



**CBPF**

**Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF**

Programa de Mestrado Profissional em Física com ênfase em Instrumentação Científica

**Danilo dos Santos Cardoso**

Desenvolvimento e validação de um firmware inicial, baseado na tecnologia SoC-FPGA, para aquisição de sinais dos sensores fotomultiplicadores no experimento CYGNO

Rio de Janeiro

2024

Daniilo dos Santos Cardoso

Desenvolvimento e validação de um firmware inicial, baseado na tecnologia SoC-FPGA, para aquisição de sinais dos sensores fotomultiplicadores no experimento CYGNO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Física com Ênfase em Instrumentação Científica, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física com ênfase em Instrumentação Científica.

Orientador: Prof. Dr. Herman Pessoa Lima Júnior.

Rio de Janeiro

2024



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



"DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM FIRMWARE INICIAL,  
BASEADO NA TECNOLOGIA SoC-FPGA, PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS DOS  
SENSORES FOTOMULTIPLICADORES NO EXPERIMENTO CYGNO"

## DANILO DOS SANTOS CARDOSO

Dissertação de Mestrado Profissional em Física  
com ênfase em Instrumentação Científica,  
apresentada no Centro Brasileiro de Pesquisas  
Físicas do Ministério da Ciência Tecnologia e  
Inovação. Fazendo parte da banca examinadora  
os seguintes professores:

Herman Pessoa Lima Junior – Orientador/CBPF

Luciano Manhães de Andrade Filho - UFJF

Paulo César Machado de Abreu Farias - UFBA

Rio de Janeiro, 27 de março de 2024.

## AGRADECIMENTOS

Quanto mais se estuda, mais se agiganta a sensação de que o aprendizado é infinito. É a Deus o meu primeiro agradecimento, principalmente por me permitir conhecer e venerar um pouco mais de sua obra naturalmente construída, a qual esculpiu as leis que futuramente iremos nos aprofundar.

Não nos é possível conquistar um trabalho como este sozinho, e também não fazemos algo apenas para nós mesmos; graças a Deus nunca estamos sós. Por isso, espero que de alguma forma este trabalho contribua com alguém. Meus sinceros agradecimentos a todos que me auxiliaram de alguma forma a concretizá-lo.

Agradeço a todos que estão à minha volta: minha esposa Kátia, meus pais e meu irmão, por todo o apoio, carinho e estímulo ao longo de toda essa jornada.

Ao meu orientador, Professor Dr. Herman Pessoa Lima Júnior, pela confiança, paciência, compreensão, orientação, pelo conhecimento transmitido e por me oportunizar com este trabalho.

Aos prezados: Cristiano Garcia e Professor Dr. Romeu Abrahão, ambos da Faculdade de Talentos Humanos (FACTHUS), por me apresentarem o CBPF e por me permitirem usar os equipamentos do laboratório da instituição. De forma semelhante, ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), por me permitir utilizar seu laboratório.

Aos membros da banca examinadora, os Professores Doutores: Luciano Andrade, Rafael Nóbrega e Paulo Farias, pela disponibilidade ao corrigirem esta dissertação, gerando excelentes contribuições para o trabalho.

Por fim, a todos membros do CBPF, por trabalharem para manter viva a disseminação de conhecimentos no nosso país, e no mundo.

## RESUMO

O CYGNO é um experimento científico, baseado em uma colaboração internacional, com o propósito de criar uma tecnologia inovadora capaz de detectar e identificar eventos de Matéria Escura. O experimento pretende utilizar detectores do tipo TPC (*Time Projection Chamber*) para detectar as trajetórias das partículas com base na leitura óptica obtida por câmeras científicas CMOS e na aquisição de sinais de fotomultiplicadoras. Com isso, espera-se conseguir reconstruir a trajetória tridimensional de eventuais partículas que atravessem o TPC, além de distinguir recuos nucleares de recuos eletrônicos.

Este trabalho foi desenvolvido diante da necessidade de uma eletrônica específica para lidar com os sinais dos fotomultiplicadores do detector CYGNO. Com este objetivo, buscou-se definir a arquitetura e o *firmware* de um módulo eletrônico de aquisição analógica de alta velocidade (DAQ), especificando os elementos-chave de seu *hardware* e planejando a estrutura principal de seu *firmware*.

As principais demandas do experimento para o módulo eletrônico foram: 500 MSPS de amostragem do sinal analógico, 8 canais de aquisição, interface de comunicação Ethernet e possibilidade de processamento de sinais. Foram estudados e selecionados componentes como: o ADC, o SoC FPGA, os componentes da camada física da Ethernet, entre outros. O desenvolvimento do *firmware* inicial teve como base um kit de desenvolvimento comercial com ADC e SoC FPGA.

O desenvolvimento do *firmware* foi baseado em uma distribuição Linux gratuita concebida para o kit de desenvolvimento, que foi ampliada neste trabalho para atender os requisitos do DAQ. Várias funcionalidades da programação e do *firmware* desenvolvidos foram testadas e comparadas com um osciloscópio e um voltímetro para validação do projeto.

Em várias etapas do desenvolvimento do *firmware* foi utilizada uma caixa escura com um SiPM (fotomultiplicador de silício) e um LED para testes do sistema desenvolvido. Por fim, levantou-se a curva de resposta do SiPM desta caixa escura para diferentes níveis de luminosidade e com a largura de pulso fixa no LED, utilizando a técnica ATE (Amostragem em Tempo Equivalente).

## ABSTRACT

CYGNO is a scientific experiment based on an international collaboration, with the purpose of creating an innovative technology capable of detecting and identifying Dark Matter events. The experiment intends to use TPC (Time Projection Chamber) detectors to trace particle trajectories based on optical readings obtained by scientific CMOS cameras and the acquisition of signals from photomultipliers. With this, it is expected to be able to reconstruct the three-dimensional trajectory of potential particles passing through the TPC, in addition to being able to distinguish nuclear recoils from electronic recoils.

This work was developed due to the need for specific electronics to handle the signals from the photomultipliers of the CYGNO detector. With this goal, the architecture and firmware of a high-speed analog acquisition module (DAQ) were defined, specifying the key elements of its hardware and planning the main structure of its firmware.

The main requirements for the experiment's electronic module were: 500 MSPS analog signal sampling, 8 acquisition channels, Ethernet communication interface and signal processing capability. Components such as the ADC, the SoC FPGA, and the Ethernet physical layer components, among others, were studied and selected. The initial firmware development was based on a commercial development kit with ADC and SoC FPGA.

The firmware development was based on a free Linux distribution designed for the development kit, which was expanded in this work to meet the DAQ requirements. Various functionalities of the developed programming and firmware were tested and compared using an oscilloscope and a voltmeter for project validation.

At various stages of the firmware development, a dark box with a SiPM (Silicon PhotoMultiplier) and an LED was used. Finally, the response curve of the SiPM in this dark box was measured for different light levels with a fixed pulse width on the LED, using the Equivalent Time Sampling (ETS) technique.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Órbita elíptica de objetos astronômicos. ....	22
Figura 2: Velocidade orbital dos componentes visíveis da Via Láctea e de seus periféricos conforme sua distância ao centro galáctico. ....	24
Figura 3: Princípio de funcionamento de um TPC. ....	33
Figura 4: Esquemático de um protótipo de TPC de uma das fases do projeto CYGNO. ....	34
Figura 5: Exemplo de uma folha de um GEM vista em um microscópio eletrônico. ....	35
Figura 6: Representação do campo elétrico e as linhas equipotenciais de uma secção de um GEM eletrificado. ....	36
Figura 7: Representação conceitual da montagem típica de um GEM-triplo. ....	37
Figura 8: Esquemático funcional de tubo fotomultiplicador (PMT). ....	38
Figura 9: Alimentação de um PMT. ....	39
Figura 10: À esquerda, esquemático da etapa LIME [43], e à direita a sua construção. ....	39
Figura 11: Representações do sensor SiPM utilizado. ....	41
Figura 12: Estrutura de uma célula de um SiPM. ....	43
Figura 13: Circuito equivalente de uma célula SiPM. ....	44
Figura 14: Pulsos resultantes de um SiPM em resposta aos fótons detectados. ....	46
Figura 15: Circuito típico com amplificação para leitura do sensor SiPM (MPPC). ....	47
Figura 16: Da esquerda para a direita: a fonte DC, o gerador de pulsos para o LED, o ADC e a representação da Caixa Escura. ....	49
Figura 17: Visão geral da caixa escura utilizada nas experimentações. ....	49
Figura 18: Diagrama de blocos simplificado do dispositivo <i>Cyclone V</i> demonstrando os barramentos de interconexão. ....	53

Figura 19: Visão geral do módulo DAQ proposto ao experimento CYGNO. ....	55
Figura 20: Diagrama simplificado das funções presentes na placa eletrônica do kit de desenvolvimento DE10-Nano, da <i>Terasic</i> . ....	56
Figura 21: Interface desenvolvida para testar o DAQ, visualizada no Navegador. ....	66
Figura 22: Visualização das opções de testes presentes no Sistema Sigma. ....	66
Figura 23: Esquema de ligação para os testes comparativos com voltímetro. ....	72
Figura 24: Técnica de Amostragem em Tempo Equivalente (ATE) com uma Sobre-Amostragem. ....	75
Figura 25: Comparação das aquisições de uma forma de onda arbitrária com Amostragens em Tempo Real (ATR) e em Tempo Equivalente (ATE), utilizando o Sistema Sigma. ....	76
Figura 26: Comparativo entre a leitura de um osciloscópio de 150 MHz e a leitura pelo Sistema Sigma usando a técnica ATE com uma sobre-amostragem que alcança 25 MSPS. ....	77
Figura 27: Montagem experimental para realização dos testes com a caixa escura. ....	78
Figura 28: Saída do SiPM da caixa escura para diferentes intensidades luminosas geradas pelo LED. ....	79
Figura 29: Esquemático de ligação dos equipamentos e componente para os testes de validação de ' <i>Internal Trigger</i> '. ....	80
Figura 30: Demonstração da detecção do <i>trigger</i> interno com a largura da FIFO ajustada para 200 e o valor de disparo em 200 mV. ....	82
Figura 31: Esquemático utilizado para os testes de comparação entre o Sistema Sigma e um Osciloscópio. ....	83
Figura 32: Interface desenvolvida para testar o DAQ, visualizada no Navegador. ....	94
Figura 33: Os dados armazenados no FPGA estão acessíveis na interface. ....	95
Figura 34: Visualização das opções de testes presentes no Sistema Sigma. ....	96



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados resultantes dos tempos de leituras utilizando a LWB, em $\mu\text{s}$ .....	69
Tabela 2: Dados resultantes dos tempos de leituras utilizando a H2F com 32 bits, tempo em $\mu\text{s}$ . .....	71
Tabela 3: Comparativo das leituras do ADC com a leitura de um voltímetro. ....	73
Tabela 4: Comparativo entre os valores calculados pelo Sistema Sigma (SS) e os valores apresentados pelo osciloscópio em resposta a uma onda senoidal de 200,05 Hz. ....	83
Tabela 5: Discrepância entre os valores calculados pelo Sistema Sigma e um osciloscópio, resultantes de leituras de várias frequências de ondas senoidais.....	84

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ADC – Analog to Digital Converter

APD – Avalanche PhotoDiode

CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

CCD – Charge-Coupled Device

CERN – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

CMB – Cosmic Microwave Background

CMOS – Complementary Metal-Oxide Semiconductor

CYGNO – módulo CYGNus com leitura Óptica

DAQ – Data Acquisition

DC – Direct Current

DDR – Double Data Rate

DSP – Digital Signal Processing

EMAC – Ethernet Media Access Control

F2H – FPGA to HPS

FIFO – First In, First Out

FPGA – Field Programmable Gate Arrays

FWHM – Full Width at Half Maximum

GEM – Gas Electron Multiplier

GM-APD – Geiger Mode Avalanche PhotoDiode

H2F – HPS to FPGA

HPS – Hard Processor System

I2C – Inter-Integrated Circuit

IP (FPGA) – Intellectual Property

KED – Kit Eletrônico de Desenvolvimento

LED – Light-Emitting Diode

LIME – Long Imaging Module

LVDS – Low-Voltage Differential Signaling

LWB – LightWeight Bridge

MACHO – Mass Compact Halo Objects

MP – Modelo Padrão (física de partículas)

MPGD – Micro-Pattern Gaseous Detectors

MPPC – Multi-Pixel Photon Counter

PMT – PhotoMultiplier Tube

RAM – Random Access Memory

sCMOS – Scientific Complementary Metal-Oxide Semiconductor

SDRAM – Synchronous Dynamic Random Access Memory

SiPM – Silicon PhotoMultiplier

SoC – System-on-a-Chip

SPE – Single Photoelectron

SPI – Serial Peripheral Interface

SS – Sistema Sigma

SUSY – SuperSYmmetry

TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet Protocol

TPC – Time Projection Chambers

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

USB – Universal Serial Bus

VME – Versa Module Eurocard

VSCI – Visual Studio Code Insiders

WIMP – Weakly Interacting Massive Particle

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1	INTRODUÇÃO HISTÓRICA	18
2.2	EVIDÊNCIAS DA PRESENÇA DA MATÉRIA ESCURA	21
<b>2.2.1</b>	<b>Validando a teoria da Matéria Escura</b>	<b>22</b>
2.3	PRINCIPAIS CANDIDATOS À MATÉRIA ESCURA	25
<b>2.3.1</b>	<b>Áxions</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Neutrinos estéreis</b>	<b>26</b>
<b>2.3.3</b>	<b>MACHOs (Mass Compact Halo Objects)</b>	<b>27</b>
<b>2.3.4</b>	<b>WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)</b>	<b>28</b>
2.4	GRUPOS DE PESQUISAS QUE BUSCAM DETECTAR A MATÉRIA ESCURA NA ATUALIDADE	29
<b>3</b>	<b>O EXPERIMENTO CYGNO</b>	<b>32</b>
3.1	TPC – CÂMARA DE PROJEÇÃO TEMPORAL	32
3.2	GAS ELECTRON MULTIPLIER – GEM	35
3.3	CÂMERAS SCMOS	37
3.4	PHOTOMULTIPLIER TUBES – PMT	38
3.5	PROTÓTIPO DO EXPERIMENTO CYGNO	39
3.6	DISPOSITIVO FOTOMULTIPLICADOR DE SILÍCIO – SiPM	40
<b>3.6.1</b>	<b>Introdução ao SiPM</b>	<b>41</b>
<b>3.6.2</b>	<b>História da detecção de fótons</b>	<b>42</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Funcionamento do sensor</b>	<b>42</b>
<b>3.6.4</b>	<b>Princípio de operação</b>	<b>44</b>
<b>3.6.5</b>	<b>Eficiência de detecção</b>	<b>46</b>
<b>3.6.6</b>	<b>Circuito eletrônico típico para a leitura do sensor</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>48</b>
4.1	EQUIPAMENTOS PARA OS TESTES	48
4.2	DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DAQ	50
<b>4.2.1</b>	<b>Solicitações da colaboração</b>	<b>50</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Conversor analógico-digital</b>	<b>51</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Processamento dos dados</b>	<b>52</b>

4.2.4	Visão geral do módulo DAQ .....	55
4.2.5	Kit de desenvolvimento Terasic DE10-Nano.....	56
4.2.6	Mudanças de escopo .....	58
4.3	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS .....	58
4.3.1	Sistema operacional do HPS .....	59
4.3.2	Descrição de hardware do FPGA .....	60
4.3.3	Alterações nos programas originais do rsYocto .....	61
4.4	O SISTEMA SIGMA .....	64
5	TESTES E RESULTADOS .....	67
5.1	TESTES DE PERFORMANCE DAS PONTES DO SoC COM RSYOCTO.....	67
5.1.1	Utilizando a <i>Lightweight Bridge (LWB)</i> .....	69
5.1.2	Utilizando a <i>HPS-to-FPGA Bridge (H2F)</i> .....	70
5.2	TESTES EXECUTADOS DIRETAMENTE NO SISTEMA SIGMA .....	71
5.2.1	Comparativo entre ADC e voltímetro.....	72
5.2.2	Aquisição Simples e em Tempo Equivalente.....	74
5.2.3	Função de <i>Trigger</i> Interno .....	79
5.2.4	Comparativo com um osciloscópio.....	83
6	CONCLUSÃO .....	86
	REFERÊNCIAS .....	88
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA INTERFACE DO SISTEMA SIGMA.....	94
	APÊNDICE B – RELATÓRIO DA FUNÇÃO DE <i>TRIGGER</i> INTERNO .....	98

## 1 INTRODUÇÃO

A Matéria Escura é uma das preeminentes indagações da astrofísica e cosmologia contemporâneas, e um dos tópicos mais desafiadores e discutidos nesta comunidade científica moderna. Séculos atrás, o termo ‘Matéria Escura’ poderia ser utilizado para descrever o que não era visível aos olhos no ‘firmamento’, mas hoje, ele representa a massa invisível responsável por moldar a estrutura universal como ela é vista, e que ainda continua obscura não somente aos nossos olhos, mas aos complexos instrumentos modernos.

Neste contexto, o corpo científico, sempre energizado pelas dúvidas e pela disseminação do seu conhecimento, se dedica a compreender o que os cálculos comprovam, a sua influência demonstra, mas que não se consegue detectar através dos meios convencionais. A hipotética Matéria Escura – que pela sua forma não emite, absorve ou reflete a luz – é considerada interativa apenas pela força gravitacional, a qual é praticamente insignificante em escalas subatômicas. Mesmo diante deste desafio, a comunidade científica, instigada pelo desconhecido, lança amplas experimentações com alcances mundiais, promovendo novas tecnologias e por vezes as integrando às clássicas; buscando assim obter algumas respostas que podem nos ajudar a decifrar, ou a expandir este enigma.

A constituição do Universo é de cerca 4,9% de Matéria Bariônica, 26,6% de Matéria Escura e 68,5% de Energia Escura [1]. Portanto, aproximadamente um terço, ou 31,5% (4,9% + 26,6%) da energia total do Universo é representado pela matéria. Destes 31,5%, estima-se que as porcentagens de Matéria Escura e de Matéria Comum são de cerca de 84,4% e 15,6%, respectivamente [2]. Com uma proporção de cerca de cinco vezes mais Matéria Escura do que a visível, entender esta entidade é crucial para desvendar a estrutura e a evolução universais.

Um dos experimentos atuais que buscam detectar a Matéria Escura é o Experimento CYGNO, na Itália, do qual este presente trabalho faz parte. De um modo geral, o experimento visa a detecção das partículas WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*) [3] por meio de recuos nucleares de baixa energia, convertendo-os em eventos de luz para a sua efetiva detecção. O experimento combina as seguintes tecnologias em um único detector:

- I. Câmeras científicas com tecnologia sCMOS de baixo ruído e de altas granularidade, velocidade e sensibilidade [4];
- II. Fotomultiplicadores tubulares ou de estado sólido;
- III. Câmaras de Projeção Temporal (TPCs) gasosas;
- IV. Multiplicadores de Elétrons em meios Gasosos (GEMs).

O CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas), entrou como um dos colaboradores do Experimento CYGNO em 2020, atuando no desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados, ou DAQ (*Data Acquisition*). A proposta é desenvolver uma eletrônica modular dedicada ao experimento, responsável pela aquisição analógica dos sinais provenientes dos sensores fotomultiplicadores utilizados nas câmaras de TPC. O desenvolvimento ainda inclui um *firmware* gerenciador do módulo que realize as aquisições analógicas, permita a transferência dos dados coletados, e possibilite suas depurações e alterações via interface serial Ethernet.

Para o desenvolvimento desta eletrônica dedicada, os requisitos mínimos necessários que foram obtidos junto aos pesquisadores do experimento são:

- Oito canais analógicos de 500 MSPS (*Mega Samples Per Second* – Milhões de Amostras Por Segundo) com resolução de 12 bits, para a leitura dos sinais de oito fotomultiplicadores por módulo eletrônico;
- Taxa de eventos de detecção prevista: 1 Hz;
- Possibilidade de processamento de sinais.

Diante da quantidade de canais analógicos e do volume de dados por eles gerados, é necessário utilizar um FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) que comporte o número de pinos necessários, e que possua a tecnologia SoC (*System-on-a-Chip*), a qual integra um HPS (*Hard Processor System*) e a lógica programável do FPGA em um único *chip*.

Dentro deste escopo, o objetivo inicial desta dissertação de mestrado era apresentar um esquemático do protótipo do DAQ incluindo a especificação de todos os seus componentes eletrônicos, ficando os desenvolvimentos de seu *layout* e de sua programação para projetos futuros. No entanto, houve uma mudança de objetivos no decorrer do trabalho, o qual se limitou a colaborar com a especificação dos componentes essenciais - como o ADC e o SoC -, mas se adicionou o desenvolvimento de um *firmware* inicial para o DAQ, o qual incluiu a validação de parte da eletrônica de um Kit Eletrônico de Desenvolvimento (KED) utilizado nos testes e desenvolvimento do *firmware*.

No que se refere ao *hardware*, com a realização de testes utilizando um KED, validou-se alguns circuitos periféricos como: controlador USB, comunicação Ethernet e cartão de memória; memórias RAM, JTAG, USB-Blaster, entre outros. Estes circuitos podem ser utilizados no futuro protótipo de DAQ.

O desenvolvimento do *firmware* engloba os seguintes objetivos:

- Pesquisar, implantar e testar um sistema operacional embarcado, que seja executado pelo HPS, visando facilitar o desenvolvimento do *firmware*;
- Estudar o funcionamento das pontes entre HPS e FPGA, verificando se a taxa de transferência das pontes atende ao volume de dados gerados pelos oito ADCs;
- Desenvolver uma via de acesso ao usuário que permita manipular tanto o HPS quanto o FPGA via interface *web* e conexão Ethernet;
- Desenvolver um sistema para operação do DAQ, onde se possa efetuar variados testes, fazer cálculos e processamento dos sinais dos ADCs, realizar configurações, além de possibilitar a visualização dos resultados dos testes e cálculos via interface *web*.

Com o desenvolvimento do *firmware* e com o kit de desenvolvimento em mãos, foi possível realizar testes para a validação do *firmware* desenvolvido utilizando uma caixa escura que possui um fotomultiplicador de Silício (SiPM) e um LED como gerador de fótons para o SiPM. Isto também permitiu o contato, estudos e o consequente aprendizado com relação aos SiPMs.

## 1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A apresentação deste documento é organizada da seguinte forma: o capítulo 2 possui o levantamento bibliográfico para apreciar a Física que ampara este trabalho. Para isto foi realizado um resumo histórico contextualizando o crescimento das ideias e teorias que corroboram o tema da Matéria Escura, trazendo também as evidências e os principais candidatos a constituírem a referida matéria.

O capítulo 3 aborda o experimento CYGNO, ao qual este trabalho faz parte, trazendo as teorias dos equipamentos propostos pelo experimento, e as perspectivas futuras na detecção da Matéria Escura dentro de seu escopo. Para encerrar este tema, foram trabalhados os conceitos básicos de história, construção e funcionamento do SiPM, que foi o sensor utilizado para esta dissertação.

O capítulo 4 traz o que foi desenvolvido neste trabalho, contextualizando com teorias e justificando as escolhas de alguns itens importantes para o projeto de uma placa eletrônica para aquisição analógica, que é o motivo deste trabalho. Além disto, este capítulo aborda o desenvolvimento de um sistema composto por vários programas embarcados que visam a operação e controle desta placa eletrônica.



Os resultados e testes foram analisados no capítulo 5, no qual estuda-se a performance das pontes entre FPGA e HPS, avalia-se os programas desenvolvidos para este trabalho, e por fim, relata-se o teste que mirou a detecção de fótons individuais com o sensor utilizado.

As considerações finais e as conclusões deste trabalho estão apresentadas no capítulo 6.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Matéria Escura ainda é uma grande incógnita para a ciência, e apesar da grandiosa teoria que a sustenta, estudar como ela foi desenvolvida durante o transcorrer da história nos prova que não se trata de uma simples hipótese, mas de um compêndio de conceitos e experimentos que sustentam plenamente o tema. Outro fator relevante para motivar o estudo da história, é destacar que o esforço milenar da humanidade sobre o desconhecido, contribui para justificar a necessidade da Ciência; e isto inclui as buscas pela Matéria Escura, cuja necessidade já se encontra plenamente ativa e clara nas mentes dos grandes cientistas.

Gianfranco Bertone e Dan Hooper [5] fizeram uma publicação detalhada da sequência histórica da descoberta da Matéria Escura, que é referência para diversos outros artigos. Na seção seguinte desta dissertação será abordada uma breve perspectiva histórica sobre o tema.

### 2.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Os questionamentos sobre a natureza da matéria, antes da promulgação da Ciência, eram feitos pelos filósofos naturais, que eram pensadores e estudiosos dedicados à exploração e compreensão dos fenômenos naturais, que tentavam explicar o funcionamento do mundo ao seu redor através da observação, raciocínio lógico e teorias fundamentadas. Séculos atrás, eles já ventilavam ideias sobre a natureza da matéria e já cogitavam a existência de formas de matérias imperceptíveis, talvez devido à distância longínqua desta matéria, ou por sua obscuridade e invisibilidade naturais. No percorrer da história aparecem as teorias dos atomistas, com destaques para os gregos Leucipo e Demócrito no século V a.C.. Epicuro (341 a 270 a.C.) trouxe suas teorias sobre a existência de infinitas quantidades de outros mundos. Além disso, outros especulavam sobre a matéria inobservável que poderia estar presente em nosso próprio Universo. No entanto, Aristóteles (384 a 322 a.C.), devido às ferramentas e conhecimentos limitados da época, elaborou um modelo cosmológico no qual a Terra estava no centro de um universo imutável, o que desacreditou a muitos sobre a existência de formas invisíveis ou desconhecidas de matéria [5].

O modelo geocêntrico aristotélico prevaleceu durante muitos séculos. O modelo heliocentrista de Copérnico surgiu no século XVI, sendo considerado herético e condenável, e foi preciso muita dedicação à ciência para sobrepujar a crença puramente dogmática do geocentrismo. Contemporâneo dessa era inquisitorial, Giordano Bruno – martirizado ao ser levado à fogueira – foi um exemplo de devoção à ciência. Ele defendia o modelo copernicano, e o expandiu com a ideia de que as estrelas são outros sóis cercados de planetas. Galileu Galilei,

um dos pais da astronomia observacional, foi provavelmente o grande líder da transição cosmológica, influenciando o fim da era aristotélica / ptolomaica na astronomia. Ele inovou as observações astronômicas com seu telescópio, que entre outras descobertas, revelou quatro satélites orbitando Júpiter. A descoberta destas luas, invisíveis a olho nu, nos prova que há corpos considerados invisíveis até a utilização de instrumentos ou técnicas apropriadas [5].

Isaac Newton, diante de mais uma de suas incalculáveis contribuições para as ciências, trouxe em 1687 as *Leis do Movimento e da Gravitação Universal*. Essas leis permitiram, entre outros avanços, calcular a força de atração de corpos astronômicos medindo suas propriedades dinâmicas [5]. Foi com a compreensão da força gravitacional que John Michell, em 1783, indagou que poderiam existir objetos supermassivos que nem mesmo a luz seria capaz de escapar de sua atração gravitacional. Esta é considerada uma das primeiras menções sobre buracos negros, considerados como objetos astrofísicos invisíveis. Sua primeira imagem só foi apresentada em abril de 2019, resultado de um esforço coletivo envolvendo uma equipe internacional de pesquisadores, parte do projeto *Event Horizon Telescope* (EHT) [6].

Voltando a 1844, o matemático Friederich Bessel previu a existência de objetos astronômicos com base na sua influência gravitacional, como são os casos das estrelas *Procyon* e *Sirius*, cujos movimentos só poderiam ser justificados pela presença de estrelas companheiras menores até então não observadas. Bessel também concluiu que o fato de haver muitas estrelas visíveis não invalida a possibilidade da existência de muitas outras estrelas invisíveis, trazendo à discussão da época a plausibilidade da existência de objetos cósmicos invisíveis [7].

Dentro deste mesmo contexto, o movimento anômalo de Urano poderia ser justificado pelas influências gravitacionais de um “novo” planeta, previa Urbain Le Verrier em 1846 [5]. Assim foi descoberto o planeta Netuno. Curiosamente foi a primeira vez que um planeta foi encontrado por meio de previsões matemáticas ao invés de observações diretas. Le Verrier também notou a precessão anômala do periélio de Mercúrio, propondo mais uma vez a existência de um corpo celeste desconhecido, um “planeta escuro” chamado de *Vulcano*. Diferentemente do planeta Netuno, esta anomalia foi posteriormente explicada pela teoria da relatividade geral de Einstein [5].

Diante da invenção da astrofotografia, os cientistas observaram regiões escuras em campos estelares densos, então emergiu a dúvida se isso era resultado da ausência de estrelas ou da presença de matéria absorvente no decorrer da linha de visão [5]. Em 1894, Artur Ranyard, ao avaliar a região em torno da estrela  $\theta$  *Ophiuchi*, concluiu que há canais ou áreas escuras cortando a luz de nebulosas e de estrelas atrás delas, que poderiam ser estruturas ou

massas escuras. Hoje sabe-se que as áreas escuras relatadas por Raynard eram nuvens densas escuradoras de poeira e gás, mas as opiniões ficaram divididas por muito tempo [8].

Apesar de todos estes corpos celestes – sejam eles planetas, estrelas ou nuvens – serem considerados como invisíveis, escuros, ou representarem algum tipo de Matéria Escura, a designação conhecida atualmente foi moldada a partir de estudos das massas de galáxias e seus *clusters*.

Lord Kelvin, utilizando conceitos da termodinâmica, tentou estimar a quantidade de corpos escuros na galáxia calculando a dispersão da velocidade observada das estrelas – ou o quão rápidas estas estrelas orbitam o centro da galáxia. Informações sobre a velocidade dessas estrelas permitiram estimar a massa da galáxia. Ele concluiu que: “Muitas de nossas supostas bilhões de estrelas, talvez a grande maioria delas, podem ser corpos escuros...” [9 p. 274, tradução própria]. A partir deste estudo, Henri Poincaré mencionou oficialmente o termo “Matéria Escura” em 1906, ao discordar das conclusões de Kelvin [5].

Em 1932, Jan Oort reforçou a teoria da Matéria Escura, ao concluir que a velocidade das estrelas analisadas excediam consideravelmente a velocidade de escape presumida [10], quando se considera apenas a matéria visível. Sendo assim, a Via Láctea deveria possuir matéria adicional além da visível [11].

O reforço da teoria veio com Fritz Zwicky, em 1933, ao estudar aglomerados de galáxias. Examinando o aglomerado Coma, Zwicky estimou a quantidade de galáxias e o tamanho físico do sistema. A partir disso, ao calcular a dispersão da velocidade, concluiu que esta deveria ser de 80 km/s, mas a média da velocidade de dispersão ao longo da linha de visão era de aproximadamente 1000 km/s. Fritz Zwicky fez uma publicação destes seus estudos em [12], a qual, erroneamente, foi considerada por muitos em se tratar do primeiro uso do termo “Matéria Escura” [5]. Eis a célebre conclusão sobre os dados: “Se isto for confirmado, obteríamos o resultado surpreendente de que a Matéria Escura está presente em quantidade muito maior do que a matéria luminosa” Fritz Zwicky [12 p.125, tradução própria].

Em 1965, Morton Roberts [13] publicou seus estudos quanto às curvas de rotação de estrelas da nossa galáxia vizinha: Andrômeda. Em seus estudos, observou-se a intrigante semelhança entre as velocidades orbitais das estrelas próximas ao núcleo galáctico e as situadas em regiões mais distantes. Até então, somente radiotelescópios eram utilizados para este fim, que comumente utilizavam a leitura da radiação emitida pelo HI (hidrogênio neutro) [14] durante sua transição hiper fina. Morton, na continuação de seus estudos, publicou um artigo em 1973 [15] comparando as curvas de rotação resultantes de seus estudos com as curvas de

outras galáxias presentes em estudos de parceiros, acentuando os questionamentos sobre a presença da matéria não observável.

Mas, paralelamente aos estudos de Morton, foi em 1960 que se iniciou uma nova era em termos de precisão nos dados. Nesta década, enquanto os astrofísicos usavam os radiotelescópios, Kent Ford desenvolveu um espectrógrafo de tubo de imagem que Vera Rubin e ele usaram para realizar observações espectroscópicas, contribuindo para medições mais precisas perante os radiotelescópios. Vera focou inicialmente na galáxia de Andrômeda [16], e posteriormente em outras galáxias espirais. Nestes seus estudos publicados em 1970, ela reforçava o postulado de que havia alguma forma de matéria nas regiões mais afastadas do centro galáctico, que justificaria as velocidades orbitais estelares acima do calculado. Vera Rubin é uma figura importante nos estudos da Matéria Escura, as contribuições de suas observações foram consideradas muito significativas neste campo de pesquisa, fornecendo evidências observacionais fortes para a existência da Matéria Escura.

## 2.2 EVIDÊNCIAS DA PRESENÇA DA MATÉRIA ESCURA

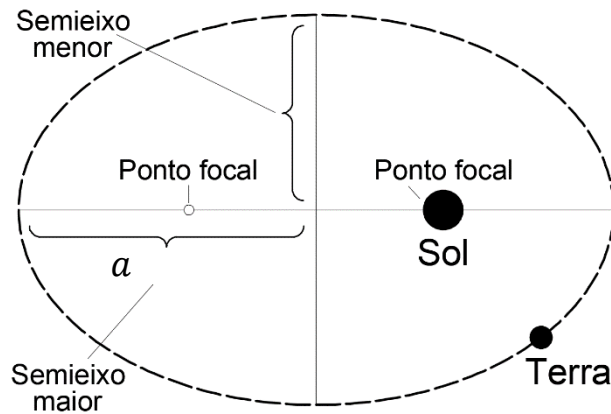
Os estudos proporcionados pela Vera Rubin e seu colega Kent Ford são alguns dos mais fortes indícios da presença de alguma matéria invisível. Seus estudos miraram na avaliação da velocidade de rotação de galáxias, onde a galáxia de Andrômeda foi a primeira a ser avaliada. Eles estudaram a distribuição de sua massa por meio de análises das velocidades de órbitas das estrelas e dos gases presentes a diferentes distâncias do centro galáctico. A conclusão desconcertante é que as estrelas mais distantes do centro da galáxia, onde a gravidade é mais fraca, se moviam a velocidades semelhantes - senão iguais - às estrelas mais próximas do centro, onde a gravidade é mais forte devido à sua proximidade do núcleo galáctico. Em outras palavras: nas regiões mais externas da galáxia, as velocidades das estrelas são muito mais altas do que o esperado quando se considera que somente a matéria visível compõe a galáxia. Essas observações foram contrárias às leis de Newton e, ao assumir a validade dos cálculos newtonianos para essas observações, levantaram-se hipóteses da presença de uma massa não detectável. Isso significa que deve haver uma quantidade significativa de matéria invisível nas galáxias que não emite luz e não interage com a matéria visível por meio de forças eletromagnéticas.

Para chegar a esta conclusão, na próxima seção serão apresentados alguns cálculos e justificativas que colaboraram com o postulado da presença desta matéria não-bariônica, partindo das deduções sustentadas pela Terceira Lei de Kepler.

### 2.2.1 Validando a teoria da Matéria Escura

Johannes Kepler formulou as leis que descrevem o movimento dos planetas ao redor do Sol. Na Figura 1 tem-se como exemplo a órbita da Terra, o desenho está fora de escala. O percurso é elíptico, e um dos pontos focais é a posição da estrela. Kepler concluiu, na chamada Terceira Lei de Kepler, que o quadrado do período orbital de um planeta é diretamente proporcional ao cubo do semieixo maior da sua órbita [17].

Figura 1: Órbita elíptica de objetos astronômicos.



Fonte: Autor.

Matematicamente, a Terceira Lei de Kepler é expressa por:

$$P^2 \propto a^3 \quad (1)$$

onde  $P$  é o período orbital em anos, e  $a$  é o semieixo maior da órbita dado em unidades astronômicas (a distância da Terra ao Sol é considerada 1 AU) [18].

Newton usou esta relação para desenvolver sua teoria da gravitação. Ele mostrou que essa proporção entre os períodos e os semieixos maiores das órbitas dos planetas poderia ser explicada se a força da gravidade diminuísse com o quadrado da distância entre dois corpos. Isso levou à formulação da Lei da Gravitação Universal, que afirma que a força gravitacional entre dois objetos é diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre seus centros [19]. A fórmula proposta por Newton é a seguinte:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} R^3, \quad (2)$$

onde  $m_1$  e  $m_2$  representam as massas dos dois corpos,  $G$  é a constante gravitacional.  $P$  e  $R$  são as variáveis  $P$  e  $a$ , da terceira lei de Kepler da equação (1), respectivamente. E, de acordo com [17], considera-se a órbita circular, portanto  $R$  e  $a$  são variáveis que possuem o mesmo valor.

Se a massa dos dois corpos são muito desiguais, como o caso da Terra e do Sol, pode-se ignorar a massa do corpo menor, ficando, portanto:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{Gm_1} R^3 \quad (3)$$

Com a órbita sendo considerada circular, sua circunferência é  $2\pi R$ , portanto o período da órbita é  $P = 2\pi R/v$ . Com isto, tem-se que a massa do corpo orbitado é:

$$m_1 = \frac{v^2 R}{G} \quad (4)$$

Conclui-se que é possível calcular toda a massa do que está dentro da órbita do objeto, através da sua velocidade e distância até o centro orbital. Conhecendo a velocidade orbital da Terra e sua distância até o Sol, é possível calcular a massa do Sol com essa equação. Com os dados atuais, chega-se ao valor que a massa do Sol é aproximadamente  $2 \times 10^{30}$  kg.

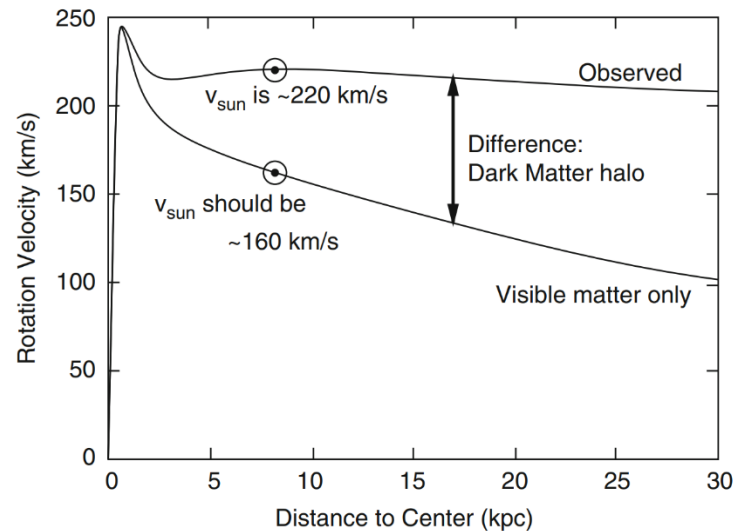
A equação (4) também pode ser utilizada para calcular a massa da galáxia que está dentro da órbita solar. Para isso, usa-se os valores estimados ao Sol com relação à sua velocidade orbital e à sua posição na Via Láctea que são: raio  $R = 26.000$  anos-luz e a velocidade orbital de  $v = 200$  km/s. Com esses dados, tem-se que a massa contida dentro da órbita solar é:  $m_1 = 1,5 \times 10^{44}$  g, ou o equivalente a  $10^{11} M_{\odot}$  (massas solares). Estes dados foram obtidos em [17].

A massa calculada, de  $10^{11} M_{\odot}$ , não corresponde ao esperado. Com esse valor, seriam necessárias aproximadamente 200 bilhões de estrelas entre o Sol e o centro galáctico, porém o número mais preciso indica a probabilidade de que seja a metade, cerca de 100 bilhões de estrelas [17].

A outra incoerência surge quando se calcula a velocidade orbital em diferentes raios de distância do centro galáctico utilizando o valor da massa da galáxia estimada por cálculos e observações. O cálculo dessa massa se baseia na distribuição da luz e da média da proporção Massa-Luminosidade da população estelar; ainda no caso da Via Láctea, descarta-se a massa representada pelas nuvens de gás e poeira, por equivalerem a menos de 10 % da massa das estrelas [20]. Para se proceder ao cálculo da velocidade orbital, deve-se isolar a variável  $v$  da equação (4). Utilizando a massa estimada estatística do disco galáctico, faz-se um levantamento das velocidades em função de vários valores de raio. De acordo com [20], na distância que o Sol está, a sua velocidade orbital deveria ser de  $\sim 160$  km/s ao considerar apenas a matéria bariônica. Portanto, o valor observado de cerca de 220 km/s é inesperado, sendo justificado apenas pela presença de uma matéria invisível.

Na Figura 2 pode-se visualizar a diferença entre as velocidades orbitais observadas e as teóricas, ambas relacionadas com a distância do centro da Via Láctea. O raio estimado da Via Láctea é de 15 kpc (quiloparsecs), portanto nota-se que as observações e cálculos foram além da galáxia, alcançando os objetos astronômicos satélites.

Figura 2: Velocidade orbital dos componentes visíveis da Via Láctea e de seus periféricos conforme sua distância ao centro galáctico.



Legenda: A curva superior representa a velocidade observada experimentalmente, e a curva inferior representa a velocidade teórica com base no volume de matéria bariônica. Fonte: [20].

A curva superior do gráfico da Figura 2 apresenta o resultado observacional das velocidades, o que não condiz com o que foi calculado, que é representado pela curva inferior. A diferença é justificada atualmente pela presença teórica de um halo natural de matéria que envolve as galáxias, matéria esta que é tratada como Matéria Escura.

Se não houvesse a Matéria Escura, a curva superior da Figura 2 seria semelhante à curva inferior, visto que a densidade de estrelas e nuvens de gás e poeira interestelar, ou seja, a matéria bariônica, vai diminuindo à medida que se afasta do centro galáctico. A linha superior indica que após uma determinada distância do centro, cerca de 4 kpc, a velocidade orbital praticamente não se altera, nem mesmo na vizinhança da galáxia após os 15 kpc [17,20], o que pode justificar a presença do halo de Matéria Escura.

Vera Rubin [21] afirma que a maior parte da matéria do Universo é escura, e que há poucas informações sobre qual seria sua composição, apenas teorias. Em seus estudos de galáxias espirais, chegou-se à estimativa de que cerca de 80 a 90 % da matéria destas galáxias é não-bariônica. No entanto, segundo [17], a quantidade de matéria invisível no disco galáctico não pode exceder a matéria visível em um fator maior do que dois; portanto, a Matéria Escura



estaria provavelmente localizada e mais concentrada em uma extensão esférica, um halo de material que pode se estender a cerca de 60 kpc do centro da Via Láctea. Acredita-se que este halo externo possua de cinco a dez vezes mais massa do que a soma do núcleo, do disco e do halo interno da galáxia.

Há outros fenômenos cósmicos que ajudam a corroborar a existência da Matéria Escura. O fenômeno das lentes gravitacionais é um deles, estas manifestações foram previstas pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein, e revelam a presença da Matéria Escura ao distorcer e ampliar a luz de objetos astronômicos distantes, como galáxias e quasares [22], reforçando a tese da influência gravitacional da Matéria Escura. Um outro fenômeno cósmico está implícito nos estudos da radiação cósmica de fundo, CMB. Segundo os estudos nesta área, para justificar as flutuações de densidade de matéria visível presente no Universo é necessária a presença de um tipo diferente de matéria além da bariônica, que interaja fracamente, mas que tenha sido desacoplada do plasma inicial do *Big Bang* muito antes da matéria comum, formando um poço de potencial gravitacional para acomodar as estruturas formadas hoje pela matéria visível [2].

Indicativos não faltam para justificar os estudos científicos que busquem respostas para este fenômeno complexo. Esta movimentação do corpo científico garante novas experiências e perspectivas, aumentam a complexidade e a engenhosidade dos experimentos e observações, e alavancam os conhecimentos não só da física, mas de diversas áreas. Tais estudos podem desvelar novas partículas ou remodelar nossa compreensão sobre a realidade universal, o que não apenas elucidaria um dos maiores mistérios da ciência moderna, mas também reconfiguraria profundamente nossa compreensão da composição e dinâmica do cosmos.

### 2.3 PRINCIPAIS CANDIDATOS À MATÉRIA ESCURA

Ainda não se sabe em que consiste a Matéria Escura, mas existem características fundamentais para que os candidatos sejam avaliados [17, 20, 2], eis algumas:

- I. A Matéria Escura não pode ser constituída de matéria bariônica, visto que esta já é bem conhecida e não pode explicar as observações astronômicas e cosmológicas que indicam a existência de Matéria Escura;
- II. Deve ser constituída de matéria exótica que interage muito fracamente com a matéria comum e a radiação eletromagnética;
- III. Ter uma massa não-nula, relativamente grande, para que possam explicar a quantidade e a distribuição de Matéria Escura no Universo;

- IV. Serem estáveis ou terem uma vida muito longa, para que possam existir desde o início do Universo até hoje.

Atualmente há fortes candidatos que a compilação dos estudos científicos já postulam. A seguir tem-se um resumo destas partículas hipotéticas, e por último, a partícula alvo deste trabalho.

### 2.3.1 Áxions

Os áxions foram propostos para resolver um problema da violação de simetria na cromodinâmica quântica, relacionada ao momento de dipolo elétrico do nêutron. Um estudo recente indica que a massa dos áxions estaria entre 40 e 180  $\mu\text{eV}$ , uma faixa muito mais estreita do que a de 40 anos atrás, que considerava uma faixa de poucos  $\mu\text{eV}$  a 500  $\mu\text{eV}$  [23]. Estes valores atuais representam uma massa equivalente a 10 bilionésimos da massa do elétron, por isso ele precisa ser suficientemente abundante para constituir a Matéria Escura por este quesito. Quanto à sua produção, considera-se que os áxions tenham sido gerados no Universo primitivo [24], reforçando a sua candidatura. A teoria de que os áxions teriam baixa interação com a matéria comum é confirmada por [25].

### 2.3.2 Neutrinos estéreis

Os neutrinos ‘comuns’ (os não-estéreis) são as únicas partículas do Modelo Padrão (MP) da física de altas energias que são eletricamente neutras; além disto, atuam muito fracamente através da gravidade, e sua maior interação é por meio da força fraca. Quanto à sua longevidade, admite-se que seja suficientemente relevante perante a idade do Universo. Com todas estas características, os neutrinos presentes no MP seriam propensos candidatos à Matéria Escura, mas há características restritivas. Entre elas, encontra-se o fato de neutrinos serem consideradas partículas ultra-relativísticas, o que não contribui com a formação das estruturas universais em grande escala observada. Ademais, há uma falha na sintonia presente no MP relacionada à massa dos neutrinos, que não deveria existir de acordo com o MP. Para justificar a pequena massa desses neutrinos, conhecidos como “*left-handed*”, postulou-se a existência dos neutrinos “*right-handed*”, denominados de *neutrinos estéreis*.

Os neutrinos estéreis, por sua vez, não interagem por meio da interação fraca, possuem massas acima de keV, são não-relativísticos, e assim como os neutrinos *left-handed*, também são eletricamente neutros, interagem fracamente com outras partículas e são longevos. As diferenças destes neutrinos estéreis perante os neutrinos do MP, os tornam mais propensos a

constituírem a Matéria Escura. Por estas características eles teriam o potencial de promover a *Matéria Escura fria*, que possui a propriedade de se aglomerar para criar o poço gravitacional fundamental na formação das estrelas, nuvens e demais corpos celestes bariônicos [2, 26, 27].

Os experimentos para a detecção dos neutrinos estéreis ainda não conseguiram comprovações, mas, assim como os neutrinos *left-handed* foram detectados após muitos anos de experimentações, os neutrinos estéreis ainda possuem a característica de não interagirem através da força fraca, dificultando ainda mais sua detecção. Neste contexto, há alguns experimentos que rejeitam a teoria dos neutrinos estéreis, como são os casos de [28] e [29].

### 2.3.3 MACHOs (Mass Compact Halo Objects)

Os MACHOs, ou Objetos Halo Compactos MASSIVOS, ao contrário das partículas exóticas, são objetos astronômicos como buracos negros, estrelas de nêutrons, anãs brancas, ou planetas que não emitem luz suficiente para serem observados diretamente, mas que podem ser detectados devido a seus efeitos gravitacionais, como as lentes gravitacionais. O MACHO foi um dos primeiros modelos propostos para explicar a existência da Matéria Escura [30], aventando a possibilidade de que a matéria bariônica compactada pudesse ser a composição da Matéria Escura.

Experimentos como o MACHO Project [31] e o EROS (Experience de Recherche d'Objets Sombres) [32] foram dedicados à busca de MACHOs por meio do fenômeno de microlente gravitacional utilizando a Grande Nuvem de Magalhães. Esse efeito ocorre quando a luz de uma estrela distante é ampliada por um MACHO passando entre a estrela e o observador.

Apesar de algumas detecções de eventos de microlentes, que sugerem a presença de MACHOs, os resultados de estudos como [31] e [32] indicam que a fração de massa de MACHOs nos halos galácticos é limitada, sugerindo que outros candidatos, como as partículas de Matéria Escura fria (WIMPs), possam ser mais significativos na composição da Matéria Escura. Seria também necessário que estes objetos massivos já existissem nos primeiros minutos da história cosmológica, o que é refutado, pois foram formados após centenas de milhões de anos. Nem mesmo os buracos negros primordiais, apesar de terem sido originados antes da nucleossíntese poderiam justificar esta teoria, visto que a quantidade de tais objetos no Universo é insuficiente para gerar a abundância conhecida de Matéria Escura [2].

### 2.3.4 WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)

Ao descartar os neutrinos quanto à temática da Matéria Escura, os astrofísicos iniciaram as buscas por experimentações com outras partículas candidatas mais viáveis. Os neutrinos forneceram um modelo importante para a classe de espécies hipotéticas, uma delas, mais tarde, seria conhecida como WIMP – Partícula Massiva que Interage Fracamente [5].

Para contextualizar o paradigma WIMP, deve-se recorrer a algumas lacunas no Modelo Padrão da física de partículas (MP) corrente. O MP atualmente não explica a massa do neutrino, e também não explica a escala de energia do bóson de Higgs, que é cerca de 125 GeV – sendo assim muito menor que a massa de Planck, que está na escala de  $10^{19}$  GeV. Essa enorme diferença nas escalas de massa entre as partículas elementares e a massa de Planck é uma das razões para o chamado "problema da hierarquia", que questiona por que a gravidade é tão fraca comparada às outras forças fundamentais, e por que as massas das partículas elementares são tão pequenas em comparação com a massa de Planck. Para resolver este problema é necessário uma nova física com partículas na escala de 100 GeV de energia, e a teoria da Supersimetria (SUSY) é a mais promissora delas [20]. A SUSY não foi motivada inicialmente para o problema da hierarquia, mas é considerada a principal candidata para uma teoria além do modelo padrão que poderia superar algumas das questões mais intrigantes da física de partículas atuais [33]. Essa teoria postula a existência de partículas companheiras mais pesadas para cada partícula e anti-partícula, com as mesmas cargas elétricas, mas spins diferentes. Se alguma destas partículas companheiras mais pesadas, que seja eletricamente neutra e estável, que tenha massa da ordem entre 100 GeV e 10 TeV, e que por fim, interaja fracamente, esta partícula é uma WIMP [20]. A respeito da interação entre partículas, estas WIMPs hipotéticas interagem apenas pela força nuclear fraca e pela gravidade. A soma de todas estas características as tornam candidatas ideais para a Matéria Escura. Dentro da teoria da Supersimetria, as partículas WIMPs mais promissoras para comporem a Matéria Escura são os neutralinos, parceiros supersimétricos dos bósons neutros do MP, ou seja, o fóton, o  $Z^0$  e o Higgs [2].

Como supracitado, as partículas WIMPs também estão mais diretamente associadas a esta dissertação. Este presente trabalho foi desenvolvido para contribuir no desenvolvimento de detectores de partículas WIMP do experimento CYGNO, que faz parte de uma colaboração internacional chamada CYGNUS. Este assunto será retomado no capítulo 3, destacando o projeto piloto que está sendo desenvolvido para os experimentos mirando a Matéria Escura nesse contexto.

## 2.4 GRUPOS DE PESQUISAS QUE BUSCAM DETECTAR A MATÉRIA ESCURA NA ATUALIDADE

A busca por Matéria Escura é um campo de pesquisa muito ativo, possui atualmente experimentos distribuídos em várias partes do globo. Devido à quantidade de candidatos e teorias sobre sua origem e composição, há diferentes focos de investigação, que por sua vez empregam uma variedade de tecnologias e procedimentos desafiadores para as equipes das pesquisas. Apesar de sua detecção ainda não ter sido confirmada, as pesquisas estão progredindo e novos resultados são esperados todos os anos.

Há diversos experimentos individualizados, mas que contribuem mutuamente com o intuito único de atingir o sucesso na detecção. O COSINUS é um exemplo de continuidade de outro experimento: o DAMA/LIBRA. Este último observou um sinal anual na taxa de contagem de eventos que poderia ser interpretado como a assinatura da Matéria Escura. No entanto, apesar desta detecção não ter sido corroborada por outros experimentos, o COSINUS pretende manter o líquido alvo do experimento DAMA/LIBRA, mas diferenciar na sua forma de experimentação.

Os experimentos atuais voltados para este campo de pesquisa, estão focados principalmente na detecção dos áxions, ALPs (*Axion-Like Particles*) e das WIMPs. Pode-se classificar as formas de detecção em *diretas* e *indiretas*. As detecções diretas buscam observar as partículas de Matéria Escura diretamente, através de sua interação com detectores especialmente projetados. As indiretas, por sua vez, procuram por produtos da aniquilação ou decaimento de partículas de Matéria Escura, como raios gama, por exemplo.

Foram selecionados alguns dos experimentos pela tecnologia de detecção e pela partícula de Matéria Escura a ser pesquisada <sup>1</sup>. São eles:

- ADMX (EUA): O *Axion Dark Matter eXperiment* utiliza um detector de cavidade ressonante para procurar áxions. O conceito básico do detector deste experimento explora a teoria de decaimento dos áxions em fótons de micro-ondas. Esse processo pode ser acelerado utilizando um campo magnético forte que reveste uma cavidade ressonante de alta frequência, se a frequência sintonizada na cavidade for a mesma dos fótons produzidos pelos áxions, o decaimento dos áxions presentes na cavidade pode ser estimulado [34]. O experimento está sediado na Universidade de Washington, e

---

<sup>1</sup> Algumas informações foram retiradas do *site* oficial do próprio experimento, e a quantidade de artigos publicados foi conseguida através do mecanismo de pesquisa *online* ‘*Inspire HEP*’ (*High Energy Physics*), em <https://inspirehep.net/>.

conta com cientistas de dez instituições dos Estados Unidos e Reino Unido. A colaboração ‘*ADMX Collaboration*’ possui 32 artigos publicados<sup>2</sup>.

- SuperCDMS (EUA): O *Super Cryogenic Dark Matter Search* possui publicações desde 1990, geradas como resultado das buscas pela Matéria Escura com o uso de criogenia. O experimento está em fase de atualização, o que adicionou o prefixo “Super” ao seu nome, e será instalado em um laboratório científico subterrâneo no Canadá. O experimento visa detectar vibrações de rede cristalina e ionização geradas nos átomos do cristal por partículas WIMPs. A ideia por trás do uso da criogenia é a de manter o detector a temperaturas próximas do zero absoluto, para que se possa diferenciar a energia recebida pela partícula de Matéria Escura da energia térmica dos núcleos dos detectores [35]. A Colaboração envolve institutos de países como o Canadá, França, Reino Unido e Índia. As colaborações ‘*CDMS Collaboration*’ e ‘*SuperCDMS Collaboration*’ possuem 201 artigos publicados<sup>2</sup>.
- XENON (Itália): O experimento Xenon utiliza uma Câmara de Projeção Temporal (TPC) preenchida com xenônio líquido e gasoso. Espera-se que partículas WIMPs reajam com o núcleo dos átomos do xenônio líquido, produzindo luz e elétrons livres. Estes últimos são atraídos por um campo elétrico para a região gasosa, onde são acelerados por um segundo campo elétrico, produzindo luz pelo processo de cintilação nesta região mais rarefeita. Os fótons produzidos nos dois momentos são registrados por tubos fotomultiplicadores (PMTs). Cerca de 200 cientistas de mais de 25 instituições mundiais compõem esta Colaboração [36]. A colaboração ‘*Xenon Collaboration*’ já produziu cerca de 96 publicações<sup>2</sup>.
- LUX-ZEPLIN (LZ) é um de três experimentos que pesquisam a Matéria Escura que foram considerados como *experimentos de segunda geração*, e que foram selecionados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Instalado a aproximadamente 1,6 km de profundidade em uma instalação de pesquisas na Dakota do Sul, o detector utiliza sete toneladas de xenônio líquido em um TPC, monitorado por 494 PMTs, e tem como alvo as partículas WIMPs. O TPC é envolvido por outras camadas: a primeira contém uma fina camada de xenônio líquido, que por sua vez, é envolvida por um detector externo com um cintilador de gadolínio, e este está envolvido por uma camada de água ultrapura. Todas estas camadas visam identificar e reduzir sinais falsos, melhorando a

---

<sup>2</sup> De acordo com informações coletadas no *site* <https://inspirehep.net/>

rejeição de eventos de fundo indesejados no detector TPC. A Colaboração LZ possui cerca de 250 cientistas de 39 instituições mundiais [37], e possui 22 artigos publicados desde 2011<sup>3</sup>.

- AMS-02 (ISS): O Espectrômetro Magnético Alfa (AMS) é o primeiro instrumento desta característica no espaço. É um módulo montado na Estação Espacial Internacional (ISS) desde 2011, voltado para experimentos de física de partículas que procuram especificamente antimatéria e Matéria Escura. O detector é muito complexo, similar aos utilizados em aceleradores de partículas, como por exemplo, o LHC; mas por já estar localizado no espaço sideral não há a necessidade do acelerador, porque as partículas já lhes chegam aceleradas. O empreendimento é uma colaboração internacional constituída por 44 instituições americanas, europeias e asiáticas [38]. As colaborações ‘AMS Collaboration’ e ‘AMS-02 Collaboration’ possuem ao todo cerca de 260 artigos publicados<sup>3</sup>.
- CYGNUS: É o grupo colaborativo deste trabalho de mestrado. Possui pesquisas avançadas com equipamentos baseados em TPC e leitura óptica, e pretende se instalar em vários países [39]. No decorrer deste trabalho serão apresentadas mais informações, incluindo a tecnologia empregada em um dos experimentos. A colaboração ‘CYGNUS Collaboration’ já produziu cerca de 22 artigos, e sua subdivisão ‘CYGNO’ produziu cerca de 24 artigos<sup>3</sup>.

A lista abaixo contém os nomes de experimentos da atualidade que buscam pela Matéria Escura:

- Experimentos que procuram áxions ou ALPs (Axion-Like Particles): ADMX, CASPER e HAYSTAC (EUA); IAXO e OSQAR (CERN).
- Experimentos que procuram por Matéria Escura considerando partículas WIMPs de forma direta: LIPSS, LUX-ZEPLIN, SuperCDMS e DAMIC (EUA); CRESST (Alemanha); PandaX (China); COSINUS, XENON, NEWSdm, Darkside, SABRE, DAMA e CYGNUS (Itália).
- Experimentos que procuram por Matéria Escura considerando partículas WIMPs de forma indireta: FERMI-LAT e VERITAS (EUA); HESS (Namíbia); MAGIC (Espanha); AMS-02 (ISS - Estação Espacial Internacional).

---

<sup>3</sup> De acordo com informações coletadas no *site* <https://inspirehep.net/>

### 3 O EXPERIMENTO CYGNO

A proto-colaboração CYGNUS [3, 40] é um dos esforços internacionais que está com seus estudos direcionados para a detecção das partículas WIMPs. Uma das divisões da colaboração CYGNUS é residente na Itália: o experimento CYGNO (um módulo CYGNus com leitura Óptica), que prevê a instalação de um detector no laboratório *National Laboratory of Gran Sasso*, na Itália [3]. O intuito de observatórios subterrâneos é o de diminuir as interferências de raios cósmicos nos detectores. As outras divisões farão as instalações de seus respectivos laboratórios em países distribuídos pelo mundo [39].

Diante dos estudos da Matéria Escura, que sugerem a presença de um halo de Matéria Escura envolvendo a Via Láctea, entende-se que há um movimento relativo do planeta Terra com as partículas deste halo. A forma de detecção proposta no CYGNO, prevê a observação da dispersão elástica entre as partículas WIMPs da Matéria Escura com as partículas subatômicas, particularmente buscando recuos nucleares de baixa energia (100 eV a 100 keV), pois as WIMPs possuem baixa interação com a matéria comum. Durante essas interações, as partículas incidentes transferem parte de sua energia para os núcleos atômicos, fazendo com que sejam excitados, podendo causar até a emissão de partículas. Para experimentar energias tão baixas, utiliza-se da discriminação de interações induzidas em outras partículas conhecidas. Estudos indicam que há um teórico “vento WIMP” do halo galáctico que atinge a Terra, resultado do movimento natural do Sol em torno do centro galáctico, cuja rota está direcionada para a constelação Cygnus. Devido à órbita terrestre, esse vento apresenta sazonalidades durante o ano [3, 41, 42].

Os instrumentos detectores que serão utilizados no experimento são fundamentados em *Time Projection Chambers* (TPCs) gasosos, ou Câmaras de Projeção Temporal gasosos, que buscam rastrear o caminho de recuos nucleares de baixa energia da ordem O (keV) [43].

A técnica utilizada pelo experimento CYGNO busca detectar recuos moleculares mais raros, por se tratar de níveis de energias inferiores ou iguais às de neutrinos solares [3]. Os principais equipamentos e componentes a serem utilizados nos experimentos estão descritos a seguir nas próximas seções, dando ênfase nas suas composições e características mais direcionadas ao experimento CYGNO.

#### 3.1 TPC – CÂMARA DE PROJEÇÃO TEMPORAL

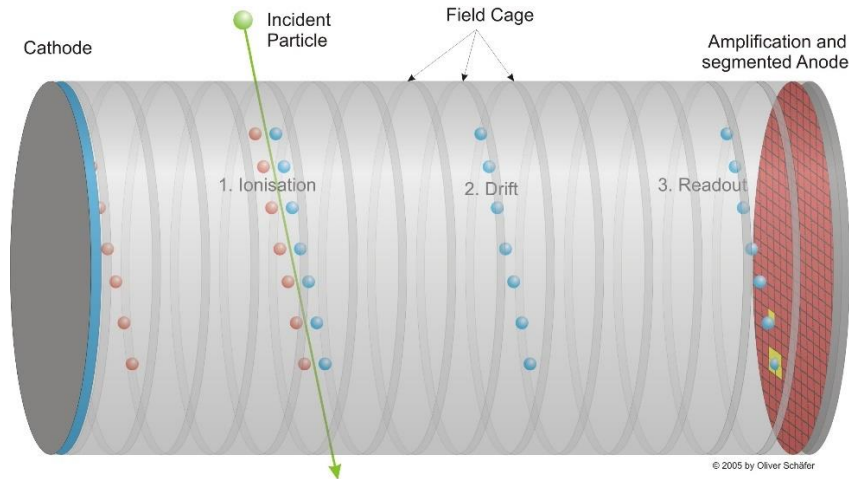
O TPC, de forma mais direta ao experimento, é um tipo de detector que pode medir a posição e a energia dos eventos de recuo nuclear e eletrônico, produzidos pela interação de



partículas de Matéria Escura ou neutrinos solares com um dado volume sensível, que pode ser um gás (ou mistura de gases) ou um líquido.

A Figura 3 exemplifica o funcionamento básico de um TPC com estrutura cilíndrica. Esta estrutura contém o volume sensível, e é delimitada nas extremidades por um ânodo e um cátodo que geram um campo elétrico adequado no interior do volume.

Figura 3: Princípio de funcionamento de um TPC.



Fonte [44].

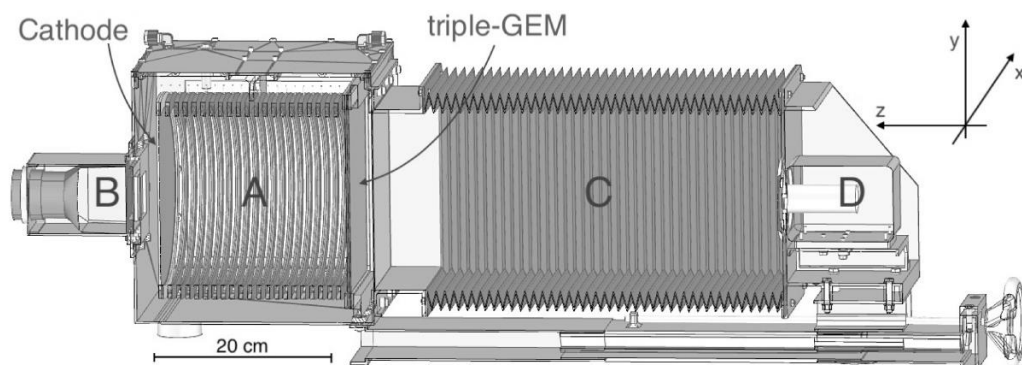
O cátodo é conectado a uma alta tensão negativa e o ânodo é interligado ao potencial de terra [45]. Uma partícula ionizante estrangeira ao TPC, ao passar pelo volume sensível, pode produzir recuos atômicos e eletrônicos liberando íons e elétrons, ou seja, pode gerar a ionização de alguns átomos (1. *Ionisation*, da Figura 3). Estes íons e elétrons são atraídos pelos eletrodos cátodo e ânodo, dada à alta tensão aplicada a seus terminais (da ordem de 100 kV [45]). Neste percurso, chamado de *deriva* (2. *Drift*), a partícula catiônica é atraída pelo cátodo (polo negativo do TPC), enquanto o elétron é atraído pelo ânodo. O ânodo deve ser um dispositivo específico que permita converter a detecção do fenômeno em um trajeto de duas dimensões (3. *Readout*), pois juntamente com a medição temporal da deriva consegue-se extrair a terceira coordenada [3]. No sentido longitudinal do cilindro são posicionados anéis espaçados entre si que vão desde um eletrodo ao outro. Essa estrutura é chamada de “*Field Cage*”, e serve para criar um campo elétrico uniforme dentro do detector, por isso sua tensão deve aumentar linearmente entre os polos do TPC, criando um gradiente de tensão. Esta gaiola contribui com a eficiência da detecção e a velocidade das trajetórias das partículas [42].

A luminescência também pode ser produzida no processo, já que as partículas que adentram o volume da câmara podem tanto ionizar quanto apenas excitar os átomos. Quando

ocorre esta excitação, os átomos excitados emitem fótons ao retornarem ao seu estado anterior de menor energia [3].

A Figura 4 [41] mostra o projeto do protótipo de uma das fases do experimento CYGNO, que servirá para ilustrar o assunto. Alguns componentes serão melhor explicados mais à frente. Em (A) tem-se o cilindro do TPC, que é o volume responsável por conter a mistura do gás alvo He:CF<sub>4</sub> (60:40) a ser utilizado no experimento. Suas extremidades são polarizadas à esquerda pelo cátodo – feito com uma malha fina metálica para garantir certa transparência [42] –, e à direita por um ânodo, feito com um detector MPGD (*Micro-Pattern Gaseous Detectors*) [3]. Este ânodo-detector é formado por um triple-GEM (*Gas Electron Multiplier* – ou Multiplicador de Elétrons em Gás). O GEM tem duas finalidades: *i*) atrair os elétrons resultantes da ionização por ser o ânodo do TPC; *ii*) multiplicar estes elétrons, e devido à presença do CF<sub>4</sub>, fótons serão produzidos. Estes fótons podem ser detectados pela câmera sCMOS (D) de altas velocidades e sensibilidade, e / ou pelo PMT (B) (*Photo-Multiplier Tube* - Tubo FotoMultiplicador).

Figura 4: Esquemático de um protótipo de TPC de uma das fases do projeto CYGNO.



Legenda: (A) representa o volume que contém o gás sensível, (B) é o PMT, (C) é um fole óptico e (D) é a câmera sCMOS. Fonte [41].

A orientação da trajetória da partícula no plano XY pode ser detectada pela câmera, e as coordenadas Z serão obtidas com o estudo dos sinais do PMT, que fornecerá informações da energia da radiação incidente (com a avaliação da quantidade de fótons detectados), assim como o comprimento do percurso ao longo da direção de deriva (a partir de informações da medição temporal) [41].

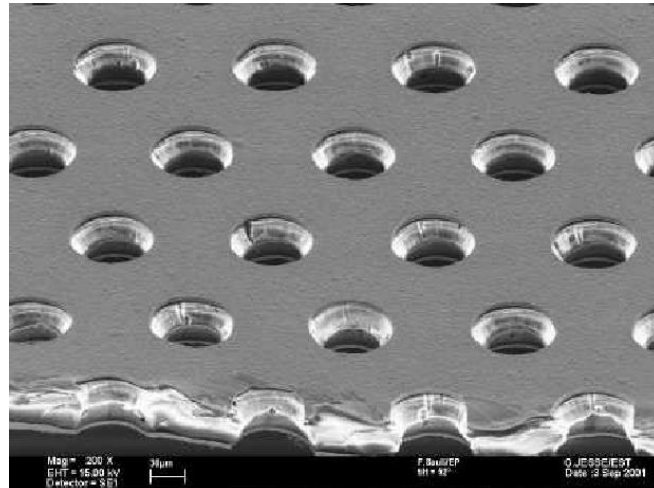
Com este experimento, espera-se que diversos tipos de eventos possam ser identificados, como os raios cósmicos e diferentes formas de radioatividade natural. Por outro lado, o limite experimental do detector, quando futuramente instalado no subterrâneo, será determinado pela capacidade de rejeitar o ruído de fundo proveniente da radioatividade natural [42].

### 3.2 GAS ELECTRON MULTIPLIER – GEM

O GEM é um detector / amplificador de elétrons em meio gasoso, apresentado em 1996 pelo CERN. Ele consiste em uma matriz de furos da ordem de micrômetros, que atravessam sua folha composta por duas camadas metálicas separadas por um isolante autoportante. Os furos são realizados por métodos fotolitográficos [46]. Um GEM-triplo foi apresentado no esquemático da Figura 4, por ser o MPGD utilizado no TPC do experimento CYGNO.

Um exemplo de GEM pode ser visualizado na Figura 5. A imagem contém uma folha de GEM composta por um isolante *kapton* de 50  $\mu\text{m}$  revestido por duas folhas de cobre de 5  $\mu\text{m}$  [47]. Neste exemplo de GEM, a distância entre os furos é de 140  $\mu\text{m}$ , e o diâmetro maior do furo é de 70  $\mu\text{m}$  [48].

Figura 5: Exemplo de uma folha de um GEM vista em um microscópio eletrônico.



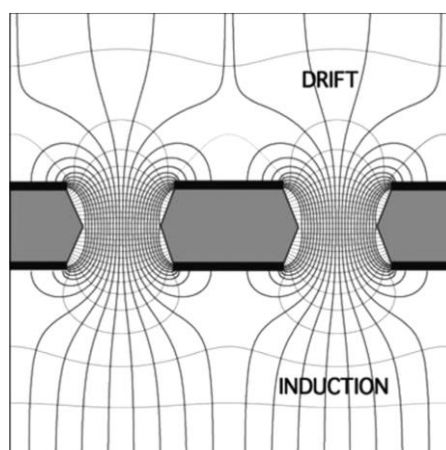
Fonte [48].

Ao aplicar uma tensão da ordem de 500 V entre os dois lados de uma folha de GEM, um campo elétrico de aproximadamente 100 kV/cm é produzido dentro dos canais [47]. Este campo elétrico está representado na Figura 6, assim como suas linhas equipotenciais. Dentro dos furos a intensidade do campo elétrico é muito elevado devido ao alto nível de potencial elétrico aplicado em uma distância muito pequena.

Em um TPC, o GEM fica instalado antes do eletrodo ânodo, portanto os elétrons são atraídos pelo potencial do eletrodo, se aproximando do GEM pela parte de cima na Figura 6, na região de *drift* (ou deriva). Alguns elétrons podem se chocar com a parede do GEM, enquanto outros são atraídos pelo campo elétrico mais forte presente nos furos. Os que seguem para os furos adquirem energia suficiente para gerar novas ionizações das moléculas do gás presentes dentro dos orifícios, causando uma avalanche de ionizações. Estas novas ionizações podem produzir elétrons, íons ou fótons, sendo estes últimos gerados pela de-excitação atômica ou

molecular. Uma grande parte destes elétrons resultantes das ionizações segue para a região de indução (*induction*, na figura), onde podem ser coletados por algum eletrodo ou serem injetados em outra folha de GEM, cascateando as multiplicações de elétrons [48].

Figura 6: Representação do campo elétrico e as linhas equipotenciais de uma secção de um GEM eletrificado.



Fonte [48].

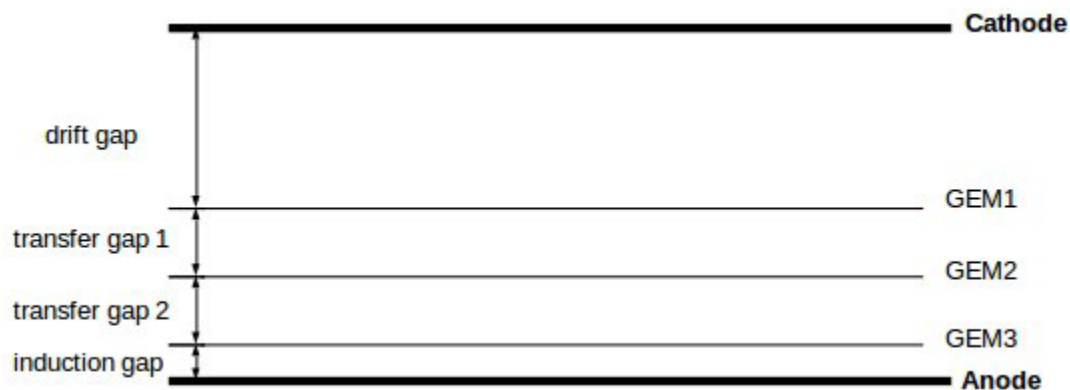
O ganho de um GEM está associado a vários fatores, como o diâmetro e formato dos furos (os furos podem possuir formas de duplo-cone, cilíndrico ou afunilado), espessura da folha, o valor da tensão elétrica aplicada, mistura de gases utilizados, entre outros. Mas para citar um número genérico para efeitos comparativos, o ganho de um GEM de uma folha é considerado tipicamente de  $10^3$ . Para aumentar este ganho, utiliza-se de cascateamento de folhas de GEM, como é o caso do GEM-triplo (*Triple-GEM*) adotado no experimento CYGNO. Este GEM-triplo pode alcançar seguramente um ganho de  $10^4$ , e há ensaios publicados em [48] que corroboram este valor. Nesse referido ensaio utilizou-se de misturas de gases no qual um deles é o  $\text{CF}_4$ , utilizado no experimento CYGNO.

O GEM-triplo possui três folhas (ou módulos) GEM concêntricas, espaçadas entre si por *gaps* da ordem de poucos milímetros. Tanto o GEM simples, quanto o triplo, ficam inseridos entre dois eletrodos: o cátodo, que fica mais afastado do GEM, permitindo que se tenha um volume do gás sensível; e o ânodo, que fica atraindo os elétrons ionizados para que estes passem pelos orifícios do GEM e sejam multiplicados.

Como pode ser observado na montagem da Figura 7, o *Drift gap* é a região entre o cátodo e a primeira folha do GEM, e é nesta região onde ocorrem as ionizações dos átomos e moléculas do gás. As regiões entre as folhas de GEM transferem as partículas entre si devido às diferenças de potencial elétrico especificamente aplicadas, e são chamadas de *Transfers Gap*. E por último, caso exista, há a região denominada *Induction Gap*, que está localizada entre a

última folha do GEM e o eletrodo ânodo [4, 49]. Por fim, quando as partículas atingem o ânodo, induzem-lhe uma corrente elétrica que pode ser amplificada e estudada.

Figura 7: Representação conceitual da montagem típica de um GEM-triplo.



Fonte [49].

No caso específico do experimento CYGNO, a última folha de GEM possui o ânodo no seu lado mais externo. Após esta terceira folha é colocado um material transparente para fechar o recipiente, que permita a instalação de sensores que irão monitorar os sinais ópticos produzidos no GEM [4].

### 3.3 CÂMERAS sCMOS

O experimento CYGNO prevê a utilização de câmeras de alta velocidade para gerar imagens da luz gerada no GEM. O modelo escolhido para o projeto é a câmera ORCA Fusion sCMOS de  $2304 \times 2304$  pixels (5.3 Megapixels), da Hamamatsu. Este modelo de câmera possui ruído de leitura de 0,7 elétrons por pixel, eficiência quântica de 80%, e pode alcançar 100 *frames/s* @ 4,5 Megapixels. As tecnologias de saídas da câmera são a USB 3.0 ou a CoaXPress, ambas digitais [50].

As câmeras sCMOS (*scientific CMOS – Complementary metal-oxide semiconductor*) são desenvolvimentos relativamente novos, voltados para fins científicos, projetadas para gerar imagens de baixíssima luminosidade. Segundo [51], os chips de imagem sCMOS possuem várias características superiores aos chips mais comuns, como CMOS e o CCD (*Charge-Coupled Device*, ou Dispositivo de Carga Acoplada). Pode-se citar: melhor sensibilidade, menor ruído, melhor integração eletrônica com outros componentes, circuitos de configuração mais simples, entre outros. Em comparação ao *chip* CMOS, o modelo científico possui menor corrente escura, menor ruído de leitura e maior fator de preenchimento do *pixel*.

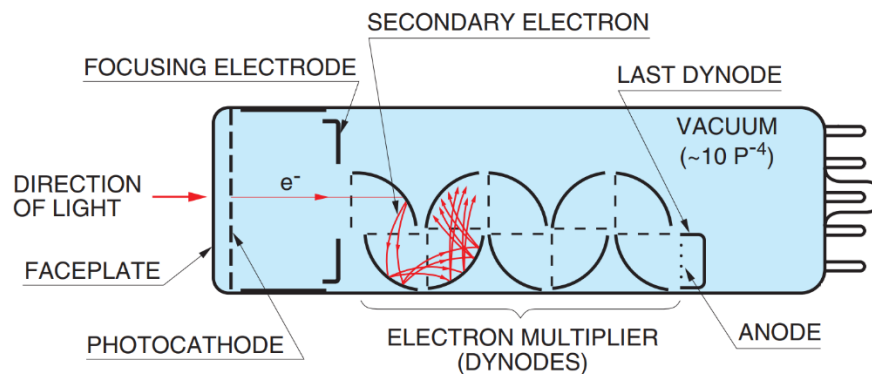
A posição da câmera no experimento visa detectar a luz cintilante produzida no gás  $\text{CF}_4$  juntamente com a avalanche produzida nos GEMs. Essa luz produzida no processo de cintilação

se encontra na região espectral da luz visível, mais precisamente a 600 nm, que é a região de ótima sensibilidade da câmera adotada [40].

### 3.4 PHOTOMULTIPLIER TUBES – PMT

Os tubos fotomultiplicadores (PMT) são detectores de luz, que mesmo em níveis de luminosidades muito pequenos como simples fótons individuais, convertem a luz em sinais elétricos. Um PMT é um tubo de vácuo composto basicamente por cinco elementos chave: uma janela de entrada, um fotocátodo, eletrodo de foco, um ânodo, e uma série de dínodos que são os multiplicadores de elétrons [52], como pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8: Esquemático funcional de tubo fotomultiplicador (PMT).



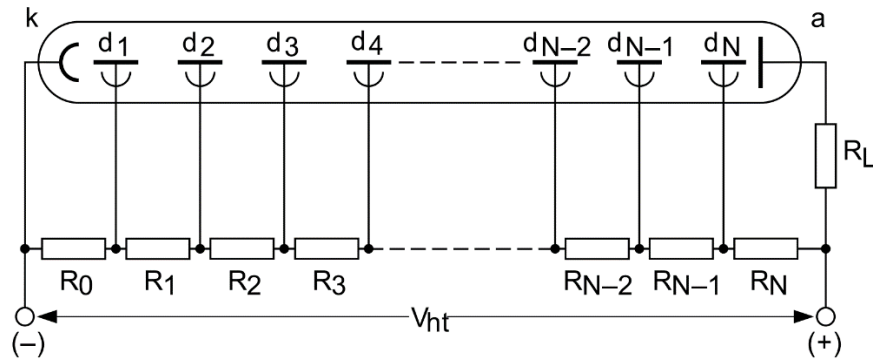
Fonte: Adaptado de [52].

Seu funcionamento é fundamentado no efeito fotoelétrico, fenômeno no qual um material emite elétrons quando uma luz que incide sobre ele possui energia suficiente para superar a energia de ligação dos elétrons de seus átomos [53].

Quando fótons passam pela janela de entrada, eles se chocam com os átomos do fotocátodo, podendo ejetar fotoelétrons do eletrodo e lançando-os no vácuo do tubo. Estes fotoelétrons são direcionados e acelerados pelo eletrodo de foco, os quais se chocam com o primeiro dínodo, criando outros fotoelétrons que são direcionados para se chocarem com o próximo dínodo e assim sucessivamente, alcançando uma multiplicação de  $10^6$  a  $10^7$  vezes no último dínodo. Estes elétrons são então coletados pelo ânodo [52, 54].

Os direcionamentos e acelerações dos elétrons são feitos por campos elétricos derivados de altas voltagens em cada terminal do PMT. Os valores de voltagens entre ânodo e cátodo variam entre 500 e 2000 volts, e para a polarização dos dínodos, faz-se uso de circuitos divisores de tensão, que produzirão uma diferença de potencial entre os pares de dínodos. Esta distribuição pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9: Alimentação de um PMT.



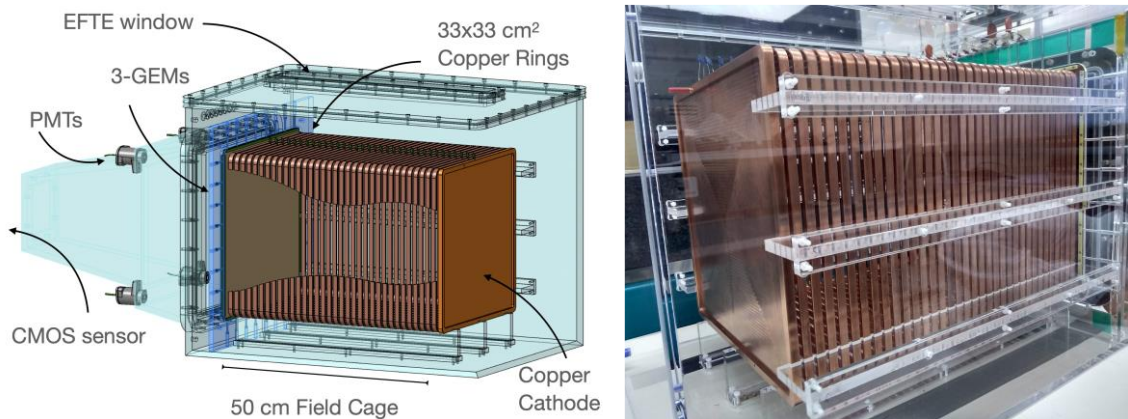
Legenda:  $V_{ht}$  representa a alta tensão aplicada entre ânodo (a) e cátodo (k). Desta alta tensão derivam-se as demais polarizações necessárias nos dínodos (prefixo d), fazendo-se o uso de divisores de tensão com resistores (prefixo R). Fonte: [54].

### 3.5 PROTÓTIPO DO EXPERIMENTO CYGNO

Após algumas etapas de pesquisas, desenvolvimentos e testes, o experimento CYGNO alcançou a etapa nomeada de LIME (*Long Imaging Module*), considerada ainda como Fase 0 (zero) do projeto. O protótipo desta etapa tem o volume de 50 litros, mas já considera a câmara de deriva do TPC com o comprimento de 50 cm, que é a mesma dimensão que se pretende utilizar na futura Fase 2, considerada a fase final. Além desta similaridade, o projeto LIME considera a utilização do mesmo conjunto de detectores já apresentados: GEM-triplo + PMT + sCMOS. Como o GEM-triplo possui dimensões de  $33 \times 33 \text{ cm}^2$ , serão instalados quatro PMTs simetricamente distribuídos, e uma câmara sCMOS concêntrica ao GEM [3].

À esquerda da Figura 10 tem-se o esquemático do projeto LIME, indicando as posições das PMTs e da câmara sCMOS focando o GEM-triplo, a *field cage* e o cátodo em cobre, e a janela em polímero EFTE (*Ethylene tetrafluoroethylene*). A imagem à direita contém o protótipo em fase avançada de montagem.

Figura 10: À esquerda, esquemático da etapa LIME [43], e à direita a sua construção.



Fonte: [55].

O intuito futuro do projeto, ao passar para a chamada Fase 1, é construir um protótipo para testes subterrâneos com volume de  $1 \text{ m}^3$ , mas somente após mais validações e testes com o protótipo LIME. O projeto do detector da Fase 1 é mais complexo, pois possuirá um volume maior, mas será dividido ao meio por um cátodo comum às duas câmaras de deriva, que direcionarão os elétrons em sentidos opostos nas duas câmaras do TPC. Com isto, em cada extremidade do TPC ter-se-á um complexo de GEMs com seus sensores de fótons. Portanto, cada lado possuirá uma matriz de  $3 \times 3$  GEMs-triplos de  $33 \times 33 \text{ cm}^2$ , com seus 4 PMTs e suas câmaras individuais, de forma idêntica ao protótipo LIME [3].

### 3.6 DISPOSITIVO FOTOMULTIPLICADOR DE SILÍCIO – SiPM

O SiPM (*Silicon Photomultiplier* – Fotomultiplicador de Silício) é um detector que pode substituir o PMT em alguns casos diante das suas características diferenciadas. Inicialmente, quando o CBPF se tornou um dos colaboradores do experimento CYGNO, o detector de estado sólido estava sendo considerado como uma alternativa ao PMT, apesar dos equipamentos desenvolvidos posteriormente terem utilizado o detector tubular (PMT).

Porém, há uma incerteza quanto ao tipo de detector que será definitivamente utilizado no projeto. Nota-se em documentações relativamente recentes (2022), que o uso do SiPM pode não ter sido totalmente descartado, como previsto ainda no texto: “[...] o experimento CYGNO visa complementar as informações da imagem sCMOS com o sinal de um sensor de luz rápido (PMT ou SiPM) que pode fornecer o perfil da trilha ao longo da direção da deriva.” [3, 2022, p.5, tradução própria].

O detector utilizado neste trabalho foi o SiPM. Para realização dos testes e do desenvolvimento foi utilizada uma caixa escura pequena, com um SiPM e um LED ultravioleta selados contra a entrada e a saída de luz. Isto facilitou muito o desenvolvimento já que estes componentes, além das pequenas dimensões físicas, exigem circuitos eletrônicos simples para suas devidas polarizações.

O que foi desenvolvido neste trabalho não é descartado com o uso de um PMT. Basta, a princípio, realizar algumas modificações na programação do FPGA relacionadas à detecção de borda do sinal do detector.

Portanto, foi necessária uma pesquisa mais intensiva sobre este detector para entender suas características de funcionamento, alimentação e sinal de saída. Nesta seção será apresentada uma abordagem teórica mais aprofundada, que foi necessária para amparar os ensaios com este dispositivo.

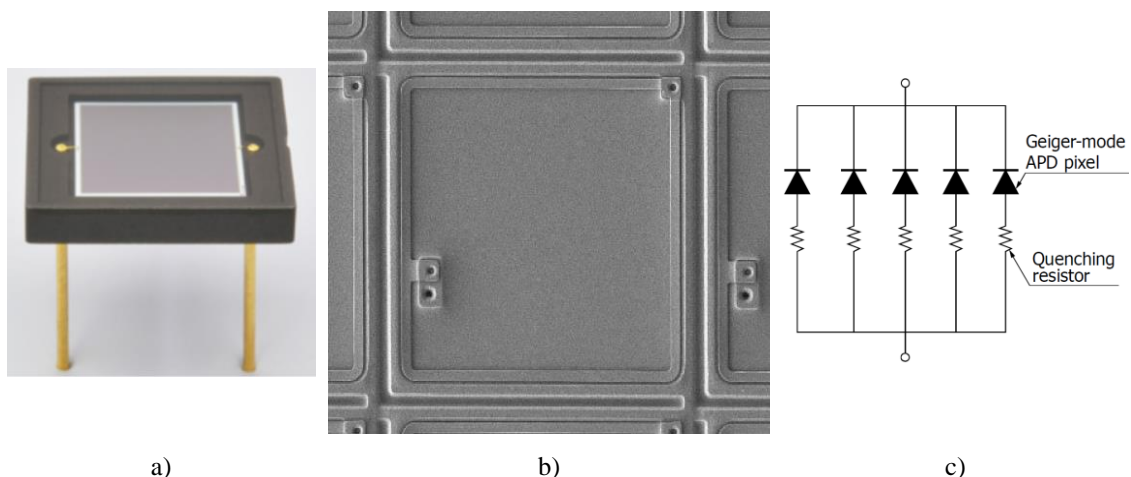


### 3.6.1 Introdução ao SiPM

O SiPM (*Silicon Photomultiplier* – Fotomultiplicador de Silício) foi o tipo de sensor / detector proposto pelo experimento CYGNO em uma de suas fases iniciais. O modelo utilizado é da fabricante Hamamatsu, e possui o código S13360-6050CS (área fotossensível: 6.0 x 6.0 mm, passo de pixel: 50  $\mu\text{m}$ ). A nomenclatura MPPC (*Multi-Pixel Photon Counter* – Contador de Fótons *Multi-Pixel*) é muito utilizada por este fabricante em seus manuais e documentações, remetendo à possibilidade de contagem de fótons. O SiPM é um dispositivo eletrônico semiconductor de silício, que possui uma matriz de *pixels* (em formato de células) ligados em paralelo [56], capazes de serem sensibilizados a partir da energia de um único fóton de uma determinada banda energética.

Na Figura 11 pode-se observar em (a) a apresentação física do sensor S13360-6050CS, cuja janela é fabricada em uma resina siliconada com índice de refração 1.41, possuindo 14400 células (ou *pixels*), e contando com 74% de preenchimento. Este preenchimento relaciona a área efetivamente sensível de cada célula em relação à área total do sensor. Isto é perceptível em (b), onde é possível notar a área sensível ao centro, circundada pelo resistor de extinção (*quenching resistor*, [57]) e por um dos condutores de polarização, além de uma depressão no material entre as células. Em (c) tem-se uma representação do circuito elétrico equivalente do sensor, mostrando as células individuais contendo o seu elemento sensível – o fotodiodo de avalanche – e o resistor de extinção, todas ligadas em paralelo.

Figura 11: Representações do sensor SiPM utilizado.



Legenda: a) Apresentação física. b) Visualização micrométrica das células (pixels). c) Simbologia conceitual. Fonte: Hamamatsu [56].

O semicondutor da célula é normalmente representado como um diodo ou fotodiodo, já que o detector possui estrutura semelhante a esses; sua construção também se baseia na união entre partes com dopagens tipo P e N, mas com intensidades de dopagens diferentes.

### 3.6.2 História da detecção de fótons

Segundo [58], foi com a invenção do tubo fotoelétrico, sete anos após Einstein formular seu trabalho sobre o Efeito Fotoelétrico em 1905, que foi possível detectar sinais de luz com intensidade muito baixa. Mais 20 anos foram necessários para iniciar-se comercialmente a produção dos primeiros tubos fotomultiplicadores (PMTs).

Ainda de acordo com [58], os PMTs possuem duas grandes desvantagens: alta sensibilidade a campos magnéticos e o alto preço devido à complexidade da sua fabricação. Estes fatores motivaram a busca por novas possibilidades.

Com os avanços nas tecnologias de estado sólido, por volta da década de 1960, os APDs (*Avalanche PhotoDiodes*, ou Fotodiodos de Avalanche) surgiram como uma opção. Apesar de serem necessários cerca de 20 fótons para se detectar um pulso luminoso, os APDs possuem ganho interno de detecção capaz de superar o ruído gerado naturalmente durante o repouso.

No início deste século foi desenvolvido o GM-APD (fotodiodo avalanche que trabalha no modo Geiger), que é a célula básica de um SiPM. Este tem a capacidade do PMT em detectar um único fóton, e apresenta imunidade à influência de campos magnéticos, além de um aumento na relação sinal-ruído quando comparado a um APD tradicional.

### 3.6.3 Funcionamento do sensor

O mecanismo de geração de corrente em um APD é o mesmo de um fotodiodo convencional, diferenciando apenas ao fato de que um APD possui a capacidade de multiplicar os portadores de carga (elétrons ou lacunas) gerados pela incidência dos fótons [59].

Segundo [60], se o fóton que atinge a região sensível de uma célula do SiPM possuir energia maior que o *gap* de energia do fotodiodo, ele pode excitar um elétron até o nível da banda de condução, criando assim um par móvel elétron-lacuna, os chamados *portadores de carga*. De acordo com [59], o campo elétrico interno do componente é o resultado da aplicação de uma diferença de potencial elétrico (ddp) externa, com polarização reversa ao semicondutor. Os valores típicos desta tensão reversa estão na casa de dezenas de volts, muito superiores ao campo elétrico autogerado durante a união metalúrgica das pastilhas N e P. Este campo elétrico

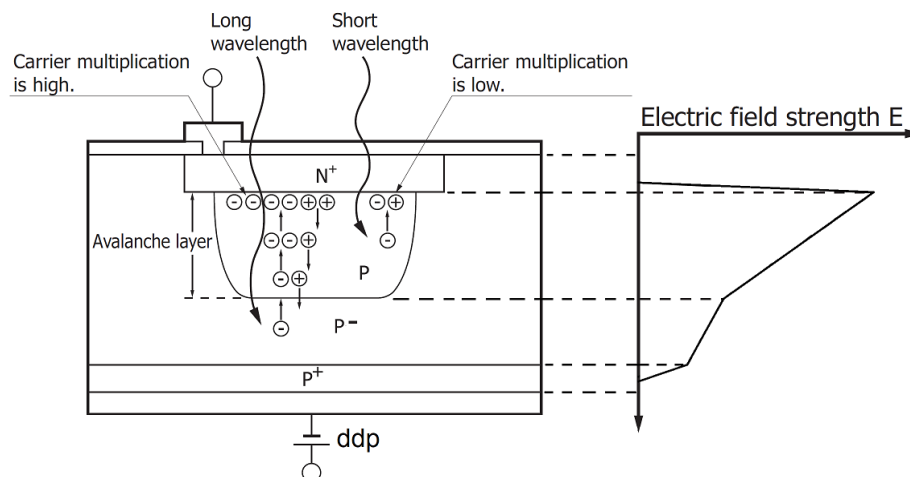
separa o par elétron-lacuna em dois portadores de carga individuais e os direciona aos respectivos polos por atração elétrica [60].

No trajeto destes portadores, atraídos pelos terminais do componente, há uma grande probabilidade de que eles colidam com a rede cristalina do metal, podendo gerar novos pares de portadores. Quanto maior o campo elétrico, maior a energia cinética do elétron. Se esta energia não for suficiente, o fotoelétron irá se chocar com a estrutura cristalina e não irá gerar novos pares. Neste caso, com um aumento desta energia através de uma elevação da  $ddp$  externa, ou com um fóton mais energético, este portador poderá transferir mais energia na colisão, gerando novos pares e a consequente avalanche por ionização [59].

No silício, a taxa de ionização gerada pelos elétrons é maior que a de lacunas [58]. Portanto, a contribuição para o aumento da avalanche é maior com elétrons. A estrutura do APD visa aproveitar esta característica.

Na Figura 12 é mostrado um desenho esquemático que simboliza um corte transversal de uma célula genérica de um SiPM; as proporções, polarizações e dopagens podem variar entre modelos e fabricantes. A célula em questão representa um SiPM com as camadas de dopagens tipo N-on-P. Sua polarização externa define o campo elétrico interno gerado, visível à direita da estrutura. Mostra-se também o funcionamento básico da detecção considerando fótons com comprimentos de onda diferentes.

Figura 12: Estrutura de uma célula de um SiPM.



Fonte: Adaptado de Handbook Hamamatsu [59].

A profundidade de penetração do fóton e a consequente geração do par elétron-lacuna podem variar de acordo com o comprimento de onda do fóton incidente. Ondas curtas alcançam profundidades rasas, gerando portadores mais próximos à superfície, ao contrário das ondas mais longas que alcançam regiões mais profundas da célula. A multiplicação de portadores é

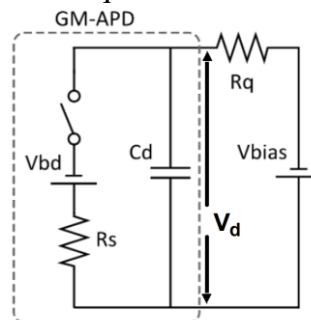
mais eficaz quando o fotoelétron é gerado na região  $P^-$ , fora da camada de avalanche, pois este portador, acelerado pela  $ddp$  externa, conseguirá uma efetividade maior se a região de avalanche à sua frente for mais profunda, gerando mais pares de portadores descendentes [59].

Ainda na Figura 12 pode-se observar que a estrutura da célula deste APD é do formato *N-on-P*, ou seja, a janela para entrada do fóton está sobre o semiconductor de dopagem N. Este tipo de estrutura é mais adequado para espectros de luz nas regiões de infravermelho ao vermelho [56 p.16], pois são ondas mais longas. Contrária a esta, a estrutura *P-on-N* possui a janela de incidência sobre o material P, sendo mais adequada às ondas mais curtas, portanto, a região do azul ao ultravioleta.

### 3.6.4 Princípio de operação

O princípio de operação de uma célula do SiPM pode ser demonstrado através do circuito equivalente de um GM-APD, retratado na Figura 13, onde a área delineada pelo retângulo tracejado representa o APD em modo Geiger.

Figura 13: Circuito equivalente de uma célula SiPM.



Fonte: [60].

$C_d$  representa a capacitância de junção em modo reverso, e possui tipicamente valores próximos a 0,1 pF.  $R_s$  é a resistência equivalente do circuito RC responsável pelo tempo característico necessário para a criação do sinal, possuindo tipicamente valores próximos de 1 k $\Omega$ .  $R_q$  (tipicamente 150 k $\Omega$ ) é o resistor de extinção [60].  $V_{bias}$  é a tensão de polarização reversa do SiPM, deve possuir valores da ordem de dezenas de Volts.  $V_{bd}$  é a tensão de ruptura do diodo (*Breakdown Voltage*).  $V_d$  simboliza o valor de tensão resultante no GM-APD. A chave interna indica o estado do APD: aberta significa APD “pronto”, e o instante de seu fechamento representa o início da avalanche.

Primeiramente, considerando a chave aberta, o capacitor  $C_d$  está totalmente carregado com o valor de  $V_{bias}$ , e não há circulação de corrente. A tensão  $V_d$  cria um campo elétrico na

região de depleção na junção dos materiais N e P, que precisa alcançar valores suficientes para iniciar uma avalanche autossustentável [60].

Uma vez que é gerado o par de portadores, seja por um fóton ou por efeitos térmicos, a chave simbólica se fecha iniciando a descarga do capacitor  $C_d$  pelo resistor  $R_s$ , cujo baixo valor proporciona um pico de corrente (avalanche), descarregando o capacitor e conseqüentemente reduzindo o valor de  $V_d$  em direção ao valor da tensão de ruptura  $V_{bd}$ , resultando também na diminuição do processo de avalanche.

Com o suporte da alimentação constante pela fonte externa, se o valor do resistor de extinção  $R_q$  for pequeno, ou nulo, a corrente irá continuar fluindo por todo o circuito do diodo; mas, se ao contrário, o valor de  $R_q$  for alto, a corrente será limitada pelo resistor, e o capacitor  $C_d$  não conseguirá manter o nível de tensão  $V_d$  em valores suficientemente acima de  $V_{bd}$ , então o processo de avalanche se interrompe e a chave se abre novamente [56].

Após a reabertura da chave, o processo de Recuperação (*Recovery*) se inicia com a recarga do capacitor  $C_d$  através do resistor de extinção  $R_q$ , alcançando novamente o valor acima de  $V_{bd}$ , preparando o GM-APD para uma nova detecção. Durante o processo de recarga, ou durante o próprio processo de avalanche, o GM-APD está praticamente impossibilitado de detectar novos eventos fotoelétricos, o valor do pulso gerado nestes casos terá uma amplitude muito pequena, pois depende da quantidade de carga armazenada em  $C_d$  para uma segunda descarga [56].

No instante de detecção de um fóton, cada célula do MPPC (SiPM) gera um pulso padrão (em amplitude) na sua saída. Quando há detecções instantâneas em mais de uma célula, suas saídas são superpostas, e a amplitude resultante do sinal de saída é a soma das saídas simultâneas, significando uma relação entre esta amplitude total e a amplitude padrão [61]. Se um ou mais fótons incidirem sobre uma célula instantaneamente, o pulso de saída não se altera [60], sendo representado pelo mesmo pulso padrão.

De acordo com [60], a Figura 14 mostra as formas de onda produzidas por um SiPM com baixa incidência de luz. Para isto foi utilizado o osciloscópio Teledyne LeCroy SDA760ZI-A – com largura de banda de 6 GHz e 40 GS/s de taxa de amostragem – ajustado para operar no modo de persistência. De baixo para cima, as formas de onda correspondem à saída do sensor para um número crescente de células “disparadas” instantaneamente, desde um único fotoelétron (1 p.e.). A linha amarela indica a emissão de luz para o sensor.

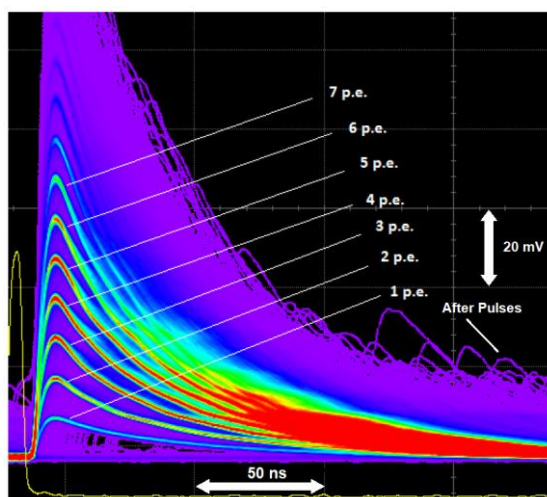
A Figura 14 também contém outros sinais que são característicos de um SiPM:

- *After pulses*: são pulsos atrasados e normalmente indistinguíveis quanto à forma de onda dos pulsos gerados por fótons [61]. São gerados por defeitos na rede cristalina que retêm

a carga durante a avalanche, e a liberam enquanto a célula se restaura, causando nova avalanche [60].

- *Crosstalk*: são pulsos gerados por células vizinhas quando estas detectam fótons secundários, que por sua vez foram gerados durante a avalanche da célula que efetivamente recebeu o fóton externo [61]. A avalanche resultante deste efeito pode ser rápida o suficiente para adicionar o sinal de 1 p.e. ao sinal real [60].
- *Dark counts*: a avalanche pode ser iniciada por um fóton incidente ou pela geração de portadores livres. Estes últimos produzem as contagens escuras (*dark counts*) [58], ou seja, geração de pulsos equivalentes a 1 p.e. sem a incidência de fótons. São gerados por agitação térmica, e o pulso produzido não pode ser diferenciado do pulso real [61].

Figura 14: Pulsos resultantes de um SiPM em resposta aos fótons detectados.



Legenda: Pulsos com um amplificador de ganho 20x para um SiPM Hamamatsu S13360-4929 produzindo sinal com 1, 2, 3,...7 células disparadas simultaneamente. Fonte: Adaptado de [60] e [61].

### 3.6.5 Eficiência de detecção

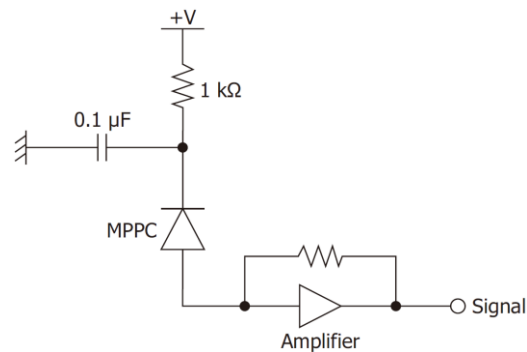
A Eficiência de Detecção de Fótons (PDE - *Photon Detection Efficiency*), no caso de um SiPM, é representada pela equação:  $PDE = QE \times CE$  [56]. QE é a Eficiência Quântica do sensor, uma taxa que relaciona a quantidade de pares elétron-lacuna gerados e o número de fótons incidentes, normalmente expressa em porcentagem [59]. CE é um fator que relaciona a probabilidade de avalanche e o fator de preenchimento do *pixel* (que é a proporção entre a área fotossensível e a área total do *pixel*). No caso de um APD totalmente depletado, pode-se assumir o valor de CE como igual a 1 [56]. Desta forma, o SiPM utilizado neste trabalho possui os valores de PDE e de QE iguais a 40 %, conforme informações da sua ficha técnica [62].

### 3.6.6 Circuito eletrônico típico para a leitura do sensor

Para detecções de pulsos de luz, a Hamamatsu [61] recomenda a utilização de um resistor de  $1\text{ k}\Omega$  e um capacitor de  $0,1\ \mu\text{F}$  na fonte de alimentação como um filtro passa-baixa, com o intuito de eliminar ruído de alta frequência proveniente da fonte de alimentação, como mostra a Figura 15. O resistor ainda protege o sensor contra excesso de corrente em casos de exposição a muita luz.

A saída do sensor pode, tipicamente, estar ligada a apenas um resistor *pull-down* ou ainda passar por algum amplificador. Se a aplicação requer a detecção de sinais *Single PhotoElectron* (SPE), os pulsos gerados serão da ordem de nanossegundos e, portanto, recomenda-se a utilização de amplificadores, conversores A/D e osciloscópios com alta banda passante, com amostragem da ordem de 1 GSPS (Giga Sample Per Second) [61].

Figura 15: Circuito típico com amplificação para leitura do sensor SiPM (MPPC).



Fonte: [61].

Foram testados ambos os circuitos neste trabalho, mas com limitações. Para isto se fez uso de uma caixa escura que contém um LED e um SiPM. Todos os roteiros e desenvolvimentos serão abordados em outros capítulos.

## 4 DESENVOLVIMENTO

O CBPF contribui com o experimento CYGNO no desenvolvimento de um módulo de aquisição analógica, ou ‘DAQ’, para converter os sinais dos fotomultiplicadores do projeto. Um dos focos deste trabalho de mestrado foi o de selecionar os componentes chaves para atender às especificações de operação do experimento (ver em 4.2.1); e o outro ponto foi o de desenvolver um *software* básico para o DAQ (que pode ser denominado como seu *firmware*), que permitisse o controle de seu circuito eletrônico, utilizando um computador por canal Ethernet. Neste capítulo serão tratados os assuntos referentes a este trabalho, como:

- A seleção dos componentes principais do DAQ;
- Os equipamentos e as ferramentas utilizadas;
- As etapas do desenvolvimento do módulo;
- As ferramentas computacionais utilizadas e desenvolvidas;
- O sistema operacional embarcado adotado;
- O sistema desenvolvido para interação entre o módulo e um usuário via computador.

### 4.1 EQUIPAMENTOS PARA OS TESTES

O objetivo central deste trabalho será desenvolvido na próxima seção. No entanto, faz-se necessário apresentar previamente um resumo dos equipamentos utilizados durante os ensaios. Os equipamentos predominantes, para as demais análises, estão descritos a seguir:

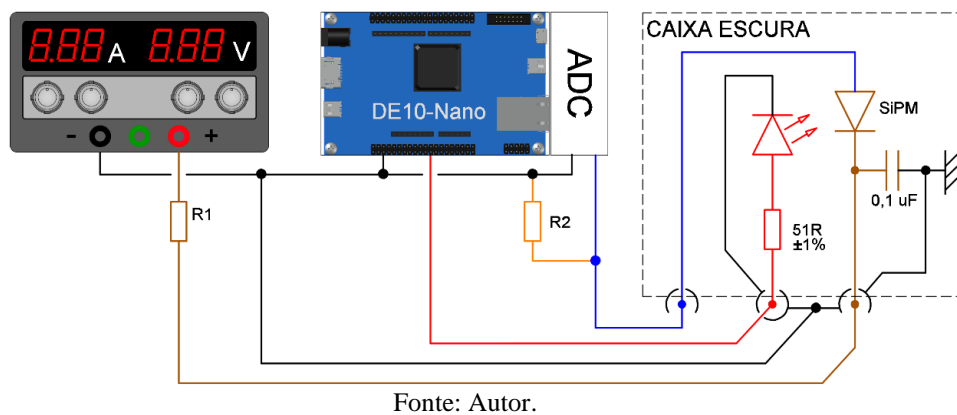
- Caixa escura;
- Fonte DC ajustável até 32 V e 3 A da Instrutherm, modelo FA-3003;
- Gerador de Funções digital da Minipa, modelo MFG-4201A 2MHz;
- Kit de desenvolvimento da Terasic, modelo DE10-Nano;
- Computador com *Windows* 10 e um roteador sem fio com acesso à internet;
- Osciloscópio digital da Minipa, modelo MVB DSO 50 MHz, 8 bits de resolução;
- Multímetro digital Fluke 106.

Entre estes equipamentos, o que precisa ser melhor apresentado é a caixa escura. O intuito desta caixa é o de isolar uma fonte de luz conhecida e um sensor SiPM. A Figura 16 apresenta o esquemático da caixa e suas ligações externas. O sensor SiPM é alimentado com



polarização reversa por uma fonte de tensão DC de 53,15V (dado do fabricante). Sua corrente precisa ser limitada por um resistor (R1), que juntamente com um capacitor de desacoplamento de 0,1  $\mu\text{F}$  formam um filtro passa-baixa, eliminando os ruídos de alta-frequência da fonte de alimentação [61]. Ao lado do sensor, encontra-se o LED com seu resistor de 51  $\Omega$  ( $\pm 1\%$ ). O resistor R2 é o resistor de carga utilizado para dar forma à saída do sensor, sua tensão pode ser monitorada por osciloscópios, ou no caso deste trabalho, pela placa DE10-Nano com seu ADC (abordados mais à frente).

Figura 16: Da esquerda para a direita: a fonte DC, o gerador de pulsos para o LED, o ADC e a representação da Caixa Escura.



A caixa escura utilizada pode ser visualizada na Figura 17. O sensor SiPM foi soldado a uma placa de circuito impresso e preso à parede da caixa. O LED – que é a fonte de luz da caixa – está sustentado pelos fios que o alimentam; tanto ele quanto seu resistor se encontram dentro do invólucro. Todas as conexões elétricas que perfuram a caixa possuem conectores flangeados ou foram vedados com fita isolante líquida para evitar a entrada de luz. Durante os testes a caixa foi envolvida em papel alumínio para eliminar a possibilidade de entrada de luz.

Figura 17: Visão geral da caixa escura utilizada nas experimentações.



Legenda: À esquerda, visão geral da Caixa escura. À direita, o detalhe do LED posicionado bem próximo ao SiPM. Fonte: Autor.

A imagem à direita na Figura 17 detalha a proximidade do LED em relação ao sensor. O sensor SiPM possui melhor eficiência de detecção para fótons com comprimentos de onda de 460 nm, e o LED<sup>4</sup> de 5 mm utilizado trabalha na faixa UVA a 385 nm. A eficiência quântica máxima do sensor é de 40 %, mas para a frequência dos fótons emitidos pelo LED esta eficiência cai para cerca de 33 %, conforme a folha de dados do componente: [62]. Este LED foi utilizado por já estar em estoque no laboratório, e por possuir um valor de frequência UVA próxima à frequência de melhor eficiência do fotomultiplicador.

## 4.2 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DAQ

Na gama de desenvolvimentos necessários no experimento CYGNO, o CBPF atuou para auxiliar no desenvolvimento de uma placa eletrônica modular, responsável pela aquisição analógica de sinais provenientes dos sensores fotomultiplicadores utilizados nas câmaras de TPC do experimento.

### 4.2.1 Solicitações da colaboração

No âmbito do desenvolvimento proposto neste trabalho, procurou-se contribuir na elaboração de um módulo de aquisição de sinais analógicos (DAQ - *Data Acquisition*). As informações que foram acordadas para engendrar o módulo são:

- Oito canais analógicos de 500 MSPS (*Mega Samples Per Second* – Milhões de Amostras Por Segundo) com resolução de 12 bits. Esse valor de taxa de amostragem é baseado em um estudo feito pela colaboração com sinais de protótipos do detector;
- O sensor a ser utilizado para detecção de fótons pode ser um fotomultiplicador de estado sólido (SiPM) ou um tubo fotomultiplicador (PMT);
- Uso de FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) combinado com Processador (tecnologia SoC) visando cálculos DSP (*Digital Signal Processing*);
- Taxa de eventos de detecção prevista: 1 Hz;
- Interface de comunicação Ethernet.

A partir dessas informações buscou-se determinar os componentes eletrônicos mais relevantes que atendam as especificações solicitadas. Entre eles estão o ADC e o SoC, que integrarão o módulo DAQ, e um detector SiPM para testes em bancada. Nas seguintes seções

---

<sup>4</sup> Código do fabricante: VAOL-5EUV8T4

deste capítulo serão abordadas as escolhas destes componentes, e por fim, na visão geral do DAQ proposto, será mostrada sua semelhança com um kit eletrônico de desenvolvimento encontrado no mercado, e as justificativas para aproveitar esta sintonia.

#### 4.2.2 Conversor analógico-digital

O sinal proveniente do SiPM precisa ser convertido a valores digitais por um ADC e acessados pelo FPGA. Diante das especificações do ADC solicitadas para o projeto, iniciou-se as buscas filtrando as opções através de análises quanto à interface de saída dos dados, quantidade de canais por *chip*, valores financeiros por canal, disponibilidade no mercado – inclusive se são recomendados para novos projetos segundo o fabricante. Baseado nas especificações técnicas dos fabricantes, a melhor opção encontrada foi o AD9684, um produto da *Analog Devices* [63] que possui dois canais com a taxa de amostragem solicitada, mas com resolução superior, alcançando 14 bits.

As características mais relevantes deste ADC ao projeto são as seguintes: dois canais diferenciais, arquitetura *pipeline* [64, 65] (mais recomendada por combinar a taxa de amostragem e essa resolução solicitadas), porta serial SPI para configurações, *threshold* programável (nessa função, o ADC aciona uma saída digital para informar que um valor de limiar de tensão pré-programado foi atingido), e por fim, a saída de dados paralela padrão LVDS com suporte a DDR; com esta última função, o resultado da conversão de cada canal é disponibilizado alternadamente a cada inversão do sinal de *clock*, facilitando o sincronismo com o FPGA.

Quanto à interface de saída de dados do ADC, foi buscada inicialmente uma tecnologia mais recente, a interface JESD204B. Esta interligação é serial, reduzindo de forma relevante a quantidade de pinos do FPGA, além das trilhas entre os dois componentes. Para conduzir os dados de 500 MSPS, esta interface utilizaria *transceivers* com taxa de transferência de 10,0 Gbps. Isto levaria à escolha de um FPGA de alta tecnologia e custo expressivo, já que seriam necessários oito canais desta velocidade para atender à solicitação do projeto. Buscando uma nova alternativa de interface, encontrou-se o barramento paralelo LVDS, que apesar de se tratar de uma tecnologia mais antiga e que exige um FPGA com mais pinos, permitiu o uso de um FPGA de mais baixo custo do fabricante Intel, a família Cyclone V. Na descrição da escolha do SoC há mais informações.

### 4.2.3 Processamento dos dados

As principais considerações para a escolha do FPGA foram:

- a) Atender à compatibilidade dos quatro *chips* ADCs de dois canais, operando simultaneamente;
- b) Combinar em um único *chip* (SoC<sup>5</sup>) as funcionalidades de um FPGA e um HPS (*Hard Processor System*);
- c) Comunicação Ethernet;
- d) Pinagens I/O reservas.

A familiaridade com itens da Altera / Intel foi o primeiro parâmetro que direcionou a escolha do FPGA. Na sequência, observou-se a interação entre o ADC e o FPGA, já que este interfaceamento exige uma alta taxa de transferência e *transceivers* específicos. Inicialmente, considerando-se a utilização do protocolo JESD204B no ADC de 14 bits citado anteriormente, a palavra de dados gerada possui 20 bits por amostragem (6 bits a mais são necessários para o protocolo) [66]. Este quantitativo de bits a 500 MSPS totaliza os 10 Gbps por canal analógico supracitados, este é um dado fundamental para se definir a tecnologia a ser utilizada.

Uma das especificações solicitadas para o projeto do DAQ é a de se possuir um processador incorporado com características de DSP. Para isto buscou-se a tecnologia SoC, que une processador e FPGA em um único chip. Apenas algumas linhas da Altera possuem processador incorporado e *transceivers* com velocidades mínimas de 10 Gbps. Entre as linhas mais acessíveis no ano de 2020 encontrava-se o modelo ARRIA 10 SX 160, que possui 12 *transceivers* de 17,4 Gbps e um processador ARM.

No entanto, há uma linha da Altera de menor custo: o *Cyclone V*, que também possui uma linha com processador incorporado, mas esbarra na quantidade e na velocidade limitada de *transceivers* JESD204. Esta limitação levou à migração da interface de comunicação com o ADC para o barramento paralelo LVDS, conforme comentado na escolha do ADC. Porém, aqui há uma observação: a única limitação encontrada quanto ao uso do *Cyclone V* pode ainda estar associada aos receptores LVDS. As informações do *datasheet* do *Cyclone V* [67 p. 48] não fornecem dados referentes à taxa de transmissão (*clock*) típica ou máxima das entradas LVDS ao se utilizar a função DDR (*Double Data Rate*), indicando que esta taxa está sujeita a simulações e testes de bancada. Os dados fornecidos no referido *datasheet* informam apenas as

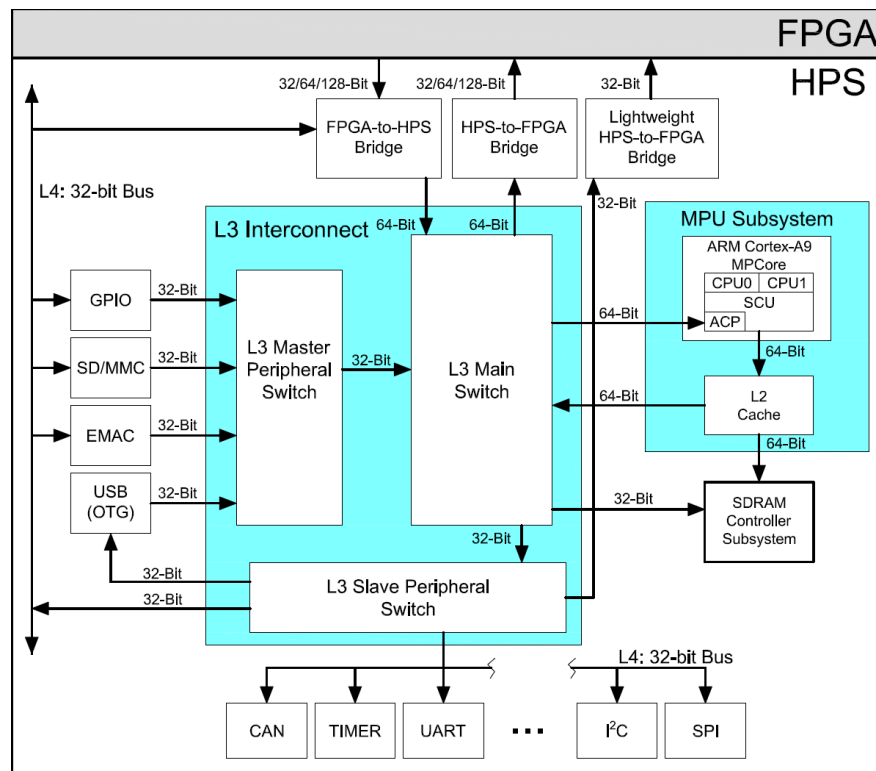
---

<sup>5</sup> Alguns artigos consideram a sigla como FPSoC – Field programmable systems-on-chip [70].

taxas para aplicações que utilizam dados seriais, pois utilizam a função de ‘*de-serialização*’ interna do FPGA, e estas alcançam a taxa máxima de 875 Mbps em modo não-DDR. Não se obteve sucesso nos ensaios realizados para este fim, portanto, recomenda-se uma melhor avaliação futura na escolha oficial do SoC para o DAQ durante a sua real concepção, ou a migração para a família Arria, do mesmo fabricante, que possui performance superior à *Cyclone V* utilizada neste trabalho.

O modelo de SoC escolhido possui um processador ARM<sup>6</sup> que trabalha a uma frequência máxima de 925 MHz. Entre outras funcionalidades, como USB e cartão de memória, ele possui a comunicação Ethernet de 1000 Mbps solicitada no projeto. O código do SoC adotado é o 5CSEMA6F31C6N, que além das funcionalidades descritas acima, possui 110k elementos lógicos e 896 pinos, entre outros recursos [68].

Figura 18: Diagrama de blocos simplificado do dispositivo *Cyclone V* demonstrando os barramentos de interconexão.



Legenda: As setas indicam a relação entre os blocos partindo do *Host* para o *Agent*. O diagrama é simplificado, os blocos presentes são os mais importantes para o projeto. Fonte: Adaptada de [69] p.8-2.

A Figura 18 destaca os barramentos do HPS utilizado e sua conexão com o FPGA. O HPS possui uma unidade de processamento com dois processadores ARM Cortex-A9 de 32

<sup>6</sup> ARM é uma família de processadores com arquiteturas RISC desenvolvida pela empresa britânica ARM Holdings.

bits, duas memórias cache de 32 kB L1 para cada processador (uma para instruções e outra para dados), e uma memória cache compartilhada de 512 kB L2. O *Snoop Control Unit* (SCU) garante a coerência de conteúdo entre as memórias caches L1, L2 e a SDRAM. A porta ACP (*Accelerator Coherency Port*) permite o acesso de nível 3 (L3) para que este execute requerimentos de coerência para as memórias cache [70].

A Interconexão do Sistema, ou *System Interconnect*, implementa uma arquitetura que suporta múltiplas transações simultâneas entre *Hosts* e *Agents* (mestres e escravos, respectivamente) com alta taxa de transferência, compreendendo os periféricos e a unidade de processamento [69]. Esta estrutura é composta pela L3 *Interconnect* e pelo barramento de nível 4 L4.

O barramento L4 é o responsável pelo acesso aos periféricos do HPS, como SPI, I<sup>2</sup>C, UART, EMAC (Ethernet), entre outros. Há ainda uma interface que não está presente na Figura 18, a *FPGA-to-SDRAM*, que permite ao FPGA acessar diretamente a memória SDRAM sem a coerência de memória [70].

Como retratado na Figura 18, os acessos entre HPS e FPGA ocorrem via L3 *Main Switch* e L3 *Slave Peripheral Switch*. Existem três interfaces para este fim, duas de alta velocidade e uma de menor performance; são chamadas de ‘pontes’ e são mapeadas em memória [69]:

- *FPGA-to-HPS bridge* (F2H): barramento de alta performance com largura de dados configurável entre 32, 64 ou 128 bits, possibilitando ao FPGA comandar transações aos *Agents* no HPS e acessar a interface de coerência de memória;
- *HPS-to-FPGA bridge* (H2F): idêntica à ponte *FPGA-to-HPS*, mas com o comando no sentido inverso, permitindo ao HPS comandar agentes no FPGA;
- *Lightweight HPS-to-FPGA bridge* (LWB): interface fixa de 32 bits, que também permite ao HPS comandar agentes no FPGA. Possui menor performance perante as outras duas, sendo útil para acessar registros de controle e *status* de periféricos lógicos.

Como comparativo, segundo [70], a interface *HPS-to-FPGA* consegue alcançar uma taxa de transferência próxima de 1100 MB/s, mas com a largura de 128 bits de dados e o FPGA sendo executado com um *clock* de 150MHz. Este valor foi alcançado em determinadas configurações e em aplicação específica tipo *baremetal*. Nas mesmas condições, a *Lightweight bridge* (que possui a largura de dados fixa em 32 bits) chega a 18% deste valor.

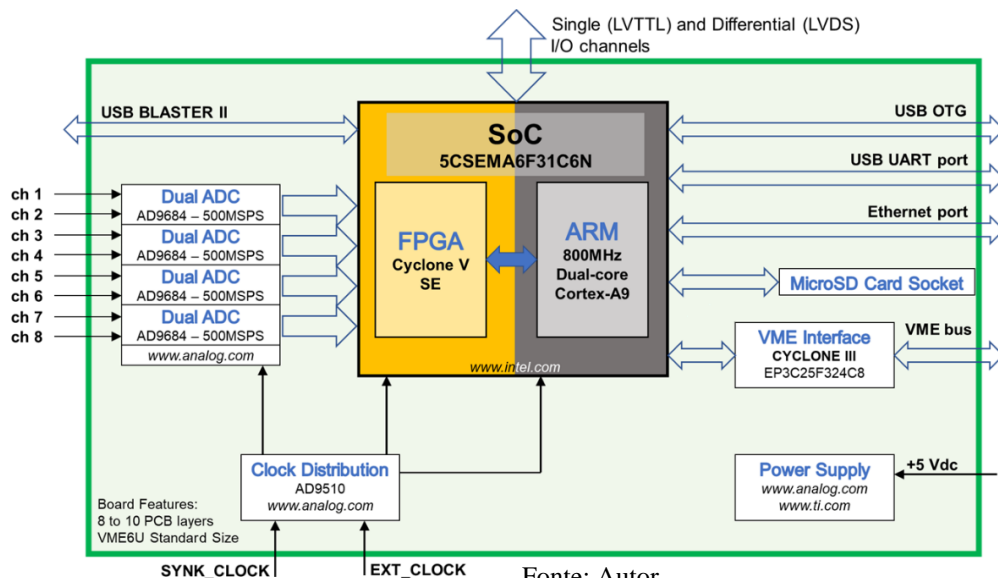
#### 4.2.4 Visão geral do módulo DAQ

Para atender à solicitação da Colaboração, é necessário projetar um módulo eletrônico DAQ (*Data Acquisition*) personalizado, capaz de receber e processar os sinais provenientes de oito SiPMs, e que possa se integrar a uma estrutura maior com outros módulos. Basicamente, o módulo precisa conter um circuito eletrônico para o escalonamento (adequação do *range* do ADC) e digitalização do sinal de entrada, memorizar uma faixa temporal destes dados realizando uma análise prévia, e disponibilizar o acesso a estes por uma transmissão serial – que foi definida como a Ethernet.

A primeira amostra do esquemático eletrônico do módulo desenvolvido neste trabalho possuía um microcontrolador PIC da Microchip com capacidade de gerir uma conexão Ethernet 10 / 100 Mbps. Ele teria uma interface digital paralela com o FPGA para transferência dos dados coletados dos ADCs. Por se tratar de um SoC, percebeu-se, no decorrer dos estudos, que o processador poderia ser mais bem aproveitado visto sua hegemonia em relação ao microcontrolador. Com isto, o microcontrolador foi retirado e o comando da interface Ethernet foi direcionado ao processador, que dentre outras superioridades, gere uma conexão Ethernet de 1000 Mbps e executa um sistema operacional Linux.

Com o ADC e o SoC especificados e com suas tarefas definidas, encontrou-se um kit de desenvolvimento fornecido pela *Terasic* com um SoC muito semelhante, com isto, o projeto da placa eletrônica do kit agregou muitas funcionalidades ao módulo. Como o processador ARM deste SoC do kit possui alguns controladores de periféricos – como o USB, cartão de memória e outros – estes foram incorporados ao projeto do módulo com o intuito de oferecer facilidades de programação / depuração e permitir possibilidades futuras.

Figura 19: Visão geral do módulo DAQ proposto ao experimento CYGNO.

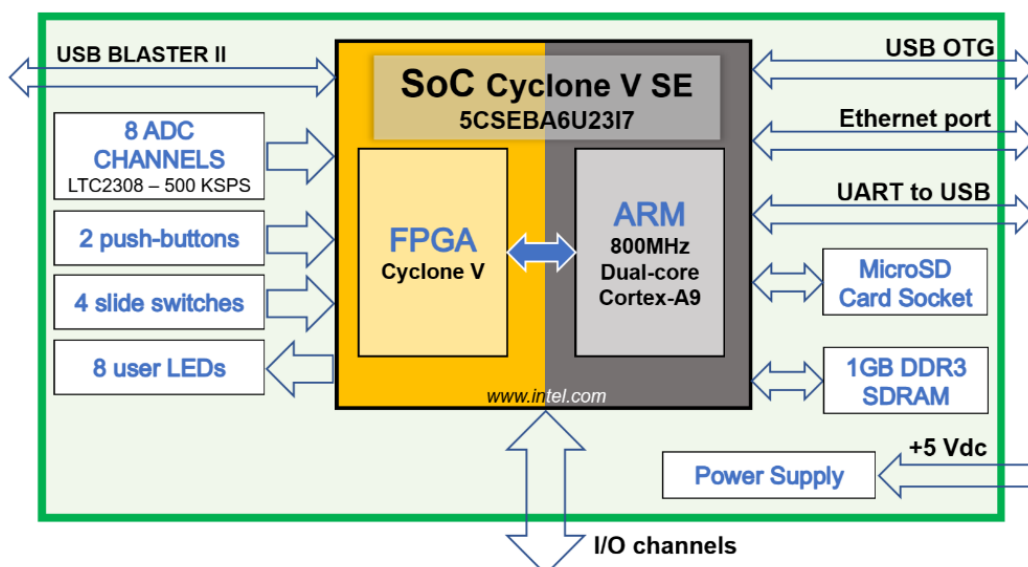


O módulo DAQ proposto está representado de forma resumida na Figura 19. Este diagrama mostra as conexões seriais USB e Ethernet, um soquete para o cartão de memória Micro SD e uma interface VME ligados ao processador do SoC. A conexão USB OTG (*On-The-Go*) pode ser utilizada para conexões de periféricos, como um *mouse* e um teclado; a porta USB UART é útil em propósitos de programação e depuração do processador; e a porta Ethernet de 1 Gbps possui a finalidade de conectar o módulo a um computador Cliente. A conexão VME visa a adaptação do módulo a *racks* VME, típicos em aplicações como as deste projeto, mas não havia certezas quanto à sua efetiva implementação. Os pinos que não forem utilizados do SoC serão disponibilizados em conectores, mirando expansões futuras ou possibilidades de sincronismos entre módulos e *triggers* externos, por exemplo.

#### 4.2.5 Kit de desenvolvimento Terasic DE10-Nano

Como já citado na seção anterior, há uma placa eletrônica de um kit de desenvolvimento da *Terasic*, que por possuir um SoC similar ao proposto ao DAQ, possibilitou uma exploração mais ampla na gama de recursos possíveis com o *chip*, agregando tecnologias ao DAQ e facilitando seu desenvolvimento; seu nome é DE10-Nano Kit. Na Figura 20 pode ser visualizado um diagrama em blocos simplificado de sua placa eletrônica, com destaque às principais funções que serão utilizadas no DAQ.

Figura 20: Diagrama simplificado das funções presentes na placa eletrônica do kit de desenvolvimento DE10-Nano, da *Terasic*.



Fonte: Adaptado de [71].



Há vários motivos para utilizar este kit de desenvolvimento como um guia para o projeto do DAQ, e estão explanados a seguir:

- O SoC presente no kit é da mesma família *Cyclone V* do projeto. No que se refere à quantidade de recursos, eles se diferem apenas na quantidade de pinos de I/O do FPGA;
- A placa eletrônica do kit possui os periféricos de comunicação serial, 1 GB DDR3 SDRAM, leitor de cartão de memória, botões e LEDs, todos associados ao HPS;
- Quanto ao FPGA, tem-se as interfaces de programação e depuração, chaves de configuração de *boot*, botões e LEDs, e também está presente um ADC.

Este último ponto reserva um destaque entre as semelhanças do kit com o projeto, pois ambos serão manipulados diretamente pelo FPGA. Com todas estas semelhanças, consegue-se uma grande redução nos desenvolvimentos do *hardware* e do *software (firmware)* do DAQ. O *hardware* exigirá ainda um trabalho referente à instalação dos ADCs, seus *clocks* e fontes DC/DC; e quanto ao *software*, grosso modo, serão necessários adequar os oito ADCs ao protocolo LVDS, analisar o armazenamento do montante de dados coletados, e realizar a transferência destes para o domínio mais reservado do HPS.

Outra grande vantagem no uso do kit DE10-Nano foi a realização de testes e estudos necessários aos desenvolvimentos deste trabalho e ao futuro DAQ. Entre os desbravamentos quanto ao uso desta tecnologia, pode-se destacar:

- Transferir os dados entre FPGA e HPS;
- Instalar um sistema operacional embarcado compatível;
- Avaliar as comunicações seriais externas e o acesso ao cartão de memória;
- Estudar o armazenamento e a logística dos dados coletados dos ADCs, fazer um tratamento prévio destes dados e disponibilizá-los em uma interface Ethernet;
- Realizar testes com a Caixa Escura, agente experimental deste trabalho.

Com isto, tendo-se uma plataforma testada e viabilizada, aprovando não somente os seus variados componentes eletrônicos em plena interação, mas também as potencialidades dos programas desenvolvidos – como por exemplo, o acesso aos dados via aplicativo *web* –, o *hardware* disponível no kit pode ser utilizado com tranquilidade para o desenvolvimento do DAQ.

Todos os testes, desenvolvimentos e resultados que serão apresentados neste trabalho foram realizados utilizando o kit DE10-Nano.

#### 4.2.6 Mudanças de escopo

A proposta inicial deste trabalho seria a de apresentar um esquemático do protótipo do DAQ. Após a realização das pesquisas para definir os modelos do SoC e do ADC, chegou-se a desenhar o esquemático de algumas partes dos periféricos do SoC, como o microcontrolador e suas conexões: Ethernet, USB, SPI, I2C, a ligação da porta paralela ao FPGA e o ICSP (*In-Circuit Serial Programming*); e na sequência iniciou-se as definições de pinagem de ligação do FPGA aos ADCs e ao microcontrolador.

Quando foi retirado o microcontrolador do projeto e suas funções foram repassadas para o processador do SoC, encontrou-se o kit eletrônico DE10-Nano. Houve então uma mudança de direcionamento quanto ao esquemático, já que a placa de desenvolvimento possui um *hardware* testado e seguro, que dentre outras vantagens, executa um sistema operacional Linux. Com a aquisição deste kit, rumou-se aos estudos de como utilizar esta tecnologia já em mãos para desenvolver o DAQ mais seguramente. Assim sendo, buscou-se como objetivos neste trabalho:

- Conhecer o funcionamento básico do SoC – mais especificamente a troca de dados entre HPS e FPGA;
- Estudar a viabilidade no uso de um sistema operacional embarcado, incluindo versatilidade e desempenho;
- Buscar uma linguagem de programação de alto nível para o HPS;
- Estudar a disponibilização dos dados resultantes para a comunicação Ethernet;
- Criar uma interface visual para o uso do DAQ;
- Avaliar o modo de armazenamento dos dados dos ADCs;
- Realizar testes em uma caixa escura que simule o funcionamento de um SiPM.

### 4.3 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Nesta seção serão abordados os *softwares* utilizados, desde o sistema operacional embarcado com suas subdivisões, bem como os *softwares* de computador utilizados para o

desenvolvimento do *firmware* do DAQ. O sistema operacional do computador utilizado foi o *Windows 10*.

#### 4.3.1 Sistema operacional do HPS

Criar programas exclusivos – como programas de nível mais baixo – para uma aplicação como esta, é mais desvantajoso quando deseja-se utilizar os diversos recursos presentes na placa, como a conexão Ethernet por exemplo, que possui grandes protocolos e *firmwares* específicos. Para isto certamente se gastariam muitas horas de desenvolvimento.

Contudo, o processador ARM incorporado ao SoC é capaz de executar um sistema operacional (SO) Linux. Entre as vantagens do uso de um sistema operacional pode-se destacar: as gerências das conexões seriais, do cartão de memória e da memória RAM; a possibilidade de depuração online, a existência de *softwares* prontos que podem ser instalados e executados; as bibliotecas e tutoriais já existentes. A única dificuldade encontrada em seu uso é a de lidar com as características não-determinísticas – como consumo de memória, as interrupções e o gerenciamento de tempo – já que não se pode estabelecer categoricamente seu tempo de execução, mas isso não justifica a necessidade de um sistema operacional de tempo real.

A complexidade em se gerar um sistema operacional embarcado para um produto específico pode ser um empecilho, mas neste caso, a Intel (fabricante do FPGA) e a ARM *Holdings* (fornecedora da arquitetura do processador) são colaboradoras de plataformas e distribuições Linux como a *Armstrong Distribution* e o projeto *Yocto*<sup>7</sup> [72].

Com o projeto *Yocto* é possível criar distribuições Linux customizadas para sistemas embarcados. Para a placa DE10-Nano já existe uma distribuição gratuita desenvolvida nessa plataforma com o nome de *rsYocto*<sup>8</sup>. Essa distribuição Linux é direcionada para os SoCs da Intel *Cyclone V* e *Arria 10* [73]. Ela implementa um *kernel* Linux com uma variedade de componentes que simplificam o processo de interação entre o FPGA e o HPS. O roteiro mais detalhado para a instalação do sistema operacional encontra-se em [74]. O SO é gravado no cartão de memória *microSD* e é acessível para depuração via *Visual Studio Code Insiders* (VSCI) utilizando o canal Ethernet do kit [75]. Ainda segundo [75], somente o VSCI permite o acesso remoto via SSH (*Secure Shell*) para dispositivos com ARMv7-A (arquitetura do ARM Cortex-A9) rodando Linux. A versão utilizada do *rsYocto* durante os testes desta dissertação

---

<sup>7</sup> O *Yocto Project* é um projeto de colaboração de código aberto que ajuda os desenvolvedores a criarem sistemas personalizados baseados em Linux, independente da arquitetura de *hardware*. Acessível em: <https://www.yoctoproject.org>

<sup>8</sup> *rsYocto*: as iniciais ‘rs’ representam o nome do profissional desenvolvedor desta distribuição Linux para *Cyclone V*, seu nome é *Robin Sebastian*. Disponível em [73].

foi a 1.041 [73]. Um detalhamento destas ferramentas, instalações e outros recursos podem ser mais bem estudados na Nota Técnica em [76], produzida pelos mesmos autores deste trabalho.

Um dos pontos de destaque no rsYocto para esta dissertação é a acessibilidade via Ethernet. O Servidor *Apache* está incluso na distribuição, assim é possível utilizar-se de uma interface de usuário mais amigável através de computadores ou *smartphones*. Um exemplo de uso desta funcionalidade de servidor está em um dos vários programas de exemplos também inclusos, que permite a manipulação do ADC do kit utilizando um Navegador *web* remoto. Essa aplicação aborda uma parte do escopo do projeto do DAQ, pois a partir de comandos remotos via TCP/IP, pode-se por exemplo, iniciar a leitura dos ADCs, configurar o FPGA, iniciar a transferência dos dados coletados, manipular estes dados, utilizar as I/Os do FPGA ou do HPS; enfim, com isto consegue-se o acesso a todos os periféricos da placa eletrônica, ao FPGA e ao HPS, entre outras possibilidades.

Para este tipo de aplicação, o rsYocto já possui pré-instalado o *framework* Django, que possibilita o emprego de linguagem de alto nível *Python* na programação do HPS quando se utiliza uma aplicação *web*. Ele fornece toda a estrutura visando facilitar o desenvolvimento *web*, incluindo desde o *front-end* (acesso ao usuário) até o *back-end* (controle do banco de dados). Essa é a interface que foi utilizada nesta dissertação.

#### 4.3.2 Descrição de hardware do FPGA

A programação do FPGA utiliza o conjunto de *softwares* de desenvolvimentos da própria Intel, a versão utilizada foi a 18.1 do *software Quartus Prime Lite*, doravante chamado de *Quartus Prime*. Para que a distribuição Linux rsYocto possa acessar o FPGA, recomenda-se a utilização do código do FPGA fornecido pelo mesmo desenvolvedor da distribuição Linux; para isso, o *download* da versão rsYocto-1.041 do projeto *Quartus Prime* pode ser feito pelo endereço encontrado em [77]. Esse código permite o acesso básico ao ADC do kit com limitações de performance. Para melhorias neste ponto é necessário alterar os arquivos Verilog e utilizar a ferramenta *Platform Designer* do *Quartus Prime*, que entre outras funções, é responsável por facilitar a interconexão entre HPS e FPGA. Esta ferramenta possuía o nome de Qsys em versões anteriores. Uma visão mais detalhada de como utilizar este recurso do *Quartus Prime* está disponível em [76].

### 4.3.3 Alterações nos programas originais do rsYocto

Aproveitando todo o arcabouço já disponibilizado pelo conjunto rsYocto, ainda houve a necessidade de modificações pontuais no *firmware* de ambos os dispositivos – HPS e FPGA. O ponto capital foi o de explorar esta interação HPS / FPGA, avaliando o funcionamento das pontes citadas na seção 0. Neste trabalho foi utilizada somente a ponte *Lightweight HPS-to-FPGA bridge* (LWB), que apesar possuir a menor taxa de transferência, esta ponte atende aos requisitos do DAQ, como será demonstrado posteriormente neste texto. A ponte *HPS-to-FPGA bridge* (H2F), que possui maior largura de dados, foi utilizada em um pequeno exemplo e está presente em [76]. Seu funcionamento é similar à ponte LWB.

Resumidamente, um dos objetivos deste trabalho foi o de realizar testes em uma caixa escura com um LED e um SiPM. Um dos pinos digitais do FPGA controla o LED localizado fisicamente logo à frente do SiPM (Figura 17). Este sensor está devidamente polarizado e com sua saída ligada ao ADC. Ambos, o LED e o ADC, estão ligados ao FPGA do SoC (Figura 20), portanto, todo o controle e resultados da caixa escura são gerenciados no FPGA, que precisa disponibilizar os dados resultantes ao HPS. Este, por sua vez, após algum comando pré-determinado, solicita e lê os dados do FPGA utilizando a ponte LWB. Utilizando uma interface *web* via Navegador, é possível visualizar seus resultados graficamente incluindo análises e cálculos, todos executados no HPS. E adicionalmente, ainda na mesma interface de navegação, é possível iniciar uma rotina de disparos do LED de forma coordenada, também utilizando a ponte LWB.

Consequentemente, foram necessárias modificações e criações de programas (ou de descrições de *hardware*), tanto para o FPGA quanto para o HPS.

#### 4.3.3.1 Alterações nos programas executados pelo HPS

O HPS executa o sistema operacional Linux embarcado instalado no cartão de memória. Não foram necessárias modificações nesta estrutura diretamente, uma vez que a interface *web* que foi utilizada é totalmente controlada pelo *framework* Django. Foram feitas modificações na programação apenas dentro dos domínios do Django, e se referem ao controle de envio e solicitações de dados ao FPGA, interface de usuário (*front-end*), e controle e manipulação do banco de dados (*back-end*).

Vale ressaltar que, mais uma vez, o rsYocto já possuía programas prontos que executavam rotinas de leitura e controle do ADC, e esta estrutura foi aproveitada e expandida. Explorando a arquitetura que o Django cria na estrutura de arquivos do HPS, é possível por

exemplo: implementar ou alterar páginas de navegação *web*, criar arquivos *Python* executáveis, e executar rotinas específicas de acordo com os comandos recebidos do Navegador. A partir disto, criou-se programas para as rotinas de testes, gerou-se os cálculos e as avaliações dos dados resultantes para apreciação via interface *web*, além de possibilitar o acesso aos resultados via Ethernet para uma rede local.

Esta aplicação será abordada na seção 4.4, ela foi nomeada como Sistema Sigma, e foi desenvolvida exclusivamente para este trabalho.

#### 4.3.3.2 Alterações nos programas executados pelo FPGA

Quanto ao FPGA, as alterações mais significativas estão relacionadas às programações de acesso ao ADC. Elas são justificadas devido ao tratamento da demanda de dados das conversões do ADC, e para que se possa realizar algumas avaliações e cálculos do sinal resultante.

Primeiramente, em se tratando da quantidade de dados resultantes do ADC, deve-se balizar que o ADC do kit possui oito canais analógicos com resolução de 12 bits e taxa de amostragem de 500 kSPS; seus dados resultantes e configurações são transferidos via apenas uma interface serial SPI (*Serial Peripheral Interface*) usando o FPGA. Ainda é preciso destacar que os oito canais não funcionam ao mesmo tempo, são multiplexados; portanto, somente um canal é selecionado por vez, a seleção do próximo canal a realizar a conversão é feita via SPI, ao mesmo tempo em que se lê os dados resultantes da última conversão.

Com isto, pensando em armazenamento, mesmo com oito canais de 500 kSPS, o máximo de dados que este ADC pode gerar é de 500.000 palavras de 12 bits em um segundo. Para armazenar previamente vários transitórios de dados deste ADC – somente até o HPS fazer sua coleta – foi utilizada a memória interna do FPGA. Foi reservada a quantidade de 65535 palavras de 32 bits, totalizando 2.097.120 bits (aprox. 2097 kb). Para justificar estes números, a quantidade de palavras que foi adotada representa a quantidade máxima permitida por um aplicativo do *Quartus Prime* que é responsável em facilitar a implementação de memórias nas aplicações. Quanto à largura da palavra fixada em 32 bits, esta foi estipulada inicialmente pensando em se adicionar um contador junto com o valor da conversão do ADC, com o intuito de representar o momento de aquisição do respectivo dado durante os testes. Isto não foi efetivamente utilizado, mas como a quantidade de palavras está no máximo, estes 32 bits são capazes de armazenar duas conversões do ADC, dobrando a quantidade de armazenamento de valores convertidos; este raciocínio pode ser implementado no futuro. Com estas ponderações,

ainda foi possível reservar uma parcela de memória para depuração de códigos ou outros fins, pois ambos FPGAs (o do kit e o previsto para o DAQ), possuem 5570 kb de memória M10K disponível para utilização.

A aplicabilidade destas condições quanto ao uso de memória do FPGA precisa ser reavaliada quando se estudam as condições do projeto do DAQ. Para ele serão direcionados os dados de oito canais ADCs de 14 bits com uma taxa de amostragem 1000 vezes maior. Considerando que o DAQ irá registrar as conversões individuais dos oito ADCs simultaneamente (mesmo com a DDR), pode-se pensar em um processo que registre estes dados em palavras de 112 bits. Utilizando o mesmo aplicativo que foi citado para implementações de memórias do *Quartus Prime*, é possível utilizar o máximo de 32768 palavras com largura de 128 bits – que é o valor mais próximo de 112 bits; isto representa a utilização de 74% de todo o recurso disponível de memória M10K.

A quantidade de palavras adotada representa o limite máximo de amostragens que podem ser armazenadas antes de sua coleta pelo HPS, do contrário, os dados armazenados nos primeiros endereços serão sobrescritos. No caso do ADC selecionado para o DAQ, que possui uma taxa de amostragem de 500 MSPS (amostragens a cada 2 nanossegundos), este quantitativo de palavras representa um lapso de 65,536  $\mu$ s de armazenamento de um evento contínuo. Como pode ser visualizado na Figura 14 (seção 3.6.4) sobre o SiPM, o pulso resultante de um fóton detectado pelo sensor dura cerca de 200 ns, ou 100 amostragens do ADC. Se considerarmos eventos com uma janela desta largura, a memória dimensionada possuirá capacidade para armazenar 327 eventos; mas caso se deseje aumentar esta janela para 500 ns com o intuito de se visualizar amostras antes e após o sinal do SiPM, o número de eventos cai para 131.

Considerando que a taxa de eventos adotada é de 1 Hz (valor definido pelo grupo gestor do experimento CYGNO), e que o HPS possui uma taxa de transferência de dados maior do que esta (esta informação será discutida na seção 5.1), estima-se que esta estruturação de memória RAM interna é suficiente para o projeto. Caso estes valores não sejam satisfatórios durante os testes do módulo DAQ, sugestiona-se a utilização de DMA (*Direct Memory Access*) ou empregar o acesso à memória RAM da placa eletrônica através das pontes específicas para isto.

Um outro ponto importante nas alterações dos programas do FPGA originais do rsYocto é justificado pela necessidade de se aprimorar o intercâmbio com o ADC presente na DE10-Nano. Para alcançar a taxa máxima deste ADC, que é de 500 kSPS, é necessário que se utilize apenas um dos oito canais para que a taxa total não seja dividida entre os demais canais habilitados. E para alcançar plenamente esta taxa, além de outras funcionalidades descritas

abaixo, foram feitas modificações em toda a estrutura de programas relacionadas ao ADC, culminando em um programa dedicado. Entre as alterações mais importantes, pode-se destacar as adequações:

- O programa de controle do ADC possui acesso direto a uma memória sintetizada no FPGA durante a aquisição de algum evento<sup>9</sup>, ou seja, o evento é memorizado concomitantemente a partir do recebimento de cada conversão do ADC. Para organizar os diversos eventos registrados, foi reservada uma região da mesma memória com informações sobre a localização e tamanho de cada evento;
- Criação de uma memória FIFO para se manter um pequeno histórico de conversões anteriores a algum evento, com isto é possível visualizar algumas conversões do ADC antes do início do evento;
- Adequações à comunicação entre HPS e FPGA no que se refere aos dados resultantes do ADC;
- Amostrador em tempo equivalente (ATE, ou ‘*Equivalent-Time Sampling*’ [78]) dos sinais provindos do ADC. Com esta ferramenta foi possível simular um ADC de 25 MSPS, em determinadas condições, no próprio kit.

#### 4.4 O SISTEMA SIGMA

Perante a eletrônica segura, confiável e consolidada do kit DE10-Nano, faltava o desenvolvimento de um programa dedicado a este trabalho, com exclusividade para interagir com a caixa escura em mãos. Além disso, explorar a integração da placa eletrônica do kit com a caixa escura está em total acordo com o desenvolvimento do DAQ para o experimento CYGNO, pois pretende-se utilizar uma estrutura semelhante à do kit. Portanto, foi desenvolvido um programa que envolveu todos os *softwares* e estruturas prontos já mencionados, como o rsYocto, o *framework* Django, as descrições de *hardware* do FPGA, e outros. Esse programa foi nomeado de Sistema Sigma, e pode representar a gênese do *firmware* do futuro módulo DAQ.

O desenvolvimento desse sistema até o presente momento foi limitado somente à proposta deste trabalho, principalmente fundamentando a possibilidade de se utilizar esta tecnologia para projetar o DAQ. Os programas desenvolvidos visaram a estruturação de uma

---

<sup>9</sup> A palavra ‘evento’ neste caso, significa um pacote sequencial de dados adquiridos do ADC, que pode representar uma detecção feita a partir do sensor ou por algum disparo manual (*trigger*) via *software*.



plataforma onde se possa realizar os testes, visualizar seus resultados, estudar as pontes entre HPS e FPGA, e desbravar tanto a distribuição do Linux embarcada quanto a programação de alto nível em *Python* para o HPS.

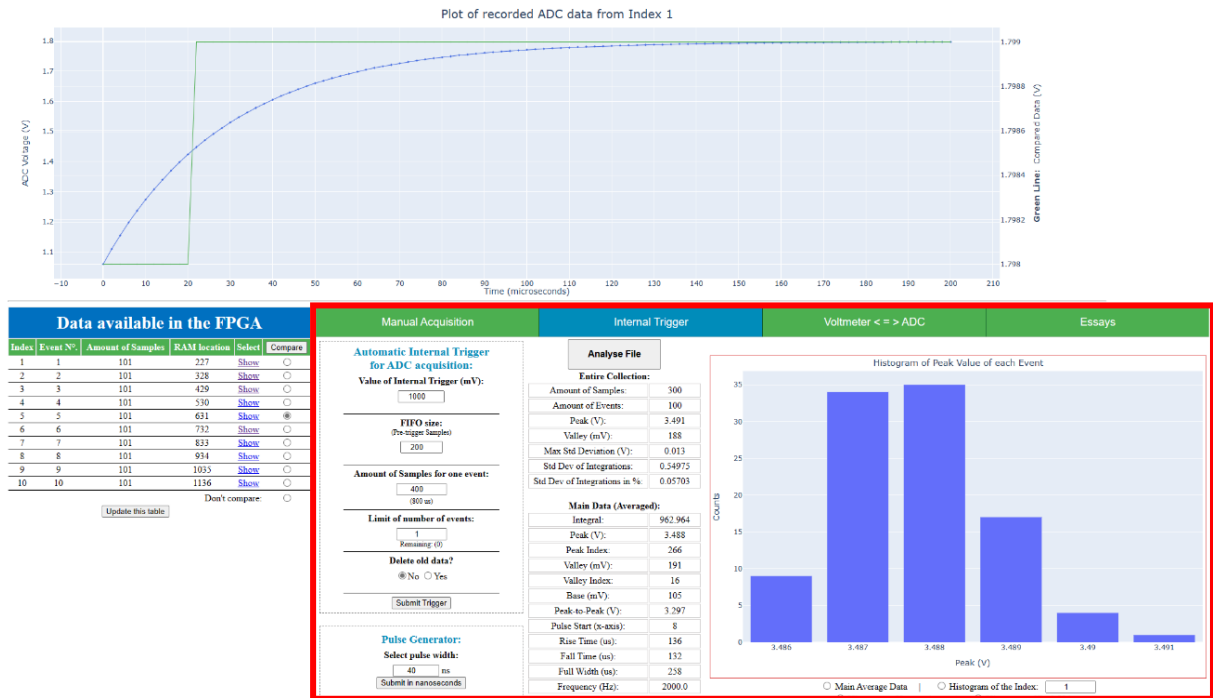
A partir destes propósitos, foi criada uma página *web* com as informações e os comandos específicos para se atuar diretamente no HPS, ou ainda interagir com o FPGA indiretamente via HPS através do uso das pontes. A visualização e configuração operacional por um usuário são feitas através dessa interface *web* desenvolvida neste trabalho, visível na Figura 21. A região demarcada com o retângulo em vermelho está ampliada na Figura 22. Nesta é possível observar as opções de testes e manipulações através deste acesso via *web*. A interface possui várias possibilidades de interação com a caixa escura, ou com o ADC e o LED isoladamente. As suas funções estão detalhadas no APÊNDICE A – Detalhamento da interface do Sistema Sigma.

A Figura 22 mostra especificamente a aquisição de 100 eventos pela função de *Internal Trigger* ao detectar ondas senoidais, o valor de *trigger* ascendente foi configurado para 200 mV. O gráfico à direita mostra a onda média resultante dos 100 eventos coletados. Informações mais detalhadas estão no Apêndice A.

O sistema desenvolvido também fornece avaliações estatísticas, cálculos relacionados a variáveis temporais e níveis de tensão, histogramas e cálculos de integrais. Estas informações serão abordadas no próximo capítulo.

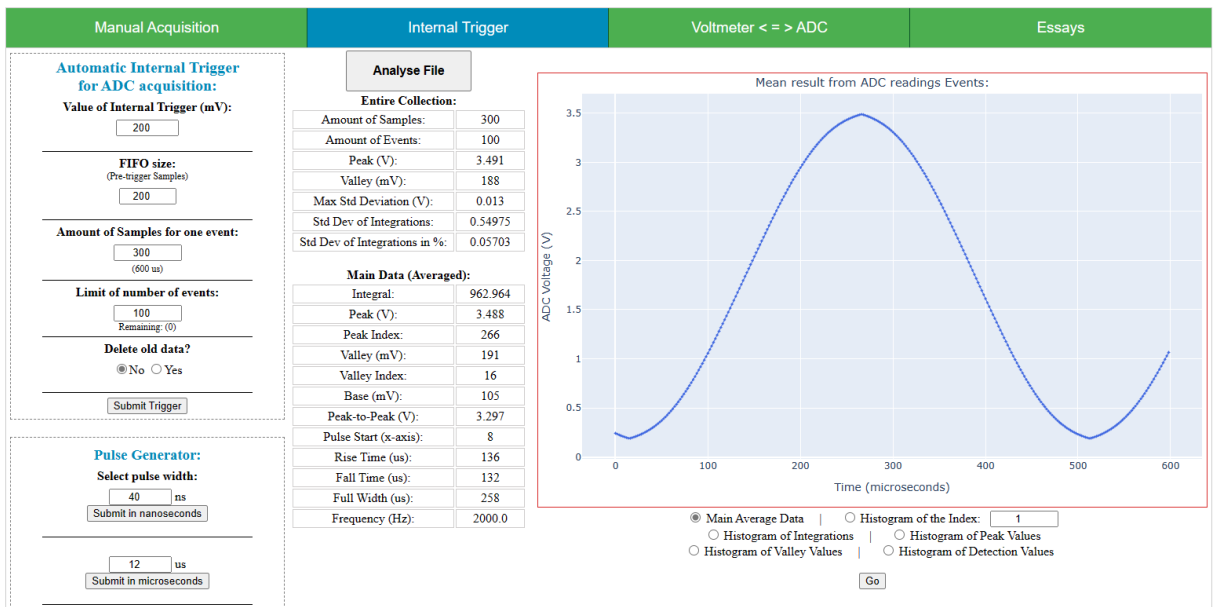
O Sistema Sigma é executado em um sistema operacional Linux embarcado no HPS (ARM) do SoC FPGA, com toda a estrutura supracitada inclusa. Contando com isso, o leque de possibilidades futuras é muito amplo com esse sistema. Pode-se, por exemplo, adaptar monitor de vídeo, *mouse* e teclado, *pen drives*, entre outros periféricos; além das possibilidades de se expandir os cálculos e as análises de dados a níveis muito superiores aos entregues por este trabalho.

Figura 21: Interface desenvolvida para testar o DAQ, visualizada no Navegador.



Fonte: Autor.

Figura 22: Visualização das opções de testes presentes no Sistema Sigma.



Fonte: Autor.

## 5 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os testes conduzidos utilizando o kit DE10-NANO com o Sistema Sigma e a caixa escura. O intuito dos testes é o de validar se as exigências repassadas pelo grupo do experimento CYGNO estão sendo atendidas (com exceção da taxa de amostragem dos ADCs), e se as funções desenvolvidas para o DAQ estão representando corretamente os resultados.

### 5.1 TESTES DE PERFORMANCE DAS PONTES DO SOC COM RSYOCTO

Os primeiros resultados que serão apresentados são referentes aos testes onde se avaliou a capacidade de transferência de dados entre HPS e FPGA. Esta avaliação foi conduzida com a intenção de analisar se o fluxo de informações entre os componentes, quando se utiliza o programa proposto, é o suficiente para atender à solicitação do projeto. Para isso foram feitos ensaios com a placa DE10-Nano utilizando as pontes LWB e H2F, ambas possuem o tráfego no sentido do HPS para o FPGA. As condições em que os testes foram executados estão apresentadas a seguir:

- O computador estava online com a DE10-Nano via Ethernet utilizando o *Visual Studio Code Insiders* (VSCI). Não foram feitas outras atividades no computador durante a execução dos testes;
- O FPGA continha instâncias independentes para a conexão via LWB e para a H2F;
- Para o HPS foi criado um programa simples em *Python*, com o menor número de linhas possível, que lia apenas uma palavra de 32 bits do FPGA;
- O programa em *Python* criado para os testes estava na estrutura de pastas do Linux, e foi executado via *Terminal* no VSCI;
- Apesar de não haver como se garantir, não havia propositalmente outras tarefas para o sistema operacional Linux controlar, ou seja, só havia os cabos Ethernet e de alimentação da placa eletrônica;
- O método de medição utilizou a função *Python* ‘time.perf\_counter()’, a mais indicada por conter melhor resolução para curtas medições de tempo [79];
- Ambas as pontes estavam sendo cadenciadas por um *clock* de 50 MHz;
- Todos os testes foram executados três vezes.

O foco principal do teste é o de medir o tempo de leitura de apenas um dado (uma palavra), mas repetidamente, completando um ‘pacote’ de palavras. Após isto, analisou-se os valores relacionados à média, o maior e o menor tempos de transferência entre os dois componentes do SoC, entre outras análises.

Nos testes iniciais, antes mesmo de se definir todas as condições de testes já mencionadas, foram feitos ensaios com alguns valores de tempo de aquisição analógica, buscando produzir leituras com quantidades razoáveis de palavras (*words*). Para isto, utilizou-se da funcionalidade de leituras do ADC pelo Sistema Sigma, determinando-se arbitrariamente aquisições analógicas com janelas de tempos relativas a 2.000 ms, 20.000 ms e 60.000 ms. Com estas janelas é possível utilizar as pontes para leituras de pacotes de 1001, 10001 e 30001 palavras de 32 bits respectivamente.

No entanto, durante os primeiros testes percebeu-se uma oscilação considerável entre os tempos de aquisição dos dados através das pontes, o que motivou a diminuição de todas as atividades do sistema operacional que fossem conhecidas. A partir disto foi desenvolvida uma programação em *Python* exclusiva para os testes, a qual foi executada via *Terminal* no VSCI. Com esse programa exclusivo, os dados lidos utilizando as pontes já não eram mais de conversões do ADC, mas um valor fixo pré-determinado no código do FPGA. Após melhorias no código *Python* foram adicionadas as medições de tempo para pacotes de 1, 11 e 101 dados, mantendo a proporção quantitativa definida inicialmente.

De forma resumida, foram feitos testes onde o HPS solicitava uma palavra de dados via LWB ou H2F ao FPGA, e a resposta do FPGA era simplesmente registrada no HPS. Este ciclo se repetia até que se completasse o pacote, que é a quantidade de palavras a serem lidas (1, 11, 101, 1001, 10001 e 30001). Ao fim da leitura de um pacote de palavras, o tempo transcorrido era medido e devidamente registrado em um arquivo no cartão de memória. Foram feitos levantamentos de mil tempos para cada tamanho de pacote, e em triplicata; ou seja, desde mil leituras de pacotes de uma palavra, até mil leituras de pacotes de 30001 palavras, três vezes para cada teste. Diante dos mil valores de tempo de cada teste, foram calculados a média aritmética e o desvio padrão, e localizados os valores máximo e mínimo em toda a série. A partir dos dividendos já encontrados: média, máximo e mínimo, obteve-se estatisticamente os valores relacionados a uma simples leitura (média, maior e menor) ao dividi-los pela quantidade de palavras (ou o tamanho do pacote) do referido teste. Estes valores estão visíveis nas respectivas tabelas nas seções a seguir.

### 5.1.1 Utilizando a *Lightweight Bridge* (LWB)

A Tabela 1 possui os resultados obtidos pelo uso da ponte LWB. Para cada teste foram consideradas as amostras das triplicatas que possuíam os valores que mais depreciaram o teste, ou seja, as que possuíam maiores médias de tempo de leituras. A unidade de tempo é  $\mu\text{s}$ .

Tabela 1: Dados resultantes dos tempos de leituras utilizando a LWB, em  $\mu\text{s}$ .

Quantidade de palavras no pacote	Média dos tempos de 1000 leituras do pacote	Desvio Padrão entre os tempos dos pacotes	Média dos tempos de leitura de uma palavra	Maior média de tempo de uma palavra	Menor média de tempo de uma palavra
1	78,1	5,6	78,1	144,3	75,3
11	757,9	62,0	68,9	214,9	67,2
101	6,9E+3	658,1	67,9	164,6	66,2
1001	69,4E+3	1,7E+3	69,3	107,5	68,7
10001	672,9E+3	2,3E+3	67,3	71,3	66,9
30001	2,0E+6	7,2E+3	65,7	69,2	65,4

Fonte: Autor.

O primeiro ponto a se observar é que para o teste com apenas 1 palavra no pacote, a proporção é direta, não há médias, portanto os resultados são relativos a leituras individuais, pois não há sequências de *loops* no programa. Nos demais testes houve um laço de repetição de leituras proporcional à quantidade de palavras do referido pacote, o que pode ter levado aos menores valores de *Menor média de tempo de uma palavra*, encontrados nos demais ensaios. Nota-se ainda que, estatisticamente, a maior e a menor média de tempo para a leitura de uma palavra, foram de 214,9  $\mu\text{s}$  em 11 palavras e 65,4  $\mu\text{s}$  em 30001 palavras, respectivamente. Os possíveis motivos que pudessem gerar o alto valor encontrado no teste de 11 palavras por pacote não são claros, mas a interferência do sistema operacional do HPS parece ser um fator relevante, já que durante a aquisição dos dados e a consequente determinação do tempo de leitura, pode ter havido interrupções no sistema operacional<sup>10</sup>. Nos demais ensaios da triplicata deste mesmo teste (de 11 palavras), o menor valor encontrado no campo *Maior média de tempo de uma palavra*, foi de 107,5  $\mu\text{s}$ ; muito mais coerente perante os demais testes. Por fim, quando se avalia todos os ensaios pelas menores médias de tempos de aquisição, nota-se que um resultado próximo de 70  $\mu\text{s}$  pode ser considerado em todos os testes.

<sup>10</sup> O Sistema Sigma não foi desenvolvido visando sistemas de tempo real; e não foram analisadas as interferências do sistema operacional nestes testes porque os resultados demonstram que a taxa de transferência obtida atende às especificações do projeto.

A partir desses resultados é possível avaliar se a ponte LWB consegue suprir a taxa de transferência necessária para o DAQ. Utilizando o maior valor de tempo encontrado para leitura de uma palavra – 214,9  $\mu$ s – pode-se calcular uma taxa máxima de dados por segundo para esta ponte, e compará-la com a taxa necessária para transferir os dados de eventos detectados pelo DAQ. Este valor permite que a totalidade de memória M10K do FPGA – 5570 kbits ou 174.062 palavras de 32 bits – possam ser totalmente transferidos em 37,4 segundos, isto resulta em uma taxa de 4653 palavras de até 32 bits por segundo. Para o menor valor de tempo de aquisição – 65,4  $\mu$ s –, levando em conta a mesma quantidade e tamanho de palavras, consegue-se transferir toda a memória em cerca de 11,383 segundos, alcançando uma taxa de 15290 palavras de até 32 bits por segundo.

A taxa de eventos solicitada para o DAQ é de um evento por segundo [ver na seção 4.2.1], e considerando uma janela de aquisição de dados por evento de 500 ns, tem-se um evento com 250 palavras de 128 bits a cada segundo (considerando os oito ADCs de 500 MSPS). Nesse caso, dividindo a palavra de 128 bits em quatro palavras de 32 bits para atender a limitação da LWB, tem-se 1000 palavras. Analisando pelo maior tempo encontrado durante os testes (214,9  $\mu$ s), é possível transferir os dados de um evento em 214,9 ms, valor este suficiente para atender ao propósito do DAQ. Não se pode deixar de fazer semelhante avaliação pelo tempo médio encontrado, visto que os maiores e menores valores encontrados não correspondem à realidade das leituras, podem representar apenas casos isolados. Retomando o valor de 1000 palavras de 32 bits utilizado no exemplo acima, ao avaliar a segunda coluna da linha correspondente a 1001 palavras da Tabela 1, os dados do DAQ seriam transferidos em apenas 69,4 ms.

### **5.1.2 Utilizando a HPS-to-FPGA Bridge (H2F)**

Os testes com a ponte H2F foram realizados de forma semelhante à LWB. Essa ponte é considerada de melhor performance por suportar transações com dados de até 128 bits de largura. Mas, como já mencionado, o *clock* desta ponte possui a mesma frequência da ponte LWB, que é de 50 MHz, e as palavras transferidas pela ponte neste teste também possuem 32 bits; desta forma, não se esperam melhores resultados quanto ao *Menor média de tempo de uma palavra*. Os resultados deste ensaio estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados resultantes dos tempos de leituras utilizando a H2F com 32 bits, tempo em  $\mu$ s.

Quantidade de palavras no pacote	Média do tempo do pacote	Desvio Padrão entre os pacotes	Média dos tempos de leitura de uma palavra	Maior média de tempo de uma palavra	Menor média de tempo de uma palavra
1	83,4	18,8	83,4	270,1	74,7
11	783,9	162,8	71,3	297,4	68,4
101	7,1E-3	575,2	70,1	128,6	68,2
1001	66,6E+3	2,8E+3	66,6	140,1	65,8
10001	654,1E+3	2,5E+3	65,4	69,6	65,0
30001	2,0E+6	8,7E+3	65,4	68,8	65,1

Fonte: Autor.

Para facilitar o comparativo, os resultados encontrados nos testes da LWB estarão doravante entre parêntesis. De forma análoga aos cálculos apresentados na LWB, considerando o maior tempo encontrado – 297,4  $\mu$ s (LWB: 214,9  $\mu$ s) – toda a memória M10K do FPGA pode ser transferida em 51,77 segundos (LWB: 37,4 segundos) utilizando palavras de 32 bits, o que resulta em uma taxa de 3362 palavras de 32 bits por segundo (LWB: 4653 palavras). Para o menor valor de tempo de aquisição – 65,0  $\mu$ s (LWB: 65,4  $\mu$ s) – a taxa para o mesmo tamanho de palavra é de 15384 (LWB: 15290) palavras por segundo. Porém não se pode utilizar os maiores e menores valores encontrados, já que estas taxas não são contínuas.

Para a aplicação do DAQ, onde a expectativa de volume de dados é de 1000 palavras de 32 bits por segundo, pode-se utilizar diretamente a média de 1001 palavras da Tabela 2 (coluna 2) para avaliar o tempo de transferência de um evento. O valor de 66,6 ms (LWB: 69,4 ms) para transferir as 1000 palavras se demonstra também muito acima da expectativa da aplicação.

O comparativo entre as duas pontes oferecem valores similares, portanto não há resultados significativos que justifiquem o uso de uma ou outra ponte quando se considera a transferência de dados de 32 bits nesta plataforma utilizada. Palavras maiores – como 128 bits – não foram testadas, e não há informações quanto ao seu funcionamento com as estruturas do *rsYocto*, *Django Framework*, ou a linguagem *Python* utilizada no sistema desenvolvido.

## 5.2 TESTES EXECUTADOS DIRETAMENTE NO SISTEMA SIGMA

Os próximos testes foram executados diretamente no Navegador *web* utilizando a interface com o Sistema Sigma. Os resultados podem ser observados pelo Navegador ou acessados no cartão de memória através de uma rede local. Para melhor entendimento das funções presentes no Sistema Sigma, recomenda-se a leitura do Apêndice A.

### 5.2.1 Comparativo entre ADC e voltímetro

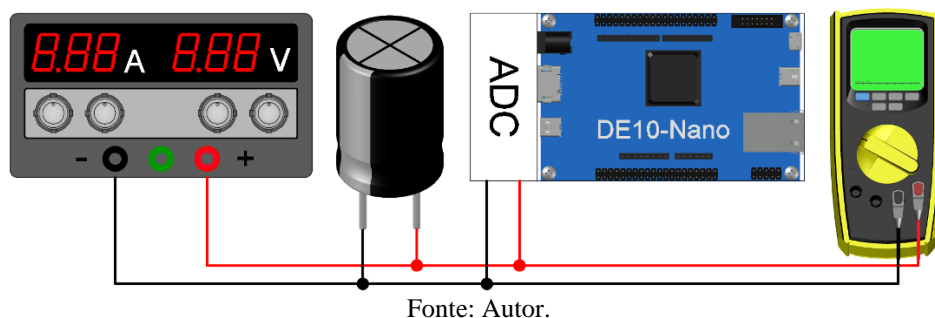
Uma das opções disponíveis na interface de usuário do Sistema Sigma é o comparativo entre o valor do ADC e um voltímetro. Esta funcionalidade foi utilizada inicialmente para conferir se o valor de tensão convertido pelo ADC e informado ao FPGA era coerente com um voltímetro de bancada. Nas primeiras etapas do desenvolvimento, os valores apresentados na tela da interface do Sistema Sigma – ainda nascituro – precisavam ser comparados com os valores de tensão apresentados ao ADC. Após a validação desta lógica de programação como um todo, pensou-se em manter esta funcionalidade, com o intuito, por exemplo, de facilitar testes de validação do ADC do DAQ. Com esta função, é possível comparar se os valores informados pelo ADC estão coerentes com alguma tensão aplicada à sua entrada, comparando os resultados com algum voltímetro, ou outra ferramenta de medição da tensão que informe o valor que é aplicado ao ADC. Na interface é possível entrar com os dados:

- Tempo da janela de aquisição em  $\mu\text{s}$  por evento;
- Quantidade de eventos;
- Valor de tensão indicada no voltímetro de referência.

Os resultados gerados são registrados no cartão de memória e são passíveis de cálculos, como a média aritmética e a geração de histogramas. Esses resultados são exibidos graficamente na interface conforme solicitação do usuário, e há também a opção de se expor um gráfico comparativo entre todos os valores de tensão inseridos e os calculados pela aplicação.

Para testar a viabilidade desta função foi utilizada uma fonte DC, um multímetro digital Fluke-106, um capacitor de 2200  $\mu\text{F}$  x 25 V e a placa eletrônica DE10-Nano conectada ao computador, conforme Figura 23.

Figura 23: Esquema de ligação para os testes comparativos com voltímetro.



A entrada do ADC, a fonte, o capacitor e o multímetro estavam todos ligados em paralelo. O capacitor foi utilizado por se perceber uma oscilação proveniente da fonte de



alimentação, sua capacitância não foi dimensionada, era um componente presente que atendeu à diminuição da flutuação do sinal. O voltímetro Fluke 106, utilizado como indicador da referência, possui precisão, na escala de tensão utilizada, de  $\pm (1\% + 3 \text{ mV})$ .

Foi criada uma lista de níveis de voltagens para a realização dos testes. Considerou-se um degrau próximo de 0,25 V entre as medições na maioria dos casos, buscando utilizar toda a faixa de leitura do ADC da placa eletrônica DE10-Nano, que vai de 0 V a 4,095 V. Para cada valor de tensão selecionado para o teste realizou-se 10.000 leituras dos valores do ADC, aqui chamado de ‘medição’, registrando-os no cartão de memória. Os dados do cartão foram transferidos para o computador, onde foram calculados:

- O valor final de cada medição – que é a média aritmética dos valores;
- O desvio padrão das amostras;
- Diferença entre a tensão calculada e o valor do voltímetro.

Devido à precisão dos valores resultantes não foi gerado um gráfico, e sim a Tabela 3 com os valores para comparação.

Tabela 3: Comparativo das leituras do ADC com a leitura de um voltímetro.

<b>Valor indicado no voltímetro (V)</b>	<b>Média (Resultado da medição) (V)</b>	<b>Desvio Padrão das amostras (V)</b>	<b>Diferença (V) Voltímetro – ADC</b>
4,060	4,055	< 0,001	0,005
3,995	3,990	< 0,001	0,005
3,761	3,756	< 0,001	0,005
3,500	3,495	< 0,001	0,005
3,249	3,244	< 0,001	0,005
2,998	2,994	< 0,001	0,004
2,750	2,746	< 0,001	0,004
2,504	2,501	< 0,001	0,003
2,235	2,232	< 0,001	0,003
2,006	2,003	< 0,001	0,003
1,755	1,753	< 0,001	0,002
1,494	1,492	< 0,001	0,002
1,244	1,243	< 0,001	0,001
1,003	1,002	< 0,001	0,001
0,751	0,751	< 0,001	0,001
0,494	0,495	< 0,001	-0,001
0,236	0,237	< 0,001	-0,001
0,128	0,129	< 0,001	-0,001
0,034	0,035	< 0,001	-0,001

Fonte: Autor.

Nota-se um desvio padrão muito pequeno entre as 10.000 amostras de cada medição, acompanhado por uma diferença muito pequena entre os valores do voltímetro e o calculado em toda a escala medida, que é de:  $5 \text{ mV} - (-1) \text{ mV} = 6 \text{ mV}$ . Os resultados dos cálculos das voltagens apresentados nesta tabela coincidem com os valores apresentados na interface, e que são calculados pelo programa na placa DE10-Nano. Portanto, esta funcionalidade pode ser implantada no projeto do DAQ para confrontar os valores lidos pelo ADC e o que lhe é efetivamente apresentado para a conversão.

### 5.2.2 Aquisição Simples e em Tempo Equivalente

Para aproximar o Sistema Sigma à realidade de sua futura aplicação, foram feitos ensaios nos quais se buscou representar o seu funcionamento no DAQ. Para isso, foram realizadas aquisições de sinais analógicos do fotomultiplicador da caixa escura, totalmente controladas pelo FPGA, que por sua vez armazenava os resultados para posterior transferência destes dados para o HPS. Os objetivos eram: realizar o desenvolvimento do *firmware*, e medir sinais reais do fotomultiplicador, visando um melhor aprendizado quanto ao seu funcionamento. No entanto, o ADC utilizado apresenta limitações na amostragem dos sinais.

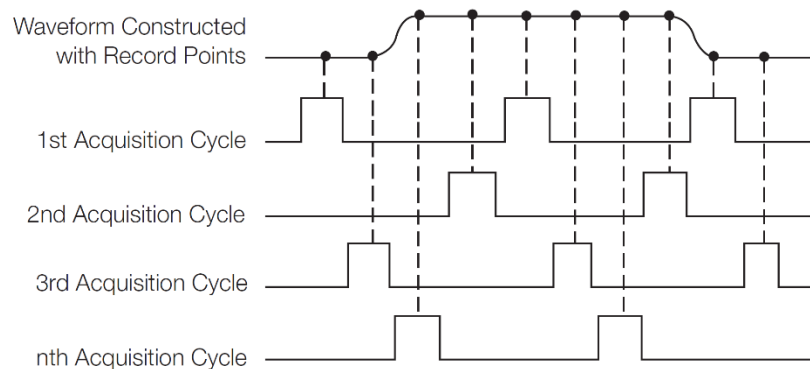
A Aquisição Simples de eventos utilizada no Sistema Sigma, é o modo de aquisição de sinais denominada como Amostragem em Tempo Real (ATR), e é a mais utilizada em DAQs e osciloscópios com elevada taxa de amostragem. A ATR é a forma ideal para sinais cujo espectro em frequência se estende além da taxa máxima de aquisição do ADC – permitindo que se atenda ao critério de Nyquist [78]. Neste contexto, durante os testes de aquisição analógica utilizando a caixa escura, percebeu-se a dificuldade em se interpretar o sinal resultante do SiPM, visto que o ADC da placa eletrônica DE10-Nano possui taxa de 500 kSPS (uma aquisição a cada  $2 \mu\text{s}$ ), limitando o espectro em frequência dos sinais medidos em 250 kHz, segundo Nyquist. Desta forma, a taxa de amostragem em tempo real deste ADC não consegue reproduzir a forma de onda gerada pela caixa escura, mesmo para pulsos no LED da ordem de alguns  $\mu\text{s}$ .

Observando a Figura 14 [60], nota-se que o Tempo de Subida do pulso relativo a um *single-photon* (SPE), é de cerca de 6 ns para o modelo de SiPM utilizado em [60] – que é da mesma família do fotomultiplicador escolhido para este trabalho. De acordo com [78], a largura de banda necessária para um osciloscópio – e também para o DAQ – medir um sinal com um determinado Tempo de Subida, deve atender minimamente à equação:  $0,35 / \text{Tempo de Subida mínimo desejado}$ , o que é representado por:  $0,35 / 6 \text{ ns} = 58 \text{ MHz}$ . Portanto, quando se trata de amostrar sinais tipo SPE, o valor calculado está muito acima do que se consegue com o ADC presente no kit (250 kHz).

Considerando-se janelas de amostragens maiores do que as que miram a detecção de SPE, quando se consideram leituras de pulsos de luz entre 40 ns e 50  $\mu$ s (ou maiores) utilizando a caixa escura, a Amostragem em Tempo Equivalente sequencial (ATE), do inglês *Equivalent-Time Sampling* [78], foi uma solução adequada para visualizar as formas de onda do fotossensor. A técnica produz uma sobre-amostragem, alcançando, neste caso, uma taxa de 25 MSPS com um ADC de 500 kSPS. Esta ferramenta, da forma como foi implementada, também pode ser utilizada em outras aplicações, nas quais o sinal a ser lido é repetitivo em vários eventos e pode ser sincronizado pelo FPGA, como foi o caso destes testes com a caixa escura.

O princípio de funcionamento da técnica ATE pode ser visualizada na Figura 24. Ela só pode ser usada para sinais periódicos e invariáveis, e que estejam associados a algum evento de disparo sincronizado aos sinais. Para tal, são realizadas várias sequências de amostragens na taxa máxima do ADC. Uma primeira sequência de amostras do sinal é adquirida com um determinado tempo de retardo do evento de disparo. Para a segunda sequência de amostragem, o retardo é minimamente aumentado, amostrando o sinal em outros instantes. Este processo é repetido por uma quantidade previamente determinada e, ao seu fim, as várias sequências são sobrepostas obedecendo a uma coerência temporal, preenchendo assim a janela de tempo desejada [78].

Figura 24: Técnica de Amostragem em Tempo Equivalente (ATE) com uma Sobre-Amostragem.



Fonte: [78].

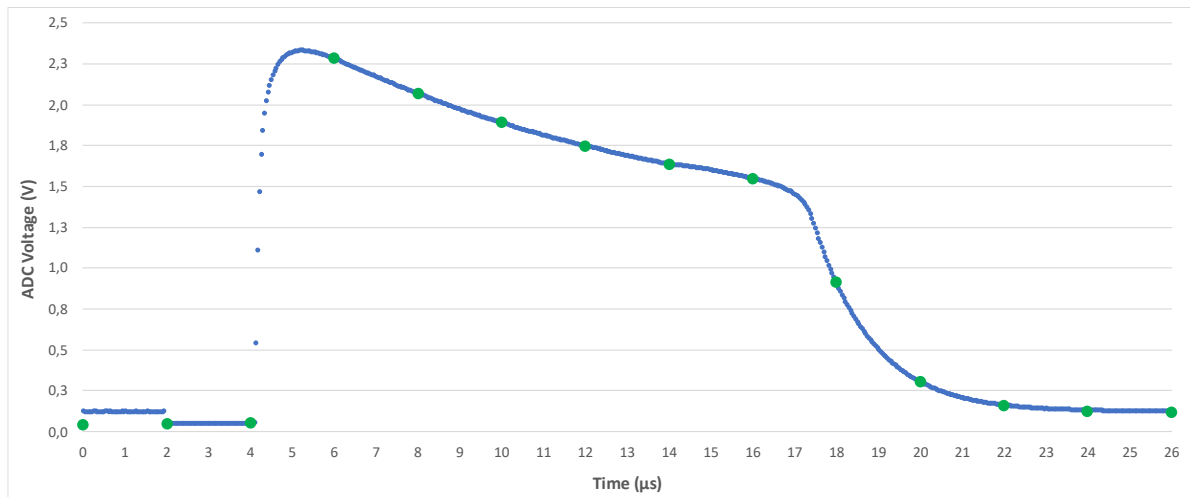
### 5.2.2.1 Amostragem em Tempo Equivalente (ATE) no Sistema Sigma

Os pulsos de energização do LED da caixa escura são controlados por um pino de natureza digital do FPGA, o que implica em uma amplitude fixa do pulso, mas sua largura pode ser ajustada através de parâmetros na interface do Sigma.

Uma vez selecionada a largura do pulso e a janela de tempo a ser lida, o FPGA produz o primeiro pulso ao comando do usuário, e inicia a coleta dos dados considerando um evento simples, ou seja, utilizando a taxa nominal do ADC. Ao final da aquisição de um evento, o FPGA opera um novo pulso no LED com a mesma duração, mas a coleta dos dados do ADC é iniciada com dois pulsos de *clock* atrasados em relação à coleta anterior, e isso é feito por mais 48 ciclos, totalizando 50 leituras de eventos. Como resultado, tem-se um sistema de conversão analógico-digital com taxa de amostragem 50 vezes maior que a amostragem real do ADC, ou seja, 25 MSPS.

Na Figura 25 há os resultados de ambas as formas de aquisição realizadas no Sistema Sigma, utilizando a caixa escura. São dois eventos distintos (um em azul e o outro em verde), mas que possuem as mesmas configurações de largura de pulso, tensão no LED e janela de tempo de aquisição. As formas de onda representam o sinal de saída do SiPM quando exposto a fótons emitidos pelo LED. Os pontos verdes representam a Leitura Simples do ADC (modo ATR) em sua taxa máxima, e as linhas azuis representam a Leitura com ATE.

Figura 25: Comparação das aquisições de uma forma de onda arbitrária com Amostragens em Tempo Real (ATR) e em Tempo Equivalente (ATE), utilizando o Sistema Sigma.

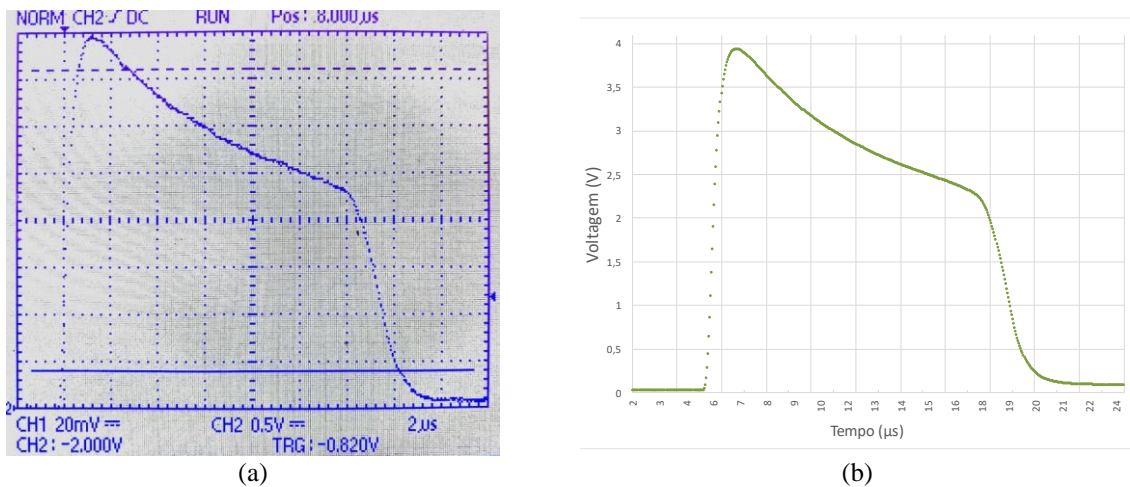


Legenda: A cor azul representa a leitura com ATE, a verde representa a leitura com ATR. Fonte: Autor.

Ainda na Figura 25, percebe-se uma distorção do sinal entre 0 e 2 microssegundos na aquisição por ATE. Isso ocorre porque nesse período, durante a aquisição de novos eventos, naturais na técnica de ATE, o SiPM ainda possui uma tensão residual em sua saída, relativa à detecção anterior. Nota-se que o nível de tensão nesse momento é similar ao nível do final da janela de aquisição. Para evitar esse problema seria necessário aumentar o tempo entre as aquisições, garantindo o retorno do sinal ao nível zero.

O resultado apresentado pelo Sistema Sigma foi comparado com um osciloscópio digital da Minipa, modelo MO-1150D, com 150 MHz de banda passante. A captura da tela do osciloscópio, apresentada na Figura 26 (a), mostra a aquisição de um evento em *single-shot*, enquanto que em (b) tem-se a leitura realizada no Sistema Sigma utilizando a técnica de ATE. Ambas as imagens representam a resposta do SiPM da caixa escura, nas mesmas condições de tensão e largura de pulso em seu LED.

Figura 26: Comparativo entre a leitura de um osciloscópio de 150 MHz e a leitura pelo Sistema Sigma usando a técnica ATE com uma sobre-amostragem que alcança 25 MSPS.



Legenda: Captura de tela do osciloscópio Minipa MO-1150D de 150 MHz, em (a), e aquisição analógica utilizando o Sistema Sigma com a técnica de Amostragem em Tempo Equivalente (ATE), em (b). Ambas as imagens representam a resposta do SiPM, em caixa escura, a pulsos no LED, nas mesmas condições de testes. Fonte: Autor.

Apesar de não haver a prévia necessidade desse modo de aquisição para a aplicação do DAQ, essa ferramenta se mostrou interessante para o estudo das curvas de resposta do SiPM para pulsos maiores que 40 ns no LED, mesmo com a baixa taxa do ADC do kit. Porém, deve-se ressaltar que esta técnica não foi eficaz para detectar *single-photons*.

Uma limitação desta técnica é que ela não pode ser utilizada para sinais periódicos que não permitam um disparo sincronizado com o sinal a ser amostrado, repetitivo nas várias sequências de amostragens.

#### 5.2.2.1.1 Aplicação e testes utilizando a técnica ATE

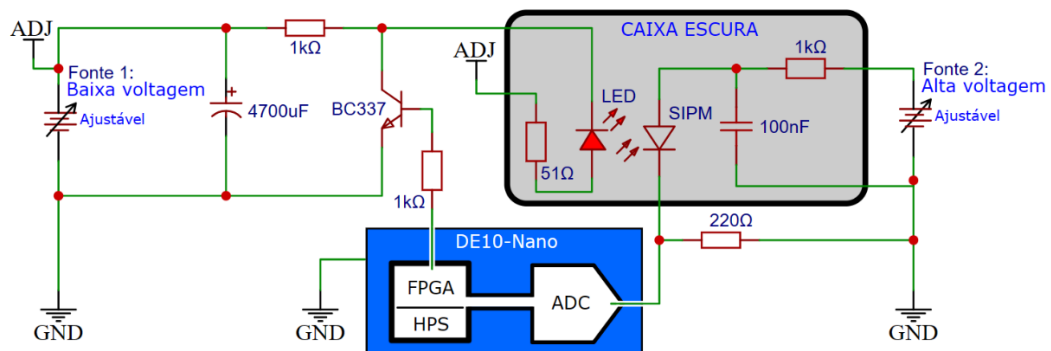
Em razão do desenvolvimento da funcionalidade de aquisição analógica usando Amostragens em Tempo Equivalente (ATE), foi possível realizar um ensaio diretamente na DE10-Nano para entender a resposta do sensor SiPM a vários níveis de luminosidade, com uma taxa de amostragem de 25 MHz. Foram realizados 22 ensaios utilizando a caixa escura de forma integral. Nestes testes foram aplicados diferentes níveis de tensão no LED, o que resultou em

diferentes intensidades luminosas aplicadas à face do sensor SiPM. Assim, espera-se que o sensor responda com diferentes níveis de tensão em sua saída.

Como pode ser visualizado na Figura 27, os valores de voltagens definidos foram aplicados ao resistor de  $51\ \Omega$  que está em série com o LED. Inicialmente buscou-se um valor de tensão em que se conseguisse um sinal resultante limpo, sem falhas ou serrilhados. Com isso, o menor valor encontrado para se conseguir uma leitura coerente com o circuito configurado foi de cerca de 2,5 V. Esta tensão é ajustada na FONTE 1, considerada como fonte de baixa voltagem. Foi instalado um capacitor eletrolítico de  $4700\ \mu\text{F}$  na saída dessa fonte, a fim de se evitar variações de tensão entre as aquisições de um evento através de ATE, caso contrário, o sinal resultante pode conter serrilhamentos.

O polo negativo do LED é chaveado por um transistor, que por sua vez é controlado por um pino digital do FPGA. O tempo de acionamento do transistor é configurado na interface do Sigma, e foi ajustado para que os pulsos no LED durassem  $12\ \mu\text{s}$  para todos os ensaios.

Figura 27: Montagem experimental para realização dos testes com a caixa escura.



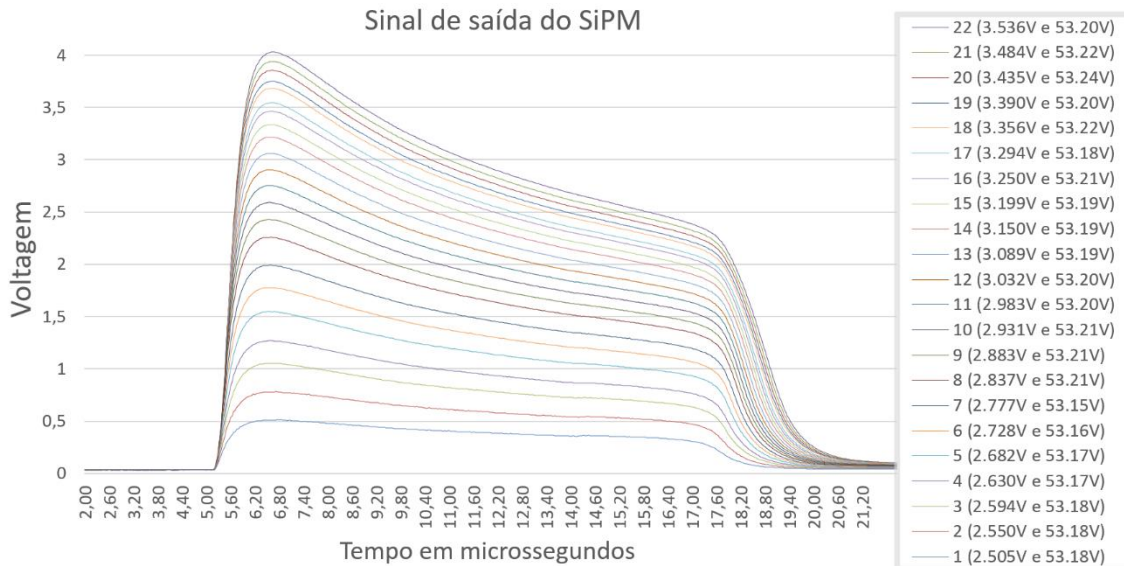
Fonte: Autor.

O sensor precisa de uma fonte DC de maior valor, denominada como alta voltagem [59]; este valor é dado pelo fabricante do sensor, e é 53,15 V. A alta voltagem foi ajustada uma única vez através da FONTE 2, porém houve pequenas diferenças entre os ensaios; o valor de tensão a cada ensaio foi anotado. Por fim, a saída do sensor é ligada ao resistor de  $220\ \Omega$ , onde é gerada e adquirida a forma de onda resultante.

A Figura 28 contém os resultados dos testes. À direita do gráfico tem-se os números com as identificações sequenciais dos ensaios, seguidos dos níveis de voltagens aplicados ao LED e ao SiPM, respectivamente. Foi objetivado um degrau entre os ensaios de 50 mV entre as voltagens do LED, partindo-se de 2,500 V. Com esse valor inicial de tensão, atingiu-se um pico de cerca de 0,5 V na saída do sensor. Entre os ensaios de 1 a 8 observa-se um degrau próximo de 0,25 V entre os picos resultantes da saída do sensor; nos demais ensaios, o degrau

foi se estreitando. O valor de tensão do LED em 3,536 V do ensaio de número 22 atingiu um valor de pico muito próximo ao maior valor suportado pelo ADC, portanto foi o último ensaio.

Figura 28: Saída do SiPM da caixa escura para diferentes intensidades luminosas geradas pelo LED.



Fonte: Autor.

O início da detecção, ou seja, a avalanche, se inicia aos 5,20  $\mu\text{s}$  com uma inclinação característica para cada ensaio; e após alcançado seu pico, a saída do sensor busca atingir um patamar mais baixo, mais bem perceptível em pulsos mais prolongados observados em outros ensaios. Após o desligamento do LED, depois de 12  $\mu\text{s}$  de exposição à sua luz, o sensor começa a retornar ao seu estado de repouso, com suas células finalizando a condução elétrica. De acordo com os dados resultantes, no primeiro ensaio, este desligamento demora cerca de 2,2  $\mu\text{s}$ , ficando entre 17,20  $\mu\text{s}$  e 19,40  $\mu\text{s}$ ; para o último ensaio, o desligamento demorou cerca de 4,72  $\mu\text{s}$ , ficando entre 17,20  $\mu\text{s}$  e 21,92  $\mu\text{s}$ .

### 5.2.3 Função de *Trigger* Interno

No Sistema Sigma há uma funcionalidade onde se pode iniciar automaticamente a memorização de uma determinada janela de leituras do ADC após a detecção de um valor de tensão pré-determinado pelo usuário, ou resumidamente: após reconhecer um evento. Essa função possui o nome de '*Internal Trigger*' ou '*Trigger* Interno', e detecta apenas inclinações de ondas com bordas ascendentes, não foi implementado o *trigger* descendente.

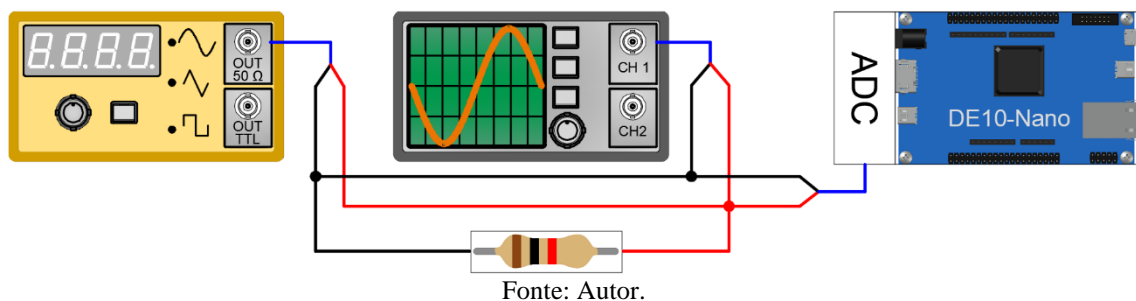
Um dos requisitos para essa função foi a utilização de uma pequena memória FIFO (*First In, First Out*) no FPGA, visando memorizar os valores pré-*trigger* amostrados pelo ADC. Essa FIFO possui uma capacidade parametrizável de até 200 palavras de 32 bits. Com isso,

quando for definido, por exemplo, uma janela de 300 leituras, e um volume de dados *pré-trigger* de 200 leituras, o 201º dado conterá o valor de leitura definido como disparo, ou um valor superior a este; enquanto o 200º dado conterá a amostragem anterior ao valor de tensão parametrizado.

Essa FIFO teve a descrição de *hardware* desenvolvida neste trabalho, e seu princípio de funcionamento considera que, atingida a sua capacidade máxima parametrizada, os dados antigos são continuamente sobrepostos à medida que os novos valores chegam. Desta forma, quando seus valores armazenados são lidos, nela há sempre os últimos valores resultantes da conversão do ADC registrados antes do *trigger* efetivo.

Para os testes de validação da função *Internal Trigger*, utilizou-se de um gerador de funções da Minipa MFG-4201A, um osciloscópio Minipa MVB-DSO 50 MHz com 8 bits de resolução, a placa DE10-Nano e um resistor de 1 k $\Omega$  de 1/4W; eles foram interligados conforme Figura 29. Os ensaios foram realizados com os seguintes valores de frequência em Hertz: 200, 2 k, 20 k, 100 k e 200 k, utilizando onda senoidal. Após alguns ensaios iniciais, foram encontrados os parâmetros ideais de configuração para cada valor de frequência do ensaio real, sendo eles: o tamanho da FIFO, a quantidade de leituras do ADC por evento e a quantidade de eventos; este último ficou fixo em 100 eventos para cada ensaio em todas as frequências. O parâmetro de quantidade de leituras por evento foi estipulado de tal forma que a onda resultante não alcançasse dois picos da onda senoidal, caso contrário poderia haver erros nos cálculos de frequência, tempo de subida, tempo de descida e FWHM. Essa limitação pode ser resolvida com investimentos futuros no desenvolvimento da programação.

Figura 29: Esquemático de ligação dos equipamentos e componente para os testes de validação de '*Internal Trigger*'.



Para não incluir os dados de todos os ensaios, serão demonstrados somente os resultados de um deles, visto que os demais replicam os resultados coerentes como este. O valor de frequência selecionado para expor as conclusões foi o de 200 Hz com os seguintes valores de configurações:



- Tamanho da FIFO: 200 valores;
- Quantidade de amostragens por evento: 2800;
- Quantidade de eventos: 100;
- Valor de disparo: 200mV.

O ensaio foi realizado ajustando um valor arbitrário de tensão que não extrapolasse a faixa de funcionamento do ADC, que é de 0 a 4,095 V. A partir do comando iniciado na interface do Sigma, o circuito sintetizado no FPGA inicialmente preenche a FIFO com as leituras do ADC, e aguarda uma rampa de subida que ultrapasse o valor de tensão configurado em 200 mV. A partir do momento da detecção, o FPGA inicia a gravação dos dados fornecidos pelo ADC em uma outra memória (RAM interna), até atingir a quantidade de 2600 amostragens, totalizando 2800 com os valores registrados na FIFO. Um sinal é utilizado no FPGA para indicar ao HPS que foi feita a aquisição de um evento, com isto o HPS inicia a transferência dos dados e os armazena no cartão SD. Ao final dos 100 eventos, o HPS inicia os cálculos e gera um relatório conforme o texto abaixo, este é apresentado na interface do sistema e armazenado no cartão de memória em um arquivo de extensão “.txt”. A explicação de cada informação do relatório encontra-se no Apêndice B.

```
Results from an analysis of an essay with Internal Trigger
Entire Collection:
  Amount of Samples: 2800
  Amount of Events:  100
  Peak (V): 3.444
  Valley (mV): 151
  Max Std Deviation (V): 0.10158

Main Data (Averaged):
  Integral: 9121.37
  Peak (V): 3.436
  Peak Index (us): 2794
  Valley (mV): 162
  Valley Index (us): 268
  Peak-to-Peak (V):  3.274
  Pulse Start (x-axis): 698
  Rise Time (us): 1352
  Fall Time (us): 1330
  Full Width (us): 2576
  Frequency (Hz): 197.9
```

Na parte de cima do relatório tem-se os valores referentes à coleção do ensaio. O nome *coleção* é dado para todos os eventos registrados no cartão de memória. No início do processo o arquivo pode ser zerado se assim for configurado; desta forma, ao fim do processo, apenas a coleção com a quantidade de eventos configurada estará no arquivo. O nome *índice* se refere

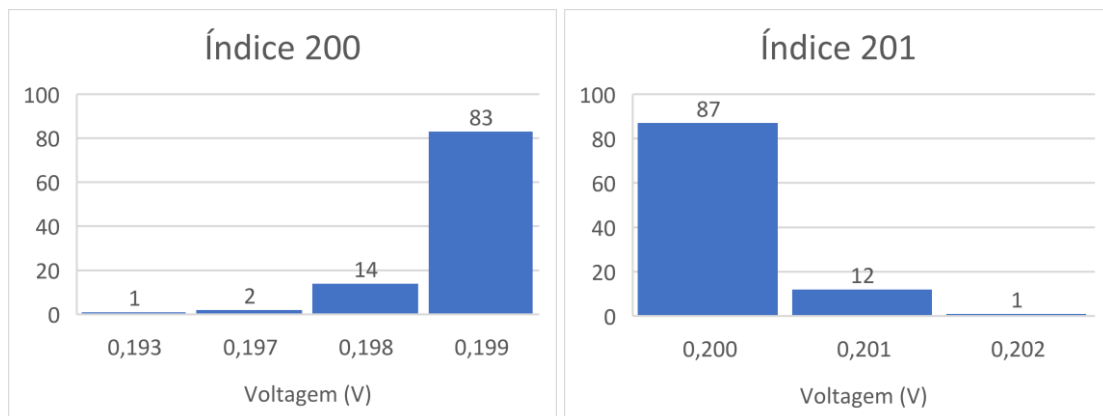
ao número sequencial das amostragens de um evento, portanto cada evento possui 2800 índices nesse caso.

Após a finalização da coleta dos 100 eventos, calcula-se automaticamente a média de cada índice dos eventos, ou seja, desde os valores número 1 de cada evento, até os valores de número 2800. Com isto consegue-se uma nova série com a forma de onda média da coleção. Na segunda parte do relatório (após “Main Data (Averaged):”) encontram-se os dados relacionados a esta série (onda média da coleção).

Apesar dessa coleção que foi apresentada conter 100 eventos, este parâmetro pode ser pré-ajustado para apenas um único evento. Assim sendo, os cálculos apresentados serão relativos ao último sinal detectado pela função *Internal Trigger*.

Para conferir a eficácia dessa função foram reunidos na Figura 30 os valores encontrados nos índices 200 e 201 dos 100 eventos. Lembrando que o tamanho da FIFO foi ajustado para 200 e a tensão de disparo foi de 200 mV. Portanto, os valores pré-*trigger* localizados na FIFO possuem os índices de 1 a 200, e os valores iguais ou maiores que 200 mV devem estar no índice imediatamente superior, que é o 201º. Conforme o histograma à esquerda, todos os valores presentes são menores que o valor de disparo configurado, e no histograma à direita estão somente os valores iguais ou maiores que o valor de disparo, comprovando a eficácia da detecção do valor de *trigger* configurado.

Figura 30: Demonstração da detecção do *trigger* interno com a largura da FIFO ajustada para 200 e o valor de disparo em 200 mV.



Fonte: Autor.

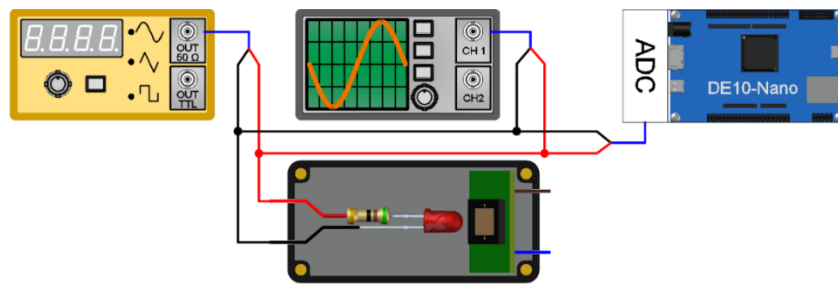
Analisando a aplicabilidade dessa função para o DAQ, pode-se presumir que essa será uma das mais importantes, visto que o par FPGA / ADC ficará sempre monitorando o sinal resultante do SiPM; e quando houver a presença de um determinado sinal, o HPS recolhe, realiza os cálculos e armazena os dados. Os cálculos e análises podem ser expandidos com melhorias futuras.

### 5.2.4 Comparativo com um osciloscópio

Os dados gerados pelo sistema foram comparados aos cálculos de um osciloscópio. Utilizando a função de *trigger* interno, uma mesma forma de onda foi lida pelos dois equipamentos: o osciloscópio e a placa DE10-Nano. Os cálculos do osciloscópio são superiores aos do Sistema Sigma em alguns pontos, principalmente em frequências mais altas, onde a taxa de leitura do ADC do kit é um fator limitante.

Para realizar estes testes foram utilizados: o gerador de funções na forma senoidal, o osciloscópio, o Sistema Sigma (SS) na placa DE10-Nano e o LED da caixa escura, não foi utilizado o SiPM. A forma como foram interligados está exposta na Figura 31. De maneira análoga aos testes do *trigger* interno da seção anterior, a tensão do gerador de sinais foi arbitrária, priorizando não extrapolar o *range* do ADC.

Figura 31: Esquemático utilizado para os testes de comparação entre o Sistema Sigma e um Osciloscópio.



Fonte: Autor.

A Tabela 4 contém os valores comparativos entre os dois equipamentos para uma onda senoidal de 200,05 Hz (valor indicado no *display* do gerador). A penúltima coluna contém a diferença entre os dois equipamentos, subtraindo o valor do osciloscópio do valor calculado pelo sistema.

Tabela 4: Comparativo entre os valores calculados pelo Sistema Sigma (SS) e os valores apresentados pelo osciloscópio em resposta a uma onda senoidal de 200,05 Hz.

Medição	Sistema Sigma (SS)	Osciloscópio	Diferença SS - Osciloscópio	Unidade
Frequência	197,90	199,84	-1,94	Hz
Tempo de Subida	1,352	1,360	-0,008	ms
Tempo de Descida	1,330	1,320	0,01	ms
FWHM	2,576	2,550	0,026	ms
Pico	3,436	3,520	-84	mV
Vale	162	160	2	mV

Fonte: Autor.

Comparativos como esse apresentado foram realizados entre todos os valores de frequência ensaiados, a *diferença* encontrada entre os equipamentos está resumida na Tabela 5.

Tabela 5: Discrepância entre os valores calculados pelo Sistema Sigma e um osciloscópio, resultantes de leituras de várias frequências de ondas senoidais.

Frequência ajustada (Hz)	Resolução Horizontal Osciloscópio	Diferença resultante entre os equipamentos (SS – Osciloscópio)					
		Frequência detectada	Tempo de subida	Tempo de descida	FWHM	Pico	Vale
20,09	400 $\mu$ s	0,075 Hz	308 $\mu$ s	-30 $\mu$ s	268 $\mu$ s	-50 mV	89 mV
200,05	40 $\mu$ s	-1,94 Hz	-8 $\mu$ s	10 $\mu$ s	26 $\mu$ s	-84 mV	2 mV
2,009 k	4 $\mu$ s	-10 Hz	0 s	0 s	6 $\mu$ s	-32 mV	31 mV
20,015 k	0,4 $\mu$ s	740 Hz	0 s	0,4 $\mu$ s	0,8 $\mu$ s	-54 mV	24 mV
100,02 k	0,08 $\mu$ s	25000 Hz	-2,8 $\mu$ s	-0,72 $\mu$ s	-3,08 $\mu$ s	-162 mV	-74 mV

Fonte: Autor.

Para chegar a uma conclusão diante dos resultados, é necessário avaliar as resoluções dos dois equipamentos. O ADC da placa DE10-Nano possui uma resolução de tensão de 12 bits para uma faixa entre 0 e 4095 mV, resultando em um degrau de 1 mV. Por possuir uma taxa de 500 kSPS, este ADC permite uma leitura a cada 2  $\mu$ s. Quanto ao osciloscópio, este possui 8 bits de resolução, resultando em uma graduação vertical de 20 mV para todos os ensaios. Já a sua resolução horizontal varia entre as experimentações conforme coluna 2 da Tabela 5. Com isso, nota-se que, para esses testes, o ADC do kit possui maior resolução de tensão; e quando se trata da resolução temporal, o ADC do kit é melhor nos três primeiros ensaios, mas inferior nos demais, com frequências maiores.

Neste cenário, percebe-se que nos três primeiros ensaios as diferenças são muito pequenas, normalmente dentro alguns degraus de resolução ou menores do que esse. As variáveis relacionadas à tensão não ultrapassaram cinco degraus de diferença considerando a resolução do osciloscópio, que é de 20 mV. As variáveis temporais estão em grande parte menores do que a resolução horizontal do osciloscópio. Diante desses resultados, nota-se que os valores calculados pelo sistema estão coerentes com os valores do osciloscópio. Porém, a partir do quarto ensaio – de 20,015 kHz –, os cálculos do Sigma começam a apresentar maiores diferenças.

Há um limite de frequência para se obter bons resultados. Ainda de acordo com a Tabela 5, a partir do quarto ensaio os valores calculados da frequência apresentaram maiores diferenças. Considerando o osciloscópio como equipamento referência, o ensaio de 100 kHz apresentou um erro muito significativo para o valor de frequência detectado pelo sistema, já

que a diferença alcançou 25 kHz. Por essa razão, os resultados do ensaio com a frequência de 200 kHz não foram tabelados.

Na busca pelo motivo dessa discrepância, chegou-se a uma possível resposta analisando os dados informados no manual do osciloscópio. A sua taxa de aquisição é de 1 GSPS, e a frequência máxima recomendada é de 50 MHz, ou seja,  $1 / 20$  da taxa de amostragem. Se aplicarmos semelhante cálculo ao ADC do kit, existe uma frequência limite de 25 kHz, porém esta teoria não foi validada durante os ensaios. Talvez, para frequências próximas e superiores a esse limite, devam-se aplicar cálculos de processamento de sinais mais específicos.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho contribuiu com o desenvolvimento do projeto de uma instrumentação dedicada – tanto nos domínios do *hardware* quanto do *firmware* – que visa promover e processar aquisições analógicas (DAQ) para oito canais de alta velocidade. O projeto foi pensado a partir das necessidades do experimento CYGNO, que busca detectar a Matéria Escura utilizando de técnicas de recuos nucleares.

Quanto ao *hardware*, este trabalho especificou o ADC e o SoC, e realizou testes para validar o circuito eletrônico de um Kit Eletrônico de Desenvolvimento (KED) comercial. O ADC foi selecionado considerando um *chip* com dois canais de 14 bits, taxa de 500 MSPS e saída de dados paralela padrão LVDS com suporte a DDR. Estas características levaram à escolha do SoC, que inclui FPGA e HPS um único *chip*. Este componente possui um processador ARM de dois núcleos com capacidade para executar um sistema operacional embarcado e controlar diversos periféricos. Após estes levantamentos, encontrou-se o KED DE10-Nano da Terasic, que além de possuir grande parte do *hardware* previsto, seu SoC é semelhante ao escolhido para compor o futuro DAQ. Ainda serão necessários estudos futuros para validar se o SoC escolhido suporta a taxa de dados via LVDS em modo DDR para os oito ADCs. A elaboração do *hardware* cessou nesse estágio.

Em seguida buscou-se investigar sobre o *firmware* do DAQ. As dúvidas mais importantes eram em como adaptar o sistema operacional Linux ao processador embarcado, e como realizar o intercâmbio de dados entre o HPS e o FPGA. Neste quesito, foi encontrada uma distribuição Linux compatível com o KED, a qual permitia, entre outras vantagens, criar programas em linguagens de alto nível para execuções no HPS.

A partir disto iniciou-se a exploração do sistema operacional, visando as ferramentas inclusas na distribuição, e o que era possível desempenhar com sua estrutura de *softwares* para a síntese do DAQ, contemplando os componentes eletrônicos citados e as exigências para o projeto. Face à amplitude de alternativas com a aplicação do sistema operacional embarcado, desenvolveu-se uma interface *web* para interações com o KED, o que possibilitou realizar simulações com uma caixa escura contendo um LED e um SiPM. Com isto foi possível simular um processo similar ao que será executado pelo DAQ. Toda essa estrutura de *softwares*, incluindo o sistema operacional e os programas criados exclusivamente para este trabalho, foi nomeada de Sistema Sigma (SS).

Diante de todo este ferramental, foram executados diversos testes para verificar se este esboço de DAQ estaria seguindo o rumo adequado para atender as exigências do grupo gestor

do projeto. Os testes também serviram para confirmar a confiabilidade do *hardware* da placa eletrônica do KED.

O primeiro teste apresentado neste trabalho foi o de avaliação da capacidade das pontes de dados entre HPS (*host*) e FPGA (*agent*). Esta intercomunicação tem o intuito de transferir os dados resultantes dos ADCs para o HPS, visto que estes dados estão inicialmente armazenados no FPGA. A taxa de eventos solicitada pelo experimento CYGNO foi de 1 Hz. Considerando um evento com dados de oito ADCs de 14 bits simultâneos, foi possível transferir todas estas informações em cerca de 300 ms. Este foi o resultado mais depreciativo entre todos os outros, mas ele foi considerado como principal já que este alto valor pode estar associado a efeitos indiretos, ocasionados por um sistema operacional sendo executado em tempo integral. Utilizando a média encontrada no teste, este valor cai para menos de 70 ms, porém ambos valores satisfazem as exigências do projeto.

Outros quatro testes analisaram as funcionalidades do SS que podem ser úteis ao futuro DAQ. A primeira funcionalidade do sistema permite que se faça a leitura de uma tensão aplicada no ADC do DAQ para, por exemplo, validação do próprio *chip*, pois possui histogramas e outras aplicações. A segunda funcionalidade talvez esteja limitada ao ADC presente no KED. Foi feita uma rotina que realiza amostragem utilizando a técnica ATE (Amostragem em Tempo Equivalente), a qual consiste em várias leituras sequenciais e sincronizadas produzindo uma sobre-amostragem, alcançando no caso deste trabalho, uma taxa de 25 MSPS com um ADC de 500 kSPS com esta ferramenta. A terceira função disponível no SS faz com que o ADC e o FPGA fiquem em constante monitoramento, buscando um valor de tensão previamente parametrizado. Quando ocorre a detecção desta tensão, o evento é salvo automaticamente em uma memória volátil do FPGA. O quarto e último teste funcional que utilizou o conjunto: KED + SS, foi um comparativo entre o relatório de análises gerado pelo SS e os valores calculados por um osciloscópio. Neste ensaio concluiu-se que o conjunto representa um produto confiável até sinais de frequência de 25 kHz. Frequências acima deste valor geram cálculos errados no SS, devido à taxa do ADC do KED.

Desta forma, este trabalho colaborou com o projeto de um DAQ de alta taxa de aquisição, destinado a leituras de sinais de fotomultiplicadores que fazem parte de um experimento de Matéria Escura.

## REFERÊNCIAS

- [1] PLANCK COLLABORATION. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, 2021.
- [2] CADERNOS DE ASTRONOMIA. Matéria Escura. Vitória: *Universidade Federal do Espírito Santo*, v. 2, n. 1, 2021.
- [3] THE CYGNO COLLABORATION. The CYGNO Experiment. *Instruments*, [s.l.], v. 6, p. 6, 2022.
- [4] MARAFINI, M.; PATERA, V.; PINCI, D.; SARTI, A.; SCIUBBA, A.; SPIRITI, E. High granularity tracker based on a Triple-GEM optically read by a CMOS-based camera. *Physics - Instrumentation and Detectors*, 2015.
- [5] BERTONE, Gianfranco; HOOPER, Dan. A History of Dark Matter. *Reviews of Modern Physics*, v. 90, p. 45002, 2018.
- [6] AKIYAMA, Kazunori; BOUMAN, Katherine L.; WOODY, David; Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 875, n. 1, p. L1, 2019.
- [7] BESSEL, F. W. On the Variations of the Proper Motions of Procyon and Sirius. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 6, p. 136-141, 1844.
- [8] SEARES, Frederick H. The Dust of Space. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 52, p. 80-115, 1940.
- [9] THOMSON, W. Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light. Cambridge: *Cambridge University Press*, 1904.
- [10] OORT, J.H. The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, v. 6, p. 249-287, 1932.
- [11] BEN-AMOTS, Netsivi. Helium as a major portion of the dark matter and the cell structure of the universe. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1956, p. 012006, 2021.
- [12] ZWICKY, F. The redshift of extragalactic nebulae. *Helvetica Physica Acta*, v. 6, p. 110-127, 1933. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1711.01693.pdf>. Acesso em: 02/01/2023.
- [13] ROBERTS, Morton S. A high-resolution 21-cm hydrogen-line survey of the Andromeda nebula. *The Astrophysical Journal*, v. 144, p. 639-664, 1966.
- [14] BAHCALL, Neta A. Vera C. Rubin: Pioneering American astronomer (1928–2016). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 114, n. 9, p. 2099-2100, 2017.



- [15] ROBERTS, M. S.; ROTS, A. H. Comparison of rotation curves of different galaxy types. *Astronomy & Astrophysics*, v. 26, n. 3, p. 483-485, 1973.
- [16] RUBIN, Vera C.; FORD, W. Kent Jr. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. *The Astrophysical Journal*, v. 159, p. 379-403, 1970.
- [17] PASACHOFF, Jay M.; FILIPPENKO, Alex. *The Cosmos: Astronomy in the New Millennium*. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [18] UNIVERSITY OF NEBRASKA-LINCOLN. Planetary Orbits - Background 1. Lincoln, 2015. Disponível em: <[https://astro.unl.edu/naap/pos/pos\\_background1.html](https://astro.unl.edu/naap/pos/pos_background1.html)>. Acesso em: 25/12/2023.
- [19] DIAS, Penha Maria Cardoso; SANTOS, Wilma Machado Soares; SOUZA, Mariana Thomé Marques de. A Gravitação Universal: um texto para o Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 3, p. 257 - 271, 2004.
- [20] SCHNEIDER, Peter. *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction*. 2. ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [21] RUBIN, Vera. Seeing dark matter in the Andromeda galaxy. *Physics Today*, v. 59, n. 12, p. 8-9, 2006.
- [22] TYSON, J. A.; VALDES, F.; WENK, R. A. Detection of Systematic Gravitational Lens Galaxy Image Alignments: Mapping Dark Matter in Galaxy Clusters. *The Astrophysical Journal*, v. 349, p. L1-L4, 1990.
- [23] BUSCHMANN, Malte et al. Dark Matter from Axion Strings with Adaptive Mesh Refinement. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 1140, 2022.
- [24] ABBOTT, L.F.; SIKIVIE, P. A Cosmological Bound on the Invisible Axion. *Physics Letters B*, v. 120, n. 1-3, p. 133-136, 1983.
- [25] CHADHA-DAY, Francesca. Axion Dark Matter: What is it and Why Now? *High Energy Physics - Phenomenology*, 2021.
- [26] KOPP, Joachim. Sterile Neutrinos as Dark Matter Candidates. *High Energy Physics - Phenomenology*, 2021.
- [27] BOYARSKY, A.; DREWES, M.; LASSERRE, T.; MERTENS, S.; RUCHAYSKIY, O. Sterile Neutrino Dark Matter. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, v. 1, n. 1, p. 1-60, 2018.
- [28] THE STEREO COLLABORATION. STEREO neutrino spectrum of <sup>235</sup>U fission rejects sterile neutrino hypothesis. *Nature*, v. 613, p. 257-261, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05568-2>

- [29] DAYA BAY, MINOS+ COLLABORATIONS. Improved Constraints on Sterile Neutrino Mixing from Disappearance Searches in the MINOS, MINOS+, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments. *Physical Review Letters*, v. 125, n. 071801, 2020.
- [30] NASCIMENTO, Elizangela Anazilda do. Candidatos à Matéria Escura no universo: MACHOs e WIMPs. Dissertação (Mestrado em Física) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.
- [31] ALCOCK, C.; THE MACHO COLLABORATION. The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations. *Astrophys. J.*, v. 542, p. 281-307, 2000.
- [32] THE EROS-2 collaboration. Limits on the MACHO content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds. *Astrophys. J.*, [s.l.], v. 469, p. 387-404, 2007.
- [33] KLAPDOR-KLEINGROTHAUS, H.V. Double Beta Decay and Dark Matter Search - Window to New Physics now, and in future (GENIUS). *High Energy Physics - Experiment*, v. 1, n. 1, p. 1-47, 1998.
- [34] ROSENBERG, Leslie. Searching for the Dark: The Hunt for Axions. *Scientific American*, 2018. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/searching-for-the-dark-the-hunt-for-axions/>. Acessado em 16/02/2024.
- [35] Super Cryogenic Dark Matter Search, Experiment Overview. *SLAC National Accelerator Laboratory*. Disponível em: <https://supercdms.slac.stanford.edu/overview/experiment-overview>. Acessado em 16/02/2024.
- [36] Xenon Dark Matter Project, official site. *XENON collaboration*, 2022. Disponível em: <https://xenonexperiment.org/>. Acessado em 16/02/2024.
- [37] The LZ Dark Matter Experiment, official site. *LZ Collaboration*. Disponível em: <https://lz.lbl.gov/detector/>. Acessado em 16/02/2024.
- [38] Alpha Magnetic Spectrometer, official site. *The National Aeronautics and Space Administration, NASA*. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission/alpha-magnetic-spectrometer/>. Acessado em 16/02/2024.
- [39] INFN, National Institute for Nuclear Physics. Directional Dark Matter Search, CYGNUS international collaboration. Disponível em: <https://web.infn.it/cygnus>. Acesso em: 25/12/2023.
- [40] THE CYGNO COLLABORATION. Directional Dark Matter Searches with CYGNO. *Particles*, [s.l.], v. 4, n. 3, p. 343-353, 2021.
- [41] THE CYGNO COLLABORATION. The CYGNO experiment, a directional detector for direct Dark Matter searches. *arXiv:2306.04568. Nuclear Instruments and Methods in Physics*

*Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 1054, 2023.

[42] THE CYGNO COLLABORATION. 1 m<sup>3</sup> Gas Time Projection Chamber with Optical Readout for Directional Dark Matter Searches: the CYGNO Experiment. *IEEE Conference Publication*, 2019.

[43] F.D. Amaro, et al. The CYGNO experiment: a directional Dark Matter detector with optical readout. *Journal of Instrumentation*, v. 18, p. C09010, 2023.

[44] EINHAUS, Ulrich. CPID: A Comprehensive Particle Identification Framework for Future e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> Colliders. *High Energy Physics - Experiment*, 2023.

[45] HILKE, H. J. Time Projection Chambers. *Reports on Progress in Physics*, [s.l.], v. 73, p. 116201, 2010.

[46] SAULI, F. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 386, p. 531-534, 1997.

[47] PINCI, Davide. Triple-gem detector for the muon system of the LHCb experiment. 2005. Tese (Doutorado em Física) - *Università degli studi di Cagliari*, Cagliari, 2005.

[48] SAULI, Fabio. The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, [s.l.], v. 805, p. 2-24, 2016.

[49] CAMPAGNOLA, Roberto. Study and optimization of the light-yield of a triple-GEM detector. 2018. Tese (Mestrado em Física) - *Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*, Roma, 2018.

[50] HAMAMATSU. ORCA®-Fusion ORCA®-Fusion BT Gen III Scientific CMOS Camera. Technical note. *Hamamatsu Photonics*, 2021.

[51] WU, Qiang; QIAO, Dingheng. Design of SCMOS Camera System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.

[52] HAMAMATSU. Photomultiplier tubes basics and applications. Fourth edition. *Hamamatsu Photonics*, 2017.

[53] EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. 23<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

[54] FLYCKT, S-O; MARMONIER, Carole. Photomultiplier tubes: principles & applications. Re-edited September 2002. *Photonis, Brive, France*, 2002. Disponível em: [https://www2.pv.infn.it/~debari/doc/Flyckt\\_Marmonier.pdf](https://www2.pv.infn.it/~debari/doc/Flyckt_Marmonier.pdf). Acesso em: 25/12/23.

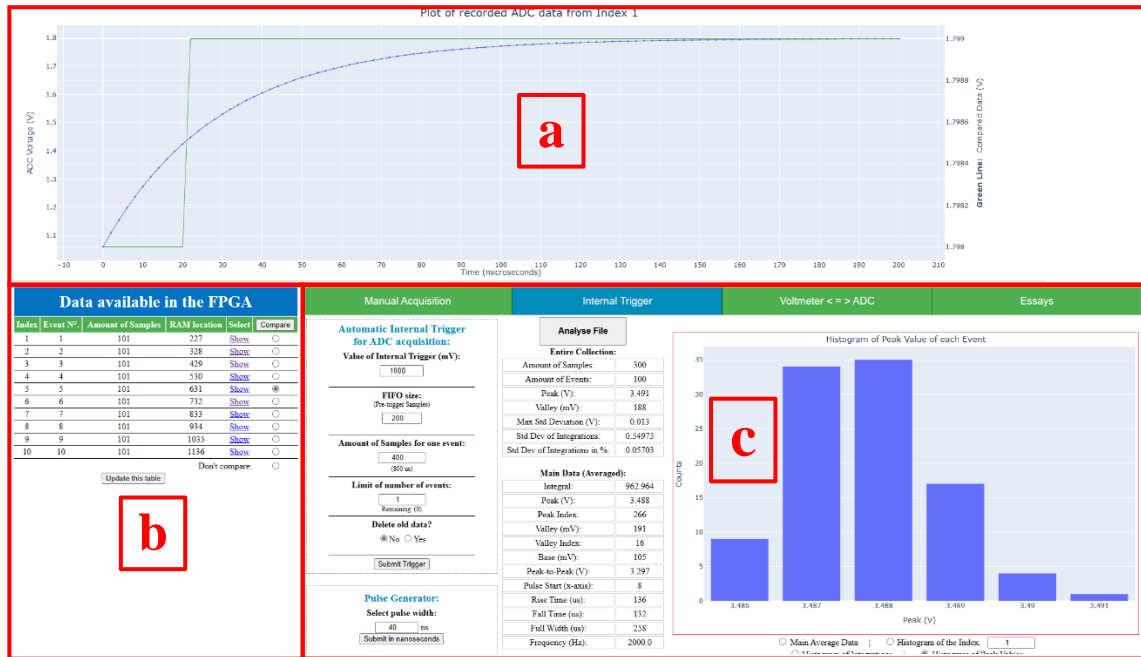
- [55] THE CYGNO COLLABORATION. A 50 liter CYGNO prototype overground characterization. *The European Physical Journal*, 2023.
- [56] HAMAMATSU. MPPC Literature. Hamamatsu Photonics K.K, 2021. Disponível em: [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/mppc\\_kapd9005e.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9005e.pdf). Acesso em 02/01/2024.
- [57] CAIANO, S. R, et. al. Dependência da resolução em energia em função da temperatura de uma fotomultiplicadora de silício acoplada a um cristal cintilador. *Congresso brasileiro de metrologia das radiações ionizantes*, 8, 18-21 de outubro, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/32630>. Acesso em: 2 jan. 2024
- [58] RENKER, D. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties, and problems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 567, n. 1, p. 48-56, nov. 2006
- [59] HAMAMATSU. Si APD, MPPC, Handbook chapter 3, E03, [internet]. Disponível em: [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e03\\_handbook\\_si\\_apd\\_mppc.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e03_handbook_si_apd_mppc.pdf). Acessado em: 10.07.2021.
- [60] NOCERINO, E. The Semiconductor Multiplication System for Photoelectrons in a Vacuum Silicon Photomultiplier Tube (VSiPMT) and Related Front End Electronics. Tesi di Laurea Specialistica, *Università degli Studi di Napoli Federico II*, Napoli, Itália, 2016.
- [61] HAMAMATSU. MPPC. Technical note. Cat. No. KAPD9008E01. *Hamamatsu Photonics*, 2021.
- [62] HAMAMATSU. MPPC-S13360 series datasheet, Cat. No. KAPD1052E04. *Hamamatsu Photonics K.K*, 2016.
- [63] ANALOG DEVICES. AD9684 ADC datasheet. Rev. A. *Analog Devices, Inc.* 2023.
- [64] LEE, C. C. Improving Accuracy and Energy Efficiency of Pipeline Analog to Digital Converters. Tese de Doutorado, *University of Michigan*, Michigan, EUA, 2010.
- [65] DIGIKEY. “Analog Basics - Part 3: Pipeline ADCs and How to Use Them”. *DigiKey’s North American Editors*, 2020. Disponível em: <https://www.digikey.com/en/articles/analog-basics-part-3-pipeline-adcs-and-how-to-use-them>. Acesso em: 2 jan. 2024
- [66] ANALOG DEVICES. AD9694 ADC datasheet. Rev. B. *Analog Devices, Inc.* 2018.
- [67] INTEL. Cyclone V Device Datasheet CV-51002. 683801. *Intel*. 2023.05.23.
- [68] INTEL. Cyclone V Device Overview. CV-51001. *Intel*. 2018.

- [69] ALTERA. Cyclone V Hard Processor System Technical Reference Manual. cv\_5v4. *Altera Corporation*. 2020.
- [70] MOLANES, R. F. Performance Characterization and Design Guidelines for Efficient Processor-FPGA Communication in Cyclone V FPSoCs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 5, p. 4368-4377, 2018.
- [71] TERASIC. DE10-Nano User Manual. Rev. B2/C Hardware. Ver. 2.2. *Terasic*. 2019. Disponível em: <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=1046&PartNo=4>. Acesso em: 02/01/2024.
- [72] INTEL Learning. Treinamento online com o tema: Getting Started with Linux OS for Intel® SoC FPGAs. Disponível em: <https://learning.intel.com/Developer/learn/course/795/getting-started-with-linux-os-for-intelr-soc-fpgas>. Acesso em: 25/04/2023.
- [73] SEBASTIAN, Robin. RSYocto Linux Distribution for Intel SoC-FPGA. Disponível em: <https://github.com/robseb/rsyocto/tree/rsYocto-1.041>. Acesso em: 26/04/2023.
- [74] SEBASTIAN, Robin. Booting rsyocto on your Board. Acessado em 05/05/2023. [https://github.com/robseb/rsyocto/blob/rsYocto-1.041/doc/guides/1\\_Bootting.md](https://github.com/robseb/rsyocto/blob/rsYocto-1.041/doc/guides/1_Bootting.md).
- [75] SEBASTIAN, Robin. Debugging Python applications remotely. Disponível em: [https://github.com/robseb/rsyocto/blob/rsYocto-1.041/doc/guides/4\\_Python.md](https://github.com/robseb/rsyocto/blob/rsYocto-1.041/doc/guides/4_Python.md). Acesso em 05/05/2023.
- [76] CARDOSO, D.S., LIMA JUNIOR, H.P. Comunicação entre processador HPS e FPGA em um chip SoC Cyclone V. Nota Técnica. *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*. 2024.
- [77] SEBASTIAN, Robin. RSYocto Linux Distribution for Intel SoC-FPGA. Disponível em: <https://github.com/robseb/rsyocto/tree/rsYocto-1.041/fpga>. Acesso em: 30/04/2023.
- [78] XYZs of Oscilloscopes. Primer. *Tektronix*. Pdf document.12/2009.
- [79] Time - Time access and conversions - *Python 3.11.4 documentation*. Disponível em: [https://docs.python.org/3/library/time.html#time.perf\\_counter](https://docs.python.org/3/library/time.html#time.perf_counter). Acesso em: 02/01/2024.

## APÊNDICE A – Detalhamento da interface do Sistema Sigma

O Sistema Sigma é uma interface *web* desenvolvida especificamente para este trabalho de mestrado. A visualização da página de acesso do usuário está na Figura 32, e foi dividida em três partes para melhor entendimento.

Figura 32: Interface desenvolvida para testar o DAQ, visualizada no Navegador.



Fonte: Autor.

A página *web* de operação visualizada na Figura 32 foi acessada via Navegador através de uma rede LAN. Em (a) tem-se o gráfico principal onde mostra-se a última leitura realizada no ADC, ou, caso o usuário deseje, o resultado de uma ou duas leituras já armazenadas e selecionadas em (b). Na área (b) da interface, mostra-se uma tabela com os eventos de aquisição do ADC armazenados na memória volátil do FPGA. Em (c) há quatro abas utilizadas para a seleção de diferentes métodos de aquisição de eventos pelo ADC, além de outras particularidades como, por exemplo, a geração de um sinal em um pino digital do FPGA e cálculos estatísticos.

Os eventos armazenados no FPGA (resumidos em (b)) estão organizados em uma tabela conforme a Figura 33. Nesta tabela é possível visualizar, por exemplo, a quantidade de eventos já registrados; e é através desta tabela que se seleciona os resultados em (a) da Figura 32.

Figura 33: Os dados armazenados no FPGA estão acessíveis na interface.

Data available in the FPGA					
Index	Event N <sup>o</sup> .	Amount of Samples	RAM location	Select	Compare
1	1	101	227	<a href="#">Show</a>	<input type="radio"/>
2	2	101	328	<a href="#">Show</a>	<input type="radio"/>
					Don't compare: <input type="radio"/>

Fonte: Autor.

As colunas mostradas na tabela da Figura 33 são:

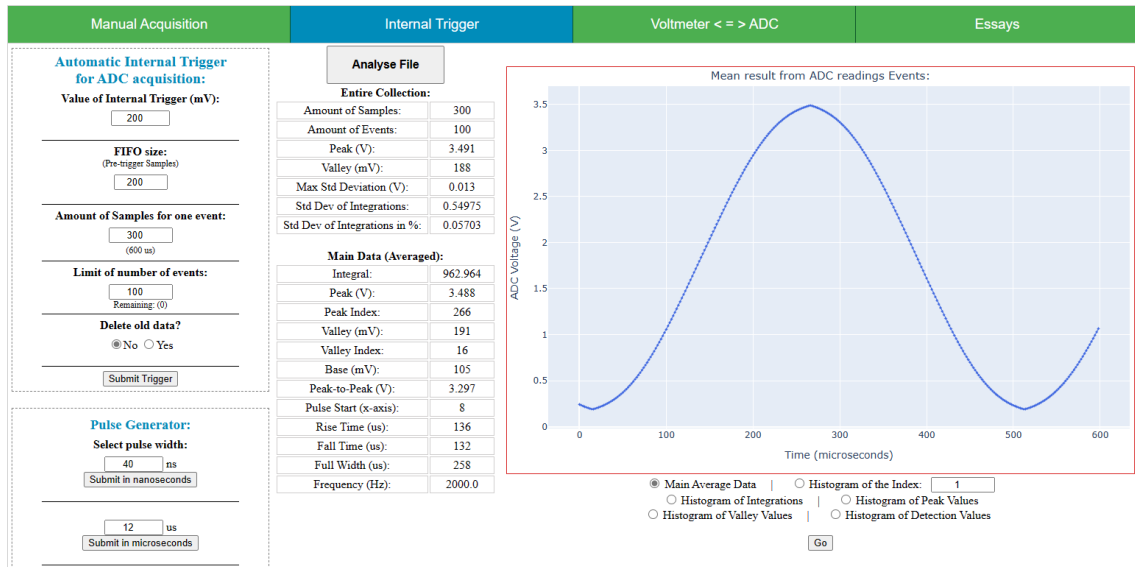
- *Index*: índice numérico limitado entre 1 e 127. É a quantidade máxima de eventos que podem ser armazenados na memória do FPGA. O *overflow* deste valor faz com que ele retorne para 1, sobrepondo os dados anteriores;
- *Event N<sup>o</sup>*: é o valor de um contador de eventos independente do índice, mas limitado a 1023. É como um número de registro (nome) exclusivo para o evento;
- *Amount of Samples*: quantidade de amostras do ADC no respectivo evento;
- *RAM location*: este valor possui três funções: *i*) mostra a quantidade de *words* de 32 bits a serem lidas do referido evento; *ii*) aponta para o endereço da memória do FPGA; *iii*) serve de monitor para o usuário ao mostrar a ocupação da memória, que é limitada a 65536 words;
- *Select*: os dados contidos em determinado índice podem ser mostrados no gráfico principal da interface, selecionando o *hiperlink* relacionado ao índice;
- *Compare*: opção para se selecionar dois eventos para efeitos comparativos, desta forma ambos são mostrados no gráfico principal.

A área (c) da Figura 32 está ampliada na Figura 34. É a região com as funcionalidades para os testes do DAQ. Essas funções foram mais bem detalhadas na seção 5.2. Resumidamente, há quatro opções:

- *Manual Acquisition*: aquisição manual de eventos no DAQ;
- *Internal Trigger*: utilizado para aquisição automática de eventos no DAQ. O usuário parametriza um valor de tensão em mV que será utilizado pelo FPGA para iniciar o registro do sinal;

- *Voltmeter*  $\Leftrightarrow$  *ADC*: comparativo entre o valor médio de um evento lido pelo ADC e um valor informado pelo usuário de acordo com um voltímetro;
- *Essays*: ensaios com diversas tomadas de eventos, e estatísticas entre os ensaios realizados.

Figura 34: Visualização das opções de testes presentes no Sistema Sigma.



Legenda: Esta figura mostra especificamente a aquisição de 100 eventos pela função de *Internal Trigger* ao detectar ondas senoidais, o valor de *trigger* ascendente foi configurado para 200 mV. O gráfico à direita mostra a onda média resultante dos 100 eventos coletados. Fonte: Autor.

As quatro opções de testes possuem funções internas similares, sendo que as duas mais comuns são:

- Pulse Generator*: função de gerador de pulsos. Seleciona-se a largura de pulsos em nanossegundos, ou microssegundos. Os pulsos são gerados em um pino de saída do FPGA no padrão de nível lógico de 3,3 V, e possui algumas opções de sincronismo: sincronizado com o ADC em disparo único, ou através de um *timer* que gera os pulsos a uma frequência fixa teórica de 500 Hz;
- Manual acquisition*: contém os parâmetros e o botão para disparo manual da aquisição de um evento. Esta opção está disponível nas opções “*Manual Acquisition*” e “*Essays*”. Os parâmetros são:
  - *Single Read*: leitura do ADC na sua frequência nominal de operação (500 kHz);
  - *Multiple*: leitura por ATE (Amostragem em Tempo Equivalente), equivalente a 25 MHz (sobre-amostrado). São feitas 50 leituras nas mesmas condições paramétricas,



mas em tempos diferentes de início de aquisição do ADC. Os resultados de cada leitura são intercalados entre si em sua coerência temporal, com isso tem-se uma sobre-amostragem que alcança 25 MHz. Esta forma de aquisição serve somente para sinais repetitivos e sincronizados com o sinal gerado pelo pino do FPGA destinado a esta função;

- *Sampling Time*: tempo total do evento a ser coletado, em microssegundos;
- *Number of Events*: quantidade de eventos a serem coletados sequencialmente;
- *Delete old data?*: Caso seja escolhido “Yes”, todos os eventos armazenados no FPGA serão apagados, os índices serão reiniciados, e os arquivos armazenados no cartão de memória referentes às leituras anteriores também serão apagados;
- *Voltage on LED*: Trata-se da tensão ajustada para disparo do LED da caixa escura, e é obtida manualmente. Este campo serve como nome do arquivo do referido ensaio (que é armazenado no SD-card) e demais exibições gráficas e estatísticas.

## APÊNDICE B – Relatório da função de *Trigger* interno

Um exemplo de relatório gerado pelo Sistema Sigma para a funcionalidade de *Internal Trigger* está descrito abaixo. Para gerá-lo foi realizado um ensaio com uma coleção de 100 eventos de 2800 amostragens do ADC, detectando um valor ascendente de tensão de 200 mV de uma onda senoidal. Na seção 5.2.3 encontram-se mais informações sobre o referido teste.

Após a coleta dos eventos, o HPS inicia os cálculos e gera um relatório conforme o texto abaixo, apresentando-o na interface do Navegador e o armazenando em formato ‘.txt’ no cartão de memória.

Results from an analysis of an essay with Internal Trigger

Entire Collection:

Amount of Samples: 2800  
 Amount of Events: 100  
 Peak (V): 3.444  
 Valley (mV): 151  
 Max Std Deviation (V): 0.10158

Main Data (Averaged):

Integral: 9121.37  
 Peak (V): 3.436  
 Peak Index (us): 2794  
 Valley (mV): 162  
 Valley Index (us): 268  
 Peak-to-Peak (V): 3.274  
 Pulse Start (x-axis): 698  
 Rise Time (us): 1352  
 Fall Time (us): 1330  
 Full Width (us): 2576  
 Frequency (Hz): 197.9

Na parte de cima do relatório encontram-se os valores referentes à coleção do ensaio. O nome *coleção* é dado para todos os eventos registrados no cartão de memória. No início do processo o arquivo pode ser zerado se assim for configurado, desta forma, ao fim do processo, apenas a coleção com a quantidade de eventos configurada estará no arquivo. O nome *índice* se refere ao número sequencial das amostragens de um evento, portanto cada evento possui 2800 índices nesse caso. Por fim, os dados do início do relatório possuem as informações:

- Quantidade de amostragens: quantidade de leituras do ADC para um evento;
- Quantidade de eventos: número de eventos em toda a coleção armazenada no arquivo;
- Pico e vale: maior e menor valores de voltagens encontrados em toda a coleção;

- Maior desvio padrão: para cada valor de índice é calculado o desvio padrão do relativo valor entre os distintos eventos. O valor dado neste campo é o maior desvio padrão em volts encontrado entre todos os índices de todos os eventos;

Após a finalização da coleta dos 100 eventos, calcula-se a média de cada índice dos eventos, ou seja, desde os valores número 1 de cada evento, até os valores de número 2800. Com isto consegue-se uma nova série com a forma de onda média da coleção. Na segunda parte do relatório (após “Main Data (Averaged):”) encontram-se os dados relacionados a esta série (onda média da coleção). São eles:

- Integral: integral da onda resultante;
- Pico e Vale: maior e menor valores de voltagens encontrados;
- Índice do pico e índice do vale: valores em microssegundos, a partir de 0  $\mu$ s, onde se encontram o maior e o menor valores da série, respectivamente;
- Pico a pico: diferença de tensão entre os valores de pico e vale;
- Início do Pulso no eixo X: índice referente ao início do pulso da onda, não necessariamente o valor de *trigger*;
- Tempo de subida ( $\mu$ s): tempo levado para a forma de onda subir de 10 % a 90 %;
- Tempo de descida ( $\mu$ s): tempo levado para a forma de onda descer de 90 % a 10%;
- Largura à meia altura;
- Frequência: valor calculado de frequência do sinal conforme os dados coletados.

A integral  $I$  é calculada utilizando a regra do trapézio:

$$I = \sum_{i=2}^k \frac{\Delta(f_i + f_{i-1})}{2} \quad (5)$$

Onde:

$\Delta$  = tempo entre as amostragens. Pelas características do ADC este valor é sempre 2  $\mu$ s;

$f_i$  = valor da leitura (amostra) atual do ADC;

$f_{i-1}$  = valor da leitura (amostra) anterior;

$k$  = quantidade total de amostras.