DENIS FURTADO DE ANDRADE

Sistema Embarcado para Aquisição de Imagens Astronômicas

São Paulo

2011

DENIS FURTADO DE ANDRADE

Sistema Embarcado para Aquisição de Imagens Astronômicas

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

São Paulo
2011

DENIS FURTADO DE ANDRADE

Sistema Embarcado para Aquisição de Imagens Astronômicas

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

Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos

Orientador: Professor-Doutor
Francisco Javier Ramirez-Fernandez

São Paulo
2011

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

São Paulo, 04 de março de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Andrade, Denis Furtado de
Sistema embarcado para aquisição de imagens astronômicas
/ D.F. de Andrade. -- ed. rev. -- São Paulo, 2011.
102 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrô-
nicos.

1. Detetores 2. Instrumentação (Astronomia) 3. Circuitos ele-
trônicos 4. Telescópios I. Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletro-
nicos II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais por serem exemplos
de profissionais que realmente amam o que fazem

AGRADECIMENTOS

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

Especialmente à Professora Claudia Mendes Oliveira, pelo espírito empreendedor ao coordenar um projeto tão inovador e importante para a comunidade científica brasileira, o instrumento BTFI. Agradeço aqui a Prof.^a Claudia e também ao Professor Keith Taylor pela oportunidade de fazer parte deste projeto e poder desenvolver meu entusiasmo pela instrumentação astronômica.

Aos excelentes profissionais com quem trabalhei diretamente e tive a oportunidade de aprender, desenvolver habilidades e trocar experiências: Dani Guzman, Olivier Daigle, Marco Bonati, Henrique Perez, Jair Pereira, Julian David e Cesar Strauss.

A toda equipe do BTFI, que transformou o projeto BTFI no instrumento hoje em operação: Luiz Cavalcanti, Bruno Quint, Alvaro Calasans, Giseli Ramos, Rene Laporte, Fernando Castro, Fernando Lourenço, Henri Plana, Fabricio Ferrari e Renato Severo.

Aos funcionários do Laboratório de Detectores do *Cerro Tololo Inter-American Observatory* – CTIO e do telescópio SOAR no Chile.

Ao departamento de Astronomia do IAG-USP e ao Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP por disponibilizarem suas instalações e equipamentos durante os testes realizados neste trabalho.

Agradeço também a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro.

*A ignorância gera confiança com mais frequência do que o conhecimento:
são aqueles que sabem pouco, e não aqueles que sabem muito,
que tão positivamente afirmam que esse ou aquele problema
jamais será resolvido pela ciência.*

(Charles Darwin)

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento de um sistema eletrônico embarcado dedicado à aquisição de imagens astronômicas. Este sistema é composto principalmente por uma câmera científica astronômica, que abriga um detector de imagem do tipo EMCCD, e por um controlador eletrônico utilizado para a operação e leitura do detector de imagem. São detalhados os estágios que formam o sistema embarcado específico para um instrumento astronômico instalado no telescópio internacional SOAR, no Chile. Cada um destes estágios: sensor, câmera, controlador eletrônico, placa de aquisição de imagens e software, será descrito detalhadamente, desde uma revisão das alternativas de solução até as técnicas de operação de sensores, além da manipulação de controladores eletrônicos. São analisados detalhes referentes ao projeto da câmera, bem como a influência desses detalhes em seu funcionamento. Alguns resultados científicos já alcançados com sistemas embarcados equivalentes são expostos. Também são apresentados os resultados dos ensaios e trabalhos realizados em laboratório para este projeto, e os resultados atingidos com o instrumento já em operação no telescópio.

Palavras-chave: detectores, instrumentação, circuitos eletrônicos, astronomia, telescópios.

ABSTRACT

This work presents the results obtained in the development of an embedded electronic system dedicated to the acquisition of astronomical images. This system consists primarily of a scientific astronomical camera, which houses an imaging detector EMCCD, and an electronic controller used for operating and reading the imaging detector. The stages that constitute the embedded system specific to an astronomical instrument installed in the telescopic international SOAR, at Chile, are detailed. Each of these stages: sensor, camera, electronic controller, image acquisition board and software, is described in detail, from a review of alternative solutions to the technical operation of sensors, and manipulation of electronic controllers. Some details of the camera design are analyzed as well as its influence in the camera operation. Some scientific results already achieved with equivalent embedded systems are exposed. It also presents the results of laboratory tests and work done for this project, and the results achieved with the instrument already operating at the telescope.

Keywords: detectors, instrumentation, electronic circuits, astronomy, telescopes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura mecânica do instrumento BTFI, detalhe do posicionamento das câmeras EMCCD	26
Figura 2 – Analogia dos baldes ilustrando o funcionamento de um CCD.....	30
Figura 3 – Célula básica de um sensor CCD	31
Figura 4 – Esboço original do diagrama de Willard Boyle e George Smith, os inventores do CCD, mostrando o esquema de tempos para a leitura de um CCD de 3 fases (JANESICK, 2001).....	31
Figura 5 – Diagrama de três fases mostrando a carga sendo transferida da esquerda para direita (JANESICK, 2001).....	33
Figura 6 – Corrente de escuro em um sensor CCD modelo TEK1024CCD (TULLOCH, 1995).	34
Figura 7 – Ruído de leitura para sensores científicos convencionais em função da taxa de leitura (STANFORD; HADWEN, 2003).	36
Figura 8 – Comparação da eficiência quântica para diferentes sistemas de detecção ICCD e EMCCD (DAVIDSON, 2006).....	37
Figura 9 – Estrutura típica de um detector EMCCD. À esquerda (a), estrutura idêntica de um CCD convencional. À direita (b) registro de ganho estendido (JERRAM, 2001).	39
Figura 10 – Funcionamento do registro de ganho de um EMCCD. Fases presentes durante a transferência das cargas em (a) e o efeito da multiplicação dos elétrons em (b) (BERNARD; COATES, 2005).....	40
Figura 11 – Comparação do SNR entre CCD convencional e um EMCCD modelo CCD60 em função do fluxo de fótons por pixel (TULLOCH, 2004a).	43
Figura 12 – O CCD97 do tipo frame-transfer, à direita: diagrama com principais partes e pinos, à esquerda: uma foto do sensor (E2V, 2007).....	46
Figura 13 – O CCD207 do tipo <i>full-frame</i> , acima diagrama com principais partes (E2V, 2008) e abaixo foto do sensor.....	47
Figura 14 – Diagrama de blocos simplificado com principais componentes de um controlador CCD.....	49
Figura 15 – Diagrama de blocos simplificado com principais componentes do controlador CCCP	53
Figura 16 – Visão inferior da <i>Detector Board</i> do controlador CCCP	55

Figura 17 – Detalhe da connector board conectada ao controlador CCCP	56
Figura 18 – Tela do software cccpComm mostrando os padrões de forma de onda para os sinais de fase paralelos (I1, I2, I3 e I4) para o detector CCD97	58
Figura 19 – Esquema 3D mostrando os principais componentes da câmera TigerCam.....	61
Figura 20 – Foto da câmera TigerCam instalada no Laboratório de Microeletrônica da POLI-USP.....	62
Figura 21 - Imagem da placa <i>Frame Grabber</i> modelo PC <i>GRABLINK Value</i>	64
Figura 22 – Interface gráfica do PanVIEW	66
Figura 23 – CIC na transferência paralela em função do ganho para diferentes temperaturas (DAIGLE et al., 2008).	71
Figura 24 – CIC na transferência horizontal em função do ganho para diferentes temperaturas (DAIGLE et al., 2008).	72
Figura 25 – Medição de todos os eventos gerados durante o processo de leitura excluindo-se o ruído escuro (DAIGLE et al., 2008).	73
Figura 26 – Comparação da relação sinal-ruído SNR das duas câmeras (DAIGLE et al., 2009).	74
Figura 27 – Esquema de temporização das três fases seriais do detector. Acima (a) para a saída convencional e abaixo (b) para a saída de ganho EM.....	78
Figura 28 - Detalhe da construção do detector modelo CCD207-40 demonstrando as diferenças no registro serial do chip ao se utilizar a saída convencional ou a saída EM (E2V, 2008).	78
Figura 29 – Simulação do sinal de fase serial R1 em condição ideal de funcionamento, de acordo com a folha de dados (a), e o mesmo sinal medido diretamente no pino do sensor durante funcionamento (b).	82
Figura 30 – Ruídos presentes no sinal de saída do EMCCD (rosa) e no sinal bias OGH (verde) gerados pela influência de alguns dos sinais de fase. Em destaque os ruídos causados pela fase serial senoidal de alta tensão, pelo sinal de reset e por um dos sinais do conversor ADC.	83
Figura 31 – Ruídos presentes no sinal de saída do EMCCD (rosa) e no sinal bias OGH (verde) gerados por alguns dos sinais de fase atenuados pela ação dos capacitores de desacoplamento. Nota-se uma menor ação dos sinais de fase se comparada com a figura 30.....	85

Figura 32 – Fluxograma mostrando a estratégia adotada para das simulações da nova placa fanout.....	86
Figura 33 – Simulação da influência da capacitância equivalente da linha de transmissão do sinal de fase serial R1.....	87
Figura 34 – Simulação da influência da resistência equivalente da linha de transmissão do sinal de fase serial R1.....	88
Figura 35 – Representação das 3 fases seriais do detector. Acima condição ideal de funcionamento, abaixo resultado obtido com as condições de contorno encontradas.	89
Figura 36 – Temporização das fases seriais e fase de alta tensão para taxa de leitura de 10MHz. Nota-se a condição ideal dos sinais (quadrados) e os mesmos sinais distorcidos (triângulos).	90
Figura 37 – Planetária de Saturno (NGC 7009) observada na primeira noite de funcionamento do instrumento BTFL.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da placa Frame Grabber utilizada para adquirir imagens	65
Tabela 2 – Exemplo de adaptação de comandos do CCCP para o PanVIEW	68
Tabela 3 – Exemplo de comando que foi criado para o PanVIEW e sua equivalência para o CCCP	68
Tabela 4 - Comparação dos valores de ruído para a saída convencional do detector CCD207-40 para diferentes taxas de leituras.....	76

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
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
PCI	Peripheral Component Interconnect
PCI-X	Peripheral Component Interconnect Extended
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

LISTA DE SÍMBOLOS

N : número de elementos que o registro de ganho do EMCCCD possui

P : probabilidade de que a multiplicação de elétron ocorra em cada etapa no registro de ganho

σ_{eff} : Ruído de leitura equivalente

σ_{real} : Ruído de leitura real

G : valor do ganho do estágio de multiplicação ou fator de ganho

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

F : fator de ruído de multiplicação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Instrumentação Astronômica	20
1.2 O Telescópio SOAR.....	23
1.3 O Instrumento BTFI.....	24
1.4 OBJETIVOS	27
2 SENSORES CCD.....	28
2.1 Funcionamento.....	28
2.1.1 Coleta de Carga	30
2.1.2 Transferência da carga	32
2.2 Fontes de Ruído.....	33
2.2.1 Corrente de Escuro	34
2.2.2 Ruído de Leitura	35
2.3 Limitações do CCD convencional.....	36
2.4 O Ruído de Multiplicação e Estratégias de utilização do EMCCD.....	42
2.5 O ruído CIC	44
2.6 CCD-97	45
2.7 CCD-207	46
3 CONTROLADORES DE SENSORES CCD	48
3.1 Controladores existentes hoje	49
3.1.1 Controlador SDSU	49
3.1.2 Controlador MONSOON	50
3.1.3 Controlador BASE – Carnegie.....	50
3.1.4 Controlador ESO – FIERA.....	51
3.1.5 Controlador ESO – NGC	51
3.2 O Controlador CCCP.....	51
3.2.1 Visão geral do hardware.....	52
3.2.1.1 Sequencer Board	53
3.2.1.2 Detector Board	54
3.2.1.3 Connector Board	56
3.2.2 Visão geral da arquitetura do sistema.....	57

3.2.3 Programa de configuração	57
4 CÂMERAS CCD.....	59
4.1 Requisitos de uma câmera CCD	59
4.2 A câmera TigerCam.....	60
5 AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	63
5.1 Captura de Imagens (Frame Grabber)	63
5.2 Interface CameraLink	63
5.3 Placa GRABLINK Value	64
5.4 Software PanVIEW	65
5.4.1 Módulos DHE - Detector Head Electronics	67
5.4.2 Módulo CCCP	67
5.4.3 Programa Grab	69
6 RESULTADOS	70
6.1 Produção Científica com o CCCP	70
6.1.1 Resultados em Laboratório	70
6.1.2 Comparação com uma câmera comercial.....	73
6.2 Resultados em laboratório com a câmera TigerCam.....	75
6.2.1 Desempenho da saída convencional.....	75
6.2.2 Testes com a saída amplificada EM.....	77
6.2.2.1 Saída amplificada EM utilizada como uma saída convencional	77
6.2.2.2 Saída amplificada EM com multiplicação de elétrons.....	79
6.3 Limitações encontradas no sistema real	80
6.3.1 Impossibilidade de caracterização da saída EM a taxa de leitura de 1MHz	80
6.3.2 Testes para a saída amplificada EM a taxa de 10MHz	81
6.3.3 Restrições encontradas no sistema	81
6.3.3.1 Tentativa de minimização do problema observado.....	84
6.3.4 Simulações das formas de onda das fases seriais em função de valores RC das linhas de transmissão	85
6.3.5 Novo projeto proposto.....	89
6.4 Testes no telescópio SOAR.....	92
6.4.1 Testes de engenharia	92

6.4.2 “Primeira Luz” do instrumento BTFI	92
6.4.3 Benefícios da utilização do EMCCD	94
7 Conclusões e perspectivas futuras.....	95
7.1 Conclusões.....	95
7.2 Trabalhos futuros: Ótica adaptativa utilizando-se EMCCD.....	96
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 Instrumentação Astronômica

Ao longo da história nota-se que o desenvolvimento da astronomia tem uma forte ligação com os avanços da tecnologia (BASH; TULL; SNEDEN, 2002). Em alguns casos, os próprios astrônomos estão por trás desses avanços. Hoje, telescópios e observatórios utilizam equipamentos eletrônicos no “estado da arte” para coletar e analisar todos os tipos de fontes de luz. A astronomia moderna mostra-se tão complexa e desafiadora para um engenheiro e para um físico aplicado quanto para um astrônomo (MCLEAN, 2008). Com o intuito de aumentar o progresso dos experimentos científicos em cada facilidade astronômica (telescópios, observatórios e instrumentos), e também de se fazer um uso ótimo dos mesmos de acordo com as condições climáticas, a comunidade astronômica tem despendido esforços significativos no desenvolvimento de tecnologias específicas (BAILEY, 1998).

De acordo com (BOYES, 2008), a instrumentação pode ser analisada de duas formas: como uma técnica ou como uma aplicação. Quando considerada uma técnica leva em conta o lado científico e o desenvolvimento de novas tecnologias de acordo com um objetivo esperado. Quando a instrumentação é vista como uma aplicação são consideradas as várias formas de se medir uma grandeza necessária para o funcionamento de um processo. Seguindo essas definições, a aplicação de tecnologia de ponta na astronomia, bem como o desenvolvimento de novas tecnologias específicas para observações e análises astronômicas recebe o nome de instrumentação astronômica, uma área de pesquisa que está em pleno desenvolvimento. Cada vez mais, físicos aplicados e engenheiros estão se dedicando à ciência da astronomia (MCLEAN, 2008).

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. São muitas as áreas que compõem a instrumentação

astronômica, como: óptica, mecânica, eletrônica, controle de sistemas, programação (ESPINOSA, 1997). Entre essas áreas pode-se destacar:

- Óptica: a criação e o estudo de sistemas ópticos é parte crucial dos sistemas para observações astronômicas (DRIGGERS, 2003). O processo de desenvolvimento e fabricação de, por exemplo, lentes, espelhos, filtros, fibras óticas e espectrógrafos, é de crucial importância para o desenvolvimento da astronomia. Vale destacar ainda os estudos realizados na área da óptica adaptativa, onde espelhos deformáveis são utilizados para correção das imperfeições atmosféricas. A aplicação dessa técnica tem melhorado a qualidade das observações dos objetos astronômicos, principalmente quando utilizada em telescópios grandes e extremamente grandes (RODDIER, 1999).

- Mecânica: a engenharia mecânica está relacionada com a astronomia principalmente no desenvolvimento e construção de estruturas para facilidades astronômicas. Nesta área a análise por métodos dos elementos finitos demonstra-se de grande importância durante o projeto de um novo instrumento ou telescópios (PYPER, 1994). Outras aplicações, como análises de viabilidade e construção de protótipos, são também executados durante o desenvolvimento de novos projetos.

- Elétrica e eletrônica: a atuação de profissionais dessas áreas na astronomia engloba a especificação de motores, sensores e CLPs, para a movimentação dos telescópios e das partes que o compõem (AMICO; BELETIC, 2000). Nesta área inclui-se o desenvolvimento de placas de aquisição de imagem, tratamento de sinais, controladores de câmeras (MCLEAN, 2008), além dos sistemas otimizados para controle de sensores e atuadores utilizados para óptica adaptativa, por exemplo. Essas áreas ainda contribuem no processo de automatização dos telescópios, com o objetivo de se realizar observações de alto desempenho, de acordo com as necessidades do astrônomo e sem a necessidade de operadores para comandar os vários equipamentos presentes num telescópio (GARRAD, 1993).

- Programação: são muitos os *softwares* envolvidos numa observação astronômica. Por exemplo, *softwares* para modelagem e simulação do comportamento de redes holográficas (QUINT et al., 2009) e de sensores de imagens (TULLOCH, 2008).

Softwares para aquisição e armazenamento das imagens adquiridas (ASHE; BONATI; HEATHCOTE, 2002). E ainda *softwares* usados para posterior visualização e processamento de imagens adquiridas, de acordo com o objetivo do astrônomo (FERRARI et al., 2010).

Apesar de toda a demanda por recursos técnicos avançados que há neste campo das Ciências, a instrumentação astronômica é uma área pouco explorada no Brasil. Nosso país possui uma carência de capacitação de profissionais desse setor. Projetos de instrumentos astronômicos como o BTFI, o SIFS (LEPINE et al., 2003) e o STELLES (CASTILHO; DELABRE; GNEIDING, 2004) estão ajudando o desenvolvimento brasileiro nessa área, gerando oportunidades para técnicos, astrônomos e engenheiros participarem da criação e da construção de instrumentos astronômicos dentro do Brasil. A participação da comunidade brasileira nesse tipo de projeto abre portas também para o intercâmbio de conhecimentos, onde pesquisadores do Brasil possam se beneficiar e ainda colaborar no desenvolvimento de projetos internacionais.

A dissertação aqui apresentada está dividida em oito 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, são expostos os objetivos que motivaram o desenvolvimento desta pesquisa.

O capítulo 2 aborda aspectos teóricos necessários para compreensão geral do texto. São apresentadas também as principais características e limitações dos sensores de imagem mais comumente utilizados em astronomia.

O capítulo 3 descreve especificamente os sensores utilizados durante o desenvolvimento deste projeto. São apresentadas suas principais diferenças em relação aos sensores de imagem comuns e ainda os cuidados que devem ser tomados durante a operação desse tipo de sensor para aplicações específicas em astronomia.

No capítulo 4 são apresentadas as principais características dos controladores eletrônicos para sensores de imagens astronômicas. O controlador utilizado durante este trabalho é explicado com mais detalhes bem como suas características que foram decisivas para a escolha do mesmo.

O capítulo 5 expõe as câmeras desenvolvidas para os sensores de imagem utilizados, bem como expõe suas especificidades.

O capítulo 6 descreve o sistema de hardware e software usados para a aquisição das imagens geradas pelas câmeras.

No capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos. Primeiramente são mostrados os resultados obtidos pelos desenvolvedores do controlador eletrônico escolhido e em seguida são mostrados os resultados dos testes e trabalhos realizados para este projeto em específico.

Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as conclusões e intenções de trabalhos futuros.

1.2 O Telescópio SOAR

O SOAR (SEBRING; CECIL; MORETTO, 1998) (*Southern Astrophysical Research*) é um telescópio que foi financiado por um consórcio com os seguintes parceiros: Brasil (representado pelo CNPq), *National Optical Astronomy Observatory* (NOAO), a Universidade da Carolina do Norte (UNC) e a Universidade Estadual de Michigan (MSU). O Brasil possui 31% do tempo no telescópio, sendo o sócio majoritário. O SOAR foi inaugurado em 17/04/2004.

O telescópio SOAR e sua cúpula esférica estão localizados a algumas centenas de metros do seu vizinho, o telescópio Gemini Sul, que possui um espelho de 8,1 metros de diâmetro, no *Cerro Pachón*, uma montanha dos Andes Chilenos com

altitude de 2.700 metros acima do nível do mar. Essa montanha é vizinha de outro grande centro de observações astronômicas conhecido como Observatório de *Cerro Tololo*.

O telescópio SOAR tem abertura de 4,1 metros e foi projetado para produzir imagens de qualidade melhor que as de qualquer outro observatório do mundo em sua categoria. Esse telescópio é o principal meio observacional do Brasil atualmente. O Departamento de Astronomia do IAG-USP foi a entidade brasileira que liderou a implantação do telescópio e tem obtido excelentes frutos em pesquisas astronômicas.

O sistema de controle do telescópio 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 de Bagé / Software de Redução de Dados;
- *Cerro Tololo Inter-American Observatory* / Software de Aquisição Imagens.

O BTFI, ou *Brazilian Tunable Filter Imager*, é um novo interferômetro e imageador em desenvolvimento para o 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 atuará 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 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 por duas câmeras que utilizam uma tecnologia recente 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. Um dos focos de estudo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema eletrônico de leitura do EMCCD que permita otimizar a eficiência na extração das imagens mediante a multiplicação da corrente oriunda do sinal de interesse com a máxima redução do ruído. 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.

Figura 1 – Estrutura mecânica do instrumento BTFI, detalhe do posicionamento das câmeras EMCCD

1.4 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é a implementação de um Sistema Embarcado para Aquisição de Imagens Astronômicas no instrumento astronômico denominado BTFI, que fará parte do telescópio científico SOAR no Chile.

As principais etapas que compõem esse sistema embarcado são: sensor, câmera, controlador eletrônico, placa de aquisição de imagens e software. Assim, como objetivos intermediários, deve-se especificar, estudar e validar o adequado funcionamento de cada um deles. Mais especificamente adequar as soluções disponíveis de acordo com as exigências do instrumento BTFI.

2 SENSORES CCD

O dispositivo de carga acoplada CCD (*Charge Coupled Device*) (BOYLE; JERJEN, 1976) é um sensor de imagem inventado no início dos anos 70 que levou seus inventores, Willard S. Boyle e George E. Smith, a receberem o Prêmio Nobel de Física de 2009 (NOBEL, 2009).

Os CCDs, originalmente, eram empregados como dispositivos de memória, mas suas propriedades de sensibilidade à luz foram rapidamente exploradas em aplicações de imageamento, causando uma grande revolução nas câmeras fotográficas e, conseqüentemente, 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).

Os CCDs funcionam convertendo luz em um padrão de carga eletrônica por meio de um chip de silício. Este padrão de carga é convertido em uma onda de vídeo, digitalizado e armazenado como um arquivo de imagem em um computador, para posterior análise.

2.1 Funcionamento

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 de absorção de energia por aquecimento ou pela detecção de um fóton, por exemplo. A energia necessária para esta transição é de 1,14 elétrons-volt. Qualquer fóton com energia entre 1,1 e 4 elétrons-volt será capaz de excitar um elétron para a banda de condução. Para valores 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. Esse elétron que foi transferido para banda de condução deixa uma lacuna na banda de valência que age como um transportador de carga positiva. Na ausência de um campo elétrico externo, a lacuna e o elétron irão rapidamente recombinar-se, sendo perdidos. 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 (pixeis) 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

2.1.1 Coleta de Carga

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 $10\mu\text{m}$, terá a resolução de 1 milhão de pixels e uma área de 100mm^2 (LAVINE et al., 1997).

Cada um dos eletrodos horizontais está conectado separadamente às fases 1, 2 e 3 do sensor. As barreiras delimitadoras são conseguidas com alta concentração de Boro no Silício.

Figura 3 – Célula básica de um sensor CCD

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, os inventores do CCD, mostrando o esquema de tempos para a leitura de um CCD de 3 fases (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.

2.1.2 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 (JANESICK, 2001) 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 (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.

2.2 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.

2.2.1 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, estas cargas geradas termicamente são indesejáveis e recebem o nome de 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). Câmeras CCD científicas são geralmente refrigeradas com nitrogênio líquido, ou sistemas criogênicos a 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. A figura 6 demonstra o efeito do resfriamento um CCD *Tektronics* modelo TEK1024CCD (TULLOCH, 1995).

Figura 6 – Corrente de escuro em um sensor CCD modelo TEK1024CCD (TULLOCH, 1995).

2.2.2 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 seguida (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 são mostrados na figura 7. Nota-se o aumento do nível do ruído diretamente proporcional ao aumento da taxa de leitura. A figura 7 mostra os níveis de ruído de leitura em função da taxa de leitura. Estão representados CCDs convencionais para aplicações em astronomia e espectroscopia em situações reais e simuladas (STANFORD; HADWEN, 2003).

Figura 7 – Ruído de leitura para sensores científicos convencionais em função da taxa de leitura (STANFORD; HADWEN, 2003).

2.3 Limitações do CCD convencional

O desempenho dos sensores CCD melhorou muito nos últimos anos. O aumento da sensibilidade desses sensores diminuiu significativamente o limite de detecção de fontes fracas. A eficiência quântica hoje facilmente ultrapassa 90% e o ruído de leitura está na faixa de 5 elétrons rms (STANFORD; HADWEN, 2003). Este baixo nível de ruído de leitura é atingível com CCDs convencionais somente à taxas de leitura consideradas lentas. Quando a leitura é feita à taxas mais rápidas, o ruído de leitura, em condições de baixa iluminação, eleva-se a níveis impraticáveis em relação ao sinal.

Uma solução para a limitação da leitura de saída em altas taxas de transferência é a utilização de um intensificador de imagem (foto cátodo acoplado a uma placa de micro canais) para multiplicar o número de fótons emitidos antes da detecção e da leitura de um CCD convencional. Nesta abordagem, que se baseia no princípio de funcionamento similar ao de tubos fotomultiplicadores, o sinal é amplificado a um nível que ultrapassa o ruído gerado pela leitura de saída a taxas de transferência desejáveis. Esta técnica é denominada CCD intensificado (ICCD) e foi uma solução bastante empregada em situações de imageamento de fontes fracas de luz (DAVIDSON, 2006). A grande limitação desse sistema está na eficiência quântica que raramente ultrapassa 50%. A baixa eficiência quântica deste tipo de sistema pode ser vista na figura 8. Os gráficos em verde e azul representam dois diferentes sistemas ICCD, enquanto a linhas vermelha e amarela representam a eficiência quântica para CCDs convencionais do tipo *back-iluminated* e *front-iluminated*, respectivamente (DAVIDSON, 2006). Sistemas ICCDs também possuem um custo elevado de implementação, além de suscetibilidade a danos irreversíveis decorrentes da exposição a níveis elevados de luz.

Figura 8 – Comparação da eficiência quântica para diferentes sistemas de detecção ICCD e EMCCD (DAVIDSON, 2006).

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 chamados de L3CCD, *Low Light Level CCD* e foram descritos e detalhados no ano de 2000 em (COCHRANE; SPENCER, 2000) e (WILSON, 2000).

Uma dos requisitos do instrumento BTFI é que o sistema de imageamento possua uma alta sensibilidade. Assim a utilização de sensores de captura de imagem do tipo CMOS fica descartada pois é sabido que a maioria das tecnologias de sensor CMOS possui uma sensibilidade significativamente menor do que a tecnologia CCD (CARLSON, 2002).

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 9 (JERRAM, 2001). No lado esquerdo (a) da figura, a estrutura é idêntica a 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 9 – Estrutura típica de um detector EMCCD. À esquerda (a), estrutura idêntica de um CCD convencional. À direita (b) registro de ganho estendido (JERRAM, 2001).

A figura 10 mostra um EMCCD do tipo *full-transfer* 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 em 10a). 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. 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 em 10b).

Figura 10 – Funcionamento do registro de ganho de um EMCCD. Fases presentes durante a transferência das cargas em (a) e o efeito da multiplicação dos elétrons em (b) (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):

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

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):

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{real}}{G} \quad (2)$$

- σ_{eff} : Ruído de leitura equivalente
- 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 aplicação de rotinas de softwares, conforme, por exemplo, descrito em (DAIGLE; CARIGNAN; BLAIS-OUELLETTE, 2006).

Idealmente o mesmo valor de ganho deveria 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. As consequências desta característica serão analisadas a seguir.

2.4 O Ruído de Multiplicação e Estratégias de utilização do EMCCD

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 a eficiência quântica do EMCCD seja reduzida à metade (STANFORD; HADWEN, 2003).

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

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S + T + n\sigma^2}} \quad (3)$$

- 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 equação (3) 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 equação (2), 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):

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{F^2 S + F^2 T + n \frac{\sigma^2}{G^2}}} \quad (4)$$

- 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 11 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 11 – Comparação do SNR entre CCD convencional e um EMCCD modelo CCD60 em função do fluxo de fótons por pixel (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)

2.5 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, 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 as suas transições e amplitudes. No capítulo 4 será mostrada uma forma de controlar o EMCCD de modo a minimizar esse ruído.

2.6 CCD-97

O CCD97 é um EMCCD da empresa *E2V Technologies*. Este dispositivo possui um circuito amplificador de saída que permite operação com ruído de saída da ordem de menos de um elétron por pixel, à taxas de leitura de mais de 11MHz. Isto torna este sensor adequado para geração de imagens científicas onde a iluminação é limitada. Este sensor é um dispositivo do tipo *frame-transfer* ou de “transferência de quadro” e pode operar em modo invertido para diminuir a corrente de escuro. As seções de imagem e de armazenamento são desenhadas para operar no modo de duas fases para aumentar a máxima frequência da transferência paralela.

O CCD97 funciona convertendo fótons em carga elétrica na seção de imagem durante o período do tempo de integração, então transfere esta carga através das seções de imagem e de armazenamento até o registro de saída. Depois de ser transferida pelo registro de saída, a carga é multiplicada no registro de ganho, antes da conversão para voltagem pelo amplificador de saída (figura 12). O sensor possui dois amplificadores de saída: uma saída de baixo ruído de operação de CCD normal e uma saída com amplificação de sinal onde o ganho de multiplicação é aplicado. Seguem alguns dados do sensor CCD97 extraídos de sua folha de dados (E2V, 2007):

Área ativa de imagem: 8.192 x 8.192 mm

Seção ativa de imagem (em pixel): 512(H)x512(V)

Tamanho do pixel de imagem: 16x16mm

Número de amplificadores de saída: 2

Fator de preenchimento: 100%

Colunas adicionais para referência: 24

Linhas adicionais para referência: 16

Elementos multiplicadores: 536

Figura 12 – O CCD97 do tipo frame-transfer, à direita: diagrama com principais partes e pinos, à esquerda: uma foto do sensor (E2V, 2007).

2.7 CCD-207

Diferentemente do CCD97, o CCD207 não é um dispositivo de “transferência de quadro”. O CCD207 é um dispositivo *full-frame* ou de “quadro completo”. Desta forma esse sensor não possui a seção de armazenamento, mas somente a seção de imagem (figura 13). 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, exatamente como no CCD97. O CDD207 pode operar a taxas acima de 15MHz com níveis de ruído de menos de um elétron por pixel. Alguns parâmetros do CCD207 retirados da folha de dados (E2V, 2008) são listados a seguir:

Área ativa de imagem: 26.11mm x 25.73mm

Seção ativa de imagem (em pixel): 1632(H) x 1608(V)

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 13 – O CCD207 do tipo *full-frame*, acima diagrama com principais partes (E2V, 2008) e abaixo foto do sensor.

3 CONTROLADORES DE SENSORES CCD

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 14 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.

Sistemas astronômicos podem exigir sinais com resolução da ordem de nanossegundos. Isto geralmente é conseguido utilizando-se DSPs com sinais de temporização de cerca de 50MHz. Sequências de relógio (*clock*) são geradas por software e entregues pelo DPS através de portas paralelas *on-chip*. A configuração mais básica para o controle de um CCD exige sete sinais de relógio. Algumas vezes, cinco sinais adicionais são exigidos para coordenar a operação do sistema eletrônico de processamento de sinal. DSPs também possuem muitas portas seriais *on-chip* que podem ser usadas para transmitir dados/pixeis. Os controladores de CCD também precisam conter alguns quilobytes de memória RAM para armazenamento das formas de ondas, dados de calibração, rotinas de inicialização etc.

Figura 14 – Diagrama de blocos simplificado com principais componentes de um controlador CCD.

3.1 Controladores existentes hoje

Cada um dos muitos grupos de pesquisas astronômicas espalhados ao redor do mundo desenvolve sistemas e câmeras de acordo com objetivos específicos. Por exemplo: obtenção de imagens com alta resolução, obtenção de imagens extremamente grandes, visualização otimizada de determinadas faixas de onda da luz, entre outros. De acordo com cada um desses objetivos é necessária a construção de controladores também específicos. Uma breve descrição dos principais controladores de sensores CCDs utilizados atualmente será feita a seguir.

3.1.1 Controlador SDSU

Desenvolvido pelo departamento de Astronomia da Universidade do Estado de San Diego (SDSU) nos EUA é um dos controladores mais utilizados para astronomia hoje em dia. Cerca de 30 instituições de diferentes tipos de pesquisa astronômica utilizam o controlador SDSU. Inicialmente desenvolvido para CCDs que operam em um modo de leitura lenta, hoje está em sua versão 2, graças a uma parceria com a

Infrared Laboratories. Essa nova versão pode operar CCDs em um modo de leitura rápida de até 1 μ s por pixel suportando várias leituras simultâneas (LEACH; BEALE; ERIKSEN, 1998).

3.1.2 Controlador MONSOON

O MONSOON é um projeto liderado pela instituição americana de pesquisa e desenvolvimento NOAO – *National Optical Astronomy Observatory*. O projeto possui a proposta de ser um controlador universal com intuito de controlar uma vasta gama de sensores de diferentes tipos. Seu ponto forte é a grande quantidade de softwares desenvolvidos especificamente para ele. Esses softwares são robustos e genéricos, e são utilizados por cerca de 10 diferentes instituições de pesquisa (BARRY et al., 2002).

3.1.3 Controlador BASE – Carnegie

O controlador BASE (*Basic Array System Eletronics*) vem sendo desenvolvido pelos Observatórios Carnegie nos EUA. Esse controlador já foi usado em vários projetos desenvolvidos pela própria instituição como, por exemplo, numa câmera com um mosaico contendo oito sensores CCD com dimensões de 4k x 2k cada.

O sistema BASE é um projeto *open-source* - todos os esquemas de hardware, *layouts* de placas de circuito, arquivos lógicos programáveis, códigos DSP, rotinas de software de interface, e os resultados dos testes estão disponíveis em sua página na Internet. (BIGELOW; LUPPINO, 2002)

3.1.4 Controlador ESO – FIERA

Trata-se do controlador utilizado atualmente pela ESO - *European Southern Observatory*, a principal organização intergovernamental em astronomia na Europa e um dos observatórios mais produtivos do mundo astronômico. É utilizado no *Very Large Telescope* (VLT) em *Cerro Paranal*, no Observatório *Cerro La Silla* e nos laboratórios de desenvolvimento da ESO. A ênfase principal no projeto FIERA é a capacidade de controlar um grande número de sensores CCDs com taxas de leitura rápida, de modo a tirar proveito da nova geração de CCDs de alta velocidade e baixo ruído (BELETIC; GERDES; DUVARNEY 1998).

3.1.5 Controlador ESO – NGC

Esse controlador ainda está em desenvolvimento e irá substituir o controlador FIERA. A sigla NGC vem de *New General detector Controller*. Seu objetivo consiste basicamente em um novo controlador que possuirá, no mínimo, todas as capacidades atuais do controlador FIERA, mas que, além disso, irá também integrar as capacidades do controlador IRACE. Ou seja, será também capaz de controlar *infrared arrays* ou matrizes de infravermelhos. *Infrared array* trata-se de outro tipo de sensor astronômico otimizado para observações na região de infravermelho. (REYES et al., 2005)

3.2 O Controlador CCCP

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 menor relação sinal/ruído nas imagens adquiridas, devido ao baixo nível de ruído CIC. Utilizando uma arquitetura de temporização de sinais inovadora, 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 superior a 20MHz. 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 à altas taxas de leitura e baixo fluxo de iluminação. Usando esse controlador, o ruído CIC foi reduzido para 0.001 - 0.0018 elétron/pixel/frame (dependendo do ganho EM), fazendo com que o modo PCM (*Photon Counting Mode*) seja possível e com resultados eficientes (DAIGLE et al., 2008).

3.2.1 Visão geral do hardware

O controlador CCCP é composto por duas placas: *Detector Board* e *Sequencer Board*. A *Detector Board* se comunica diretamente com o detector, enquanto a *Sequencer Board* se comunica com o computador do sistema de imageamento. Cada controlador utiliza apenas uma *Sequencer Board*, e pode possuir até quatro *Detector Boards*. O princípio de funcionamento do CCCP é:

Os dados que geram as formas de onda que excitam o CCD são armazenados em memórias do tipo SRAM localizadas na *Detector Board*. As SRAMs podem ser endereçadas independentemente da escrita, mas são endereçadas simultaneamente à leitura.

Os endereços das SRAMs são gerados pela *Sequencer Board*. A *Sequencer Board* gera um endereço a cada 10ns e esse endereço é enviado para todas SRAMs de todas as *Detector Boards* de uma só vez. Pode-se visualizar na figura 15 um diagrama simplificado como da figura 14, mas específico para o controlador CCCP.

Figura 15 – Diagrama de blocos simplificado com principais componentes do controlador CCCP

3.2.1.1 Sequencer Board

A *Sequencer Board* pode ser entendida como sendo o motorista do controlador. Ela é responsável por sincronizar e configurar as outras placas do controlador. A *Sequencer Board* possui um FPGA e um DSP. O FPGA é responsável pelos eventos síncronos enquanto o DSP manipula os eventos assíncronos.

O computador se comunica apenas com o DSP. Os comandos vindos do computador passam pelo DSP e então para o FPGA (se necessário). A comunicação entre o DSP e o FPGA é feita através de uma memória FIFO de 4K-18 bits e alguns sinais de sincronização.

A comunicação entre a *Sequencer Board* e o computador é feita através da interface serial RS-232. Existe uma lista de comandos que podem ser enviados para o controlador através da interface serial, como: *start*, *stop*, *se*, *reset* etc.

3.2.1.2 Detector Board

A *Detector Board* é responsável pelos sinais temporizados (*clocks*) entregues ao CCD. Essa placa fornece as tensões BIAS e também digitaliza o sinal de saída entregue pelo CCD. Uma imagem dessa placa pode ser vista na figura 16. A *Detector Board* é composta por:

- 14 SRAM–DAC: permite que os dados armazenados nas SRAMs sejam transformados em sinais analógicos de baixa potência. Os DACs (*Digital-to-Analogic Converter*) possuem 12 bits de resolução.
- 14 *Power Amplifiers*: amplificam os sinais gerados pelos DAC a níveis de -15V / 15V de tensão e 350mA de corrente.
- 1 *High voltage clock*: ou fase de alta tensão. Trata-se de um circuito ressonante de alta tensão usado para o ganho EM do detector EMCCD.
- 1 AFE-16bits: este *Analogic Front End* é utilizado para digitalizar a saída do CCD com resolução de 16 bits a taxas de até 12.5MHz.
- 1 AFE-14bits: utilizados para digitalizar a saída do CCD com resolução de 14 bits a taxas de até 30MHz.

Figura 16 – Visão inferior da *Detector Board* do controlador CCCP

Na figura 16 estão destacados os pontos de teste necessários para configuração do controlador. Os pontos *Amplified CCDOut0* e *Amplified CCDOut1* são usados para monitorar as saídas EM e convencional do sensor, respectivamente. Os sinais *AFE0_ADC_CLK*, *AFE0_CDS_CLK1* e *AFE0_CDS_CLK2* devem ser analisados para a correta configuração do chip AD9826 de 16 bits responsável pela digitalização dos sinais de saída do CCD. O mesmo se aplica para os sinais *AFE1_ADC_CLK*, *AFE1_CDS_CLK1* e *AFE1_CDS_CLK2*, mas estes pontos são usados para configuração do AD9824. A diferença é que este digitalizador deve ser usado quando se deseja taxas de leituras mais altas, com o compromisso que cada pixel terá apenas 14 e não 16 bits.

O circuito ressonante do controlador é ajustado através dos sinais *HV probe* e *HV adjust fb* que representam o sinal da fase de alta tensão atenuada 250 vezes e a resposta do sinal de ajuste do circuito, respectivamente. O sinal *HV adjust fb* diminui de 15V, para cerca de 5V quando o circuito é corretamente ajustado. Para que o circuito ressonante seja corretamente ajustado deve-se variar o capacitor *HV adjust* (de 6pF a 30pF). O objetivo é fazer com que a capacitância do registro EM do sensor

entre em ressonância com a indutância da *Detector Board*. Caso seja necessário, os capacitores mostrados em *HV comp*, que também fazem parte do circuito ressonante, podem ser trocados.

O sinal *virtual VSS* é usado para verificar o valor de tensão da bias *Virtual VSS*. O controlador CCP opera em um modo onde o pino VSS do sensor deve ser conectado ao GND da placa. O sinal *Virtual VSS* é responsável por aplicar o valor de tensão adequado para cada modelo de sensor. Desta forma todos os níveis de tensão do controlador são diminuídos desse valor de tensão.

3.2.1.3 Connector Board

Foi necessária a construção de uma placa-interface com objetivo de tornar compatível a conexão do controlador CCCP com a câmera que será utilizada pelo instrumento BTFI. Esta placa não faz parte do controlador CCCP e é específica de acordo com o sistema utilizado. Para o sistema utilizado no BTFI foi desenhada uma placa passiva que possui apenas conectores e nenhum componente ativo. Esta placa pode ser vista na figura 17. Na lateral da placa há um conector tipo QTE-60, de montagem de borda, da marca *Samtec*. Este conector é compatível com o conector existente na *Detector Board* do controlador CCCP. Já para fazer a conexão com a câmera, foi utilizado um conector militar modelo PT06E22-55S(SR) da marca *Amphenol*.

Figura 17 – Detalhe da connector board conectada ao controlador CCCP

3.2.2 Visão geral da arquitetura do sistema

O controlador CCCP possui uma arquitetura diferente das usualmente empregadas em controladores de CCDs (DAIGLE et al., 2008). O CCCP gera sequências de leitura que podem ser separadas por um tempo de obturação e/ou um tempo de exposição. Durante os tempos de exposição e obturação, seus respectivos padrões serão executados em ciclos. (Informações sobre os padrões serão detalhadas adiante).

Caso necessário, ambos os tempos, de obturação e exposição, podem ser definidos como zero segundo e controlados dentro de uma sequência de leitura. Caso esses tempos sejam definidos, eles serão contados antes que a sequência de leitura seja executada. O tempo de obturação será contado primeiro, em seguida o tempo de exposição, e então a sequência de leitura será finalmente executada. Se nenhum tempo de obturação for especificado, o controlador assumirá que o tempo gasto durante a execução da sequência de leitura será também o tempo de exposição. Isto é, se o tempo de exposição for de 50 milissegundos e a sequência de leitura tiver um tempo de execução de 30 milissegundos, na segunda vez que a sequência de leitura rodar (por exemplo, quando imagens múltiplas são solicitadas), um tempo de exposição de 20 milissegundos será gasto. Quando o controlador estiver ocioso (a sequência de leitura não estiver em execução), o controlador executará o padrão de obturação.

3.2.3 Programa de configuração

Para se gerar as formas de ondas que serão armazenadas nas memórias SRAMs da *detector board*, é necessária a utilização de um *software* proprietário de configuração. Este programa é denominado *cccpComm* e gera arquivos com extensão *.cccp*, estes arquivos possuem todas as informações necessárias para

operação do controlador como: formas de onda padrões, dados de calibração, valores padrões dos sinais BIAS etc.

O *cccpComm* possui uma característica até então não utilizada pelos programas de configuração dos controladores atuais: ele permite a visualização do padrão de onda que se pretende aplicar no sensor, como pode-se observar na figura 18.

Figura 18 – Tela do software *cccpComm* mostrando os padrões de forma de onda para os sinais de fase paralelos (I1, I2, I3 e I4) para o detector CCD97

4 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 do CCD. 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.

4.1 Requisitos de uma câmera CCD

Como citado anteriormente, sensores CCDs devem trabalhar em baixas temperaturas. Desta forma 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^{-9} atm são suficientes para deixar o ambiente interno da câmera livre de contaminação de materiais que podem 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.

Com intuito de se obter um valor de temperatura fixo no CCD, a câmera deve possuir sensores de temperatura e atuadores. 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*”. A ligação entre a PCB e o conector hermético deve ser feita, preferencialmente, através de cabos coaxiais, para minimização de ruídos.

4.2 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 -110°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 19 mostra um modelo 3D da câmera destacando suas principais partes. A refrigeração criogênica é fornecida por um refrigerador de ciclo fechado “*Cryotiger*”, que é instalado em uma peça especialmente desenvolvida denominada “*Cryotiger holder*”. Pode-se notar ainda

uma válvula de vácuo padrão de conector KF-16 que se liga 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 18, pode ser visto ainda o detector EMCCD através da janela por onde a luz incide na câmera. Uma foto da câmera instalada no Laboratório de Microeletrônica da POLI-USP é mostrada na figura 20.

Figura 19 – Esquema 3D mostrando os principais componentes da câmera TigerCam

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 é apenas relacionado com o roteamento dos sinais na placa. Essa característica da câmera é extremamente importante e crucial para seu correto funcionamento e será abordada novamente no capítulo 7.

Figura 20 – Foto da câmera TigerCam instalada no Laboratório de Microeletrônica da POLI-USP

5 AQUISIÇÃO DE IMAGENS

5.1 Captura de Imagens (Frame Grabber)

Frame Grabbers são dispositivos eletrônicos que convertem sinais de vídeo em imagens digitalizadas. Esses dispositivos geralmente encontram-se no formato de placa de computadores para se conectarem aos *slots* PCI (convencional ou PCI-X). As placas *Frame Grabber* têm como vantagem o fato de utilizarem os *slots* de expansão do computador utilizando espaço, energia e ventilação fornecidos por esses slots. Desta forma consegue-se alto desempenho a baixo custo para sistemas de processamento e captura de imagens.

O BTFI utilizará duas placas *Frame Grabber* digitais com interface *CameraLink* modelo *GRABLINK Value* da fabricante *Euresys*. As características desse modelo serão explicadas mais detalhadamente adiante.

5.2 Interface CameraLink

CameraLink é uma interface de comunicação desenvolvida para ser utilizada em aplicações com sistemas de imagens. As especificações para a interface *CameraLink* foram definidas por um grupo de fabricantes de câmeras e de placas *Frame Grabber*. Essas especificações são abertas, com isso os fabricantes podem criar produtos diferenciados mantendo a compatibilidade com o padrão.

Essa interface usa uma comunicação serial baseada na tecnologia *Channel Link* desenvolvida pela *National Semiconductor*. A tecnologia *Channel Link* utiliza o padrão LVDS (*Low Voltage Differential Signaling*) para transmissão de dados, utilizando um transmissor paralelo-para-serial e um receptor serial-para-paralelo podendo atingir taxas de transmissão de até 2.28Gbps (PULNIX, 2004).

5.3 Placa GRABLINK Value

Para a aquisição das imagens geradas pelo controlador CCCP no instrumento BTFI é utilizada a placa *Frame Grabber* modelo *GRABLINK Value* que pode ser vista na figura 21.

Figura 21 - Imagem da placa *Frame Grabber* modelo PC *GRABLINK Value*

A tabela 1 lista algumas especificações da placa. Esta placa possui uma interface *CameraLink* com conector padrão 3M modelo MDR de 26 pinos. Esse modelo de *Frame Grabber* foi escolhido devido a seu baixo custo e também porque todas as suas especificações atendem as necessidades do projeto.

Tabela 1 – Especificações da placa Frame Grabber utilizada para adquirir imagens

Característica	GRABLINK Value	Especificação BTFI
Pixel Rate	66MHz	10MHz
Bit depth (bits/pixel)	16	12
Canais de Comunicação	2	2
Comunicação	Serial	Serial
Interface	CameraLink	CameraLink

5.4 Software PanVIEW

Toda a aquisição de imagem é controlada pelo software denominado PanVIEW. PAN vem de *Pixel Acquisition Node* e VIEW vem de *Labview* que é o ambiente de desenvolvimento utilizado para a criação do PanVIEW. Esse *software* é uma versão mais recente e específica para controle de detectores do programa denominado ArcVIEW (ASHE; BONATI; HEATHCOTE, 2002) e é responsável por coletar os pixels e a informação de cabeçalho fornecidos pelo controlador.

O PanVIEW é o software utilizado pela comunidade do telescópio SOAR (CECIL; CRAIN; SCHUMACHER, 2002), portanto foi crucial para esse projeto se familiarizar com o mesmo e trabalhar nas modificações necessárias para torná-lo compatível com o controlador utilizado, o CCCP.

O PanVIEW possui uma arquitetura modularizada onde cada tarefa específica é realizada por um módulo de software específico. Cada módulo é independente dos outros, ou dependente de uma forma muito específica (somente dependências de sentido único são permitidas). A ideia é a mesma por trás da arquitetura de um *kernel* UNIX: para cada hardware específico deve haver um *driver* muito específico para controlá-lo. O *kernel* não precisa de nenhuma especificidade do driver, mas o driver deve ser compatível com o *kernel*. Isso permite um crescimento natural do sistema.

Uma vez que todas as capacidades são baseadas nos módulos e não no núcleo, o total de funcionalidades do programa dependerá dos módulos instalados. Em uma simples aplicação para testes em laboratório, por exemplo, somente deverão estar presentes o módulo específico do controlador e o *FITS server*, para salvar os arquivos fits no disco. Sistemas mais complexos podem incluir pontos de teste e monitoramento, alarmes, controle e monitoramento de temperatura, display em tempo real, envio de imagens para computadores remotos etc. O PanVIEW pode ser operado por comandos de linha em um terminal Linux e também possui uma interface gráfica. A figura 22 mostra a tela principal da interface gráfica do PanVIEW:

Figura 22 – Interface gráfica do PanVIEW

5.4.1 Módulos DHE - Detector Head Electronics

Seguindo a lógica de operação em módulos do PanVIEW, existe um módulo denominado *Detector Head Electronic* – DHE que é o módulo responsável por se comunicar com o hardware que controla o detector. Esse módulo é específico para cada controlador utilizado, devendo possuir diferentes comandos de baixo nível para cada hardware existente. Por exemplo, tem-se um módulo específico para cada um dos controladores existente como: MONSOON, SDSU e CCCP. Ao mesmo tempo, todos os diferentes módulos DHE suportam um número mínimo de comandos semelhantes, ou seja, possuem comandos “gerais” em comum. Caso haja a necessidade de se instalar um driver específico para um determinado controlador, isso deve ser feito de forma manual por que é uma tarefa extremamente dependente do hardware/driver que será utilizado. Em muitos casos isso não é necessário, pois alguns controladores necessitam apenas se comunicar com o computador através de portas seriais convencionais ou USB, por exemplo.

5.4.2 Módulo CCCP

Para a utilização do controlador CCCP através do programa PanVIEW, foi necessário criar um módulo do tipo DHE específico para esse hardware. Esse trabalho foi desenvolvido em conjunto com o Eng. Marco Bonati do CTIO (*Cerro Tololo Inter-American Observatory*), desenvolvedor do *software* PanVIEW. Não é necessária a instalação de nenhum driver específico do controlador, uma vez que o CCCP recebe comandos via porta serial RS-232. Foi feito um trabalho de adaptação dos comandos do CCCP para o padrão utilizado pelo PanVIEW. Por exemplo, um comando para mudar o tempo de exposição da câmera para 3s pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2 – Exemplo de adaptação de comandos do CCCP para o PanVIEW

Comando CCCP	Comando PanVIEW
se 3000	dhe set obs.exptime 3.0

Essa conversão foi feita para praticamente todos os comandos do controlador CCCP. Alguns comandos, entretanto, não possuíam um equivalente em PanVIEW e por isso foi necessária a criação de uma nova categoria de comandos específicos para o CCCP. Como por exemplo, o comando para carregar uma sequência de leitura:

Tabela 3 – Exemplo de comando que foi criado para o PanVIEW e sua equivalência para o CCCP

Comando CCCP	Comando PanVIEW
ld 0	dhe memory load sequencer app 0

Ainda deve-se citar que foi feito um trabalho de padronização das respostas enviadas pelo controlador ao computador depois de cada comando executado. Essa padronização foi necessária para que o PanVIEW soubesse exatamente quando o comando foi executado e qual a resposta para uma ação executada com sucesso ou não. Por exemplo, o comando “start” para iniciar a execução de uma sequência de leitura. Esse comando retornará *OK\r\n* se a sequência for iniciada corretamente ou retornará *error\r\n* se houver algum tipo problema que impeça o início da sequência.

5.4.3 Programa Grab

Como citado anteriormente, para enviar dados para o controlador não é necessária a instalação de drivers, utiliza-se somente a comunicação serial através da interface *CameraLink*. Já para a aquisição de imagens é necessária a instalação do driver da placa *Frame Grabber* que será utilizada. Para tornar possível que o programa PanVIEW se comunique com a placa *Frame Grabber* e possa salvar as imagens foi necessário criar um programa em C++ com comandos específicos para manipulação da placa. Esse programa foi compilado e é executado toda vez que uma aquisição de imagem é solicitada.

A imagem adquirida pelo *Frame Grabber* é salva em um *buffer*, que é entregue ao PanVIEW que monta o arquivo FITS unindo o buffer da imagem com as informações do cabeçalho do arquivo.

6 RESULTADOS

6.1 Produção Científica com o CCCP

Esta seção descreverá os resultados já alcançados com o controlador CCCP. Esses resultados foram extraídos de (DAIGLE et al., 2008) e (DAIGLE et al., 2009). Primeiro, serão descritos os resultados obtidos em laboratório e será feita uma análise de seu desempenho. Em seguida, serão citados e comentados os resultados conseguidos utilizando o controlador CCCP pela primeira vez em observações astronômicas reais. Por fim, serão mostrados os testes realizados com o controlador CCCP operando em conjunto com a câmera *TigerCam* em laboratório e no instrumento BTFI já instalado no telescópio SOAR.

6.1.1 Resultados em Laboratório

Os resultados apresentados nesse item foram obtidos com o CCCP utilizando o EMCCD modelo CCD97 operado a uma taxa de 10MHz no modo invertido (IMO). Todos os testes foram realizados pelos desenvolvedores do controlador e são detalhados em (DAIGLE et al., 2008). Serão analisados os níveis do ruído CIC, uma vez que se trata da fonte de ruído dominante nos EMCCDs.

Mesmo operando em modo invertido o controlador manteve o CIC baixo durante a transferência paralela. Na figura 23 podem ser vistos valores extremamente baixos para o CIC. Essa figura não apresenta os ruídos gerados pela corrente de escuro, portanto representa apenas os eventos CIC gerados pela transferência vertical. Como esperado, a fase de alta tensão não desempenha nenhum papel na transferência vertical. O pequeno efeito da temperatura se deve ao ruído escuro que

é gerado durante a leitura da saída do CCD, uma vez que esse processo demora aproximadamente 30ms.

Figura 23 – CIC na transferência paralela em função do ganho para diferentes temperaturas (DAIGLE et al., 2008).

A figura 24 mostra as relações do CIC gerado durante a transferência horizontal com a temperatura e com o ganho EM. A fase de alta tensão do EMCCD se destina a produzir a ionização por impacto e multiplicar a carga do pixel. Elétrons podem ser gerados, no entanto, mesmo na ausência de um elétron na entrada do registro de EM. Este CIC gerado no registro horizontal irá produzir taxas na saída do registro de EM, que pode estar acima do limiar, ou “*threshold*”, escolhido. A temperatura não desempenha um papel significativo na quantidade de eventos gerados durante a transferência horizontal.

Figura 24 – CIC na transferência horizontal em função do ganho para diferentes temperaturas (DAIGLE et al., 2008).

O ruído CIC total é a soma do CIC gerado durante as transferências horizontal e vertical. Finalmente na figura 25 o CIC total medido durante os experimentos pode ser observado. Mesmo com ganhos EM tão altos quanto 4000, o CIC total medido é inferior a 0,002 eventos/pixel/frame. Comparando-se as figuras 23 e 24, percebe-se que o CIC horizontal é dominante sobre o vertical nos ganhos com valores menores que 800. Dada a sua forte dependência com o ganho, nota-se que o CIC horizontal ocorre principalmente devido à fase de alta tensão.

Figura 25 – Medição de todos os eventos gerados durante o processo de leitura excluindo-se o ruído escuro (DAIGLE et al., 2008).

6.1.2 Comparação com uma câmera comercial

Esta seção descreverá uma breve comparação entre duas câmeras operando o CCD97 a uma taxa de 10MHz. Será comparada uma câmera desenvolvida pela Universidade de Montreal utilizando o CCCP que será citada como CCCP/CCD97 com uma câmera comercial “*Andor iXonEM+ 897 BI camera*”, que já possui um controlador de detectores integrado. Os experimentos utilizados para a obtenção dos resultados apresentados neste item foram realizados pelos desenvolvedores do controlador CCCP e estão publicados em (DAIGLE et al., 2009).

A câmera Andor é anunciada como tendo um nível de ruído CIC e corrente de escuro juntos de 0.005 elétron/pixel/image, a um ganho EM de 1000, para tempo de integração de 30ms operando a -85°C (ANDOR, 2008). Esta câmera não é capaz de operar a maiores ganhos EM e, assim não é possível avaliar o CIC em maiores ganhos. Já a câmera CCCP/CCD97 também a um ganho de 1000 possui ruído da ordem de 0.001 elétron/pixel/image. Para um ganho de 2500 o nível do CIC

alcança níveis de 0.0014 – 0.0018. Fica evidente que em termos de ruídos na saída da imagem causados pelo CIC e pelos “eventos escuros”, o desempenho da câmera CCCP/CCD97 é cerca de cinco vezes melhor do que a câmera comercial da empresa Andor.

Foi feita também uma comparação do SNR das duas câmeras. A figura 26 mostra o desempenho das câmeras operando no modo “*photon counting*” a uma taxa de 30 quadros por segundo. Nota-se que para qualquer valor de fluxo de elétrons, o desempenho da câmera CCCP/CC97 é superior ao da câmera Andor.

Figura 26 – Comparação da relação sinal-ruído SNR das duas câmeras (DAIGLE et al., 2009).

6.2 Resultados em laboratório com a câmera TigerCam

Os resultados discutidos a seguir foram obtidos no Laboratório de Detectores do *Cerro Tololo Inter-American Observatory* – CTIO no Chile. Trata-se de uma divisão do *National Optical Astronomy Observatory* – NOAO, o centro de pesquisa e desenvolvimento dos EUA para astronomia baseada em telescópios e observações noturnas. Todos os experimentos foram realizados utilizando-se uma das câmeras científicas *TigerCam* do instrumento BTFI sob supervisão dos engenheiros e técnicos desse instituto.

6.2.1 Desempenho da saída convencional

Como citado anteriormente, a câmera *TigerCam* possui um detector EMCCD modelo CCD207-40. Uma característica importante deste detector é que, além de possuir a saída amplificada EM, ele também possui uma saída convencional. Assim, o mesmo dispositivo pode ser usado como um CCD convencional ou como um EMCCD de fato. Em ambos os casos, a temporização utilizada nas fases paralelas do detector será a mesma, não importando qual saída será utilizada. Ou seja, a transferência da carga coletada na área de imagem será sempre a mesma. A definição da saída usada se dá através da temporização das fases seriais. Assim, torna-se interessante a investigação do desempenho do sistema quando operado como um CCD convencional, de modo a verificar separadamente o comportamento da transferência paralela de carga.

Os resultados obtidos, utilizando-se a saída convencional do detector, são caracterizados pelo nível médio de ruído medido nas imagens obtidas. Os níveis de ruído obtidos nas imagens foram calculados através de rotinas padrão do software IRAF (TODY, 1986).

Operando-se a câmera a uma taxa de leitura de 1MHz através de sua saída convencional, o ruído total médio estimado nas imagens foi de 35,6 elétrons/pixel. Esse valor, a princípio, pode ser considerado superior aos limiares normalmente usados para fins de observações científicas astronômicas (BOUCHARD; COSTA; JERJEN, 2009). Porém, vale ressaltar que esses valores foram obtidos em um detector do tipo EMCCD, ou seja, esse detector é otimizado para trabalhar em sua saída amplificada ou saída EM, e não em sua saída convencional. Assim, o valor de ruído medido nas imagens obtidas pode ser considerado bom, se comparado com as especificações fornecidas pelo fabricante.

Segundo a folha de testes do detector utilizado, o ruído para a saída convencional, do detector em questão, para uma taxa de leitura de 50 kHz, é de 6,3 e-/pixel. Portanto, comparando-se os dois níveis de ruído, nota-se que para uma taxa de leitura 200 vezes mais rápida (1MHz), obteve-se um ruído apenas 5,65 vezes maior. A tabela 4 resume a comparação dos resultados obtidos em laboratório com a folha de testes do detector.

Tabela 4 - Comparação dos valores de ruído para a saída convencional do detector CCD207-40 para diferentes taxas de leituras

	Taxa de leitura da saída	Ruído total
TigerCam	1MHz	35,6 e-/pixel
Folha de testes	50Khz	6,3 e-/pixel

O controlador CCCP é projetado para operar apenas a altas taxas de leitura, com taxas mínimas da ordem de MHz (DAIGLE et al., 2008). Logo, não foi possível fazer o teste em laboratório utilizando-se a saída convencional com uma taxa de leitura de 50 kHz para fins de comparação direta com os dados fornecidos pelo fabricante.

Os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que o detector utilizado é otimizado para trabalhar na saída EM a altas taxas de leitura e não na saída convencional. Quando um sistema de imageamento utiliza um CCD convencional,

geralmente, trabalha à taxas de leitura de cerca de 10 kHz a 100 kHz, chegando a 500 kHz em algumas aplicações (VALLERGA et al., 2004). Todos os experimentos utilizando a saída convencional do detector EMCCD foram realizados a uma taxa de leitura de 1MHz e tiveram o intuito de testes de estudo e aprendizado do sensor, principalmente sobre a melhor forma de se transportar a carga nos registros paralelos da área de imagem do mesmo. Essa transferência paralela se demonstrou eficiente e será a mesma utilizada para a saída EM do detector.

6.2.2 Testes com a saída amplificada EM

6.2.2.1 Saída amplificada EM utilizada como uma saída convencional

O principal objetivo dos testes apresentados a seguir é repetir os resultados encontrados na saída convencional do detector para a saída EM, com as devidas modificações necessárias para que a carga seja transportada para a saída EM. Desta forma, a temporização para as fases paralelas é mantida a mesma, porém, duas das três fases seriais (R1 e R2) são invertidas, de modo que as cargas coletadas são levadas para o sentido oposto do que quando são transportadas para a saída convencional. O esquema de temporização para as duas saídas do detector pode ser visto na figura 27.

Figura 27 – Esquema de temporização das três fases seriais do detector. Acima (a) para a saída convencional e abaixo (b) para a saída de ganho EM.

Deve-se também aumentar o número de repetições em que a transferência serial acontece. No caso do detector CCD207-40 as cargas são transportadas por 16 registros extras devido à construção do chip. Esses registros extras são denominados registros “de canto” ou *corner registers*. Este detalhe pode ser visualizado na imagem 28.

Figura 28 - Detalhe da construção do detector modelo CCD207-40 demonstrando as diferenças no registro serial do chip ao se utilizar a saída convencional ou a saída EM (E2V, 2008).

Assim, obtém-se um esquema de temporização das fases, ou uma “forma de onda”, para a taxa de leitura de 1MHz na saída EM. A forma de onda obtida nessa etapa será usada como ponto inicial para o aperfeiçoamento da transferência serial das cargas nesse sentido. Vale ressaltar que a fase de alta tensão ainda não foi utilizada nessa etapa. Um valor de tensão constante de 11V (mesmo nível das outras fases seriais) foi fixado para essa fase, de forma a operar como se não estivesse presente.

Com o sistema funcionando dessa forma, ou seja, a leitura sendo realizada através da saída amplificada, obteve-se resultados de ruído e ganho semelhantes com os resultados encontrados para a saída convencional do CCD. O ruído de leitura estimado em laboratório foi de 37,2 elétrons por pixel. Esses resultados mostraram-se bastante consistentes. Utilizando-se o modo de operação proposto, o detector está realmente trabalhando como um CCD convencional, exceto pelo fato de que a carga está sendo conduzida para a saída EM. Portanto espera-se um comportamento semelhante ao encontrado quando as cargas estavam sendo transportadas para a saída convencional.

6.2.2.2 Saída amplificada EM com multiplicação de elétrons

Conforme visto no capítulo 3, sobre o funcionamento do EMCCD, para que haja a multiplicação de elétrons uma das fases da transferência serial de cargas deve ser substituída por dois eletrodos. O primeiro é mantido a uma tensão constante e o segundo é operado como os outros, a não ser pela maior amplitude da tensão aplicada (cerca de 40V). No caso do sistema em questão utilizando o controlador CCCP, a fase de alta tensão possui o formato senoidal, o que gera um menor ruído CIC (DAIGLE et al., 2008).

Assim, o sistema foi testado com o detector funcionando no modo amplificado EM a uma taxa de leitura de 1MHz. Foi observado, nas imagens adquiridas, o fenômeno da multiplicação de elétrons. Para a confirmação desse fato foi realizado o seguinte experimento: foram mantidas constantes todas as condições do sistema, dentre as quais podemos destacar a intensidade da luz projetada na câmera, a temperatura do

detector e o tempo de exposição do sistema. Somente a amplitude da fase serial de alta tensão foi variada. As imagens adquiridas apresentaram, em média, os seguintes resultados:

Amplitude: 35V -> Contagem em ADU por pixel: ~6000

Amplitude: 42V -> Contagem em ADU por pixel: ~26000

Esses resultados demonstram qualitativamente o funcionamento do ganho EM. Mantendo-se todas outras variáveis constantes e modificando-se apenas a amplitude da fase serial de alta tensão, a contagem de eventos por pixel na imagem aumentou, como esperado. Neste exemplo o ruído final da imagem será reduzido a, aproximadamente, menos de 25% do ruído para a mesma situação sem o ganho EM. Isso ocorre pois o sinal final é cerca de quatro vezes maior.

6.3 Limitações encontradas no sistema real

6.3.1 Impossibilidade de caracterização da saída EM a taxa de leitura de 1MHz

Durante os testes realizados nos laboratórios do CTIO a câmera *TigerCam* funcionou nas condições citadas anteriormente e ficou comprovado o fenômeno da multiplicação de elétrons. Devido às limitações de hardware encontradas na câmera, esta não operou em um nível razoável para que fosse realizado um processo de caracterização da mesma, como por exemplo, encontrar os níveis de ruído para diferentes ganhos EM. O problema que impediu o perfeito funcionamento do sistema nessa configuração foi encontrado através de uma série de testes e será detalhado na sessão 7.3.3.

6.3.2 Testes para a saída amplificada EM a taxa de 10MHz

Com o sistema funcionando marginalmente a taxa de leitura de 1MHz na saída EM do detector, o próximo objetivo é executar a câmara a uma taxa de 10MHz. Esta alta taxa de frequência, além de ser um requerimento final do instrumento onde a câmara irá operar, também se faz necessária para conseguir níveis ainda mais baixos de ruídos (DAIGLE et al., 2009).

O ponto de partida para atingir-se o funcionamento da câmara a 10MHz foi, novamente, a utilização das formas de onda e os resultados obtidos nos testes anteriores, no caso, a saída amplificada EM a 1MHz. Para isso, todas as fases paralelas foram mantidas e a direção da transferência serial das cargas também. As mudanças ocorreram na temporização das fases seriais, dos sinais do circuito ADC, do sinal de reset, do sistema de aquisição de imagens etc., cuja frequência foi modificada. Feitas essas mudanças, o sistema não se mostrou operante, ou seja, a câmara não apresentou resposta à presença de luz. Mesmo medindo-se diretamente a saída do sensor, não foi detectada sensibilidade à presença de luz.

6.3.3 Restrições encontradas no sistema

Após vários testes constatou-se que, devido a uma restrição de hardware, a câmara se mostrava impossibilitada de operar à taxa de leitura de 10MHz. Medindo-se os sinais seriais, sendo temporizados diretamente nos pinos do detector, com um osciloscópio digital, verificou-se que as formas de onda estavam bastante distorcidas em relação ao sinal que estava sendo aplicado. A figura 29 mostra a temporização de uma das três fases seriais (R1) para a taxa de leitura de 10MHz. Nela está representada a condição ideal do sinal e o mesmo sinal medido diretamente no pino do CCD com um osciloscópio durante seu funcionamento.

Figura 29 – Simulação do sinal de fase serial R1 em condição ideal de funcionamento, de acordo com a folha de dados (a), e o mesmo sinal medido diretamente no pino do sensor durante funcionamento (b).

Nota-se a distorção do sinal medido em relação ao sinal ideal. As deformidades apresentadas na figura 29 são causadas pela impedância elétrica existente entre o ponto onde o sinal é gerado e o pino do sensor CCD. Uma vez que os sinais de fase serial demonstram-se distorcidos dessa forma, as cargas não podem ser transferidas de uma fase serial para outra, fazendo com que o sinal se perca ao longo da transferência serial. Assim, apesar de o sensor estar detectando as cargas corretamente e transportando-as através da área de imagem, as cargas não podem ser notadas na saída do detector, pois são perdidas durante essa transferência. Vale ressaltar que isso só ocorre para altas taxas de transferência, como 10MHz, no caso do sistema em questão.

Outro problema verificado através de observações dos sinais dos pinos do detector durante seu funcionamento foi a “instabilidade” dos sinais BIAS (sinais de tensão constante), além da suscetividade desses sinais às variações nos sinais de fase, principalmente a influência de alguns sinais de fase no sinal da saída do detector. Essa influência é descrita em (DOWNING; GEBLER; KATOPIS, 1993) e é chamada de ruído de chaveamento. Dessa forma, mesmo que a carga estivesse chegando à saída do chip, o ruído introduzido pelos sinais de fase serial fariam com que a leitura

ficasse praticamente imperceptível. Essa situação é demonstrada na figura 30. Nesta figura é apresentada a influência dos sinais de fase no sistema. Em rosa está representada a saída EM do detector operando a 1MHz. Em verde, o sinal OGH do tipo BIAS que deveria ser um sinal de tensão constante. Algumas das influências indesejadas estão destacadas em vermelho como o sinal da fase serial senoidal de alta tensão, o sinal de reset e um dos sinais do conversor ADC.

Figura 30 – Ruídos presentes no sinal de saída do EMCCD (rosa) e no sinal bias OGH (verde) gerados pela influência de alguns dos sinais de fase. Em destaque os ruídos causados pela fase serial senoidal de alta tensão, pelo sinal de reset e por um dos sinais do conversor ADC.

6.3.3.1 Tentativa de minimização do problema observado

Uma vez observadas as características dos sinais do detector e analisado o projeto da câmera, concluiu-se que as limitações quanto à frequência de operação advinham da placa “*fanout board*”. Trata-se de uma placa passiva (não possui nenhum componente ativo, apenas conectores) localizada no interior da câmera e responsável pela interface entre o detector EMCCD e o conector hermético fixado no corpo da câmera. Nessa placa estão: o soquete, onde o detector é montado, e três conectores que se ligam ao conector hermético através de cabos coaxiais. Como citado, essa placa possui apenas trilhas, sem nenhum componente ativo, além de não possuir uma malha de GND. Devido a essas características, pode-se concluir que o problema observado trata-se da alta impedância apresentada por essas trilhas e da falta de um isolamento adequado entre os sinais. Essas altas impedâncias não se demonstram críticas para taxas de leituras mais baixas, mas tornam-se essenciais para taxas mais altas.

Uma solução simples foi utilizada durante os testes para confirmar as suspeitas dos problemas observados. Foram utilizados capacitores de 0,1 μF entre todos os sinais BIAS e o sinal de GND. Esses são denominados capacitores de desacoplamento e sua utilização é muito comum para minimizar esse tipo de problema (HAIHUA; SAPATNEKAR; NASSIF, 2003). Houve uma ligeira atenuação nos sinais conforme pode ser visto na figura 31, quando comparada com os mesmos sinais da figura 30.

Figura 31 – Ruídos presentes no sinal de saída do EMCCD (rosa) e no sinal bias OGH (verde) gerados por alguns dos sinais de fase atenuados pela ação dos capacitores de desacoplamento. Nota-se uma menor ação dos sinais de fase se comparada com a figura 30.

6.3.4 Simulações das formas de onda das fases seriais em função de valores RC das linhas de transmissão

Nesse item é feita uma análise do comportamento da resposta de uma das fases seriais quando operada a 10MHz, através de simulações. A condição ideal de funcionamento da fase serial R1, definida pela folha de dados do CCD207, já foi apresentada na figura 29a. A resposta dessa forma foi analisada através de simulações para diferentes valores RC da linha de transmissão entre o ponto onde o sinal é gerado e o pino do detector. É feita também uma simulação com mais de uma fase serial, e analisadas as implicações destas linhas de transmissão no funcionamento do sistema.

Para a realização das simulações em questão, foi utilizado o programa *Altium Designer*. Trata-se de um programa integrado para criação de projetos eletrônicos que vai desde a programação de FPGAs, passando por simulação de circuitos até a confecção da placa eletrônica em si. Os processos de simulação de circuitos encontrados nesse programa são utilizados, por exemplo, para otimização de projeto de placas eletrônicas e podem ser observados em (CHENG; ZHU; GE, 2009) e (WANG, 2009).

Nas simulações seguintes foram utilizados os valores de resistência e capacitância fornecidos pela folha de dados do fabricante para o sinal R1. O sinal de entrada gerado também está de acordo com o sugerido na folha de dados. Os sinais de saída obtidos mostram a resposta simulada no pino R1 do detector, ou seja, após a linha de transmissão, nesse caso, a trilha da placa *fanout*. A estratégia adotada para as simulações questão é apresentada na figura 32 e explicada nos parágrafos seguintes.

Figura 32 – Fluxograma mostrando a estratégia adotada para das simulações da nova placa fanout

Para analisar a influência do valor de capacitância foi feita a seguinte simulação. O valor equivalente da resistência foi mantido constante em $0,1\Omega$ e o valor da capacitância equivalente foi variado de 1nF a 100nF . O resultado dessa simulação pode ser visto na figura 33. A forma de onda com marcador quadrado (in_1) representa o sinal na entrada, ou seja, o sinal ideal que deve ser aplicado ao detector. O sinal marcado com triângulo em pé (phir1_1) com valor de $C=1\text{nF}$, marcador diamante (phir1_2) para $C=10\text{nF}$, marcador retângulo (phir1_3) para $C=50\text{nF}$ e o marcador triângulo invertido (phir1_4) para $C=100\text{nF}$.

Figura 33 – Simulação da influência da capacitância equivalente da linha de transmissão do sinal de fase serial R1.

Em seguida foi analisada a influência da resistência equivalente. Para isso foi feito o processo inverso do anterior. A capacitância equivalente foi mantida em 10nF e o valor da resistência foi variado entre $0,1\Omega$ e 1Ω . As formas de onda obtidas nessa simulação podem ser observadas na figura 34. Novamente, a forma de onda com marcador quadrado (in_1) representa o sinal ideal que deve ser aplicado ao detector. O sinal marcado com triângulo em pé (phir1_1) com valor de $R=0,1\Omega$, marcador diamante (phir1_2) para $R=0,2\Omega$, marcador retângulo (phir1_3) para $R=0,5\Omega$ e o marcador triângulo invertido (phir1_4) para $R=1\Omega$.

Figura 34 – Simulação da influência da resistência equivalente da linha de transmissão do sinal de fase serial R1.

A partir dos resultados obtidos nos testes anteriores chegou-se a uma condição de contorno para os valores RC equivalentes. Esses valores foram definidos de acordo com especificações da folha de dados do CCD207. Foram considerados os atrasos dos sinais e as temporizações necessárias para a transferência de carga entre as fases seriais.

De acordo com a folha de dados do detector o tempo ideal de sobreposição (*overlap*) entre as fases seriais para uma taxa de 10MHz é de 5ns, podendo variar de 3ns a 7ns. Outra especificação importante é o tempo decorrido entre os valores máximos para duas fases consecutivas, por exemplo, entre as fases R2 e R3. Esse valor idealmente é de 10ns podendo atingir no máximo 20ns.

A condição de contorno adotada foi para a forma de onda phir1_1 da figura 34. Nessa condição os valores de resistência e capacitância considerados são de $0,1\Omega$ e 10nF, respectivamente. Foi simulada também a condição das três fases (R1, R2 e R3) operando conjuntamente, obtendo-se a figura 35. Observa-se na parte superior da figura 35 as três fases seriais em condição ideal. R1 está representado pelo marcador quadrado (in_1), a fase R2 é representada pelo marcador triângulo (in_2), e a fase R3 pelo marcador diamante (in_2). Na parte inferior da imagem encontram-se os mesmos sinais simulados nos pinos das respectivas fases. Nessas condições foi medido um tempo de sobreposição mínimo de 3,26ns e o tempo máximo entre picos de 18,53ns. Esses valores estão dentro das especificações da folha de dados e são adequados para que a transferência serial das cargas seja efetiva.

Figura 35 – Representação das 3 fases seriais do detector. Acima condição ideal de funcionamento, abaixo resultado obtido com as condições de contorno encontradas.

Uma vez encontrados os valores para a condição de contorno, estes valores foram considerados como restrições durante o desenvolvimento da nova *placa fanout*. As técnicas empregadas para se atingir a condição de contorno adotada serão detalhadas a seguir.

6.3.5 Novo projeto proposto

Foi proposto um novo projeto para a placa “*fanout board*”. Esse novo projeto leva em conta todos os aspectos que foram constatados durante os testes. Foram adicionados capacitores de desacoplamento em todos os sinais BIAS. Estes foram colocados o mais próximo possível dos pinos do soquete onde o detector é instalado. Foram ainda acrescentados em série para os mesmos sinais BIAS componentes denominados EMIFIL (*EMI Supression Filters*). Estes dispositivos são filtros LC utilizados para eliminar interferências eletromagnéticas em circuitos de

corrente contínua. A utilização destes filtros garante um melhor desempenho na eliminação de ruídos para os sinais BIAS. Foram também adicionados planos GND internos na placa eletrônica, com o intuito de isolar os sinais da camada superior e inferior da placa, ou seja, a nova placa proposta é do tipo multicamada. Por fim, durante o roteamento da placa, tomou-se o cuidado de isolar todos os sinais de fase dos demais sinais através de trilhas de GND. Esse *projeto* foi revisado e aprovado pelo fabricante da câmera.

O software utilizado para o desenvolvimento dessa nova placa também foi usado para a simulação do comportamento da mesma, e também para as simulações prévias. Trata-se do software *Altium Designer*, já citado anteriormente. Foi feita uma simulação para análise do comportamento dos três sinais de fase seriais e também do sinal de fase de alta tensão para uma taxa de transferência de 10MHz. A figura 36 mostra o resultado das simulações. As formas de onda ideais (quadrados) foram aplicadas e os sinais resultante nos pinos do EMCCD (triângulos) também são mostrados.

Figura 36 – Temporização das fases seriais e fase de alta tensão para taxa de leitura de 10MHz. Nota-se a condição ideal dos sinais (quadrados) e os mesmos sinais distorcidos (triângulos).

Nota-se que os sinais resultantes nos pinos do CCD continuam distorcidos e defasados, mas em escala bem menor do que os medidos com a placa anterior (figura 29). As condições de contorno foram utilizadas para a confecção dessa nova placa *fanout*. Assim, fica garantida a transferência serial das cargas para taxas de 10MHz.

O sistema real, ou seja, após a placa ser manufaturada, poderá apresentar algumas diferenças em relação ao sistema simulado no programa. Porém pode-se notar que as distorções e a defasagem dos sinais são mínimas na figura 36. Os resultados obtidos para a nova placa estão melhores que as condições de contorno. Isso se confirma com a análise das condições para a transferência serial das cargas. Foram medidos, por software, os tempos de sobreposição mínimo e máximo entre picos, os valores encontrados foram de 4,81ns e 13,32ns, respectivamente. Estes valores mostram-se muito bons, pois as especificações do fabricante, conforme citado, são de 5ns (entre 3ns e 7ns) para o tempo de sobreposição e de 10ns (máximo de 20ns) para o tempo entre picos. Assim, possui-se uma margem de segurança para as possíveis diferenças entre a placa real e a simulação da mesma.

6.4 Testes no telescópio SOAR

6.4.1 Testes de engenharia

Este capítulo exemplifica uma das aplicações astronômicas do instrumento BTFI. É apresentado um dos resultados do primeiro teste “*on sky*” do instrumento. Ou seja, são testes feitos com o instrumento acoplado a uma das saídas do Telescópio SOAR e executados durante uma noite de observação astronômica. Durante essas observações somente uma das câmeras científicas *TigerCam* foi utilizada. Este teste demonstrou-se importante, mesmo com a câmera operando nas condições citadas anteriormente, pois seu principal objetivo é realizar uma verificação em nível de engenharia, ou seja, analisar o funcionamento geral do instrumento, além das possíveis causas de falhas.

Foram analisados os comportamentos mecânico, óptico, eletrônico e de software operando em conjunto com o telescópio e observando-se objetos astronômicos reais. Para isso várias imagens foram adquiridas em diferentes condições de operação: diferentes objetos astronômicos, diferentes tempos de exposição, diferentes níveis de intensidade de luz e diferentes configurações da óptica do instrumento.

6.4.2 “Primeira Luz” do instrumento BTFI

Das várias imagens adquiridas durante os testes citados anteriormente podemos destacar um grupo de imagens que ilustra umas das principais características do instrumento: a capacidade do estudo dos objetos astronômicos através da espectroscopia. A figura 37 mostra uma imagem de um dos primeiros objetos observados pelo instrumento. Trata-se da Nebulosa planetária de Saturno, ou NGC 7009. A figura mostra toda a informação espacial contida dentro de um cubo de dados obtido com o BTFI. Ela foi obtida somando-se todos os diferentes quadros deste cubo, cada quadro está relacionado com um comprimento de onda em

específico. Este procedimento é o equivalente a obter-se uma imagem com um filtro espectral de baixa resolução. Nesse caso, foram somadas 20 imagens com comprimentos de onda de 3900 a 5800 Angstroms.

Figura 37 – Planetária de Saturno (NGC 7009) observada na primeira noite de funcionamento do instrumento BTFI.

Cada comprimento de onda da nebulosa é representado por uma imagem obtida pela câmera operando à taxa de leitura de 1MHz na saída convencional e com tempo de exposição de 30 segundos. A posição do equipamento óptico do instrumento define qual comprimento de onda será observado em cada imagem. Nesse caso a câmera está posicionada na saída do instrumento que possui o equipamento ótico iBTF ou *imaging Bragg Tunable Filter* (BLAIS-OUELLETTE; DAIGLE; TAYLOR, 2006).

6.4.3 Benefícios da utilização do EMCCD

Pode-se citar alguns benefícios que seriam obtidos caso a câmera fosse utilizada na saída amplificada EM do detector para a observação mostrada na figura 37. Além da melhoria significativa na qualidade da imagem devido ao nível de ruído bem menor, há outras vantagens. As imagens seriam obtidas de forma mais rápida e com um menor tempo de exposição. Isso porque no modo de operação EM o sensor possui a sensibilidade de detectar até mesmo um único elétron gerado pela presença de um fóton (TULLOCH; DHILLON, 2010). Com essa possibilidade de operação seriam necessários menores tempos de exposição para capturar a mesma quantidade de informação. Somando-se ainda o fato de que várias imagens podem ser adquiridas em pouco tempo, pode-se fazer um pré-processamento (por exemplo, uma simples adição pixel a pixel) de todas as imagens adquiridas num determinado tempo e analisar se as condições atuais são favoráveis para o objetivo da observação em questão.

7 Conclusões e perspectivas futuras

7.1 Conclusões

Detectores EMCCD são uma alternativa real para o desenvolvimento de novos instrumentos astronômicos voltados para diferentes aplicações como imageamento e espectroscopia. Esses detectores tornam possível o desenvolvimento de sistemas de imageamento de alta velocidade (alta taxa de leitura), o que permite um melhor aproveitamento do telescópio em uma noite de observação, além de possibilitar diferentes tipos de observações. Fontes extremamente fracas podem ser observadas utilizando-se EMCCDs no modo de contagem de fótons. O valor do limite escolhido para esse modo influencia diretamente na confiabilidade do sistema. Porém, para fontes com alta taxa de iluminação, a utilização de detectores CCDs convencionais ainda mostra-se mais eficiente.

O ruído de leitura nos EMCCDs pode ser reduzido a níveis insignificantes através da multiplicação por avalanche. A restrição quanto ao ruído desses sensores concentra-se nos valores de ruído CIC. Através de uma minuciosa manipulação dos sinais de fase do detector, quanto às suas transições e amplitudes, o ruído CIC pode atingir níveis muito baixos, tornando-se desprezível para as aplicações em questão.

Altas taxas de leitura são viáveis, desde que seja tomado um cuidado especial no projeto eletrônico da câmera. Simulações sobre a resposta do sistema para diversas condições de operação devem ser levadas em consideração no momento do desenvolvimento da câmera que abrigará o sensor EMCCD.

Os testes preliminares do instrumento BTFI se mostraram satisfatórios. Os objetivos deste trabalho foram atingidos e o sistema de imageamento (sensor, câmera, controlador eletrônico, placa de aquisição de imagens e software) está atualmente operante no instrumento BTFI, conforme proposto.

7.2 Trabalhos futuros: Ótica adaptativa utilizando-se EMCCD

Sistemas de ótica adaptativa são sistemas onde o objeto a ser observado é previamente analisado por amostras, e condições desfavoráveis de observação são corrigidas.

Turbulências na atmosfera terrestre produzem heterogeneidades no índice de refração do ar, afetando a qualidade das imagens dos telescópios terrestres (RODDIER, 1999). Em observações astronômicas, essas turbulências atmosféricas constituem um grande problema, pois camadas de ar de diferentes densidades, temperaturas e, conseqüentemente, diferentes índices de refração, se movimentam na frente do instrumento, desviando o raio de luz, deformando as imagens e reduzindo drasticamente a resolução. Esse problema pode ser parcialmente contornado construindo-se telescópios em montanhas que possuam grandes altitudes e baixa umidade no ar. Algumas montanhas em locais como Chile, Havaí e Ilhas Canárias reúnem essas condições e, por isso, possuem telescópios instalados.

Outra forma de se corrigir o efeito das turbulências atmosféricas nas imagens é a utilização de ótica adaptativa. Ótica Adaptativa (OA) é uma forma de compensação dessa degradação da imagem em tempo real. Essa técnica consiste na utilização de elementos óticos ativos, tais como espelhos deformáveis, para corrigir instantaneamente distorções na frente de onda. Essas distorções são medidas por um dispositivo denominado sensor de frente de onda que entrega o sinal necessário para conduzir o elemento de correção.

Sensores de frente de onda possuem algumas limitações em seu desempenho devido às limitações impostas pelos CCDs convencionais. Uma delas é a velocidade de leitura da saída. Sistemas mais rápidos podem fazer leituras mais rápidas e, conseqüentemente, atuar mais rapidamente na correção da frente de onda. Ruídos na leitura do CCD também limitam a operação dos sensores de frente de onda.

Assim, espera-se que a utilização de detectores EMCCDs em sensores de frente de onda seja uma alternativa que irá melhorar o desempenho de sistemas de ótica

adaptativa. As altas taxas de leitura do EMCCD permitirão uma resposta mais rápida ao sistema e uma maior precisão seria garantida pelos baixos níveis de ruído.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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

BAILEY J. A., Optical astronomical instrumentation. 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. Laser Focus World Magazine, In: Laser Focus World Vol. 41, 2005, p. 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.

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.

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

BOYES W., Instrumentation Reference Book, 4a ed. Burlington – MA, Butterworth-Heinemann Press, 2008. 1312p.

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

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, p. 433.

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, p. 72-79.

CHENG Y. Q., ZHU M., GE W., Signal Integrity Simulation Design of Image Processor PCB Combined with Electromagnetic Compatibility Analyses Based on Altium Designer 6. In: IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009, p. 745-749.

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

DAIGLE O., et al., L3CCD results in pure photon-counting mode. In: Proceedings of the SPIE, vol. 5499, 2004, p. 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.

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, p. 866-884.

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, p. 167-174.

DOWNING R., GEBLER P., KATOPIS G. A., Decoupling capacitor effects on switching noise. In: IEEE Transactions on Electron Devices, Hybrids, Manufact. Technol., vol. 16, 1993, p. 484-489.

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

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

E2V TECHNOLOGIES, CCD97-00 Back Illuminated 2-Phase IMO Series - Electron Multiplying CCD Sensor Datasheet, 2007.

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

FERRARI et al., BUTTERFLY: o sistema de software do Brazilian Tunable Filter Imager, In: XXXV Reuniao da Sociedade Astromica Brasileira. 2010, In press.

GARRAD R. E., An automated telescope system for photoelectric photometry, 1a ed. Queensland, University of Queensland, 1993. 321p.

HAIHUA S., SAPATNEKAR S.S., NASSIF S.R., Optimal decoupling capacitor sizing and placement for standard-cell layout designs. In: IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 22, 2003, p. 428-436.

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

JANESICK J. R. Scientific Charge Coupled Devices, 1a 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.

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, p. 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, p. 512–519.

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

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

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

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

QUINT B. et al., Illusion - A Fabry-Perot Data-Cube Synthesizer. In: Astronomical Data Analysis Software and Systems XIX, National Astronomical Observatory of Japan, 2009, in press.

PULNIX, CameraLink Standards, Specification of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers, Version 1.1, 2004.

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

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, p. 579-584.

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

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, p. 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, p.1227-1232.

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

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

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

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

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, p. 148–161.

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

VALLERGA J., et al., Noiseless imaging detector for adaptive optics with kHz frame rates. In: Proceedings of the SPIE, vol. 5490, 2004, p. 1256–1267.

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

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

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

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Divisão de Biblioteca. Diretrizes para apresentação de dissertações e teses / Divisão de Biblioteca da EPUSP. 3ª. Ed. São Paulo, 2006. 103 p.