todos os modos de operação, e o resultado pode ser encontrado na Tabela 5.



Figura 14 – Gráfico da frequência de aquisição do CCD em função do tempo de exposição para o modo 1 MHz e binagem 1 pixel. São apresentadas as curvas para os modos de sub-imagem 256x256 pixels (verde), 512x512 pixels (vermelho) e 1024x1024 pixels (azul).

HSS	SI	Bin	t_c
(MHz)	(pixels)	(pixels)	(s)
30	x256	2	0,0059
20	x256	2	0,0083
30	x256	1	0,011
30	x512	2	0,011
20	x256	1	0,015
20	x512	2	0,015
10	x256	2	$0,\!015$
30	x512	1	0,020
30	x1024	2	0,020
10	x256	1	0,029
20	x512	1	0,029
10	x512	2	0,029
20	x1024	2	0,029
30	x1024	1	0,039
10	x512	1	$0,\!057$
10	x1024	2	$0,\!057$
20	x1024	1	$0,\!057$
10	x1024	1	$0,\!11$
1	x256	2	$0,\!14$
1	x256	1	$0,\!28$
1	x512	2	$0,\!28$
1	x1024	2	0,56
1	x512	1	$0,\!56$
1	x1024	1	$1,\!11$
$_{0,1}$	x256	2	$1,\!24$
0,1	x512	2	$2,\!14$
0,1	x256	1	2,79
0,1	x1024	2	$2,\!97$
$_{0,1}$	x512	1	$5,\!53$
$_{0,1}$	x1024	1	10,93

Tabela 5 – Valores do tempo crítico (t_c) do CCD para todos os modos de operação permitidos para a frequência de aquisição.

Com base nos resultados das caracterizações apresentados, foram desenvolvidas duas bibliotecas em linguagem *Python*. Uma delas baseou-se nos resultados da caracterização do ruído para o cálculo da SNR do CCD em função do modo de operação. A outra biblioteca baseou-se nos resultados apresentados pela Tabela 5 para o cálculo da da FA em função do modo de operação. Estas bibliotecas, por sua vez, são utilizadas pelo método para a determinação do modo de operação ótimo dos CCDs.

4 Método de otimização

Esta seção descreve o método de otimização desenvolvido para a determinação do Modo de Operação (MOP) ótimo das câmeras EMCCDs do SPARC4. Para tanto, foi desenvolvido um *software* em linguagem *Python* 3.7.4. A Figura 15 apresenta o diagrama de blocos da estrutura utilizada para o desenvolvimento do *software*. O bloco principal representa a inicialização do *software*, o qual recebe todas as informações referentes à observação do objeto astronômico. Devem ser fornecidos: a SNR, a FA, magnitude aparente do objeto, modos de SI e Bin permitidos, temperatura do CCD e a quantidade de iterações do MOB. Caso seja escolhida a opção de calcular o fluxo de fótons da estrela através de uma pré-imagem, devem ser fornecidos o nome da imagem, coordenadas xy do objeto, uma imagem de bias com o mesmo MOP da imagem da estrela e o raio máximo da estrela.



Figura 15 – Diagrama de blocos da execução do método de otimização do modo de operação dos CCDs. A estrutura do diagrama pode ser dividida nos blocos principal, cálculo do fluxo da estrela e otimização. O cálculo do fluxo da estrela possui duas subcategorias: cálculo através da magnitude do objeto ou através da pré-imagem. A otimização pode ser dividida em três subcategorias: otimiza SNR, otimiza FA e otimiza ambos os parâmetros ao mesmo tempo.

O próximo bloco representa o cálculo do fluxo de fótons da estrela detectado pelo CCD. Para tanto, pode ser utilizada uma pré-imagem, ou a magnitude do objeto. Para o caso da pré-imagem, o sinal da estrela, em fótons/s, é calculado segundo o método descrito na Seção 2.2.3. Para o caso do cálculo através da magnitude do objeto, o sinal da estrela

é obtido através da Equação de Pogson (Kepler e Saraiva, 2000)

$$m - m_h = -2,5 \log \frac{S}{S_h},\tag{4.1}$$

onde m e S representam a magnitude e o sinal da estrela em fótons/s a ser observada; $m_h = 12,25$ (Wenger et al., 2000) e $S_h = 56122,30$ fótons/s representam a magnitude e o sinal obtidos para uma imagem da estrela HATS-24b (Oliveira, Martioli e Tucci-Maia, 2019), utilizados como valores de referência para o cálculo dos demais fluxos. O valor de S_h foi calculado através de uma imagem da estrela disponibilizada pelo banco de dados do OPD (Bruch, 2001). Rearranjando a Equação 4.1, o sinal S da estrela para uma magnitude m será

$$S = S_h \times 10^{(m_h - m)/2.5}.$$
(4.2)

Em seguida, é executado o método de otimização. Este método se baseia em um conjunto de bibliotecas desenvolvidas para o cálculo da SNR e da FA. A implementação da rotina para a execução do MOB apresentado na Seção 2.2.1 se baseia na biblioteca disponibilizada por Koehrsen (2018). Os algoritmos para a modelagem da função objetiva disponibilizados por esta biblioteca são o *RANDOM search* e o TPE. Realizou-se um teste para verificar a performance de cada um destes algoritmos na otimização dos MOPs do CCD. O Apêndice B apresenta o resultado do teste, explicando a escolha do algoritmo TPE. A biblioteca para o cálculo da SNR se baseia na metodologia apresentada na Seção 2.2.3. Caso seja utilizada a opção da pré-imagem, os valores do fluxo da estrela, fluxo do céu e o número de pixels da estrela serão aqueles obtidos para o valor do raio ótimo calculado. Caso o fluxo da estrela seja calculado através da magnitude, serão utilizados os valores calculados para o raio ótimo da imagem do HATS-24b, onde $S_c \approx 12.30$ fótons/pix/s e $n_p = 305$ pixels, respectivamente. O valor da corrente de escuro é obtido segundo o modelo apresentado por Bernardes, Martioli e Rodrigues (2018) para as câmeras 9914 (C_{E9914}), 9915 (C_{E9915}), 9916 (C_{E9916}) e 9917 (C_{E9917}) do SPARC4:

$$C_{E9914} = 24,66 \times e^{(0,0015T^2+0,29T)}$$

$$C_{E9915} = 35,26 \times e^{(0,0019T^2+0,31T)}$$

$$C_{E9916} = 9,67 \times e^{(0,0012T^2+0,25T)}$$

$$C_{E9917} = 5,92 \times e^{(0,0005T^2+0,18T)},$$
(4.3)

sendo T a temperatura do CCD em °C. O RN, em elétrons, é obtido através dos resultados da Seção 3.1.1. Para o MOP convencional, utiliza-se os valores da Tabela 4. Para o modo EM, é feita uma interpolação dos dados apresentados nas Figuras 10 a 13. O valor de G é obtido através do *datasheet* da câmera.

Deve ser ressaltado que o G_{em} dos CCDs é um recurso que aumenta a sensibilidade do dispositivo para um regime de baixas contagens e seu uso deve ser feito de forma adequada. Com base nisso, a implementação do método de otimização do MOP dos CCDs da SPARC4 seguiu alguns critérios. Segundo o reporte técnico disponibilizado pela Andor, a performance da SNR do modo EM supera a performance do modo convencional até um número máximo de 100 fótons por pixel (Andor Technology, 2020a). Dessa forma, o t_{exp} de cada modo EM utilizado pelo software é limitado de forma a atender este critério. O valor do G_{em} máximo permitido para o MOB é de 300x. Valores maiores do que este podem deteriorar o dispositivo (Andor Technology, 2001). Além disso, o G_{em} deve ser tal que a amplificação do sinal não sature o CCD. Para tanto, seu valor foi configurado de forma arbitrária para gerar um nível de contagens até 80 % do valor máximo de um pixel. Contudo, a Andor garante uma linearidade melhor do que 99,95 % (Andor Technology, 2014). Para uma imagem de 16 bits por pixel, este valor é 2¹⁶ × 0, 8 ADU, ou 52.428 ADU. Dado que o valor medido por um pixel é a soma do fluxo da estrela, do fluxo do céu, da corrente de escuro e do nível de bias, o valor máximo para o G_{em} será dado por

$$\frac{(S/n_p + S_c + S_{ce}) \times G_{em}}{G} + B = 52.428.$$
(4.4)

Rearranjando os termos da Equação 4.4, tem-se

$$G_{em} = \frac{(52.428, 8-B) \times G}{S/n_p + S_c + S_{ce}}.$$
(4.5)

A biblioteca para o cálculo da FA se baseia nos resultados apresentados na Seção 3.1.2. Seja o valor de t_c dado segundo a Tabela 5. Para cada modo, o valor da FA será calculado por interpolação, caso $t_{exp} < t_c$ e será FA= $1/t_{exp}$ caso $t_{exp} \ge t_c$.

Dessa forma, implementou-se o método de otimização dos modos de operação dos CCDs, com base nas bibliotecas acima descritas. Este método foi desenvolvido de forma a permitir três diferentes Modos de Otimização (MOT):

- Modo 1: neste modo, a SNR será otimizada, mantendo uma FA fixa. Para tanto, são selecionados todos os modos de operação que atendem à FA. Então, para cada modo da lista, é calculada a SNR para os valores máximos do G_{em} e t_{exp} permitidos. O modo ótimo será aquele com o maior valor da SNR.
- **Modo 2:** neste modo, a FA será otimizada, mantendo a SNR fixa. Para tanto, é calculado o mínimo t_{exp} que um modo necessita para atingir o requisito da SNR, para o máximo valor do G_{em} permitido. Para o cálculo deste valor mínimo, serão considerados os valores de $s = S/t_{exp}$ do sinal da estrela em fótons por segundo, $s_c = S_c/t_{exp}$ do céu em fótons/pix/s e $s_{ce} = S_{ce}/t_{exp}$ da corrente de escuro em e-/pix/s. Logo, a Equação 2.39 pode ser reescrita na forma

$$S = \frac{s t_{exp}}{\sqrt{s t_{exp} F_R^2 + n_p \left[(s_c + s_{ce}) t_{exp} F_R^2 + (\sigma_{ADU} G/(G_{em}))^2 \right]}}.$$
 (4.6)

Rearranjando os termos da Equação 4.6 de forma a isolar o t_{exp} ,

$$s^{2} t_{exp}^{2} - S^{2} F_{R}^{2} [s + n_{p}(s_{c} + s_{ce})] t_{exp} - S^{2} n_{p} [\sigma_{ADU} G/(G_{em})]^{2} = 0$$
(4.7)

ou, na forma

$$\mathfrak{A} \times t_{exp}^2 - \mathfrak{B} \times t_{exp} - \mathfrak{C} = 0 \tag{4.8}$$

onde $\mathfrak{A} = s^2$, $\mathfrak{B} = (\mathcal{S} F_R)^2 [s + n_p(s_c + s_{ce})]$ e $\mathfrak{C} = \mathcal{S}^2 n_p [\sigma_{ADU} G/(G_{em})]^2$. A Equação 4.7 é uma equação de segundo grau e o t_{exp} mínimo será a raiz da equação de menor valor não negativo. Dessa forma, para cada MOP será calculado o t_{exp} mínimo que o modo necessita para atingir a SNR fornecida. O MOP ótimo será determinado calculando-se a FA para cada modo, dado o t_{exp} mínimo obtido.

Modo 3: neste modo, são otimizadas a SNR a FA ao mesmo tempo. Inicialmente, são determinados os modos de operação que atendem tanto à SNR, quanto à FA. A lista resultante é utilizada para a implementação do espaço de estados do MOB. Então, são calculados os valores máximos S^M e \mathcal{F}^M e mínimos S^m e \mathcal{F}^m da SNR e da FA, respectivamente, para a normalização destes valores dentro do intervalo de 0 a 1. A função f(SNR,FA) a ser otimizada é dada pela multiplicação dos valores normalizados da SNR e da frequência de aquisição \mathcal{F} obtidos para cada MOP, na forma

$$f = \frac{S - S^m}{S^M - S^m} \times \frac{\mathcal{F} - \mathcal{F}^m}{\mathcal{F}^M - \mathcal{F}^m}.$$
(4.9)

O MOP ótimo do CCD será dado pelo conjunto de parâmetros obtidos pelo MOB que otimizam a função objetiva dada pela Equação 4.9.

A Figura 16 apresenta um exemplo da execução do MOB para a otimização do modo de operação do CCD. Nesta imagem, é apresentado o gráfico da resposta da função objetiva para as iterações do MOB ao longo do t_{exp} e do G_{em} . Este gráfico foi obtido executando-se o MOB sobre a imagem de uma estrela artificial, gerada pelo simulador que será apresentado na Seção 4.1. O modo de operação utilizado para gerar a imagem foi Convencional, HSS = 1 MHz, PA = 1, Bin = 1 pixel, $G_{em} = 1$ e $t_{exp} = 20$ s. Foram utilizados os valores de FA e SNR mínimos de 0,05 fps e 100, respectivamente. Foi utilizado um número de 500 iterações para o MOB e um raio máximo para a estrela de 20 pixels. No gráfico, pode-se notar um conjunto de pontos alinhados para um $G_{em} = 1$, obtidos pela avaliação da função para o modo Convencional do CCD. O regime de pontos dentro do intervalo de t_{exp} de 0 s a 1 s é dado pela limitação do t_{exp} utilizado pelos modos EM, de forma a atender ao requisito de uso de 100 fótons/pix.



Figura 16 – Exemplo da execução do Método de Otimização Bayesiano para a otimização do modo de operação do CCD. No gráfico, são apresentados os conjuntos de pontos para os valores de HSS 0,1 MHz (amarelo), 1 MHz (roxo), 10 MHz (verde), 20 MHz (vermelho) e 30 MHz (azul).

4.1 Simulador de imagens artificias

Para a realização de testes do método de otimização, foi desenvolvido um simulador que gera imagens artificias de uma estrela, reproduzindo as imagens que seriam adquiridas pelo CCD. Para tanto, é utilizada uma distribuição gaussiana 2D implementada pela biblioteca *Python Astropy* (Price-Whelan et al., 2018) como função de propagação puntiforme da estrela:

$$f_p(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) = \mathcal{A}e^{-a(\mathcal{X} - \mathcal{X}_0)^2 - b(\mathcal{X} - \mathcal{X}_0) \times (\mathcal{Y} - \mathcal{Y}_0) - c(\mathcal{Y} - \mathcal{Y}_0)^2},$$
(4.10)

onde

$$a = \frac{\cos(\Theta)^2}{2\delta_x^2} + \frac{\sin(\Theta)^2}{2\delta_y^2},\tag{4.11}$$

$$b = \frac{\sin(2\Theta)^2}{2\delta_x^2} - \frac{\sin(2\Theta)^2}{2\delta_y^2},$$
 (4.12)

$$c = \frac{\sin(\Theta)^2}{2\delta_x^2} + \frac{\cos(\Theta)^2}{2\delta_y^2}.$$
(4.13)

 $f_p(\mathcal{X}, \mathcal{Y})$ é a intensidade da estrela em ADU, \mathcal{A} representa a amplitude máxima em ADU, $\mathcal{X} \in \mathcal{Y}$ são as coordenadas em pixels ao longo da imagem, $\mathcal{X}_0 \in \mathcal{Y}_0$ são as coordenadas em pixels do centro da estrela; $\delta_x \in \delta_y$ são os desvios padrões da gaussiana nas direções $\mathcal{X} \in \mathcal{Y}$, respectivamente; Θ é o ângulo de rotação da gaussiana em radianos. As imagens criadas pelo simulador possuem um tamanho de 200 x 200 pixels, a coordenada ($\mathcal{X}_0, \mathcal{Y}_0$) do centro da estrela foi configurada para (100,100), foram utilizados os valores $\delta_x = \delta_y = 3/Bin$ pixels e $\Theta = 0$ rad. A amplitude máxima \mathcal{A} para o respectivo modo da imagem a ser gerada foi calculada pela fórmula

$$\mathcal{A} = \frac{\beta \times t_{exp} \times G_{em} \times B_{in}^2}{G},\tag{4.14}$$

onde β simula um fluxo de luz constante que incide sobre a imagem e B_{in} é o valor de binagem dos pixels. Em termos práticos, foi utilizado o valor $\beta = 2000$ fótons/s. Sobre a imagem da estrela, foi somada uma imagem com uma distribuição de contagens dada por um nível de fundo C_f , em ADU, somado a um ruído N_p gaussiano, em ADU/pixel. O nível de fundo é obtido pela relação

$$C_f = B + (S_{ce} + S_c) \times t_{exp} \times G_{em} \times B_{in}^2 / G.$$

$$(4.15)$$

O ruído da imagem é dado pela relação

$$N_p = \sqrt{(S_c + S_{ce}) \times F_R^2 \times G_{em}^2 \times B_{in}^2 + (\sigma_{ADU} \times G)^2}.$$
(4.16)

Os valores de S_{ce} , G_{em} , σ_{ADU} , B_{in} e G são obtidos em função do MOP do CCD; o valor de B, em ADU, pode ser obtido através de uma imagem de bias; o valor de S_c , dado o t_{exp} , é obtido segundo a medida de fluxo do céu para a imagem do HATS-24b, que vale 12,30 fótons/pix/s. A Figura 17 apresenta um exemplo de uma estrela artificial gerada através do simulador.



Figura 17 – Imagem de uma estrela artificial gerada através do simulador. O modo utilizado para gerar a imagem foi Convencional, $G_{em} = 1$, HSS = 1 MHz, PA = 1, Bin = 1 pixel e $t_{exp} = 20$ s.

5 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos no uso do método de otimização para determinação do modo de operação ótimo dos CCDs. A Seção 5.1 apresenta os testes de validação do funcionamento do método. A Seção 5.2 apresenta o uso do método para a otimização do modo de operação dos CCDs utilizados em noites de observação realizadas no Observatório Pico dos Dias (OPD). Para todos os resultados apresentados, a temperatura do CCD foi fixada em -60 °C. Verificou-se, durante os ensaios, instabilidades no uso de menores valores de temperatura.

Com o intuito de facilitar a representação dos modos de operação (MOPs) do CCD, foi criada uma codificação para cada um dos parâmetros de controle utilizados pelo *software*. Esta representação pode ser vista na Tabela 6. Dessa forma, um MOP pode ser representado por uma sequência de 5 dígitos. Estes dígitos serão organizados seguindo a mesma ordem dos parâmetros apresentados pela tabela. Logo, a sequência 11111 representa o MOP do CCD Convencional, HSS = 0,1 MHz, PA = 1, Bin = 1 pixel e SI = 256 pixels. Contudo, para as imagens geradas através do simulador, foi utilizada uma sequência de 4 dígitos, omitindo o parâmetro de SI, uma vez que estas imagens possuem um tamanho fixo de 200 x 200 pixels.

Parâmetro	Unidade	Codificação					
		1	2	3	4	5	6
Modo EM		Conv	EM				
HSS	(MHz)	0,1	1	3	10	20	30
Pré-amplificação		1	2				
Binagem	(pixels)	1	2				
Sub-imagem	(pixels)	256	512	1024			

Tabela 6 – Codificação utilizada para representar os parâmetros de controle do CCD.

5.1 Testes do método de otimização

Esta seção apresenta os testes realizados para a validação do funcionamento do método de otimização. Estes testes avaliam a convergência para o MOP ótimo, a validade do MOP ótimo encontrado e a performance do MOP ótimo obtido em relação a uma performance média do CCD. Todos estes testes foram realizados para os modos de otimização (MOTs) 1, 2 e 3. Além disso, foram realizados testes para avaliar a exatidão do cálculo da SNR.

5.1.1 Convergência

Neste teste, o intuito é verificar se o método converge para o mesmo MOP ótimo do CCD, utilizando uma série de pré-imagens com diferentes configurações, para uma fonte de luz constante. Esta série de imagens foi gerada através do simulador apresentado da Seção 4.1. Executou-se o método de otimização para cada imagem da série, utilizando os valores mínimos para FA e SNR iguais a 2 fps e 100, respectivamente; a quantidade de iterações do MOB foi de 170 e o valor máximo para o raio de estrela foi de 20 pixels. Os MOPs utilizados e a resposta da função objetiva obtidos para cada MOT são apresentados na Tabela 7. Para cada MOT, o modo ótimo obtido foi o mesmo para todas as imagens da série. A Tabela 8 apresenta estes modos ótimos obtidos, assim como o valor médio da função objetiva para os respectivos casos apresentados na Tabela 7. Dessa forma, pode-se demonstrar o método converge para o mesmo modo ótimo para uma série de imagens com diferentes MOPs que possuam uma mesma fonte de luz.

Tabela 7 – Valores ótimos obtidos para a execução do método de otimização para otimização da SNR, FA e SNR × FA, para uma série de imagens geradas com diferentes modos de operação.

MOP	t_{exp}	G_{em}	SNR	FA	$SNR \times FA$
	(s)			(fps)	
1111	20	1	207,69	6,77	0,15
1211	15	1	$207,\!63$	6,77	$0,\!15$
1211	20	1	207,72	6,78	$0,\!15$
1211	30	1	$207,\!63$	6,77	$0,\!15$
1212	20	1	$207,\!53$	6,76	$0,\!15$
1221	20	1	$207,\!62$	6,77	$0,\!15$
2211	20	2	207,76	6,78	$0,\!15$
2211	20	5	$207,\!56$	6,77	$0,\!15$
2211	20	10	$207,\!62$	6,77	$0,\!15$
2211	20	15	$207,\!62$	6,77	$0,\!15$
2211	20	20	207,75	6,78	$0,\!15$
2411	20	2	$207,\!62$	6,77	$0,\!15$
2511	20	2	$207,\!45$	6,76	$0,\!15$
2611	20	2	207,79	6,78	$0,\!15$

Tabela 8 – Modos ótimos de operação do CCD obtidos através da execução do método para uma série de imagens com diferentes modos de operação, para cada um dos modos de otimização. São apresentados, também, os valores médios da função objetiva, calculados para o conjunto de valores da Tabela 7.

MOT	MOP	t_{exp}	G_{em}	Função Objetiva
		(s)		
1	12222	$0,\!5$	1	$207{,}64 \pm 0{,}07$
2	12221	$0,\!1477\pm0,\!0001$	1	$6,771 \pm 0,004$
3	12221	$0,\!1481 \pm 0,\!0001$	1	$0,\!15241\pm0,\!00004$

5.1.2 Validação do modo ótimo

Este teste tem como objetivo verificar se o modo ótimo retornado pelo método de otimização é realmente o máximo global. Para tanto, foi gerada uma imagem inicial (pré-imagem) através do simulador com o MOP 2211, $t_{exp} = 1$ s e $G_{em} = 20$. Sobre esta imagem foi executado o método de otimização. Os valores mínimos de FA e SNR utilizados foram 2 fps e 100, respectivamente. Utilizou-se um número de 170 iterações para execução do MOB e um raio máximo da estrela de 20 pixels. A Tabela 9 apresenta o modo ótimo obtido para cada MOT. Para validação do MOT 1, gerou-se uma imagem utilizando o modo ótimo. A SNR calculada para esta imagem foi 207,89. Além disso, foi gerada uma série de imagens com todos os modos do CCD que atendem ao requisito da FA, utilizando os valores máximos de t_{exp} e G_{em} permitidos. Para cada imagem da série foi calculada a SNR. Para validação do MOT 2, foi calculada a FA máxima para todos os modos que atendem ao requisito da SNR, para o mínimo t_{exp} . Para validação do MOT 3, realizou-se 500 iterações sobre a função objetiva para todos os modos que atendem aos requisitos da FA e da SNR, para valores aleatórios de t_{exp} e G_{em} . As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam os modos do CCD para os 10 maiores valores obtidos para os MOTs 1, 2 e 3, respectivamente. Nenhum dos modos apresentados nas tabelas obteve maior resultado que o respectivo modo ótimo. Para o MOT 2, foram encontrados três modos com SI diferentes que retornaram a mesma FA. Desta forma, o modo ótimo selecionado pelo método foi para o maior SI permitido. A Figura 18 apresenta o gráfico do resultado das iterações do MOB em função do t_{exp} , do G_{em} e do HSS. Pelo gráfico, pode-se perceber que existe um ponto de máximo para um HSS = 1 MHz.

Tabela 9 – Modos ótimos de operação do CCD obtidos através da execução do método sobre uma pré-imagem gerada com o modo de operação 2211 para cada um dos modos de otimização.

MOT	MOP	t_{exp}	G_{em}	Função Objetiva
		(s)		
1	12211	0,50	1	207,89
2	12221	$0,\!15$	1	6,78
3	12221	$0,\!25$	1	$0,\!152$

5.1.3 Performance da otimização

Este teste busca avaliar a performance do método de otimização em relação a performance média obtida pela avaliação da função objetiva sobre todo o espaço de estados, para os três casos de otimização. Inicialmente, foi gerada uma série de imagens com o MOP 1211, variando-se a intensidade do fluxo de luz no intervalo $\beta = 2000$ fótons/s a $\beta = 3000$ fótons/s, com passo de 100 fótons/s. Para cada imagem, foi executado o método de otimização. Os valores de FA e SNR mínimos utilizados foram 0,05 fps e 100,

Tabela 10 – 10 maiores valores obtidos para a SNR para uma série de imagens com todos modos de operação que atendem ao requisito da FA mínima. Os valores de $G_{em} e t_{exp}$ foram fixados em 300 (para os modos EM) e 0,5 s, respectivamente.

MOP	texp	G_{em}	SNR
		(s)	
12123	0,5	1	194,84
12213	0,5	1	$179,\!87$
12113	0,5	1	$156,\!92$
26123	0,5	300	$156,\!63$
24123	0,5	300	$156,\!58$
22113	0,5	300	$156,\!56$
24213	0,5	300	$156{,}53$
26223	0,5	300	$156,\!50$
25223	0,5	300	$156,\!41$
22123	0,5	300	156, 36

Tabela 11 – 10 maiores valores obtidos para a FA para todos os modos de operação que atendem ao requisito da SNR mínima.

MOP	t_{exp}	G_{em}	\mathbf{FA}
	(s)		(fps)
12121	0,180	1	5,56
24221	0,204	300	4,91
24223	0,204	300	4,91
24222	0,204	300	4,91
25222	0,204	300	4,91
25223	0,204	300	4,91
25221	0,204	300	4,91
22221	0,204	300	4,91
22121	0,204	300	4,91
24213	0,204	300	4,91

respectivamente. Utilizou-se um raio máximo para a estrela de 20 pixels e 170 iterações para o MOB. O cálculo do valor médio da função objetiva para cada MOT foi feito para um número de 500 iterações ao longo de todos os modos de operação que atenderam ao requisito da SNR e/ou FA. A Tabela 13 apresenta o resultado do método (R_m) e o resultado do valor médio da função objetiva $(R_{médio})$ para cada MOT. É apresentada, também, a relação R, onde $R = (R_m/R_{médio} - 1) \times 100$. Pelos resultados, pode-se concluir que a performance do CCD obtida através do MOP ótimo sugerido pelo método é melhor que aquela obtida para um valor médio da função objetiva ao longo do espaço de estados permitido. Isto mostra a utilidade do método para um usuário que desconhece o funcionamento do sistema de aquisição do SPARC4. Os melhores resultados obtidos para os MOTs 1, 2 e 3 foram R = 265,21 %, R = 428,36 % e R = 164,58 %, respectivamente.

Tabela 12 – 10 maiores valores obtidos pela avaliação da função objetiva para todos os modos de operação do CCD que atendem aos requisitos da SNR e FA. Foram utilizadas 500 iterações e valores aleatórios para G_{em} e t_{exp} .

MOP	t_{exp}	G_{em}	$SNR \times FA$
	(s)		
12221	0,23	1	0,145
12222	$0,\!30$	1	$0,\!141$
12221	$0,\!30$	1	0,141
12222	$0,\!26$	1	$0,\!130$
12221	$0,\!34$	1	$0,\!120$
12222	$0,\!34$	1	$0,\!120$
12121	$0,\!29$	1	0,109
12122	$0,\!29$	1	0,109
12221	$0,\!19$	1	0,106
12121	0,32	1	0,104



Figura 18 – Gráfico da otimização da SNR × FA em função do t_{exp} e do G_{em} obtida ao longo das iterações do MOB. São apresentados os modos de HSS 1 MHz (roxo), 10 MHz (verde), 20 MHz (vermelho), e 30 MHz (azul).

5.1.4 Cálculo da SNR

Este teste tem como objetivo avaliar a exatidão do valor da SNR calculado pelo método através de uma pré-imagem. Para tanto, calculou-se o valor teórico da SNR segundo a Equação 2.39 para uma série de imagens geradas através do simulador. Inicialmente, calculou-se o raio e o número de pixels da estrela para cada imagem da série segundo o critério da FWHM, como apresentado na Seção 2.2.3. O sinal teórico da estrela S foi obtido através da soma dos valores das coordenadas (\mathcal{X}, \mathcal{Y}) dentro do raio da estrela, dados pela Equação 4.10. Os valores de $S_{ce}, \sigma_{ADU}, G, G_{em}$ e B_{in} foram obtidos em função do

Tabela 13 – Valores da função objetiva para cada modo de otimização, para uma série de imagens com diferentes fluxos luminosos incidentes. São apresentados os resultados obtidos pelo método de otimização (R_m) e para a média da função objetiva $(R_{médio})$ ao longo do espaço de estados para 500 iterações. É apresentado o valor de R, em %, da relação entre o resultado do método e da média da função objetiva, na forma $R = (R_m/R_{médio} - 1) \times 100$.

β	SN	R	R	FA	(fps)	R	SNR	\times FA	R
(fótons/s)	R_m	$R_{m\acute{e}dio}$	(%)	R_m	$R_{m\acute{e}dio}$	(%)	R_m	$R_{m\acute{e}dio}$	(%)
2000	1394,87	401,80	247,16	6,77	1,31	417,68	0,024	0,010	145,38
2100	$1433,\!80$	$415,\!99$	$244,\!67$	$6,\!82$	$1,\!29$	$428,\!36$	0,025	$0,\!010$	151,71
2200	$1472,\!33$	$433,\!38$	239,73	$6,\!94$	$1,\!43$	$386,\!30$	$0,\!025$	$0,\!010$	$154,\!29$
2300	$1509,\!49$	$434,\!57$	$247,\!35$	$7,\!05$	$1,\!42$	$395,\!38$	$0,\!025$	$0,\!010$	$151,\!10$
2400	$1546,\!15$	$442,\!23$	$249,\!62$	$7,\!10$	$1,\!45$	$388,\!17$	$0,\!025$	$0,\!010$	$155,\!88$
2500	$1581,\!93$	$464,\!03$	$240,\!91$	$7,\!13$	$1,\!42$	403, 16	0,026	$0,\!010$	$151,\!90$
2600	$1616,\!39$	$471,\!99$	$242,\!47$	$7,\!15$	$1,\!55$	$361,\!21$	0,026	$0,\!010$	$155,\!14$
2700	$1650,\!84$	$469,\!90$	$251,\!32$	$7,\!17$	1,70	$323,\!22$	0,027	$0,\!010$	$159,\!83$
2800	1684, 14	461, 14	$265,\!21$	$7,\!19$	$1,\!65$	$335,\!01$	0,027	0,011	$154,\!65$
2900	$1717,\!01$	$489,\!35$	$250,\!87$	$7,\!42$	1,70	$335,\!61$	0,027	0,011	$155,\!68$
3000	1749,44	$503,\!10$	247,73	7,70	1,70	353,87	0,027	0,010	$164,\!58$

MOP do CCD. Foi utilizado o mesmo valor de S_c apresentado na Seção 4.1. A Tabela 14 apresenta os MOPs do CCD utilizados para gerar a série de imagens, os valores teóricos obtidos e os valores calculados através do método. Dessa forma, pode-se concluir que o modelo utilizado para o cálculo da SNR é capaz de reproduzir o valor da SNR que seria obtido ao adquirir-se uma imagem de uma estrela com a mesma configuração do CCD. O maior erro obtido entre o valor calculado e o teórico foi de 1,05 %.

5.2 Otimização das noites de observação

Esta seção apresenta o uso do método na otimização da performance do CCD para determinadas noites de observação realizadas no OPD. Foram analisadas noites no período de abril de 2017 a abril de 2018, respeitando o tempo de 2 anos de direitos autorais do proprietário sobre as imagens (Bruch, 2001). Foram selecionadas noites em que a observação foi realizada no telescópio 1,6 m Perkin-Elmer, com o uso de uma câmera iXon EMCCD e com a aquisição de séries temporais de fotometria. Foram desconsideradas todas as observações de objetos extensos como galáxias, nebulosas ou aglomerados. A Tabela 15 apresenta as informações relevantes de todas as noites selecionadas. Os objetos de cada noite foram encontrados através do banco de dados astronômico *SIMBAD* (Wenger et al., 2000). O tempo de observação de cada noite foi obtido pelo intervalo de tempo entre a primeira e a última imagem da série. A soma do tempo de observação de todas as noites selecionadas noite 03-06-2017 são ocultações estelares. Como não se tem certeza de qual das estrelas do campo foi utilizada

Tabela 14 – Comparação dos valores da SNR teóricos e calculados pelo método de otimização para uma série de imagens geradas através do simulador com diferentes modos de operação. É apresentado o modo de operação de cada imagem, os valores da SNR obtidos por cada modo e o erro da SNR calculada em relação à teórica.

MOP	t_{exp}	G_{em}	SNI	Erro	
	(s)		Calculado	Teórico	(%)
1211	20	1	$1377,\!64$	1377,99	0,03
1212	20	1	$1389,\!65$	$1393,\!86$	$0,\!30$
1221	20	1	1386, 32	1385, 26	-0,08
1222	20	1	$1392,\!82$	$1394,\!48$	$0,\!12$
2211	1	20	220,20	$219,\!80$	-0,18
2212	1	20	$220,\!58$	$220,\!95$	$0,\!17$
2221	1	20	$221,\!57$	220,74	-0,38
2222	1	20	$221,\!32$	$221,\!22$	-0,05
2222	1	25	221,07	$221,\!22$	$0,\!07$
2411	1	20	$210,\!52$	$210,\!18$	-0,16
2511	1	20	$187,\!07$	188,01	$0,\!50$
2611	1	20	$147,\!02$	$148,\!56$	$1,\!05$

para a observação, escolheu-se a estrela com menor magnitude para ser otimizada. O valor da SNR apresentado pela Tabela 15 representa a média para os 10 maiores valores obtidos para a série de imagens. O valor da FA de cada noite foi calculado pelo tempo de observação dividido pelo número de exposições.

Para cada uma das noites, foi executado o método de otimização para a imagem da série com uma SNR média, para os três MOTs. Foram utilizados os valores da SNR e FA apresentados pela Tabela 15 como os valores mínimos. Os valores permitidos para os parâmetros Bin e SI foram os mesmos utilizados pelo usuário na observação. Foram utilizadas 170 iterações para o MOB. As Tabelas 16 a 18 apresentam os resultados obtidos para a otimização, da SNR, da FA e da SNR × FA, respectivamente. As Tabelas 16 e 17 apresentam a relação \mathcal{R} entre o valor da função objetiva obtido pelo método e o valor obtido pelo usuário. A Tabela 18 apresenta ambos os valores da SNR e da FA, assim como suas respectivas relações R_{SNR} e R_{FA} com os valores obtidos pelo usuário. O valor da FA apresentado pelas tabelas leva em consideração o tempo morto entre cubos de imagens proporcionado pelo sistema de aquisição apresentado na Seção 3. Este tempo morto equivale à 980 ms para cada cubo de 70 imagens. Dessa forma, foi calculado o tempo de observação necessário para adquirir cada série de imagens utilizando a FA ótima obtida somada ao tempo morto entre cubos de imagens. A FA apresentada corresponde ao tempo total calculado dividido pelo número de imagens da série. Tabela 15 – Informações referentes às noites de observação no Observatório Pico dos Dias selecionadas para a execução do método de otimização. São apresentados a data da observação, o modo de operação, o Tipo de Objeto (TO) observado, o número de exposições N_e , a SNR média, a FA e o tempo de observação da série de imagens. Foi utilizada a seguinte abreviatura para o tipo de objeto: BE = Binária Eclipsante, AB = Anã Branca, E = Estrela e EX = Exoplaneta. A informação do tipo de objeto foi obtida através do SIMBAD.

Noite	MOP	t_{exp}	G_{em}	ТО	N_e	SNR	FA	Tempo obs.
(d-m-a)		(s)					(fps)	(h:m:s)
22-03-17	12213	3	1	BE	1234	$52,59 \pm 1,32$	0,076	04:32:24
23-03-17	12213	2	1	BE	1692	$34,\!57 \pm 0,\!56$	$0,\!091$	05:08:32
24-03-17	12213	2	1	BE	1319	$35,56 \pm 1,46$	$0,\!110$	03:20:35
14-04-17	11223	40	1	AB	134	$49,90 \pm 1,65$	$0,\!014$	02:41:50
15-04-17	11223	20	1	AB	414	$67,75 \pm 2,58$	0,019	06:12:58
16-04-17	22123	41	1	AB	341	$94,46 \pm 3,41$	0,019	05:00:42
03-06-17	22113	100	1	Ε	20	$3964{,}36\pm53{,}63$	$0,\!010$	00:34:43
02-07-17	22123	45	1	Ε	221	$110,\!64 \pm 8,\!90$	0,020	03:00:33
13-07-17	12113	30	1	$\mathbf{E}\mathbf{X}$	811	$1257,\!62 \pm 1,\!55$	0,032	$07{:}03{:}43$
08-08-17	12113	10	1	$\mathbf{E}\mathbf{X}$	1150	$1096{,}98 \pm 2{,}53$	$0,\!053$	06:02:19
24-11-17	13123	15	1	Ε	209	$88,76 \pm 4,34$	$0,\!056$	01:02:39
06-03-18	22123	180	1	AB	63	$63,\!84 \pm 4,\!13$	0,0035	05:00:00

Tabela 16 – Modos de operação ótimos do CCD obtidos em função da otimização da SNR das noites de observação no Observatório Pico dos Dias. A tabela apresenta o valor da SNR calculada pelo método e da relação \mathcal{R} entre as SNRs do método e do modo de operação utilizado pelo usuário.

Noite	MOP	t_{exp}	G_{em}	SNR	\mathcal{R}
(d-m-a)		(s)			(%)
22-03-17	12213	13,24	1	$131,\!57$	145,29
23-03-17	11213	$10,\!95$	1	$106,\!25$	$207,\!33$
24-03-17	12213	$9,\!12$	1	$96,\!35$	$170,\!94$
14-04-17	11223	$72,\!57$	1	$102,\!06$	$104,\!52$
15-04-17	11223	$53,\!93$	1	$168,\!28$	$148,\!37$
16-04-17	11223	$52,\!85$	1	$196,\!00$	$107,\!50$
03-06-17	11213	$103,\!67$	1	$7073,\!21$	$78,\!42$
02 - 07 - 17	11223	49,03	1	$165,\!81$	$49,\!87$
13-07-17	11213	$31,\!37$	1	$1297,\!04$	$3,\!13$
08-08-17	11213	$18,\!90$	1	$2189,\!67$	$99,\!61$
24 - 11 - 17	11223	$17,\!99$	1	$139,\!14$	56,76
06-03-18	11223	282,99	1	114,59	79,49

Com base nos dados apresentados, pode-se concluir que o método desenvolvido foi capaz de obter o modo ótimo do CCD de acordo com os requisitos científicos da SNR e da FA, para todas as noites, para os três modos de otimização. Para a otimização da SNR, Tabela 17 – Modos de operação ótimos do CCD obtidos em função da otimização da FA das noites de observação no Observatório Pico dos Dias. A tabela apresenta o valor da FA calculada pelo método e da relação \mathcal{R} entre as FAs do método e do modo de operação utilizado pelo usuário.

Noite	MOP	t_{exp}	G_{em}	FA	\mathcal{R}
(d-m-a)		(s)		(fps)	(%)
22-03-17	12213	3,11	1	0,320	324,14
23-03-17	12213	2,09	1	$0,\!475$	419,70
24-03-17	24213	$1,\!96$	300	0,506	$361,\!67$
14-04-17	11223	$17,\!43$	1	$0,\!057$	$316,\!10$
15-04-17	11223	8,79	1	0,114	$513,\!05$
16-04-17	11223	$12,\!63$	1	0,079	$318,\!09$
03 - 06 - 17	11213	$32,\!57$	1	0,031	217,79
02-07-17	11223	$21,\!84$	1	0,046	$124,\!33$
13-07-17	11213	$29,\!49$	1	0,034	$6,\!30$
08-08-17	11213	4,77	1	0,209	$295,\!26$
24 - 11 - 17	11223	$7,\!68$	1	$0,\!130$	133,78
06-03-18	11223	87,86	1	0,011	222,03

Tabela 18 – Modos de operação ótimos do CCD obtidos em função da otimização da SNR × FA das noites de observação no Observatório Pico dos Dias. São apresentados os valores da SNR e da FA calculados pelo método, assim como suas respectivas relações $R_{SNR} \in R_{FA}$ com os valores obtidos através do modo de operação utilizado pelo usuário.

Noite	MOP	t_{exp}	G_{em}	SNR	\mathbf{R}_{SNR}	FA	\mathbf{R}_{FA}
(d-m-a)		(s)			(%)	(fps)	(%)
22-03-17	12213	$5,\!89$	1	79,57	48,34	0,17	124,29
23-03-17	12213	4,33	1	57,70	$66,\!90$	$0,\!23$	152, 16
24-03-17	12213	$1,\!98$	$267,\!31$	$57,\!36$	$61,\!29$	$0,\!25$	123,72
14-04-17	11223	$32,\!89$	1	$68,\!65$	$37,\!57$	0,030	$120,\!56$
15-04-17	11223	$19,\!12$	1	100, 10	47,75	$0,\!052$	$181,\!92$
16-04-17	11223	$23,\!91$	1	$131,\!11$	$38,\!80$	0,042	120,95
03-06-17	11213	$54,\!51$	1	$5168,\!67$	30,38	0,018	87,09
02-07-17	12223	30,82	1	$133,\!81$	20,94	0,031	$53,\!45$
13-07-17	11213	30,41	1	$1277,\!04$	$1,\!54$	0,033	$3,\!10$
08-08-17	11213	8,87	1	$1498,\!36$	$36,\!59$	$0,\!11$	112,72
24 - 11 - 17	11223	$11,\!41$	1	$109,\!66$	$23,\!55$	0,088	$57,\!48$
06-03-18	12123	$150,\!18$	1	$83,\!47$	30,75	0,0067	88,42

pode-se obter uma melhora de até 207,33 % da performance do CCD para uma das noites. Neste caso, os valores do t_{exp} retornados pelo método foram maiores que aqueles utilizados pelo usuário. Isto ocorre porque o tempo morto entre cubos de imagens proporcionado pelo sistema de aquisição permite o uso de t_{exps} maiores, mantendo a mesma FA da observação. Nesta análise, pode-se observar o uso de diferentes MOPs em algumas observações, em contraposição de um mesmo modo retornado pelo método. Isto mostra como cada usuário utiliza critérios diferentes na escolha de um modo. Verificou-se em alguns casos o uso do modo EM, sem a amplificação do sinal através do G_{em} . Isto resulta no uso de um MOP de maior ruído sem a vantagem da amplificação do sinal permitido pelo modo. Verificou-se, também, em diversos casos o uso de um t_{exp} que permitia a aquisição de imagens com um HSS menor (portanto, de menor ruído), sem perda na FA. Para o caso da otimização da FA, obteve-se uma melhora de performance em relação ao MOP do usuário de até 513,05 % para um dos casos. Verificou-se que diversos modos sugeridos pelo método possuem um HSS menor, apesar de apresentar uma FA maior. Isto ocorre pelo fato de que uma HSS maior resulta num ruído de leitura maior, exigindo um t_{exp} maior, para se obter a mesma SNR sugerido pelo método. Uma sugestão para a utilização das câmeras seria o usuário considerar utilizar um Bin = 2 pixels, sempre que possível. Esta opção melhora tanto a SNR, quanto a FA e permite a utilização de HSSs com menores taxas de leitura. Para a otimização da SNR e da FA, foi possível a melhora de ambos os parâmetros ao mesmo tempo para todas as noites. Nesta análise, obteve-se uma melhora de até 66,90 % na SNR e de 181,92 % da FA.

5.2.1 Análise dos resultados

Analisou-se a Economia de Tempo (ET) de uso do telescópio que seria obtida utilizando-se o modo ótimo sugerido pelo método, para cada um dos casos de otimização apresentados. Esta análise foi divida na melhoria na SNR e na melhoria da FA. Para o caso da SNR, calculou-se o t_{exp} necessário para que uma imagem adquirida com o modo do usuário obtivesse a mesma SNR do modo ótimo. O valor do t_{exp} mínimo foi obtido através da Equação 4.7. Os valores do fluxo da estrela e do céu utilizados atendem à SNR média apresentada na Tabela 15. Dessa forma, a ET foi obtida multiplicando-se a diferença de t_{exp} entre os dois casos pelo número de exposições (N_e) realizadas na noite de observação. A análise da ET para o caso da FA pode ser feita de forma mais direta. Os valores ótimos apresentados pela Tabela 17 representam a maior FA permitida, mantendose a SNR constante. Logo, a ET do telescópio pode ser calculada através da diferença do tempo de observação dada pelas FAs ótima e do usuário, para o número de imagens N_e da série. O resultado desta operação é apresentados na Tabela 19. Os t_{exps} referentes aos MOTs 1 e 3 representam o tempo necessário para que o respectivo modo alcance a mesma SNR do modo ótimo. Para o caso do MOT 3, foram somadas as ETs referentes a diferença de tempo devido à maior FA e o tempo que o modo do usuário precisaria para atingir a mesma SNR. No final da tabela, são apresentadas as porcentagens de tempo totais que seria economizada em cada MOT caso estas observações fossem feitas com o auxílio do método de otimização dos CCDs. A Figura 19 apresenta um gráfico de barras da economia de tempo de telescópio obtida ao longo das noites.

Com base nos dados apresentados na Tabela 19, verificou-se uma ET para os

Tabela 19 – Análise da economia de tempo de telescópio obtido pelos modos ótimos sugeridos pelo método em relação aos modos do usuário. São apresentados os t_{exps} para os modos de otimização 1 e 3 necessários para que a imagem adquirida com o modo do usuário atinja a mesma SNR obtida pelo método. A economia de tempo do modo de otimização 3 representa a soma do tempo economizado com relação à melhoria da FA e da SNR ao mesmo tempo. No fim da tabela é apresentada a relação entre a soma do tempo economizado e o tempo total de observação de todas as noites para cada modo de otimização.

	Modo 1		Modo 2	Modo 3	
Noite	t_{exp}	TE	TE	t_{exp}	TE
(d-m-a)	(s)	(%)	(%)	(s)	(%)
22-03-17	13,76	81,25	76,41	5,75	76,17
23-03-17	$11,\!50$	$86,\!86$	80,76	$4,\!19$	80,32
24 - 03 - 17	8,91	75,76	$78,\!34$	$3,\!92$	$76,\!31$
14-04-17	$150,\!54$	$152,\!55$	75,79	$71,\!36$	$97,\!89$
15-04-17	$110,\!15$	166,78	83,77	$40,\!80$	103, 11
16-04-17	$128,\!17$	164,76	$76,\!08$	$67,\!12$	$104,\!15$
03-06-17	$251,\!41$	$145,\!35$	69,03	$150,\!48$	$95,\!13$
02 - 07 - 17	$98,\!62$	$109,\!38$	$55,\!65$	$64,\!63$	$74,\!86$
13-07-17	$31,\!87$	$5,\!96$	$6,\!18$	30,91	$5,\!95$
08-08-17	$18,\!94$	$47,\!28$	$74,\!69$	18, 19	$96,\!33$
24 - 11 - 17	27,26	$68,\!18$	$57,\!23$	$19,\!43$	$61,\!13$
06-03-18	$564,\!57$	$134,\!60$	68, 18	300, 38	$89,\!89$
TE total		97,17	65,08		77,66



Figura 19 – Gráfico de barras da economia de tempo de telescópio ao longo das noites de observação selecionadas. São apresentados os resultados obtidos para a otimização da SNR (azul), FA (laranja) e SNR x FA (verde).

três MOTs. Para o MOT 1, seria necessário um tempo 97,17 % (48:16:38 h) maior para alcançar a mesma SNR obtida pelo método para todas as noites, mantendo o mesmo

modo de operação. O uso deste MOT poderia melhorar a qualidade dos dados adquiridos em observações para cada uma das noites analisadas. Para o MOT 2, a ET poderia ter sido de 65,08 % (32:19:56 h), caso fosse utilizado o modo de maior FA, mantendo a SNR. Logo, o uso deste MOT permitiria a aquisição do mesmo número de exposições realizadas pelo usuário em um menor tempo de observação, permitindo que mais projetos pudessem ser alocados no OPD. Para o MOT 3, a ET seria de 77,66 % (38:34:57 h) caso ambos os parâmetros fossem otimizados ao mesmo tempo. Logo, a aquisição das imagens poderia ser feita com melhor qualidade e em um menor tempo.

Foram calculadas as curvas da SNR ao longo do t_{exp} para cada uma das noites, para os modos de operação obtidos através dos três MOTs e para o modo do usuário. Foram utilizados os mesmos valores de fluxo da estrela, do céu e número de pixels usados na obtenção dos modos ótimos. As Figuras 20 a 22 apresentam as curvas obtidas para as noites 22-03-17 a 24-03-17. São apresentadas as curvas do perfil da SNR dos MOPs ótimos para os MOTs 1 (vermelho), 2 (verde), 3 (preto) e para o modo do usuário (azul). Além disso, é apresentado um *zoom* da região em torno do modo do usuário. Pelas Figuras 20 e 21 pode-se perceber como o t_{exp} do modo ótimo da FA foi maior que o t_{exp} do usuário, apesar de proporcionar uma maior taxa de aquisição devido ao mínimo tempo morto do sistema de aquisição desenvolvido. A Figura 22 apresenta um caso onde o MOP do usuário obteve melhor desempenho que o modo ótimo. Isto ocorreu por causa do erro associado à medida do ruído de leitura do CCD utilizado na caracterização. Contudo, este problema pôde ser contornado pelo maior t_{exp} permitido pelo método devido ao uso do sistema de aquisição. As Figuras 23 a 31 apresentam as curvas obtidas para as noites 14-04-17 a 18-06-18. Como o modo de operação ótimo obtido foi o mesmo para todos os modos de otimização, este modo foi representado em vermelho e o modo do usuário em azul. Sobre as curvas, são apresentados os pontos do t_{exp} dos modos ótimos e para o modo do usuário. Nestas figuras, é possível ver a diferença da SNR proporcionada por cada modo. Além disso, pode-se ver como um modo com menor t_{exp} é capaz de manter a mesma SNR do usuário.



Figura 20 – Curvas da SNR ao longo do tempo de exposição para os modos de operação ótimos obtidos pelos modos de otimização 1 (vermelho), 2 (verde), 3 (preto) e o modo utilizado pelo usuário (azul) da noite 22-03-17. Sobre as curvas, são apresentados os pontos dos tempos de exposição para cada um dos modos anteriormente citados, respectivamente. No canto inferior direito, é apresentado um zoom da região em torno do modo do usuário.



Figura 21 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 23-03-17.

Calculou-se a FA permitida pelos CCDs para diferentes valores de magnitude de uma estrela, através do método de otimização. Para cada magnitude, o fluxo de fótons da estrela foi obtido através da Equação 4.2. A magnitude e fluxo de fótons utilizados como referência para a equação foram os mesmos apresentados na Seção 4 para uma imagem da estrela HATS24-b, obtida com o uso de um filtro de banda I. Foram utilizados valores de magnitude para o intervalo 5 a 20. Este procedimento foi realizado para os valores de SNR 1, 10, 100 e 1000. A execução do método de otimização foi realizada para dois grupos de modos de operação: (1) SI = (256,512) pixels e Bin = 2 pixels e (2) SI = 1024 pixels e Bin = 1 pixel. A Figura 32 apresenta o gráfico do resultado obtido. As linhas cheias representam os valores máximos da FA obtidos para o grupo 1; as linhas tracejadas representam os valores máximos obtidos para o grupo 2. O gráfico apresenta uma região com FA = 189,14 fps, que é a maior FA permitida pelo sistema de aquisição



Figura 22 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 24-03-17. Neste caso, o modo do usuário apresentou melhor performance do que o modo ótimo sugerido para a SNR e para a SNR × FA. Contudo, este problema pode ser contornado pelo fato do sistema de aquisição permitir o uso de um maior t_{exp} , mantendo-se a mesma frequência de aquisição.



Figura 23 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 14-04-17.



Figura 24 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 15-04-17.



Figura 25 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 16-04-17.



Figura 26 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 03-06-17.



Figura 27 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 02-07-17.

do SPARC4. Para um mesmo valor de SNR, existe uma magnitude à partir da qual a FA do grupo 1 se iguala a FA do grupo 2, sendo indiferente o uso de modos de menor resolução espacial para se obter maiores FAs. Isto ocorre quando o t_{exp} exigido para manter a SNR é maior que o tempo crítico de leitura de uma imagem *full-frame*. Este resultado


Figura 28 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 13-07-17.



Figura 29 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 08-08-17.



Figura 30 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 24-11-17.

apresenta uma estimativa das possibilidades científicas que os CCDs do SPARC4 são capazes de cobrir. Contudo, deve ser levado em conta que estes cálculos foram feitos para a magnitude de uma estrela na banda I. Ainda sugere-se o uso de uma pré-imagem do objeto a ser observado para o cálculo da real performance do CCD.



Figura 31 – Mesmo gráfico da Figura 20, para a noite 06-03-18.



Figura 32 – Gráfico da frequência de aquisição do CCD ao longo da magnitude de uma estrela. São apresentadas as curvas obtidas fixando-se a SNR em 1 (azul), 10 (vermelho), 100 (verde), 1000 (preto). As linhas cheias representam os valores máximos para a FA obtidos para os modos de sub-imagem = (256,512) pixels e binagem = 2 pixels; as linhas tracejadas representam a máxima FA obtida para os modos de sub-imagem = 1024 pixels e binagem = 1 pixel.

No Apêndice A são apresentados os principais temas de pesquisa em que cada um dos usuários das noites selecionadas atua. Tais temas são possíveis candidatos para a utilização do SPARC4. Estes temas são: anãs brancas, variáveis cataclísmicas, trânsitos estelares e ocultações estelares. Observações de objetos como anãs brancas e variáveis cataclísmicas necessitam de uma alta sensibilidade do CCD para permitir a aquisição adequada de imagens. Os temas de trânsito e ocultações estelares requerem não apenas sensibilidade do CCD, como também, uma FA alta o suficiente para permitir uma amostragem adequada. Para ambos os casos, o uso do método de otimização pode ser uma ferramenta útil no auxílio da escolha do MOP dos CCDs, contribuindo com a aquisição de medidas fotométricas com uma performance ótima.

Dentre as noites de observação selecionadas para a aplicação do *software* de otimização, não foi encontrada uma onde necessitou-se de alta sensibilidade e FA. Isto pode ocorrer devido a falta de demanda de aplicações científicas que utilizam dos instrumentos do OPD para tal fim. Contudo, o projeto do SPARC4 foi realizado de forma a proporcionar suporte não apenas para os casos estudados neste projeto, como também, para estes casos que exigem alta sensibilidade e FA (Rodrigues et al., 2012a). Dessa forma, o uso do método de otimização torna-se ainda mais indicado como uma ferramenta de auxílio ao usuário para o uso adequado das câmeras em tais condições, colaborando com o uso do observatório para a produção de ciências para as quais antes não era utilizado.

Um exemplo de um caso com aquisição de imagens com as condições descritas anteriormente foi encontrado no reporte disponibilizado na revista LNA em Dia - número 52. Neste reporte é apresentada uma adaptação em um dos instrumentos do telescópio 1,6 m Perkin-Elmer para a observação de imagens interferométricas *speckle* de estrelas binárias (Guerrero et al., 2018). Na ausência da atmosfera, a função de espalhamento puntiforme (FEP) da estrela seria radialmente simétrica, com um núcleo central e uma sucessão de anéis concêntricos. Contudo, a turbulência atmosférica deforma a frente de onda, alterando a posição de objetos astronômicos e alargando a FEP. Isto ocorre principalmente para exposições com $t_{exp} > 1$ s. O sinal resultante deste processo produz o chamado disco de *seeing*. Logo, para o caso de estrelas binárias, necessita-se que a distância que separa as duas estrelas seja maior que o tamanho dos discos de *seeing*. A técnica de interferometria *speckle* baseia-se na aquisição de imagens com uma FA em torno de 50 fps de forma a minimizar a interferência atmosférica na FEP da estrela (Peña, 2020). Dessa forma, este tipo de imageamento é um possível candidato de uso para o SPARC4, o qual permite a aquisição de imagens com até 189,14 fps.

Para todos os casos citados até aqui, é recomendado o uso do método de otimização dos MOPs dos CCD como uma ferramenta de auxílio aos usuários do instrumento SPARC4. A aquisição de uma pré-imagem do objeto é sugerida como mais adequada em relação ao cálculo da intensidade do fluxo de luz pela magnitude da estrela. Isto ocorre porque a pré-imagem é capaz de levar em conta o fluxo de luz real medido pelo CCD em uma determinada noite, incluindo efeitos da absorção atmosférica e do próprio instrumento. Não foram testados outros métodos de otimização além do MOB. Contudo, este método foi capaz de atender às necessidade do presente projeto.

6 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um método teórico de otimização da SNR e da FA dos CCDs do SPARC4. Para tanto, foi desenvolvido um código em linguagem *Python*. Este código permite calcular o fluxo de luz proveniente da estrela através do método da pré-imagem ou da magnitude do objeto. Com base nesta informação, são utilizadas duas bibliotecas para o cálculo da SNR e da FA dos CCDs que, por sua vez, utilizam uma série de caracterizações do ruído e da FA realizadas para uma das câmeras, em função do modo de operação. A aquisição de imagens para as caracterizações foi feita através de uma interface em Labview desenvolvida para o controle do sistema de aquisição do SPARC4. São disponibilizados três MOTs: otimização da SNR, da FA e de ambos os parâmetros ao mesmo tempo. O MOT da SNR retorna qual o modo de maior SNR que atende ao requisito da FA; o MOT da FA retorna o modo de maior FA que atende ao requisito da SNR; o MOT de ambos os parâmetros seleciona os modos que atendem aos dois critérios ao mesmo tempo, passando a lista resultante para a execução do MOB. A função objetiva utilizada neste caso é dada pela multiplicação dos dois parâmetros normalizados para um intervalo entre 0 e 1 através de seus respectivos valores máximo e mínimo.

O funcionamento do método de otimização foi testado de acordo com diversos critérios. Para a realização destes testes, foi desenvolvida uma biblioteca em linguagem *Python* que simula a aquisição de imagens de uma estrela em função do MOP do CCD. Verificou-se que o método é capaz de retornar o mesmo MOP ótimo para uma dada fonte de luz, independente do MOP utilizado. Verificou-se que o MOP retornado pelo método é realmente aquele que otimiza a performance do CCD, de acordo com os requisitos da observação. Verificou-se que o MOP retornado pelo método é capaz de fornecer uma performance do CCD superior à performance média da função objetiva, avaliada ao longo de todo o espaço de estados. Este resultado reproduz o uso do SPARC4 por um usuário que não possui nenhum conhecimento prévio sobre o sistema. Verificou-se que o modelo utilizado para o cálculo da SNR em diferentes MOPs do CCD é capaz de reproduzir a SNR que seria obtida através da aquisição de uma imagem real.

Em seguida, foram selecionadas algumas noites de observação para serem otimizadas pelo método. Analisou-se todas as noites no período de abril de 2017 a abril de 2018 com observações realizadas no telescópio 1,6 m Perkin-Elmer do OPD. Foram selecionadas todas as noites com aquisição de séries temporais de fotometria de estrelas com o uso de uma câmera iXon EMCCD. Foram desconsideradas as noites com observação de objetos extensos como galáxias, nebulosas e aglomerados. Para todas as noites foi possível encontrar um MOP do CCD com performance melhor do que aquela obtida utilizando o modo do usuário, para todos os MOTs. Para o MOT 1, obteve-se uma melhoria na SNR de até 207,33 %. Para o MOT 2, obteve-se uma melhoria na FA de até 513,05 %. Para o MOT 3, obteve-se uma melhoria de até 66,90 % na SNR e de até 181,92 % na FA. Para os três MOTs apresentados, verificou-se uma possível economia de tempo de telescópio caso fosse utilizado o modo ótimo sugerido pelo método. Para o MOT 1, seria necessário um tempo 97,17 % maior que o tempo de observação para que todas as noites pudessem atingir a mesma SNR sugerida para o modo ótimo. Para o MOT 2, poderia ter sido economizado 65,08 % do tempo total para a mesma SNR e número de exposições obtidas pelo usuário. Para o MOT 3, a otimização de ambos os parâmetros permitiria uma economia de 77,66 %.

6.1 Trabalhos futuros

Devido ao tempo do projeto, as medidas da caracterização do ruído e FA utilizadas na implementação do método foram limitadas para apenas uma das câmeras do SPARC4. Contudo, estas medidas poderiam muito bem ser reproduzidas não só para as demais câmeras do SPARC4, como também, para as câmeras iKon disponíveis no OPD. Além dos modos de SI utilizados pelo método, uma possível melhoria seria implementar um SI contínuo ao longo do chip do CCD, obtendo-se assim, um maior grau de liberdade para a otimização da FA. Poderia-se alcançar melhores resultados na otimização da função da SNR \times FA implementado-se no método a execução de ambas funções de amostragem: TPE e *RANDOM*. Uma possível aplicação do SPARC4, servindo de auxílio ao usuário durante as observações. O método poderia ser re-executado ao longo de toda a noite como uma forma de reajuste da performance da câmera em função de variações climáticas.

Apêndices

APÊNDICE A – Temas científicos dos usuários das observações selecionadas

Foi realizado um levantamento dos principais temas de pesquisa em que cada um dos usuários atua e que, portanto, são temas onde o método de otimização pode muito bem ser aplicado. Os temas encontrados foram anãs brancas, variáveis cataclísmicas, trânsitos planetares e ocultações estelares.

Uma anã branca é um dos estágios finais da evolução de uma estrela dentro da sequência principal, com massa de até 1,44 massa solar (M_s = 1,9891 \times 10^{30} kg). No momento em que o núcleo da estrela consome todo o hidrogênio disponível através do processo de fusão nuclear, ela se expande numa gigante vermelha. Neste estágio, a estrela passa a fundir o hélio produzido no estágio anterior em carbono e oxigênio. Contudo, se a estrela não tiver temperatura suficiente para continuar o processo com a fusão do carbono, a fusão cessa e sua camada externa é ejetada, formando uma nebulosa planetária composta de plasma e gás ionizado, deixando o núcleo para trás. Neste estágio, a estrela passa a ser chamada de anã branca. Por não mais haver o processo de fusão, a atração gravitacional da estrela não é mais contrabalanceada pela liberação do calor gerado pela fusão. Esta contraposição passa a ser realizada apenas pela degenerescência dos elétrons, dada pelo princípio de exclusão de Pauli. Por este motivo, a densidade de estrelas anãs brancas pode chegar a 10⁷ vezes a densidade da água. Inicialmente, estas estrelas podem possuir uma temperatura elevada. Contudo, esta temperatura diminui com o passar do tempo devido à emissão de radiação, até o momento em que ela deixa de ser visível e torna-se uma anã negra (New World Encyclopedia, 2013; Kepler e Saraiva, 2000).

Variáveis cataclísmicas são sistemas binários formados por uma anã branca, chamada de estrela primária, e uma estrela normal, chamada de estrela secundária ou companheira. A estrela companheira perde parte de seu material, geralmente rico em hidrogênio, para a estrela primária, formando o disco de acresção. Neste disco ocorre emissões de radiação na região do ultra-violeta e dos raios-X devido à perda de energia gravitacional do material que está sendo acrescido à anã branca. Existem, provavelmente, mais de um milhão de variáveis cataclísmicas em todo o universo. Elas podem ser classificadas em duas categorias, de acordo com as propriedades de suas explosões: *novae* clássica e *novae* anã. As *novae* clássicas sofrem explosão quando a densidade e a temperatura da camada de hidrogênio sobre a anã branca são altas o suficiente para iniciar a fusão nuclear do hidrogênio em hélio. Se esta acresção continuar tempo o suficiente até o limite de massa de uma anã branca, uma supernova pode ser gerada, destruindo a estrela por completo. As explosões *novae* anãs são causadas por instabilidades térmicas no disco de acresção, gerando grandes variações periódicas de brilho. Estas explosões são menores em amplitude e maiores em frequência do que as *novae* clássicas (Myers, 2014).

Um trânsito planetário ocorre quando um planeta passa diretamente entre sua estrela hospedeira e o observador. Para planetas fora do sistema solar, é dado o nome de trânsito de exoplanetas. Este fenômeno exige o alinhamento destes três corpos celestes e, portanto, são fenômenos raros de serem observados. Apesar disto, observações fotométricas de tais eventos são importantes no estudo e caracterização de exoplanetas, sendo a única forma de medida direta de parâmetro físicos, como raio e massa. A determinação do raio, por sua vez, permite inferir sobre a presença (ou ausência) de um núcleo sólido, o qual está intimamente relacionado com a formação do exoplaneta. De forma geral, o raio de exoplanetas correspondem a uma pequena porcentagem do raio de sua estrela hospedeira. Por este motivo, a variação de brilho de uma estrela causada por um trânsito é da ordem de 0,3 % a 3 % do fluxo total que atinge a Terra. Além disso, estes eventos costumam durar algo em torno de 1,5 h a 3,5 h, fazendo com que seu monitoramento em telescópios terrestres seja um grande desafio (Oliveira, Martioli e Tucci-Maia, 2019; Charbonneau et al., 2006).

Uma ocultação estelar ocorre quando uma estrela, vista da Terra, passa por trás de um corpo celeste, o qual oculta sua luz. Este corpo pode ser um planeta, uma lua ou um asteroide. Ocultações são fenômenos que acontecem raramente, durando cerca de algumas horas (Porco e Hamilton, 2007). Contudo, este método permite a determinação de parâmetros estruturais e atmosféricas de corpos celestes com grande precisão (Camargo et al., 2018). As ocultações podem ser classificadas em duas categorias: extintivas e refrativas. Na ocultação extintiva, a luz da estrela observada é atenuada pelos efeitos da atmosfera no momento da passagem do planeta. Esta atenuação pode ocorrer por causa dos efeitos de espalhamento ou absorção da luz devido aos componentes atmosféricos. Conforme a ocultação acontece, o caminho da luz penetra cada vez mais profundo na atmosfera, aumentando a atenuação. A diferença entre as intensidade dos espectros atenuado e nãoatenuado está relacionada com a transmissividade da atmosfera do planeta. A ocultação refrativa ocorre quando a densidade dos componentes da atmosfera levam à refração, ou curvatura do caminho da luz. Medidas deste grau de refração proporcionam informações importantes como densidade, temperatura e pressão atmosférica. Uma das técnicas de observação de ocultações refrativas é por fotometria. Conforme a ocultação acontece, maior será o grau de refração do caminho da luz, devido à concentração atmosférica em diferentes altitudes do planeta. Isto resulta numa divergência no fluxo medido, em relação à luz paralela incidente. Esta divergência aparece como uma atenuação da luz, que varia ao longo do tempo (Yee, Vervack e Demajistre, 2004).

APÊNDICE B – Comparação dos algoritmos de modelagem TPE e *RANDOM* do MOB

Realizou-se um teste de comparação da performance dos algoritmos de modelagem TPE e RANDOM da função substituta do MOB. Para tanto, utilizou-se a mesma série de imagens apresentada na Seção 5.1.3. Para cada imagem, executou-se o método de otimização, para os algoritmos TPE e RANDOM. Utilizou-se os valores de FA e SNR mínimas de 2 fps e 100, respectivamente. Foi utilizado um número de 170 iterações e um raio máximo para a estrela de 20 pixels. Como forma de comparação, este mesmo teste foi repetido utilizando como função objetiva do MOB a função do cálculo da SNR. O resultado é apresentado na Tabela 20. Este resultado mostra um melhor desempenho do algoritmo TPE para o segundo experimento. Logo, é possível que este algoritmo obtenha melhor desempenho na otimização de funções mais simples. Ainda assim, este algoritmo obteve melhor resultado na otimização da SNR × FA do que o algoritmo RANDOM (7/11 casos). Logo, escolheu-se o algoritmo TPE para a modelagem da função substituta do MOB. O uso dos dois algoritmos ao mesmo tempo tornaria o processo de otimização computacionalmente custoso, além de requerer a realização de novos testes de funcionamento do método.

Tabela 20 – Valores ótimos da função objetiva obtidos para uma série de imagens com diferentes fluxos luminosos incidentes, utilizando os algoritmos TPE e RAN-DOM. São apresentados os resultados obtidos utilizando-se as funções objetivas do cálculo da SNR × FA e da SNR.

β	SNR x FA		Melhoria	SNR		Melhoria
$(f \circ tons/s)$	TPE	RANDOM	(%)	TPE	RANDOM	(%)
2000	0,1524	0,1519	$0,\!37$	207,42	204,43	1,46
2100	$0,\!1588$	$0,\!1578$	$0,\!63$	213,79	210,72	$1,\!46$
2200	0,1622	0,1608	$0,\!89$	$219,\!93$	216,78	$1,\!45$
2300	$0,\!1544$	0,1637	-5,72	226, 19	222,79	1,52
2400	$0,\!1561$	0,1679	-7,03	$231,\!99$	$228,\!52$	$1,\!52$
2500	$0,\!1759$	$0,\!1727$	$1,\!83$	237,79	$234,\!24$	$1,\!51$
2600	0,1811	$0,\!1773$	$2,\!18$	$243,\!38$	239,76	$1,\!51$
2700	$0,\!1867$	$0,\!1817$	2,74	$249,\!02$	$245,\!33$	$1,\!51$
2800	$0,\!1920$	$0,\!1859$	$3,\!26$	$254,\!49$	250,72	1,50
2900	$0,\!1522$	$0,\!1826$	$-16,\!67$	259,76	$255,\!92$	1,50
3000	$0,\!1509$	$0,\!1776$	-15,07	$265,\!04$	261, 13	$1,\!50$

Referências

Airy, G. B. On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, v. 5, p. 283, jan. 1835. 46

ANDOR TECHNOLOGY. Software Guide, Andor's camera control and analysis software platform. [S.l.], 2001. 45, 54

ANDOR TECHNOLOGY. User's Guide to Andor Technology SDK. [S.1.], 2009. 22, 45

ANDOR TECHNOLOGY. System Performance Booklet - iXon Ultra X-9916 performance sheet. [S.l.], 2014. 48, 54

ANDOR TECHNOLOGY. *iXon Ultra 888 Hardware Guide*. 1. ed. [S.l.], 2015. 22, 45, 49, 50

ANDOR TECHNOLOGY. Comparing EMCCD, ICCD and CCD Cameras. [S.1.], 2020. 44, 45, 54

ANDOR TECHNOLOGY. *iXon Ultra - The World's Highest Performance Backilluminated EMCCDs.* [S.1.], 2020. 39

BASHASHATI, H.; WARD, R. K.; BASHASHATI, A. Bayesian optimization of bci parameters. In: IEEE. 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). [S.l.], 2016. p. 1–5. 28, 30

BERGSTRA, J. S. et al. Algorithms for hyper-parameter optimization. In: Advances in neural information processing systems. [S.l.: s.n.], 2011. p. 2546–2554. 29, 30, 32, 34, 36

BERK, J. et al. Exploration enhanced expected improvement for bayesian optimization.
In: BERLINGERIO, M. et al. (Ed.). Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases.
Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 621–637. ISBN 978-3-030-10928-8. 31, 32, 34

BERNARDES, D. V. Caracterização fotométrica de câmeras CCDs do Observatório Pico dos Dias. Lorena, SP, Brasil: [s.n.], 2017. 8, 22, 39, 40, 41

BERNARDES, D. V. et al. Acquisition control system of the sparc4 astronomical instrument. In: *Frontiers in Optics* + *Laser Science APS/DLS*. Optical Society of America, 2019. p. JTu3A.102. Disponível em: http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=LS-2019-JTu3A.102. 24

BERNARDES, D. V.; MARTIOLI, E.; RODRIGUES, C. V. Characterization of the SPARC4 CCDs. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 130, n. 991, p. 095002, Sep 2018. 43, 48, 53

BREMMER, D. M.; HUTCHESON, F. V.; STEAD, D. J. Methodology for the elimination of reflection and system vibration effects in particle image velocimetry data processing. 2005. 39

BROCHU, E.; CORA, V. M.; FREITAS, N. D. A tutorial on bayesian optimization of expensive cost functions, with application to active user modeling and hierarchical reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1012.2599*, 2010. 8, 31, 32, 33, 34, 35

BROCHU, E.; HOFFMAN, M. W.; FREITAS, N. de. Portfolio allocation for bayesian optimization. arXiv preprint arXiv:1009.5419, 2010. 31, 32, 33, 34

BRUCH, A. O Banco de Dados Observacionais do LNA. 2001. Disponível em: http://www.lna.br/~databank/docs/bolsab/bolsab.html>. 53, 63

BUDDING, E.; WILLSTROP, R. An introduction to astronomical photometry. *Measu*rement Science and Technology, Bristol: IOP Pub., c1990-, v. 5, n. 7, p. 877, 1994. 38, 39

CAMARGO, J. et al. The future of stellar occultations by distant solar system bodies: Perspectives from the gaia astrometry and the deep sky surveys. *Planetary and Space Science*, Elsevier, v. 154, p. 59–62, 2018. 23, 80

CARVALHO, J. B. de. Estudo dos componentes ópticos do espectrógrafo coudé do observatório do Pico dos Dias e proposta para sua melhoria. Dissertação (mathesis) — Universidade Federal de Itajubá, jun. 2011. 46

CHARBONNEAU, D. et al. When extrasolar planets transit their parent stars. arXiv preprint astro-ph/0603376, 2006. 80

DEWANCKER, I.; MCCOURT, M.; CLARK, S. Bayesian optimization primer. 2015. 32, 36

FRAZIER, P. I. A tutorial on bayesian optimization. *arXiv preprint arXiv:1807.02811*, 2018. 31, 32

GUERRERO, C. A. et al. First speckle interferometric measurements at the Observatório do Pico dos Dias of the Laboratório Nacional de Astrofísica. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 481, n. 4, p. 5307–5314, 09 2018. ISSN 0035-8711. Disponível em: https://doi.org/10.1093/mnras/sty2629>. 75

GUNN, J. E. et al. The sloan digital sky survey photometric camera. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 116, n. 6, p. 3040–3081, dec 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1086%2F300645>. 22

HIGHLAND TECHNOLOGY. T560 DIGITAL DELAY GENERATOR, Technical Manual. [S.1.], 2019. 45

HOWELL, S. Handbook of CCD astronomy/Steve B. Howell. [S.l.]: Cambridge, UK, 2000. 43

JONES, D.; SCHONLAU, M.; WELCH, W. Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global Optimization*, n. 13, p. 455–492, 1998. 33

KASTNER, M.; NELLEN, N.; JAHN, C. Model-based optimisation with tree-structured parzen estimation for discrete event simulation at container terminals: Modellbasierte optimierung mit baumstrukturierter kerndichteschätzung für ereignisdiskrete simulation auf container-terminals. In: PUTZ, M.; SCHLEGEL, A. (Ed.). *Simulation : In Produktion und Logistik.* 1. ed. Auerbach /Vogtl.: Wissenschaftliche Scripten, 2019. p. 489–498. ISBN 9783957351135. 35, 36

KEPLER, S. O. F. Seeing e Speckle. 2018. Online. Disponível em: http://astro.if.ufrgs.br/telesc/speckle.html>. 46

KEPLER, S. O. F.; SARAIVA, M. D. F. O. Astronomia e astrofisica. Ed. Universidade/UFRGS, 2000. ISBN 9788570255396. Disponível em: https://books.google.com. br/books?id=lfVwPwAACAAJ>. 37, 53, 79

KIM, J.; CHO, Y.; KIM, A. Generic camera attribute control using bayesian optimization. arXiv preprint arXiv:1807.10596, 2018. 27, 28

KOEHRSEN, W. Introduction: Bayesian Optimization using Hyperopt. 2018. https://github.com/WillKoehrsen/hyperparameter-optimization/blob/master/ Introduction%20to%20Bayesian%20Optimization%20with%20Hyperopt.ipynb>. 53

KUSHNER, H. J. A new method of locating the maximum point of an arbitrary multipeak curve in the presence of noise. 1964. 32, 33

LABORATÓRIO NACIONAL DE ASTROFÍSICA. *TELESCÓPIOS DO OPD*. [S.l.], 2015. Disponível em: http://www.lna.br/opd/telescop/telescop.html#160bc>. 38

LÉNA, P. Observational astrophysics. Springer-Verlag, 1988. (Astronomy and astrophysics library). ISBN 9783540184331. Disponível em: <a href="https://books.google.com.br/books?id="https://books?id="http

LIZOTTE, D. J. *Practical bayesian optimization*. [S.l.]: University of Alberta, 2008. 33, 34

LU, H. et al. Camera parameters auto-adjusting technique for robust robot vision. In: IEEE. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.], 2010. p. 1518–1523. 26, 27, 28

MARKEVICH, N.; GERTNER, I. Comparison among methods for calculating fwhm. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, v. 283, n. 1, p. 72 – 77, 1989. ISSN 0168-9002. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900289912588>. 42

MARTIOLI, E. et al. A survey of eight hot jupiters in secondary eclipse using wircam at cfht. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 474, n. 3, p. 4264–4277, 2018. 42

MATTSON, B. Light Curves and What They Can Tell Us. [S.I.], 2012. Disponível em: http://teacherlink.ed.usu.edu/tlnasa/reference/imaginedvd/files/imagine/docs/science/how_l1/light_curves.html>. 23

MERLINE, W.; HOWELL, S. A realistic model for point-sources imaged on array detectors: The model and initial results. *Experimental Astronomy*, v. 6, p. 163–210, 01 1995. 40, 42, 43

MOCKUS, J.; TIESIS, V.; ZILINSKAS, A. Toward Global Optimization. [S.l.]: Elsevier, 1978. 33

MYERS, J. D. Introduction to Cataclysmic Variables (CVs). 2014. Online. Disponível em: https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/cataclysmic_variables.html>. 80

NATIONAL INSTRUMENTS. What Is LabVIEW? [S.I.], 2020. 22, 45

NEW WORLD ENCYCLOPEDIA. *White dwarf.* [S.l.], 2013. Disponível em: <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/White_dwarf#Credits>. 79

NEWBERRY, M. V. Signal-to-noise considerations for sky-subtracted CCD data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 103, p. 122, jan 1991. Disponível em: https://doi.org/10.1086%2F132801. 44

OLIVEIRA, J. M.; MARTIOLI, E.; TUCCI-MAIA, M. First observation of a planetary transit with the SPARC4 CCD: Improved parameters for HATS-24b. *Research Notes of the AAS*, American Astronomical Society, v. 3, n. 2, p. 35, feb 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3847%2F2515-5172%2Fab06c7. 23, 53, 80

PALMER, J.; DAVENHALL, A. The ccd photometric calibration cookbook. *Starlink Co-okbook*, v. 6, 2001. 8, 37

PEñA, C. A. G. Primeiras observações interferométricas speckle no opd. *LNA em Dia*, n. 52, p. 29, abr. 2020. 75

PORCO, C. C.; HAMILTON, D. P. Chapter 27 - planetary rings. In: MCFADDEN, L.-A.; WEISSMAN, P. R.; JOHNSON, T. V. (Ed.). *Encyclopedia of the Solar System (Second Edition)*. Second edition. San Diego: Academic Press, 2007. p. 503 - 518. ISBN 978-0-12-088589-3. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120885893500311>. 80

PRICE-WHELAN, A. M. et al. The astropy project: Building an open-science project and status of the v2.0 core package. *The Astronomical Journal*, American Astronomical Society, v. 156, n. 3, p. 123, Aug 2018. ISSN 1538-3881. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aabc4f>. 56

RODRIGUES, C. V. et al. SPARC4 A simultaneous polarimeter and rapid camera in 4 bands. In: Hoffman, J. L.; Bjorkman, J.; Whitney, B. (Ed.). *American Institute of Physics Conference Series*. [S.I.: s.n.], 2012. (American Institute of Physics Conference Series, v. 1429), p. 252–255. 22, 39, 75

RODRIGUES, C. V. et al. Concept of SPARC4: a simultaneous polarimeter and rapid camera in 4 bands. In: MCLEAN, I. S.; RAMSAY, S. K.; TAKAMI, H. (Ed.). *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*. SPIE, 2012. v. 8446, p. 773 – 785. Disponível em: https://doi.org/10.1117/12.924976>. 46

SHIM, I.; LEE, J.-Y.; KWEON, I. S. Auto-adjusting camera exposure for outdoor robotics using gradient information. In: IEEE. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.I.], 2014. p. 1011–1017. 26, 28

SINGH, P. Bayesian optimization for machine learning. Math 693 A - Project Report. 2018. Disponível em: https://pdeep.xyz/documents/Bayesian_Optimization_Report.pdf>. 35, 36

ADAMS, SNOEK. J.; LAROCHELLE, H.; R. P. Practical bayesian opti-In: of machine learning algorithms. PEREIRA, \mathbf{et} (Ed.). mization F. al. Advances inNeural Information Processing Systems 25. Curran Associates. Inc. 2012. p. 2951–2959. Disponível em: <http://papers.nips.cc/paper/ 4522-practical-bayesian-optimization-of-machine-learning-algorithms.pdf>. 29, 30

WANG, G. Active entropy camera. *Machine Vision and Applications*, Springer, v. 23, n. 4, p. 713–723, 2012. 26, 28

WENGER, M. et al. The simbad astronomical database. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, EDP Sciences, v. 143, n. 1, p. 9–22, Apr 2000. ISSN 1286-4846. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1051/aas:2000332>. 53, 63

WIDENHORN, R. et al. Temperature dependence of dark current in a ccd. In: INTER-NATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications III. [S.1.], 2002. v. 4669, p. 193–201. 43

WU, P.-H.; NELSON, N.; TSENG, Y. A general method for improving spatial resolution by optimization of electron multiplication in ccd imaging. *Optics express*, Optical Society of America, v. 18, n. 5, p. 5199–5212, 2010. 25, 28

YEE, J.-H.; VERVACK, R. J.; DEMAJISTRE, R. The stellar occultation technique: Past achievements, recent developments, and future challenges. In: _____. Occultations for Probing Atmosphere and Climate. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 261–273. ISBN 978-3-662-09041-1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/ 978-3-662-09041-1_23>. 80