

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

LEONARDO CHAVES RUIZ GUEDES

**DESENVOLVIMENTO DE DETECTOR DE TIRAS DE
CINTILADORES PLÁSTICOS PARA *TRIGGER* DO SISTEMA
*TRACKING***

**RIO DE JANEIRO
2013**

LEONARDO CHAVES RUIZ GUEDES

**DESENVOLVIMENTO DE DETECTOR DE TIRAS DE
CINTILADORES PLÁSTICOS PARA *TRIGGER* DO SISTEMA
*TRACKING***

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica.

Orientador: Prof. André Luis Costa Canella.
Coorientador: Prof. André Massafferri Rodrigues.

**RIO DE JANEIRO
2013**

LEONARDO CHAVES RUIZ GUEDES

**DESENVOLVIMENTO DE DETECTOR DE TIRAS DE
CINTILADORES PLÁSTICOS PARA *TRIGGER* DO SISTEMA
*TRACKING***

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica.

Área de Concentração:

Data de defesa: 16 de janeiro de 2014.
Resultado: _____.

BANCA EXAMINADORA

André Luis Costa Canella.
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Prof. _____

André Massafferri Rodrigues.
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Prof. _____

Luciano Mendes Camillo
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Prof. _____

Marco Aurélio Pinhel Peixoto
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Prof. _____

Nelson Luiz Panza Pereira da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Prof. _____

Ricardo Cardoso Paschoal
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Prof. _____

DEDICATÓRIA

A Deus, sem o qual não alcançaria mais essa conquista.

A minha família que sempre me apoiou e incentivou durante todo o tempo.

Aos amigos e colegas de trabalhos pelo apoio, e ajuda.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor André Massafferri Rodrigues, pela orientação, sugestão do tema e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor André Luis Costa Canella, pela orientação, confiança e apoio na realização deste projeto.

Ao Professor Ricardo Cardoso Paschoal pela indicação ao CBPF e orientação anterior de iniciação científica.

Ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, onde obtive todo o suporte para a realização do projeto.

Aos técnicos e funcionários que ajudaram na confecção das placas de circuito impresso.

Aos professores e a instituição do CEFET/RJ por serem responsáveis por todo conhecimento e formação que obtive ao longo dos cinco anos de curso de engenharia Eletrônica.

RESUMO

O Laboratório Multiusuário de Física Experimental de Altas Energias do LAFEX (Coordenação de Física Experimental de Altas Energias do CBPF) atualmente contém um *setup* experimental, vinculado às experiências LHCb (*Large Hadron Collider beauty*). Onde está sendo construído um sistema de determinação de trajetórias de partículas elementares (*Tracking*) para ser utilizado como base para o desenvolvimento de novos detectores, estudo da distribuição angular de múons cósmicos e para fins didáticos.

Tanto o detector como o sistema de *Tracking* serão úteis também no contexto do Programa Antártico Brasileiro o qual prevê, nos próximos anos, a construção de um espectrômetro de raios cósmicos no Polo Sul. O sistema de *Tracking* do LAFEX/CBPF conta com três câmaras proporcionais a fio, MWPC (*Multi-Wire Proportional Chamber*), trazidas da organização europeia para a pesquisa nuclear, conhecida como CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*). Para viabilizar a seleção rápida de eventos (*trigger*) estão sendo construídos dois detectores de cintiladores plásticos segmentados com leitura por MaPMT (*Multi Anode Photo Multiplier*). A aquisição dos dados está sendo desenvolvida em módulos VME (*VERSA-Module Euro*) que utilizam tecnologia FPGA (*Field-Programmable Gate Array*). O intuito do projeto é desenvolver a eletrônica, analógica e digital, de um detector de cintiladores plásticos segmentado.

Esta monografia tem como objetivo descrever as partes que compõem o detector, explicar a teoria envolvida no processo de detecção, o projeto de sua eletrônica, testes e o desempenho da eletrônica do protótipo construído.

Palavras-chave: Detector, MaPMT, *Tracking*,

ABSTRACT

The Multiuser Laboratory of High Energy Experimental Physics at LAFEX (Department of High Energy Physics at CBPF) currently contains an experimental setup linking to LHCb (Large Hadron Collider beauty). Where a system is being constructed for the trajectories determination of elementary particles (tracking) to be used as a basis for the development of new detectors, study of the angular distribution of cosmic muon and teaching purposes.

Both the detectors and the tracking system will also be useful in the context of the Brazilian Antarctic Program that provides, in the coming years, the construction of a cosmic ray spectrometer in South Polo. This system has three MWPC (Multi -Wire Proportional Chamber), brought by the European Organization for Nuclear Research, known as CERN (European Organization for Nuclear Research). To facilitate rapid event selection (trigger), two detectors are being constructed of segmented plastic scintillators with MaPMT (Multi Anode Photo Multiplier) reading. The data acquisition are being developed on VME (VERSA -Module Euro) modules using FPGA (Field-Programmable Gate Array) technology. The intention of the project is the development of analog and digital electronics parts of a segmented plastic scintillator detector.

This monograph aims is to describe the parts of the detector, the explanation of the theory involved in the detection process, the design of your electronics, testing and performance of the electronic prototype built.

Keywords: Detector, MaPMT, Tracking.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVO	13
1.2. MOTIVAÇÃO	13
1.3. METODOLOGIA	14
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	15
2.1. RAIOS CÓSMICOS	15
2.2. MWPC, Cintiladores Plásticos e PMT	18
2.2.1. MWPC	18
2.2.2. Cintiladores Plásticos	18
2.2.3. PMT	19
3. SISTEMA DE <i>TRACKING</i>	21
3.1. DESCRIÇÃO GERAL	21
3.2. DETECTORES + ELETRÔNICA DE <i>FRONT-END</i> UTILIZADOS	21
3.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (<i>DATA ACQUISITION</i>)	22
4. DESENVOLVIMENTO DO DETECTOR <i>SCITILE</i>	23
4.1. TIRAS CINTILANTES	23
4.2. FIBRA WLS	24
4.3. MAPMT	24
4.4. MECÂNICA/ÓPTICA	26
4.5. ELETRÔNICA (16 CANAIS: ANALÓGICOS E DIGITAIS)	27
4.5.1. Circuito de Alimentação	28
4.5.2. Circuito Amplificador	29
4.5.3. Circuito Discriminador	30
4.5.4. Circuito Manual de <i>Threshold</i>	31
4.5.5. Circuito Digital de <i>Threshold</i>	32
4.5.6. Interface Gráfica do Controle Digital de <i>Threshold</i>	35
5. RESULTADOS	36
5.1. SIMULAÇÃO	36
5.2. PROTÓTIPO - ELETRÔNICA (UM CANAL)	37
5.3. CÁLCULO DE IMPEDÂNCIA	39
5.4. TESTE DE LINEARIDADE E CALIBRAÇÃO DO POTENCIÔMETRO DIGITAL	41

5.5. TESTE DE AMPLITUDE, RUÍDO E COMUNICAÇÃO ECL.....	42
5.6. PERFORMANCE DO DETECTOR	45
6. CONCLUSÃO.....	46
7. TRABALHOS FUTUROS.....	47
REFERÊNCIAS.....	48
APÊNDICE A – Código da Interface Gráfica	51
APÊNDICE B – Código do Microcontrolador.....	58
APÊNDICE C – Sinais Visualizados no Osciloscópio.....	60
APÊNDICE D – Imagem da Realização dos Testes.....	61
APÊNDICE E – Montagem em 3D do Detector e <i>Setup</i> do Sistema <i>Tracking</i>.....	62
APÊNDICE F – Layout da Pcb da <i>Front-End</i> de 16 Canais	63

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1: Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE) [2].....	16
FIGURA 2: Gráfico da concentração de partículas em diferentes altitudes [2].....	17
FIGURA 3: MWPC. As partículas T que passarem são ionizadas e liberam carga que será coletada pelo amplificador [5].....	18
FIGURA 4: Estrutura básica de um tubo fotomultiplicador [7].....	19
FIGURA 5: Posicionamento dos detectores.....	21
FIGURA 6: Esquema do sistema de <i>Tracking</i> composto pelos detectores e pelo sistema de aquisição.....	22
FIGURA 7: Representação da tira cintiladora plástica e da fibra WLS [9].....	23
FIGURA 8: Fotografia das fibras WLS (<i>wavelength shifter</i>) [11].....	24
FIGURA 9: Fotografia da MaPMT de fabricação da Hamamatsu. [12].....	24
FIGURA 10: Representação de duas MaPMT indicando a dimensão de suas células. [13]....	25
FIGURA 11: Sinal típico de uma MaPMT para uma impedância de 50Ω [14].....	25
FIGURA 12: Estrutura do detector SciTile em 3D - realizada no <i>Software SolidWorks</i>	26
FIGURA 13: Painel de conectores do detector SciTile em 3D - realizada no <i>Software SolidWorks</i>	27
FIGURA 14: Diagrama do <i>setup</i> experimental do detector SciTile.....	28
FIGURA 15: Desenho esquemático do circuito de alimentação - realizado no <i>Software Altium Designer</i>	28
FIGURA 16: Desenho esquemático do circuito amplificador e filtro RC - realizado no <i>Software Altium Designer</i>	29
FIGURA 17: Desenho esquemático do circuito discriminador - realizado no <i>Software Altium Designer</i>	30
FIGURA 18: Sinal diferencial e ruído [22].....	31
FIGURA 19: Desenho esquemático do circuito de controle manual de <i>threshold</i> - realizado no <i>Software Altium Designer</i>	32
FIGURA 20: Desenho esquemático do circuito de controle digital de <i>threshold</i> - realizado no <i>Software Altium Designer</i>	33
FIGURA 21: Diagrama de controle digital de <i>threshold</i> [23].....	33
FIGURA 22: Condição de <i>start</i> e <i>stop</i> [27].	35

FIGURA 23: Interface gráfica do controle digital de <i>threshold</i> – desenvolvida no software LAZARUS.....	35
FIGURA 24: Simulação do circuito amplificador realizada no <i>Software Altium Designer</i>	36
FIGURA 25: (a) <i>Layer</i> superior do circuito protótipo de um canal; (b) <i>Layer</i> inferior do circuito protótipo de um canal.	37
FIGURA 26: LPKF Protomat C60 realizando a produção do circuito protótipo de um canal.	38
FIGURA 27: <i>Layer</i> superior do protótipo de um canal.	38
FIGURA 28: <i>Layer</i> inferior do protótipo de um canal.	38
FIGURA 29: Protótipo teste de um canal.	39
FIGURA 30: Medidas de tensão antes e depois do resistor de entrada, sua diferença e cálculo de corrente.	40
FIGURA 31: Gráfico de calibração do potenciômetro digital (AD5171).....	41
FIGURA 32: Diagrama do teste de amplitude, ruído e comunicação ECL.	43
FIGURA 33: Gráfico de frequência x <i>threshold</i>	43
FIGURA 34: Imagem demonstrativa de um pulso amplificado, mostrando as regiões de diferentes valores de <i>threshold</i> e fazendo referência às regiões do gráfico frequência x <i>Threshold</i>	44
FIGURA 35: Sinal de entrada do amplificador (C2) e sinal de saída do amplificador + filtros (C3)....	60
FIGURA 36: Sinal amplificado (C1), sinal ECL diferencial positivo (C2), sinal ECL diferencial negativo (C3), Sinal C2-C3 (M1).	60
FIGURA 37: Teste de qualidade e funcionamento do circuito protótipo de um canal.	61
FIGURA 38: Teste de comunicação com o potenciômetro digital (AD5171).....	61
FIGURA 39: Imagem de como o circuito da <i>front-end</i> de 16 canais será posicionado na estrutura.	62
FIGURA 40: Sistema de monitoramento de raios cósmicos. Contendo 4x MWPCs, 4x SciTiles e 10x PMTs.....	62
FIGURA 41: Desenho esquemático do circuito da <i>front-end</i> de 16 canais (parte 1) - realizado no <i>Software Altium Designer</i>	63
FIGURA 42: <i>Layer</i> inferior do circuito da <i>front-end</i> de 16 canais (parte 1).	63
FIGURA 43: <i>Layer</i> superior do circuito da <i>front-end</i> de 16 canais (parte 1).	63
FIGURA 44: Desenho esquemático do circuito da <i>front-end</i> de 16 canais (parte 2) - realizado no <i>Software Altium Designer</i>	64
FIGURA 45: <i>Layer</i> inferior do circuito da <i>front-end</i> de 16 canais (parte 2).	64
FIGURA 46: <i>Layer</i> superior do circuito da <i>front-end</i> de 16 canais (parte 2).	64

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

SiPM - *Silicon Photomultiplier*

CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

LAFEX - Coordenação de Física Experimental de Altas Energias do CBPF

LHCb - *Large Hadron Collider beauty*

MWPC - *Multi-Wire Proportional Chamber*

CERN - Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear

VME - *VERSA-Module Euro*

FPGA - *Field-Programmable Gate Array*

ECL - *Emitter-Coupled Logic*

SiPM - *Silicon Photomultiplier*

CNC - equipamento de fresa para confecção de circuito impresso

PCB - *Printed Circuit Board*

CAE - Chuveiro Atmosférico Extenso

GND - *Ground*

PMT - *Photomultiplier tubes*

SciTile – *Scintillator Tile*

WLS - *Wavelength Shifter*

MaPMT - *Multianode Photomultiplier Tubes*

SHV - *Safe High Voltage*

PC - *Personal Computer*

EPROM - *Erasable Programmable Read-Only Memory*

SMD - *Surface-Mount Device*

DIP - *Dual-Inline Package*

NIM - *Nuclear Instrumentation Module*

DC - *Direct Current*

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVO

O objetivo do projeto consiste no desenvolvimento e construção do protótipo de um canal da eletrônica de *Front-end* do detector de tiras cintilantes com leitura MaPMT. Esta eletrônica é composta pelo circuito de amplificação analógico, *shaper*, discriminação digital e transmissão de dados via sinais diferenciais ECL (*Emitter-Coupled Logic*) de alta velocidade e baixa suscetibilidade a ruído. O circuito é composto pelas seguintes partes:

- Um circuito amplificador e filtro analógico, em que o sinal oriundo da MaPMT é amplificado e filtrado, diminuindo os ruídos indesejáveis e aumentando a amplitude e largura do sinal;
- Um circuito discriminador digital, que possui como principal função a preservação do sinal oriundo da passagem de partículas pelas tiras cintilantes em detrimento do ruído eletrônico, tipicamente de menor amplitude;
- Um circuito de alimentação que fornece as tensões necessárias a alimentação do circuito a partir de uma tensão de 14V fornecida externamente;
- Uma interface gráfica possibilitando o controle do valor de *threshold* dos discriminadores através do PC;
- Um painel disponibilizando saída digital no formato ECL e cópias do sinal analógico amplificado.

1.2. MOTIVAÇÃO

Motivado pelo estudo do mundo subatômico, em particular na física envolvida nos raios cósmicos, novas tecnologias foram desenvolvidas, requerendo a participação de grandes colaborações internacionais. Além disso, o estudo sobre raios cósmicos é de grande importância para o incentivo no desenvolvimento de novas tecnologias, como aceleradores de partículas.

Com o objetivo de contribuir na construção de um sistema de *Tracking* de partículas elementares e na construção de um espectrômetro de raios cósmicos para o Projeto Antártico Brasileiro foi proposto o desenvolvimento de um detector de partículas com tiras cintiladoras plásticas de 16 canais denominado *SciTile*.

1.3. METODOLOGIA

Para a realização do que foi proposto, um estudo teórico foi essencial, tanto na parte da física de partículas quanto na experimental, incluindo os sensores e o *setup* do projeto. Após o estudo, o conhecimento adquirido ao longo do curso de engenharia eletrônica foi aplicado para projetar e construir um amplificador e discriminador de sinal e enviar esse sinal ao sistema de aquisição no formato ECL.

Após desenvolvimento dos esquemáticos do circuito protótipo de um canal, algumas simulações que analisam a amplificação do sinal foram realizadas para se obter o ponto ideal de amplitude e largura do pulso de saída, atendendo assim às necessidades do projeto. Em seguida, o desenvolvimento do *layout* do circuito protótipo foi efetuado, ambos através do *software Altium Designer*. Desenvolvido o *layout* do protótipo de um canal, foi realizada a produção da PCB (*Printed Circuit Board*) projetada em máquina CNC (equipamento de fresa para confecção de circuito impresso).

Após montagem dos componentes na PCB, foram realizados vários testes das partes do circuito protótipo, dentre eles: teste de alimentação +5V e - 5V, teste de amplificação do sinal, teste de controle manual de *threshold*, teste de discriminação do sinal, tendo como valor de referência o do circuito manual de *threshold*, e teste do circuito digital de *threshold*, primeiramente através de um terminal de computador e depois através de uma interface gráfica desenvolvida usando o programa LAZARUS. Após verificarmos o funcionamento do circuito, efetuamos testes de integridade dos sinais de saída, levando em conta sua amplitude, largura e ruído intrínseco do sistema. Com o funcionamento e sucesso em todos os testes do protótipo de um canal, começamos a desenvolver o circuito final de 16 canais, ainda em andamento.

CAPÍTULO 2

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Para um melhor entendimento do funcionamento deste projeto, uma breve explicação dos fenômenos físicos se faz necessária para que se prossiga com a descrição do que foi proposto.

2.1. RAIOS CÓSMICOS

O detector tem como principal objetivo a utilização no sistema *tracking* de partículas cósmicas. Sendo assim, um entendimento sobre raios cósmicos é essencial para estender seu funcionamento.

A todo momento recebemos a presença de raios cósmicos na superfície provenientes do sol e de explosões de estrelas. Entretanto, há uma classe de raios cósmicos bem menos comum que possuem uma quantidade de energia elevada, mais de 10^8 eV, que são os raios ultra energéticos. A origem desses raios ultra energéticos ainda não é completamente conhecida, possivelmente originadas de explosões de supernovas. A compreensão da origem e a formação desses raios traz grandes contribuições para a Física no campo de partículas elementares e do mecanismo de aceleração de partículas ultra energéticas[1].

O primeiro físico a perceber que havia um intenso fluxo de radiação proveniente do espaço foi o austríaco Victor Franz Hess, e sua descoberta lhe rendeu o prêmio Nobel de 1936. Antigamente, pensava-se que a influência na leitura de um contador Geiger vinha de isótopos radioativos oriundos da crosta terrestre. Vitor Hess, então, realizou um experimento no qual monitorou um contador Geiger em pontos de maior altitude, percebendo que a medida em que a altitude aumentava o contador mantinha sua taxa de contagem. Entretanto, quando Hess levou o contador Geiger em um balão a 5 mil metros da superfície, notou que o contador aumentava a contagem, ao contrário do que se esperava. Sendo assim, a hipótese de influência dos isótopos do interior da crosta terrestre foi descartada e deduziu-se que essa radiação vinha da alta atmosfera, começando assim o estudo sobre raios cósmicos [1].

Os raios cósmicos são partículas elementares estáveis, prótons em sua maioria, de alta energia, que colidem constantemente com moléculas da sua atmosfera, principalmente nitrogênio e oxigênio [2].

A cadeia de eventos que se inicia após a interação de um raio cósmico, com energia ultrarrelativística, com uma molécula da alta atmosfera terrestre é denominada de CAE

(Chuveiro Atmosférico Extenso), mostrado na Figura 1. Os produtos da primeira interação movimentam-se aproximadamente na mesma direção do primário, dando origem a uma cascata de outras interações e podendo gerar um número (os denominados secundários) superior a 10^6 partículas. Um CAE é composto basicamente por 90% de elétrons, pósitrons e fótons, 9% de partículas alfa e 1% de partículas hadrônicas (prótons energéticos e píons carregados) [2].

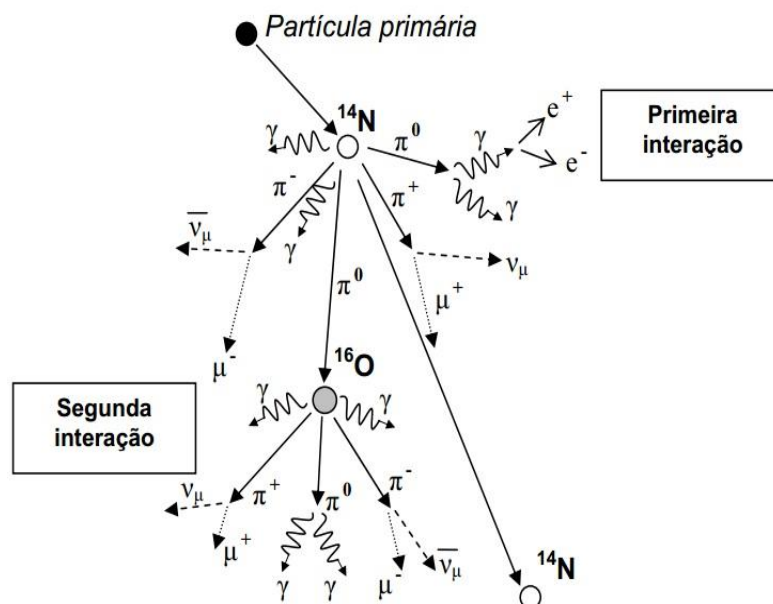


Figura 1: Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE) [2].

A primeira colisão produz em sua maioria partículas denominadas de mésons, píons e káons. Os mésons, em especial, decaem antes de interagirem e dão origem aos múons. A quantidade média de partículas produzidas nessa interação depende da energia do primário e do parâmetro de impacto da colisão. O número de partículas de um CAE ao nível do mar pode alcançar dezenas de milhares de partículas e a componente muônica representa até 15% do total de partículas carregadas [2].

Os múons são partículas elementares carregadas, com massa duzentas vezes maior que a massa do elétron, são instáveis e tem vida média de aproximadamente dois microssegundos. Os múons também decaem em outras partículas, tendo como principal canal de decaimento, a produção de elétrons (e^-), pósitrons (e^+), neutrino do elétron (ν_e), neutrino do múon (ν_μ), antineutrino do elétron ($\bar{\nu}_e$) e antineutrino do múon ($\bar{\nu}_\mu$) [2].

A maioria das partículas produzidas nestes chuvers é absorvida pela atmosfera alta, exceto os múons e neutrinos, que devido a pequena energia perdida no processo de ionização e longo tempo de vida atravessam a atmosfera sem sofrer grandes deflexões. Na Figura 2 é mostrado o gráfico da concentração destas partículas nas diferentes altitudes da atmosfera.

Como não são absorvidos pela atmosfera, os múons consistem nas partículas carregadas da radiação cósmica mais abundantes [2].

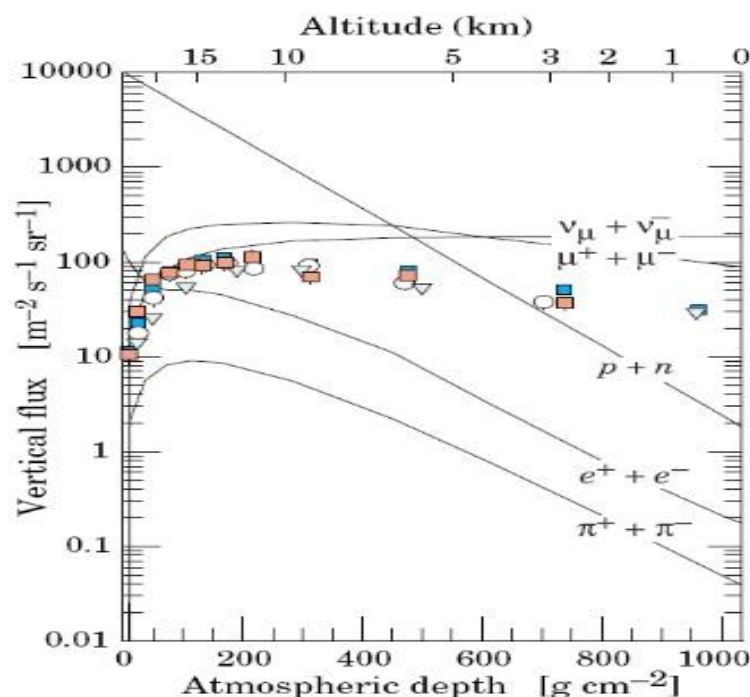


Figura 2: Gráfico da concentração de partículas em diferentes altitudes [2].

O gráfico acima, em escala logarítmica, demonstra como se comportam diversas partículas para diferentes altitudes. Na atmosfera alta encontramos grandes concentrações de prótons e nêutrons provenientes do espaço diminuindo à medida que chegam à superfície terrestre. Já elétrons e píons que são formados a partir das colisões de raios cósmicos primários com átomos da alta atmosfera, são gradualmente absorvidos, ou seja, interagem com a matéria enquanto diminuem a altitude [2].

Os múons e neutrinos se comportam de modos diferentes do resto das partículas. Eles passam pela atmosfera sem serem completamente absorvidos. Isso é mostrado no gráfico da Figura 2 [2].

Os múons chegam à superfície da Terra com velocidades próximas a da luz, com um valor médio $v = 2,992 \times 10^8$ (m/s). O tempo que os múons levam para percorrer os 15 km de atmosfera é dado por $T = 50,13 \times 10^{-6}$ (s) [2].

No Brasil, um dos mais conhecidos físicos e pesquisadores no ramo de raios cósmicos é o brasileiro César Lattes. O professor César Lattes, também criador do Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia do Instituto de Física "Gleb Wataghin" da UNICAMP, em 1946, na Bolívia, descobriu a existência do méson π , partícula com massa maior que elétron e inferior ao próton [3].

2.2. MWPC, CINTILADORES PLÁSTICOS E PMT

2.2.1. MWPC

Os detectores MWPC (*Multi-Wire Proportional Chamber*) são um tipo detector de ionização gasosa sensível a partículas carregadas e fótons.

O MWPC é preenchido com um gás composto geralmente por uma mistura de argônio e CO_2 que se ioniza pela passagem de partículas carregadas e fótons. Os íons e os elétrons resultantes são acelerados pelo campo elétrico criado em torno de alta tensão existente no centro do volume do detector, provocando uma cascata de ionização e fornecendo como resultado uma corrente elétrica mensurável, acima do ruído intrínseco do detector. Isto permite a contagem de partículas a determinação de sua energia [4].

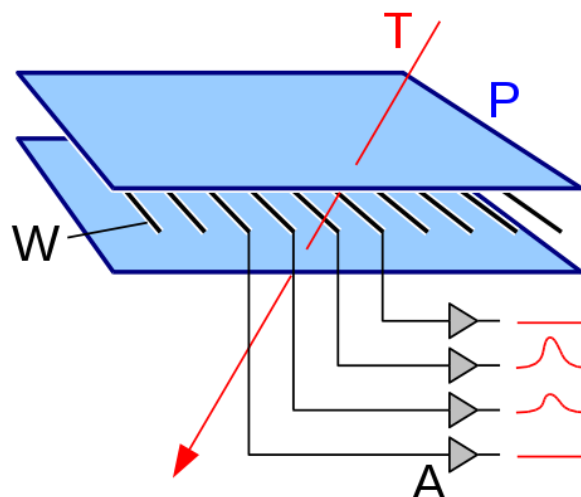


Figura 3: MWPC. As partículas T que passarem são ionizadas e liberam carga que será coletada pelo amplificador [5].

2.2.2. Cintiladores Plásticos

Emitir luz em consequência da absorção de energia é uma propriedade presente em uma gama de materiais. A absorção desta energia promove um dos elétrons do átomo para níveis orbitais mais energéticos porém instáveis. A desexcitação destes elétrons ocorre na forma da emissão de um fóton. A observação deste fóton em dispositivos fotomultiplicadores consiste então na assinatura da passagem das partículas pelo detector. Os materiais cintiladores utilizados na detecção de partículas precisam conter as seguintes propriedades [6]:

- Converter a energia cinética de partículas carregadas em luz com alta eficiência quântica;

- Ser transparente, de modo que a luz possa ser transmitida a um dispositivo capaz de captá-la;
- O processo de emissão deve ter curta duração, para que seja viável a contagem de partículas sem grandes atrasos.
- Material ter boa qualidade óptica e fácil de ser produzido em dimensões necessárias para serem utilizadas como detector;
- Índice de refração perto do vidro para permitir o acoplamento do cristal com a fotomultiplicadora.

2.2.3. PMT

A PMT (*photomultiplier tubes*) tem a função de gerar uma corrente mensurável em decorrência da chegada de pequena quantidade de fótons. A estrutura básica de uma fotomultiplicadora tem como componentes principais: o fotocatodo, a óptica de focalização de elétrons, os dinodos e o anodo [7].

O processo de multiplicação se inicia com a transferência da energia do fóton para um elétron no fotocatodo seguido da migração do elétron até a superfície do fotocatodo e o transporte do elétron até o primeiro dinodo. Após esse processo, os elétrons são conduzidos num processo de multiplicação até o anodo, como mostrado na Figura 4 [7]:

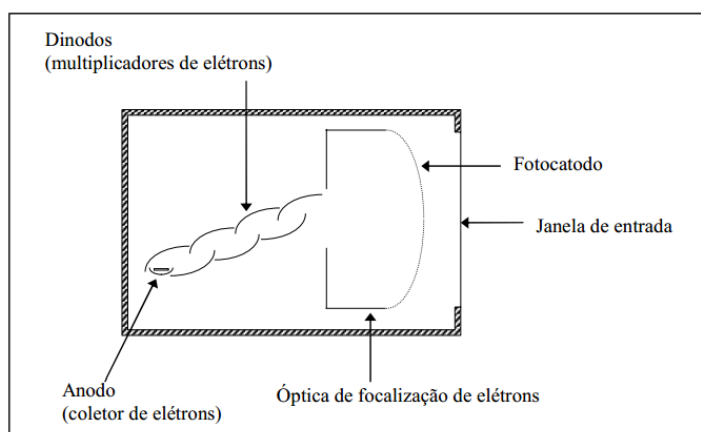


Figura 4: Estrutura básica de um tubo fotomultiplicador [7]

A óptica de focalização de elétrons é composta por eletrodos que geram um campo elétrico que guia os elétrons para a superfície do primeiro dinodo. Uma diferença de potencial é aplicada entre os próximos dinodos, de modo que os elétrons são acelerados e geram novos elétrons nos choques com as superfícies. O material da superfície dos dinodos é escolhido para que cada elétron incidente provoque a emissão vários elétrons na mesma superfície. É possível

que, com uma diferença de potencial de 100 V aplicada entre dinodos, cada elétron produza cerca de 30 novos elétrons, mas apenas uma pequena fração atinge o próximo dinodo, já que muitos não chegam a se desprender da superfície [7].

Portanto, estrutura fotomultiplicadora composta pelos dinodos fornece um ganho em corrente elétrica. Com n dinodos o ganho é expresso por $G = \alpha\delta^n$, onde α é a fração de fotoelétrons coletados. O valor de δ é próximo de 5 para os dinodos convencionais. Seu valor depende naturalmente da tensão entre dinodos. Ganhos da ordem de $10^6 \sim 10^7$ são atingíveis com fotomultiplicadoras de 10 estágios [7].

Capítulo 3

3. SISTEMA DE *TRACKING*

3.1. DESCRIÇÃO GERAL

O sistema de trajetória de partículas ionizantes (*Tracking*), tem o objetivo de reconstruir o trajeto da partícula ao passar pelos detectores. Através de cálculos de geometria espacial, tempo de detecção e a posição xy , é possível obter os ângulos de incidência, velocidade e o valor aproximado do trajeto dessa partícula.

3.2. DETECTORES + ELETRÔNICA DE *FRONT-END* UTILIZADOS

O *setup* do sistema *tracking* será composto por cinco detectores: três MWPC (*Multi-Wire Proportional Chamber*) já disponíveis e operativos, trazidos do CERN, e dois detectores de tiras cintilantes (*SciTile*). Os detectores *SciTile* serão utilizados como um *trigger* do sistema, ou seja, são responsáveis por informar se existe coincidência entre sinais em ambos os detectores, eliminando sinais descorrelacionados criados por ruídos nos detectores e em sua eletrônica, selecionando assim eventos promovidos pela passagem de partículas ionizantes ao longo do sistema. Quando este critério não é satisfeito o *trigger* não é enviado, descartando os dados resultantes.

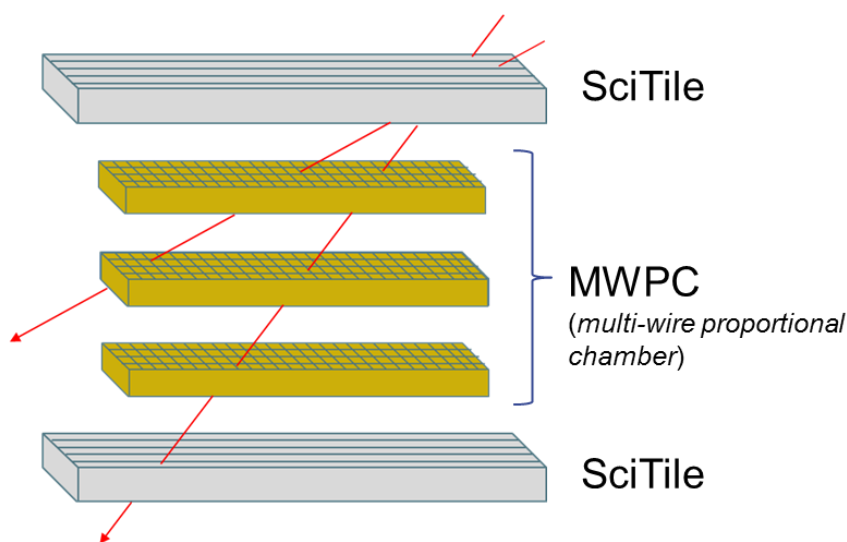


Figura 5: Posicionamento dos detectores.

Para o funcionamento do detector *SciTile*, uma eletrônica para tratar o sinal proveniente da passagem da partícula e envio desses dados, faz-se necessária. A proposta do projeto é a elaboração do circuito amplificador e discriminador desses detectores *SciTile*.

3.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (*DATA ACQUISITION*)

Os sinais digitalizados gerados pela eletrônica de *Front-End* dos detectores são então enviados para o sistema de aquisição. O sistema de aquisição é composto por um CRATE VME (*VERSA-Module Euro*) e um módulo V1495 [8], com uma FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) responsável pela captação desses dados em formato ECL, implementação de lógica entre os sinais digitais e envio para um PC, na qual serão armazenados e analisados.

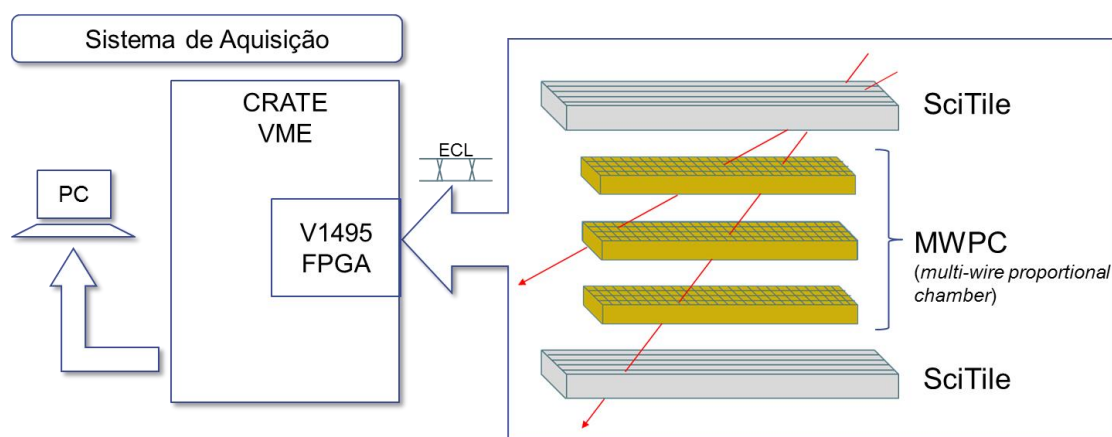


Figura 6: Esquema do sistema de *Tracking* composto pelos detectores e pelo sistema de aquisição.

CAPÍTULO 4

4. DESENVOLVIMENTO DO DETECTOR *SCITILE*

O detector *SciTile* é composto pelas seguintes partes:

- Mecânica/óptica: contando com uma estrutura em alumínio responsável pelo suporte das outras partes, bloqueio da entrada de luz e acoplamento mecânico entre a fibra WLS e a MaPMT. Este acoplamento é viabilizado pela construção de um suporte de polietileno para alojar a MaPMT;
- Tiras cintilantes: responsável pela detecção de partículas;
- Fibras *wavelength shifter* (WLS): responsável pela condução dos fótons gerados pelos cintiladores plásticos até a MaPMT. É também responsável pela mudança do comprimento de onda gerado pelos cintiladores em outro mais adequado a MaPMT (descrita a seguir);
- MaPMT (*Multianode Photomultiplier Tubes*): responsável pela conversão dos fótons em corrente para ser enviada e tratada pelo circuito;
- Eletrônica: composta por 16 circuitos analógicos (circuito amplificador e filtros) e 16 circuitos digitais (circuito discriminador).

4.1. TIRAS CINTILANTES

As tiras cintilantes são compostas por materiais cintiladores que geram fótons na passagem de uma partícula atômica. Tais tiras possuem um película refletiva em sua estrutura, fazendo com que o fóton gerado seja refletido até chegar na fibra WLS, como mostrado na Figura 7.

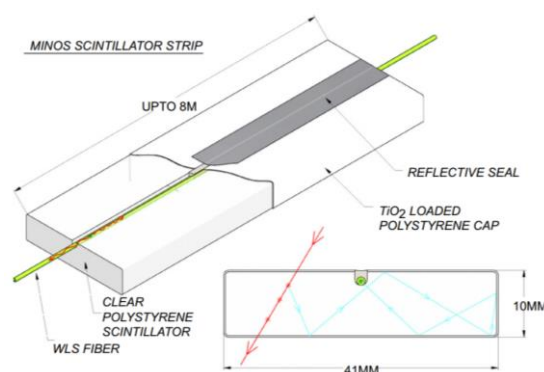


Figura 7: Representação da tira cintiladora plástica e da fibra WLS [9].

4.2. FIBRA WLS

As fibras *wavelength shifter* (WLS) são compostas por um material fosforescente que absorve fótons de altas frequências e os emite em baixa frequência. Estes materiais costumam absorver um fóton e emitir múltiplos fótons de baixa energia. Dessa forma, esse material pode ser usado para aumentar a eficiência da fotomultiplicadora conectada à ele [10].



Figura 8: Fotografia das fibras WLS (*wavelength shifter*) [11].

4.3. MAPMT

A MaPMT (*Multianode Photomultiplier*) é uma fotomultiplicadora de vários canais que possui a função de gerar um pulso de corrente devido à detecção de fótons em suas células. O pulso de corrente gerado nesse processo é enviado e tratado por um circuito amplificador e discriminador.

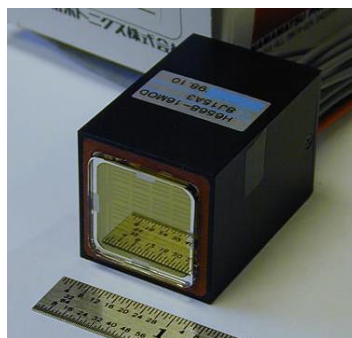


Figura 9: Fotografia da MaPMT de fabricação da Hamamatsu. [12].

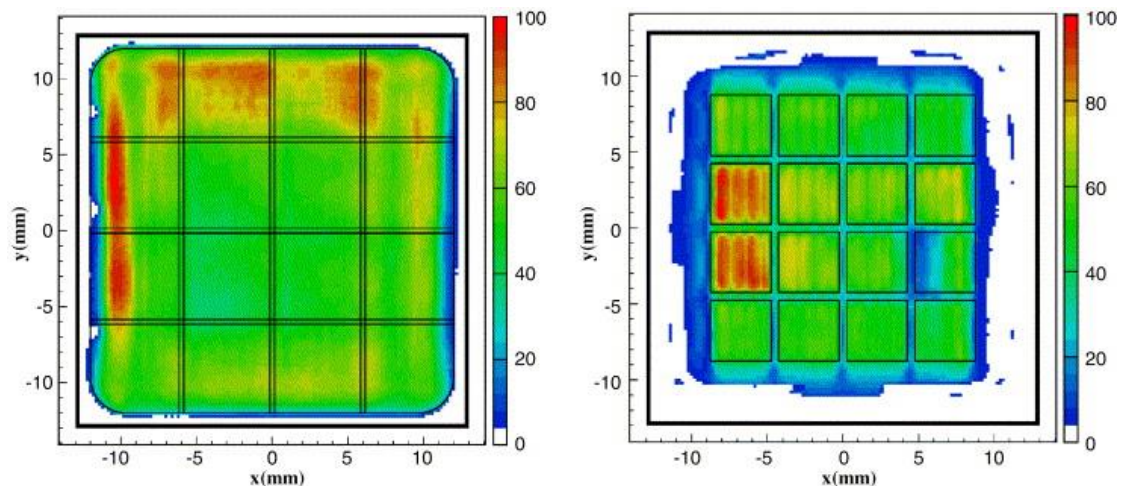


Figura 10: Representação de duas MaPMT indicando a dimensão de suas células. [13].

A corrente máxima gerada pelo acionamento de uma das células da MaPMT está entre -150uA e -300uA, tendo seu valor típico de -200uA. Este sinal ao ser injetado num circuito com impedância de $50\ \Omega$ tem como resultado uma tensão de aproximadamente -10 mV.

Typical Time Response

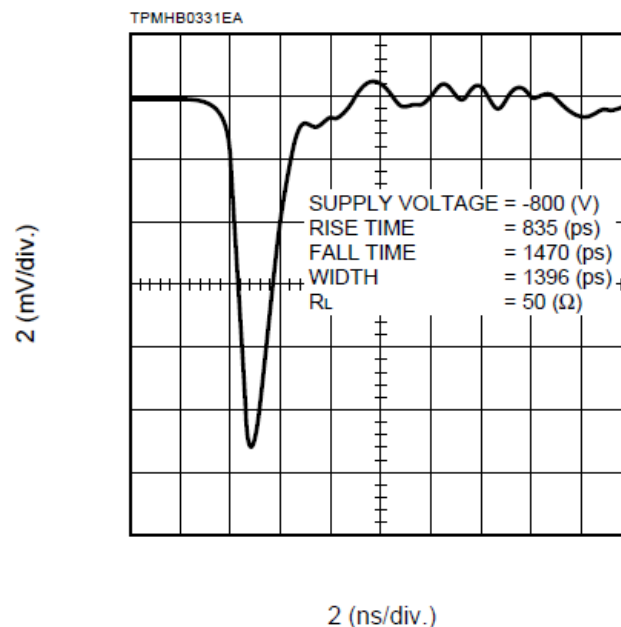


Figura 11: Sinal típico de uma MaPMT para uma impedância de $50\ \Omega$ [14].

4.4. MECÂNICA/ÓPTICA

A estrutura do detector, construída em alumínio, tem como requerimento o completo isolamento da luz externa, garantindo que todo o fóton que chega na MaPMT seja proveniente apenas da passagem de partículas subatômicas.

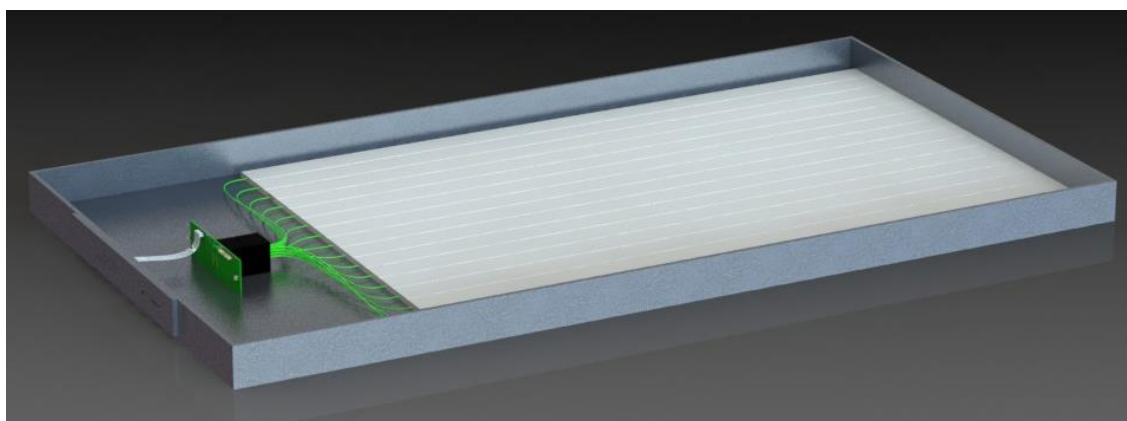


Figura 12: Estrutura do detector SciTile em 3D - realizada no *Software SolidWorks*.

Em sua estrutura há um painel contendo:

- 18 conectores LEMO (16 com saída analógica do sinal amplificado e dois auxiliares para qualquer leitura do circuito);
- Dois conectores Banana para a alimentação de +14v do circuito;
- Um conector SHV para a alta tensão -900V referente a alimentação da MaPMT;
- Um conector *Header 2x17* (disponibilizando 16 canais para comunicação digital do discriminador através da lógica diferencial ECL e 2 canais auxiliares para qualquer leitura do circuito);
- Um conector *Header 2x6* utilizado na comunicação entre o circuito de controle digital de *threshold* e o PC;

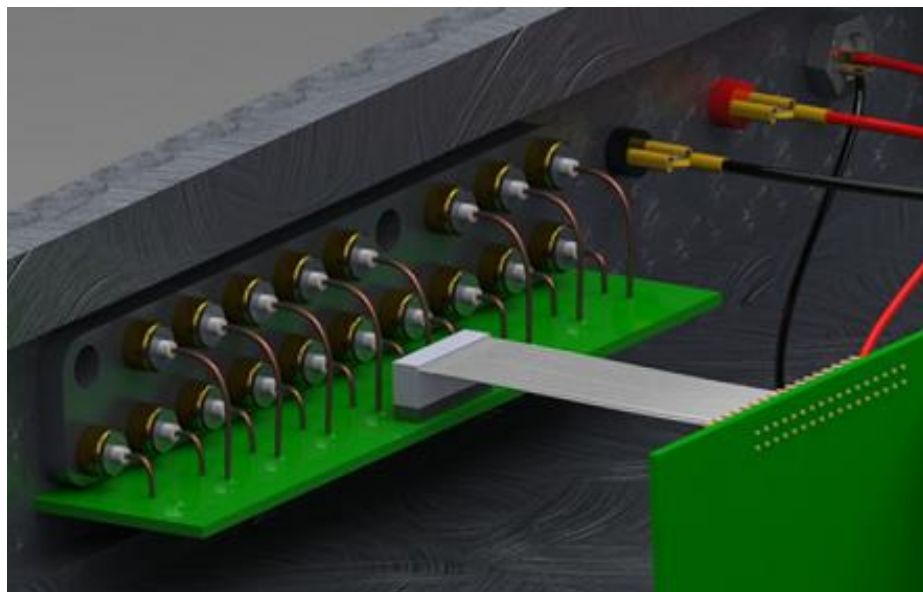


Figura 13: Painel de conectores do detector SciTile em 3D - realizada no *Software SolidWorks*.

A parte óptica está relacionada ao posicionamento das tiras cintilantes, as fibras WLS e a MaPMT. Esta parte possui grande importância para se obter melhor eficiência na detecção de partículas, pois qualquer mudança na curvatura das fibras WLS afeta diretamente na condução dos fótons até a MaPMT. No Apêndice E, é possível visualizar mais imagens em 3D do detector e do sistema de monitoramento de raios cósmicos.

4.5. ELETRÔNICA (16 CANAIS: ANALÓGICOS E DIGITAIS)

Está sendo desenvolvido uma eletrônica de *front-end* de 16 canais composta por cinco circuitos principais:

- Circuito de alimentação;
- Circuito amplificador;
- Circuito discriminador;
- Circuito de controle manual de *threshold*;
- Circuito de controle digital de *threshold*.

Na Figura 14, podemos observar um diagrama representativo dessa eletrônica de *front-end* de 16 canais, indicando a comunicação entre os circuitos, os periférico e instrumentos que são usados no *setup* experimental bem como os sinais enviado/recebido de cada etapa.

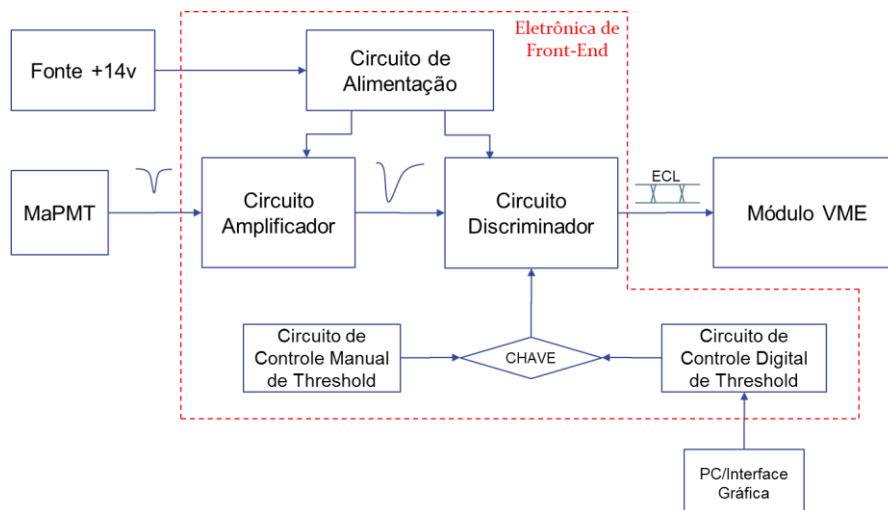


Figura 14: Diagrama do *setup* experimental do detector SciTile.

No Apêndice F é possível visualizar os desenhos esquemáticos e *layout* da eletrônica de *front-end* de 16 canais.

4.5.1. Circuito de Alimentação

O circuito de alimentação [15] tem a função de, a partir de uma tensão de entrada de +12 V até +35 V, prover uma tensão de +5 V e -5 V para alimentar todos os outros circuitos. O circuito é composto principalmente por dois reguladores de tensão, um MC7810 [16] com saída de +10 V e outro MC7805 [17] com saída de +5 V, e capacitores de filtro.

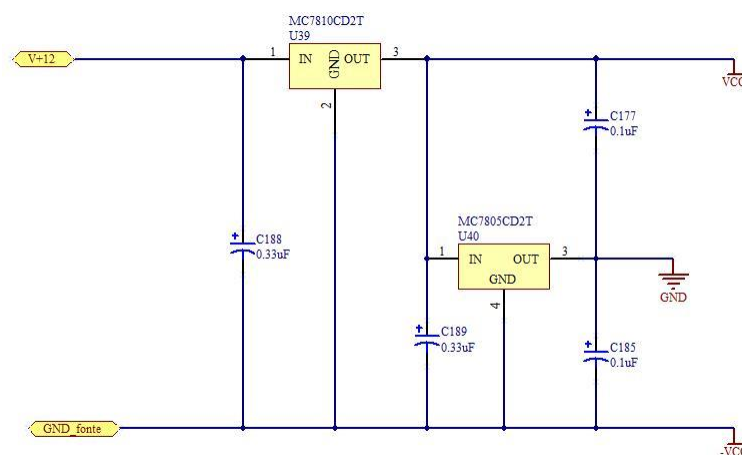


Figura 15: Desenho esquemático do circuito de alimentação - realizado no *Software Altium Designer*.

Os reguladores agem como duas fontes independentes de tensão, em que a tensão fornecida não se altera para diferentes valores de impedância do circuito. Note que neste circuito o GND da saída é distinto do GND da fonte externa.

4.5.2. Circuito Amplificador

O sinal vindo da MaPMT não possui uma amplitude e largura que possa ser discriminado, por isso um circuito amplificador [18] [19] não inversor foi projetado. O amplificador foi projetado com um ganho de aproximadamente 200 e acrescentado em sua saída dois filtros, um passa-alta, com intuito principal de eliminar sinal DC e um passa-baixa, que teve função de alongar o sinal de 2 ns vindo da MaPMT para aproximadamente 20 ns, facilitando assim sua digitalização e menor que a janela de tempo de 25 ns definida para o sistema existente no laboratório, que não detectava com eficiência sinais menores de 10 ns. Esse módulo N843 seria utilizado como alternativa caso não houvesse sucesso no desenvolvimento do discriminador. Abaixo podemos visualizar o desenho esquemático do circuito amplificador:

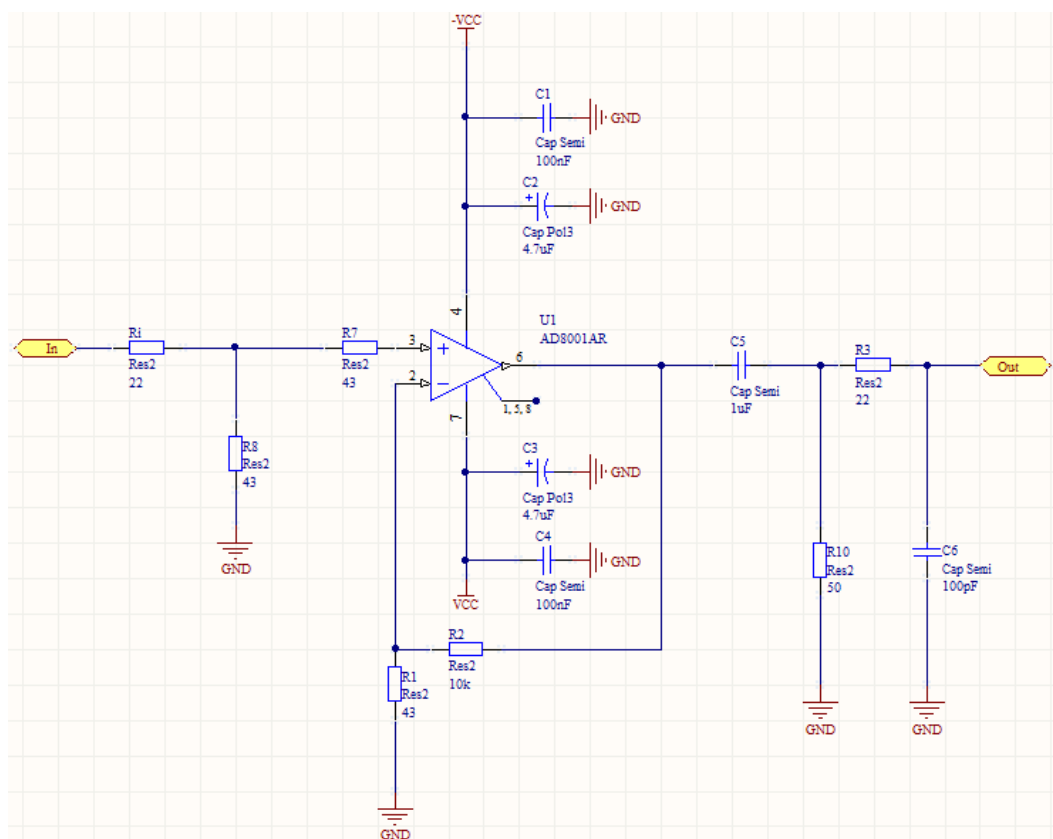


Figura 16: Desenho esquemático do circuito amplificador e filtro RC - realizado no *Software Altium Designer*.

O amplificador foi projetado com um ganho maior que o desejado, pois seu sinal de saída, ao passar pelo filtro passa-baixa, perde amplitude. O circuito final apresenta ganho de 13.

Os valores de resistência e capacitância dos filtros RC foram escolhidos de forma que sua frequência de corte inferior eliminasse o sinal DC e a frequência de corte superior alongasse o sinal de saída do amplificador para aproximadamente 20 ns. Os valores de resistência e capacitância dos filtros foram definidos a partir dos valores ideais de amplitude e largura do pulso. Como resultado, tivemos uma frequência de corte inferior de 3.183 KHz e de corte superior de 72.343 MHz. As frequências de corte superior e inferior podem ser calculadas através da Equação 1:

$$Fc = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \quad (1)$$

4.5.3. Circuito Discriminador

Detectores em geral tem a característica de fornecer sinais de maior amplitude que seu ruído intrínseco. A etapa final na discriminação de sinal e ruído é realizada através da comparação dos mesmos com uma tensão de referência (*threshold*). Quando identificado um sinal, ele é transformado em um pulso diferencial e no formato ECL. O circuito discriminador é composto basicamente por um comparador de alta velocidade e baixa tensão, capaz de operar até 800 MHz, possibilitando leitura de sinais com larguras de pulso maiores que 625 ps.

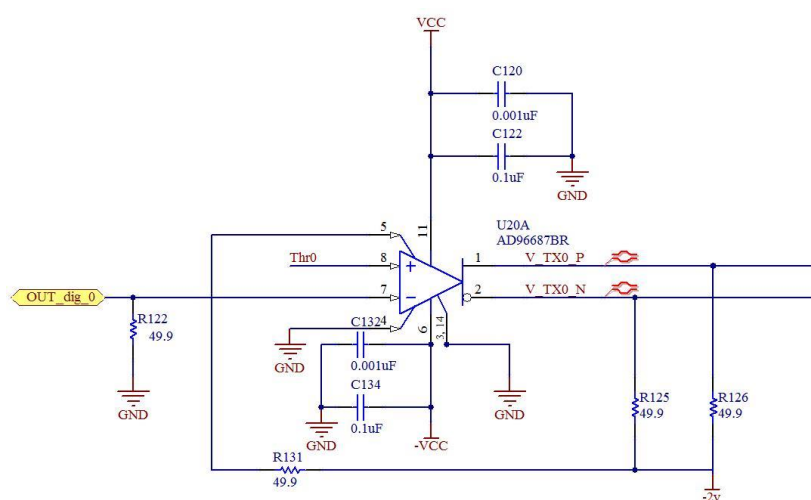


Figura 17: Desenho esquemático do circuito discriminador - realizado no *Software Altium Designer*.

O comparador age da seguinte forma: o sinal na entrada inversora, vindo do amplificador, é subtraído do sinal de referência (*threshold*) na entrada não-inversora. Quando o resultado dessa subtração é positivo, um pulso ECL é gerado. O comparador, por ser de saída diferencial ECL, possui duas saídas, uma diferencial positiva (pino 1) e uma diferencial negativa (pino 2). Depois de enviado para o sistema de aquisição, esses sinais são subtraídos. O Padrão ECL tem como características principais sua baixa amplitude de sinal, permitindo uma maior velocidade na transmissão de dados e menor suscetibilidade à ruído decorrentes das linhas de transmissão e capacitâncias parasitas [21]. A Figura 18 explica como o ruído agregado à um sinal diferencial é eliminado:

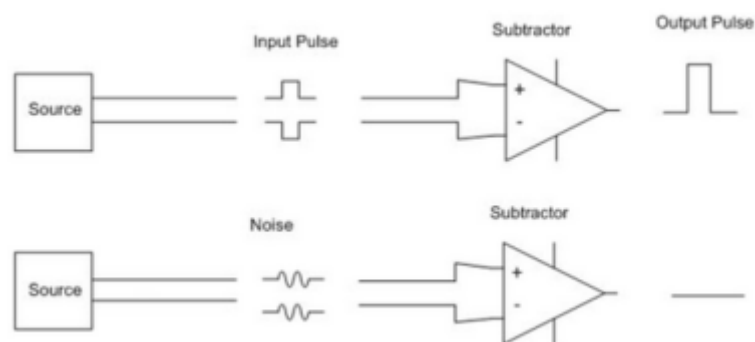


Figura 18: Sinal diferencial e ruído [22].

O ruído proveniente do circuito, da fonte de alimentação e temperatura, está presente em ambos os sinais diferenciais, positivo e negativo. Sendo assim, pelo ruído possuir a mesma fase, ao ocorrer a subtração do sinal diferencial positivo e negativo, ele é eliminado, como mostrado na Figura 18.

O valor de referência do comparador pode ser configurado de duas formas: pelo circuito manual de *threshold* ou pelo circuito digital de *threshold*. Sua escolha se dá através de um conector *header* agindo como uma chave.

4.5.4. Circuito Manual de *Threshold*

O circuito manual de *threshold* tem a função de fornecer a tensão de referência para o discriminador. Seu funcionamento se dá a partir de um divisor resistivo de tensão, que tem sua resistência ajustada através de um *trimpot* (resistor variável).

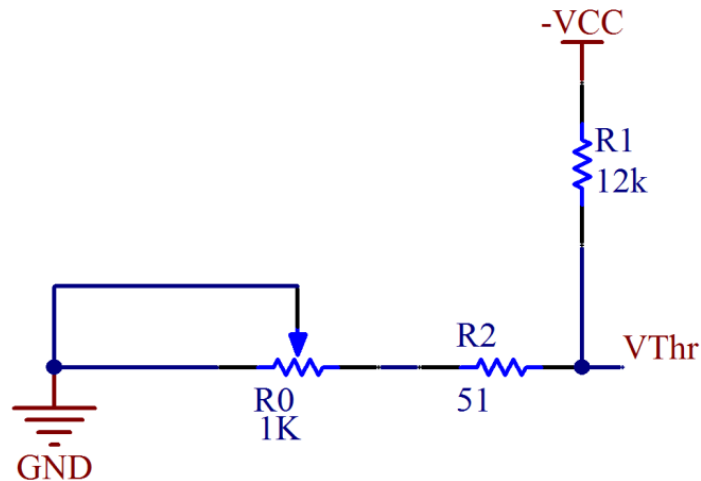


Figura 19: Desenho esquemático do circuito de controle manual de *threshold* - realizado no *Software Altium Designer*.

Tendo $-V_{cc} = -5,00\text{ V}$, $R1 = 12\text{ K}\Omega$ e $R2 = 51\text{ }\Omega$, a tensão “VThr” gerada por esse divisor, segue a Equação 2:

$$V_{Thr} = \frac{-5\text{ V} \times (51\text{ }\Omega + R0)}{51\text{ }\Omega + R0 + 12\text{ k}\Omega} \quad (2)$$

A resistência máxima do trimpot R0, $1\text{ K}\Omega$, foi calculada de modo a obter “Vthr” operando numa faixa de -21 mV a -403 mV , segundo a Equação 2.

4.5.5. Circuito Digital de *Threshold*

O circuito digital de *threshold*, assim como o manual, possui a função de configurar uma tensão de referência para o circuito discriminador. Seu ajuste se dá de forma digital, através de uma interface gráfica no computador. O circuito discriminador do protótipo de um canal é composto basicamente por um potenciômetro digital (AD5171 [23]) de $10\text{ K}\Omega$ com 64 posições, um microcontrolador ATMEGA328 [24] ligado à uma placa ARDUINO [25] e um circuito amplificador inversor que fornece a tensão máxima para o controle de *threshold*.

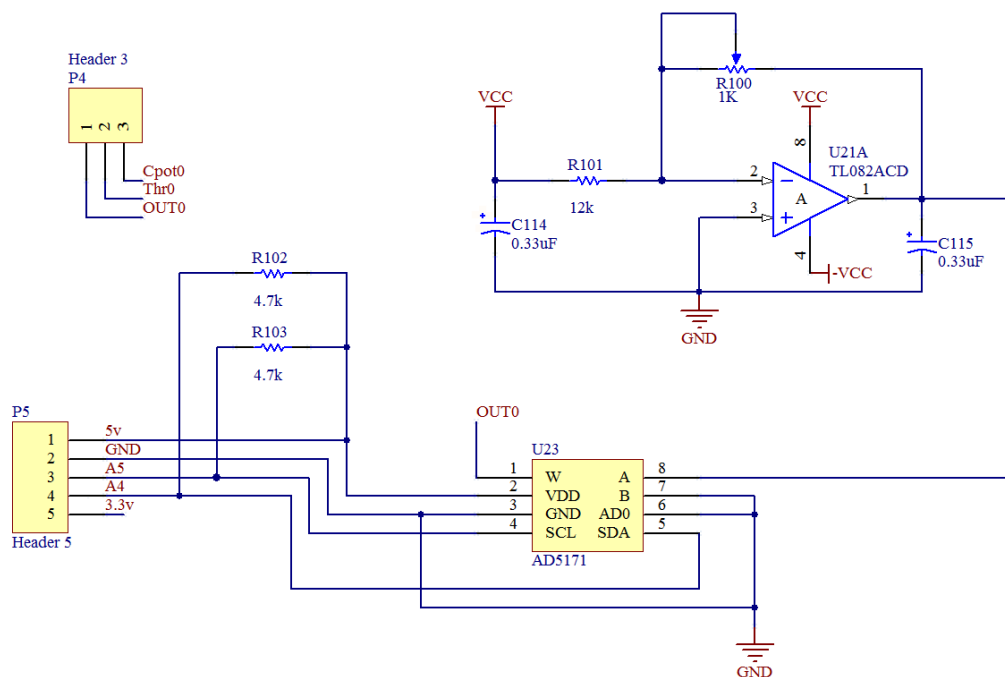


Figura 20: Desenho esquemático do circuito de controle digital de *threshold* - realizado no *Software Altium Designer*.

O circuito amplificador inversor possui um ganho máximo de -0.083 e fornece o ajuste da tensão máxima para o *threshold* em sua saída de 0 mV até -417 mV, adequado para um sinal amplificado com uma faixa dinâmica de 0 a -200 mV. O conector “P5” faz a comunicação do potenciômetro digital com o ARDUINO, seus pinos analógicos “A4” e “A5” são, respectivamente, responsáveis pelo envio de dados e *clock* para programação do potenciômetro digital via protocolo I2C. A Figura 21 representa as etapas desse processo.

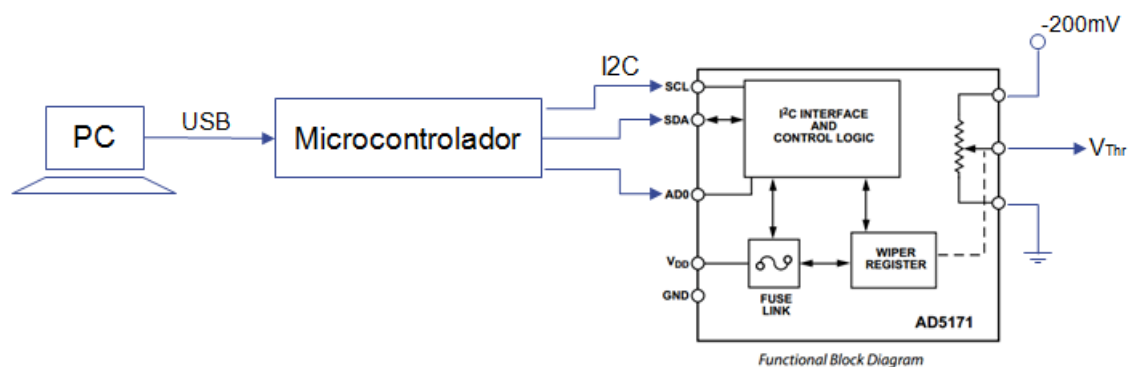


Figura 21: Diagrama de controle digital de *threshold* [23].

O valor do *threshold* é escolhido através de interface gráfica desenvolvida em *freepascal* através do *software* LAZARUS. Seu valor é transformado em bits que representam a posição do potenciômetro digital correspondente aquela tensão de *threshold*. Os bits são enviados para o ARDUINO de forma serial através do USB. O microcontrolador escreve os bits em uma memória EPROM e os envia para o potenciômetro digital através do protocolo I2C. Tendo a posição do potenciômetro correspondente à tensão de *threshold* desejada, ao final é acrescentado um divisor de tensão com sua tensão máxima de -200 mV, vinda do amplificador não-inversor como mostrado na Figura 20. O Código foi elaborado de forma que o valor inicial da posição do potenciômetro digital sempre seja o último valor configurado pela interface, valor esse gravado e lido na memória EPROM do microcontrolador. Isso permite que o uso do computador seja opcional, caso o valor de *threshold* já tenha sido configurado anteriormente. O código fonte do microcontrolador ATMEGA328 pode ser visualizado no Apêndice A.

O potenciômetro digital utilizado no protótipo de um canal possui uma resolução de 64bits e resistência máxima de 10 k Ω , tendo sua resolução encontrada através da Equação 3:

$$k = \frac{FE}{2^n - 1} \quad (3)$$

Onde “k” é a sua resolução, “FE” o fundo de escala de 10 k Ω e “2ⁿ” seu valor nominal de 64 posições. Sendo assim, possuímos um passo de 160 Ω , que através do divisor de tensão na saída de -200mV, na teoria, obteremos valores de *threshold* múltiplos de -3.17 mV.

O protocolo I2C é um método de transmissão de dados entre dois dispositivos na qual possui duas vias de comunicação: serial data (SDA) e serial *clock* (SCL). As duas vias são bidirecionais e enquanto o barramento está livre, ficam em nível lógico alto. O dado na linha SDA precisa ser estável durante o período alto do *clock*. A transição do nível lógicos alto e baixo só pode ocorrer quando o sinal de *clock* estiver baixo [26]. Durante o processo de transmissão de dados dois sinais são caracterizados como condições de *start* e *stop*. A transição do nível lógico alto para o baixo na linha SDA, enquanto a linha SCL está em nível lógico alto, caracteriza a condição de *start*. Já a transição do nível lógico baixo para o alto na linha SDA, enquanto a linha SCL está em nível lógico alto, se refere a condição de *stop* [27]. A Figura 22 mostra as condições de *start* e *stop*.

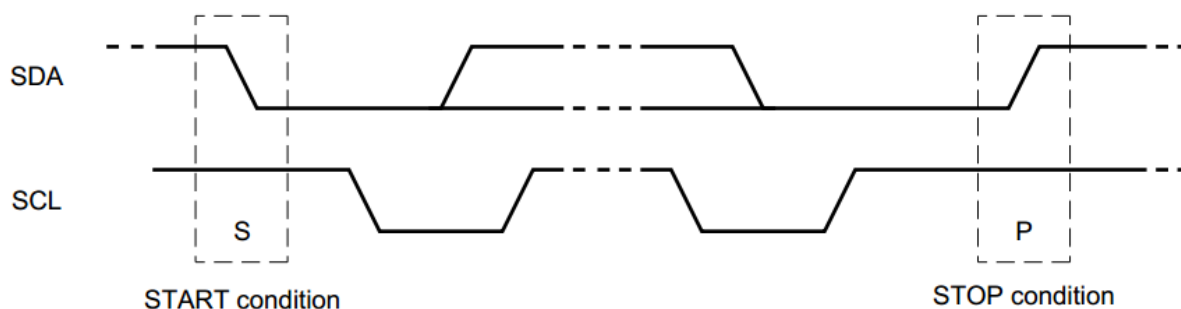


Figura 22: Condição de *start* e *stop* [27].

4.5.6. Interface Gráfica do Controle Digital de *Threshold*

A escolha de uma interface gráfica para o controle de *threshold* digital foi feita para facilitar sua configuração e ter acesso a esses valores configurados sem o auxílio de aparelhos de medição. Na interface gráfica, é possível estabelecer a comunicação serial com o ARDUINO, digitar o valor de *threshold* desejado e visualizar o seu valor atual. A interface foi criada para atender a *front-end* de 16 canais, de forma que possui 16 *checkbox* para informar qual canal está sendo configurado e um botão para o envio desse valor. Ao lado de cada *checkbox* é informado o valor atual do *threshold*. O código fonte da interface gráfica pode ser visualizado no Apêndice B. Na Figura 23 é possível observar a versão final da interface em funcionamento para o protótipo de um canal, sendo apenas esse habilitado.

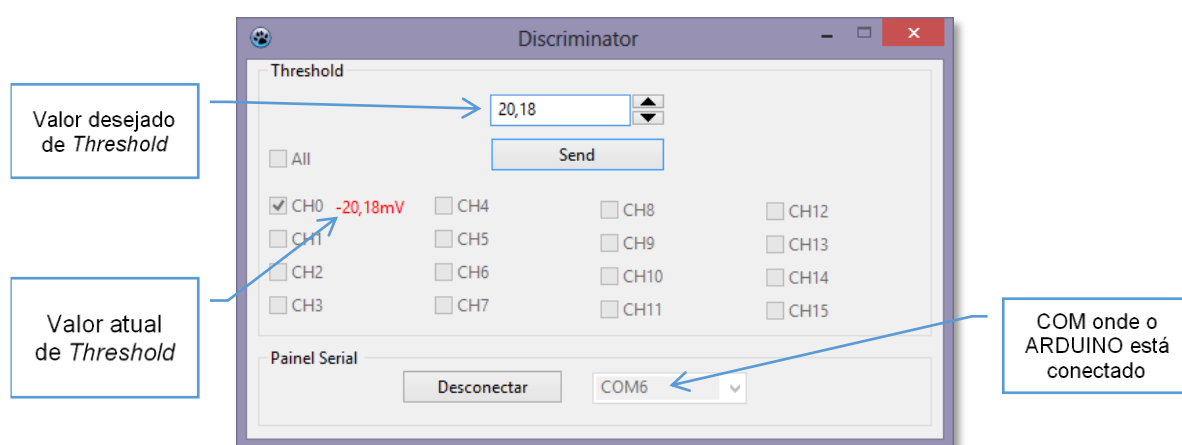


Figura 23: Interface gráfica do controle digital de *threshold* – desenvolvida no software LAZARUS

Capítulo 5

5. RESULTADOS

5.1. SIMULAÇÃO

Antes da montagem foi realizada a simulação do circuito através do *software Altium Designer* para verificar o sinal amplificado em resposta à um pulso similar da MaPMT. Para tal simulação, utilizamos o código *spice* do CI amplificador AD96687 [28], fornecido no próprio site da fabricante do software [29].

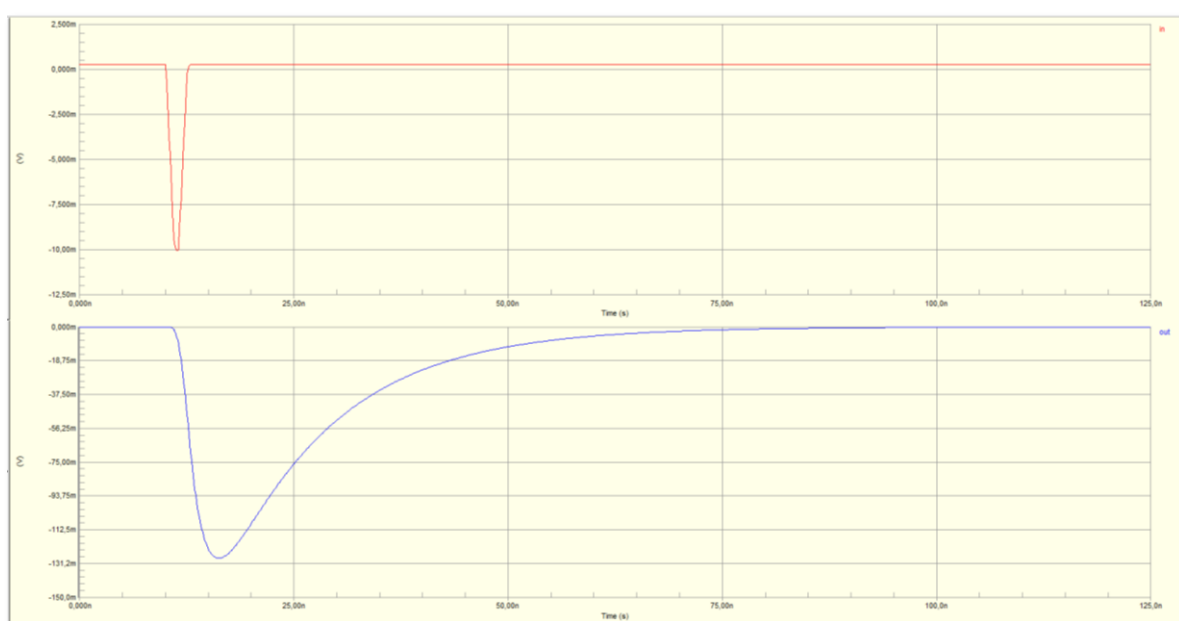


Figura 24: Simulação do circuito amplificador realizada no *Software Altium Designer*.

Na simulação podemos observar que os resultados correspondem ao esperado. O pulso de entrada (em vermelho) de -10 mV e largura de aproximadamente 2 ns teve como resposta um sinal amplificado (em azul) de aproximadamente -130 mV com largura de pulso de aproximadamente 20 ns, como era desejado. Na Figura 35 do Apêndice C pode-se observar a imagem do sinal do protótipo de um canal visto no osciloscópio. Pode-se verificar que os sinais real e simulado são compatíveis.

5.2. PROTÓTIPO - ELETRÔNICA (UM CANAL)

Depois de realizadas simulações do circuito analógico de um canal, o projeto de sua PCB foi implementado através do *Software Altium Designer*. A PCB desenvolvida possui duas camadas, sendo que apenas a superior possui componentes.

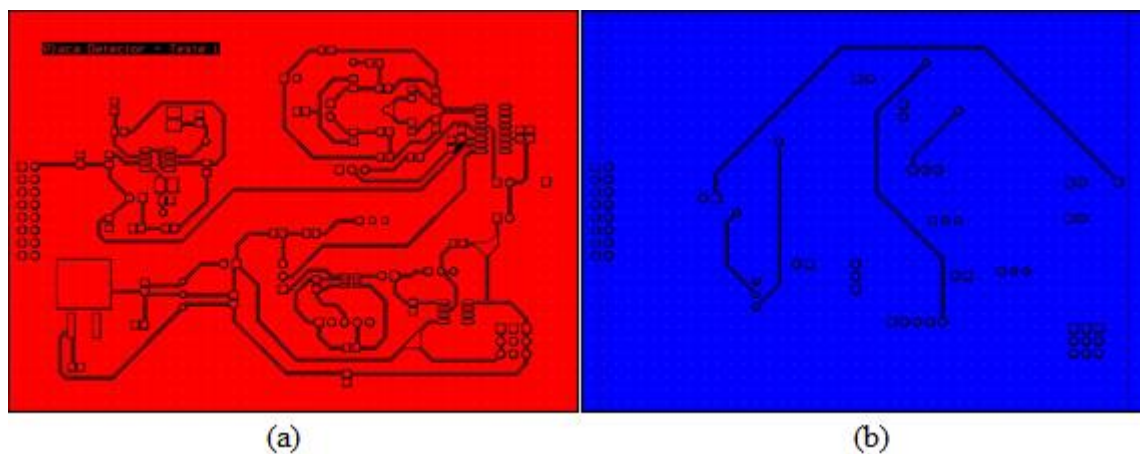


Figura 25: (a) *Layer* superior do circuito protótipo de um canal; (b) *Layer* inferior do circuito protótipo de um canal.

A construção da PCB foi realizada na CNC modelo *LPKF Protomat C60* [30], disponibilizada pelo CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas).



Figura 26: LPKF Protomat C60 realizando a produção do circuito protótipo de um canal.

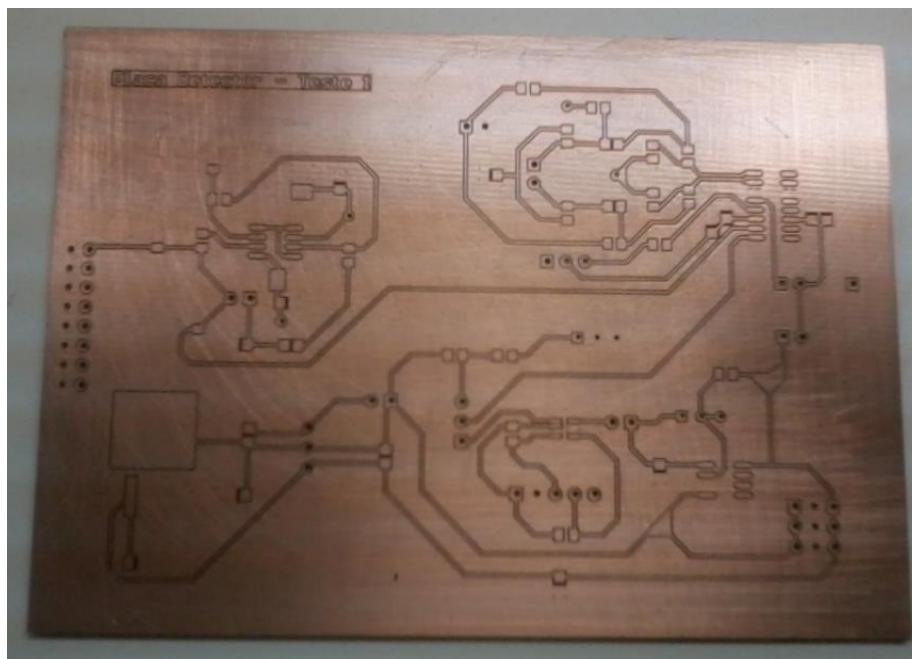


Figura 27: *Layer* superior do protótipo de um canal.

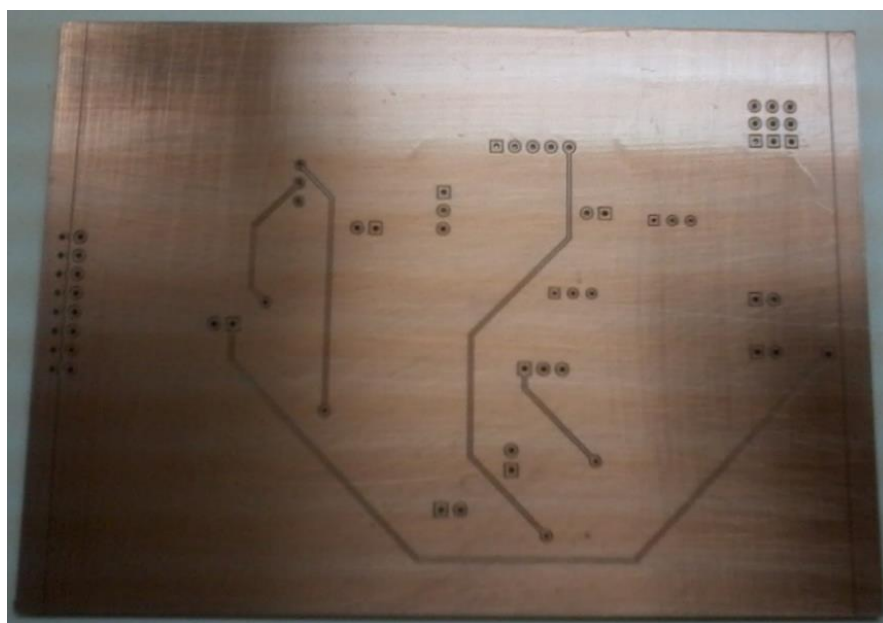


Figura 28: *Layer* inferior do protótipo de um canal.

Depois de produzida a PCB, foram realizadas a soldagem dos componentes, em sua maioria SMD (*Surface-Mount Device*), e testes de continuidade para verificação de possíveis curtos entre as trilhas.



Figura 29: Protótipo teste de um canal.

A escolha na utilização de componentes SMD está na possibilidade de uma maior densidade de componentes em menor espaço da PCB e principalmente no fato de trabalharmos com sinais muito rápidos e de baixa amplitude. Embora haja maior dificuldade da confecção da PCB, devido à sua velocidade e resposta em alta frequência, comparando com os componentes DIP (*Dual-Inline Package*) convencionais, a utilização de componentes SMD se mostrou mais adequada.

5.3. CÁLCULO DE IMPEDÂNCIA

O sinal vindo da MaPMT é uma fonte de corrente, logo, manter a impedância do circuito próxima de $50 \, \Omega$ é muito importante para que os valores do sinal sejam compatíveis com os apresentados em seu *datasheet*. Outro ponto importante, é o casamento de impedância entre o circuito e o sistema de aquisição, também de $50 \, \Omega$.

Para verificarmos a impedância do circuito protótipo efetuamos um teste em que foi medido no osciloscópio a tensão antes e depois de um resistor r_i na entrada do amplificador, mostrado na Figura 16. Ao subtrair a tensão antes e depois do resistor e dividir por sua resistência, obtivemos a sua corrente através da Equação 4:

$$i = \frac{V_o - V_i}{R_{es}} \quad (4)$$

Sabendo-se o valor da corrente e o valor da amplitude do pulso de entrada é possível calcular a impedância do circuito através da Equação 5:

$$RL = \frac{VI}{i} \quad (5)$$

Os valores foram obtidos através do osciloscópio *Tektrônix DPO 70404C Digital Phosphor Oscilloscope* (25GS/s – 4GHz) [31]:

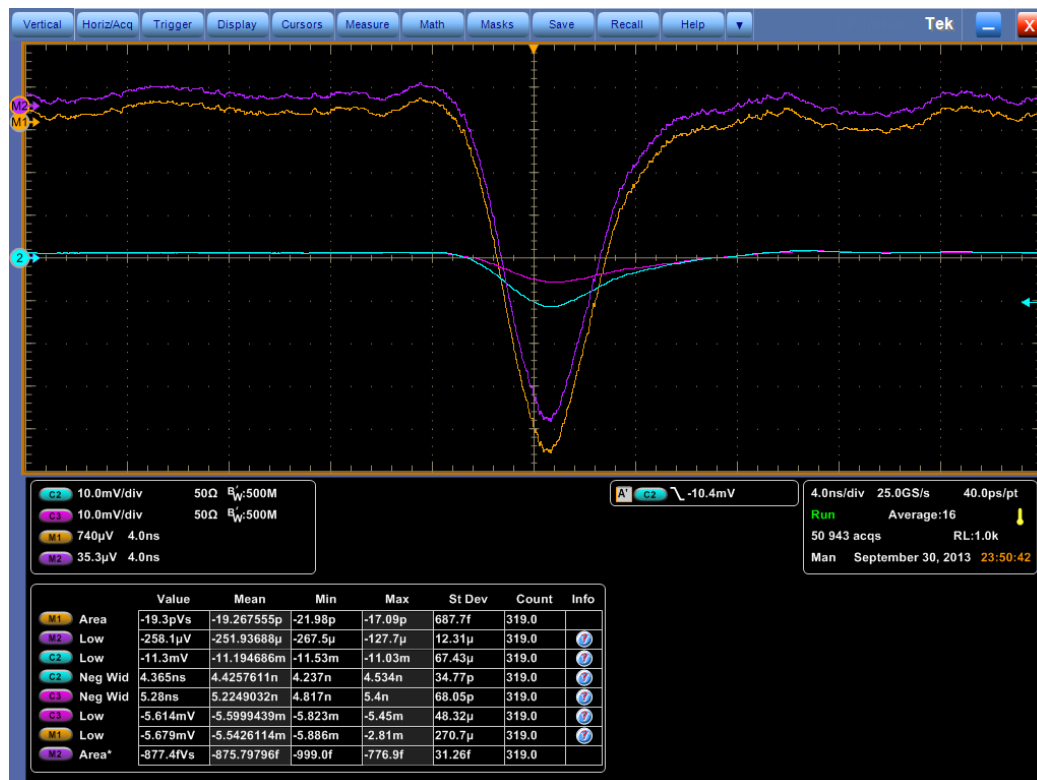


Figura 30: Medidas de tensão antes e depois do resistor de entrada, sua diferença e cálculo de corrente.

Na Figura 30 podemos observar os valores de tensão antes do resistor de entrada (C2), depois do resistor de entrada (C3), a diferença desses sinais (M1:C3-C2) e essa diferença dividida pelo valor do resistor de 22 Ω, obtendo-se o sinal de corrente (M2:(CH3-CH2)/22). De acordo com as medidas observadas no osciloscópio, podemos ver que a corrente de entrada é de -258.1μA, compatível com os valores máximos e mínimos gerados pela MaPMT. Ao dividirmos o valor da tensão de entrada por essa corrente (Lei de Ohm), obteremos a impedância do circuito que é de aproximadamente 44Ω, levemente abaixo do ideal de 50Ω.

5.4. TESTE DE LINEARIDADE E CALIBRAÇÃO DO POTENCIÔMETRO DIGITAL

Na interface gráfica, para que o valor do *threshold* digitado corresponda ao seu valor real, uma calibração foi realizada verificando sua reta de linearidade. O teste consistiu em enviar ao potenciômetro digital dados de 6 bits (correspondendo a valores decimais de 0 a 63) e verificar sua tensão de *threshold* correspondente. O valor de resistência do potenciômetro digital se dá através da Equação 6:

$$Res = \frac{FE}{2^n - 1} \times D \quad (6)$$

Sendo *Res* a resistência correspondente ao valor *D* (valor decimal correspondente ao número de bits a ser enviado), *FE* o fundo de escala de 10 K Ω e 2^n o número de posições (64) do potenciômetro digital (AD5171), permitindo o cálculo da tensão de *threshold* a partir da Equação 7:

$$VThr = \frac{Res}{10k\Omega} \times Vmáx \quad (7)$$

Sendo assim, através das Equações 1 e 2 teremos a Equação 8:

$$VThr = \frac{D}{2^n - 1} \times Vmáx \quad (8)$$

No gráfico abaixo podemos observar a diferença do valor de *threshold* real e teórico para os mesmos valores de bits enviados para o potenciômetro digital. Os valores foram lidos por um voltímetro e sua reta teórica e curva real são apresentadas na Figura 31.

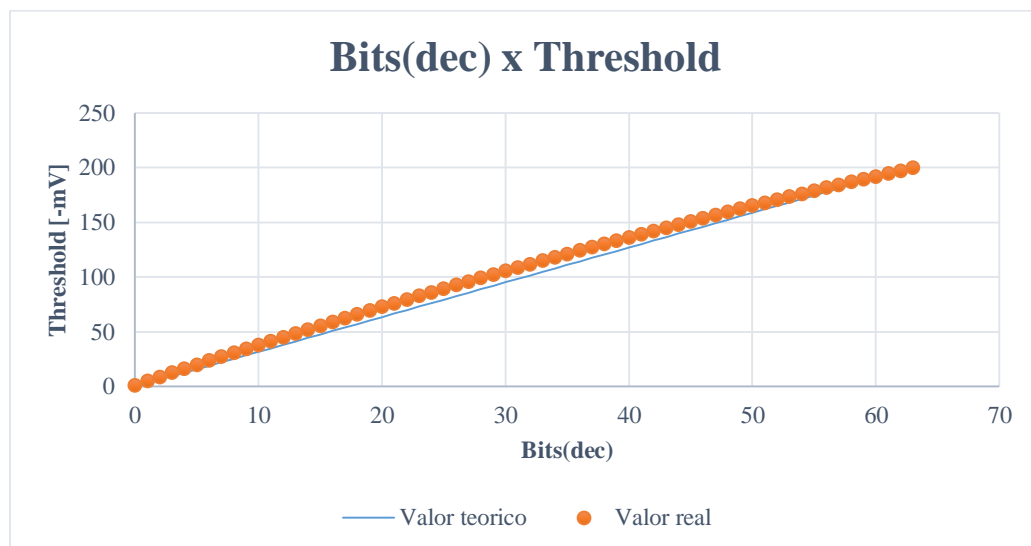


Figura 31: Gráfico de calibração do potenciômetro digital (AD5171).

Podemos observar que a diferença máxima entre o valor de *threshold* teórico e o valor real é de aproximadamente 10 mV. Para resolver essa diferença, primeiramente realizamos um ajuste na função de 2º grau dos valores reais, por apresentarem características não lineares, minimizando essa diferença para no máximo 2 mV. Entretanto, ainda não satisfeitos, resolvemos diminuir ainda mais tal diferença, e ao invés de inserirmos a fórmula teórica ajustada, geramos um vetor contendo os valores obtido de tensão real para seu valor decimal de bit correspondente. Após isso, aprimoramos o código da interface gráfica, de modo que quando o usuário digita um valor de *threshold*, esse valor é comparado com os componentes desse vetor e o que mais se aproxima é escolhido e mostrado na interface, podendo ser enviado ao se clicar no botão “send”.

5.5. TESTE DE AMPLITUDE, RUÍDO E COMUNICAÇÃO ECL

Para verificarmos o funcionamento do circuito, um teste reproduzindo um sinal vindo de uma MaPMT foi realizado. Nesse teste foi possível analisar a amplitude de ruído proveniente do circuito, amplitude do sinal amplificado, funcionamento do circuito discriminador em conjunto com o controle digital de *Threshold* e comunicação via sinais ECL com o sistema de aquisição.

Para isso utilizamos os seguintes instrumentos:

- Gerador de função Tektronix AGF 3252 (2GS/s – 240MHz) [32];
- FONTE DC - ICEL PS6100 [33];
- Osciloscópio – Tektronix MSO 4104B Mixed Signal Oscilloscope (5GS/s - 1GHz) [31];
- CAEN N858 - Dual Attenuator [34];
- CAEN N1145 - Quad Scaler And Preset Counter / Timer [35];
- CAEN N625- Quad Linear FAN-IN FAN-OUT [36];
- CAEN V1495- General Purpose VME Board [8];

O teste consiste em enviar um pulso similar ao da MaPMT, numa frequência de 10KHz, através do gerador de onda. Devido ao gerador de onda gerar amplitudes mínimas de 50 mV, utilizamos um atenuador da CAEN N858 para atenuar o sinal em 10dB e obtendo uma tensão de aproximadamente -10mV, compatível ao sinal proveniente da MaPMT para uma impedância de circuito de 50Ω. Os pulsos foram amplificados e discriminados pelo circuito protótipo em

diferentes valores de *threshold*. A saída discriminada é então digitalizada no padrão ECL e convertida em padrão NIM pelo módulo V1495 através de FPGA *cyclone I* da Altera. Na Figura 32 podemos ver o diagrama do teste realizado:

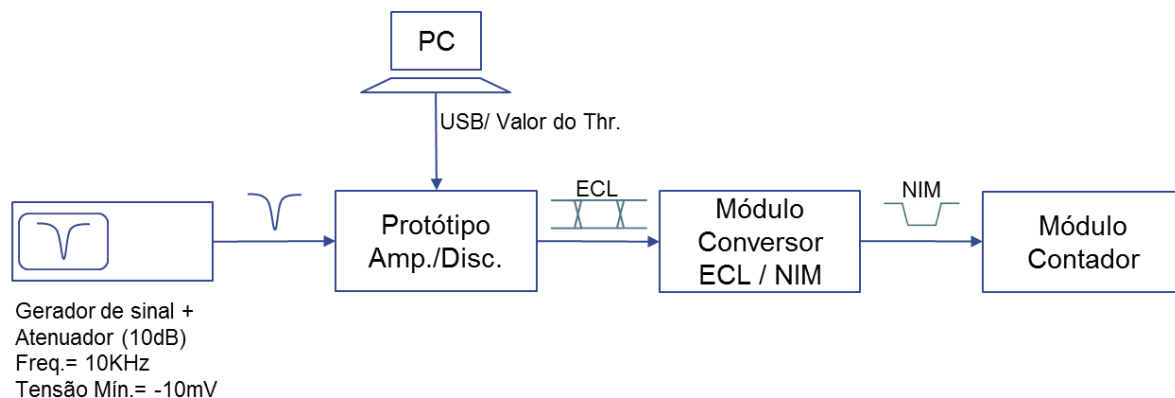


Figura 32: Diagrama do teste de amplitude, ruído e comunicação ECL.

Os valores das contagens e seu respectivo *threshold* foram digitados no programa EXCEL, na qual foi feita uma tabela e um gráfico de frequência x *threshold*. Os resultados são mostrados na Figura 33:

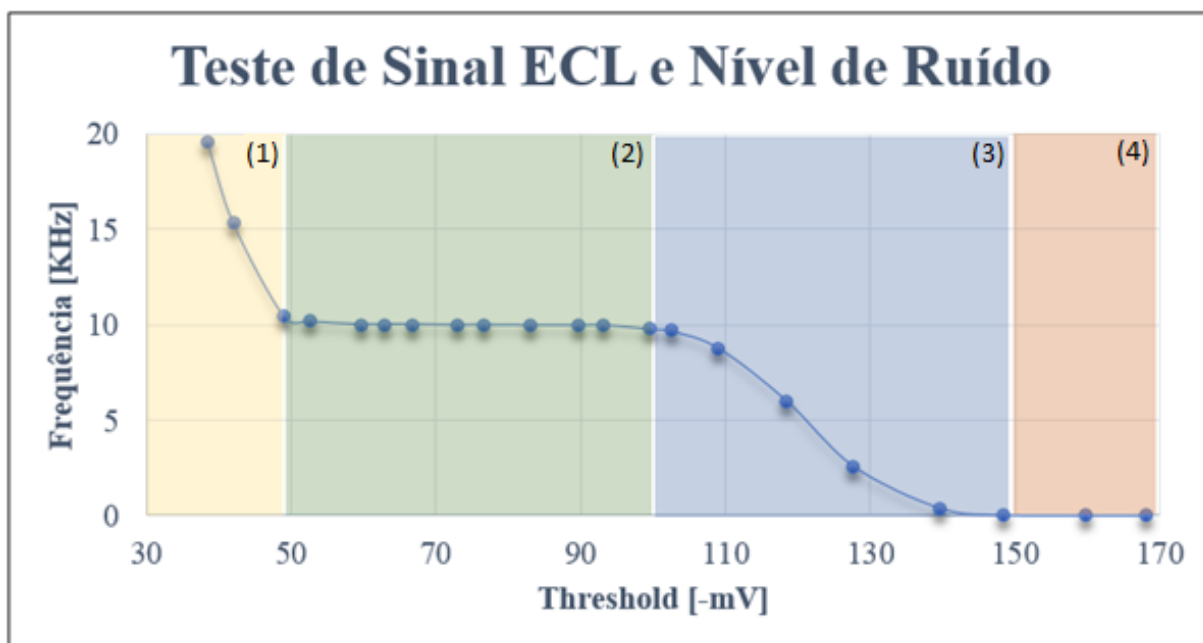


Figura 33: Gráfico de frequência x *threshold*.

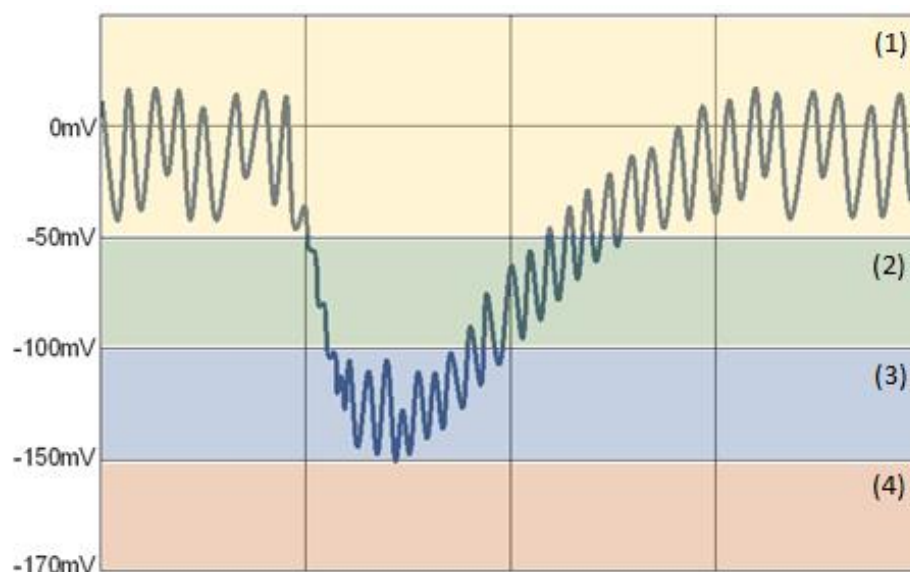


Figura 34: Imagem demonstrativa de um pulso amplificado, mostrando as regiões de diferentes valores de *threshold* e fazendo referência às regiões do gráfico frequência x *Threshold*.

De acordo com os resultados obtidos, podemos observar que a frequência de detecção de pulsos realizada pelo contador é maior quando o valor de *threshold* se aproxima de 0mV. Isso se dá porque todo o ruído agregado ao sistema é confundido com sinal, elevando a contagem de pulsos. Quando o valor de *threshold* ultrapassa -50mV, a frequência de detecção de pulsos começa a se aproximar da frequência de pulsos fornecida pelo gerador indicando que o ruído agregado ao sistema foi completamente discriminado. Ao ultrapassar o valor de *threshold* de -100mV, a frequência de detecção cai, mas não totalmente, significando que o ruído agregado ao sistema se soma a amplitude do sinal, fazendo com que alguns pulsos sejam identificados e outros não. Quando o valor de *threshold* ultrapassa -150mV, a frequência de detecção de pulsos realizada pelo contador chega à zero, indicando que a amplitude do sinal está abaixo do valor de *threshold* escolhido.

O ponto ideal de *threshold* pode ser definido dentro da região (2), sendo ele entre -50mV e -100mV. Neste mesmo teste podemos observar que o ruído agregado ao sinal possui uma amplitude máxima, em módulo, de aproximadamente 50mV, que apesar de relativamente alto, pode ser separado do sinal com boa eficiência. O ruído pode vir de diversas fontes, dentre elas: da temperatura, do cabeamento, da fonte externa de alimentação e principalmente dos elementos do próprio circuito. As imagens da realização dos testes podem ser visualizadas no Apêndice D.

5.6. PERFORMANCE DO DETECTOR

Depois de realizados diferentes testes do circuito protótipo de um canal, podemos fazer as seguintes análises:

- O circuito de alimentação atendeu de forma satisfatória o que foi proposto, fornecendo tensões estáveis de +5V e -5V sem que houvesse a necessidade de duas fontes DC;
- O circuito amplificador, embora tenha tido grandes faixas de ruído agregado, é simples, possui um custo relativamente baixo e forneceu um sinal capaz de ser discriminado do ruído eletrônico;
- Foi desenvolvido um circuito de controle digital de tensão através de uma interface gráfica no PC, possibilitando que o valor de *threshold* do detector seja alterado sem que haja a abertura de sua estrutura e assim a interrupção do experimento.

6. CONCLUSÃO

O projeto de montagem desse detector teve tempo estimado de nove meses, porém um grande estudo e conhecimento na área de detecção de partícula, instrumentação eletrônica e comunicação diferencial vem sendo realizado desde julho de 2012, na qual ingressei como estudante de iniciação científica no CBPF. Com o recebimento de todo o conhecimento necessário para a realização do trabalho proposto, pudemos em março de 2013, dar início ao projeto do amplificador e discriminador. O projeto do circuito durou até setembro e finalizadas as simulações, foi desenvolvida a PCB do protótipo de um canal. Em novembro foram realizados testes e ajustes, confirmando a eficiência do circuito.

Com as realizações dos testes, pôde-se observar que o sinal da amplificação possui largura e amplitude adequados às necessidades do projeto, sendo eles de aproximadamente 20 ns e 130 mV, respectivamente. Verificou-se que o ruído intrínseco é adequadamente removido no processo de discriminação. Após a conclusão do protótipo, foi possível finalizar o desenho do *layout* de 16 canais.

7. TRABALHOS FUTUROS

Mesmo que o foco do projeto tenha sido na parte eletrônica do detector, participarei na montagem de sua mecânica e óptica. Tendo o circuito final e estrutura montada, realizaremos testes com fontes radioativas e, verificado seu completo funcionamento, partiremos para a aquisição de dados do sistema de *tracking*.

REFERÊNCIAS

- [1] Leitão, S. A., & Sousa, C. (s.d.). A Importância do estudo dos Raios Cósmicos: O método de detecção do Observatório Pierre Auger. Acesso em Dezembro de 2013, disponível em <http://www.ucb.br/sites/100/118/TCC/1%C2%BA2012/AImportandiadsRaiosCosmicosOmetododedete.pdf>
- [2] Consalter, D. M., Fauth, A. C., Gonzalez, L., Grizolli, W. C., Kemp, E., & Penereiro, J. (s.d.). RAIOS CÓSMICOS DETECTADOS ATRAVÉS DE UM TELESCÓPIO DE PARTÍCULAS. Acesso em Outubro de 2013, disponível em http://universo.liada.net/Memorias/a11a%20-%20Raios_C_smicos.pdf
- [3] Cinquenta anos do méson pi. Acesso em Novembro de 2013, disponível em <http://www.ghtc.usp.br/meson.htm>
- [4] Frass, W. (2009). *C4: Particle Physics Major Option - Particle Detectors*. Acesso em Novembro de 2013, disponível em https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:pr1LweUHs8EJ:www2.physics.ox.ac.uk/sites/default/files/Detectors.pdf+particle+detection&hl=en&gl=uk&pid=bl&srcid=ADGEESgJYXYj4LeAgetDVxmhAtp5PG6SLPFZBfqVOxeg0MhQrAmx_liH36nu3ROypLqIzTldkQXyD-nA1cEX3GignIoj6huRb1pcnoa5r6LrEPG5a4zQ48elvgU0kSe_v-qwu1nJnlci&sig=AHIEtbSdcLi39Jqhkvxml3Zate0WTdPd1Q&pli=1
- [5] Nguyen, K. (s.d.). Acesso em Novembro de 2013, disponível em wikispaces: <https://wadness.wikispaces.com/4.+Delay+Wire+Chamber+-+Reported+by+Kevin+Nguyen>
- [6] Conti, C. C. (s.d.). Cintiladores. *INSTRUMENTAÇÃO NUCLEAR*. Acesso em 5 de Dezembro de 2013, disponível em <http://www.ccconti.com/Instnuc/Aula/Aula9.pdf>
- [7] Barbosa, L. (s.d.). TÉCNICAS DE DETECÇÃO. Acesso em 5 de Dezembro de 2013, disponível em http://www.cbpf.br/~lsd/Curso_Detectores.pdf
- [8] *CAEN Eletronics Instrumentation*. (s.d.). Acesso em 11 de Dezembro de 2013, disponível em <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=484&parent=11>
- [9] *The OPERA Target Tracker Technical Design Report*. (s.d.). Acesso em março de 2013, disponível em http://sbgopera.in2p3.fr/general/TDR/target_tracker.htm
- [10] Hines, K.-E. (2012). Centralized Coincidence Trigger Processing for COMPET Using Both a Synchronous and an Using Both a Synchronous and an. Acesso em Novembro de 2013, disponível em https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/11079/hines_master_final.pdf?sequence=1

- [11] CERN. (s.d.). *LHCb*. Acesso em 5 de Dezembro de 2013, disponível em <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/detector/Calorimeters2-en.html>
- [12] *Phototube Test for MiniPlug Calorimeter*. (s.d.). Acesso em Novembro de 2013, disponível em http://hep.baylor.edu/hatake/miniplug/pmt_test.html
- [13] Nuclear Instruments and Methods in Physics Performance of a multi-anode photomultiplier employing a weak electrostatic focusing system (Hamamatsu R8900 series). (Agosto de 2006). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 378–394. Acesso em 11 de Dezembro de 2013, disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020600492X>
- [14] MULTIANODE PHOTOMULTIPLIER TUBE ASSEMBLY H6568, H6568-10. (Janeiro de 2001). *Datasheet*. Acesso em Março de 2013
- [15] *Creating a Virtual Power Supply Ground*. (15 de Março de 2008). Acesso em Junho de 2013, disponível em [All about circuits: http://forum.allaboutcircuits.com/showthread.php?p=84026#post84026](http://forum.allaboutcircuits.com/showthread.php?p=84026#post84026)
- [16] 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator MC78XX/LM78XX/MC78XXA. (s.d.). *Datasheet*. Acesso em Junho de 2013, disponível em <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/MC7810.pdf>
- [17] 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator MC78XX/LM78XX/MC78XXA. (s.d.). *Datasheet*. Acesso em Junho de 2013, disponível em
- [18] Corradi, G., & Tagnani, D. (22 de Fevereiro de 2010). AMPLIFICATORE CH.
- [19] Corradi, G., & Tagnani, D. (24 de Fevereiro de 2010). AMPLIFICATORE Fotomoltiplicatore HAMAMATSU H8500
- [20] *CAEN Eletronics Instrumentation*. (s.d.). Acesso em 11 de Dezembro de 2013, disponível em <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=12&idmod=120>
- [21] Lawless, B. (s.d.). *Fundamental Digital Electronics* by Brian Lawless. Acesso em Novembro de 2013, disponível em <http://www.physics.dcu.ie/~bl/digi/unitd04.pdf>
- [22] Kassner, M. (s.d.). Acesso em 12 de Dezembro de 2013, disponível em <http://ademarfey.wordpress.com/2011/01/28/cabo-ethernet-utp-e-stp/>
- [23] *64-Position OTP Digital Potentiometer*. (s.d.). Acesso em Junho de 2013, disponível em <http://datasheet.octopart.com/AD5171BRJZ10-R2-Analog-Devices-datasheet-8546.pdf>
- [24] 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash. (s.d.). *Datasheet*. Acesso em Junho de 2013, disponível em <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>

- [25] *ARDUINO.CC.* (s.d.). Acesso em Junho de 2013, disponível em <http://arduino.cc/en/Tutorial/DigitalPotentiometer>
- [26] Filho, R. P. (s.d.). Protocolo de Comunicação I2C . Acesso em Dezembro de 2013, disponível em <http://www.eletronica.org/modules.php?name=News&file=article&sid=13>
- [27] I2C - bus specification and user manual. (9 de Outubro de 2012). Acesso em Janeiro de 2014, disponível em http://www.nxp.com/documents/other/UM10204_v5.pdf
- [28] Ultrafast Comparators AD96685/AD96687. (s.d.). *Datasheet*. Acesso em junho de 2013, disponível em http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD96685_96687.pdf
- [29] *Altium Designer Summer 09 Libraries.* (s.d.). Acesso em Agosto de 2013, disponível em <http://wiki.altium.com/display/ADOH/Altium+Designer+Summer+09+Libraries>
- [30] *ProtoMat® C60* (s.d.). Acesso em Dezembro de 2013, disponível em <http://www.lpkfusa.com/RapidPCB/CircuitboardPlotters/c60.htm>
- [31] *MSO/DPO70000 Digital & Mixed Signal Oscilloscope* (s.d.). Acesso em Dezembro de 2013, disponível em <http://www.tek.com/oscilloscope/dpo70000-mso70000>
- [32] *AFG3000C Arbitrary / Function Generator* (s.d.). Acesso em Dezembro de 2013, disponível em <http://www.tek.com/signal-generator/afg3000-function-generator>
- [33] MANUAL DE INSTRUÇÕES DA FONTE DIGITAL MODELO PS-6100 (s.d.). Acesso em Dezembro de 2013, disponível em <http://www.icel-manauas.com.br/manual/146.pdf>
- [34] *CAEN Eletronics Instrumentation.* (s.d.). Acesso em 11 de Dezembro de 2013, disponível em <http://www.caen.it/jsp/Template2/CaenProd.jsp?parent=12&idmod=536>
- [35] *CAEN Eletronics Instrumentation.* (s.d.). Acesso em 11 de Dezembro de 2013, disponível em <http://www.caen.it/jsp/Template2/CaenProd.jsp?parent=12&idmod=299>
- [36] *CAEN Eletronics Instrumentation.* (s.d.). Acesso em 11 de Dezembro de 2013, disponível em <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=12&idmod=419>

APÊNDICE A – Código da Interface Gráfica

A estrutura da interface, a princípio, está funcional apenas para o circuito protótipo de um canal. Na utilização da *front-end* de 16 canais, algumas modificações serão necessárias. A seguir, está o código contendo a programação principal comentada. Entretanto, não são apresentados comentários nas partes referentes à estética da interface.

Código em *freepascal* desenvolvido através do *software* LAZARUS:

```
unit Unit1;

{$mode objfpc}{$H+}

interface

uses
  Classes, SysUtils, FileUtil, Forms, Controls, Graphics, Dialogs,
  StdCtrls,
  ComCtrls, SdpoSerial;

type

  { TForm1 }

  TForm1 = class(TForm)
    Button_connect: TButton;
    Button_send: TButton;
    CheckBox1: TCheckBox;
    CheckBox10: TCheckBox;
    CheckBox11: TCheckBox;
    CheckBox12: TCheckBox;
    CheckBox13: TCheckBox;
    CheckBox14: TCheckBox;
    CheckBox15: TCheckBox;
    CheckBox16: TCheckBox;
    CheckBox17: TCheckBox;
    CheckBox2: TCheckBox;
    CheckBox3: TCheckBox;
    CheckBox4: TCheckBox;
    CheckBox5: TCheckBox;
    CheckBox6: TCheckBox;
    CheckBox7: TCheckBox;
    CheckBox8: TCheckBox;
    CheckBox9: TCheckBox;
    ComboBox_port: TComboBox;
    ComboBox_thr: TComboBox;
    GroupBox1: TGroupBox;
    GroupBox2: TGroupBox;
    GroupBox3: TGroupBox;
    Label1: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Label14: TLabel;
    Label15: TLabel;
```

```

Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Label2: TLabel;
Label3: TLabel;
Label4: TLabel;
Label5: TLabel;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Label8: TLabel;
Label9: TLabel;
Memo_terminal: TMemo;
SdpoSerial1: TSdpoSerial;
UpDown1: TUpDown;
procedure Button_connectClick(Sender: TObject);
procedure Button_sendClick(Sender: TObject);
procedure CheckBox17Change(Sender: TObject);
procedure ComboBox_thrChange(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var CloseAction: TCloseAction);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure SdpoSerial1RxData(Sender: TObject);
procedure UpDown1Click(Sender: TObject; Button: TUDBtnType);
private
  {private declarations }
public
  { public declarations }
end;

var
  Form1: TForm1;
  estaconectado : Boolean = True ;
  valor:integer;
  Valores_thr : array[0..63] of Double =
(1.52,5.3,9.05,12.78,16.49,20.18,23.85,
27.5,31.1,34.71,38.3,41.88,45.42,48.95,52.46,55.95,59.38,62.83,66.26,69.67,
73.06,76.43,79.78,83.1,86.4,89.7,92.9,96.2,99.4,102.6,105.8,109,112.1,115.2
,
118.4,121.5,124.5,127.6,130.6,133.6,136.6,139.6,142.5,145.5,148.4,151.3,154
.1,
157,159.8,162.6,165.4,168.2,171,173.7,176.4,179.1,181.8,184.4,187.1,189.7,
192.3,194.9,197.5,200); //vetor com valores de tensao para seu
                        //determinado valor de BIT
  var rec:string;

implementation

{$R *.lfm}

{ TForm1 }

procedure TForm1.Button_connectClick(Sender: TObject);

begin
  if (estaconectado) then
  begin
    GroupBox2.Enabled:=true;
    Button_connect.Caption:='Desconectar';

```

```

Memo_terminal.Clear;
SdpoSerial1.Device:=ComboBox_port.text;
SdpoSerial1.Active:=True;
ComboBox_port.Enabled:=false;

    end
else
    begin
        GroupBox2.Enabled:=false;
        Button_connect.Caption:='Conectar';
        SdpoSerial1.Active:=false;
        ComboBox_port.Enabled:=true;
    end;
    estaconectado:= NOT estaconectado;

end;

procedure TForm1.Button_sendClick(Sender: TObject);
var
    i : integer = 0;

begin
    rec:='';
    while (i<=64) do
        begin

            if (StrToFloat(ComboBox_thr.Text)>=200) then
                ComboBox_thr.Text:='200';    // ajuste de valor maximo para -200mv

            //faz a comparacao do valor digitado com os componentes do vetor, valor
            //mais aproximado sera o valor mostrado

            if ((StrToFloat(ComboBox_thr.Text)-valores_thr[i])<=0.0001) then
                begin
                    ComboBox_thr.ItemIndex:=i;
                    UpDown1.Position:=i;
                    valor:=i;
                Memo_terminal.Text:=floatToStr((StrToFloat(ComboBox_thr.Text)-
                valores_thr[i]));    //apenas para verificacao de erro, desabilitado na
                //versao final

                    i:=65
                end;
                i:=i+1;

            end;
            if CheckBox1.Checked then
                begin
                    SdpoSerial1.WriteData('a'); //"a" representa o ch1
                    //codigo abaixo garante de os bytes enviados, via serial, tenham sempre o
                    //mesmo tamanho, 3 bytes
                    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

                    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

                    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor)); //envio do valor em bits ao
                                                            //microcontrolador via serial
                end;

```

```

if CheckBox2.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('b');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox3.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('c');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox4.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('d');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox5.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('e');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox6.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('f');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox7.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('g');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox8.Checked then

```

```

begin
    SdpoSerial1.WriteData('h');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');
    memo_terminal.Append(inttostr(valor));

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox9.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('i');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox10.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('j');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox11.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('k');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox12.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('l');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox13.Checked then
begin
    SdpoSerial1.WriteData('m');
    if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

    SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
end;
if CheckBox14.Checked then
begin

```

```

        SdpoSerial1.WriteData('n');
        if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

        if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

        SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
    end;
    if CheckBox15.Checked then
    begin
        SdpoSerial1.WriteData('o');
        if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

        if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

        SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
    end;
    if CheckBox16.Checked then
    begin
        SdpoSerial1.WriteData('p');
        if (valor<100)then SdpoSerial1.WriteData('0');

        if (valor<10)then SdpoSerial1.WriteData('0');

        SdpoSerial1.WriteData(inttostr(valor));
    end;
end;

procedure TForm1.CheckBox17Change(Sender: TObject);
begin
    if CheckBox17.Checked then
    begin
        CheckBox1.Checked:=true;
        CheckBox2.Checked:=true;
        CheckBox3.Checked:=true;
        CheckBox4.Checked:=true;
        CheckBox5.Checked:=true;
        CheckBox6.Checked:=true;
        CheckBox7.Checked:=true;
        CheckBox8.Checked:=true;
        CheckBox9.Checked:=true;
        CheckBox10.Checked:=true;
        CheckBox11.Checked:=true;
        CheckBox12.Checked:=true;
        CheckBox13.Checked:=true;
        CheckBox14.Checked:=true;
        CheckBox15.Checked:=true;
        CheckBox16.Checked:=true;

    end
    else
    begin
        CheckBox1.Checked:=false;
        CheckBox2.Checked:=false;
        CheckBox3.Checked:=false;
        CheckBox4.Checked:=false;
        CheckBox5.Checked:=false;
        CheckBox6.Checked:=false;

```



```

        CheckBox7.Checked:=false;
        CheckBox8.Checked:=false;
        CheckBox9.Checked:=false;
        CheckBox10.Checked:=false;
        CheckBox11.Checked:=false;
        CheckBox12.Checked:=false;
        CheckBox13.Checked:=false;
        CheckBox14.Checked:=false;
        CheckBox15.Checked:=false;
        CheckBox16.Checked:=false;

    end;
end;

procedure TForm1.ComboBox_thrChange(Sender: TObject);
begin
    Button_send.Enabled:=true;

end;

procedure TForm1.FormClose(Sender: TObject; var CloseAction: TCloseAction);
begin
    SdpoSerial1.Active:=false;

end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    SdpoSerial1.Active:=False;

end;

procedure TForm1.SdpoSerial1RxData(Sender: TObject);
var rec:string;

begin
    while (Length(rec)<=2) do
    begin
        rec:=rec+SdpoSerial1.ReadData;
        memo_terminal.Append(rec);    //apenas para verificação de erro,
                                     //desabilitado na versão final

        end;
        Label1.Caption:=('-'+ floattostr(valores_thr[strtoint(rec)])+'mV');
    end;

procedure TForm1.UpDown1Click(Sender: TObject; Button: TUDBtnType);
begin
    ComboBox_thr.ItemIndex:=UpDown1.Position;
    Button_send.Enabled:=true;

end;

end.

```

APÊNDICE B – Código do Microcontrolador

O código apresentado abaixo foi desenvolvido em Linguagem C e através do Software ARDUINO IDE 1.0.2, para comunicação com a interface gráfica.

```
// I2C Digital Potentiometer
// Controle AD5171 via I2C
#include <Wire.h>
#include <EEPROM.h>
#define pot_byte 63 //byte de resolucao do potenciometro digital
int addr=0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin(); // comeca a utilizacao do barramento i2c (endereço opcional
               // para mestre)
  i2cserial();
}

byte valor = 0;
float val=0;
float tensao=0;
float leitura;
char qualcanal;
void loop()
{
  if (Serial.available() > 0) {
    qualcanal=Serial.read();
    delay(100);
    leitura=Serial.read();

    if ((leitura>47) && (leitura<58)){ //identifica se os caracteres são
                                     //numeros
      val=100*((int)leitura-48); //converte ascii no valor decimal
                                //correspondente
                                //coloca o primeiro numero na casa das
                                //centenas
    }
    delay(100);

    leitura=Serial.read();
    if ((leitura>47) && (leitura<58)){
      val=val+10*((int)leitura-48); //converte ascii no valor decimal
                                    //correspondente
                                    //coloca o segundo numero na casa das
                                    //desenas
    }
    else{
      val=val/10;
    }
    delay(100);

    leitura=Serial.read();
    if ((leitura>47) && (leitura<58)){
      val=val+((int)leitura-48); //converte ascii no valor decimal
                                //correspondente
                                //coloca o terceiro numero na casa das unidades
    }
  }
}
```

```

    }
    else{
        val=val/10;
    }
    delay(100);

    valor=byte(val);
    leitura=0;

    if ((valor >=0) && (valor <= pot_byte)){
        EEPROM.write(addr,valor);
        i2cserial();
    }
}

void i2cserial(){

    valor=EEPROM.read(addr);
    switch (qualcanal){
        case 'a':
            Wire.beginTransmission(44); // transmit to device #44 (0x2c)
                                           // device address is specified in datasheet
            Wire.write(byte(0x00));      // sends instruction byte
            Wire.write(valor);           // sends potentiometer value byte
            Wire.endTransmission();      // stop transmitting

            break;
        }
        if (valor<100){
            Serial.print('0');
        }
        if (valor<10){
            Serial.print('0');
        }
        Serial.print(valor);
        delay(100);
        return;
    }
}

```

APÊNDICE C – Sinais Visualizados no Osciloscópio



Figura 35: Sinal de entrada do amplificador (C2) e sinal de saída do amplificador + filtros (C3)



Figura 36: Sinal amplificado (C1), sinal ECL diferencial positivo (C2), sinal ECL diferencial negativo (C3), Sinal C2-C3 (M1).

APÊNDICE D – Imagem da Realização dos Testes

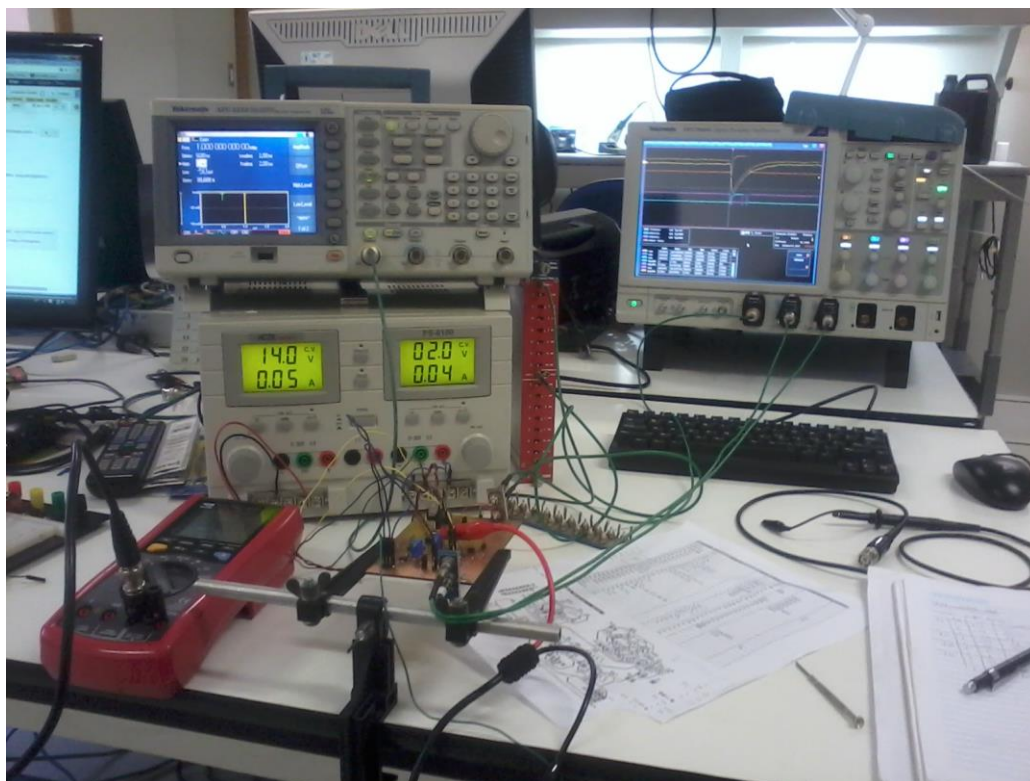


Figura 37: Teste de qualidade e funcionamento do circuito protótipo de um canal.

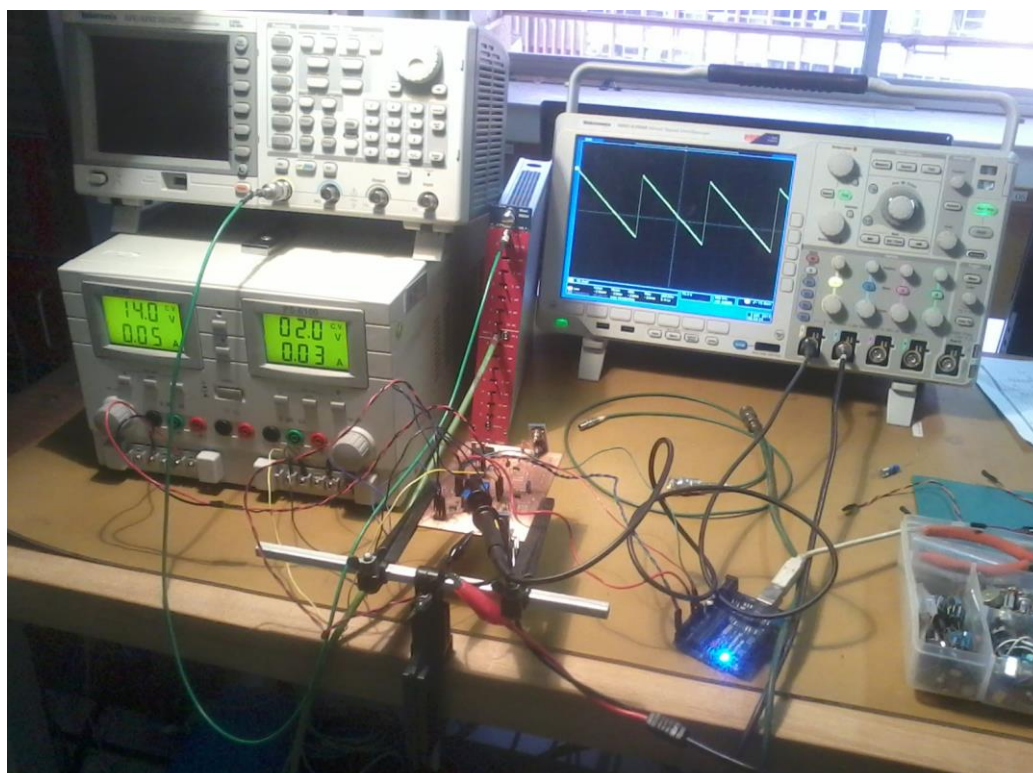


Figura 38: Teste de comunicação com o potenciômetro digital (AD5171).

APÊNDICE E – Montagem em 3D do Detector e *Setup* do Sistema *Tracking*

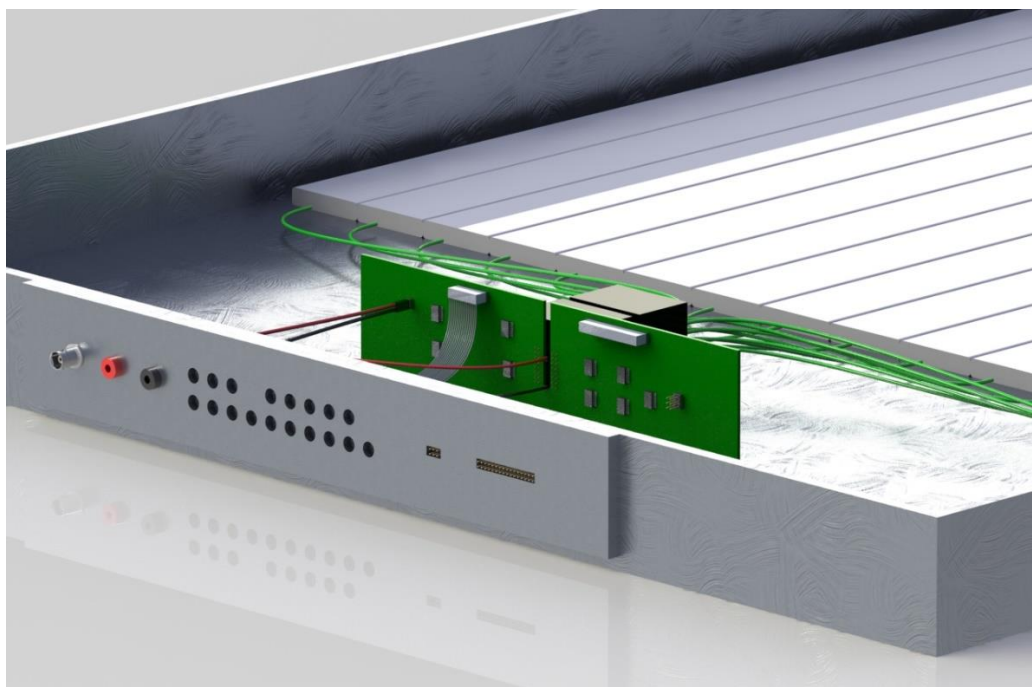


Figura 39: Imagem de como o circuito da *front-end* de 16 canais será posicionado na estrutura.

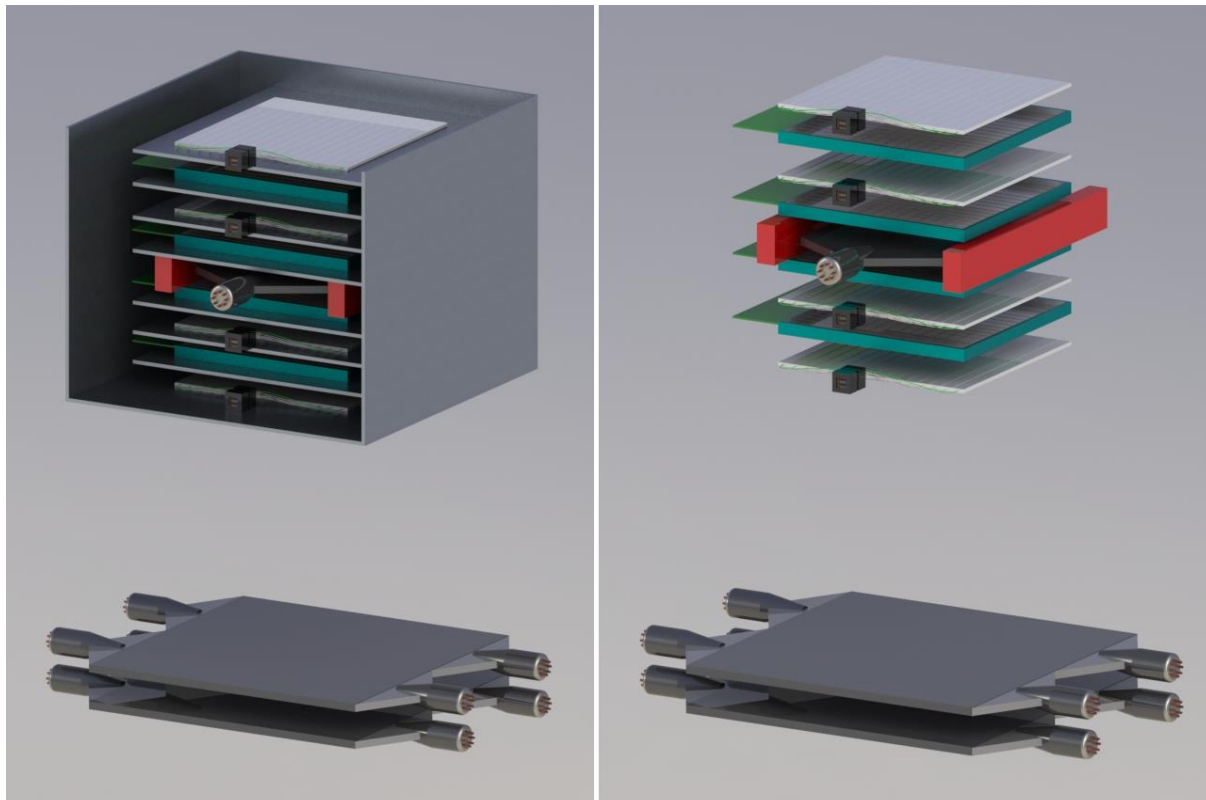


Figura 40: Sistema de monitoramento de raios cósmicos. Contendo 4x MWPCs, 4x SciTiles e 10x PMTs

APÊNDICE F – Layout da Pcb da *Front-End* de 16 Canais

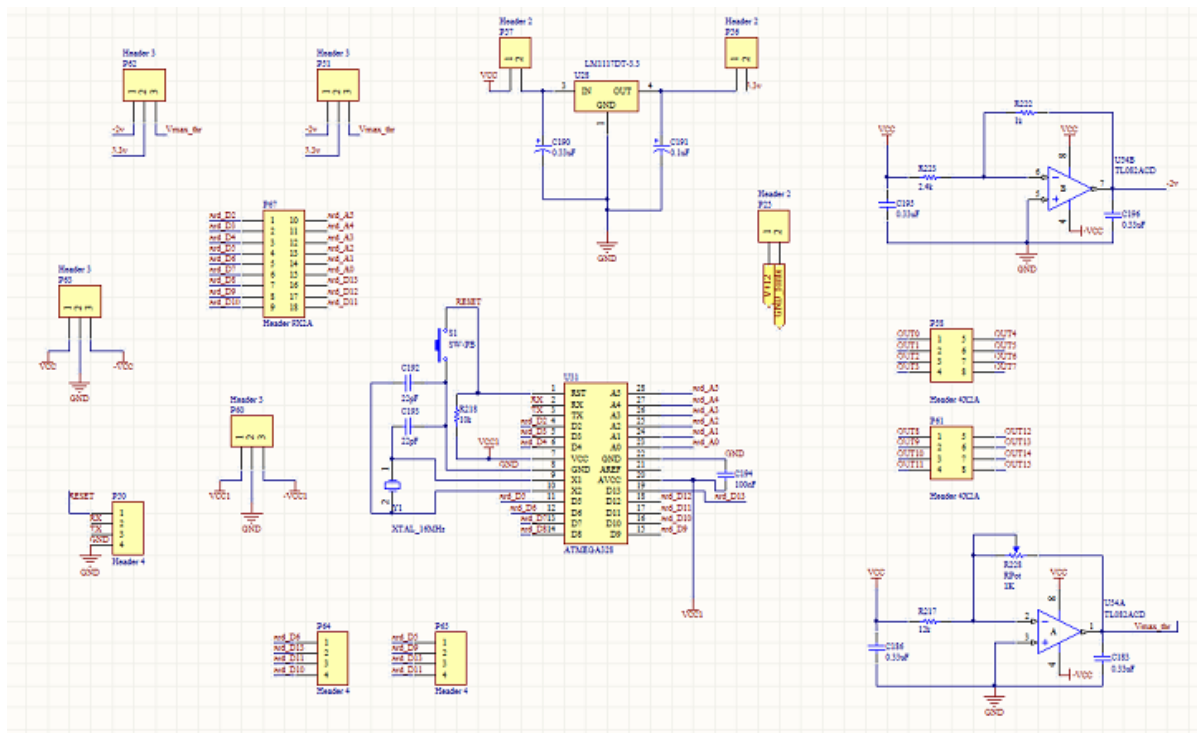


Figura 41: Desenho esquemático do circuito da *front-end* de 16 canais (parte 1) - realizado no *Software Altium Designer*.

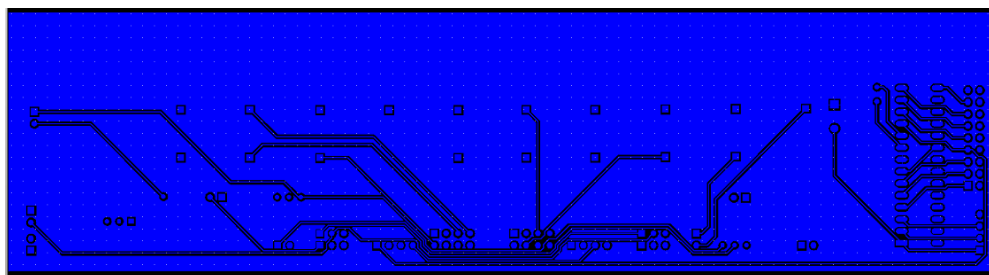


Figura 42: *Layer* inferior do circuito da *front-end* de 16 canais (parte 1).

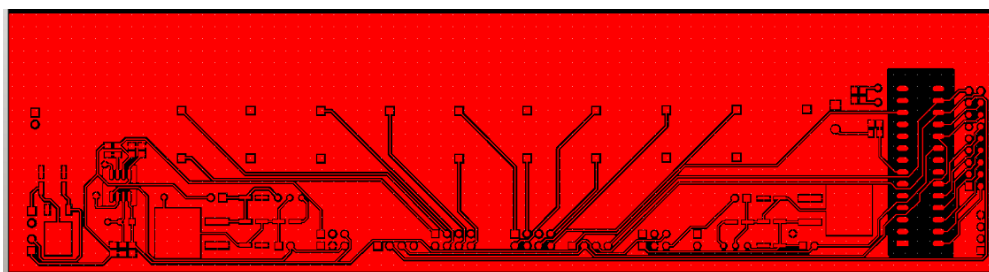


Figura 43: *Layer* superior do circuito da *front-end* de 16 canais (parte 1).

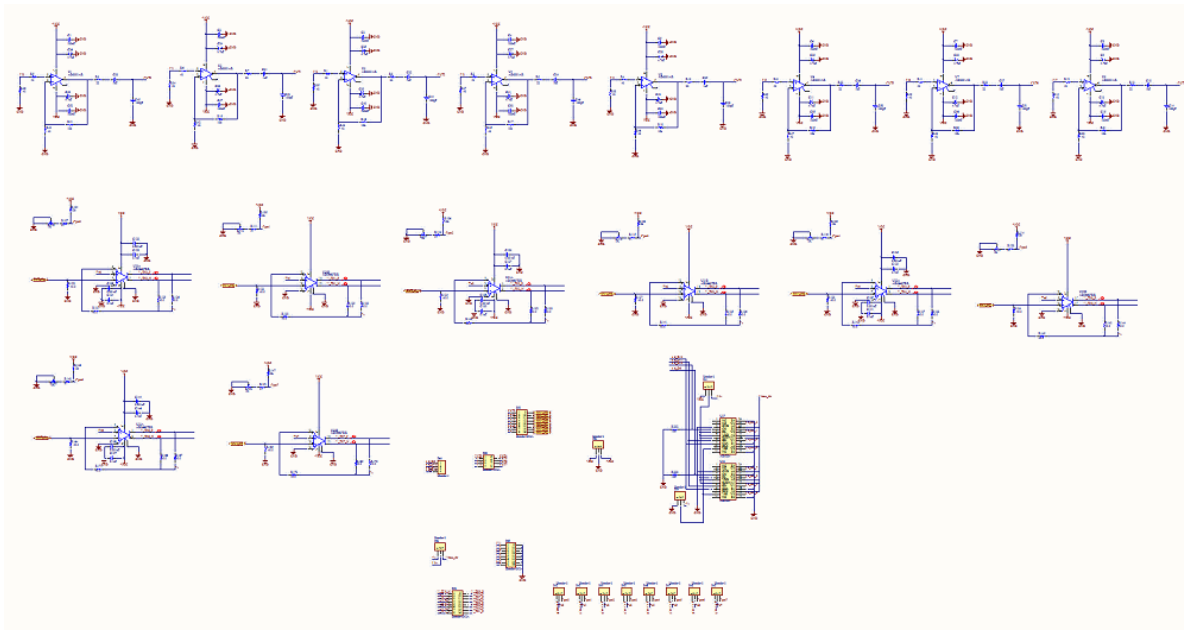


Figura 44: Desenho esquemático do circuito da *front-end* de 16 canais (parte 2) - realizado no *Software Altium Designer*.

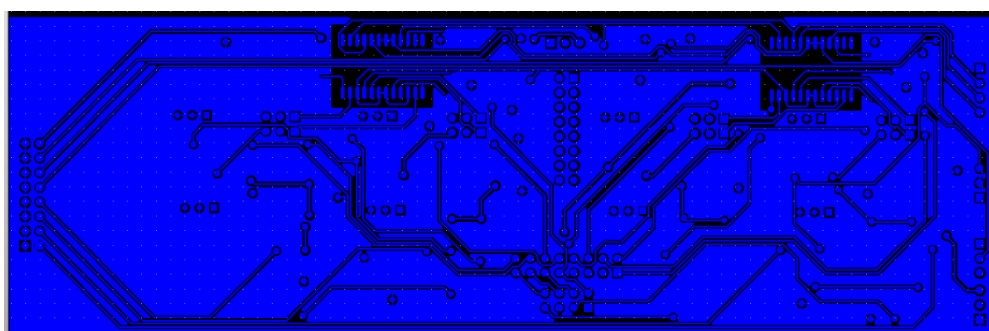


Figura 45: *Layer inferior* do circuito da *front-end* de 16 canais (parte 2).

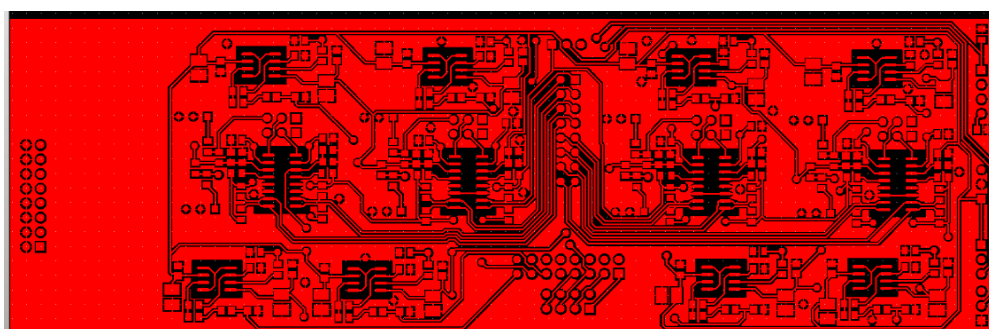


Figura 46: *Layer superior* do circuito da *front-end* de 16 canais (parte 2).