DENIS FURTADO DE ANDRADE

Otimização das câmeras astronômicas do instrumento Brazilian Tunable
Filter Imager

São Paulo
2016

DENIS FURTADO DE ANDRADE

Otimização das câmeras astronômicas do instrumento Brazilian Tunable
Filter Imager

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

São Paulo
2016

DENIS FURTADO DE ANDRADE

Otimização das câmeras astronômicas do instrumento Brazilian Tunable
Filter Imager

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Sistemas
Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Francisco Javier
Ramirez Fernandez

São Paulo
2016

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Andrade, Denis Furtado de

Otimização das câmeras astronômicas do instrumento Brazilian Tunable Filter Imager / D. F. Andrade -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
130 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Instrumentação (Astronomia) 2.Baixa Temperatura 3.Vácuo 4.Circuitos Eletrônicos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha companheira de vida, sonhos e projetos,
Tainá, por trilhar este caminho ao meu lado

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Professor Francisco Javier Ramirez, pelo estímulo e suporte transmitidos desde a elaboração do projeto de pesquisa até a conclusão deste trabalho.

Aos colegas, professores, alunos e funcionários do IAG-USP e ao Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP.

À empresa Nuvu Cameras, que me recebeu em seus laboratórios durante as caracterizações iniciais das câmeras astronômicas, realizadas em Montreal.

Aos funcionários do Laboratório de Detectores do *Cerro Tololo Inter-American Observatory – CTIO* e do telescópio SOAR no Chile. Em especial aos engenheiros Marco Bonati e Peter Moore.

Aos colegas (técnicos, astrônomos e engenheiros) do BTFI que compartilharam experiências e conhecimentos durante os últimos anos. Principalmente à Profa. Dra. Claudia Mendes Oliveira pela oportunidade de fazer parte deste projeto e poder desenvolver meu entusiasmo pela instrumentação astronômica.

Ao grupo de Astro-Engenharia da “*Pontificia Universidad Católica de Chile*” em especial ao engenheiro Rodrigo Bilbeny e ao Prof. Dr. Dani Guzman pelo período que trabalhamos juntos em Santiago e pela oportunidade de aplicar parte de seu trabalho em minha pesquisa.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (principalmente através do INCTa) pelo apoio financeiro.

Levantar novas questões, novas possibilidades, considerar velhos problemas de um novo ângulo, requer imaginação criativa e marca o avanço real na ciência.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos no processo de otimização realizado nas câmeras astronômicas do instrumento BTFI (*Brazilian Tunable Filter Imager*) instalado no telescópio SOAR, no Chile, para reduzir o ruído nos sinais. O instrumento BTFI opera com duas câmeras astronômicas de alto desempenho que utilizam detectores de imagens denominados EMCCDs. Esses detectores são sensores de imagem baseados em dispositivos de carga acoplada (CCDs) otimizados por um estágio integrado de multiplicação de elétrons por avalanche. Essa característica permite atingir ao mesmo tempo altas taxas de leitura (10 MHz) e níveis de ruído muito baixos (<1 elétron/pixel). Detectores CCD exigem temperaturas de operação da ordem de -100°C para operar com baixo ruído, o que demanda uma série de especificações técnicas quanto ao projeto da câmera. O trabalho aqui exposto fundamentou-se na otimização de aspectos mecânicos e eletrônicos de câmeras astronômicas com o intuito de se obter a melhor relação sinal-ruído, mostrando a importância do correto desenho mecânico (do ponto de vista térmico) e sua influência no comportamento eletrônico da câmera. São expostos os resultados obtidos com as duas câmeras em laboratório, os métodos e processos de caracterização utilizados, bem como as simulações térmicas e experimentos realizados em laboratório. Com as técnicas empregadas alcançou-se níveis de ruído total menores que 0,18 elétrons/pixel/segundo para exposições de 10 segundos. Os resultados atingidos foram observados nas duas câmeras do instrumento BTFI e foram validados em laboratório, onde demonstraram estabilidade durante 71 dias consecutivos. Por fim, é mostrada uma caracterização comparativa entre as duas câmeras quanto aos níveis de ruídos, ganho, estabilidade, eficiência quântica, linearidade e relação sinal-ruído.

Palavras-chave: instrumentação, astronomia, vácuo, simulação térmica, circuitos eletrônicos.

ABSTRACT

This work presents results of the optimization performed in the astronomical cameras from the Brazilian Tunable Filter Imager (BTFI), instrument for the SOAR Telescope in Chile, in order to reduce the signals noise. The BTFI instrument has two high-performance cameras equipped with detectors named EMCCDs, which are image sensors based on charge-coupled devices (CCDs) optimized by an electron multiplication integrated stage. This feature enables to achieve high readout rates (10 MHz) and very low noise levels (<1 electron/pixel) at the same time. CCD detectors demand running temperatures of about -100°C for very low noise operation, which requires a series of technical specifications for the camera design. The work shown here is based in the optimization of the mechanical and electronic aspects for the astronomical cameras, in order to obtain the best signal to noise ratio, showing the importance of the correct mechanical design (from the thermal point of view) and its influence on the camera electronic behavior. The laboratory results obtained with the two cameras, the characterization procedures, as well as the thermal simulations and laboratory ratification experiments that allowed achieve the results presented are exposed. Using such techniques it was possible to achieve total noise levels lower than 0.18 electron/pixel/second for 10 seconds of exposure time. The results achieved were observed in both BTFI cameras and were validated in laboratory showing 71 consecutive days of stability. Finally it is shown a comparative characterization between both cameras in: noise and gain levels, stability, quantum efficiency, linearity and signal to noise ratio.

Keywords: instrumentation, astronomy, vacuum, thermal simulation, electronic circuits.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura mecânica do instrumento BTFI, detalhe do posicionamento das câmeras EMCCD. Fonte: autor.	23
Figura 2 - Analogia dos baldes ilustrando o funcionamento de um CCD. Fonte: adaptado de (JANESICK, 2001).....	27
Figura 3 - Célula básica de um sensor CCD. Fonte: Autor.....	28
Figura 4 – Esboço original do diagrama de Willard Boyle e George Smith. Fonte: (JANESICK, 2001).	28
Figura 5 – Diagrama de três fases mostrando a carga sendo transferida da esquerda para direita. Fonte: (JANESICK, 2001).....	30
Figura 6 – Corrente de escuro do detector TEK1024CCD em função da temperatura. Fonte: (TULLOCH, 1995).	36
Figura 7 - Corrente de escuro de um CCD em função da temperatura e da corrente de superfície. Fonte: (JANESICK, 2001).....	37
Figura 8 – Ruído de leitura para sensores científicos convencionais em função da taxa de leitura. Fonte: adaptado de (STANFORD; HADWEN, 2003).	38
Figura 9 – Exemplo de correção de imagem astronômica utilizando-se imagens <i>dark</i> . Fonte: (MA, 2014).	40
Figura 10 - Estrutura típica de um detector EMCCD. Fonte: adaptado de (JERRAM, 2001).	43
Figura 11 - Funcionamento do registro de ganho de um EMCCD. Fonte: adaptado de (BERNARD; COATES, 2005).	44
Figura 12 - Ganho do registro EM em função da tensão da fase de alta tensão (R2HV) e da temperatura. Fonte: (E2V, 2008).	46
Figura 13 – Comparação do SNR entre CCD convencional e um EMCCD modelo CCD60 em função do fluxo de fótons por pixel. Fonte: Adaptado de (TULLOCH, 2004a).	48
Figura 14 O CCD207 do tipo full-frame. Fontes: (E2V, 2008) e autor.....	50
Figura 15 – Diagrama de blocos simplificado com principais componentes de um controlador CCD. Fonte: autor.....	51
Figura 16 – Frequência de ressonância da fase de alta tensão (R2HV) <i>versus</i> a soma das capacitâncias (registro EM e capacitores de compensação). Fonte: (PHOTON ETC, 2009).....	53

Figura 17 – Esquema 3D mostrando os principais componentes da câmera TigerCam. Fonte: autor.....	56
Figura 18- Imagem do sistema Polycold Compact Cooler (PCC). Fonte: (BROOKS AUTOMATION, 2006).....	57
Figura 19 - Curva de desempenho térmico do Cryocooler para diferentes misturas de gás. Fonte: (BROOKS AUTOMATION, 2006).	58
Figura 20 - Modelo 3D do sistema de refrigeração da TigerCam. Fonte: autor.	59
Figura 21 - Detalhe da posição do sensor de temperatura e do resistor (heater) na parte interna da câmera. Fonte: autor.	60
Figura 22 – Criostato do espectrógrafo MEGARA. Fonte: (CASTILLO-DOMÍNGUEZ E. et al., 2012).	62
Figura 23 - O problema da distribuição da temperatura nos detectores. Fonte: adaptado de (BILBENY, 2014).	66
Figura 24 - Balanço energético em um volume de controle fechado. Fonte: adaptado (BILBENY, 2014).	70
Figura 25 - Condução através de uma barra sólida composta por dois materiais distintos. Assume-se uma união ideal entre os dois materiais. Fonte: (BILBENY, 2014).	74
Figura 26 - Curvas de transferência de fótons para uma das câmeras do instrumento BTFI rodando a uma taxa de leitura de 10 MHz e 100 kHz de transferência vertical. Fonte: autor.	81
Figura 27 - Perfil de temperaturas gerado pelo FDM em duas simulações distintas. Fonte: (GUZMAN et al., 2014).....	87
Figura 28 - Volume a ser modelado. Fonte: autor.	88
Figura 29 - Resultado da simulação inicial do BTFI para 796 elementos. Fonte: autor.	91
Figura 30 - Resultado da simulação da Proposta 1 para 796 elementos. Fonte: autor.	93
Figura 31 - Resultado da simulação da Proposta 2 para 796 elementos. Fonte: autor.	95
Figura 32 - Resultado da simulação da Proposta 3 para 796 elementos. Fonte: autor.	97
Figura 33 - Fotos mostrando sensores utilizados para validar simulações. Fonte: autor.	98

Figura 34 - Teste de vazamento executado na câmera do BTFl. Fonte: Autor.....	101
Figura 35 - Testes injetando N ₂ na câmera do BTFl. Fonte: autor.....	102
Figura 36 - Localização dos sensores para investigar temperaturas dos sinais seriais e paralelos (extremos internos). Fonte: autor.....	104
Figura 37 - Localização dos sensores para investigar temperaturas dos sinais seriais e paralelos (extremos externos). Fonte: autor.	105
Figura 38 - Simulações da proposta 3 com modelo de 20.436 elementos. Fonte: autor.	113
Figura 39 - Temperatura e pressão estáveis do sistema. Fonte: autor.....	116
Figura 40 - Estabilidade do ganho EM. Fonte: autor.	117
Figura 41 – Eficiência quântica dos EMCCDs utilizados. Fonte: Adaptado de (E2V, 2008) e autor.	119
Figura 42 - Gráfico de Linearidade para as duas câmeras do BTFl. Fonte: autor...	120
Figura 43 – Relação sinal-ruído das câmeras. Fonte: Autor	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição dos tipos de qualidade de vácuo em função da pressão de um gás em um volume fechado (WESTON, 2013).	63
Tabela 2 - Parâmetro adotados para a análise térmica da câmara do BTFL.....	78
Tabela 3 – Comparação dos níveis de ruído e ganho das câmeras. Fonte: autor.....	82
Tabela 4 - Interações térmicas disponíveis entre os volumes. Fonte: adaptado de (GUZMAN et al., 2014).....	86
Tabela 5 - Constantes medidas em laboratório para a câmara do BTFL.....	88
Tabela 6 - Parâmetros físicos adotados para simular o sistema térmico da câmara.	89
Tabela 7 - Parâmetros analisados durante as simulações	90
Tabela 8 - Resultados das simulações da situação inicial da câmara	92
Tabela 9 - Resultados das simulações da proposta 1 de solução	94
Tabela 10 - Resultados das simulações da proposta 2 de solução	95
Tabela 11 - Resultados das simulações da proposta 3 de solução	97
Tabela 12 - Primeiros testes injetando Nitrogênio	103
Tabela 13 - Temperaturas próximas aos sinais seriais e paralelos na parte interna da placa eletrônica.	104
Tabela 14 - Temperaturas próximas aos sinais seriais e paralelos na parte externa da placa eletrônica.	105
Tabela 15 - Temperaturas próximas aos sinais seriais e paralelos na parte interna da placa eletrônica com peças de Alumínio no lugar das peças de <i>PEEK</i>	108
Tabela 16 – Resultados das caracterizações prévias realizadas em laboratório e no telescópio.	109
Tabela 17 - Resumo dos resultados das quatro simulações térmicas executadas..	110
Tabela 18 - Resultados da situação inicial em que a câmara se encontrava	111
Tabela 19 - Resultados das simulações e dados medidos para a proposta de solução 1: mudar localização do sensor de controle.	112
Tabela 20 - Resultados das simulações e dados medidos para a proposta de solução 3: mudar localização do resistor.	113
Tabela 21- Variação da temperatura nos pontos externos da placa eletrônica interna de acordo com a pressão.	114
Tabela 22 - Comparativo das temperaturas internas da placa fixada com <i>PEEK</i> e com Alumínio.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analogic to Digital Converter
AFE	Analogic Front End
BASE	Basic Array System Eletronics
BTFI	Brazilian Tunable Filter Imager
CCCP	CCD Controller for Couting Photons
cccpComm	CCD Controller for Couting Photons communication program
CCCPv2	CCD Controller for Counting Photons Version 2
CCD	Charge Coupled Device
CIC	Clock Induced Charge
CLP	Controlador Lógico Programável
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CTIO	Cerro Tololo Inter-American Observatory
D/A	Digital to Analogic Converter
DAC	Digital to Analogic Converter
DHE	Detector Head Electronics
DSP	Digital Signal Processor
E2V	English electric Valve Company
EM	Electron Multiplying
EMCCD	Electron Multiplied Charge Coupled Device
EMI	Electromagnetic Induction
EMIFIL	Electromagnetic Induction Filter
ESO	European Southern Observatory
FIERA	Fast Imager Electronic Readout Assembly
FIFO	First In, First Out
FITS	Flexible Image Transport System
FPGA	Field Programmable Gate Array
GLAO	Ground Layer adaptive Optics
GND	Ground
HV	High Voltage
IAG-USP	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
iBTF	imaging Bragg Tunable Filter
ICCD	Intensified Charge Coupled Device
IMO	Inverted Mode Operation

IRACE	InfraRed Array Control Electronics
IRAF	Image Reduction and Analysis Facilit
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
MSU	Michigan State University
NGC	New General detector Controller ou New General Catalogue
NOAO	National Optical Astronomy Observatory
OA	Óptica Adaptativa
OGH	Output Gate High
PanVIEW	Pixel Aquisition Node Labview
PCB	Printed Circuit Board
PCM	Photo Counting Mode
POLI-USP	Escola Politécnica da USP
R1	Serial Register Clock 1
R2	Serial Register Clock 2
R3	Serial Register Clock 3
RAM	Random Access Memory
Rdc	Multiplication Register DC Bias
RS-232	Padrão de comunicação serial
SAM	SOAR Adaptive Module
SDSU	San Diego State University
SIFS	SOAR Integral Field Unit Spectrograph
SNR	Signal to Noise Ratio
SOAR	Southern Astrophysical Research
SRAM	Static Random Access Memory
STELLES	SOAR Telescope Echelle Spectrograph
UNC	The University of North Carolina
VLT	Very Large Telescope
VSS	Virtual Substrate Signal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação	19
1.2 O Telescópio SOAR.....	21
1.3 O Instrumento BTFI.....	22
1.4 Objetivos	24
2 Sensores CCD.....	25
2.1 Geração de carga.....	25
2.2 Coleta de carga	27
2.3 Transferência da carga.....	29
2.4 Medição da carga	30
2.5 Conversão da carga	32
2.6 Fontes de Ruído	34
2.6.1 Corrente de Escuro	34
2.6.2 Ruído de Leitura	37
2.7 Imagens de calibração	38
2.7.1 Imagem Bias	39
2.7.2 Imagem <i>Dark</i>.....	40
2.7.3 Imagem Flat	40
2.8 Sensores EMCCD	42
2.8.1 Determinação do ganho EM (<i>Electron Multiplying</i>).....	45
2.8.2 O Ruído de Multiplicação.....	47
2.8.3 O ruído CIC	49
2.8.4 O EMCCD modelo CCD-207.....	49
2.9 O controlador CCCP	51
2.10 Câmeras CCD	54
2.10.1 Requisitos de uma câmera CCD	54
2.10.2 A câmera TigerCam	55
2.10.3 O sistema de refrigeração da câmera TigerCam	56
2.10.4 O sistema de controle da temperatura	59
2.10.5 A placa eletrônica interna	61

2.11 Considerações sobre vácuo e ambientes criogênicos.....	62
2.12 Emprego da distribuição térmica em detectores para astronomia.....	65
2.12.1 Motivações para conhecer a distribuição térmica.....	67
2.13 Transferência de calor	68
2.14 Conservação de energia na transferência de calor	69
2.15 Radiação de calor em regime permanente.....	71
2.16 Condução de calor em regime permanente	73
2.16.1 Condução de calor dentro de um corpo sólido	73
2.16.2 Condução de calor entre dois sólidos em contato.....	74
3 EXPERIMENTOS / DESENVOLVIMENTO	76
3.1 Análise térmica das câmeras.....	76
3.2 Caracterização das câmeras.....	79
3.2.1 Ganho de saída e ruído de leitura.....	80
3.2.2 Ganho de multiplicação de elétrons (ganho EM)	81
3.3 Comportamento Inesperado.....	83
3.3.1 COLABORAÇÃO UC.....	84
3.3.2 A ferramenta de simulação térmica FDM.....	85
3.3.3 Aplicando ferramenta FDM para o sistema do BTFI.....	87
3.3.4 Primeira proposta, mudar localização do sensor de controle de lugar.....	93
3.3.5 Proposta intermediária: aumentar a resistência térmica no dedo frio.....	94
3.3.6 Melhor solução proposta: mudar localização do Resistor	96
3.3.7 Validação das simulações em laboratório	98
3.4 Novos testes em laboratório.....	100
3.4.1 Problema de decaimento de vácuo.....	100
3.4.2 Testes injetando Nitrogênio.....	101
3.5 Dependência capacitância x temperatura	106
4 RESULTADOS	109
4.1 Caracterização prévia das câmeras	109
4.2 Simulações térmicas (gradiente).....	110
4.3 Temperaturas internas x pressão interna	114
4.4 Comportamento estável	116
4.5 Caracterização final.....	118

4.5.1 Ruídos e ganho EM	118
4.5.2 Eficiência Quântica	119
4.5.3 Linearidade	120
4.5.4 Relação sinal-ruído	121
5 CONCLUSÕES	122
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

1 INTRODUÇÃO

Os avanços da tecnologia na instrumentação astronômica no decorrer das últimas décadas proporcionaram um notável desenvolvimento nas pesquisas astronômicas, e abriram espaço para a formação de equipes mistas, em que profissionais de outras áreas podem explorar seu potencial científico na busca de soluções e facilidades astronômicas (telescópios, observatórios e instrumentos). Os esforços despendidos no desenvolvimento de tecnologias específicas visam aperfeiçoar a observação astronômica, envolvendo a melhoria de instrumentos e sua adequação a condições climáticas específicas, sem envolver o conhecimento astronômico *per se*, o que faz com que a astronomia moderna seja um campo de pesquisa muito fértil também para profissionais da engenharia ou da física aplicada.

Estes profissionais estão se dedicando cada vez mais à ciência da astronomia por meio da instrumentação astronômica, nome dado à área dedicada a aplicar tecnologia de ponta na astronomia, desenvolvendo novas tecnologias específicas para observações e análises astronômicas. Segundo BOYES (2008), a instrumentação pode ser compreendida de maneiras diferentes: de forma técnica ou de forma aplicada. De forma técnica, o objetivo esperado dita a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias pelo lado científico. De forma aplicada têm-se a ponderação das variáveis inerentes ao processo para que se obtenha um bom funcionamento do mesmo. A instrumentação astronômica é, portanto, um setor que envolve várias áreas com intuito de auxiliar o desenvolvimento de projetos astronômicos, com conhecimentos de física e engenharia. Algumas das áreas que compõem a instrumentação astronômica são: óptica, mecânica, eletrônica, controle de sistemas e programação (ESPINOSA, 1997).

Mesmo com o aumento da demanda de profissionais que se dediquem à pesquisa de recursos técnicos avançados aplicados à astronomia, o Brasil ainda é considerado um país que explora áreas como a instrumentação astronômica abaixo das possibilidades oferecidas no país. Ainda que haja projetos como o BTFI (OLIVEIRA et al., 2013), o SIFS (LEPINE et al., 2003) e o STELLES (CASTILHO; DELABRE; GNEIDING, 2004), há uma carência de capacitação de profissionais para

este setor. O desenvolvimento de projetos voltados para a criação de instrumentos astronômicos no Brasil, como os supracitados, estão ajudando a aumentar a participação brasileira nessa área, além de estarem abrindo portas para um intercâmbio de conhecimentos, proporcionando colaboração em projetos internacionais, que representam uma excelente oportunidade de aprendizado para os profissionais brasileiros.

1.1 Motivação

Entre os instrumentos propostos para operar junto ao telescópio SOAR (do inglês *Southern Astrophysical Research Telescope*), encontra-se um interferômetro e imageador denominado *Brazilian Tunable Filter Imager* ou, BTFI. Este instrumento foi a principal motivação deste trabalho e será apresentado com mais detalhes adiante. Mais especificamente, durante o trabalho de pesquisa apresentado nesta tese, trabalhou-se com as câmeras astronômicas que operam nesse instrumento pois as mesmas apresentavam um comportamento inesperado que foi objeto de estudo da pesquisa desenvolvida.

O instrumento BTFI, bem como suas câmeras, apresentam características *sui generis* que serão explicadas ao longo do texto. Algumas dessas características tornam o instrumento como um todo único e com um incrível potencial para geração de ótimos resultados. Porém, essas mesmas características se apresentam, em algumas situações, como desafios científicos e tecnológicos que precisam ser dominados e superados. Dentre eles pode-se citar a necessidade de um projeto mecânico, térmico e eletrônico muito precisos e detalhados. Esses desafios são justamente a motivação dessa tese de Doutorado. Desde o primeiro contato com as câmeras astronômicas, vários aspectos foram levantados e solucionados. Detalhes de todo esse processo serão apresentados ao longo do texto.

Esta tese está dividida em 5 capítulos organizados de acordo com a seguinte descrição:

O capítulo 1 (presente) traz a introdução, onde são apresentadas as características e dados do projeto em que este trabalho está inserido. Além disso, é exposta a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa.

O capítulo 2 descreve a teoria dos dispositivos de cargas acopladas, ou CCDs e também dos dispositivos EMCCDs (utilizados na câmeras do BTFI). São descritos aspectos relevantes dos equipamentos utilizados. Além disso, são apresentadas algumas teorias básicas de termodinâmica, mais especificamente as técnicas relevantes a serem aplicadas na confecção de câmeras astronômicas.

O capítulo 3 descreve os experimentos realizados com as câmeras: desde a caracterização inicial do nível de ruídos, problemas encontrados durante operação no telescópio, experimentos em laboratórios, modelagens e propostas para solução.

O capítulo 4 descreve os resultados finais das simulações e caracterização das câmeras.

O capítulo 5 expõe as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

1.2 O Telescópio SOAR

O SOAR (SEBRING; CECIL; MORETTO, 1998) (*Southern Astrophysical Research*) é um telescópio que foi construído pela associação dos seguintes parceiros: *National Optical Astronomy Observatory* (NOAO), Universidade da Carolina do Norte (UNC), Universidade Estadual de Michigan (MSU) e o Brasil (representado pelo CNPq). O Brasil possui cerca 31% do tempo no telescópio, sendo seu sócio majoritário. A cerimônia de inauguração do telescópio SOAR aconteceu do dia 17 de Abril de 2004.

O telescópio SOAR tem abertura de 4,2 metros e está localizado no *Cerro Pachón*, no Chile. O *Cerro Pachón* é uma montanha dos Andes Chilenos que possui altitude de 2.700 metros acima do nível do mar e está localizada na cidade de Vicuña. Nessa mesma montanha encontra-se ainda o telescópio *Gemini South* com espelho de 8,1 metros de diâmetro e que possui um “irmão gêmeo” no hemisfério norte compondo o *Gemini Observatory*. Há ainda um terceiro telescópio em construção atualmente no *Cerro Pachón*: trata-se do LSST - *Large Synoptic Survey* - que terá um espelho primário de 8,4 metros. Vale ressaltar também que o *Cerro Pachón* é vizinho de outro grande centro de observações astronômicas, o CTIO - *Cerro Tololo Inter-American Observatory*.

O sistema de controle do telescópio SOAR foi desenvolvido em *Labview* e opera em um conjunto de microcomputadores com sistemas operacionais Linux e Windows. O programa *Labview* fornece a conectividade consistente com a rede de computadores que controlam vários elementos do telescópio, o sistema de controle ambiental e os instrumentos periféricos. O telescópio SOAR está configurado para permitir que astrônomos possam realizar observações remotas a partir de qualquer lugar do mundo, com o mínimo de exigências de hardware e conectividade. Há uma sala de observação e controle remoto do telescópio SOAR instalada dentro do departamento de Astronomia do IAG-USP, onde astrônomos brasileiros podem fazer observações, comunicando-se diretamente com o telescópio no Chile.

1.3 O Instrumento BTFI

O instrumento BTFI é um projeto liderado pelo Departamento de Astronomia do IAG-USP em parceria com o Laboratório de Microeletrônica da POLI-USP, e possui colaboradores em instituições de vários países. Seguem abaixo algumas dessas instituições e suas participações:

- *Université de Montréal* / Controlador do CCD;
- *Laboratoire d'Astrophysique de Marseille* / Sistema Fabry-Perot;
- *Durham University* / Câmeras;
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Mecânica e Eletrônica;
- Laboratório Nacional de Astrofísica / Ótica e Astronomia;
- Universidade Federal do Pampa / Software de Redução de Dados;
- *Cerro Tololo Inter-American Observatory* / Software de Aquisição de Imagens.

O BTFI, ou *Brazilian Tunable Filter Imager*, é um interferômetro e imageador em desenvolvimento para operar no telescópio SOAR. A nova tecnologia empregada no equipamento o torna extremamente versátil, pois introduz o conceito de iBTF ou *imaging Bragg Tunable Filter* (BLAIS-OUELLETTE; DAIGLE; TAYLOR, 2006) e um novo modelo de interferômetro *Fabry-Perot* (ATHERTON, 1995) em que um único padrão (etalon) atua em uma larga faixa de resolução.

O instrumento BTFI pode atuar tanto no *SOAR Adaptive Module* (SAM) com o sinal do sistema GLAO (*Ground Layer Adaptive Optics*) e campo de visualização de 3' e excelente resolução espacial, quanto na porta *Bent Cassegrain* com campo de 6' de visualização (SEBRING; CECIL; MORETTO, 1998).

Os dados gerados pelo *Fabry-Perot* em modo de *scanning* podem ser agrupados como um cubo de imagens da mesma fonte em diferentes comprimentos de onda. Cada comprimento de onda é obtido a partir de diferentes espaçamentos das placas do *Fabry-Perot* e diferentes filtros de interferência. Com a obtenção deste cubo conseguem-se informações sobre a cinemática de um objeto em duas dimensões e o perfil de linha em alta precisão (com R maior que 10.000), para determinação de parâmetros físicos da fonte emissora da radiação óptica.

O BTFI é composto de duas câmeras que utilizam uma tecnologia específica de sensores de imagem com base em dispositivos de acoplamento de carga otimizados por um estágio integrado de multiplicação por avalanche. Esses sensores são denominados EMCCDs (*Electron Multiplied Charge Coupled Device*). Um dos focos deste trabalho é o estudo, caracterização e aprimoramento das câmeras que integram o BTFI, de modo que se possa otimizar a eficiência na extração das imagens mediante a multiplicação da corrente oriunda do sinal de interesse com a máxima redução do ruído. Alguns dos principais aspectos mecânicos e eletrônicos dessas câmeras serão descritos ao longo deste texto.

A estrutura mecânica do instrumento BTFI é descrita na Figura 1, onde os principais componentes são identificados, com destaque para o posicionamento das câmeras EMCCD identificadas pelas elipses. Além das duas câmeras e dos dois principais elementos ópticos citados (iBTF e *Fabry-Perot*), o instrumento BTFI conta ainda com um obturador, duas rodas de filtros ópticos (de 6 e 8 posições) e uma roda de máscaras. Toda essa estrutura demonstra a versatilidade e complexidade do instrumento BTFI, que permite ao mesmo operar em vários modos de observação, com a possibilidade de atender diversos objetivos científicos da comunidade astronômica.

Figura 1 - Estrutura mecânica do instrumento BTFI, detalhe do posicionamento das câmeras EMCCD. Fonte: autor.

1.4 Objetivos

O objetivo central desta pesquisa é otimizar o funcionamento das câmeras astronômicas do instrumento BTFI para conseguir a melhor relação sinal-ruído dentro de pré-requisitos estabelecidos pelo projeto e pela forma como o instrumento trabalha. O instrumento BTFI foi projetado para operar com altas taxas de leitura (MHz) e baixos tempos de exposição (centenas de milissegundos). É essencial portanto, minimizar todas as fontes de ruído para otimizar a relação sinal-ruído. Deste modo, definiu-se que o ruído total da câmera, seja a soma de todas as fontes de ruído (leitura, CIC e térmico), não deve ultrapassar o limite de 0,5 elétrons/pixel mesmo para longos tempos de exposição (dezenas de segundos). Essa condição operacional garante a possibilidade de trabalhar no regime de contagem de fótons. Para isso, foram adotadas as seguintes especificações como metas: ruído e leitura menor ou igual a 0,3 elétrons/pixel, ruído CIC menor ou igual a 0,05 elétrons/pixel e ruído térmico (corrente de escuro) menor que 0,01 elétrons/pixel/segundo. Com os valores de ruídos pré-estabelecidos é possível atingir um ruído total menor que 0,5 elétrons/pixel, mesmo para tempos de exposição da ordem de 10 segundos, muito acima do regime normal do instrumento BTFI.

Ajustar e otimizar uma câmera astronômica para operar em níveis de ruído tão reduzidos já é um grande desafio por si só. Para atingir o objetivo principal, ainda é preciso alcançar outras metas intermediárias, como: estabilidade na temperatura de operação da câmera de no mínimo 0,5°C, para garantir o ruído de corrente de escuro especificado; ganho EM controlado na ordem de centenas, operando normalmente e estável em aproximadamente 1.000, mas podendo atingir valores maiores para operação do instrumento no regime de contagem de fótons; estabilidade (ordem de semanas) no comportamento geral da câmera.

O principal desafio e consequente contribuição deste trabalho é compreender e justificar a improvável relação entre o ganho EM da câmera e o valor de sua pressão interna que, a princípio, não possuem nenhuma relação direta. Conhecer a fundo o funcionamento e especificidades do sistema é fundamental para elaborar uma hipótese de solução para o comportamento apresentado.

2 Sensores CCD

Foi no final dos anos 60, nos laboratórios da empresa americana *AT&T Bell Labs*, que Willard S. Boyle e George E. Smith desenvolveram o primeiro dispositivo eletrônico capaz de mover cargas numa superfície. Esse dispositivo, denominado de “*Bubble Charge Device*”, era capaz de mover cargas injetadas externamente, mas não de capturar cargas. No início dos anos 70 foi adicionado ao dispositivo a capacidade de coletar cargas pelo efeito fotoelétrico e então surgiu o CCD (*Charge Coupled Device*), ou dispositivo de carga (BOYLE; SMITH, 1976).

Mesmo com baixa eficiência de captação e transporte de cargas (0,5%), os primeiros CCDs fabricados já possuíam muitas vantagens em relação aos filmes fotográficos (HEGYI; BURROWS, 1980) e rapidamente causaram uma grande revolução nas câmeras fotográficas e, consequentemente, na Astronomia. Os CCDs melhoraram o poder de captação de luz dos telescópios em aproximadamente duas ordens de grandeza. Hoje em dia, um astrônomo amador com uma câmera CCD e um pequeno telescópio de 15cm pode coletar muito mais luz que um astrônomo profissional na década de 60, equipado com chapas fotográficas e um telescópio de 1m (JANESICK, 2001).

2.1 Geração de carga

O efeito fotoelétrico é fundamental no funcionamento do CCD. Quando um feixe luminoso interage com a superfície do CCD, ocorre a liberação de elétrons por meio do efeito fotoelétrico. A quantidade de elétrons liberados é proporcional à intensidade do feixe incidente.

Os átomos presentes em um cristal de silício possuem elétrons dispostos em bandas de energia discretas. A banda de energia mais baixa é chamada de banda de valência, e a banda superior é a banda de condução. A maioria dos elétrons ocupa a banda de valência, mas podem ser transferidos para a banda de condução através da absorção de energia por aquecimento ou pela incidência de um fóton, por exemplo. A energia necessária para esta transição da banda de valência para a

banda de condução é de 1,14 elétrons-volt. Qualquer fóton com energia entre 1,14 e 4,00 elétrons-volt será capaz de excitar um elétron para a banda de condução. Para valores de energia acima disso os CCDs tornam-se insensíveis, pois o silício torna-se transparente (HOWELL, 2006).

Estando na banda de condução, o elétron está livre para se mover na estrutura do cristal de silício. O elétron que foi transferido para banda de condução deixa uma lacuna na banda de valência que age como um portador de carga positiva. Na ausência de um campo elétrico externo, a lacuna e o elétron irão rapidamente recombinar-se, sendo neutralizados. Já em um detector CCD, um campo elétrico é introduzido para manter essas cargas separadas e evitar a recombinação. O elétron que foi liberado representa um fóton incidido na superfície do CCD e será transportado até sua saída.

A seguir é apresentada uma analogia para explicar o funcionamento dos CCDs denominada analogia dos baldes, ilustrada pela Figura 2: Um determinado número de baldes (pixels) é distribuído através de um campo (plano focal de uma câmera) em uma matriz quadrada. Os baldes são colocados no topo de uma série de correias transportadoras paralelas (registros paralelos ou colunas do CCD), e a chuva (fótons) que cai em todo o campo é recolhida por esses baldes. As correias transportadoras estão inicialmente paradas, enquanto a chuva lentamente enche os baldes (durante o tempo de exposição). Quando o obturador da câmera é fechado (quando a chuva cessa), as correias transportadoras paralelas começam a girar e a transferir os baldes de chuva. Quando os baldes de cada coluna chegam ao final da correia, seus conteúdos são passados para um sistema de baldes em uma correia horizontal (registro serial), que carrega o conteúdo de cada balde para ser quantificado por um cilindro medidor (amplificador eletrônico) no canto do campo.

Figura 2 - Analogia dos baldes ilustrando o funcionamento de um CCD. Fonte: adaptado de (JANESICK, 2001).

2.2 Coleta de carga

Um pixel de um CCD é na verdade um pequeno capacitor que armazena elétrons gerados pelo efeito fotoelétrico. A área de imagem do CCD é composta pela repetição de uma célula básica que pode ser vista na Figura 3. Este padrão básico é repetido várias vezes para formar a área útil de captação de luz do sensor, ou área de imagem. A resolução do sensor é definida pelo tamanho de sua área útil e pelo tamanho de cada pixel que a compõe. Por exemplo, um sensor que possui uma área de imagem com 1k x 1k pixels onde cada pixel mede 10 μm , totalizando 1 milhão de pixels e uma área de 100 mm^2 (LAVINE et al., 1997). Cada um dos eletrodos horizontais está conectado separadamente às fases 1, 2 e 3 do sensor.

Figura 3 - Célula básica de um sensor CCD. Fonte: Autor.

A analogia dos baldes pode também ser explicada através de seu equivalente eletrônico real para explicitar como a coleta de carga é realizada de fato. Os sensores CCD mais empregados atualmente e, conceitualmente os mais simples de serem entendidos, são os do tipo de três fases (JANESICK, 2001). A Figura 4 mostra o esboço original de uma das primeiras anotações feitas por Boyle e Smith para explicar a configuração básica de um sensor CCD de três fases.

Figura 4 – Esboço original do diagrama de Willard Boyle e George Smith. Fonte: (JANESICK, 2001).

Os fótons que são absorvidos pelo CCD criam os pares elétron-lacuna. Durante um determinado tempo (tempo de integração da carga), dois dos eletrodos em cada pixel são mantidos com potencial positivo. Os elétrons são então atraídos para o

potencial mais positivo no sensor, onde criam "pacotes de carga". Cada pacote corresponde a um pixel. O eletrodo vizinho, com seu potencial mais baixo, age como a barreira que define os limites verticais do pixel.

2.3 Transferência da carga

A carga coletada é transferida através de uma temporização específica das 3 fases do CCD. Ela se inicia quando barreiras e poços de coleta são gerados aplicando-se tensões nas fases corretas e na sequência determinada. A Figura 5 ilustra esta sequência e é explicada detalhadamente a seguir.

No tempo t_1 o potencial da fase 1 é mantido alto. As cargas geradas na área da fase 1 serão coletadas por essa fase. Elétrons gerados nas fases de barreira (ou seja, fases 2 e 3, cujos potenciais estão baixos) irão, rapidamente, propagar-se para a fase 1 devido ao seu maior potencial. No tempo t_2 a transferência de cargas começa. Durante t_2 o potencial da fase 2 é mantido alto, formando o mesmo poço que existe na fase 1. A carga que foi gerada então, agora está dividida entre esses dois poços. Vale lembrar que ainda em t_2 o potencial da fase 3 está baixo e, com isso, a barreira de potencial é formada. No tempo t_3 a fase 1 é colocada em potencial baixo, o que força a carga a transferir-se totalmente para a fase 2. A carga é então transferida da fase 2 para a fase 3 no tempo t_4 . Este processo se repete até que a carga tenha sido movida completamente. (JANESICK, 2001)

Figura 5 – Diagrama de três fases mostrando a carga sendo transferida da esquerda para direita. Fonte: (JANESICK, 2001).

É importante notar que ao se inverter quaisquer duas fases entre si, a transferência da carga muda de sentido. Por exemplo, caso as fases 1 e 2 sejam invertidas na Figura 5, a carga não será transportada da esquerda para direita e sim da direita para esquerda. Esta característica é importante, pois, em sensores EMCCDs, tanto a saída convencional quanto a saída amplificada podem ser utilizadas. Isso irá depender da direção em que a carga é movida quando se encontra no registro serial.

2.4 Medição da carga

Uma vez que a carga acumulada no pixel foi transferida, ela precisa ser medida. Para essa medição os elétrons são transferidos para um pequeno capacitor na saída conectado a um transistor MOSFET. Um aspecto crítico da medição de carga é quão pequeno é o capacitor na saída. A tensão associada com carga do elétron é $V = q/C$, onde q é carga do elétron. Assim, quanto maior a capacitância, menor será a tensão gerada pelo elétron. O ganho típico é da ordem de 1 a 20 $\mu\text{V}/e^-$. Um capacitor de 0.075 pF terá um ganho de 2.1 $\mu\text{V}/e^-$.

Outro aspecto importante no processo de medição de carga são as flutuações

provenientes da corrente que passa pelo MOSFET. Quando o MOSFET trabalha no modo linear (que é o caso do amplificador do CCD), a “fonte” age como doadora de elétrons e o “dreno” como coletor. A taxa de elétrons entre a fonte e o dreno, e consequentemente, a corrente, é função da tensão da “porta”. As variações da corrente são causadas basicamente pela distribuição de Maxwell-Boltzmann da taxa de elétrons (componente térmico), que é semelhante ao ruído de uma resistência simples (uma vez nesse regime, o MOSFET age como uma resistência fixa entre a fonte e o dreno). Esse ruído Gaussiano provoca uma incerteza na tensão de saída do CCD. Essa incerteza é conhecida como *readout noise* ou ruído de leitura. O ruído de leitura é o fator determinante da sensibilidade do CCD.

Independentemente do componente térmico, o ruído de leitura é apenas marginalmente reduzido pelo resfriamento do CCD. O ruído de tensão da resistência é dado por (DAIGLE, 2010):

$$\sigma_v = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} \quad (1)$$

Onde:

- k: constante de condutividade térmica
- T: temperatura
- R: resistência
- Δf : largura de banda (em Hz, pois trata-se de um ruído branco) na qual a medida é realizada

O ruído de leitura, portanto, não se limita ao ruído branco induzido pelo MOSFET, e o mesmo não varia com a frequência. Outro componente, esse sim variando com a frequência, é conhecido como ruído de flutuação (*flicker noise*). As “armadilhas” existentes na interface Si-SiO₂ do MOSFET são as principais responsáveis por esse ruído. Os elétrons que ficam presos nas armadilhas da interface Si-SiO₂ se soltam aleatoriamente causando perturbações positivas e negativas no fluxo da corrente. Os tempos envolvidos nessa captura/soltura de elétrons variam muito, o que torna o ruído aleatório. Esse ruído é maior em baixas frequências pois as armadilhas possuem mais tempo para acumular cargas. Em altas frequências esses ruídos são desprezíveis e o ruído branco torna-se dominante. O ruído de leitura total do CCD é

a integral do ruído em todo espectro da frequência. Geralmente utiliza-se um filtro passa-banda na saída do CCD que limita as flutuações em baixas frequências e reduz o nível de ruído branco em altas frequências. Geralmente o filtro possui de 2 a 3 vezes a frequência de leitura do pixel, portanto de 20 a 30 MHz para uma taxa de leitura de 10 MHz.

2.5 Conversão da carga

Uma vez que os elétrons acumulados em um pixel produzem um valor equivalente em tensão, essa tensão pode facilmente ser convertida em um valor numérico. A tensão de saída do amplificador do CCD possui três níveis: um nível de reset, um nível de referência e um nível do sinal.

O nível de reset é gerado quando o capacitor de saída é esvaziado. Esse esvaziamento é necessário para ler os pixels em sequência. Em seguida, o nível de referência proveniente da tensão gerada pelo capacitor de saída é comparado com os elétrons do pixel. O nível de referência corresponde a um sinal de 0 elétrons. Em seguida, o nível de sinal é gerado pela carga dos elétrons do pixel no capacitor.

Entretanto, o nível de referência não se mantém estável pixel a pixel. Na verdade o capacitor de saída não é completamente descarregado durante o reset (a descarga de um capacitor é uma função de $e^{-t/\tau}$). Além disso, algumas cargas parasitas podem permanecer no capacitor. Assim a diferença entre o sinal de referência e o nível do sinal será estável dependendo do nível do sinal (e das limitações impostas pelo ruído de leitura). Para cada pixel, o nível de referência deve ser medido, para que seja possível medir com precisão o nível do sinal. O circuito responsável por essa operação é conhecido como *Correlated Double Sampling* ou CDS.

Um circuito CDS é um método de amostragem onde duas amostras são tomadas durante o ciclo de leitura do pixel. A primeira amostragem acontece quando o pixel ainda está no estado de reset e a segunda quando a carga já foi transferida para a saída. Os dois valores amostrados são então usados como sinais diferenciais nos estágios seguintes, como: ADC e amplificador. A vantagem dessa técnica em relação

a uma amostragem simples é que ela praticamente elimina o ruído padrão fixo inerente dos detectores CCD (WHITE, 1975).

A tensão de saída do circuito CDS é então digitalizada por um conversor analógico digital, ADC. Existem muitos tipos de conversores, mas todos possuem a mesma restrição: baixa precisão para altas taxas de conversão. Tipicamente, para os CCDs científicos, a conversão é feita em 14 ou 16 bits (possibilitando 16.384 ou 65.536 valores). Porém, numa maior resolução, leva-se mais tempo para realizar a conversão. Outra característica relevante dos conversores ADC é a linearidade, tanto a linearidade diferencial (de um valor numérico para outro) quanto integral (dentro de toda faixa de operação). Não existe um ADC perfeitamente linear. As características de linearidade do ADC são levadas em conta e precisam ser compensadas para que se obtenha uma resposta linear em relação à saída do CCD.

Frequentemente, um amplificador discreto é colocado entre a saída do CCD e o circuito CDS. O desempenho do circuito CDS e do ADC são geralmente otimizados para uma faixa (em tensão) bem específica. O amplificador discreto é portanto usado para amplificar o sinal de CCD e trazê-lo para essa faixa ideal. Ele pode também adicionar uma constante no nível do sinal do CCD para torná-lo compatível com o ADC. Essa é também uma oportunidade para filtrar o sinal do CCD e remover frequências indesejáveis utilizando, por exemplo, um filtro passa-baixa ou passa-banda.

As fontes de ruído do CCD, do amplificador e do ADC são Gaussianas. Consequentemente, o ruído total do sistema será simplesmente a soma quadrática dessas fontes de ruído. A faixa dinâmica (*dynamic range*) final será restrita por esse ruído, em valor numérico, expresso em função dos valores numéricos possíveis (16384 a 65536 para 14 o 16 bits) por:

$$G_D = 20 \cdot \log \frac{2^N}{\sigma} \quad (2)$$

Onde:

- N : resolução da conversão (em bits)
- σ : ruído total.

Uma vez que o sinal foi convertido a um valor numérico digital, ele não está mais sujeito à ruídos. Quando o sinal analógico do CCD é convertido em um valor numérico, significa que uma quantidade de elétrons X acumulada no CCD irá gerar um valor digital Y . Essa taxa será a relação direta entre o valor digital e o número de elétrons e é denominada de resposta em unidade analógica/digital por elétrons, ou ADU/e^- (*Analog to Digital Unit per electron*). Assim, a partir de um valor Y , é possível obter a quantidade de elétrons, e portanto de fótons, correspondente a esse valor digital.

2.6 Fontes de Ruído

As principais fontes de ruído presentes nos sensores CCDs são a corrente de escuro (*dark current*) e o ruído de leitura de saída ou simplesmente ruído de leitura (*readout noise*) (HOWELL, 2006). Cada uma delas será exposta de forma mais detalhada a seguir.

2.6.1 Corrente de Escuro

Em um sensor CCD, os elétrons podem ser gerados pela absorção de fótons ou por excitação térmica. Os elétrons produzidos por esses dois efeitos são indistinguíveis (WIDENHORN et al., 2002). Portanto, as cargas geradas termicamente são indesejáveis e recebem o nome de corrente de escuro.

A corrente de escuro é uma característica intrínseca dos semicondutores. Ela advém da geração de cargas por efeito térmico. A vibração das partículas no Silício seguem a distribuição de Maxwell-Boltzmann. Acima do zero absoluto, algumas partículas podem ter uma energia de vibração maior que a energia da banda de valência. Isso explica a necessidade de resfriar o CCD para reduzir a corrente de escuro. O efeito da corrente de escuro pode ser reduzido ou até eliminado (níveis insignificantes) resfriando-se o CCD a temperaturas muito baixas (cerca de -100°C) durante sua

operação (BELETIC et al., 2000). Em detectores que possuem a banda de valência muito estreita (detectores infravermelho, por exemplo), é necessário reduzir a temperatura ainda mais para reduzir os níveis da corrente de escuro.

Câmeras CCD científicas são geralmente refrigeradas com nitrogênio líquido, ou sistemas fechados de compressão e expansão de gás. Aplicando-se essas técnicas de resfriamento, facilmente atinge-se níveis de corrente de escuro de menos de 1 elétron por pixel por hora, praticamente imensuráveis abaixo disso (TULLOCH, 1995). Já as câmeras CCD amadoras são refrigeradas eletricamente, através de células *Peltier*, por exemplo, e possuem um alto nível de corrente de escuro.

O ruído térmico possui um componente temporal: quanto maior for o tempo de exposição do CCD, maior será a quantidade de elétrons gerados pela corrente de escuro. Nos detectores CCD existem três principais regiões responsáveis pela geração da corrente de escuro:

1- A região de depleção (região neutra, onde apenas se encontram íons positivos e negativos fixos na estrutura cristalina) do CCD. Essa região não é considerada em estado de equilíbrio térmico pois não há a geração de elétrons e lacunas. Assim, cargas geradas espontaneamente pelos átomos de Si serão repelidos (lacunas) ou mantidos (elétrons) na região de depleção. Essa é, portanto, a denominada corrente de escuro de depleção.

2- O volume de Si exterior à camada de depleção. Essa zona é isenta de campo elétrico e os elétrons estão distribuídos uniformemente. Os movimentos de lacunas e elétrons são aleatórios e resultam em uma corrente nula. Porém, a uniformidade da distribuição de lacunas e elétrons diminui ao se aproximar da zona de depleção. É possível, portanto, que alguns elétrons saltem para a zona de depleção e permaneçam presos pelo poço de potencial gerado. Essa contribuição caracteriza a corrente de escuro de difusão.

3- A interface Si-SiO₂. Essa componente da corrente de escuro domina as demais. Seu processo de geração é uma espécie de mistura das duas anteriores. O SiO₂ pode ser considerado uma zona de depleção no sentido de

que possui pouquíssimas cargas livres. As cargas geradas espontaneamente podem saltar entre os poços de potencial. Essa componente é denominada corrente de escuro de superfície e pode ser quase completamente removida operando-se o CCD no modo reverso (sinais de *clock* mais negativos que o substrato). A operação do CCD em modo reverso cria uma grande quantidade de lacunas e os elétrons gerados espontaneamente poderiam se recombinar antes de chegarem na zona de depleção. Operar o CCD no modo inverso, porém, provoca um ruído suplementar identificado por injeção de carga que será tratado posteriormente.

Assim, o movimento de cargas causados pelo efeito da temperatura é o processo que provoca a corrente de escuro. Resfriar o CCD minimiza o movimento das cargas e reduz a corrente de escuro, como pode ser visto na Figura 6 e na Figura 7. A Figura 6 mostra o gráfico da corrente de escuro em função da temperatura para o CCD modelo TEK1024CCD, da fabricante Tektronix. Já a Figura 7 apresenta a corrente de escuro total de um CCD cujos pixels possuem 12x12 μm em função da temperatura e da corrente de superfície.

Figura 6 – Corrente de escuro do detector TEK1024CCD em função da temperatura. Fonte: (TULLOCH, 1995).

Figura 7 - Corrente de escuro de um CCD em função da temperatura e da corrente de superfície. Fonte: (JANESICK, 2001).

2.6.2 Ruído de Leitura

O ruído de leitura consiste em dois componentes. O primeiro componente advém do amplificador *on-chip* e é gerado durante a conversão da carga coletada em tensão. Esta conversão não é perfeitamente reproduzível em sequência (JANESICK, 2001). Até mesmo para o caso hipotético da leitura do mesmo pixel duas vezes, e a cada vez com a mesma carga, o valor poderá ser um pouco diferente. O tamanho físico do amplificador *on-chip*, a construção do circuito integrado, a temperatura do amplificador e sua sensibilidade, contribuem como um todo para o ruído de leitura em um CCD (HOWELL, 2006). O segundo componente do ruído de leitura trata-se do fato de que a própria eletrônica da câmera poderá introduzir alguns elétrons falsos.

O ruído de leitura representa um limite fundamental do desempenho de um CCD. Esse ruído pode ser diminuído caso haja um aumento do tempo de leitura, ou seja, em CCDs convencionais ruídos de leitura menores só são possíveis para taxas de leitura mais baixas. Assim cria-se uma relação de compromisso entre a taxa de leitura e o ruído de leitura do CCD, no que diz respeito ao desempenho do sensor. Os níveis típicos de ruído de leitura para sensores CCDs científicos em função da taxa de leitura são mostrados na Figura 8. Nota-se o aumento do nível do ruído diretamente proporcional ao aumento da taxa de leitura. Estão representados CCDs convencionais para aplicações em astronomia e espectroscopia em situações reais e simuladas (STANFORD; HADWEN, 2003).

Figura 8 – Ruído de leitura para sensores científicos convencionais em função da taxa de leitura. Fonte: adaptado de (STANFORD; HADWEN, 2003).

2.7 Imagens de calibração

As imagens provenientes do CCD precisam ser tratadas antes de seu uso científico. Esse tratamento compensa as conhecidas “imperfeições cosméticas” e ameniza a contribuição de algumas fontes de ruído. O objetivo é tornar os pixels comparáveis entre eles em termos de resposta à luminosidade e remover estruturas fixas geradas pelo CCD.

O tratamento da imagem considerada como “iluminada”, ou seja, imagem de um objeto observado, necessita de imagens de calibração que são usadas para caracterizar o CCD. Essas imagens são: imagens *bias*, imagens *darks* e imagens *flats*. Cada tipo de imagem de calibração é utilizada com determinados objetivos que serão descritos a seguir.

2.7.1 Imagem Bias

A imagem bias permite subtrair das outras imagens o sinal médio induzido pelo canal analógico (CCD, amplificador, ADC). Esse sinal médio é propositalmente gerado para prevenir valores negativos gerados pelo ADC. Na verdade, mesmo que a resposta do CCD em ADU/e⁻ seja conhecida, o ruído de leitura interfere de forma que um pixel que contenha 0 (zero) elétrons não produz necessariamente um valor de 0 Volts na saída. Assim, uma tensão negativa pode chegar ao ADC. A adição de um sinal médio da ordem de 5 a 10 vezes o ruído de leitura garante sempre um valor positivo no ADC. Esse sinal médio precisa ser caracterizado e subtraído das imagens geradas pelo CCD de forma que se obtenha $0 \text{ ADU} = 0 \text{ e}^-$.

O sinal médio induzido também existe devido ao fato de que nenhum sistema analógico é perfeito, tornando muito difícil obter uma resposta natural onde $0 \text{ ADU} = 0 \text{ e}^-$. O próprio CCD algumas vezes induz um sinal negativo que pode ser compensado em parte, por exemplo, pelo amplificador discreto.

A imagem bias é obtida com CCD sem luz (obturador fechado) e com tempo de exposição zero. Ou seja, o CCD é lido sucessivamente para produzir um tempo de integração efetivo o mais curto possível. Dessa forma a imagem bias apresentará apenas os componentes indesejáveis citados acima e estará livre dos ruídos térmicos (corrente escura).

2.7.2 Imagem *Dark*

As imagens *dark* são utilizadas para minimizar o efeito da corrente escura nas imagens do CCD. Como as *bias*, as imagens *dark* são obtidas completamente sem luz, mas com tempos de exposição variados. Utilizam-se os mesmos tempos de exposição usados para as imagens obtidas durante a observação astronômica. É feita uma média das várias imagens *dark* (geralmente 10). De cada imagem observada é então subtraída a média das imagens *dark* de mesmo tempo de exposição, obtendo-se assim, uma imagem final com ruído de corrente de escuro praticamente nulo. Podemos ver na Figura 9 um exemplo do efeito da correção utilizando-se imagens *dark*. À esquerda sem correção e à direita com correção.

Figura 9 – Exemplo de correção de imagem astronômica utilizando-se imagens *dark*. Fonte: (MA, 2014).

2.7.3 Imagem Flat

A imagem flat permite compensar as diferentes respostas à excitação luminosa entre os pixels que compõem o CCD. Vários fatores podem influenciar na resposta de um pixel, desde a resposta intrínseca do pixel, devido à defeitos de fabricação, até a presença de poeira na superfície do CCD. Portanto, é importante compensar esses defeitos.

A imagem flat é obtida iluminando-se uniformemente toda a superfície do CCD. Idealmente, com uma fonte que possua a mesma faixa espectral dos objetos observados, pois a não-uniformidade da resposta dos pixels pode variar em função do comprimento de onda da luz observada. Uma vez obtida a imagem flat, a resposta relativa pixel a pixel é calculada e a imagem flat resultante é então aplicada

à imagem a ser corrigida através de uma divisão simples pixel a pixel. Assim, a resposta dos pixels à excitação luminosa torna-se normalizada em toda a superfície do CCD.

2.8 Sensores EMCCD

Como visto, o sensor CCD convencional é fundamentalmente limitado pelo ruído de leitura em aplicações que exigem altas taxas de transferência e níveis de luz muito baixos. Esse ruído de leitura da saída pode ser reduzido a níveis insignificantes, em relação ao sinal lido, com a utilização de sensores denominados EMCCDs, *Electron Multiplied Charge Coupled Device*. Em princípio, estes dispositivos eram denominados de L3CCD, *Low Light Level* CCD e foram descritos e detalhados no ano de 2000 em (COCHRANE; SPENCER, 2000) e (WILSON, 2000).

A principal característica que distingue esta tecnologia dos CCDs convencionais é a inclusão de um registro serial prolongado no chip do sensor, denominado registro de ganho. Este registro prolongado produz um ganho de multiplicação através do processo de ionização por impacto no silício. Ao elevar a carga coletada acima do ruído de leitura do dispositivo, o EMCCD pode ser empregado para imageamento de fontes de luz extremamente fracas, sem a necessidade da utilização de intensificadores externos, mesmo a altas taxas de leitura.

A estrutura básica de um EMCCD do tipo frame-transfer é mostrada na Figura 10. Um dispositivo frame-transfer possui uma área de armazenamento do mesmo tamanho da área de coleta de luz que é utilizada para armazenar as cargas coletadas antes de transferi-las. No lado esquerdo (a) da figura, a estrutura é idêntica à de um CCD convencional. A diferença do EMCCD pode ser vista no lado direito (b), onde o registro serial prolongado, ou registro de ganho é mostrado localizado antes do amplificador da saída. É no registro de ganho que a multiplicação de elétrons ocorre. Em algumas aplicações esse ganho pode chegar a valores maiores que 1000 (JERRAM, 2001).

Figura 10 - Estrutura típica de um detector EMCCD. Fonte: adaptado de (JERRAM, 2001).

A Figura 11 mostra um EMCCD do tipo *full-transfer* (sem área de armazenamento) e ilustra o funcionamento do registro de ganho (BERNARD; COATES, 2005). As três fases do registro serial (R1, R2 E R3) são normalmente alimentadas com uma tensão de cerca de 10V. No caso dos EMCCDs uma dessas três fases é substituída por dois eletrodos, conforme visto na Figura 11a. O primeiro eletrodo (Rdc) é mantido a uma tensão constante e o segundo (R2) é operado como os outros, porém, a tensão aplicada nesse eletrodo (fase de alta tensão) é muito mais alta, geralmente de 40V a 50V, e é denominada de R2HV (*high voltage*). Este esquema resulta em um intenso campo elétrico que é suficientemente alto para que a transferência de elétrons seja submetida à ionização por impacto. Este processo pode gerar novos elétrons em cada transferência do registro de ganho e pode ser visto na Figura 11b.

Figura 11 - Funcionamento do registro de ganho de um EMCCD. Fonte: adaptado de (BERNARD; COATES, 2005).

A probabilidade (P) de que a multiplicação de elétron ocorra em cada etapa no registro de ganho é pequena, cerca de 1% a 2%. Geralmente, o registro de ganho possui cerca de 600 (N) elementos e, portanto, a probabilidade de multiplicação em todo registro ou fator de ganho (G) é dada por (JERRAM, 2001):

$$G = (1+P)^N \quad (3)$$

Por exemplo, considerando-se uma probabilidade P de 1%, haverá um ganho total de aproximadamente 392 ($1,01^{600}$). Na sequência do registro estendido, o amplificador de saída é do mesmo tipo que o normalmente usado em um CCD convencional, porém localizado na outra extremidade deste registro.

Como visto anteriormente, o ruído de leitura é gerado durante a conversão da carga coletada em tensão. Esse ruído é geralmente expresso em elétrons (um elétron é gerado pela absorção de um fóton na área de imagem do CCD). Devido ao fator de ganho do EMCCD, o ruído de leitura equivalente quando expresso como elétrons detectados na área de imagem do sensor é reduzido de acordo com (DAIGLE et al., 2004):

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{real}}{G} \quad (4)$$

Onde:

- σ_{real} : Ruído de leitura real
- G: fator de ganho

Desta forma, mesmo a altas taxas de leitura e para fontes muito fracas de observação, o ruído de leitura é baixo em relação ao sinal. O fator de ganho G pode ser ajustado variando-se a amplitude da fase de alta tensão. Não é possível prever qual o valor de ganho que será aplicado na imagem final obtida com o EMCCD. Para uma estimativa do valor do ganho G é necessária a aquisição de algumas imagens e a aplicação de rotinas de softwares, conforme, por exemplo, descrito em (DAIGLE; CARIGNAN; BLAIS-OUELLETTE, 2006).

Idealmente, o mesmo valor de ganho deve ser aplicado para cada elétron que passe pelo registro de ganho. Entretanto, devido à natureza probabilística do processo de multiplicação, existe uma grande dispersão no número de elétrons gerados para cada um dos elétrons que passem por esse registro.

2.8.1 Determinação do ganho EM (*Electron Multiplying*)

A valor do ganho EM produzido pelo EMCCD deve ser determinado com precisão para que seja possível analisar as imagens geradas corretamente. Na realidade, para se obter a quantidade de elétrons acumulados em um pixel, deve-se dividir o sinal de saída de EMCCD pelo ganho médio do registro EM. Diferente do ganho recíproco do CCD convencional (em e-/ADU), o ganho EM é muito sensível a variações da temperatura e da tensão dos sinais de *clock*, como observado na

Figura 12. Portanto, é muito importante que o ganho EM possa ser medido de forma fácil e frequente.

Figura 12 - Ganho do registro EM em função da tensão da fase de alta tensão (R2HV) e da temperatura. Fonte: (E2V, 2008).

A probabilidade p , de haver x elétrons na saída do registro EM em função do ganho, g , e do número de elétrons na entrada n , é dada pela equação (JERRAM, 2001):

$$p(x, n, g) = \frac{x^{n-1} \cdot e^{-x/g}}{g^n \cdot (n-1)!} \quad (5)$$

Utilizando-se a eq.(5) é possível encontrar o ganho EM a partir de várias (~1000) imagens bias. Essas imagens possuem um nível de sinal uniforme e apenas poucos pixels acumulam mais de um elétron, pois esse tipo de imagem possui apenas injeção de carga e corrente de escuro. Tipicamente o fluxo médio deve ser menor que 0,01 elétron/pixel, de modo que a probabilidade de existir 2 elétrons por pixel é ínfima (0,005 nesse caso). Uma vez obtidas todas as imagens bias, a eq.(5) pode ser ajustada ao histograma das mesmas para se encontrar o ganho, g .

2.8.2 O Ruído de Multiplicação

O ruído de multiplicação é um subproduto da natureza probabilística da tecnologia EMCCD (MACKAY et al., 2001). Quando um elétron é submetido a um ganho de, por exemplo, 300 vezes, ele não é amplificado para exatamente 300 elétrons. Na verdade existe uma distribuição no sinal de saída com um valor médio de 300 vezes o sinal de entrada. Portanto, não se sabe o ganho exato em cada pixel.

O comportamento estatístico do ganho gerado pelo registro multiplicador adiciona um fator de excesso de ruído, que atinge um valor de $2^{1/2}$ em ganhos elevados. Há ainda uma influência na taxa sinal-ruído (SNR) do sistema, o efeito do registro multiplicador no SNR é o mesmo que reduzir à metade a eficiência quântica do EMCCD (STANFORD; HADWEN, 2003).

Para CCDs convencionais, temos a seguinte equação para a razão sinal ruído (DAIGLE et al., 2004):

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S + T + n\sigma^2}} \quad (6)$$

Onde:

- S: número de elétrons coletados por pixel durante o tempo de integração
- T: corrente de escuro em elétron por pixel
- n: número de leituras
- σ : ruído de leitura

Na eq.(6) é clara a degradação da taxa sinal-ruído (SNR) devido ao ruído de leitura.

Para EMCCDs, no entanto, devemos fazer algumas modificações. Primeiro o ruído de leitura σ deve estar de acordo com a eq.(4), ou seja, o fator de Ganho G deve ser levado em consideração. Deve-se ainda acrescentar a influência do fator de ruído de multiplicação. Assim, é obtida a seguinte equação (STANFORD; HADWEN, 2003):

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{F^2 S + F^2 T + n \frac{\sigma^2}{G^2}}} \quad (7)$$

Onde:

- G: valor do ganho do estágio de multiplicação ou fator de ganho
- F: fator de ruído de multiplicação

Observa-se que, com o aumento de G, o termo relativo ao ruído de leitura desaparece, mas o problema do ruído de multiplicação passa a existir. A Figura 13 faz uma comparação do SNR entre um CCD convencional e um EMCCD modelo CCD60 e ilustra bem essa situação. Nota-se que, para fontes de luz fracas, o EMCCD tem melhor SNR que o CCD, já para fontes com alto fluxo, a utilização de CCDs convencionais é mais indicada (TULLOCH, 2004a).

Figura 13 – Comparação do SNR entre CCD convencional e um EMCCD modelo CCD60 em função do fluxo de fótons por pixel. Fonte: Adaptado de (TULLOCH, 2004a).

Para reduzir o efeito do ruído de multiplicação, o EMCCD pode ser usado no modo de contagem de fótons ou *Photon Counting Mode* - PCM. Neste modo, o valor de cada pixel é comparado a um limite, ou "*threshold*". Desta forma, quando o valor detectado ultrapassa este limite, um único fóton-elétron é computado. Este modo de operação deve ser utilizado apenas para níveis moderados de iluminação para evitar perdas de eficiência quântica devido à coincidência de elétrons (TULLOCH, 2004b).

A escolha do valor de *threshold* para o EMCCD é extremamente importante. Valores muito altos diminuirão a quantidade de fóton-elétrons detectada enquanto valores muito baixos aumentam a probabilidade de falsos eventos (DAVIDSON, 2006).

2.8.3 O ruído CIC

O CIC, ou *Clock Induced Charge*, é um ruído produzido pelas transições de estado nas fases da área de imagem do sensor e também, com impacto menor no ruído final, no registro serial (DONAL; DENVIR; EMER, 2002). O CIC produz picos que podem parecer fótons e que serão levados até a imagem final.

As transições das fases paralelas (área de imagem) podem produzir cargas falsas através da multiplicação por avalanche de lacunas nas regiões da coluna de isolamento (JERRAM, 2001). O ruído CIC aparece em todo tipo de CCD, mas nos CCDs convencionais ele geralmente é encoberto pelo ruído de leitura e, por isso, é ignorado. Já nos EMCCDs, esses falsos elétrons gerados são amplificados pelo registro de ganho, como qualquer elétron o seria, e além disso, mais alguns elétrons podem ser gerados nesse registro estendido.

Para que o ruído CIC seja minimizado, as tensões das fases do sensor devem ser cuidadosamente manipuladas quanto às suas transições e amplitudes. No capítulo 4 será mostrada uma forma de controlar o EMCCD de modo a minimizar esse ruído.

2.8.4 O EMCCD modelo CCD-207

O EMCCD modelo CCD-207 é um detector da fabricante e2v. Trata-se de um dispositivo *full-frame* ou de “quadro completo”. Esse sensor não possui uma seção de armazenamento (comum nesses detectores), mas somente a seção de imagem. Assim, o sensor converte fótons em carga na seção de imagem e já transfere a carga diretamente para o registro de saída. Depois, a carga é multiplicada no registro de ganho, antes da conversão para voltagem no amplificador de saída. A

Figura 14 mostra o detector: acima, um diagrama com as principais partes e abaixo uma foto do sensor. O CDD207 pode operar a taxas acima de 15 MHz, com níveis de ruído de menos de um elétron por pixel. Alguns parâmetros do CCD207 retirados da folha de dados (E2V, 2008) são listados abaixo:

Área ativa de imagem: 26.11 mm x 25.73 mm

Seção ativa de imagem (em pixel): 1632(horizontal) x 1608(vertical)

Tamanho do pixel de imagem: 16x16 μm

Número de amplificadores de saída: 2

Fator de preenchimento: 100%

Colunas adicionais para referência: 16+16

Linhas adicionais para referência: 4

Elementos multiplicadores: 536

Figura 14 O CCD207 do tipo full-frame. Fontes: (E2V, 2008) e autor.

2.9 O controlador CCCP

Um controlador CCD é um sistema eletrônico responsável por gerar os sinais para o CCD, bem como captar os sinais gerados pelo mesmo. Esse controlador normalmente contém: uma seção analógica de baixo ruído para amplificação e filtragem do sinal de vídeo do CCD, um conversor analógico-digital, um processador de alta velocidade para geração das formas de onda e um canal de comunicação. A Figura 15 ilustra os componentes básicos de um controlador CCD genérico. Os sinais que controlam o CCD são gerados por dispositivos eletrônicos DSPs e passam por um conversor digital-analógico (D/A) antes de serem entregues ao detector. O sinal da leitura do CCD faz o caminho inverso. O valor de tensão, que representa a carga coletada, passa por um conversor analógico-digital (A/D) antes de ser transferido para o computador.

Figura 15 – Diagrama de blocos simplificado com principais componentes de um controlador CCD. Fonte: autor.

O instrumento BTFI utiliza o controlador CCCPv2 (*CCD Controller for Counting Photons Version 2*) para a manipulação dos detectores. O CCCP é um controlador desenvolvido numa parceria entre a Universidade de Montreal e o Laboratório de Astrofísica de Marselha, na França. Esse controlador possui a peculiaridade de gerar sinais de onda senoidais para uma das fases do registro de ganho EM, o que leva a uma melhor relação sinal/ruído nas imagens obtidas, devido ao baixo nível de ruído CIC. Utilizando uma arquitetura de temporização de sinais específica, o CCCP manipula o CCD de uma forma diferente das conhecidas até então. Seu projeto é

otimizado para manipular os dados de EMCCDs a uma taxa de transferência de pixel que pode atingir até 20 MHz. O controlador CCCP ainda possui um excelente desempenho quanto ao nível de ruído CIC (*Clock Induced Charge*), que é a fonte de ruídos dominante em sensores EMCCD a altas taxas de leitura e baixo fluxo de iluminação. Usando esse controlador, o ruído CIC foi reduzido para 0.001 - 0.0018 elétron/pixel (dependendo do ganho EM), fazendo com que o modo PCM (*Photon Counting Mode*) seja possível e com resultados eficientes (DAIGLE et al., 2008).

A peculiaridade do controlador CCCP encontra-se no fato de ele utilizar um sinal de onda senoidal para o *clock* de alta tensão do sistema. Para isso, é utilizado um circuito específico que precisa entrar em ressonância com a capacitância do detector, e assim o sinal é gerado de forma mais limpa e otimizado. Para que o circuito ressonante seja corretamente ajustado, deve-se ajustar um capacitor variável presente no controlador que pode variar de 6 pF a 30 pF. O objetivo é fazer com que a capacitância do registro EM do sensor entre em ressonância com a indutância da placa eletrônica do controlador. Esse ajuste existe para que controlador possa trabalhar com diferentes tipos de EMCCD. No caso do CCD207 usado neste trabalho, a capacitância do registro EM é de 30 pF (E2V, 2008). Para operá-lo em 10M Hz, a capacitância total (CCD + placa + capacitor variável + cabos) deve ser de 160 pF, de acordo com a Figura 16.

Figura 16 – Frequência de ressonância da fase de alta tensão (R2HV) versus a soma das capacitâncias (registro EM e capacitores de compensação). Fonte: (PHOTON ETC, 2009).

Através de consultas em (PHOTON ETC, 2009) e contato direto com o fabricante do controlador, sabe-se que os capacitores presentes no circuito totalizam 94 pF (dois capacitores de 47 pF). Assim, a soma das capacitância da placa e do CCD é de 124 pF. Considerando-se o capacitor variável de 6 pF a 30 pF, resta para os cabos uma capacitância de no máximo 30 pF e no mínimo 6 pF.

Essa informação dos valores de capacitância permitidos para os cabos no circuito de ressonância é muito importante no projeto, e sua implicação direta no funcionamento da câmera será abordada adiante.

2.10 Câmeras CCD

A câmera CCD é parte essencial da cadeia de aquisição de imagens. É na câmera que o sensor CCD fica alojado. A câmera é responsável por levar os sinais gerados pelo controlador para o CCD, e ainda captar os sinais gerados pelo CCD e entregar para o controlador. Ou seja, a câmera é responsável pela interface entre o CCD e o controlador. Esses sinais devem ser bem isolados e não podem conter ruídos. A câmera ainda deve apresentar determinadas condições físicas para um correto funcionamento do sensor.

2.10.1 Requisitos de uma câmera CCD

Como citado anteriormente, sensores CCDs devem trabalhar em baixas temperaturas. Assim, a câmera deve de alguma forma, fornecer condições para que o sensor opere em temperaturas da ordem de -100°C , por exemplo. Algumas técnicas empregadas para abaixar temperatura do CCD são: resfriamento por Nitrogênio Líquido, células *Peltier* e ainda sistemas criogênicos com a utilização da compressão e descompressão de gases.

O interior da câmera deve operar a um baixo nível de pressão. Pressões da ordem de 10^{-4} Torr são suficientes para deixar o ambiente interno da câmera livre de contaminação de materiais que possam atrapalhar a operação, ou ainda danificar o CCD quando este estiver em operação. Por exemplo, moléculas de H_2O podem se condensar no CCD devido à baixa temperatura de operação e danificá-lo de forma irreversível. Esses problemas serão abordados novamente em 3.3.

Com intuito de se obter um valor de temperatura fixo no CCD, a câmera deve possuir sensores de temperatura e atuadores (*heaters*). Desta forma consegue-se operar o sensor CCD em determinados valores de temperatura e verificar seu comportamento para cada um desses valores.

A câmera ainda deve possuir uma interface de comunicação entre o CCD e o controlador. Essa interface deve ser feita através de um conector hermeticamente isolado devido às diferenças de pressão. Geralmente é montada na câmera uma PCB (placa eletrônica) sem componentes, com um soquete que se encaixe no CCD e com conectores que ligarão a PCB ao conector hermético. Essa placa recebe o nome de “*fanout board*”.

2.10.2 A câmera TigerCam

A *TigerCam* é uma câmera EMCCD que foi construída em colaboração com a empresa *Astroinventions* (Chile) atendendo todos os requisitos necessários de uma câmera CCD padrão, além dos requisitos específicos para ser integrada ao instrumento BTFI. Entre os requisitos encontram-se:

- Fornecer um ambiente criogênico e de alto vácuo para abrigar um detector científico, o EMCCD modelo CCD207;
- Utilizar a tecnologia de resfriamento a gás “*Cryotiger*” (solicitada pelo BTFI e pelo SOAR) para abaixar a temperatura do detector à aproximadamente - 100°C;
- Oferecer uma interface de conexão “limpa” com o detector, utilizando conectores herméticos para minimizar ruídos e interferências;
- Possuir controle ativo de temperatura.

O corpo da câmera é feito em Alumínio polido. A Figura 17 mostra um modelo 3D da câmera destacando suas principais partes. Nota-se a válvula de padrão de conector KF-16 que é ligada à bomba de vácuo. O corpo da câmera possui dois conectores herméticos, um para os sinais do detector e outro para o controle de temperatura. Na Figura 17, pode ser visto ainda o detector EMCCD através da janela por onde a luz incide na câmera.

Figura 17 – Esquema 3D mostrando os principais componentes da câmera TigerCam. Fonte: autor.

2.10.3 O sistema de refrigeração da câmera TigerCam

Durante esta pesquisa trabalhou-se o tempo todo com equipamentos de ciclo fechado de refrigeração. Mais especificamente o sistema denominado *Polycold Compact Cooler (PCC)*, do fabricante *Brooks Automation*. Basicamente, o sistema consiste em três partes: um compartimento principal que possui o compressor e toda instrumentação associada ao ciclo térmico, duas linhas de gás que transportam o gás de ida e volta ao evaporador, e o evaporador que gera o ponto frio do sistema que será conectado no elemento de interesse. A Figura 18 mostra sistema Polycold Compact Cooler (PCC). Nota-se o compressor, as linhas de gás e o evaporador (canto inferior direito).

Figura 18- Imagem do sistema Polycold Compact Cooler (PCC). Fonte: (BROOKS AUTOMATION, 2006).

Esse sistema permite resfriar cargas térmicas de 0,5W e 30W e alcança temperaturas de até 70K. Essas temperaturas e potências dependem da mistura que compõe o gás utilizado no ciclo. Neste trabalho foi utilizado o gás PT-30 que é uma mescla de argônio, etano, metano, neônio, nitrogênio e propano. A Figura 19 mostra as curvas de refrigeração para diferentes misturas de gás onde nota-se o gás PT-30 na curva pontilhada. Esse tipo de curva relaciona a potência máxima disponível para a carga térmica em função da temperatura atingida pelo dedo frio.

Figura 19 - Curva de desempenho térmico do Cryocooler para diferentes misturas de gás.
Fonte: (BROOKS AUTOMATION, 2006).

Nota-se que, para o gás PT-30, durante o processo de resfriamento que começa à temperatura ambiente, a carga térmica não pode superar 12W de potência, caso contrário, não será possível passar a barreira de 233K. Uma vez superado esse ponto, o sistema é capaz de drenar mais de 20W de potência em uma determinada zona de temperatura.

A Figura 20 mostra os detalhes internos da câmara onde notam-se os componentes do sistema de resfriamento. À direita, uma vista da câmara completa com a posição do evaporador e dos demais componentes, sendo que o corpo da câmara é mostrado transparente. Já à esquerda, há uma vista explodida do detalhe mostrando de cima para baixo o dedo frio, a placa eletrônica interna, o suporte do detector e o EMCCD. O evaporador, responsável pelo resfriamento, está em contato com a peça denominada dedo frio. Essa é uma peça de cobre que faz o contato entre o evaporador e o suporte do detector. O suporte do detector é uma peça de Alumínio que faz o contato entre o CCD e o dedo frio. O detector é preso ao suporte do detector e esse conjunto é preso na placa eletrônica interna. Dessa forma o fluxo de calor flui na ordem: CCD, suporte do detector, dedo frio e evaporador.

Figura 20 - Modelo 3D do sistema de refrigeração da TigerCam. Fonte: autor.

2.10.4 O sistema de controle da temperatura

Análises térmicas mostradas posteriormente em 4.1 indicam que com o sistema de resfriamento descrito anteriormente o CCD poderia atingir uma temperatura de -132°C . É necessário porém, restringir esse valor e ainda atuar de forma a conseguir um valor de temperatura pré-determinado fixo e estável. Dessa forma, a câmera precisa ainda de um sistema de controle de temperatura. Para a *TigerCam* o sistema é composto de um sensor de temperatura, um elemento ativo ou resistor (*heater*) e um controlador eletrônico. O sensor e o *heater* estão presos no suporte do detector conforme a Figura 21, e são conectados ao controlador externo através de um conector hermético localizado na parte superior da câmera, como pode ser observado na Figura 17, mostrada em 2.10.2.

Figura 21 - Detalhe da posição do sensor de temperatura e do resistor (heater) na parte interna da câmara. Fonte: autor.

O sensor utilizado é um sensor de temperatura do tipo diodo (DT-670). Esse tipo de sensor varia sua queda de tensão de acordo com a temperatura e possui uma curva própria dessa variação. Já o elemento ativo é um resistor MP930 de 50Ω e 30W. Foi utilizado um controlador externo modelo 325, da fabricante *Lakeshore*. Trata-se de um controlador de dois canais que comporta sensores do tipo diodo, resistor, RTD e termopar. Possui dois *loops* de controle PID independentes com potência de saída para o elemento ativo de 25W e 2W que podem ser configurados para cargas de 50Ω ou 25Ω.

Com o sistema descrito implementado, é possível escolher uma temperatura pré-determinada de operação do detector e mantê-la estável com um erro menor que 0,1°C.

2.10.5 A placa eletrônica interna

Devido à configuração do instrumento BTFI, essa câmera não possui um circuito eletrônico interno, todos os sinais digitais e analógicos são implementados fora da câmera à temperatura ambiente pelo controlador CCCP já mencionado. Portanto, o projeto eletrônico da câmera consiste basicamente de uma placa interna, denominada *fanout board*, responsável pela interface entre o detector EMCCD e o conector hermético fixado no corpo da câmera. Trata-se de uma placa desenhada especialmente para possuir baixo ruídos eletrônicos e otimizada para trabalhar em frequências da ordem de 10 MHz. Dentre suas principais características, vale destacar a presença de uma malha GND (a placa é multicamada), além da utilização (em todos os sinais BIAS) de capacitores de desacoplamento e componentes denominados EMIFIL (*EMI Supression Filters*). Estes dispositivos são filtros LC utilizados para eliminar interferências eletromagnéticas em circuitos de corrente contínua.

2.11 Considerações sobre vácuo e ambientes criogênicos

Obter e manter um bom nível de vácuo é o primeiro desafio técnico encontrado nos projetos de instrumentos que necessitam operar em baixas temperaturas. Os principais motivos para essa necessidade são dois: em primeiro lugar, a umidade do ar se congela a temperaturas inferiores a 0°C. Isso gera partículas de gelo que podem danificar o CCD e/ou produzir efeitos ópticos indesejáveis. O segundo motivo existe pois, conforme a temperatura diminui, a quantidade de energia térmica que flui entre o ambiente de trabalho e o exterior aumenta, chegando a um ponto em que nenhum sistema de refrigeração seria capaz de extrair o calor gerado pelas cargas térmicas devidas à condução e convecção através dos gases. Ou seja, a temperatura de trabalho escolhida é tão baixa que qualquer conexão térmica através do ar seria muito grande para poder ser drenada por um sistema de refrigeração.

O primeiro desafio é resolvido projetando-se câmaras de vácuo robustas ou Criostatos. Um criostato é um volume fechado fabricado em uma estrutura sólida metálica que resiste a diferenças de pressão superiores a uma atmosfera e que permite o acesso ao seu interior para introduzir ou ajustar componentes, e impedir o ingresso de moléculas de ar através de suas paredes. A Figura 22 ilustra um exemplo de um criostato típico usado em instrumentação astronômica. Trata-se do criostato usado no espectrógrafo MEGARA instalado no *Gran Telescopio Canarias*, na Espanha (CASTILLO-DOMÍNGUEZ E. et al., 2012).

Figura 22 – Criostato do espectrógrafo MEGARA. Fonte: (CASTILLO-DOMÍNGUEZ E. et al., 2012).

Os ambientes criogênicos são projetados de forma que os objetos a serem resfriados (principalmente o CCD) tenham quase nenhum contato térmico com o exterior. Uma vez que a convecção é anulada pelo vácuo, é necessário diminuir ao máximo as vias de condução ou radiação que possam causar fluxos térmicos em direção ao interior da câmera. Para isso, são construídos suportes e estruturas internas com materiais de baixa condutividade térmica. Como exemplo, vale citar o material conhecido como *PEEK* (BLUMM, LINDEMANN, SCHOPPER, 2008). Trata-se um material muito utilizado em ambientes criogênicos. Dentre as características do *PEEK*, vale ressaltar: excelente resistência mecânica, fácil manufatura, baixa condutividade térmica (0,29 W/m.K) e baixa taxa de degasificação (0,06%), o que o torna ainda melhor para ambientes em baixas pressões.

Na prática, não é possível atingir um estado de vácuo ideal, onde não exista nenhuma molécula de matéria num determinado volume. Portanto, é comum classificar os níveis de “qualidade de vácuo”, em função da pressão que as moléculas de gás exercem em um volume fechado. A Tabela 1 resume os tipos de vácuo:

Tabela 1 - Definição dos tipos de qualidade de vácuo em função da pressão de um gás em um volume fechado (WESTON, 2013).

Pressão [Torr]	Nível do vácuo
10^3 a 30	Vácuo baixo
30 a 10^{-3}	Vácuo médio
$< 10^{-3}$ a 10^{-6}	Vácuo alto
$< 10^{-6}$ a 10^{-9}	Vácuo muito alto
$< 10^{-9}$ a 10^{-12}	Vácuo ultra alto
$< 10^{-12}$	Vácuo extremo-alto

As aplicações criogênicas geralmente trabalham na zona de Vácuo alto e Vácuo muito alto. Essas zonas correspondem a pressões onde a quantidade de moléculas de ar é suficientemente pequena para os fluxos térmicos por convecção tornarem-se desprezíveis. Para alcançar esses níveis de pressão é necessário utilizar sistemas de bombeamento de múltiplas etapas (*multiple-stage pumping*). Geralmente, utiliza-se sistemas que possuem uma bomba seca de baixa pressão e uma bomba de alto vácuo.

Uma vez que câmera possui um bom nível de vácuo e o elemento de interesse (CCD) esteja isolado, resta ainda resfriar o sistema. Existem basicamente três técnicas para esfriar um CCD:

1- Esfriadores termoelétricos: são equipamentos baseados no efeito *Peltier*. Possuem baixo custo, mas não atingem temperaturas muito baixas. Esses dispositivos geralmente abaixam a temperatura do CCD em cerca de 70K em relação a sua temperatura inicial, o que o torna insuficiente para aplicações em instrumentação astronômica (JOHNSON G. B., 1998).

2- Evaporação de Nitrogênio ou Hélio Líquido: trata-se da forma mais conhecida de se alcançar baixas temperaturas. O método consiste em colocar o elemento de interesse em contato com um recipiente que possui Nitrogênio Hélio Líquido. Enquanto o processo de ebulição do Nitrogênio ocorrer, o elemento de interesse se manterá resfriado. A principal desvantagem desse método é a necessidade de constante reposição de Nitrogênio, o que torna o processo mais trabalhoso e dispendioso.

3- Ciclos fechados de refrigeração: esses equipamentos, também conhecidos como *Cryocooler* utilizam o ciclo de compressão e expansão de Joule-Thompson. Neste ciclo, um gás não ideal se expande desde uma pressão muito alta para uma pressão muito baixa, mantendo constante a entalpia. O resultado é um resfriamento que dependerá da qualidade da compressão prévia e da mistura dos gases utilizados. As vantagens desse sistema se deve ao fato de não necessitar da reposição de insumo e a versatilidade de temperaturas atingíveis. Existem no mercado sistemas que geram temperaturas de 4K adiante. As desvantagem são seu alto custo inicial (em comparação com os outros métodos de resfriamento) e suas limitadas curvas de potência. Para temperaturas de operação de 190K, a carga térmica máxima estaria em torno de 25W, e para temperaturas de 90K, em torno de 7,5K (BROOKS AUTOMATION, 2006).

2.12 Emprego da distribuição térmica em detectores para astronomia

O emprego da criogenia em aplicações de instrumentação astronômica tornou-se contínuo e cada vez mais complexo ultimamente. Isso atraiu a atenção de pesquisadores no desenvolvimento de métodos para simular e prever temperaturas dos diferentes elementos dentro de um criostato (AHMAD A. et al., 2001), (AUNE et al., 2003), (CASTILLO-DOMÍNGUEZ E. et al., 2012), (FEAUTRIER P. et al., 2006), (JOHNSON G. B., 1998) e (YANG W. et al., 2011). O objetivo destas pesquisas é poder validar ferramentas de desenho térmico para esses tipos de aplicação, e desta forma, garantir determinada temperatura nos detectores dos instrumentos em fase de projeto (desenho), antes da fabricação dos mesmos. A literatura revisada neste trabalho apresenta diversas pesquisas de ferramentas de análises de elementos finitos para prever a temperatura de operação de um detector como um todo. Porém, não foram encontradas simulações que - validadas empiricamente - tenham demonstrado sucesso para determinar *a priori* a distribuição da temperatura em um componentes específico do criostato, como por exemplo, o próprio detector.

Porém, as novas tecnologias desenvolvidas originaram detectores de maior desempenho, e conseqüentemente de maior número de pixels e maior tamanho. Isso incorporou um novo desafio à fase de desenho nos projetos de criostatos: o problema da distribuição de temperatura nos detectores. Esse problema existe pois os sistemas de refrigeração disponíveis produzem uma determinada temperatura em um espaço físico limitado, denominado geralmente de fonte fria ou extremo frio. Esses pontos frios geralmente são superfícies planas de cerca de 500 mm², cujo material é um metal condutor. Portanto, o gradiente térmico em grandes detectores (superfícies de 10.000 mm², ou mais) surge naturalmente pois o detector está conectado termicamente com o exterior através de suportes localizados em certos setores de sua geometria, e ao mesmo tempo, conectado termicamente em outros pontos aos extremos frios gerados pelos sistema de refrigeração. Isso produz, de acordo com as leis de transferência de calor, um gradiente térmico entre os extremos frios e os extremos quentes do detector. Este problema não se apresentava quando a área física dos detectores utilizados era similar (ou menor) que a área da fonte fria. Nesse caso os gradientes térmicos eram desprezíveis e

considerava-se o detector como um elemento pontual único a uma determinada temperatura. A Figura 23 ilustra o problema da distribuição de temperatura quando o tamanho dos detectores aumenta. No lado esquerdo (a) há um CCD de tamanho similar ao ponto frio, o que permite considerar o detector como um elemento pontual único a uma temperatura uniforme. Já o lado direito (b) mostra o caso para um CCD de maior tamanho, nessa situação existe uma diferença considerável entre os suportes (extremo quente) e o ponto frio, gerando um gradiente de temperatura espacial.

Figura 23 - O problema da distribuição da temperatura nos detectores. Fonte: adaptado de (BILBENY, 2014).

O gradiente térmico mencionado já foi estimado pelo método de elementos finitos para o *CFHT MegaCam 40 CCD Camera*. Essa câmera possui um mosaico de 40 CCDs montados em uma placa de Alumínio comum. As estimativas previram gradientes de até 2°C dentro de um CCD em particular (sem validação experimental). Além de gradientes de até 6°C entre dois CCDs montados em diferentes partes da placa de alumínio (medido experimentalmente) (AUNE et al., 2003).

As razões pelas quais não é viável aumentar o tamanho dos pontos frios estão relacionadas com as dificuldades e limitações técnicas próprias do funcionamento térmico dos sistemas de refrigeração. Deve-se portanto reconhecer a existência do gradiente térmico e avaliar suas implicações no correto funcionamento do detector. Além de estudar as possibilidades de conhecer o gradiente com exatidão para contornar os prejuízos por ele provocados.

2.12.1 Motivações para conhecer a distribuição térmica

A necessidade de conhecer em detalhe a temperatura em cada pixel de um CCD de grandes dimensões tem a mesma justificativa da necessidade anterior de possuir uma estimativa da temperatura média de um CCD pequeno: a calibração. Existem diversas fontes de ruído que são dependentes da temperatura e que podem ser corrigidas conhecendo-se o valor exato da mesma. A seguir são apresentadas as três mais relevantes: a corrente de escuro, o ruído de Jhonson e a dilatação linear.

Como citado em 2.6.1, a corrente escura produz uma certa quantidade de ruído que é somado aos fótons detectados durante a etapa de exposição. A intensidade do ruído (quantidade de elétrons) é diretamente proporcional à temperatura do pixel. Assim, uma diferença de temperatura entre pixels gera também diferentes níveis de ruído entre pixels. Atualmente, para determinar a quantidade de elétrons provenientes da corrente escura, utiliza-se o valor médio da temperatura do detector. Para detectores maiores essa calibração será imprecisa, pois a diferença entre a temperatura real de um pixel e a temperatura média do detector é considerável. Assim, conhecer o gradiente de temperatura para estimar pixel a pixel a magnitude da corrente escura gerada, melhora a razão global do ruído por unidade de sinal de leitura.

Uma segunda fonte de ruído, que, diferente da corrente escura, se produz principalmente durante o processo de leitura, é o Ruído de Johnson. O Ruído de Johnson está presente em todos os condutores devido a um efeito térmico. Ele surge a partir das colisões de elétrons livres responsáveis pela condução da carga (JANESICK, 2001), e se modela para um resistor real como uma fonte de tensão em série com um resistor ideal sem ruído. A tensão-ruído *rms* dessa fonte, se dá por:

$$w = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R} \quad (8)$$

Onde:

- k: constante de Boltzmann
- T: temperatura do condutor

- B: largura de banda
- R: resistência do condutor

Da mesma forma que a corrente escura, o valor do ruído de Johnson aumenta com a temperatura, o que gera diferentes níveis de ruído de leitura em um detector cuja área apresente um gradiente de temperatura. É importante mencionar que esta fonte de ruído é predominante na radioastronomia, exigindo temperaturas de operação ainda mais baixas para os detectores dessa área. Assim, calibrar espacialmente o valor dessa fonte de ruído em função da temperatura é uma contribuição considerável para essa área de pesquisa.

Finalmente, a temperatura de um CCD pode produzir erros na interpretação de uma imagem por deslocamentos no detector gerados pela dilatação térmica do mesmo. Especificamente, a largura de um detector de 100mm é reduzida em aproximadamente 0,076mm ao ser resfriado 190°C em relação à sua temperatura inicial. Para um instrumento de alta precisão, como o Espectrógrafo Infravermelho de Alta Resolução, (KÄUFL, 2004), cujo detector mede aproximadamente 111mm e a largura de cada pixel é de 27 μm , uma contração térmica dessa natureza reduziria seu tamanho em largura ao equivalente a 3 pixels, deslocando de maneira sistêmica a leitura de acordo com a ordem por comprimento de onda. Se a temperatura é constante ao longo do detector, este deslocamento pode ser facilmente incorporado à leitura, no entanto, na presença de um determinado gradiente térmico, a dilatação estará distribuída de maneira desconhecida, o que impede a interpretação correta e precisa do que se está focalizando. Novamente, a capacidade de conhecer a distribuição térmica exata no detector é de grande contribuição para registrar corretamente os fenômenos observados.

2.13 Transferência de calor

Existem 3 formas de troca de energia térmica: condução, radiação e convecção. A condução é o processo de transmissão de calor feita de partícula para partícula sem que haja transporte de matéria de uma região para outra. As partículas podem ou não pertencer ao mesmo sólido, mas para que haja transferência de calor por

condução entre dois sólidos eles devem necessariamente estar em contato direto, uma vez que a transferência de energia se dá por meio de colisões entre as partículas.

A radiação ou irradiação consiste na transmissão de calor por meio de ondas eletromagnéticas. Ocorre tanto no vácuo quanto em certos meios materiais como, por exemplo, no ar. Esta é a única forma de transmissão de calor que pode ocorrer no vácuo. Na verdade, essa forma de transmissão é mais eficiente quando não existem fluidos entre os dois corpos que estejam trocando calor. O fluxo de calor ocorre entre superfícies que “se veem” ou seja, que se encontram geometricamente expostas. A energia térmica que o nosso planeta recebe do Sol se propaga exclusivamente por irradiação.

A convecção é o processo de transmissão de calor feita por meio do transporte da matéria de uma região para outra. A convecção é o processo que só pode ocorrer nos fluidos, pois nos sólidos as partículas não podem ser arrastadas. Em ambientes de alto vácuo (da ordem de 10^{-5} Torr) a transferência por convecção é desprezível, pois a presença de partículas é praticamente nula. Assim, num sistema de modelamento térmico para ambientes criogênicos, são consideradas somente as trocas de calor por condução e radiação.

2.14 Conservação de energia na transferência de calor

O planejamento de qualquer modelo de transferência de calor deve começar pelo balanço energético de um determinado volume de controle genérico, como observado na Figura 24, que mostra o balanço energético em um volume de controle fechado, que absorve, emite, gera e acumula energia térmica.

Figura 24 - Balanço energético em um volume de controle fechado. Fonte: adaptado (BILBENY, 2014).

Os valores de q_{entra} e q_{sai} correspondem às interações de transferência de calor do volume de controle com o entorno. Neles se encontram todos os fluxos de energia térmica por condução, radiação e convecção. Os fluxos de energia do volume de controle para os corpos de menor temperatura são considerados em q_{sai} . Já os fluxos de energia provenientes de corpo de maior temperatura são considerados em q_{entra} .

O valor de q_{gera} corresponde à geração de energia térmica dentro do volume de controle. Por exemplo: calor gerado por atritos internos em um sistema de freios, calor gerado por alguma reação química ou o calor produzido por um semicondutor devido às correntes elétricas em seu interior.

Finalmente, q_{acumula} corresponde à energia térmica armazenada dentro do volume de controle, manifestada pelo aumento de sua temperatura. Ao subir a temperatura de um corpo, aumentamos a energia interna de suas partículas, energia essa que permanece dentro do corpo. Assim, o valor de q_{acumula} será positivo quando a temperatura do volume de controle aumentar, negativo se a temperatura diminuir e zero quando a temperatura do volume de controle permanecer estável no tempo. O valor de q_{acumula} (W) é calculado por:

$$q_{acumula} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt'} \quad (9)$$

Onde:

- m: massa do volume de controle (kg)
- c: Calor Específico (J/Kg · K)

O Calor Específico de um material se define como a energia necessária para aumentar em um Kelvin, um grama desse material. Portanto, aplicando o princípio de conservação de energia ao volume de controle da Figura 24, temos que:

$$Q_{entra} + Q_{gera} = Q_{sai} + Q_{acumula} \quad (10)$$

A eq.(10) deve ser aplicada de maneira geral para qualquer modelo de transferência de calor. Porém, em sistemas em estado de equilíbrio térmico, onde dT/dt é zero para todas suas componentes, a conservação de energia é expressada simplesmente como:

$$Q_{entra} = Q_{gera} + Q_{sai} \quad (11)$$

2.15 Radiação de calor em regime permanente

A lei de Stefan-Boltzmann estabelece que a radiação total por unidade de área E_b (W/m^2) emitida por um corpo negro em todas direções e todos os comprimentos, se calcula por (INCROPERA; DEWITT, 1992):

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (12)$$

Onde:

- σ : constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} (W/m^2 \cdot K^4)$
- T: temperatura absoluta do corpo (K)

A lei se aplica para todos os corpos negros, que são uma idealização teórica de corpos cujas superfícies realizam trocas radiativas perfeitas com seu entorno, tanto para absorver, quanto para emitir energia térmica em forma de ondas eletromagnéticas.

Devido ao fato de que todos os corpos emitem energia em forma de radiação, de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, o fluxo resultante da troca de calor por radiação entre superfícies de dois corpos distintos se dá por:

$$q_{1 \rightarrow 2} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (13)$$

Onde:

- T_1 e T_2 : temperaturas das duas superfícies envolvidas (K)

Porém, em sistemas reais, os corpos não realizam trocas radiativas perfeitas com seu entorno. Assim, deve-se considerar portanto o coeficiente de emissividade e a área do elemento radiador. Dessa forma, a troca de calor por radiação pode ser descrita por:

$$q_{1 \rightarrow 2} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_r^4 - T_2^4) \quad (14)$$

Onde:

- e : emissividade do elemento radiador
- σ : constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- A : área do elemento radiador
- T_r : temperatura do elemento radiador
- T_2 : temperatura do corpo que recebe a radiação

2.16 Condução de calor em regime permanente

2.16.1 Condução de calor dentro de um corpo sólido

Todo tipo de transferência de calor requer a existência de um gradiente de temperatura. A lei de Fourier estabelece que a quantidade de energia transferida em uma direção por unidade de tempo (ou velocidade da transferência de calor) se expressa em função do gradiente de temperatura como (INCROPERA; DEWITT, 1992):

$$q_x = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (15)$$

Onde:

- q_x : transferência de calor na direção x (W)
- k : é a condutividade térmica do material (W/m.K)
- A : secção transversal da condução de calor na direção x (m²)

Se dividirmos a eq.(15) pelo valor de A , obtemos do lado esquerdo o que se conhece como Fluxo de Calor q'_x (W/m²), que corresponde à quantidade de potência calórica transmitida por unidade de área:

$$q'_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

A eq.(15) pode ser aplicada a qualquer volume de controle dentro de um sólido contínuo. Resolvendo a equação diferencial e substituindo as condições de contorno genéricas (quando $x=0$, $T(x) = T_0$ e quando $x = L$, $T(x) = T_L$), encontra-se a expressão para condução de calor ao longo de uma barra em função das temperaturas dos extremos:

$$q_x = \frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_0 - T_L) \quad (17)$$

Por fim, o valor da temperatura $T(x)$ pra qualquer ponto ao longo da barra em função da transferência de calor e da temperatura do extremo inicial da barra, se expressa por:

$$T(x) = T_0 - \frac{q_x}{k \cdot A} \cdot x \quad (18)$$

A eq.(18) corresponde a uma reta decrescente a partir de T_0 .

2.16.2 Condução de calor entre dois sólidos em contato

Em muitos casos é necessário lidar com a transferência de calor entre dois corpos sólidos distintos em contato direto como na Figura 25.

Figura 25 - Condução através de uma barra sólida composta por dois materiais distintos. Assume-se uma união ideal entre os dois materiais. Fonte: (BILBENY, 2014).

O fluxo de calor na barra composta por dois materiais distintos pode ser dado por:

$$q_x = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \right) \cdot (T_0 - T_{L_1+L_2}) \quad (19)$$

Porém, essa equação requer que a temperatura de contato T_{L1} (final da primeira barra e começo da segunda) seja idêntica para ambos materiais, fenômeno que não ocorre na prática. Na prática, há uma queda de temperatura de um material para o outro, principalmente devido aos efeitos da irregularidade superficial dos materiais (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Assim, na condução de calor entre dois sólidos em contato, deve-se considerar a Resistência Térmica de Contato ($m^2.K/W$). O oposto da resistência de contato é conhecido como condutividade térmica de contato ($W/m^2.K$) e é também muito utilizada na literatura.

Em (YOVANOVICH, 1981) foi sugerida uma equação para expressar a condutância térmica de contato (em watt/K), e ela é dada por:

$$h = 1.25k_s \frac{m}{\delta} \left(\frac{P}{H_c} \right)^{0.95} \quad (20)$$

Onde:

- $k_s = \frac{(2k_1k_2)}{(k_1 + k_2)}$: média harmônica da condutividade térmica das superfícies em contato;
- $\delta = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$: rugosidade efetiva das superfícies de contato;
- $m = \sqrt{(m_1^2 + m_2^2)}$: aspereza efetiva média absoluta da interface e pode ser aproximada como $m = 0,125(\sigma \times 10^6)^{0,402}$;
- $P = \frac{F}{A}$: pressão de contato entre as superfícies (N/m^2);
- H_c : “micro dureza” (*microhardness*) do mais macio dos dois elementos em contato (N/m^2).

Assim, o fluxo de calor na barra composta por dois materiais distintos pode ser considerado por:

$$q_x = \frac{h}{A} \cdot \left(\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \right) \cdot (T_0 - T_{L_1+L_2}) \quad (21)$$

3 EXPERIMENTOS / DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentados os experimentos efetuados com as câmeras astronômicas bem como as simulações térmicas realizadas por software. Inicialmente foi feita uma análise térmica baseada na construção mecânica e nos materiais empregados na construção das câmeras. Em seguida são mostrados os testes para caracterização dos níveis de ruído e os ganhos (de saída e EM) das câmeras. Posteriormente são expostas as simulações térmicas executadas, a necessidade dessas simulações e suas respectivas validações em laboratórios. Por fim são apresentados novos testes realizados em laboratório que permitiram identificar a relação entre a pressão interna da câmera e seu comportamento quanto aos níveis de ruídos e ganhos.

3.1 Análise térmica das câmeras

O objetivo da análise térmica é comprovar que usando o sistema de resfriamento escolhido (PCC com gás PT-30), a câmera é capaz de resfriar o CCD a uma temperatura de operação apropriada (-100°C a -110°C). Além de conhecer detalhadamente os aspectos termodinâmicos do funcionamento da câmera.

Sob vácuo, a temperatura do detector é definida pelo equilíbrio térmico devido às transferências de calor por radiação e por condução. O equilíbrio é alcançado quando os fluxos de entrada e saída de calor do detector estão balanceados. A temperatura de funcionamento livre (*free-running*) também é investigada para obter o equilíbrio térmico da montagem.

Existem quatro principais trocadores de calor dentro da câmera. Como já citado em 2.10.3, o elemento resfriador diminui a temperatura do detector por condução, do suporte do detector para o dedo frio. Os outros três trocadores de calor que aumentam a temperatura do detector são: a janela da câmera, que aumenta a temperatura por radiação; o corpo da câmera, que aumenta a temperatura também por radiação; o cabeamento interno, que aumenta a temperatura do detector por condução do conector hermético através dos condutores de cobre.

Para os casos de troca de calor por radiação utilizou-se a eq.(14) considerando-se T_2 como sendo a temperatura do suporte do detector. Ou seja, a referência adotada para receber todos os fluxos de calor foi o suporte do detector (peça de Alumínio).

Já a transferência de calor por condução através de um elemento onde existe uma diferença de temperatura foi formulada e é calculada pela eq.(17), considerando-se T_0 e T_L como os pontos mais frio e mais quente do sólido em questão.

No caso da condutância térmica de contato, a condutância de uma interface onde dois elementos se tocam e há uma certa pressão aplicada no contato, pode ser aproximada pela eq.(19) cujo modelo foi sugerido por (YOVANOVICH, 1981)

O único lugar em que se considera relevante calcular a condutância térmica de contato é entre o dedo frio e o suporte do detector. Essa é a principal interface de contato “puro” (sem parafusos) entre dois elementos condutores térmicos.

Assim, aplicando-se o princípio de conservação de energia e a eq.(11) para o caso das câmeras do BTFI, o equilíbrio térmico é atingido quando a seguinte equação é satisfeita:

$$PC_{dedo} = PR_{janela} + PR_{corpo} + PC_{cabos} \quad (22)$$

Onde:

- PC_{dedo} : transferência de calor entre o suporte do detector e o PCC, conduzida pelo dedo frio e pelo contato entre o suporte do detector e o dedo frio;
- PR_{janela} : transferência de calor por radiação através da janela da câmera;
- PR_{corpo} : transferência de calor por radiação através do corpo da câmera;
- PC_{cabos} : transferência de calor por condução entre o conector hermético e o detector, conduzido pelos trilhos de cobre da placa eletrônica interna.

Encontrar o equilíbrio térmico é um processo iterativo pois a transferência de calor é calculada usando a temperatura do detector, que é a variável final desejada. Portanto, uma temperatura inicial é assumida e um algoritmo iterativo feito em

MATLAB incrementa a temperatura até o equilíbrio térmico ser atingido com um erro específico (0,01K para os resultados apresentados neste item).

Na verdade, o equilíbrio térmico é atingido depois de um determinado tempo, ou seja, há uma constante de tempo e todo o problema poderia ser modelado por uma equação diferencial. Os cálculos realizados neste item não levam em conta essa constante de tempo. Portanto o equilíbrio térmico é apenas estático.

Os parâmetros usados para os cálculos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetro adotados para a análise térmica da câmera do BTFI

Parâmetro	Valor	Observação
Emissividade da janela	1	Considerado um corpo negro
Emissividade Alumínio (polido)	0,09	(WEN; MUDAWAR, 2005)
Condutividade Alumínio [W/mK]	180	(YOUNG, 1992)
Rugosidade Al	$4,25 \times 10^{-6}$	(YUNCU, 2006)
Micro dureza Al [N/m ²]	$9,12 \times 10^8$	(YUNCU, 2006)
Emissividade Cu	0,1	(WINDOW; HARDING, 1981)
Condutividade cobre [W/mK]	380	(YOUNG, 1992)
Rugosidade Cu	$1,98 \times 10^{-6}$	(YUNCU, 2006)
Força do dedo frio [N]	5	equivalente a 0,5 Kg
Condutores de cobre PCB	0,51	mils, de 1 oz de cobre
Temperatura PCC [°C]	-144	
Temperatura da Sala [°C]	25	

Aplicando os parâmetros citados nas equações anteriores, o algoritmo retornou uma transferência de calor total de 1,87 W e a temperatura final do detector de -132,31 °C.

Essa análise prévia foi fundamental para garantir que o sistema de controle de temperatura citado em 2.10.4 seria capaz de resfriar o detector à temperatura de operação especificada (-100 °C a -110 °C).

3.2 Caracterização das câmeras

A seguir, serão detalhados os testes realizados e os resultados encontrados durante o processo de caracterização dos níveis de ruídos das câmeras astronômicas científicas do instrumento BTFI.

Os primeiros testes de caracterização das câmeras do instrumento BTFI foram realizados nos laboratórios Nuvu Cameras Inc. (empresa incubada dentro da Universidade de Montreal, no Canadá e importante parceira no desenvolvimento do instrumento).

Primeiramente, a câmera deve ser preparada para os testes, ou seja, a câmera deve ser alocada em um espaço apropriado com isolamento de luz externa e com incidência de fonte de luz controlável. Por fim, a câmera deve ser resfriada à temperatura de operação que varia de -85°C a -100°C . Com a câmera montada e resfriada o próximo passo deve-se elaborar as formas de onda para operar o EMCCD de acordo com a folha de dados fornecida pelo fabricante, ou seja, as formas de onda que irão excitar o EMCCD e transportar as cargas. É necessário que todas as temporizações e níveis de tensão respeitem as especificações. Essa é considerada a primeira aproximação. Em seguida, é preciso fazer ajustes nas formas de onda e níveis de tensão. Muitas vezes fugindo do que a folha de dados sugere, pois cada detector EMCCD é muito específico e a câmera e o controlador utilizados também influenciam muito. O processo citado é iterativo e a cada ajuste é feita uma bateria de testes para verificar o resultado. Posteriormente é feito um ajuste fino e finalmente uma otimização objetivando sempre conseguir o melhor desempenho do sistema. Neste caso, o melhor desempenho é a melhor relação sinal ruído possível.

3.2.1 Ganho de saída e ruído de leitura

Como resultado dos testes, o ganho do sistema é calculado utilizando-se uma curva de transferência de fótons. O método que utiliza a curva de transferência de fótons é o mais utilizado na literatura e está descrito em (JANESICK, 2001). Para isso utilizou-se um script em linguagem IDL elaborado em parceria com o engenheiro Olivier Daigle denominado “determinepreampgain.pro” que, além de gerar a curva de transferência, ainda calcula o ganho e o ruído de leitura para uma determinada amostra de imagens. Como entrada para o script é necessário adquirir imagens com diferentes níveis de intensidade luminosa. No caso, foi utilizada uma fonte de luz branca (nota-se que não há uma dependência cromática) constante e, através de um código em “C Shell” o processo de aquisição de imagens foi automatizado. Assim, a cada iteração, foram obtidas 20 imagens para diferentes tempos de exposição de 0,1 até 20 segundos. Todas as imagens foram obtidas com a câmera operando a uma taxa de aquisição de 10 MHz, sem multiplicação de elétrons e transferência vertical de 100 kHz.

O ganho encontrado foi de 5,79 elétrons/ADU e o ruído de leitura calculado foi de 135,92 elétrons/pixel. A princípio, o nível de ruído encontrado pode parecer alto, mas deve-se levar em consideração que esses valores foram conseguidos rodando a saída EM do detector a uma taxa de leitura extremamente alta (10 MHz). Além disso, o ruído de leitura é diminuído pelo fator do ganho EM e será mostrado em seguida. A Figura 26 mostra a curva de transferência de fótons para os valores acima usada para calcular o ganho e o ruído de leitura da câmera.

Figura 26 - Curvas de transferência de fótons para uma das câmeras do instrumento BTFI rodando a uma taxa de leitura de 10 MHz e 100 kHz de transferência vertical. Fonte: autor.

3.2.2 Ganho de multiplicação de elétrons (ganho EM)

O ganho calculado anteriormente (5,79 elétrons/ADU) é então usado no cálculo do ganho EM e o ruído CIC. O ganho EM é determinado ajustando-se o histograma de várias imagens “*bias frames*”, ou seja, imagens obtidas sem nenhuma iluminação e com tempo de exposição de zero segundos. Deste modo, obtém-se apenas o ruído advindo da leitura do EMCCD. Através de um segundo script também escrito em IDL que utiliza como entrada várias (no mínimo 200, geralmente 1000) imagens bias, o ganho EM encontrado foi de 3334 e o ruído CIC estimado foi de 0,005 elétrons/pixel.

Assim, o ruído de leitura efetivo calculado foi de 0,041 elétrons/pixel, ou seja, o ruído sem o ganho EM (135,92 elétrons/pixel) dividido pelo ganho EM encontrado (3334). Para completar a caracterização do nível de ruídos das câmeras do BTFI foi calculado o valor da corrente de escuro (*dark current*) já apresentado anteriormente. Para isso, foram obtidas imagens sem iluminação em diferentes tempos de exposição e foi observado o valor do ruído total. O ruído total é a soma do ruído de leitura com ruído CIC e também, a corrente de escuro. Aumentando-se o tempo de exposição, aumenta-se apenas a corrente de escuro. Desta maneira, consegue-se isolar a corrente de escuro com uma simples subtração dos valores de ruído

encontrados anteriormente. A corrente de escuro encontrada foi de 0,00113 elétrons/pixel/segundo com a câmera operando a -85 °C.

Vale ressaltar que todos os valores encontrados anteriormente foram obtidos em ambiente de laboratório nas instalações da Universidade de Montreal.

Posteriormente uma segunda câmera foi montada nas instalações do CTIO no Chile e testes preliminares de laboratório apontaram desempenho muito próximo ao da câmera testada na Universidade de Montreal. Por fim, ambas câmeras foram levadas para o telescópio SOAR, instaladas dentro do instrumento BTFI e toda a bateria de testes foi realizada novamente. Foram necessários ajustes nas formas de onda para compensar a diferença do ambiente, porém os níveis de ruído encontrados foram muito similares aos encontrados em laboratório. Realizando-se os mesmos testes no telescópio, os valores encontrados foram:

- Ganho EM de 3087;
- Ruído de leitura efetivo de 0,044 elétrons/pixel;
- Ruído CIC de 0,009 elétrons/pixel e corrente de escuro 0,00121 elétrons/pixel/segundo.

A Tabela 3 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos com a câmera 1 em Montreal e a câmera 2 no CTIO, Chile.

Tabela 3 – Comparação dos níveis de ruído e ganho das câmeras. Fonte: autor.

	Montreal [Câmera 1]	CTIO [Câmera 2]
Ganho EM	3334	3087
Ruído de leitura efetivo [elétrons/pixel]	0,041	0,044
Ruído CIC [elétrons/pixel]	0,005	0,009
Corrente de escuro [elétrons/pixel/segundo]	0,00113	0,00121

3.3 Comportamento Inesperado

Após finalizada a caracterização completa das duas câmeras, elas ficaram instaladas dentro do instrumento BTFI e foram usadas em algumas observações para caracterização do instrumento como um todo. Essas observações aconteciam esporadicamente e tinham como principal objetivo caracterizar os elementos ópticos do instrumento: iBTF e Fabry-Perot. Durante algumas dessas observações as câmeras apresentaram um comportamento inesperado: aparentemente elas não possuíam sensibilidade suficiente para observar “fontes fracas” ou fontes de baixa intensidade luminosa (exatamente o regime que o EMCCD se torna mais útil). Um mesmo objeto astronômico que já havia sido observado anteriormente (NGC 2070, nebulosa da tarântula) não pode ser observado novamente durante outra noite de observação. A relação sinal ruído apresentada pela câmera não foi suficiente para tornar a observação viável.

Assim, as câmeras foram levadas de volta para o laboratório para testes e análises mais detalhadas. Os testes foram realizados no Laboratório de Detectores do CTIO localizado na cidade de La Serena, no Chile sob supervisão dos engenheiros Peter Moore e Marco Bonati. Durante os testes foi observado pela primeira vez que a pressão interna da câmera aumentava ao longo do tempo. Isso foi observado de forma indireta pelo valor de leitura do resistor utilizado no sistema de controle de temperatura para manter a câmera a -100°C . Ainda mais interessante: foi observada uma relação entre o ganho EM e o nível de vácuo da câmera. Apesar de improvável e sem sentido aparente, essa relação foi observada na prática. Ao longo do tempo a pressão da câmera subia. Isso devido a algum provável vazamento, desgaseificação, sujeira interna, ou outro problema. Com o passar do tempo o valor do ganho EM aumentava.

Com o vácuo recém feito (pressão na ordem de 10^{-6} Torr) a câmera não apresenta um bom ganho EM. Os melhores ganhos EM observados foram da ordem ~ 500 . Porém, com o passar do tempo, conforme a pressão aumenta, o ganho EM também aumenta chegando a valores maiores que 3.000 depois de 2 a 3 semanas em funcionamento. Isso mantendo-se as mesmas condições anteriores: mesma

temperatura de trabalho, mesmas formas de onda, mesmo valor de R2HV, etc. Ou seja, com um pior vácuo (alta pressão) a câmera apresentava melhor desempenho.

Após análises, estudos e ponderações desconfiou-se que o comportamento inesperado poderia ser causado por um possível gradiente térmico existente no EMCCD. Devido à construção mecânica da câmera e à forma como a temperatura do detector é controlada, considera-se a possibilidade de existir um gradiente térmico ao longo do EMCCD. Na seção 2.10.4 foi mostrado que o suporte do detector (peça de alumínio) está em contato direto com o dedo frio (peça de cobre). As posições do sensor e do resistor do sistema de controle também foram ilustradas. Essa configuração poderia estar gerando um gradiente térmico no suporte do detector e, conseqüentemente, no EMCDD em si. Isso porque o sensor de controle está localizado longe do resistor e ainda há um ponto extremamente frio entre eles. O possível gradiente térmico existente afetaria diretamente o comportamento do dispositivo, principalmente se a temperatura do registro EM for diferente da temperatura do resto do detector.

3.3.1 COLABORAÇÃO UC

Perante esse comportamento atípico e suas possíveis causas, várias possibilidades foram levantadas. Como por exemplo: influência eletromagnética do elemento ativo (resistor) do sistema de controle de temperatura ou influência eletromagnética dos sinais de *clock* do registro serial do CCD. Algumas hipóteses foram descartadas com testes simples em laboratório. Outras porém precisariam de uma análise mais minuciosa. Dentre elas a mais plausível, sem dúvidas, foi a possível existência de um gradiente térmico no EMCCD. Ou seja, diferentes pontos do detector estariam em diferentes temperaturas. Esse gradiente seria minimizado com uma pressão interna maior no interior da câmera e então o EMCCD funcionaria corretamente.

Através de pesquisas foi encontrado um grupo de Astro-Engenharia da “*Pontificia Universidad Católica de Chile*” que possui um projeto pertinente ao projeto desenvolvido nessa pesquisa. O grupo liderado pelo Prof. Dr. Dani Guzman estava desenvolvendo um sistema de modelagem e simulação térmica baseado no método

diferenças finitas (GUZMAN et al., 2014) capaz de prever o perfil térmico de peças com aplicações para instrumentos criogênicos em astronomia. Após um período inicial de estudo e análise, foi firmado um acordo para colaborar com os experimentos práticos do projeto em andamento e poder aplicá-lo ao problema encontrado nas câmeras do BTFL.

3.3.2 A ferramenta de simulação térmica FDM

A ferramenta de simulação térmica baseada no método de diferenças finitas será denominada FDM, ou *Finite Difference Model*, de acordo com (GUZMAN et al., 2014). O FDM divide a peça a ser analisada em uma malha de volumes menores identificados como nós ou elementos. Esses nós são retangulares, no caso de problemas em duas dimensões ou paralelepípedos no caso de problemas tridimensionais. Essa divisão em elementos menores é feita com intuito de dividir o volume inicial e deixá-lo com resolução suficiente para assumir que a temperatura de cada um dos elementos é uniforme e há balanço de energia no mesmo. A ferramenta foi implementada em *MATLAB* e pode modelar diferentes materiais interagindo por radiação e/ou condução. Como citado na seção 2.13 essas são as duas únicas formas de interação térmica que importam nesse tipo de sistema.

Para calcular as temperaturas de um sistema em estado estacionário é necessário definir as características físicas e geométricas dos diferentes volumes que compõe o sistema. Como exemplos de características físicas podemos citar: condutividade térmica, coeficiente de emissividade e condutância térmica de contato, por exemplo. Em seguida, deve-se estabelecer as diferentes interações térmicas entre os volumes. Essas interações podem ser: condução com superfície externa, condução entre elementos, radiação com superfície externa, radiação entre elementos, condução entre elementos e radiação com superfície externa. A Tabela 4 ilustra cada uma dessas interações. Feito isso a ferramenta calcula todos os fluxos térmicos e resolve as equações diferenciais gerando uma matriz de temperaturas para todos os elementos que compõem o volume analisado.

Os elementos são mostrados num gráfico tridimensional usando uma escala

cromática para melhor visualização das temperaturas. É possível requisitar o valor de temperatura para qualquer elemento que compões o volume. A Figura 27 ilustra um exemplo de saída da ferramenta mostrando da direita para esquerda: vista isométrica para o modelo de 1500 elementos, vista isométrica para o modelo de 9000 elementos e vista frontal para modelo de 9000 elementos escala de temperaturas.

Tabela 4 - Interações térmicas disponíveis entre os volumes. Fonte: adaptado de (GUZMAN et al., 2014).

Condução com superfície externa ao sistema	Adiciona todas as interações por condução térmica de um conjunto de elementos com uma superfície externa ao sistema, cujas propriedades e temperatura são conhecidas
Condução entre elementos	Adiciona todas as interações por condução térmica entre dois conjuntos de elementos pertencentes à volumes diferentes
Radiação com superfície externa ao sistema	Adiciona todas as interações por radiação térmica de um conjunto de elementos com uma superfície externa ao sistema, cujas propriedades e temperatura são conhecidas
Radiação entre volumes	Adiciona todas as interações entre dois conjuntos de elementos pertencentes à volumes diferentes
Condução entre elementos de um conjunto de peças	Adiciona todas as interações por condução térmica entre elementos pertencentes a um conjunto de peças, assumindo a mesma resistência à condução por contato
Radiação de várias peças com superfície externa	Adiciona todas as interações possíveis entre elementos pertencentes a um conjunto de peças e uma superfície externa. Assume-se que essa superfície é a única que existe naquela direção

Figura 27 - Perfil de temperaturas gerado pelo FDM em duas simulações distintas. Fonte: (GUZMAN et al., 2014).

3.3.3 Aplicando ferramenta FDM para o sistema do BTFI

Após discussões com os criadores da ferramenta de simulação térmica da UC, a seguinte abordagem foi adotada para o sistema do BTFI: A peça principal a ser modelada é a peça de alumínio “suporte do detector” (em destaque na Figura 28). Essa peça está em contato com a placa eletrônica interna, o dedo frio e o EMCCD (em transparente na Figura 28). Será modelado e analisado também, o próprio EMCCD. Na Figura 28 são apontados ainda os pontos de interesse onde foram instalados sensores para posterior validação das simulações.

Figura 28 - Volume a ser modelado. Fonte: autor.

A Tabela 5 mostra os valores de constantes medidas em laboratório para a câmera do BTFI que foram usados como constantes de entrada na ferramenta de simulação.

Tabela 5 - Constantes medidas em laboratório para a câmera do BTFI

Variável	Valor	Descrição
T_dedofrio	132 (-141°C)	Temperatura do dedo frio onde ele toca no suporte do detector
T_window	293 (20°C)	Temperatura da janela da câmera (considerada tem ambiente)
T_fr4	283 (15°C)	Temperatura das peças de PEEK que seguram o suporte do detector
Resistor	0,24	Porcentagem da potência do resistor indicada no controlador de temperatura

Depois de extensa pesquisa bibliográfica, os parâmetros físicos necessários como entrada para a ferramenta de modelagem foram adotados. A Tabela 6 lista todos os parâmetros físicos utilizados.

Tabela 6 - Parâmetros físicos adotados para simular o sistema térmico da câmera

Variável	Valor	Descrição	Observação
cr_alum_coop	0,0015	Condutância térmica de contato entre Alumínio e cobre	estimado por (YOVANOVICH, 1981)
cr_alum_peek	0,0005	Condutância térmica de contato entre Alumínio e PEEK	estimado por (YOVANOVICH, 1981)
cr_fr4_peek	0,0001	Condutância térmica de contato entre fr4 e PEEK	estimado por (YOVANOVICH, 1981)
cr_alum_CCD	0,0005	Condutância térmica de contato entre Alumínio e CCD	estimado por (YOVANOVICH, 1981)
e_window	1	Emissividade da janela	considerada corpo negro
e_alum	0,09	Emissividade do Alumínio (polido)	(WEN; MUDAWAR, 2005)
e_CCD	1	Emissividade do CCD	considerado corpo negro
k_coop	380	Condutividade cobre [W/mK]	(YOUNG, 1992)
k_alum	180	Condutividade Alumínio [W/mK]	(YOUNG, 1992)
k_peek	0,59	Condutividade PEEK [W/mK]	(BLUMM, LINDEMANN, SCHOPPER, 2008)
k_fr4	0,32	Condutividade fr4 [W/mK]	(AZAR; GRAEBNER, 1996)
k_CCD	1,4	Condutividade CCD [W/mK]	(CREMERS, 1991)
Q_CCD	50000	Total de energia gerada pelo CCD [W/m3]	(E2V, 2008)
L_fr4	0,0024	Espessura do fr4 [mm]	medido
L_dedofrio	0,005	Distância vertical de onde é medida a temperatura do dedo frio [mm]	(GUZMAN, 2009)

O sistema da câmera do BTFI foi modelado de duas formas diferentes: um modelo com 796 elementos para simulações qualitativas e outro modelo com 20.436 elementos para simulações mais precisas.

A Figura 28 demonstra os pontos de interesse cujos valores de temperatura foram analisados nas simulações. Já a Tabela 7 mostra os parâmetros analisados durante as simulações.

Tabela 7 - Parâmetros analisados durante as simulações

Variável	Descrição
T_sensor [k]	Valor da temperatura no nó que corresponde à posição do sensor de controle
T_resistor [k]	Valor da temperatura no nó que corresponde à posição do Resistor no suporte do detector
T_dedofrio [k]	Valor da temperatura na base do dedo frio onde há o contato com o suporte do detector
Resistor [%]	Valor do Resistor indicado no controlador de temperatura
Fator	Fator utilizado para emular diferentes pressões internas nas câmeras
T_grad [k]	Diferença entre maior e menor temperatura entre os nós que compõem o CCD
T_avg_CCD [k]	Temperatura média entre todos os nós que compõem o CCD

As simulações iniciais do sistema do BTFI indicaram que o sistema possuía um gradiente térmico que variava de 4,5°C a 9,3°C. O resultado da simulação inicial para o modelo de 796 elementos pode ser visualizado na Figura 29, onde pode-se notar no sentido horário: a) Vista do suporte do detector, vácuo recém feito; b) vista do EMCCD, vácuo recém feito; c) Vista do suporte do detector, vácuo degradado; d) vista do EMCCD, vácuo degradado. Os valores de gradientes obtidos nas simulações iniciais se mostraram muito altos e isso poderia estar influenciando no comportamento do ganho EM do detector.

Figura 29 - Resultado da simulação inicial do BTFI para 796 elementos. Fonte: autor.

Além disso, foi possível verificar através das simulações, a dependência que a câmera apresenta em relação à qualidade do vácuo. Uma alta pressão (ou vácuo ruim) foi simulado através de um fator de correção aplicado nas interações térmicas entre o dedo frio e suporte do detector e também entre o suporte e o EMCCD.

Foi simulada a situação exata que era observada em laboratório, ou seja: inicialmente com vácuo recém feito o resistor do controlador de temperatura indicava 24% de sua potência. Depois de alguns dias, com a degradação do vácuo, o resistor indicava 10%. Nesse nível de valor do resistor, a câmera já apresentava um comportamento esperado, ou seja, alto ganho EM. O fator de correção a ser aplicado foi ajustado para que, nos dois casos, a variável T_{sensor} indicasse -100°C ou $173,15\text{K}$. Chegou-se num fator de correção de 1,71 do forma recursiva. Ou seja, o programa de simulação foi modificado para encontrar um fator que convergia quando o resistor mudava de 24% para 10% de sua potência mantendo T_{sensor}

(temperatura do sensor de controle) próximo de 173,15K.

Os pontos de interesse para essa simulação inicial são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados das simulações da situação inicial da câmera

	Pressão baixa	Pressão alta
T_sensor	173,62	173,53
T_resistor	181,66	177,746
T_dedofrio	132	132
Resistor	0,24	0,1
Fator	1	1,71
T_grad	9,3312	4,4551
T_avg_CCD	178,81	176,28

Essa simulação inicial mostra como o gradiente cai 43,3% (de 9,33°C para 4,45°C) apenas com a degradação do vácuo. Ou seja, a temperatura do sensor indica - 100°C (~173,15K), mas a temperatura média do CCD (T_avg_CCD) varia de 178,81K para 176,28 K nesse caso. O gradiente térmico (T_grad) está muito diferente. Isso indica que há pontos mais frios e mais quentes que poderiam estar atrapalhando o comportamento do CCD. As simulações iniciais indicam que o gradiente térmico existe e é muito alto.

Foram feitas outras de simulações de propostas de solução com o intuito de diminuir ou eliminar o gradiente térmico. Todas elas com o modelo 796 elementos. Inicialmente foi utilizado o modelo de 796 elementos devido ao seu menor tempo computacional necessário. Posteriormente, as propostas mais relevantes foram simuladas também com o modelo de 20.436 e serão mostradas adiante. Algumas das soluções propostas foram testadas nos laboratórios do CTIO em La Serena e serão discutidas no final.

3.3.4 Primeira proposta, mudar localização do sensor de controle de lugar

Constatou-se que o controle de temperatura poderia estar ineficiente pois o sensor de controle que fecha o loop do controle está longe do elemento ativo (resistor). Foi proposto então mudar a localização do sensor de controle e posicioná-lo exatamente acima do resistor. Dentro da simulação, foi necessário encontrar um valor da porcentagem do resistor onde o valor da temperatura do elemento T_resistor indique 173,15K. Os resultados gerados pela simulação da Proposta 1 são observados na Tabela 9. A Figura 30 mostra no sentido horário: a) Vista do suporte do detector, vácuo recém feito; b) vista do EMCCD, vácuo recém feito; c) Vista do suporte do detector, vácuo degradado; d) vista do EMCCD, vácuo degradado.

Figura 30 - Resultado da simulação da Proposta 1 para 796 elementos. Fonte: autor.

Tabela 9 - Resultados das simulações da proposta 1 de solução

	Pressão baixa	Pressão alta
T_sensor	180,59	177,55
T_resistor	173,85	173,43
T_dedofrio	132	132
Resistor	0,21	0,09
Fator	1	1,71
T_grad	7,82	4,91
T_avg_CCD	178,36	176,85

A potência do resistor abaixou nos dois casos, 21% para pressão baixa e 9% para pressão alta. A temperatura média do CCD também abaixou um pouco nos dois casos. Mas o gradiente ainda se manteve alto e ainda há uma grande diferença entre os dois regimes de vácuo.

3.3.5 Proposta intermediária: aumentar a resistência térmica no dedo frio

Uma solução intermediária possível é aumentar a resistência térmica no dedo frio e assim aumentar a temperatura do dedo frio para que se exija menos potência do resistor e consequente, o gradiente diminua. Nessa simulação adotou-se que t_{dedofrio} deve aumentar para que o sistema exija 10% do resistor quando vácuo estiver bom. Esse valor de 10% foi adotado pois ainda é necessário uma faixa para o sistema se ajustar confirme o vácuo vá piorando. Assim é preciso achar um ponto onde: com $\sim 0\%$ do resistor, T_{sensor} ainda indique 173,15K. O programa de simulação foi modificado e recursivamente encontrou-se que para $t_{\text{dedofrio}} = 148,5\text{k}$ atinge-se $t_{\text{sensor}} \sim 173,15\text{K}$ com um bom range para o resistor. Os resultados gerados pela simulação da Proposta 2 podem ser observados na Tabela 10. A Figura 31 mostra no sentido horário: a) Vista do suporte do detector, vácuo recém feito; b) vista do EMCCD, vácuo recém feito; c) Vista do suporte do detector, vácuo degradado; d) vista do EMCCD, vácuo degradado.

Figura 31 - Resultado da simulação da Proposta 2 para 796 elementos. Fonte: autor.

Tabela 10 - Resultados das simulações da proposta 2 de solução

	Pressão baixa	Pressão alta
T_sensor	173,53	173,77
T_resistor	177,32	176,55
T_dedofrio	148,5	148,5
Resistor	0,1	0,02
Fator	1	1,71
T_grad	4,34	3,09
T_avg_CCD	174,871	175,052

Piorar o contato térmico de modo a obter $t_{dedofrio} = 148,5K$ melhora o sistema. O gradiente para o vácuo bom (recém feito) é igual ao gradiente inicial para o vácuo ruim. Isso em teoria é aceitável, pois com o resistor em 10% na situação inicial o ganho EM está OK. Conforme o vácuo fica pior, o gradiente diminui. Isso melhoraria ainda mais o comportamento do sistema. Para um vácuo degradado (fator 1,71) o

sistema exige 2% do Resistor nessa simulação. Apesar de 3,09 ser um gradiente aparentemente alto, talvez esteja aceitável.

Principal desafio da implementação prática dessa solução: conseguir piorar o contato térmico do dedo frio para ficar exatamente em 148,5K.

3.3.6 Melhor solução proposta: mudar localização do Resistor

A proposta que apresentou melhores resultados em simulação foi mover o resistor e posicioná-lo no próprio dedo frio. Isso exigirá mais potência do resistor, mas o dedo frio entregará para o sistema uma temperatura mais compatível com a temperatura de controle solicitada.

Nessas simulações o valor do resistor não importa. Na verdade o resistor foi removido do modelo e assumiu-se uma temperatura fixa no dedo frio. Novamente o software foi modificado para, recursivamente, convergir para $T_{\text{sensor}} \sim 173,15\text{K}$. O valor de T_{dedofrio} foi sendo testado e incrementado em cada caso e os valores encontrados e demais resultados gerados pela simulação da Proposta 3 podem ser observados na Tabela 11. Já a Figura 32 mostra no sentido horário: a) Vista do suporte do detector, vácuo recém feito; b) vista do EMCCD, vácuo recém feito; c) Vista do suporte do detector, vácuo degradado; d) vista do EMCCD, vácuo degradado.

Figura 32 - Resultado da simulação da Proposta 3 para 796 elementos. Fonte: autor.

Tabela 11 - Resultados das simulações da proposta 3 de solução

	Pressão baixa	Pressão alta
T_sensor	173,92	173,84
T_resistor	176,3	175,83
T_dedofrio	158,39	144,22
Resistor	0	0
Fator	1	1,71
T_grad	2,45747	2,02183
T_avg_CCD	174,957	174,884

Os resultados das simulações mostram que o gradiente térmico no detector (T_{grad}) é baixo nos dois casos. Tanto para baixas pressões (vácuo bom) quanto para altas pressões (vácuo ruim) as diferenças entre as temperaturas e os gradientes são muito pequenas. A solução apresentada na proposta 3 é a configuração mais estável com relação à variação da pressão interna, e por isso, foi considerada a melhor e mais promissora solução para resolver o problema do gradiente térmico no detector.

3.3.7 Validação das simulações em laboratório

O principal objetivo dos testes em laboratório foi validar as simulações feitas com a ferramenta de modelagem térmica para as câmeras do BTFI e implementar as propostas de melhorias de modo a eliminar o gradiente térmico do CCD e ter o ganho EM da câmera funcionando corretamente.

Foram instalados dois novos sensores de temperatura dentro de uma das câmeras do BTFI. Ou seja, além do sensor de controle localizado no suporte do detector (T_{sensor}), foram instalados sensores na posição do resistor e no dedo frio conforme a Figura 33 (À direita, sensores instalados na posição original e logo acima do resistor. À esquerda, detalhe do sensor instalado no dedo frio). Através de uma série de testes, foi possível constatar qualitativamente que a modelagem térmica inicial estava correta. No capítulo seguinte esses resultados são mostrados e discutidos.

Figura 33 - Fotos mostrando sensores utilizados para validar simulações. Fonte: autor.

A primeira abordagem proposta foi fechar o loop do controle de temperatura utilizando-se o sensor de controle mais próximo ao resistor. Ou seja, o loop de controle de temperatura seria fechado utilizando o sensor T_{resistor} ao invés de T_{sensor} . Essa solução já havia sido testada em simulações e sabia-se que o gradiente não diminuiria suficientemente. Porém o teste foi feito com intuito de validar as simulações. Conforme esperado, o valor da potência do resistor diminuiu.

Baseado nos valores de leitura dos 3 sensores conclui-se que a temperatura média do CCD diminuiu e o gradiente ainda se manteve alto. Portanto, apesar de confirmada na prática, a solução foi descartada. Os resultados obtidos serão mostrados e discutidos no capítulo seguinte.

Apesar das simulações indicarem um gradiente térmico no CCD, na prática, minimizar esse gradiente não resolveu o problema na câmera do BTFI. Mesmo com um gradiente térmico bem menor que o inicial (de 9,33 para 2,46), não foi possível encontrar nenhum ajuste nos parâmetros da câmera para obter um ganho EM satisfatório com o vácuo bom e recém feito (baixa pressão). Ou seja, mesmo um gradiente quase 4x menor que o inicial a câmera ainda apresentava o mesmo comportamento indesejado. Isso indica que o problema do comportamento do ganho EM não tem relação com o gradiente térmico.

Posteriormente, foram feitas novas simulações utilizando a ferramenta de modelagem térmica na versão de 20.436 elementos. Esse processo serviu para aprimorar mais os valores de temperaturas obtidos em simulação e validar sua funcionalidade com os valores medidos.

3.4 Novos testes em laboratório

Mesmo após identificar e minimizar o gradiente térmico existente no detector, a câmera ainda não apresentava o comportamento esperado. Assim, novos testes foram feitos em laboratório com intuito de seguir investigando e encontrar uma solução para o problema.

3.4.1 Problema de decaimento de vácuo

Uma das variáveis indesejáveis apresentada na câmera é o decaimento da vácuo ou aumento da pressão interna ao longo do tempo. Isso, a princípio não se mostrou um problema pois havia um grande *range* de potência do resistor pra manter a temperatura do CCD constante no valor desejado. Porém, testes em laboratório indicaram que o comportamento da câmera dependia do valor da pressão interna. Apesar do sistema apresentar um desempenho ruim (baixo ganho EM) com um bom nível de vácuo. Era necessário garantir que a câmera apresentasse um comportamento estável nesse aspecto. O valor da pressão interna deveria se manter constante por semanas ou meses, ou seja, o sistema deve apresentar um bom nível de vácuo.

Foram feitos diversos testes no Laboratório de Detectores do CTIO em La Serena para tentar encontrar o motivo do decaimento do vácuo. Dentre os diversos procedimentos executados, vale citar:

- Testes de vazamento;
- RGA (*Residual gas analyzer*) testes (HOLKEBOER et al., 1998);
- *Baking*, ou cozimento das partes metálicas (HOFFMAN; SINGH; THOMAS III, 1997);
- Reativação e posterior substituição da peneira molecular (zeólito) (O'HANLON, 2005);
- Desmontagem completa e limpeza interna;

Como exemplo, a Figura 34 mostra um teste de vazamento executado na câmera.

Durante esse teste a câmara é mantida conectada há uma bomba de vácuo com um analisador espectral acoplado. Com um pistola de ar, é injetado gás Hélio aos poucos nos possíveis pontos de vazamento do sistema, como nas conexões, por exemplo. Após várias rodadas de testes realizados ao longo de 8 horas nenhum pico ou sinal evidente de vazamento foi indicado.

Figura 34 - Teste de vazamento executado na câmara do BTFI. Fonte: Autor.

Nenhum dos procedimento citados indicou um problema aparente na câmara. Não foi encontrado nenhum vazamento ou contaminação. Foi observado ainda que o decaimento apresentado era realmente muito lento (ao longo 2 a 3 semanas).

A solução encontrada para esse comportamento, portanto, foi a instalação de sensores de pressão (*Pirani pressure gauges*). O sensor passou a atuar como uma bomba de íons e foi suficiente para manter a pressão estável por 2 meses. O sistema manteve-se estável com pressão na ordem de 10^{-5} Torr.

3.4.2 Testes injetando Nitrogênio

Com o sistema estabilizado em uma baixa pressão (bom vácuo), ainda era necessário entender porque não se conseguia um bom ajuste para a câmara. Ou seja, porque ela não operava com alto ganho EM. Assim, foi montado um aparato em laboratório de modo a injetar gás nitrogênio de forma controlada na câmara resfriada e em funcionamento. A ideia é simular o comportamento de decaimento de

vácuo apresentado anteriormente, porém de forma controlada e mais dinâmica.

A montagem utilizada foi a seguinte: uma bomba de vácuo foi conectada na câmera atuando o tempo todo. Entre a bomba de vácuo e a câmera foi instalada uma válvula do tipo agulha que permitia injetar Nitrogênio de forma controlada e precisa na câmera. Assim, foi possível aumentar a pressão interna da câmera preenchendo-a com Nitrogênio. O aparato utilizado nesse teste pode ser visto na Figura 35. Na parte direita da Figura 35 um esquemático das principais partes, e na parte esquerda uma foto do experimento sendo realizado em laboratório.

Figura 35 - Testes injetando N₂ na câmera do BTFl. Fonte: autor.

Nessa fase dos testes o sistema já apresentava modificações em relação a sua configuração original. A solução de proposta 3 já havia sido implementada, ou seja, o resistor do sistema de controle de temperatura agora já encontrava-se instalado no dedo frio. Com a nova configuração do sistema, o resistor estava estabilizado em ~46% e pressão em 1,00E-6Torr. Injetando-se Nitrogênio de forma controlada foi possível obter um bom ganho EM (em detrimento da pressão). Conseguiu-se um bom comportamento da câmera para um a pressão interna de $5,3 \times 10^{-2}$ Torr. Nesse caso o resistor havia caído para ~20%. Esse teste confirmou que a câmera só funcionava bem com um vácuo ruim, ou seja, alta pressão interna. A Tabela 12 mostra algumas medidas de destaque.

Tabela 12 - Primeiros testes injetando Nitrogênio

Pressão (Torr)	Resistor (%)	t_sensor (°C)	t_resistor (°C)	t_dedofrio (°C)	Ganho EM
5,33E-06	46,5	-99,978	-99,218	-100,7	273,278
5,55E-04	45,5	-99,991	-99,223	-100,95	38,4423
5,38E-03	40,5	-99,997	-99,203	-101,93	158,467
8,44E-03	39	-99,996	-99,19	-102,4	254,077
1,32E-02	37,5	-100	-99,175	-102,66	318,097
2,44E-02	30,5	-99,967	-99,108	-103,97	346,448
3,38E-02	28	-100,03	-99,161	-104,34	538,579
4,32E-02	26	-100,02	-99,139	-104,65	803,334
5,31E-02	24	-100,01	-99,126	-105	1082,99
6,32E-02	22	-100,01	-99,124	-105,21	1423,61
7,33E-02	20,5	-100,01	-99,124	-105,42	1749,45
8,32E-02	19	-100,01	99,124	-105,6	2124,78
9,36E-02	17,5	-100,02	-99,133	-105,76	2550,54
5,30E-06	46,5	-99,992	-99,231	-100,69	222,79

É possível verificar que, com aumento da pressão interna, aumenta-se também o ganho EM. Esse comportamento já era observado ao longo de semanas e foi possível observá-lo em pouco minutos com a montagem citada anteriormente injetando-se gás Nitrogênio.

Com esse comportamento observado, dois sensores de temperatura foram movidos para investigar outras temperaturas internas da câmara. Os sensores t_resistor e t_dedofrio foram instalados na parte interna da placa eletrônica com o objetivo de investigar as temperaturas próximas aos sinais seriais e paralelos. Esses sinais são considerados críticos pois operam em alta frequência: 100 kHz para os sinais paralelos e 10 MHz para os sinais seriais. Os novos pontos foram denominados *t_par_close* (temperatura próxima aos sinais paralelos) e *t_ser_close* (temperatura próxima aos sinais seriais). A localização interna de cada um desses pontos pode ser observada a Figura 36. Nota-se à direita, o detalhe da placa eletrônica interna mostrando a proximidade dos pontos escolhidos com os sinais a serem observados. À esquerda, uma foto dos sensores instalados dentro da câmara.

Figura 36 - Localização dos sensores para investigar temperaturas dos sinais seriais e paralelos (extremos internos). Fonte: autor.

Uma vez que os sensores foram instalados, foi feito todo o processo de bombeamento e resfriamento da câmara. Com a câmara funcional e em operação vários pontos de temperatura foram observados. Foram escolhidos três pontos de destaque, de acordo com o valor da pressão interna, para análise:

- 1) Vácuo recém feito (pressão alta);
- 2) Pressão na qual a câmara apresentava um ganho EM ~ 1000 ;
- 3) Pressão considerada limite alto crítico ($< 1.00E-1$ Torr).

A Tabela 13 resume os valores observados:

Tabela 13 - Temperaturas próximas aos sinais seriais e paralelos na parte interna da placa eletrônica.

Pressão (Torr)	Resistor (%)	t_sensor (°C)	t_par_close (°C)	t_ser_close (°C)	Ganho EM
3,05E-06	44	-99,993	-84,757	-88,632	262,33
3,12E-02	12	-99,994	-84,76	-88,608	1050,19
8,42E-02	6,5	-99,997	-84,823	-88,193	2385,52

Nota-se que nos pontos observados, a variação da pressão interna praticamente não afeta os valores de temperatura. Como esperado, t_{sensor} manteve-se estável com variação de $0,003^{\circ}\text{C}$. Os locais observados pouco variaram, mostrando que nessa parte da placa eletrônica, a temperatura não sofre influência da degradação do vácuo.

Em seguida os sensores foram movidos para os extremos externos da placa eletrônica interna ainda com o intuito de investigar as temperaturas próximas aos sinais de seriais e paralelos. Os novos pontos foram denominados t_{par} (temperatura próxima aos sinais paralelos) e t_{ser} (temperatura próxima aos sinais seriais) e podem ser observados na Figura 37.

Figura 37 - Localização dos sensores para investigar temperaturas dos sinais seriais e paralelos (extremos externos). Fonte: autor.

A Tabela 14 resume os valores observados:

Tabela 14 - Temperaturas próximas aos sinais seriais e paralelos na parte externa da placa eletrônica.

Pressão (Torr)	Resistor (%)	t_{sensor} (°C)	t_{par} (°C)	t_{ser} (°C)	Ganho EM
4,42E-06	43,5	-99,993	19,062	21,02	257,3
5,40E-02	11,5	-100,01	9,457	13,284	1089,16
9,42E-02	6	-100,05	6,049	10,209	2465,02

Pode-se observar que a placa eletrônica interna está bem isolada termicamente da “parte fria” do sistema, ou seja, CCD + suporte do detector. Outro ponto importante observado é que a degradação do vácuo a ponto de se obter um alto ganho EM também influencia na temperatura de outras partes do sistema. Apesar de o sensor de controle t_{sensor} indicar -100°C para pressões tão distintas, notamos que as temperaturas t_{par} e t_{ser} variam bastante.

3.5 Dependência capacitância x temperatura

As características elétricas de um cabo, trilha ou linha de transmissão podem ser expressas por sua impedância em Ω (HOROWITZ, 1989):

$$Z = R + j(X_L + X_C) \quad (23)$$

Onde:

- Z: impedância
- R: resistência
- X_L : reatância indutiva
- X_C : reatância capacitiva

A reatância capacitiva X_C , por sua vez é expressa por (IRWIN, 2002):

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (24)$$

Onde:

- f: frequência do sinal
- C: capacitância

As equações acima mostram a influência da capacitância e da frequência do sinal na impedância total da linha de transmissão. Já em (RYU; KIM; KIM, 2014) é demonstrada uma relação direta entre capacitância e temperatura:

$$C = \frac{1}{63 \times (2,79 + 0,0158 \times T) \times 10^{-5}} \quad (25)$$

Onde:

- T: temperatura em $^{\circ}\text{C}$
- C: capacitância em pF

Através da eq.(25) podemos observar que uma variação de 0°C para 10°C pode gerar uma variação de 30,5 pF na capacitância. E uma variação de 0°C para 20°C geraria uma variação de 57,88 pF.

Com as informações citadas acima e após todos os testes executados, ponderou-se que o isolamento térmico existente entre o CCD e placa eletrônica externa poderiam estar causando o problema.

Sabe-se que a capacitância de condutor está relacionada com sua temperatura. Uma diferença tão abrupta de temperatura (-100°C no CDD e +20°C na placa) poderia interferir no valor da capacitância da linha de transmissão e desconfigurar o ajuste do sinal senoidal de alta tensão responsável pelo ganho EM, conforme explicado em 2.9. Os valores de capacitância envolvidos nas variações de temperatura (30,5 pF e 57,88 pF) são da mesma ordem da faixa permitida para os cabos que levam o sinal do controlador até o EMCCD (6 pF a 30 pF).

Foi feito então um teste para comprovar essa hipótese. As pequenas peças de *PEEK*, responsáveis por isolar termicamente a parte fria do restante do sistema, foram substituídas por peças de Alumínio. O objetivo dessa proposta era tornar a queda de temperatura da parte fria para os pontos externos da placa mais suave. Isso seria atingido melhorando o contato térmico entre a placa e o suporte do detector.

Como esperado os valores de t_{par} e t_{ser} abaixaram bastante. Por exemplo a temperatura do ponto t_{ser} baixou de 21,02°C para 1,37°C com o vácuo recém feito (pressão de 10^{-6} Torr). Além disso, esses pontos da placa não ficaram tão dependentes da variação da pressão. Ou seja, mesmo variando a pressão de 10^{-6} Torr para 10^{-2} Torr a temperatura de t_{ser} variou apenas de 1,37°C para -0,15°C.

Notou-se ainda que o valor exigido do resistor foi bem menor. Isso se explica pois, uma vez que a parte fria não está mais isolada do resto do sistema, não é necessária tanta potência do resistor para manter o CCD em -100°C.

Os resultados dos testes executados com um melhor contato térmico entre a placa eletrônica e o suporte do detector podem ser vistos na Tabela 15.

Tabela 15 - Temperaturas próximas aos sinais seriais e paralelos na parte interna da placa eletrônica com peças de Alumínio no lugar das peças de PEEK.

Pressão (Torr)	Resistor (%)	t_sensor (°C)	t_par (°C)	t_ser (°C)	Ganho EM
3,06E-06	30	-99,99	2,056	1,37	1770,19
5,52E-04	28,5	-99,995	2,124	1,466	1772,61
5,38E-03	16	-100,01	1,496	0,953	1774,31
8,42E-02	11,5	-99,846	0,311	-0,149	1711,01

Os valores da Tabela 15 mostram que a hipótese estava correta. Mesmo com o vácuo recém feito e uma alta pressão, o sistema já apresentou um alto ganho EM. Ao injetar nitrogênio e aumentar propositalmente a pressão interna, o valor do ganho EM praticamente manteve-se constante.

4 RESULTADOS

A seguir são demonstrados os vários resultados obtidos durante a pesquisa e os testes desenvolvidos. São apresentados os primeiros resultados de caracterização das câmeras, os resultados das simulações térmicas (e seus equivalente reais), o comportamento estável e a caracterização final das câmeras.

4.1 Caracterização prévia das câmeras

Durante os testes realizados nos laboratórios da empresa Nuvu Cameras Inc. foram obtidos os seguinte resultados. O ganho encontrado foi de 5,79 elétrons/ADU e o ruído de leitura calculado foi de 135,92 elétrons/pixel. O valor encontrado para o ganho EM foi de 3334 e o ruído CIC estimado foi de 0,005 elétrons/pixel. Assim, o ruído de leitura efetivo calculado foi de 0,041 elétrons/pixel, ou seja, o ruído sem o ganho EM (135,92 elétrons/pixel) dividido pelo ganho EM encontrado (3334). A corrente de escuro encontrada foi de 0,00113 elétrons/pixel/segundo com a câmera operando a -85°C.

Realizando-se os mesmos testes no telescópio, os resultados encontrados foram: ganho EM de 3087; ruído de leitura efetivo de 0,044 elétrons/pixel; ruído CIC de 0,009 elétrons/pixel e corrente de escuro 0,00121 elétrons/pixel/segundo. A Tabela 16 compara os valores encontrados para as câmeras em ambiente de laboratório e já instaladas no telescópio.

Tabela 16 – Resultados das caracterizações prévias realizadas em laboratório e no telescópio.

	Laboratório	Telescópio
Ruído de leitura (elétrons/pixel)	135,92	135,83
Ganho EM	3334	3087
Ruído de leitura efetivo (elétrons/pixel)	0,041	0,044
Ruído CIC (elétrons/pixel)	0,005	0,009
Corrente de escuro (elétrons/pixel/segundo)	0,00113	0,00121

4.2 Simulações térmicas (gradiente)

Neste item são apresentados os dados mais relevantes obtidos com a ferramenta de simulação utilizada. Primeiramente é feita uma comparação entre as várias soluções propostas. Em seguida, os valores simulados são mostrados juntos com os valores medidos na prática.

A Tabela 17 mostra um resumo dos resultados das quatro simulações executadas para o sistema: a situação inicial e as três soluções propostas para o problema. Para cada uma das quatro situações a ferramenta de simulação foi executada considerando o ambiente interna da câmara em pressão baixa (da ordem de 10^{-6} Torr) e em alta pressão (da ordem de 10^{-2} Torr). Como explicado anteriormente isso foi feito utilizando-se um fator de correção aplicado nas interações térmicas entre o dedo frio e suporte do detector e também entre o suporte e o EMCCD. O fator utilizado foi 1 para baixas pressões e 1,71 para altas pressões.

Tabela 17 - Resumo dos resultados das quatro simulações térmicas executadas.

Pressão	Inicial		Proposta 1		Proposta 2		Proposta 3	
	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta
T_sensor	173,59	173,48	170,26	171,68	173,28	173,6	173,71	173,52
T_resistor	177,56	175,27	173,77	173,32	175,07	174,14	173,95	173,75
T_dedofrio	132	132	132	132	148,5	148,5	161	152,5
Resistor	0,24	0,1	0,21	0,09	0,1	0,02	0	0
T_grad	4,62	3,2	4,36	3,11	3,15	2,38	2,16	2,22
T_avg_CCD	175,81	175,29	172,36	173,45	174,87	175,05	174,86	174,88

Vale lembrar cada uma das três soluções propostas:

Proposta 1: mudar localização do sensor de controle

Proposta 2: aumentar a resistência térmica no dedo frio

Proposta 3: mudar localização do Resistor

Em seguida são apresentados resultados mais específicos das simulações que puderam ser testadas na prática. Tanto para a situação inicial quanto para as propostas 1 e 3, a ferramenta foi novamente utilizada dessa vez na versão com 20.436 elementos. Para essas 3 situações também são mostrados os valores reais medidos e os respectivos erros de predição.

Para a situação inicial da câmera temos a Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados da situação inicial em que a câmera se encontrava

Pressão	Real		Simulado 800		Erro [%] 800		Simulado 20.436		Erro [%] 20.436	
	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta
T_sensor	173,15	173,16	173,62	173,53	-0,27	-0,21	173,59	173,48	-0,26	-0,18
T_resistor	177,22	176,15	181,66	177,74	-2,51	-0,9	177,56	175,27	-0,19	0,5
T_dedofrio	133,03	130,45	132	132	0,77	-1,19	132	132	0,77	-1,19

Nota-se que os resultados da simulação demonstram que a situação inicial foi muito bem modelada pela ferramenta da UC. Apesar de o sensor de temperatura de controle indicar que o CCD estava operando em -100oC, é possível observar que há pontos internos com valores bem distintos e esses valores mudam bastante quando muda a pressão interna da câmera. Os erros do modelo com 800 elementos foram baixos chegando a no máximo 2,5% para o valor da temperatura na posição do resistor para a câmera operando em pressão baixa. Para o modelo de 20.436 os erros foram ainda menores. Nos pontos de medição do suporte do detector (T_sensor e T_resistor) todos os erros foram menores ou iguais a 0,50%

Apesar de ter sido descartada pelas simulações, a proposta 1 foi aplicada na prática devido à sua fácil implementação. Para isso utilizou-se o sensor localizado na posição do resistor para fechar o loop do controle de temperatura. Mesmo não possuindo aplicação prática, o objetivo do teste foi validar os resultados simulados e comparar os modelos de 800 e 20.436 elementos. Esses resultados podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados das simulações e dados medidos para a proposta de solução 1: mudar localização do sensor de controle.

Pressão	Real		Simulado 800		Erro [%] 800		Simulado 20.436		Erro [%] 20.436	
	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta
T_sensor	180	178	181,59	178,55	-0,88	-0,31	180,59	177,55	-0,33	0,25
T_resistor	173,15	173,16	173,99	173,73	-0,49	-0,33	173,65	173,43	-0,29	-0,16
T_dedofrio	134,21	130,95	132	132	1,65	-0,8	132	132	1,65	-0,8

Como esperado a temperatura de T_resistor ficou em -100°C pois esse foi o valor solicitado para se fechar o loop do controle. Os erros entre os valores medidos e os simulados foram mínimos, e como esperado, menores ainda para o modelo de 20.436 elementos.

Devido às dificuldades de implementação, a proposta 2 (aumentar a resistência térmica no dedo frio) não foi aplicada na prática. As simulações com o modelo de 800 elementos indicaram que era necessário chegar a uma temperatura de cerca de 148K no dedo frio para obter um gradiente aceitável (entre 3 e 4K). Após várias tentativas não foi possível atingir essa temperatura exata. As tentativas de piorar o contato térmico envolveram utilização de espaçadores metálicos e plásticos, mas sem sucesso. A solução foi descartada portanto.

Por fim a proposta de solução 3 (mudar localização do resistor) foi implementada na prática e simulada no modelo de 20.436 elementos. Pelas simulações iniciais essa proposta mostrou-se a mais promissora pois os valores de temperatura de interesse mudavam pouco para baixa e alta pressão e o gradiente térmico era baixo (menor que 3K) nos dois casos. A Tabela 20 mostra os resultados reais e simulados da proposta de solução 3.

Tabela 20 - Resultados das simulações e dados medidos para a proposta de solução 3: mudar localização do resistor.

Pressão	Real		Simulado 800		Erro [%] 800		Simulado 20.436		Erro [%] 20.436	
	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta
T_sensor	173,15	173,16	173,9	173,8	-0,44	-0,39	173,71	173,52	-0,32	-0,21
T_resistor	174,07	172,88	176,3	175,8	-1,28	-1,71	173,95	173,55	0,07	-0,39
T_dedofrio	162,05	150,27	158,4	144,2	2,26	4,03	161	151,5	0,65	-0,82

Novamente, os valores de temperaturas obtidos no sistema se mostraram muito próximos dos simulados, mesmo com o modelo de 800 elementos. Considerando-se o modelo de 20.436 elementos, o erro entre os valores simulados e medidos foram todos menores que 1%. O valor do gradiente medido na prática foi ainda menor que o simulado: menos que 1o comparando T_sensor e T_resistor. Esses resultados confirmam positivamente duas coisas: primeiro, a ferramenta de modelagem térmica mostrou-se efetiva e funcionou muito bem para o sistema do BTFI; e segundo, as propostas de solução apresentadas para diminuir o gradiente térmico funcionaram e estavam corretas, principalmente a proposta 3. A título de ilustração, a Figura 38 mostra os resultados das simulações da proposta 3 utilizando o modelo de 20.436 elementos (a- Vista do suporte do detector e b- Vista do EMCCD.). Nesse exemplo foi considerado o caso de pressão baixa, ou seja vácuo recém feito. Nesse regime exige-se mais do resistor e o gradiente térmico é maior, seja, esse seria o pior caso.

Figura 38 - Simulações da proposta 3 com modelo de 20.436 elementos. Fonte: autor.

4.3 Temperaturas internas x pressão interna

Movendo os sensores de temperaturas em pontos específicos da câmera, pode-se notar que placa eletrônica interna estava muito bem isolada termicamente da “parte fria” do sistema. Considera-se a parte fria do sistema o conjunto: dedo frio, suporte do detector e o EMCCD. As medidas de temperatura indicaram variações superiores a 50% nos pontos monitorados da placa eletrônica, apenas com a degradação do vácuo. Na Tabela 21 podemos ver essas variações. Nela são mostradas as temperaturas para dois níveis distintos de pressão em três pontos da placa: t_{sensor} , que é o sensor de controle do loop e espera-se estar em -100°C ; t_{par} e t_{ser} , que são pontos extremos externos da placa eletrônica localizados próximos aos sinais de clock paralelos e seriais, respectivamente.

Tabela 21- Variação da temperatura nos pontos externos da placa eletrônica interna de acordo com a pressão.

Pressão	4,42E-6 Torr	9,42E-2 Torr	Variação %
t_{sensor}	-99,993	-100,05	-0,06
t_{par}	19,062	6,049	68,27
t_{ser}	21,02	10,209	51,43

Vale ressaltar também como a modificação mecânica alterou os valores da temperaturas internas da câmera. Na Tabela 22 é possível analisar a variação dos valores de temperatura na parte externa da placa antes (usando *PEEK* para isolar) e depois da modificação (usando Alumínio para melhorar contato térmico). Para ambos casos o valor da pressão era da ordem de 10^{-6} Torr, ou seja, sistema com bom nível de vácuo.

Tabela 22 - Comparativo das temperaturas internas da placa fixada com *PEEK* e com Alumínio

	PEEK	Alumínio	Variação %
t_sensor	-99,993	-99,99	0
t_par	19,062	2,056	89,21
t_ser	21,02	1,37	93,48

Os valores mostrados na coluna “Alumínio” ainda estão longes das temperaturas da parte fria da câmera. Porém ambos caíram bastante se comparados com as medidas de temperaturas realizadas quando o sistema utilizava peças de *PEEK* para isolar termicamente a placa eletrônica da parte fria.

4.4 Comportamento estável

Após substituição de *PEEK* por Alumínio houve um melhor contato térmico entre a parte fria do sistema e a placa eletrônica interna. Dessa forma não houve uma variação tão grande de temperatura entre os sinais que saem do CCD e passam pela placa. Assim, mesmo com vácuo recém feito (ordem de 10^{-6} Torr), a câmera já apresentou um bom ganho EM (na ordem de 1000).

Na verdade, foi preciso abaixar o valor da tensão de R2HV (eletrodo serial de alta tensão) para obter um ganho menor, pois o ganho estava muito alto para os testes pretendidos (maior que 3000).

A Figura 39 mostra a estabilidade do sistema ao longo do tempo. Os valores de temperatura e pressão foram monitorados durante 71 dias e foram adquiridos mais de 1600 medidas entre Outubro e Dezembro de 2015 no Laboratório de Óptica do CTIO em La Serena.

Figura 39 - Temperatura e pressão estáveis do sistema. Fonte: autor.

O gráfico demonstra a estabilidade do sistema quanto ao nível de pressão interna, que ficou em torno de $6,00E-5$ Torr e de temperatura do CCD que ficou em torno de -100°C conforme solicitado. Nota-se no gráfico que o controle de temperatura se

mostra eficiente pois as variações máximas de temperaturas medidas não passaram de 0,05°C. Para a pressão são visíveis alguns picos no gráfico, isso se deve ao fenômeno de desgaseificação que ocorre internamente, ou ainda alguma moléculas de ar que estavam “presas” e se soltaram aleatoriamente com o tempo.

Esporadicamente foram feitos testes para medição do ganho EM ao longo dos dias de monitoramento. O valor do ganho EM foi medido 28 vezes durante o período de observação. A Figura 40 ilustra os valores dos ganhos EM medidos ao longo de 71 dias.

Figura 40 - Estabilidade do ganho EM. Fonte: autor.

O valor médio obtido para essas medições foi de 1760,13. Trata-se da média do ganho EM obtido durante os 71 dias de observação. A maior variação medida foi de - 4,45% (ganho EM de 1681,79) e a variação média foi de 1,54%.

Os valores de temperatura, pressão e ganho EM demonstram a atual robustez e estabilidade do sistema.

4.5 Caracterização final

A mesma caracterização feita inicialmente mostrada em 4.1 foi executada novamente, agora com a câmera apresentando um comportamento estável ao longo do tempo e com mais detalhes. Foram caracterizadas as duas câmeras do BTFI no Laboratório de Detectores do CTIO em La Serena. Foi feito um ajuste para encontrar um ganho EM de aproximadamente 1.000.

4.5.1 Ruídos e ganho EM

Os resultados, quanto aos níveis de ruídos das câmeras, são mostrados em seguida:

Câmera 1:

Ruído de leitura: 90,79 elétrons/pixel

Ganho EM: 1011

Ruído CIC: 0,010 elétrons/pixel

Ruído de leitura efetivo: 0,10 elétrons/pixel

Corrente de escuro: 0,0039 elétrons/pixel/segundo

Câmera 2:

Ruído de leitura: 89,5 elétrons/pixel

Ganho EM: 1005

Ruído CIC: 0,025 elétrons/pixel

Ruído de leitura efetivo: 0,11 elétrons/pixel

Corrente de escuro: 0,0045 elétrons/pixel/segundo

Os resultados encontrados para o ruído CIC das câmeras são considerados excelentes se levado em conta o nível do ganho EM aplicado. A título de comparação, pode ser citado (BUSH, 2015) que utilizando detectores EMCCD modelo CCD201-20 da fabricante E2V obteve um ruído CIC de 0,0474 elétrons/pixel para ganhos EM da ordem de 300. Ou ainda a câmera comercial modelo iXon3 860 da fabricante Andor, cujo ruído CIC é de 0,05 elétrons/pixel para o mesmo nível de ganho EM das câmeras do BTFI.

Há na literatura resultados obtidos com menores ruídos de leitura e CIC. Porém são equipamentos projetados para fins específicos e geralmente com detectores menores, como por exemplo em (ALBERTI, 2015) e (DAIGLE, 2010) que utilizam detectores EMCCD de 512x512 pixels.

4.5.2 Eficiência Quântica

A Figura 41 mostra a eficiência quântica dos detectores. A linha contínua mostra a eficiência quântica genérica para o modelo do EMCCD utilizado (CCD207-40) encontrada em (E2V, 2008). Já os pontos em triângulo e em X representam a eficiência quântica para as câmeras do BTFI.

Figura 41 – Eficiência quântica dos EMCCDs utilizados. Fonte: Adaptado de (E2V, 2008) e autor.

Foram usados dados fornecidos pelo fabricante para os detectores que estão sendo utilizados de fato. Considerou-se também, um coeficiente de transmissão de 0,95 para o vidro do tipo BK7 (HORN; KREUTZ; POPRAWE, 2004), material que compõe a janela das câmeras do BTFI.

4.5.3 Linearidade

Foram feitos também testes de linearidade para as duas câmeras. O teste consiste basicamente em variar o tempo de exposição de forma crescente e anotar a contagem média em ADU de uma determinada área do detector e tem como objetivo verificar o comportamento linear da câmera em seu regime de trabalho. Em seguida, esses dados são plotados para se verificar a linearidade do sistema. A Figura 42 mostra os resultados dos testes de linearidade para as duas câmeras

Figura 42 - Gráfico de Linearidade para as duas câmeras do BTFI. Fonte: autor.

Pelo gráfico, nota-se que câmera 2 satura em um nível um pouco abaixo que a câmera 1. Para a câmera 2 o nível de saturação é de ~18.000 ADUs, enquanto para a câmera 1 a saturação ocorre em ~20.200 ADUs. A câmera 1 também possui um comportamento ligeiramente mais linear que a câmera 2. Os coeficientes de regressão linear R^2 calculados foram de 0,995 e 0,987 para câmera 1 e para a câmera 2, respectivamente. Portanto, ambas câmeras podem ser consideradas com comportamento linear até o nível de saturação. Vale ressaltar que, apesar de as câmeras saturarem em cerca 20.000 ADUs, este não é o limite de contagem. Aplicando-se o ganho EM de, por exemplo 1.000, o limite de 65.536 ADUs (imposto pelos 16 bits do ADC) é atingido com muito menos fluxo de luz. No caso da Figura 42 esse limite foi atingido com tempo de exposição menor que 50ms.

4.5.4 Relação sinal-ruído

A relação sinal-ruído (SNR) das duas câmeras foi calculada utilizando-se a eq.(7) e dados obtidos em laboratório. Os resultados pode ser vistos na Figura 43.

Figura 43 – Relação sinal-ruído das câmeras. Fonte: Autor

Foi analisada a faixa de interesse para utilização do ganho EM, ou seja, um regime de baixa contagem de fótons por pixel por frame. Vale citar também que em ambos casos foi utilizado um ganho EM de ~ 1000 . Os resultados da relação sinal-ruído encontrados para as duas câmeras estão muito próximos do limite teórico, se considerado um detector com eficiência quântica de 90% em 600nm. Os níveis de sinal-ruído das câmeras do BTFI estão próximos dos limites físicos dos detectores e são compatíveis com os melhores resultados alcançados em trabalhos semelhantes recentes, como em (ZHANG, 2010), (THOUIN, 2014) e (KRISHNAKUMAR, 2016).

Como esperado, a relação sinal-ruído das duas câmeras é praticamente idêntica. A única diferença observada é que em mesmas condições de testes (mesmos ganho EM, iluminação e tempo de exposição) a câmera 1 capta menos fótons. Isso é explicado pois a resposta em elétrons por ADU é ligeiramente menor na câmera 1. O ganho do amplificador da câmera 1 é de 3,86 elétrons/ADU e para a câmera 2 é de 4,71 elétrons/ADU.

5 CONCLUSÕES

A análise prévia do comportamento térmico da câmera, além de ser útil para a escolha e dimensionamento do sistema de resfriamento utilizado, foi também essencial no momento da modelagem e simulação térmica do sistema.

As simulações térmicas realizadas demonstraram excelentes resultados. Os dados medidos ficaram muito próximos dos valores de temperatura simulados, mesmo para o modelo de 796 elementos. Isso demonstra que, além de a ferramenta de simulação ser efetiva, ela foi interpretada e utilizada corretamente. As simulações permitiram prever o comportamento térmico da câmera para cada uma das soluções propostas, economizando assim tempo de trabalho em laboratório. A proposta adotada como melhor solução funcionou como previsto. Modificar a posição do resistor (*heater*) do sistema de controle da temperatura de fato diminui o gradiente térmico existente no detector.

As modificações mecânicas efetuadas internamente na câmera se mostraram efetivas. Ambas as câmeras encontram-se hoje funcionando perfeitamente, além de se mostrarem estáveis em testes realizados durante mais de 70 dias. Os valores de temperatura, pressão e ganho EM verificados durante esse período demonstram a atual robustez e estabilidade do sistema.

Todos os níveis de ruídos das câmeras do instrumento BTFI cumpriram com os requisitos do sistema. As câmeras possuem um ruído total muito baixo e operam a uma taxa de leitura de 10 MHz permitindo ao instrumento BTFI trabalhar no regime de operação “*rapid scanning*”.

O ruído de corrente de escuro das câmeras pode ser considerado insignificante, uma vez que o tempo médio de exposição por frame utilizado no instrumento é menor que 500 milissegundos. O alto ruído de leitura encontrado se deve à alta taxa de leitura utilizada, porém é compensado pelo ganho EM extremamente alto. Assim, o ruído de leitura efetivo é considerado adequado às especificações de instrumentos científicos (0,1 elétrons/pixel) e pode ser considerado desprezível. Ambas as

câmeras mostraram um comportamento linear até o limite de saturação, que é ligeiramente menor para a câmera 2.

5.1 Trabalhos futuros

Como possibilidades de trabalhos futuros sugerem-se:

Testar as câmeras operando simultaneamente no telescópio SOAR e analisar o comportamento de ambas a longo prazo. Ou seja, executar testes básicos de caracterização algumas vezes por mês, durante o período de um semestre ou um ano. Isso confirmaria os resultados obtidos em laboratório e permitiria uma série de novas análises, como por exemplo, quantificar o fenômeno de “envelhecimento” do EMCCD.

Desenvolver uma ferramenta de simulação que permita modelar e simular o comportamento térmico e elétrico de forma integrada em sistemas criogênicos. Unificando a simulação térmica com a simulação elétrica, seria possível prever o comportamento elétrico dos sinais que chegam e saem do detector. Essa ferramenta poderia prever, por exemplo, o problema da variação da capacitância encontrada durante a elaboração deste trabalho. Poderia ainda mostrar com detalhes o comportamento de, por exemplo, um sinal quadrado de 1 MHz ao passar por diferentes materiais (cobre, ouro), com diferentes geometrias e diferentes temperaturas. Isso permitiria otimizar ainda mais o desenho mecânico e elétrico de criostatos utilizados em instrumentação astronômica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. M.; SMITH, J. M. VAN NESS, H. C. **Introduction to chemical engineering thermodynamics**. 6a ed. Boston, McGraw-Hill Press. 2001. 789p.

Alberti, A. et al. **Super-resolution microscopy of single atoms in optical lattices**. *arXiv preprint arXiv:1512.07329*. 2015.

AHMAD, A. et al. **Structural and thermal modeling of a cooled CCD camera**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 4444, 2001. pp. 122-129.

AMICO, P.; BELETIC, J. W. **Optical detectors for astronomy II: state-of-the-art at the turn of the millennium**, 1^a ed. Dordrecht-Netherlands, Springer Books, 200. 420p.

ANDOR Technology; **iXonEM+ 897 (back-illuminated) Camera Datasheet**, 2008.

ARCILA, A. M. et al. **High resolution Fabry-Pérot Interferometer-Dynamic System modeling and nanopositioning control system design Using Lqg/Ltr technique**. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013. p. 4800.

ASHE, M. C.; BONATI, M.; HEATHCOTE, S. **ArcVIEW: A LabVIEW-based Astronomical Instrument Control System**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 4848, 2002. pp. 508-518.

ATHERTON, P. D. **The Scanning Fabry-Perot Spectrometer**. In: 3D Spectral Methods in Astronomy, ASP Conference Series Vol. 71, 1995. p. 50.

AUNE, S. et al. **The CFHT MegaCam 40 CCDs camera: cryogenic design and CCD integration**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 4841, 2003. pp. 513-524.

AZAR, K; GRAEBNER J. E. **Experimental Determination of Thermal Conductivity of Printed Wiring Boards**. In: Proceedings of the Twelfth IEEE SEMI-THERM Symposium, 1996. pp. 169–182.

BAILEY, J. A. **Spectroastrometry: a new approach to astronomy on small spatial scales**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 3355, 1998, p. 932.

BARRY, M. S. et al. **MONSOON Image Acquisition System**. In: Scientific Detectors for Astronomy, Astrophysics and Space Science Lib., Vol. 300, Kluwer Academic Publishers, 2002, p. 269-276.

BASH, F. N.; TULL, R. G.; SNEDEN, C. **Astronomical instrumentation and the birth and growth of astrophysics**, 2a ed. Austin-Texas, Astronomical Society of the Pacific Press, 2002, 159 p.

BELETIC, J. W. et al. **A New CCD Designed for Curvature Wavefront Sensing**. In: Optical Detectors for Astronomy II, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 283.

BELETIC, J. W.; GERDES, R.; DUVARNEY, R. C. **Fiera: ESO's new generation CCD controller**. In: Optical Detectors for Astronomy, Astrophysics. Space Science Lib., 1998, p. 103.

BERNARD, O.; COATES, C. **Electron-multiplying CCDs remove low-light barriers**. In: Laser Focus World Magazine, Vol. 41, 2005. pp. 133–134.

BIGELOW, B. C.; LUPPINO, G. A. **8K x 8K dewar and detector system for IMACS. Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-Based Telescopes**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 4841, 2002. pp. 225-231.

BILBENY, R. **Diseño y Evaluación Experimental de un Modelo Térmico Basado en Diferencias Finitas para Instrumentos Criogénicos en Astronomía**. 2014. 153 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 2014.

BLAIS-OUELLETTE, S.; DAIGLE, O.; TAYLOR K. **The imaging Bragg tunable filter: a new path to integral field spectroscopy and narrow band imaging**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 6269, 2006, p. 62695H.

BLUMM, J.; LINDEMANN, A.; SCHOPPER, A. **Influence of the CNT content on the thermophysical properties of PEEK-CNT composites**. In Proceedings of Japan Symposium on Thermophysical Properties, 2008. pp.306-308.

BOUCHARD, A.; COSTA, G. S.; JERJEN, H. **The environmental influence on the evolution of local galaxies**. The Astronomical Journal, vol. 137, no. 2, 2009, pp. 3038-3052.

BOYES, W. **Instrumentation Reference Book**, 4^a ed. Burlington, Butterworth-Heinemann Press, 2009. 928p.

BOYLE, W. S.; SMITH, G. E. **Inception of charge-coupled devices**. In: IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 23, 1976, pp. 661–663.

BROOKS AUTOMATION. **Polycold Compact Cooler (PCC) With PT Refrigerant Blends Operating Manual**. 2006. 88p.

CARLSON, B. S. **Comparison of modern CCD and CMOS image sensor technologies and systems for low resolution imaging**. In: Proceedings of IEEE, vol.1, 2002, p. 171-176.

CASTILHO, B. V.; DELABRE, B.; GNEIDING, C. D. **A new concept for echelle spectrographs: the SOAR Telescope Echelle Spectrograph**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 5492, 2004. pp. 433-444.

CASTILLO-DOMÍNGUEZ, E. et al. **Cryostat and CCD for MEGARA at GTC**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 8446, 2012. p. 84465Y.

CECIL, G.; CRAIN, A.; SCHUMACHER, G. **Remote Use of the SOAR 4.25m**

Telescope with LabVIEW. In: Advanced Global Communications Technologies for Astronomy II, vol. 4845, 2002, pp. 72-79.

COCHRANE, A.; SPENCER, S. H. **Imaging without intensifiers.** In: Night Vision conference, 2000.

CREMERS, C.J.; FINE, H.A. **Thermal Conductivity.** vol. 21 New York, Springer Science & Business Media, 1991. p. 711.

DAIGLE, O.; et al. **L3CCD results in pure photon-counting mode.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 5499, 2004, pp. 219-227.

DAIGLE, O.; CARIGNAN, C.; BLAIS-OUELLETTE, S. **Faint flux performance of an EMCCD.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 6276, 2006, p. 62761F.

DAIGLE, O. et al. **CCCP: A CCD Controller for Counting Photons.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 7014, 2008. p. 70146L.

DAIGLE, O. et al. **Extreme faint flux imaging with an EMCCD.** In: Publications of the Astronomical Society of the Pacific (PASP), vol. 121, issue 882, 2009, pp. 866-884.

DAIGLE, O. **Spectro-imagerie optique à faible flux et comparaison de la cinématique H α et H I d'un échantillon de galaxies proches.** 2010. 280 p. Tese (Doutorado) - Département de Physique, Université de Montréal, 2010.

DAVIDSON, M. W. **Concepts in Digital Imaging Technology - Electron Multiplying Charge-Coupled Devices (EMCCDs).** The Florida State University, Internal Publication, 2006.

DONAL, J.; DENVER; EMER, C. **Electron Multiplying CCD Technology: The new ICCD.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 4796, 2002, pp. 167-174.

DRIGGERS, R. G. **Encyclopedia of optical engineering.** Vol 3, 1^a ed. New York, Marcel Dekker Press, 2003. 3104p.

E2V TECHNOLOGIES. **CCD207-40 Back-Illuminated 2-Phase IMO Series - Electron Multiplying CCD Sensor Datasheet,** 2008.

ESPINOSA, J. M. R.; HERRERO, A.; SANCHEZ F. **Instrumentation for Large Telescopes,** 1^a ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1997. 329p.

FEAUTRIER, P. et al. **Thermal modelling of cooled instrument: from the WIRCam IR camera to CCD Peltier cooled compact packages.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 6271, 2006. p. 62710S.

FERRARI et al. **BUTTERFLY: o sistema de software do Brazilian Tunable Filter Imager.** In: XXXV Reunião da Sociedade Astronômica Brasileira. 2010. p. 31.

GARRAD, R. E. **An automated telescope system for photoelectric photometry,**

1^a ed. Queensland, University of Queensland, 1993. 321p.

GUZMAN, D. **BTFI EMCCD Science Camera Design Document “TigerCam”**, 2009

GUZMAN, D. et al. **Finite-differences model to predict temperatures on cryogenic focal plane arrays: first laboratory results**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 9154, 2014. p. 915425.

HEGYI, D. J.; BURROWS, A. **Optimal sampling of charge-coupled devices**. In: The Astronomical Journal, vol. 85. 1980. pp.1421-1424

HOFFMAN, D., SINGH, B. AND THOMAS III, J.H. **Handbook of vacuum science and technology**. Academic Press. 1997. 835 p.

HOLKEBOER, D.H. ET AL. 1998. **Miniature quadrupole residual gas analyzer for process monitoring at milli Torr pressures**. In: Journal of Vacuum Science & Technology A, 16(3), 1998. pp. 1157-1162.

HORN, A.; KREUTZ, E.W.; POPRAWA, R. **Ultrafast time-resolved photography of femtosecond laser induced modifications in BK7 glass and fused silica**. In: Applied Physics A, 79(4-6), 2004. pp. 923-925.

HOROWITZ, P.; HILL, W.; HAYES, T. C. **The art of electronics**, Vol. 2, Cambridge, Cambridge University Press, 1989. 658 p.

HOWELL, S. B. **Handbook of CCD Astronomy**, 2^a ed. New York, Cambridge University Press, 2006. 208 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3^a ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992. 380 p.

IRWIN, D. **Basic Engineering Circuit Analysis**, 7^a ed. New York, Wiley Press. 2002. 274 p.

JANESICK, J. R. **Scientific Charge Coupled Devices**, 1^a ed. Bellingham, SPIE Press, 2001. 649 p.

JERRAM, P.; et al. **The LLLCCD: Low Light Imaging without the need for an intensifier**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 4306, 2001. pp. 178-186.

JOHNSON, G. B. **Thermal management for CCD performance on the Advanced Camera for Surveys (ACS)**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 3356, 1998. pp. 284-291.

KÄUFL, H. U. et al. **CRIRES: A High Resolution Infrared Spectrograph for ESO's**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 5492, 2004. pp. 1218-1227.

KRISHNAKUMAR, S.B. et al. **Investigation of noise and contrast sensitivity of an Electron Multiplying Charge Couple Device (EMCCD) based cone beam micro-CT system**. In: Proceedings of the SPIE, vol. 9783. 2016. p. 97831W.

LAVINE, J. P.; BANGHART, E. K. **The effect of potential obstacles on charge transfer in image sensors.** In: IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 44, 1997, pp. 1593-1598.

LEACH, R.; BEALE, F.; ERIKSEN, J. **New generation CCD controller requirements and an example: the San Diego State University generation II controller.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 3355, 1998, pp. 512–519.

LEPINE, J. R. D. et al. **SIFUS: SOAR integral field unit spectrograph.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 4841, 2003, pp. 1086-1095.

MA, B. et al. **A new method of CCD dark current correction via extracting the dark Information from scientific images.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 9154, 2014. p. 91541T.

MACKAY, C. D. et al. **Sub-Electron Read Noise at MHz Pixel Rates.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 4306A, 2001, pp. 289-298.

MACKAY, C. D.; TUBBS, R. N.; BALDWIN, J.E. **Noise-Free Detectors in the Visible and Infrared: Implications for the Design of Next Generation AO Systems and Large Telescopes.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 4840, 2002. pp. 436-442.

MCLEAN, I. S. **Electronic imaging in astronomy: detectors and instrumentation,** 2^a ed. Los Angeles – CA, Springer-Praxis books, 2008. 552 p.

Bush, N. et al. **The impact of radiation damage on photon counting with an EMCCD for the WFIRST-AFTA coronagraph.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 9605, 2015. p. 96050E.

NOBEL, **The Nobel Prize in Physics 2009.** In: Nobelprize.org.

O'HANLON, J.F. **User's Guide to Vacuum Technology.** 3^a ed. Hoboken. Wiley Press. 2005. 536 p.

OLIVEIRA C. M. et al. **The Brazilian Tunable Filter Imager for the SOAR Telescope.** In: Publications of the Astronomical Society of the Pacific 125(926), 2013. p. 396.

PHOTON ETC. **EMCCDC Controller UserGuide,** Revision 1.2.0, 2009.

PYPER, D. M. **Optical astronomy from the earth and moon: Astronomical Society of the Pacific,** 1^a ed. San Diego, Astronomical Society of the Pacific Press, 1994. 304p.

QUINT, B. et al. **Illusion - A Fabry-Perot Data-Cube Synthesizer.** In: Astronomical Data Analysis Software and Systems, vol. 434, 2010, p. 382.

QUINT, B.; OLIVEIRA, C. M. **Observational Results using BTFI.** In: Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, vol. 44, 2014. p. 124.

REYES, J.; et al. **NGC Front-end for CCDs and AO Applications**. In: **Scientific Detectors for Astronomy**, Astrophysics and Space Science Lib., Vol. 300, Kluwer Academic Publishers, 2005, pp. 579-584.

RODDIER, F. **Adaptive Optics in Astronomy**, 1^a ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1999. 327p.

RYU S. J.; KIM K. E.; KIM B. W. **Analysis of the Effects of Temperature on the Electrical Parameters of Long Distance Cables**. In: *Advanced Science and Technology Letters*, vol. 47, 2014, pp. 15-18.

SEBRING, T.A.; CECIL, G.; MORETTO, G. **The SOAR telescope project: a four-metre telescope focussed on image quality**. In: *Proceedings of the SPIE*, vol. 3352, 1998, pp. 62–69.

STANFORD, M. R.; HADWEN, B.J. **The Noise Performance of Electron Multiplying Charge Coupled Devices**. In: *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 50, no 5, 2003, pp.1227-1232.

TAYLOR, B. N. et al. **The Fundamental Constants and Quantum Electrodynamics**. In: *Physics Today*, vol. 24, issue 5, 1969. p. 51.

THOUIN, F. et al. **Ultra Fast Raman Hyperspectral Imaging Using Bragg Tunable Filters and a High Performance EMCCD Camera**. In: *Biophysical Journal*, 106(2), 2014. p. 613a.

TODY, D. **The IRAF Data Reduction and Analysis System**. In: *Proceedings of the SPIE*, vol. 627, 1986, pp. 733-748.

TULLOCH, S. **Effects Contributing to Dark Current in Loral and TEK CCDs**. In: *Isac Newton Group of Telescopes, Thecnical Note #99*, 1995.

TULLOCH, S. **Application of L3 Technology to Wavefront Sensing**. In: *Proceedings of the SPIE*, vol. 5490-34, 2004. pp. 1167-1176.

TULLOCH, S. **Photon Counting and Fast Photometry with L3CCDs**. In: *Proceedings of the SPIE*, vol. 5490, 2004. pp. 604-614.

TULLOCH, S. **Monte Carlo Modeling of L3 Detectors in High Time Resolution Applications**. In: *High Time Resolution Astrophysics: The Universe at Sub-Second Timescales*, American Institute of Physics Conference Series 984, 2008, pp. 148–161.

TULLOCH, S.; DHILLON V. **On the use of electron-multiplying CCDs for astronomical spectroscopy**. In: *Instrumentation and Methods for Astrophysics*, 2010. pp.211-225.

VALLERGA, J.; et al. **Noiseless imaging detector for adaptive optics with kHz**

frame rates. In: Proceedings of the SPIE, vol. 5490, 2004, pp. 1256–1267.

WANG, A. **Analysis of Signal Integrity in the Design of High Speed Digital PCB.** In: Modern Electronics Technique, vol. 32, 2009, pp.177-180.

WEN, C.D.; MUDAWAR, I. **Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models.** In: International journal of heat and mass transfer, vol. 48(7), 2005. pp. 1316-1329.

WESTON, G. F. **Ultrahigh vacuum practice.** Cambridge, University Press. 2013. 296 p.

WHITE, M.H.; LAMPE, D.R.; BLAHA, F.C.; MACK, I.A. **Characterization of surface channel CCD image arrays at low light levels.** In: IEEE Journal vol. 9(1), 1974. pp. 1-12.

WIDENHORN, R. et al. **Temperature dependence of dark current in a CCD.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 4669, 2002, pp. 193-201.

WINDOW B.; HARDING G. **Thermal emissivity of copper.** In: Journal of the Optical Society of America, vol. 71. 1981. pp. 354-357.

WILSON, A. **Low light CCD needs no intensifier.** In: Vision Systems Design, vol.5, 2000.

YANG, W. et al. **Precise Thermal Control of CCD Assembly of Space Optical Remote.** In: Proceedings of the SPIE, vol. 8321, 2011. p. 83211V.

YOUNG, H. D. **University Physics**, 7^a Ed., Addison Wesley Pub, 1992.

YOVANOVICH, M. **New Contact and Gap Correlations for Conforming Rough Surfaces.** In: AIAA Thermophysics Conference, AIAA-81-1164, 1981. pp. 83-95.

YUNCU, H. **Thermal contact conductance of nominally flat surfaces.** In: Heat and mass transfer, vol. 43(1), 2006. pp.1-5.

ZHANG, W.W. et al. **Signal-to-Noise Ratio Improvement of EMCCD Cameras.** In: World Academy of Science, Engineering and Technology, 4(5), 2010. pp. 966-970.