



CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

PROGRAMA DE MESTRADO EM FÍSICA

ÊNFASE EM FÍSICA FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS

HODOSCÓPIO DE MÚONS
PARA CARACTERIZAÇÃO DE DETECTORES
DE SUPERFÍCIE

DISSERTAÇÃO
MESTRADO EM FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS

GUILHERME FERREIRA FRANCO

RIO DE JANEIRO

2023

GUILHERME FERREIRA FRANCO

HODOSCÓPIO DE MÚONS PARA CARACTERIZAÇÃO DE DETECTORES DE SUPERFÍCIE

Dissertação apresentada à Coordenação de Formação Científica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Física pelo Programa de Mestrado em Física, com ênfase em Física de Altas Energias.

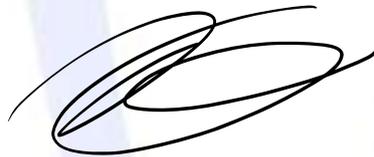
Orientador: Prof. Dr. Ulisses Barres de Almeida

Coorientador: Luís Miguel Domingues Mendes

“HODOSCÓPIO DE MÚONS PARA CARACTERIZAÇÃO DE DETECTORES DE
SUPERFÍCIE”

GUILHERME FERREIRA FRANCO

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



Ulisses Barres de Almeida – Orientador/CBPF



Luis Miguel Domingues Mendes – Coorientador/CBPF



Sandro Fonseca de Souza – UERJ



Rita da Cassia dos Anjos - UFPR

Rio de Janeiro, 29 de agosto de 2023.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, à minha família e a todos aqueles responsáveis tanto pela minha existência quanto minha criação, que me fez valorizar o conhecimento e nutrir minha curiosidade, motivo pelo qual busquei essa carreira.

Agradeço também a todos aqueles, para além da minha família, que me mantiveram e me apoiaram nesse caminho, incluindo meus professores na UENF e no CBPF, meu orientador Ulisses Barres, meu co-orientador Luís Mendes, e minha namorada Kariny Xavier, minha pareceria na física e na vida, que desde o início da minha graduação me ajudou como pôde para que eu tivesse sucesso.

Agradeço também à equipe do Observatório Pierre Auger e do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) por todo suporte e ajuda que se fizeram necessários para a realização dos trabalhos experimentais e de análise de dados necessários a este trabalho.

E por fim, mas não menos importantemente, agradeço às instituições que tornaram possível minha formação, como o CBPF, a UENF e o CNPq, que são instituições públicas, gratuitas e de qualidade, que junto com tantas outras, garantem oportunidades a jovens como eu e assim o desenvolvimento científico-tecnológico, imperativo ao futuro do nosso país.

Em homenagem ao nosso querido ex-diretor, e meu primeiro orientador no CBPF, **Ronald Cintra Shellard**.



GUILHERME FERREIRA FRANCO

HODOSCÓPIO DE MÚONS PARA CARACTERIZAÇÃO DE DETECTORES DE SUPERFÍCIE

MESTRADO EM FÍSICA

ÊNFASE EM FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

RIO DE JANEIRO, 2023

Resumo

Múons atmosféricos são partículas vitais para a calibração de detectores de superfície, por serem abundantes, altamente penetrantes e minimamente ionizantes, gerando sinais que podem ser usados como referência por diversos tipos de detector. Mas, a resposta dos detectores frequentemente depende das trajetórias dos múons, não sendo eles mesmos capazes de determiná-las para uma auto-calibração. Assim sendo, arranjos como hodoscópios são empregados para caracterizar a resposta de detectores às trajetórias dos múons, e encontrar parâmetros que permitam o desenvolvimento de um processo de auto-calibração independente. Neste trabalho, apresentaremos um sistema de hodoscópio implementado para a caracterização de detectores de superfície no Observatório Pierre Auger, o maior observatório de raios cósmicos do mundo atualmente, apresentando os detectores utilizados neste observatório, discorrendo sobre a física envolvida nestes e sobre os processos de caracterização envolvidos. Os resultados obtidos são preliminares, mas demonstram boa performance na aquisição de dados, demonstrando seu potencial para caracterização, e trazem algumas discussões sobre o sistema.

Franco, G. F. Hodoscópio de Múons para caracterização de detectores de superfície. 2023.

Dissertação (Mestrado em Física, com ênfase em Física de Altas Energias.) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2023.

Palavras chave: Múons, raios cósmicos, Observatório Pierre Auger, câmaras de placas resistivas, hodoscópio

GUILHERME FERREIRA FRANCO

MUON HODOSCOPE FOR SURFACE DETECTOR CHARACTERIZATION

MASTER IN PHYSICS

EMPHASIS ON HIGH ENERGY PHYSICS

BRAZILIAN CENTER FOR RESEARCH IN PHYSICS

RIO DE JANEIRO, 2023

Abstract

Atmospheric muons are vital particles for the calibration of surface detectors, for they are abundant, highly penetrating and minimally ionizing, generating signals that can be used as a reference in several types of detector. But the detectors' response often depends on the muon trajectories, and they often cannot determine these trajectories themselves for a self-calibration. Therefore, setups such as hodoscopes are used to characterize the response of detectors to muon trajectories, and to find parameters that allow for the development of an independent self-calibration process. In this work, we will present a hodoscope system implemented for the characterization of surface detectors at the Pierre Auger Observatory, the largest cosmic ray observatory in the world today, presenting the detectors used in this observatory, discussing the physics involved in them and the characterization processes involved. The results obtained are preliminary, but show good performance in data acquisition, demonstrating its potential for characterization, and bring some discussions about the system.

FRANCO, G. F. Muon Hodoscope for Surface Detector characterization. 2023. Dissertation (Master's course in Physics with Emphasis on High Energy Physics) – Brazilian Center for Research in Physics, Rio de Janeiro, 2023.

Key words: Muons, cosmic rays, Pierre Auger Observatory, Resistive Plate Chamber, hodoscope

Lista de Figuras

1.1	Ilustração de um eletroscópio de folhas de ouro, como aqueles utilizados por Coulomb inicialmente. Retirado de [1].	2
1.2	Esquema de um eletroscópio sendo eletrizado. Inicialmente, ao se aproximar um corpo carregado, é induzida uma carga na superfície próxima ao corpo, levando à indução de uma carga oposta nas folhas de ouro, que se repelem por terem a mesma carga. Posteriormente, o corpo é friccionado contra a ponta do eletroscópio, carregando-o o por contato. A partir desse momento, o eletroscópio fica carregado, e só deveria descarregar por algum processo de condução entre sua parte metálica e os entornos. Retirado de [2].	3
1.3	Henri Becquerel (esquerda) e o casal Curie com sua filha Irène Joliot-Curie (direita). Henri, Marie e Pierre foram agraciados com o Nobel em Física de 1903 pela descoberta da radioatividade. Marie Curie ainda viria a receber o Nobel em Química de 1911, e sua filha Irène ganhou o Nobel em Química de 1935 pela descoberta da radioatividade artificial, junto com seu marido, Frédéric Joliot-Curie. Retirado de [3].	4
1.4	Hess (no centro da cesta) se preparando para fazer medidas em grandes altitudes	5
1.5	Esquema representativo do modelo de Heitler para cascatas eletromagnéticas. Retirado de [4].	6
1.6	Esquema representativo das diferentes componentes de um chuveiro iniciado por um hádron. Retirado de [5]	7
1.7	O rastro vertical no canto direito deste mosaico de micrografias é um pión carregado, que decaiu em um múon ou anti-múon (o rastro horizontal longo) e um antineutrino do múon ou neutrino do múon (que não é visível nesse meio). Retirado de [6]	7
1.8	Mapa original do Observatório Pierre Auger, mostrando o <i>array</i> de estações do SD (pontinhos) e os 4 edifícios do FD (vértices das linhas azuis).	9
1.9	Foto de uma estação de detector de superfície, sendo visível ao fundo outras estações do <i>array</i>	9
1.10	Diagrama de um telescópio de fluorescência do FD. O espelho segmentado focaliza a luz em uma câmera de PMTs. Retirado de [7]	10

1.11	Foto em longa exposição de um edifício do FD, onde se observa 4 baias abertas. Retirado de [8]	10
1.12	Estimativa experimental do fluxo diferencial de raios cósmicos em função da energia (pontos), e ajuste por 4 leis de potência (linha vermelha). Retirado de [9]	11
1.13	O gráfico da esquerda apresenta o valor esperado do X_{max} em função da energia, enquanto o gráfico da direita apresenta a dispersão do X_{max} em função da energia. As linhas vermelhas e azuis representam o que se espera de prótons e de núcleos de ferro (respectivamente) de acordo com 3 diferentes modelos de interação hadrônica. Os pontos são os dados experimentais. Retirado de [10].	12
1.14	Esquerda: Protótipo 3D de estação do SD no <i>AugerPrime</i> . Direita: Estação instalada no <i>array</i> . Retirado de [10].	13
1.15	Exemplo de hodoscópio simples, aplicável para casos onde a trajetória da partícula pode ser assumida retilínea. Dois detectores (superior e inferior) detectam a interseção da partícula, de forma a permitir a reconstrução de sua trajetória pelo espaço entre eles.	15
1.16	Foto da estrutura na estação experimental do WCD Gianni Navarra. A caixa metálica vista acima do WCD abriga a RPC superior, enquanto a RPC inferior fica em um trilho abaixo da estrutura.	16
2.1	Simulação de dois chuveiros atmosféricos iniciados por um próton (esquerda) e um núcleo de ferro (direita) de $10^{14}eV$. Em vermelho estão elétrons, pósitrons e gamas, em verde os múons e em azul os hádrons. retirado de [11]	18
2.2	Representação da frente de um chuveiro atmosférico e sua geometria em relação ao eixo. Retirado de [12]	19
2.3	Intensidade aproximada de hádrons (H), múons (μ) e elétrons (e), a nível do mar, em função da distância ao núcleo, em um chuveiro vertical iniciado por um próton de $10^{16}eV$. Retirado de [12].	20
2.4	Intensidade e fração cumulativa de múons em função da distância do eixo do chuveiro, para a LDF apresentada na figura 2.3.	21
2.5	Razão entre o fluxo vertical e o fluxo para outros zenites para múons de diferentes energias. Retirado de [13].	22
2.6	<i>Stopping power</i> de múons em função do seu momento linear. Note que para todos materiais, exceto o hidrogênio, o mínimo do <i>stopping power</i> tem valores próximos, entre 1 e 2 $MeVcm^2/g$. Adaptado de [14]	23
2.7	a) Situação onde $v_p < c/n$ e não há emissão de radiação Cherenkov. b) Situação onde $v_p > c/n$, e a interferência construtiva leva à emissão de radiação Cherenkov. A direção de propagação dos fótons produzidos é a normal da frente de onda, k . Adaptado de [15]	24

- 2.8 Coeficiente de atenuação (linha verde escura, em escala logarítmica) e espectro Cherenkov observado na água (linha azul, em escala linear), ressaltando o efeito da atenuação na porção ultravioleta da radiação Cherenkov na água. Retirado de [16] 25
- 2.9 Em alguns reatores nucleares, o núcleo é imerso em uma piscina de água para refrigeração e blindagem radioativa, e a radiação beta (elétrons de alta energia) emitida pelo núcleo produz quantidades visíveis de radiação Cherenkov na água. Retirado de [17] 26
- 2.10 Diagrama de um PMT. O fóton inicial incide no fotocátodo, emitindo um (foto)elétron que é desviado, por um eletrodo de focagem, para o primeiro dínodo. A colisão com o dínodo emite mais elétrons secundários, que são acelerados até o próximo dínodo pela diferença de potencial entre estes, levando à liberação de mais elétrons e assim por diante, até chegar no anodo, onde se faz a leitura do sinal. Retirado de [18] 27
- 2.11 Esquema do WCD utilizado no SD do Observatório Pierre Auger. Aqui, por simplicidade, se mostram apenas 2 PMTs. O *small PMT* ainda não está incluso. 28
- 2.12 Um sinal típico em uma das PMTs de um WCD do Observatório Pierre Auger, em função da passagem de um único múon. 29
- 2.13 Distribuição de comprimentos de trajetória para múons em um WCD do Observatório Pierre Auger, simulado com método Monte-Carlo. O pico observado corresponde ao comprimento da trajetória vertical. Retirado de [19] 30
- 2.14 Histogramas de carga total para 2 diferentes tipos de *trigger*: Coincidência entre dois cintiladores, um acima e outro abaixo do centro do tanque (VEM); e coincidência entre as 3 PMTs com um baixo limiar de discriminação (3-fold). Retirado de [20] 30
- 2.15 Estrutura interna do SSD, representando os dois módulos de 12 barras cintiladoras cada, com seus feixes de fibras óticas indo até o compartimento separado onde fica abrigada a PMT (quadrado branco no centro da figura). Retirado de [21]. 32
- 2.16 Foto de um WCD, com um SSD instalado, no *array* do SD. Retirado de [22] 32
- 2.17 Diagrama em corte da configuração mínima de uma RPC. Adaptado de [23] 34
- 2.18 Várias avalanches discretas sendo produzidas por uma partícula ionizante cruzando um volume gasoso. Adaptado de [24] 34
- 2.19 Foto de uma Avalanche de Townsend em uma câmera de nuvens, mostrando seu formato de "gota" devido à frente de crescimento exponencial. Retirado de [25] 35
- 2.20 Exemplo de seção de uma RPC convencional com eletrodos de média resistividade e plano de detecção separados. Adaptado de [23] 36
- 2.21 Sinal induzido em uma *pad* em função de uma avalanche. Sua forma é semelhante ao sinal de uma PMT, como na figura 2.12, porém com uma amplitude muito menor. Retirado de [26]. 37

3.1	Esquema básico da conexão entre RPCs e CeU no projeto MARTA. Retirado de [26]	40
3.2	Esquema das camadas das RPCs utilizadas neste trabalho.	41
3.3	Foto mostrando o plano de detecção dividido em pads e os cabos coaxiais durante a montagem de uma das RPCs deste trabalho.	42
3.4	Esquema de numeração das <i>pads</i> .	42
3.5	Foto de uma RPC montada, com os cabos coaxiais, conectores para gás e HV à mostra. A <i>pad</i> 1 nesta RPC é a mais próxima da quina frontal esquerda.	43
3.6	Foto de uma <i>Front-End</i> , igual a todas as utilizadas neste trabalho.	44
3.7	Foto de uma <i>Front-End</i> com uma Mezzanine, recebendo os cabos coxiais de uma RPC.	45
3.8	Ordem de crimpagem do cabo para utilização na comunicação LVDS.	46
3.9	Placa de desenvolvimento DE10-Standard da Intel	46
3.10	CeU com uma <i>Interface</i> conectada, na qual estão conectados cabos UTP.	47
3.11	Modelo 3D da da RPC de MARTA, com a tampa da expansão fechada (esquerda) e aberta (direita). Retirado de [26]	48
3.12	Esquema da eletrônica dentro da expansão. 1: multiplexador i2c da eletrônica dos borbulhadores; 2: PSU; 3: barramento i2c principal; 4: <i>Front-end</i> ; 5: <i>Mezzanine</i> ; 6: Fonte de HV; 7: borbulhadores e sua eletrônica; 8: LVDS IN; 9: LVDS OUT; 10: Porta de serviço; 11: conector para 24 VDC; 12: entrada de gás	48
3.13	Uma trama de <i>read request</i> , pedindo 4 bytes do endereço 31, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.	51
3.14	Uma trama de <i>write request</i> , ordenando a gravação de 1 byte, de valor 170, no endereço 2, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.	51
3.15	Uma trama de <i>satus report</i> indicando sucesso, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.	51
3.16	Uma trama de <i>read response</i> , retornando um byte de valor 60, após a requisição (de um byte) do endereço 15, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.	52
3.17	Esquema simplificado da comunicação entre módulos e as partes de entrada e saída do módulo de comunicação. Os demais módulos não podem gravar nos registros do módulo de comunicação, somente ler, e devem responder adequadamente às mudanças nestes. No envio de dados, eles devem colocar bytes nos seus próprios registros de byte a todo pulso do <i>New Byte</i> , para que o módulo de comunicação os leia.	53
3.18	Fluxograma dos mecanismos do módulo de hit.	56
3.19	Diagrama da lógica de <i>trigger</i> . Cada T_IN corresponde às linhas de <i>trigger</i> das portas LVDS IN da <i>Interface</i> , enquanto Reg bit [x] corresponde aos bits do registro de lógica de <i>trigger</i>	58

3.20	Fluxograma do mecanismo de <i>trigger</i> da CeU no modo de <i>trigger 4</i> , onde aplica operações lógicas às linhas de <i>trigger</i> de entrada (vindas das <i>Front-Ends</i>).	59
3.21	Diagrama geral de interconexão da instrumentação eletrônica do hodoscópio do CBPF.	62
3.22	Hodoscópio instalado no CBPF. 1: RPC inferior; 2: <i>Front-End</i> e <i>Mezzanine</i> ; 3: CeU e <i>Interface</i> ; 4: Sistema de monitoramento e alta tensão; 5: Fonte de alimentação geral; 6: Estação local de programação e debugging; 7: Cilindro de gás R143a; 8: WCD; 9: Crate NIM onde está a fonte de alta tensão da PMT do WCD. O Osciloscópio, assim como a RPC superior, estão fora do enquadramento da foto.	62
3.23	Fluxograma do <i>software</i> usado para a captura de dados do hodoscópio. Ver 3.24 para verificar sua coordenação.	63
3.24	Fluxograma do <i>software</i> usado para a captura de dados do osciloscópio.	64
3.25	Foto do WCD Gianni Navarra após a instalação do SSD e UUB. 1: Domo metálico sob o qual fica instalada a UUB; 2: SSD; 3: RPC superior; 4: WCD. A RPC Inferior está abaixo grade de aço que forma a base da estrutura.	65
3.26	Orientação das barras de suporte do SSD (em verde) relativa ao trilho da RPC superior (vermelho) e da RPC inferior (azul). As PMTs do WCD estão identificadas pelos seus números, conforme a numeração que aparece nos dados. A PMT 1 fica imediatamente abaixo da UUB.	66
3.27	Geometria do hodoscópio. A RPC superior e o centro de suas <i>pads</i> estão representadas em vermelho, enquanto a RPC inferior está em azul. As cruzes verdes indicam a <i>pad 1</i> de cada RPC, enquanto as cruzes amarelas indicam a <i>pad 64</i> de cada. Os dois retângulos azuis semi-transparentes representam a região sensível do SSD.	67
3.28	Esquema geral do sistema de hodoscópio + WCD + SSD no arranjo em Gianni Navarra.	69
3.29	Fluxograma do <i>firmware</i> de eventos da UUB.	70
3.30	Fluxograma do cliente de eventos da UUB.	70
3.31	Fluxograma do <i>firmware</i> de <i>muon fill</i> da UUB.	71
3.32	Fluxograma do cliente de <i>muon fill</i> da UUB.	71
3.33	Fluxograma do <i>software</i> de aquisição de dados do hodoscópio em Gianni Navarra.	72
3.34	Frequência relativa de 1s por posição da FIFO, em 50000 eventos, da RPC inferior no hodoscópio do CBPF. Os eventos estão muito próximos da posição 128, pois desde o evento até a recepção do <i>trigger</i> vindo da CeU, se passam apenas cerca de 90 ns, dos quais cerca de 20 ns se devem à propagação do sinal nos cabos.	73
3.35	Fluxograma geral do <i>software</i> de validação, tradução e correlação de dados entre hodoscópio e DeC.	74

3.36	Diagrama da determinação dos ângulos da trajetória para dois detectores planos, horizontais, considerando que os dados conhecidos são as intersecções x_b, y_b e x_t, y_t . θ é o ângulo azimutal enquanto ϕ é o ângulo zenital, se considerando que o eixo x está paralelo ao eixo norte-sul, e apontando para o norte.	75
3.37	Um cubo de <i>voxels</i> , onde há <i>voxels</i> com cor sólida e <i>voxels</i> vazios. Retirado de [27].	78
3.38	Visão frontal do processo onde um paralelepípedo (em verde) é movido ao longo da trajetória, pintando os <i>voxels</i> no caminho (em tons de cinza).	79
3.39	Visão <i>top-down</i> do paralelepípedo desalinhado em um plano horizontal de <i>voxels</i> , e a pintura produzida nesses <i>voxels</i> em função da passagem do paralelepípedo.	79
3.40	Métrica para busca e integração de sinais das PMTs do WCD. As regiões <i>baseline</i> e <i>charge</i> demarcam os intervalos usados para determinação da <i>baseline</i> e integração da carga, respectivamente. As linhas vermelha e laranja representam os limiares para busca de pico do sinal, o primeiro limiar sendo usado no intervalo de <i>bins</i> 700-720 e o segundo de 721 em diante.	80
3.41	Mesma imagem da figura 2.14, porém discriminando os nomes dados a cada pico. Adaptado de [20].	81
3.42	Mapas de calor dos fatores de fluxo R_i para cada <i>pad</i> da RPC superior.	82
3.43	Histogramas de multiplicidade para múons (histograma tracejado) e para todas partículas em uma área de 10m ² sob o fluxo simulado. A curva em vermelho representa a probabilidade de que o número de <i>hits</i> numa RPC (de 1.824m ²) seja igual ou maior que o número no eixo x (repare que essa escala não começa em zero). Retirado de [28]	83
4.1	Número de eventos por <i>pad</i> durante a aquisição. Os picos e vales periódicos vem dos fatores geométricos que influenciam no fluxo gerador de coincidência para cada <i>pad</i>	85
4.2	Mapas de calor da RPC inferior (esquerda) e superior (direita) durante a aquisição.	86
4.3	Mapa de calor das <i>pads</i> com mais eventos verticais em coincidência o WCD.	87
4.4	Visualização 3D do WCD baseado nos <i>voxels</i> interseccionados por trajetórias com sinal nos eventos. A <i>pad</i> 1 está no canto inferior direito frontal.	87
4.5	Exemplo de <i>trace</i> com um único pico (esquerda) e exemplo de um <i>trace</i> com nenhum pico, capturado por um <i>trigger</i> espúrio (direita).	88
4.6	Exemplo de <i>trace</i> com sinal saturado (esquerda) e exemplo de um <i>trace</i> com sinal fora do janela recortada (direita).	89
4.7	Exemplo de <i>trace</i> com mais de um pico.	89
4.8	Volume de <i>triggers</i> espúrios e de <i>triggers</i> com um único múon registrado pelas PMTs.	90

4.9	Distribuição (normalizada pela área abaixo da curva) do número de eventos detectados por <i>pad</i> na simulação, contra os valores encontrados nos dados. A discrepância é maior para o caso da RPC superior (esquerda).	90
4.10	Simulação e reconstrução da distribuição zenital (esquerda) e dos comprimentos de trajetória (direita).	91
4.11	Na esquerda, a distribuição de carga de cada PMT para os eventos de um múon nos dados, e na direita a simulação.	91
4.12	Na esquerda, a distribuição de carga de cada PMT para os eventos de um múon nos dados de 03/04, e na direita a simulação.	92
5.1	Sistema proposto. Os 64CD passam pelo módulo de <i>rate</i> , que irá bloquear quaisquer canais ruidosos demais, e saindo deste módulo irão passar por um detector de <i>rising edge</i> e daí então passar pelo OR lógico.	94

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
1 Introdução	1
1.1 Descoberta dos raios cósmicos	1
1.2 O observatório Pierre Auger	8
1.3 Trabalho desenvolvido	15
2 Fundamentação	17
2.1 Chuveiros Atmosféricos Extensos e seus Múons	17
2.2 Tipos de detector de partículas do SD	23
2.3 Hodoscópio	33
3 Materiais e Métodos	39
3.1 Hardware	41
3.2 <i>Firmware</i>	49
3.3 Arranjos experimentais	60
3.4 Análise de dados	72
3.5 Simulações	82
4 Resultados	85
4.1 Medidas com o hodoscópio do CBPF	85
4.2 Medidas com o Hodoscópio do Gianni Navarra	88
5 Conclusões e Perspectivas	93
6 Glossário	101

Capítulo 1

Introdução

Mecanismos e entes imperceptíveis permeiam o imaginário da humanidade desde os primórdios, seja na livre expressão artística ou na tentativa de compreender e explicar a realidade perceptível ao seu redor. O desenvolvimento da filosofia natural e posteriormente da ciência moderna trouxe ceticismo e cautela quanto à invocação do imperceptível, mas ao mesmo tempo terminou por provar sua inevitabilidade.

Mais do que explicar o papel do imperceptível em fenômenos perceptíveis bem estabelecidos, como aquele dos germes nas doenças contagiosas, a investigação científica e o desenvolvimento tecnológico acabou ainda por nos trazer à descoberta novos fenômenos que sequer tinham efeitos perceptíveis em nossa vida até então, mas que viriam a se mostrar fundamentais para a compreensão do nosso universo.

Um desses fenômenos são os raios cósmicos, que hoje são uma ferramenta fundamental para a física de altas energias, para a física atmosférica e para astrofísica, permitindo investigar desde as interações entre partículas subatômicas até os mecanismos de larga escala que aceleram os raios cósmicos em corpos celestes distantes.

Essas investigações dependem do emprego de detectores de partículas, cuja história de desenvolvimento se confunde com a própria história da descoberta dos raios cósmicos e da radiação ionizante.

1.1 Descoberta dos raios cósmicos

1.1.1 Ionização espontânea

O primeiro efeito causado por raios cósmicos a ser percebido foi a descarga espontânea de eletroscópios, instrumentos usados pra medir a presença de carga elétrica em corpos.

Um dos primeiros registros de investigação dessa descarga vem de 1785 [29], quando Charles-Augustin de Coulomb, após uma série de estudos, chegou à conclusão de que esse efeito não era consequência da condução elétrica através de um isolamento elétrico deficiente.

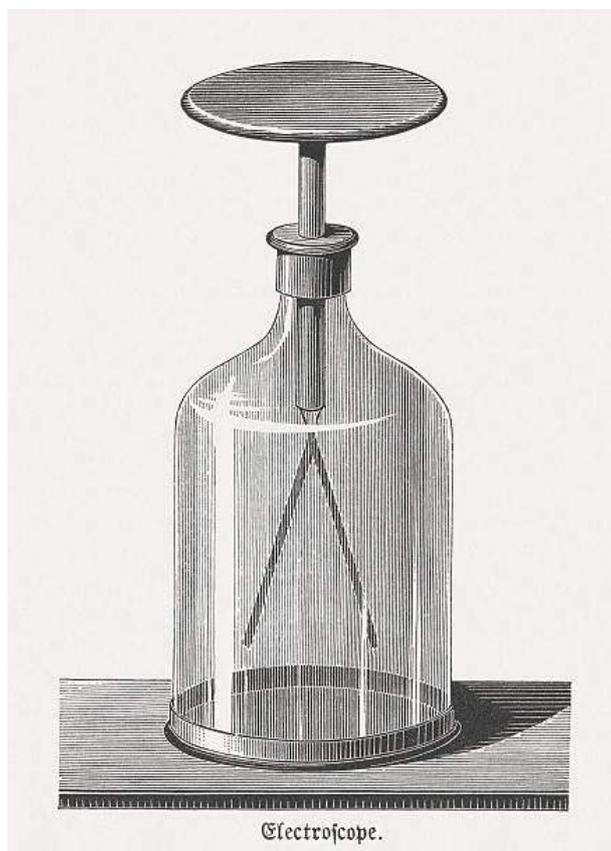


Figura 1.1: Ilustração de um eletroscópio de folhas de ouro, como aqueles utilizados por Coulomb inicialmente. Retirado de [1].

Michael Faraday também investigou esse problema em torno de 1835 [30], reforçando as observações de Coulomb. O eletroscópio foi otimizado desde então por Lord Kelvin, até que em 1879 [31], William Crookes conseguiu realizar experimentos que demonstravam que a descarga espontânea se tornava mais lenta conforme se reduzia a pressão dentro da garrafa do eletroscópio.

Tornou-se então evidente que a descarga estava relacionada a uma ionização do ar no eletroscópio, que leva a uma lenta condução elétrica entre as folhas de ouro e as paredes do eletroscópio, conforme íons de carga oposta àquela das folhas de ouro são atraídas em sua direção, e os íons de mesma carga são repelidos em direção às paredes. Mas, essa ionização ainda era vista como "espontânea", pois não se conhecia qualquer fonte externa que explicasse essa ionização.

Isso viria a mudar em 1896, quando Henri Becquerel [32] observou as primeiras evidências de radioatividade espontânea na matéria, ou seja, a emissão de radiação ionizante por núcleos atômicos devido à sua instabilidade. Poucos anos depois o casal Marie e Pierre Curie [33] identificaram vários isótopos radioativos naturalmente ocorrentes, ganhando o prêmio Nobel de física de 1903 junto com Becquerel.

Com estes desenvolvimentos, o eletroscópio passou a ser inclusive uma ferramenta

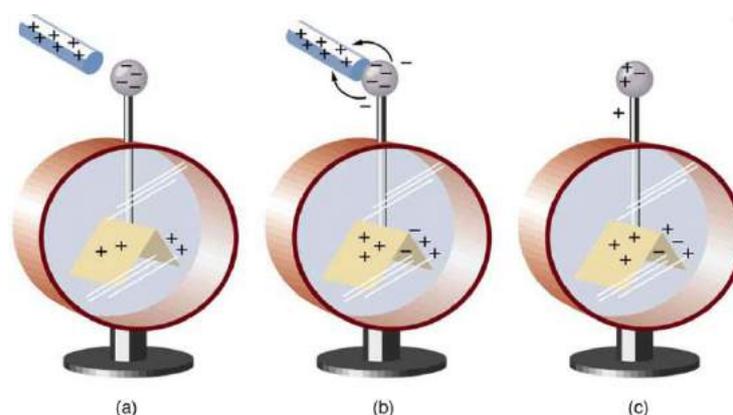


Figura 1.2: Esquema de um eletroscópio sendo eletrizado. Inicialmente, ao se aproximar um corpo carregado, é induzida uma carga na superfície próxima ao corpo, levando à indução de uma carga oposta nas folhas de ouro, que se repelem por terem a mesma carga. Posteriormente, o corpo é friccionado contra a ponta do eletroscópio, carregando-o e por contato. A partir desse momento, o eletroscópio fica carregado, e só deveria descarregar por algum processo de condução entre sua parte metálica e os entornos. Retirado de [2].

de medição de radiação ionizante, mas que continuava sempre a exibir uma taxa de fundo, que agora poderia ser atribuída à existência de materiais radioativos na crosta terrestre.

Várias investigações passaram a ser realizadas para determinar tanto a origem quanto a natureza dessa radiação, visto que ela se mostrava consideravelmente mais penetrante que a radiação dos materiais conhecidos até então.

Seu alto poder de penetração também frustrava a determinação de sua direção. Devido ao erro instrumental dos eletroscópios da época, não se conseguia observar nenhuma grande direcionalidade apenas se utilizando da colocação de blindagens em torno do eletroscópio [3]. Assim sendo, experimentos envolvendo o afastamento do aparato experimental da crosta terrestre se tornariam a fonte mais valiosa de informação.

Um dos primeiros experimentos a seguir essa linha foi realizado pelo Padre Theodor Wulf [34], que desenvolveu um eletroscópio mais sensível e o instalou no topo da Torre Eiffel, a cerca de 300 m de altitude.

Seus experimentos porém não demonstraram uma redução suficiente para confirmar ou rejeitar a hipótese de origem terrestre. O primeiro experimento a obter dados mais substanciais para a determinação da origem dessa radiação foram realizados por Domenico Pacini em 1911.

Pacini realizou experimentos com eletroscópios no mar, a 300 m de distância da costa, onde a taxa de ionização espontânea era cerca de 66% daquela em terra [35].

O fato mais importante, porém, era o de que, ao se submergir o eletroscópio 3 metros abaixo da água, havia uma redução adicional de 20% (em relação ao que se observava sobre a água), sendo que o submergir só o aproximava do fundo do mar, que tinha 7 metros de profundidade.



Figura 1.3: Henri Becquerel (esquerda) e o casal Curie com sua filha Irène Joliot-Curie (direita). Henri, Marie e Pierre foram agraciados com o Nobel em Física de 1903 pela descoberta da radioatividade. Marie Curie ainda viria a receber o Nobel em Química de 1911, e sua filha Irène ganhou o Nobel em Química de 1935 pela descoberta da radioatividade artificial, junto com seu marido, Frédéric Joliot-Curie. Retirado de [3].

Esses resultados eram significantes o suficiente para afirmar que uma porção não desprezível dessa radiação deveria provir de de outra origem que não da crosta, fosse da atmosfera, ou mesmo extraterrestre, como na hipótese dos "raios cósmicos" que já era discutida na comunidade científica.

A determinação definitiva da sua origem extraterrestre viria com os resultados de uma série de estudos realizados utilizando-se balões. Movidos principalmente pela metodologia e resultados de Padre Wulf, vários cientistas passaram a realizar estudos com balões para se obter medidas em maiores altitudes, incluindo Karl Bergwitz, Albert Gockel e, mais importante, Victor Hess.

Os estudos de Victor Hess [36] incluíram medidas da descarga de eletroscópios em várias altitudes, até 5200 metros, que juntas a várias medidas da absorção de raios gama levaram a conclusão que alguma forma de radiação extremamente penetrante haveria de incidir na atmosfera, vindo de fora.

Os impactos destes trabalhos na confirmação dos raios cósmicos trouxeram a Hess o prêmio Nobel de Física de 1936, que foi dividido também com Carl David Anderson, pela descoberta do pósitron. Porém, seus estudos não chegaram a determinar a exata natureza dessa radiação.



Figura 1.4: Hess (no centro da cesta) se preparando para fazer medidas em grandes altitudes

1.1.2 Chuveiros atmosféricos

Em 1936, Georges Lemaître e Manuel Sandoval Vallarta publicaram um artigo [37] que demonstrava uma dependência latitudinal do fluxo de raios cósmicos, que poderia ser entendida em função do movimento de partículas carregadas no campo geomagnético da Terra.

Estudos adicionais viriam então a elucidar que essa ionização não era gerada por partículas chegadas diretamente das fontes extraterrestres, e sim por partículas secundárias, geradas em uma cascata de produção de partículas pela interação entre a partícula primária e a matéria em nossa atmosfera.

O primeiro tratamento a cobrir uma porção dessas cascatas surgiu em 1938, quando Homi Jehangir Bhabha e Walter Heitler, estudando a natureza quântica da radiação, desenvolveram um modelo no qual elétrons, pósitrons e fótons gama altamente energéticos poderiam gerar uma cascata de partículas ao interagir com a matéria.

Nesse modelo, elétrons e pósitrons de alta energia emitem fótons gama por *Bremsstrahlung*¹, que por sua vez podem interagir novamente com a matéria e gerar pares elétron-pósitron, criando uma cascata de crescimento exponencial, como ilustrado na figura 1.5. Essa cascata é refreada conforme a energia dos novos fótons se reduz e diminui a probabilidade de produção de pares elétron-pósitron (que cai a zero em 1.02 MeV). [38].

Cascatas semelhantes já eram observadas em média escala em câmaras de nuvem, porém não havia evidências de cascatas semelhantes na atmosfera. Foi então que, em 1938, o físico francês Pierre Auger [39] fez uma importante descoberta: detectores de partículas no solo, mesmo que separados de uma grande distância, registravam uma quantidade de detecções simultâneas grande demais para ser explicada pela mera coincidência entre eventos independentes.

Essa foi a primeira observação a embasar a hipótese de cascatas de partículas iniciadas por raios cósmicos na atmosfera. Esses eventos vieram a ser conhecidos como

¹Radiação produzida quando uma partícula carregada sofre desaceleração ao interagir com a matéria.

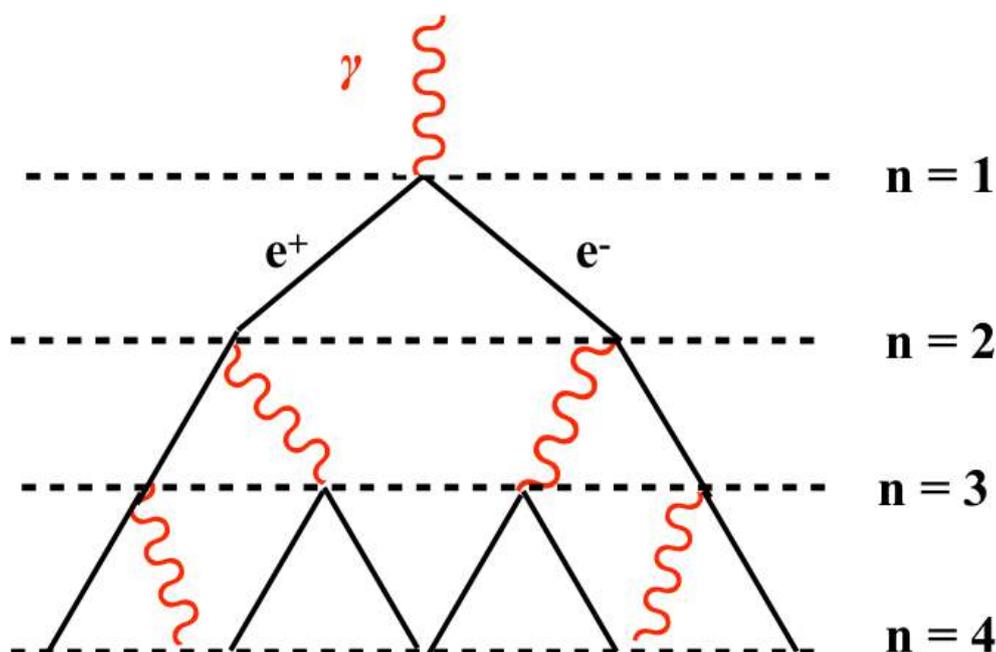


Figura 1.5: Esquema representativo do modelo de Heitler para cascatas eletromagnéticas. Retirado de [4].

chuveiros atmosféricos extensos ou simplesmente *chuveiros atmosféricos*.

Através de medidas experimentais, Auger calculou [40] que os primários desses chuveiros haveriam de ter energias da ordem de 10^{15} eV, energias em uma escala totalmente distinta daquela produzida em laboratórios.

Porém, chuveiros não são somente eletromagnéticos. Na realidade, a grande maioria dos chuveiros é iniciada por hádrons (como prótons e núcleos atômicos) que produzem uma cascata de interações hadrônicas e decaimentos, gerando uma grande diversidade de partículas, como núcleons, píons, káons, múons, neutrinos, e fótons gama que vão dar origem a cascatas eletromagnéticas secundárias, como ilustrado na figura 1.6.

A grande energia envolvida e a diversidade de partículas geradas fazem dos chuveiros atmosféricos extensos uma das principais ferramentas de investigação na física de altas energias, com diferentes usos.

A nível do mar, por exemplo, os chuveiros atmosféricos produzem um fluxo de múons de alta energia, partículas carregadas e altamente penetrantes, que correspondem à maior parte das partículas ionizantes sobreviventes dos chuveiros atmosféricos [13].

Seu alto poder de penetração permite, por exemplo, a investigação de estruturas maciças através da tomografia de múons (ou muografia), usada para estudar a estrutura de montanhas, pirâmides etc. Em altitudes maiores, encontra-se uma maior abundância de partículas como prótons, nêutrons, píons, elétrons, pósitrons, fótons gama, entre outras.

Foi justamente investigando essas partículas em grande altitude que o físico brasi-

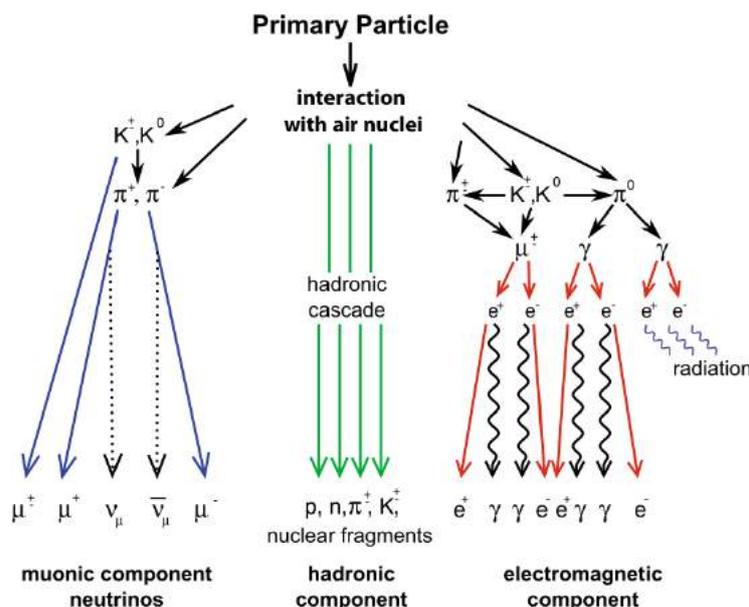


Figura 1.6: Esquema representativo das diferentes componentes de um chuveiro iniciado por um hádron. Retirado de [5]

leiro César Lattes realizou a descoberta do méson pi (ou pión) carregado [6] e da origem dos múons em chuveiros atmosféricos; ao registrar o decaimento de um pión em um múon e um antineutrino do múon em uma emulsão nuclear própria (uma emulsão fotográfica modificada para ter maior espessura e maior concentração de brometo de prata).

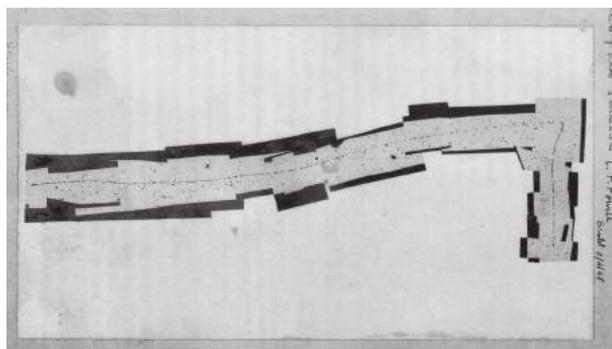


Figura 1.7: O rastro vertical no canto direito deste mosaico de micrografias é um pión carregado, que decaiu em um múon ou anti-múon (o rastro horizontal longo) e um antineutrino do múon ou neutrino do múon (que não é visível nesse meio). Retirado de [6]

Além do seu papel para o estudo da física de partículas em si, o estudo dos chuveiros nos dá uma poderosa ferramenta de investigação da nossa vizinhança galáctica e extragaláctica, à medida em que podemos reconstruir os primários, inferindo sua energia, direção de chegada e composição.

Por esses motivos, foram criados vários "observatórios de raios cósmicos", instalações científicas onde se utilizam diferentes tipos de detectores para registrar chuveis atmosféricos conforme atravessam a atmosfera e/ou atingem a superfície terrestre, para obter dados que permitam a reconstrução desses chuveis e seus primários.

Dentre estes destaca-se o Observatório Pierre Auger, que se encontra na América do Sul.

1.2 O observatório Pierre Auger

Resultado de uma colaboração internacional entre 18 países², incluindo Argentina, Brasil e Portugal, o Observatório Pierre Auger é o maior observatório de raios cósmicos do mundo em extensão, cobrindo uma área de mais de 3000 km² da planície na *Pampa Amarilla* próxima à cidade de Malargüe, na Província de Mendoza, Argentina.

Estando a 1400 m de altitude, este observatório foi concebido para investigar o fluxo, direção e composição em massa de raios cósmicos primários a partir da energia de 10¹⁸ eV [41].

Nesta época já se estimava que, na ordem de 10²⁰ eV, o fluxo de raios cósmicos seria da ordem de 1 evento por quilômetro quadrado por esterradiano por século, requerendo grandes áreas de detecção para conseguir obter estatística relevante nessas energias.

Por isso, foi desenvolvido um sistema híbrido, que combina um *Surface Detector* (SD) - um *array* de cerca de 1600 estações de detectores cobrindo 3000 km² de área - com um *Fluorescence Detector* (FD) - 4 estações de observação que ficam em torno do SD, cada uma com 6 telescópios para detecção de fluorescência atmosférica.

As estações do SD estão dispostas nos vértices de uma grade triangular de 1500 m lado, e tem como base um *Water Cherenkov Detector* (WCD), um tanque de água purificada no qual se registra a passagem de partículas carregadas de alta energia pela emissão de radiação Cherenkov, através de tubos fotomultiplicadores (PMTs) [41].

²À época da publicação desta dissertação.

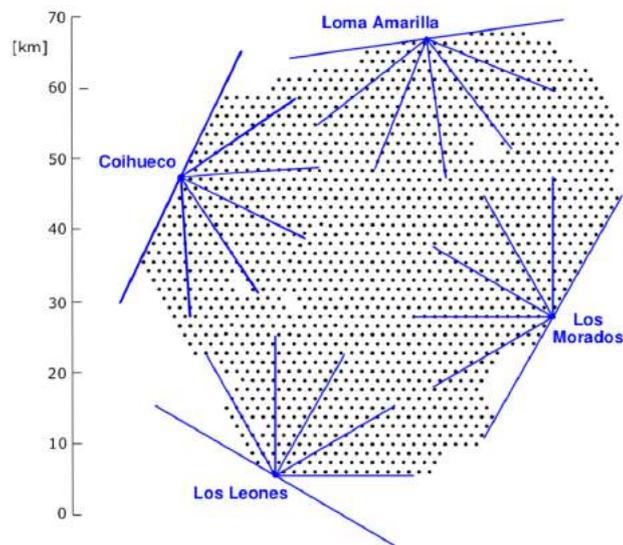


Figura 1.8: Mapa original do Observatório Pierre Auger, mostrando o *array* de estações do SD (pontinhos) e os 4 edifícios do FD (vértices das linhas azuis).



Figura 1.9: Foto de uma estação de detector de superfície, sendo visível ao fundo outras estações do *array*

Cada estação do FD contém 6 telescópios que focalizam a luz de diferentes porções do céu noturno em uma câmera composta por 440 PMTs de 40 mm de diâmetro cada, que conseguem captar a fluorescência do nitrogênio atmosférico quando este é excitado pelas partículas de um chuva [7].

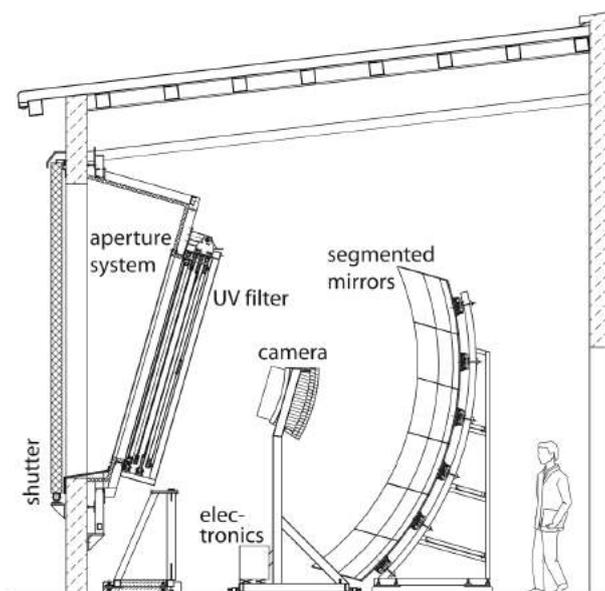


Fig. 4. Schematic view of a fluorescence telescope of the Pierre Auger Observatory.

Figura 1.10: Diagrama de um telescópio de fluorescência do FD. O espelho segmentado focaliza a luz em uma câmera de PMTs. Retirado de [7]

Cada telescópio fica instalado em uma baia individual, que conta com uma janela mecânica para fechar sua abertura fora dos horários de observação (que são tipicamente em noites sem lua, ou enquanto a lua não estiver no campo de visão dos telescópios).



Figura 1.11: Foto em longa exposição de um edifício do FD, onde se observa 4 baias abertas. Retirado de [8]

Com essa instrumentação, o Observatório Pierre Auger consegue cumprir sua principal tarefa: a medição e a caracterização do fluxo de raios cósmicos de ultra-alta energia.

Um dos seus principais resultados é a medida do fluxo de primários em razão da energia, o espectro de energia.

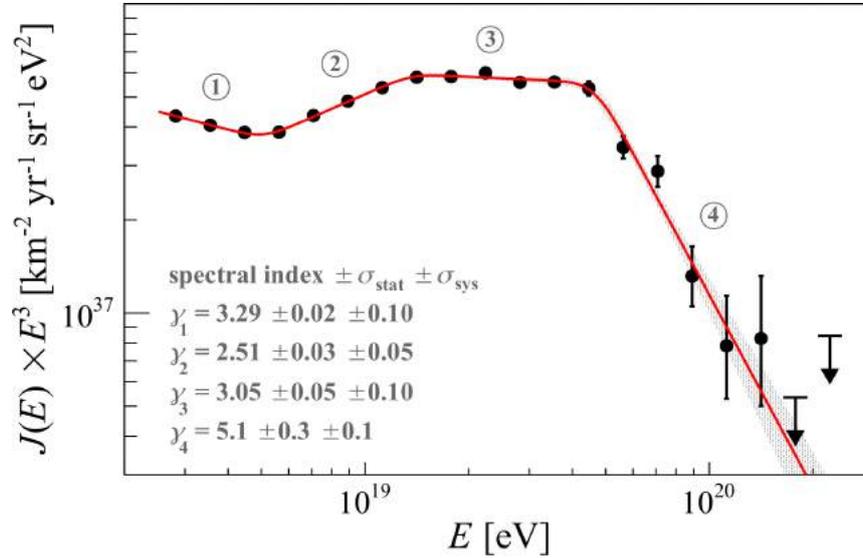


Figura 1.12: Estimativa experimental do fluxo diferencial de raios cósmicos em função da energia (pontos), e ajuste por 4 leis de potência (linha vermelha). Retirado de [9]

Esse espectro é tipicamente ajustado através de leis de potência com diferentes expoentes, explicando diferentes intervalos de energia e estando associadas a diferentes possíveis mecanismos.

É possível observar, a partir de 4.6×10^{19} eV, uma forte atenuação do fluxo de raios cósmicos, com uma taxa de variação mais intensa que as demais regiões.

Essa atenuação também foi observada por outros experimentos, como o *High Resolution Fly's Eye Cosmic Ray Detector* (HiRES), e seu estudo é fundamental para uma importante teoria física: o limite GZK.

Proposto independentemente por Kenneth Greisen [42], Georgiy Zatsepin e Vadim Kuzmin [43] em 1966, o limite GZK prevê um teto para a energia de prótons de fontes extragaláticas distantes.

Prótons com energia acima de 5×10^{19} eV, ao interagir com fótons da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM), podem produzir píons através da ressonância delta:



ou



Em função do livre caminho médio para essa interação e da grande fração de energia retirada dos prótons a cada ocorrência (cerca de 20%), não se deveria observar nenhum

próton com energia acima do limiar vindo de uma distância maior que 50 Mpc (o horizonte GZK), excluindo mais de 99.99999% do volume do universo observável.

As observações de vários diferentes experimentos observa uma supressão que coincide com a energia de 5×10^{19} , mas o número de eventos acima dessa energia trás dúvidas quanto a natureza desses eventos: Seriam estes raios cósmicos de outra composição; ou seriam prótons que desafiam o mecanismo do limite GZK?

Dados recentes do Observatório Pierre Auger sugerem que há uma mudança de composição dos raios cósmicos em altas energias, pela relação observada entre a profundidade do máximo dos chuueiros (X_{max}) e a energia do primário, como apresentado na figura 1.13.

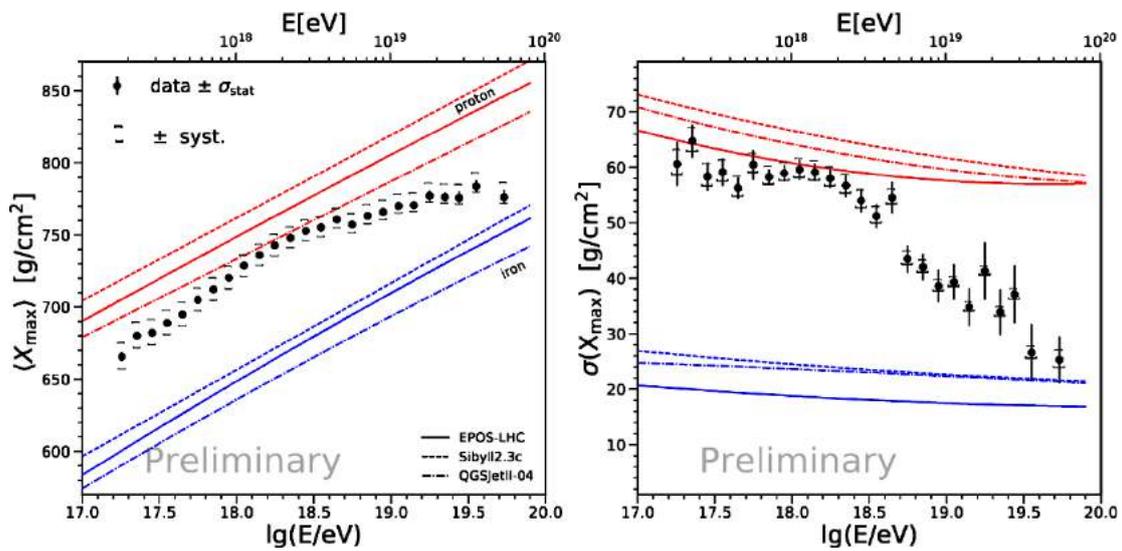


Figura 1.13: O gráfico da esquerda apresenta o valor esperado do X_{max} em função da energia, enquanto o gráfico da direita apresenta a dispersão do X_{max} em função da energia. As linhas vermelhas e azuis representam o que se espera de prótons e de núcleos de ferro (respectivamente) de acordo com 3 diferentes modelos de interação hadrônica. Os pontos são os dados experimentais. Retirado de [10].

Uma mudança de composição pode explicar simultaneamente a observação de uma atenuação justamente na energia prevista (visto que prótons deixam de contribuir) mas ainda se observa um excesso de eventos (pela contribuição de íons pesados).

Ainda sim, outros mecanismos semelhantes, como a fotodesintegração de núcleos pelos fótons da RFCM [42] afetam o fluxo neste intervalo de energias.

Para aprimorar a investigação do fluxo de raios cósmicos neste intervalo de energias, e com isso melhor compreender o efeito de mecanismos como o GZK e semelhantes neste intervalo de energias, é necessário se obter mais informações dos chuueiros atmosféricos, assim como se refinar os modelos de físicos que os descrevem.

Com esses objetivos, a Colaboração Pierre Auger buscou o desenvolvimento de um amplo *upgrade* do Observatório, culminando na criação do *AugerPrime*.

1.2.1 O upgrade AugerPrime

A determinação da composição dos raios cósmicos primários, assim como a validação dos modelos de interação entre raios cósmicos e atmosfera, depende da discriminação das componentes hadrônica, muônica e eletromagnética do chuveiro.

Para melhorar essa discriminação, o *AugerPrime* trás instalações localizadas, como o AMIGA (*Auger Muons and Infill for the Ground Array*) e também trás atualizações generalizadas, como a instalação de nova eletrônica e novos detectores em todas 1600 estações do SD.

Cada estação será adicionada de um detector de cintilador plástico (*Surface Scintillator Detector*, SSD) e uma antena para captação de sinais de rádio (*Short Aperiodic Loaded Loop Antenna*, SALLA) instaladas sobre o WCD.

O SSD utiliza como meio sensível um plástico que gera luminescência a partir da energia depositada por partículas ionizantes ao atravessar o meio sensível, detectando a luz através de fotomultiplicadores de silício (SiPM).

As antenas SALLA, enquanto isso, foram desenvolvidas para captar sinais eletromagnéticos na faixa das ondas de rádio gerados pela frente de partículas carregadas do chuveiro.



Figura 1.14: Esquerda: Protótipo 3D de estação do SD no *AugerPrime*. Direita: Estação instalada no *array*. Retirado de [10].

Além disso, será adicionado um pequeno PMT (*small PMT*, com 25 mm de diâmetro) dentro dos WCDs, para ampliar seu alcance dinâmico.

Para realizar o controle, interfaceamento e leitura desses detectores, foi desenvolvido uma nova central eletrônica, chamada de *Upgraded Unified Board* (UUB), que realiza a leitura das 3 PMTs do WCD, do sPMT, do SSD e da antena de rádio, sendo responsável pela geração de *triggers* a nível de estação e pelo envio de dados ao *Central Data Acquisition System* (CDAS).

A UUB é uma atualização da antiga *Unified Board*, que além de integrar os novos detectores, também muda as características dos sinais adquiridos, por diferenças de ganho analógico, de taxa amostragem, de *bit depth* (número de bits para representar o valor do sinal) etc.

A atualização da eletrônica trás a necessidade de se realizar processos de calibração utilizando os sinais conforme obtidos pela UUB, pois vários dos parâmetros que se medem em eventos são relativos aos sinais gerados em um evento de referência.

Por exemplo, no caso dos WCDs, os sinais em cada PMT são medidos em unidades de *Vertical Equivalent Muon* (VEM), que quantifica o sinal em razão do sinal produzido por múons verticais atravessando o centro do tanque.

No caso dos SSDs, o sinal é quantificado em termos do sinal de *Minimum Ionizing Particle* (MIP), que é produzido por partículas no mínimo do seu *stopping power*, ou seja, que depositam o mínimo de energia por unidade de comprimento ao atravessar o SSD.

Múons se comportam como MIPs para os SSDs, sendo novamente valiosos para a geração de um sinal de referência nestes. Esses detectores, porém, não são capazes de discriminar a trajetória dos múons por conta própria, e é inviável se realizar uma calibração manual com detectores auxiliares em cada unidade do SD.

Mas, é possível se estudar extensivamente o comportamento de uma amostra desses detectores, de forma a estabelecer uma relação entre esses sinais de referência e outras informações que possam ser adquiridas automaticamente de todas estações do SD, sem a necessidade de processos manuais e individuais.

Mais especificamente, o que se obtém de cada WCD e SSD é um histograma de carga induzida nos fotomultiplicadores por evento, em um grande número de eventos; tendo contribuições de múons com diversas trajetórias.

O estudo que se faz necessário envolve a análise da correlação entre as características desses histogramas e a trajetória de múons, que precisam ser registradas junto às demais informações a cada evento.

Por esse motivo, é interessante o emprego de um hodoscópio, um arranjo onde se utiliza detectores segmentados para se registrar a passagem de partículas ionizantes e determinar sua trajetória ao passar pelo arranjo, que se construído com espaçamento adequado, pode abrigar outros detectores dentro de seu volume.

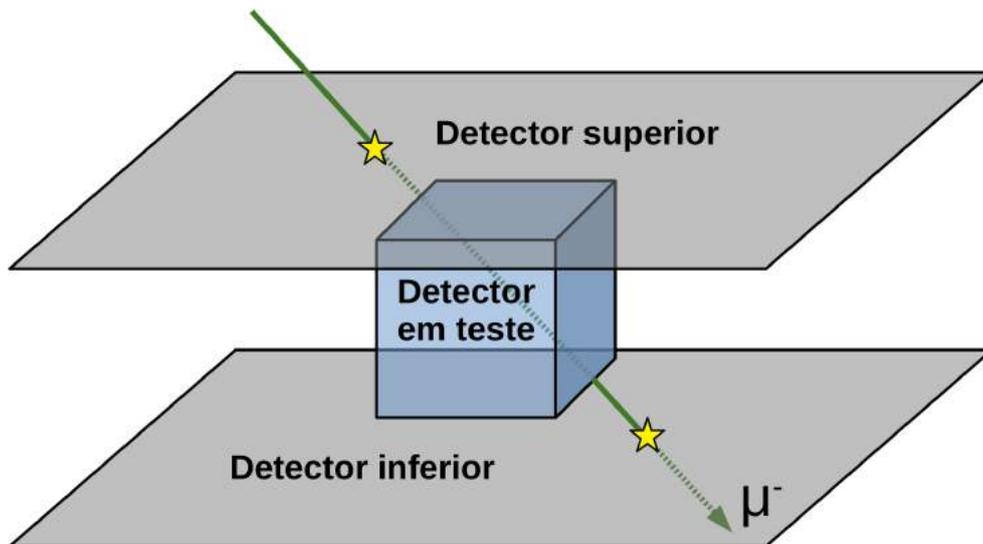


Figura 1.15: Exemplo de hodoscópio simples, aplicável para casos onde a trajetória da partícula pode ser assumida retilínea. Dois detectores (superior e inferior) detectam a interseção da partícula, de forma a permitir a reconstrução de sua trajetória pelo espaço entre eles.

Estudos de WCDs com um hodoscópio de múons já foram realizados anteriormente no Observatório Pierre Auger [44] [45] [28], porém a implementação da nova eletrônica trouxe a necessidade da condução de novos estudos para calibração, em função de diferenças entre os histogramas pela nova eletrônica em comparação à eletrônica anterior, que havia sido caracterizada nestes trabalhos anteriores.

1.3 Trabalho desenvolvido

Para poder conduzir os novos estudos, se propôs atualizar, implementar e operacionalizar um sistema de aquisição completo em um hodoscópio de múons já existente no Observatório do Pierre Auger, que anteriormente utilizava um sistema protótipo, capaz de usar apenas uma fração da área útil do hodoscópio anterior para detecção.

Esse hodoscópio consiste de um arranjo com duas Câmaras de Placas Resistivas (*Resistive Plate Chamber*, RPC), detectores gasosos planos que demonstram alta eficiência, alta capacidade de fluxo e alta velocidade de resposta na detecção de múons.

Essas RPCs estão instaladas uma acima e outra abaixo do WCD Gianni Navarra, que fica em uma estação experimental próxima ao prédio principal do Observatório Pierre Auger.



Figura 1.16: Foto da estrutura na estação experimental do WCD Gianni Navarra. A caixa metálica vista acima do WCD abriga a RPC superior, enquanto a RPC inferior fica em um trilho abaixo da estrutura.

Recentemente, essa estação também foi atualizada com um SSD e uma UUB, permitindo então que sirva de modelo para os detectores do SD no *AugerPrime*.

Dessa forma, a atualização e operacionalização completa deste hodoscópio com uma nova instrumentação permitirá a condução dos estudos necessários para a caracterização desses detectores para a obtenção dos parâmetros necessários para a calibração de dados no Observatório Pierre Auger.

Capítulo 2

Fundamentação

2.1 Chuveiros Atmosféricos Extensos e seus Múons

A grande maioria dos chuveiros atmosféricos são iniciados por hádrons de alta energia, principalmente prótons, mas em menor quantidade núcleos atômicos, como o Fe^{+26} , que interagem com a matéria em nossa atmosfera, transferindo a maior parte de sua energia através de interações hadrônicas.

As primeiras interações entre o primário hadrônico e os núcleos atômicos na atmosfera produzem principalmente píons, káons, núcleons e fragmentos de núcleo, que, juntos com o primário sobrevivente (se houver), irão interagir com mais núcleos atômicos, gerando mais partículas em uma cascata hadrônica.

O espalhamento lateral das partículas durante a propagação do chuveiro depende de como o momento é dividido a cada interação e de quantas interações ocorrem por unidade de comprimento.

Nas interações hadrônicas, a maioria das partículas é gerada com uma pequena fração de momento transversal, gerando um feixe compacto e intenso de hádrons na mesma direção do momento do primário, formando o núcleo do chuveiro. Porém, alguns dos processos geram hádrons com maior momento lateral, que podem dar origem a chuveiros com múltiplos núcleos ou sub-núcleos que não coincidem com o eixo do chuveiro (a direção do primário).

Os píons produzidos na cascata hadrônica podem também decair antes de interagir com mais núcleos na atmosfera.

Os píons carregados são os maiores responsáveis pela componente muônica dos chuveiros, à medida que decaem em um múon e anti-neutrino do múon ou em um anti-múon e um neutrino do múon.

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \quad (2.1)$$

Os múons gerados têm (em média) uma fração maior de momento transversal em relação aos hádrons do núcleo do chuveiro, gerando um feixe mais aberto que dos hádrons.

Enquanto isso, os píons neutros, que tem um tempo de vida muito inferior, irão na sua grande maioria decair antes de interagir, gerando dois fótons gama cada.

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (2.2)$$

Cada fóton gama por sua vez inicia uma cascata eletromagnética como aquela descrita pelo modelo de Heitler.

Adicionalmente, os múons também podem decair em elétrons/pósitrons e neutrinos, e alimentam uma pequena fração das cascatas eletromagnéticas, especialmente nas periferias do chuvaeiro.

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu) \quad (2.3)$$

Isso faz com que chuvaeiros atmosféricos de primário hadrônico sejam compostos tipicamente de um denso núcleo de hádrons, sobreposto com a componente muônica e a componente eletromagnética.

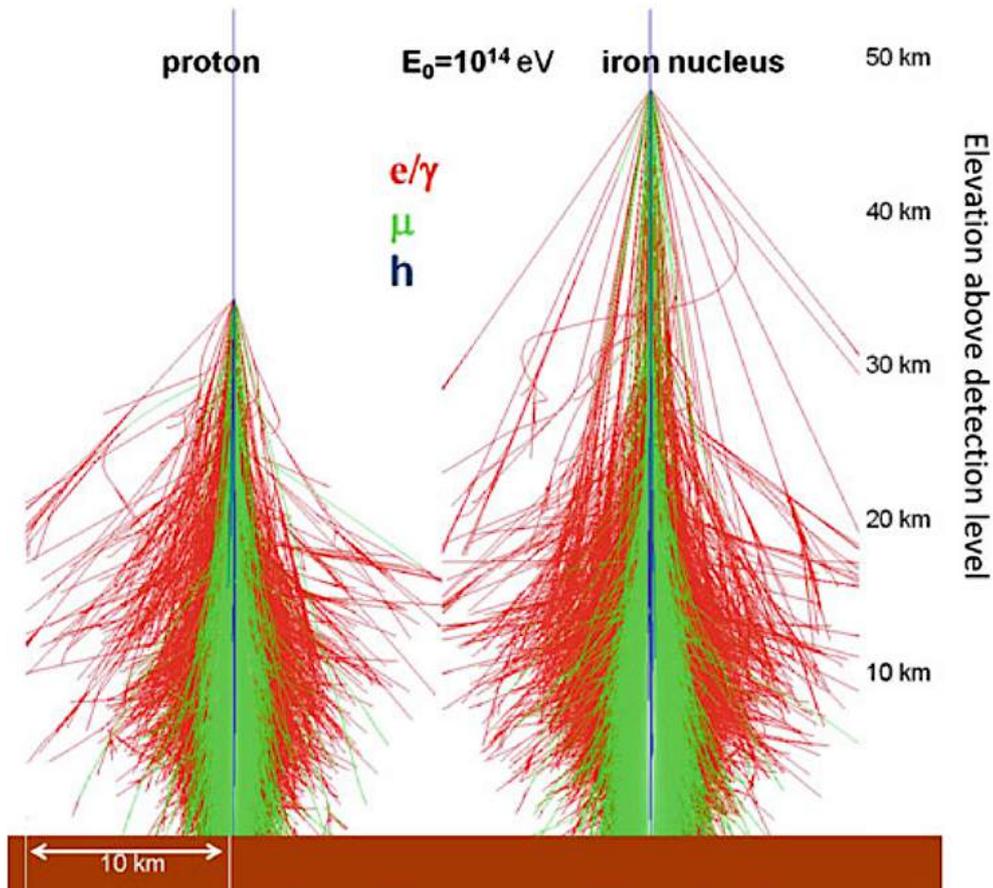


Figura 2.1: Simulação de dois chuvaeiros atmosféricos iniciados por um próton (esquerda) e um núcleo de ferro (direita) de 10^{14} eV. Em vermelho estão elétrons, pósitrons e gamas, em verde os múons e em azul os hádrons. retirado de [11]

Essas partículas se propagam todas em velocidade extremamente próxima à da luz em direção ao solo, o que faz com que, a qualquer momento, encontrem-se em um fino disco ligeiramente curvo (frente do chuveiro), perpendicular ao eixo do chuveiro.

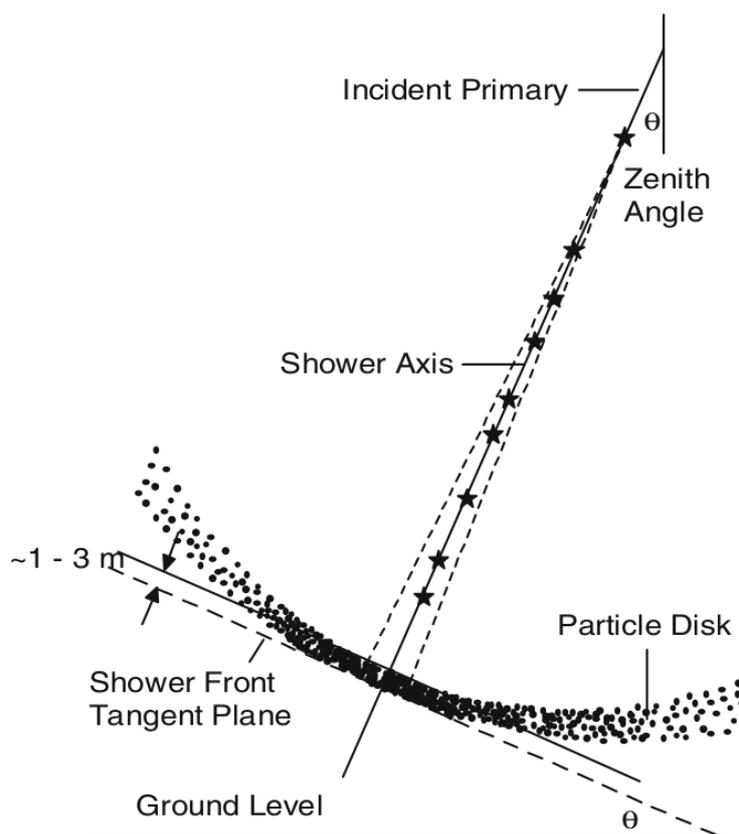


Figura 2.2: Representação da frente de um chuveiro atmosférico e sua geometria em relação ao eixo. Retirado de [12]

A quantidade de partículas por unidade de área no disco (intensidade) é grande no eixo do chuveiro e cai rapidamente para posições mais distantes (no sentido perpendicular ao eixo).

A função que relaciona a intensidade de uma partícula em função da sua distância ao eixo, em uma dada profundidade atmosférica, é a *Lateral Distribution Function* (LDF) daquela partícula.

A LDF de cada tipo de partícula para uma dada profundidade atmosférica depende também da natureza e energia do primário. A figura 2.3 traz um exemplo de LDFs para alguns tipos de partículas, a nível do mar, .

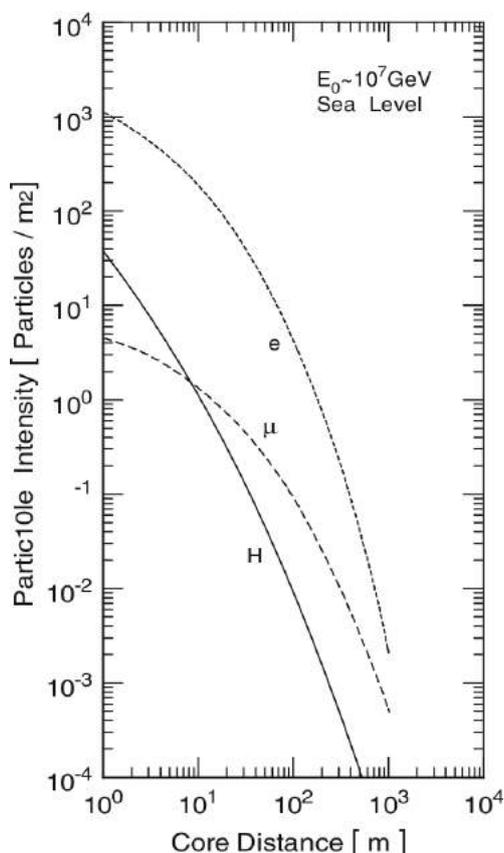


Figura 2.3: Intensidade aproximada de hádrons (H), múons (μ) e elétrons (e), a nível do mar, em função da distância ao núcleo, em um chuva vertical iniciado por um próton de 10^{16} eV . Retirado de [12].

Mas, além da LDF, para ponderar sobre a distribuição de partículas na área da frente de um chuva, é necessário lembrar que a área de um anel fino é proporcional ao raio do anel.

Em outras palavras, a área em torno de todos os pontos a uma mesma distância r do eixo é proporcional à r , sendo zero pra $r=0$ e crescendo com a distância, ao passo que a LDF é máxima pra $r=0$ e diminui com a distância.

Isso faz com que a maioria das partículas, incluindo os múons, estejam distribuídas em largas regiões de baixa intensidade do disco quando este atinge a superfície terrestre, com exceção dos hádrons, que estão extremamente concentrados no núcleo.

Por exemplo, utilizando-se a mesma LDF apresentada na figura 2.3, cerca de 90% dos múons de um chuva vertical iniciado por um próton de 10^{16} eV estarão distribuídos em regiões onde a intensidade é inferior a 0.5 m^{-2} ao chegar no nível do mar. A intensidade média dos múons para esse caso é de 0.18 m^{-2} .

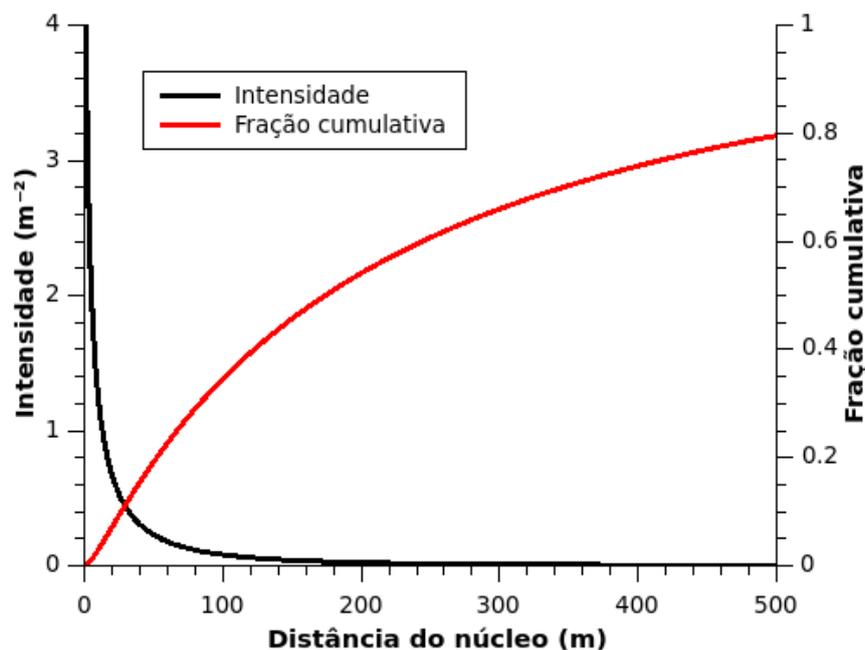


Figura 2.4: Intensidade e fração cumulativa de múons em função da distância do eixo do chuveiro, para a LDF apresentada na figura 2.3.

Isso também traz implicações pra multiplicidade de múons, o número médio de múons a atravessar um detector a cada evento. Para um detector de pequeno a médio porte (até a ordem de 10 m^2), registrando toda e qualquer passagem de múons, a grande maioria dos eventos contará com um único múon. ¹

Porém, apesar do pequeno número de múons a atingir um detector em chuveiros medianos, há um fluxo constante de múons vindos de diferentes chuveiros.

Como múons de alta energia sobrevivem por longas distâncias antes de decair e perdem pouca energia por interação com a atmosfera, toda superfície no solo experimenta um fluxo de "múons atmosféricos", que é produzido por chuveiros das mais distintas direções, energias e composições.

Esse fluxo tem como principais características a isotropia azimutal, e uma dependência zenital que é proporcional a uma potência do cosseno do zênite, potência essa que depende da energia dos múons.

O fluxo total (para múons de todas energias) a nível do mar é de aproximadamente 1 múon por centímetro quadrado por minuto, e sua distribuição angular é aproximadamente proporcional ao quadrado do cosseno do zênite, que corresponde à dependência para múons de $\sim 3 \text{ GeV}$ de energia.

¹A multiplicidade é muito maior se analisados apenas eventos produzidos por chuveiros de ultra alta energia, como aqueles que interessam ao Observatório Pierre Auger, mas estes são uma pequena minoria dos chuveiros.

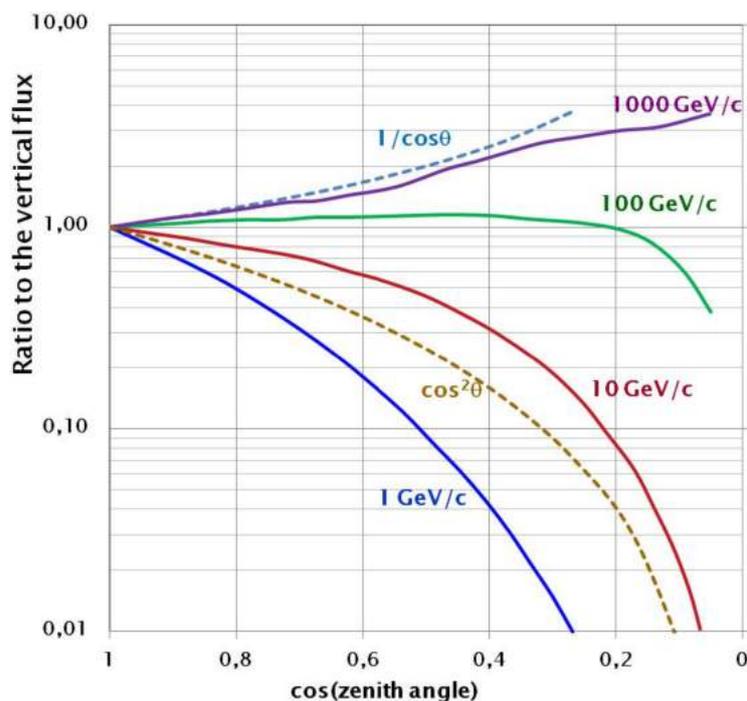


Figura 2.5: Razão entre o fluxo vertical e o fluxo para outros zenites para múons de diferentes energias. Retirado de [13].

A energia média dos múons vindos de todas direções, ao nível do mar, é de ≈ 4 GeV [14], energia suficiente para atravessar mais de 10 m de água.

Adicionalmente, em função da sua massa e momento linear típico, os múons atmosféricos estão próximos ao mínimo do seu *stopping power*, que é a quantidade de energia que depositam ao atravessar um meio, por unidade de comprimento, por unidade de densidade do meio, como representado na figura 2.6.

O *stopping power* nessa faixa de momentos linear se deve primariamente à ionização do material, o que significa que os múons atmosféricos são partículas que produzem o mínimo de ionização por unidade de comprimento em um dado material, sendo *Minimum Ionizing Particles* (MIPs), que são uma importante referência para detectores como cintiladores, onde o sinal produzido é proporcional à energia depositada pelas partículas carregadas.

Essas qualidades dos múons atmosféricos os tornam valiosos para os processos de auto-calibração dos detectores no Observatório Pierre Auger, sendo todos capazes de detectar e discriminar sinais de múons e então correlacionar dados estatísticos dos sinais (histogramas) com os sinais de múons verticais, desde que essa relação seja conhecida. Isso requer uma caracterização prévia desses modelos de detectores.

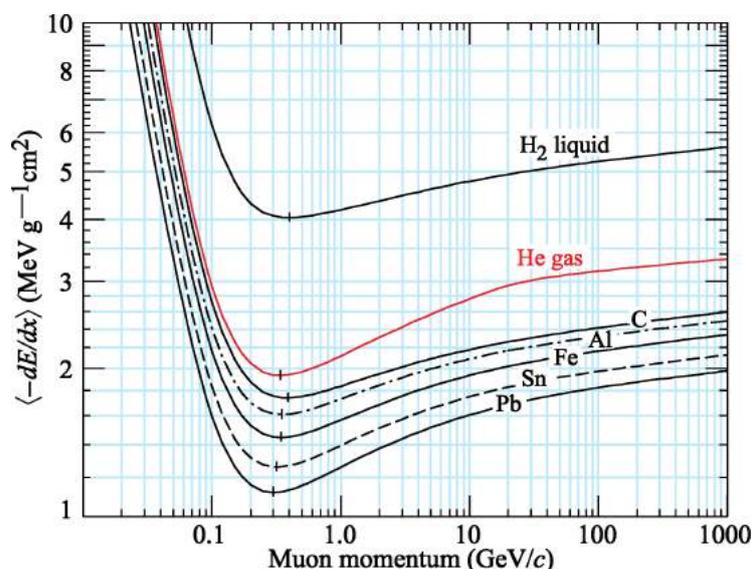


Figura 2.6: *Stopping power* de múons em função do seu momento linear. Note que para todos materiais, exceto o hidrogênio, o mínimo do *stopping power* tem valores próximos, entre 1 e 2 $\text{MeV cm}^2/\text{g}$. Adaptado de [14]

2.2 Tipos de detector de partículas do SD

2.2.1 Water Cherenkov Detector

Detetores de radiação Cherenkov na Água (*Water Cherenkov Detector/WCD*), são detetores de partículas carregadas que utilizam uma massa de água como meio de detecção, através da radiação Cherenkov.

A radiação Cherenkov

A radiação Cherenkov é uma emissão eletromagnética produzida quando partículas carregadas atravessam um meio polarizável, como um dielétrico, em uma velocidade superior àquela da luz naquele meio, ou seja, desde que:

$$v_p > \frac{c}{n} \quad (2.4)$$

, onde v_p é a velocidade da partícula carregada, c a velocidade da luz e n o índice de refração do meio [46].

Em um meio polarizável, as moléculas e/ou átomos do meio irão se polarizar em resposta à passagem de uma partícula carregada, e irão retornar ao seu estado despolarizado original imediatamente após sua passagem, emitindo radiação eletromagnética [46].

Usando o princípio de Huygens, pode se considerar que cada ponto do material emitirá uma onda eletromagnética de frente esférica, com velocidade c/n .

Se $v_p < c/n$, essas ondas não irão se interseccionar em nenhum ponto e não haverá interferência entre estas, como na figura 2.7(a). Mas, se $v_p > c/n$, essas frentes de onda irão se interseccionar e irão produzir interferência construtiva ao longo de uma superfície cônica, como em 2.7(b):

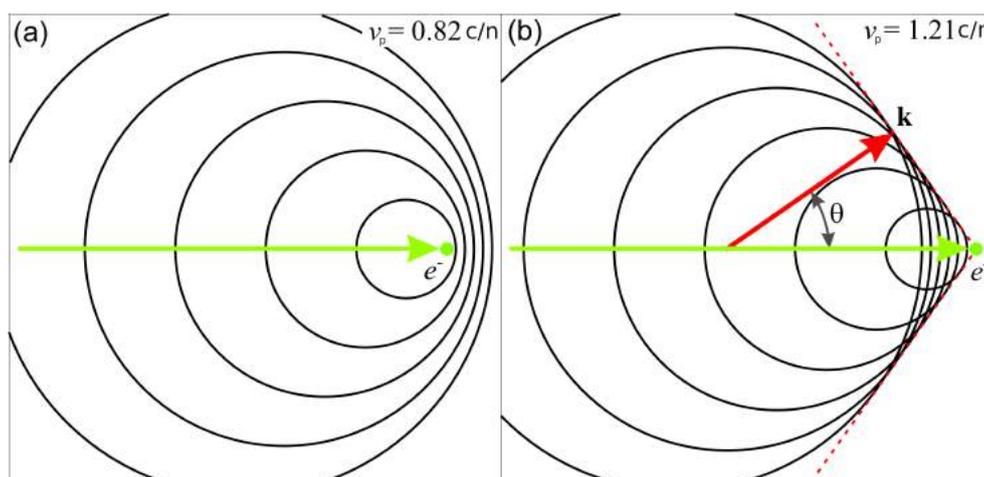


Figura 2.7: a) Situação onde $v_p < c/n$ e não há emissão de radiação Cherenkov. b) Situação onde $v_p > c/n$, e a interferência construtiva leva à emissão de radiação Cherenkov. A direção de propagação dos fótons produzidos é a normal da frente de onda, \mathbf{k} . Adaptado de [15]

Essa onda resultante, de frente cônica, é a radiação Cherenkov. Seu processo de formação é geometricamente análogo ao das ondas de choque mecânicas produzidas por corpos atravessando meios fluidos em velocidades supersônicas [46].

Porém, diferentemente do caso mecânico, o ângulo (θ) formado entre a normal dessa frente cônica e a trajetória da partícula (o ângulo de emissão) tem um limite bem definido, dado que $v_p < c$:

$$\theta = \arccos\left(\frac{c}{nv_p}\right) < \arccos\left(\frac{1}{n}\right) \quad (2.5)$$

Para o caso da água ($n \approx 1.33$), esse limite é aproximadamente $\theta < 41^\circ$.

Apesar de ser um limite, esse valor será próximo ao ângulo de emissão na água pela passagem de quase todas partículas de alta energia dos chuviscos atmosféricos, visto que nesse caso $v_p \approx c$ e que n não é muito próximo de 1.

Enquanto isso, a quantidade de energia (E) emitida por unidade de frequência angular (ω) por unidade de comprimento (x) percorrido pela partícula é dada pela fórmula de Frank-Tamm [47]:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x \partial \omega} = \frac{q^2}{4\pi} \omega \mu(\omega) \left(1 - \frac{c^2}{v_p^2 n^2(\omega)}\right) \quad (2.6)$$

, onde q é a carga da partícula, e $\mu(\omega)$ e $n(\omega)$ são as partes reais da permeabilidade magnética e do índice de refração do meio em função de ω (respectivamente).

$n(\omega)$ é o principal responsável por limitar a quantidade de energia emitida para ω arbitrariamente grande, pois $n(\omega)$ eventualmente cai a 1 em alguma frequência do intervalo entre o ultravioleta e raios-X para a maioria dos dielétricos transparentes.

Ainda sim, a proporcionalidade com ω implica que a maioria da energia será emitida nos maiores ω possíveis, ou seja, nos menores comprimentos de onda (λ) possíveis.

No caso da água pura, a parte real do índice de refração cai a 1 (e inclusive se torna inferior a 1) em $\lambda \approx 90$ nm, em uma região de dispersão anômala, causada por uma forte banda de absorção que se inicia (no sentido decrescente de λ) acerca de 200 nm, com $n(\omega)$ nunca retornando a valores significativamente superiores a 1 . [48].

Essa absorbância implica que grande parte da energia emitida será absorvida pela própria água, e só a região do ultravioleta e visível onde a água é transparente será útil a WCDs, como na região entre 250 e 500 nm [16].

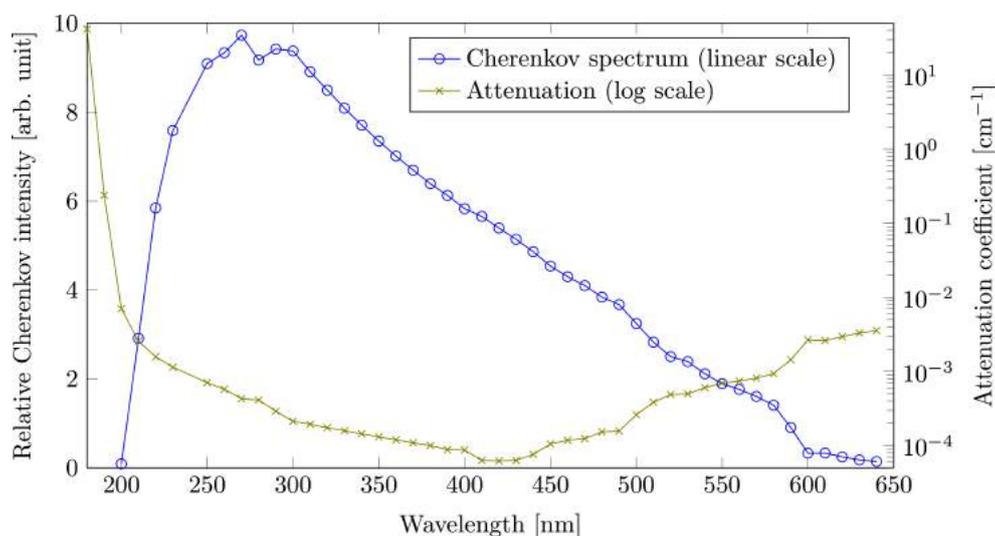


Figura 2.8: Coeficiente de atenuação (linha verde escura, em escala logarítmica) e espectro Cherenkov observado na água (linha azul, em escala linear), ressaltando o efeito da atenuação na porção ultravioleta da radiação Cherenkov na água. Retirado de [16]

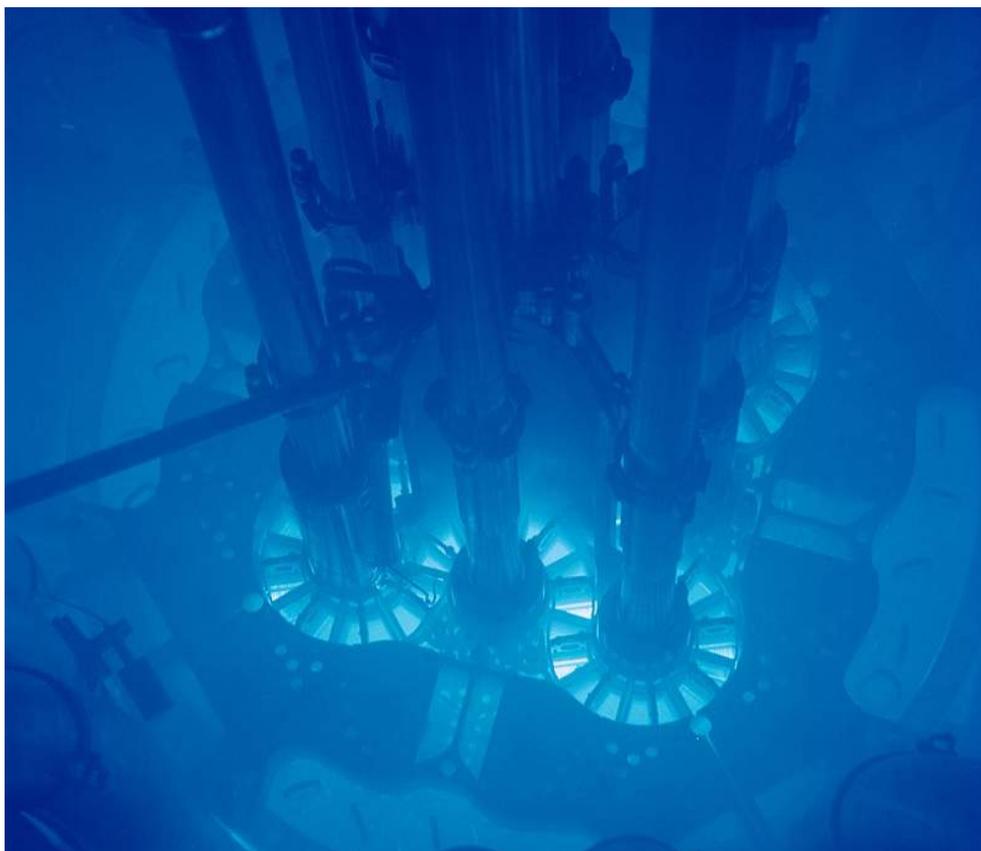


Figura 2.9: Em alguns reatores nucleares, o núcleo é imerso em uma piscina de água para refrigeração e blindagem radioativa, e a radiação beta (elétrons de alta energia) emitida pelo núcleo produz quantidades visíveis de radiação Cherenkov na água. Retirado de [17]

Vale notar também, analisando a fórmula de Frank-Tamm, que $\partial E/\partial x$ converge para um valor finito conforme $v_p \rightarrow c$, não escalonando com o fator de Lorentz como outras variáveis como energia cinética e momento de partículas relativísticas.

Isso tem raiz no fato de que a diferença de energia entre o estado despolarizado e polarizado do meio não depende de v_p , e sim do meio e da carga da partícula. A dependência de $\partial E/\partial x$ com v_p vem da sua influência na construtividade da radiação Cherenkov.

Usos e designs típicos

A abundância, baixo custo e alta densidade da água a torna interessante para um detector voltado para partículas de alta energia.

Como a quantidade total de radiação Cherenkov é proporcional ao comprimento da trajetória, e partículas de baixa energia são completamente freadas em poucos centímetros de água, a construção de detectores com dimensões na ordem de metros desvia a sensibilidade máxima para partículas de alta energia e alto poder de penetração,

como os múons atmosféricos.

Adicionalmente, considerando que não existe virtualmente nenhum atraso entre a passagem da partícula e a emissão da radiação Cherenkov, esse tipo de detector é muito útil para aplicações onde se necessita boa resolução temporal e resposta rápida aos eventos.

Uma das desvantagens, porém, é que a quantidade máxima de radiação Cherenkov emitida por partícula, por unidade de comprimento, é muito pequena. Detectar a passagem de uma única partícula através da água requer detectores extremamente sensíveis à luz visível e ultravioleta próximo.

WCDs, e detectores Cherenkov em um geral, só se tornaram viáveis com o desenvolvimento dos tubos fotomultiplicadores (PMTs), detectores que se baseiam no efeito fotoelétrico e em uma série de emissões secundárias para obter alto ganho eletrônico com baixo nível de ruído, tornando possível distinguir entre a fluxos extremamente pequenos de fótons (como nenhum fóton e um único fóton nos casos mais extremos).

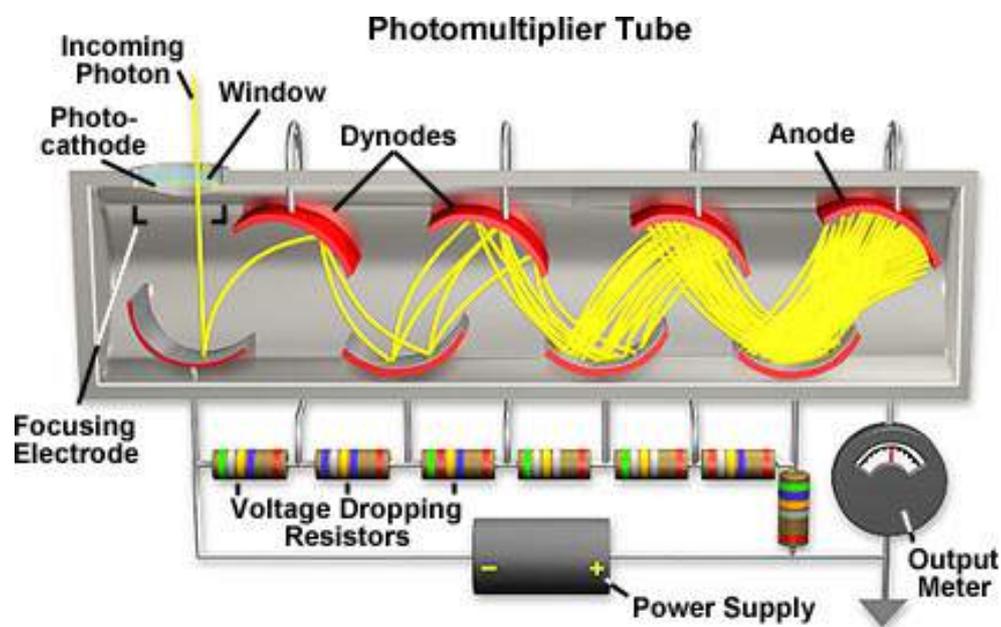


Figura 2.10: Diagrama de um PMT. O fóton inicial incide no fotocátodo, emitindo um (foto)elétron que é desviado, por um eletrodo de focagem, para o primeiro dínodo. A colisão com o dínodo emite mais elétrons secundários, que são acelerados até o próximo dínodo pela diferença de potencial entre estes, levando à liberação de mais elétrons e assim por diante, até chegar no ânodo, onde se faz a leitura do sinal. Retirado de [18]

O ângulo de emissão definido da radiação Cherenkov permite a discriminação ou mesmo reconstrução da direção da partícula incidente, motivo pelo qual alguns experimentos empregam múltiplos PMTs em um mesmo detector, alguns mesmo revestindo toda sua parede interna com PMTs, como no Super-Kamiokande [49].

Outros WCDs empregam múltiplos PMTs para maximizar a coleta de luz, geral-

mente também revestindo as paredes internas do detector com material de alta reflectância no ultravioleta e visível, como o Tyvek®, um tecido-não-tecido (TNT) utilizado na construção civil para envelopamento e proteção temporária de superfícies.

No Observatório Pierre Auger, os WCDs do SD utilizam um design com 3 PMTs de 230 mm de diâmetro (Photonis XP1805) instaladas no topo de um tanque cilíndrico de polietileno rotomoldado de 3.6 m de diâmetro de 1,5 m de altura. A água é contida dentro de uma bolsa instalada dentro do tanque, que tem pelo lado externo camadas pretas opacas e pelo interno uma camada de Tyvek®.

A coluna de água interna tem 1,2 m de altura, e as PMTs estão dispostas nos vértices de um triângulo equilátero, o centro de cada uma estando a 1,2 m do centro do tanque, estando acima de domos flexíveis e transparentes costurados à bolsa de água.

O *small PMT* a ser adicionado é Hamamatsu R8619, com 25 mm de diâmetro, a ser colocado acima outro domo flexível já existente no centro do tanque.

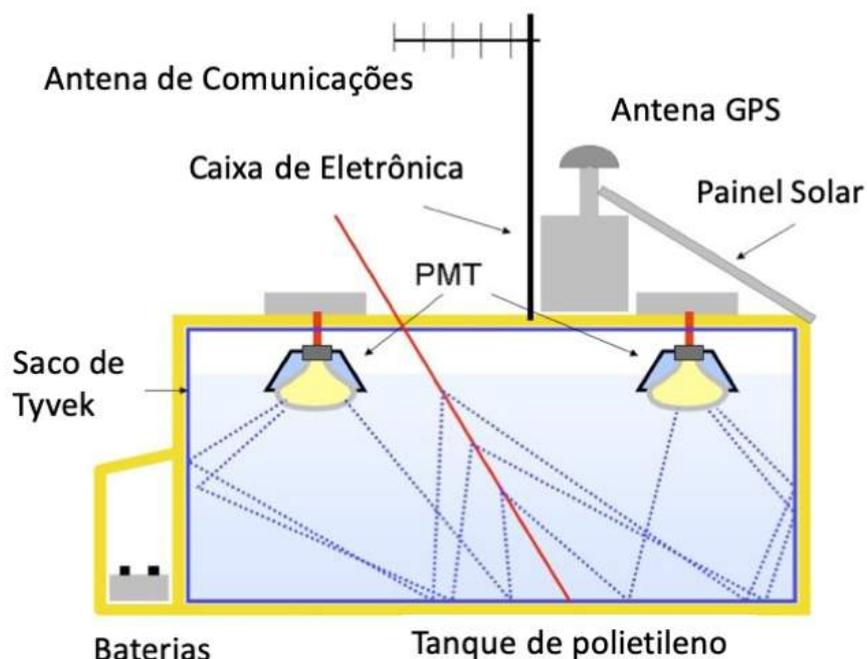


Figura 2.11: Esquema do WCD utilizado no SD do Observatório Pierre Auger. Aqui, por simplicidade, se mostram apenas 2 PMTs. O *small PMT* ainda não está incluso.

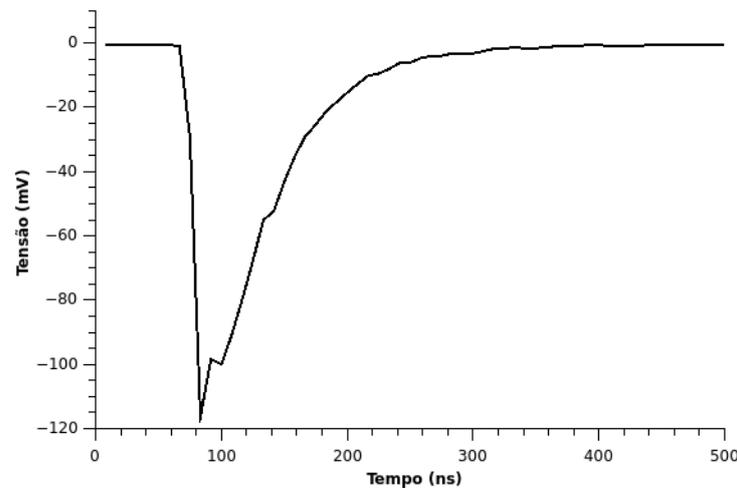


Figura 2.12: Um sinal típico em uma das PMTs de um WCD do Observatório Pierre Auger, em função da passagem de um único múon.

Considerando a simetria cilíndrica do detector, junto à distribuição zenital experimentalmente observada dos múons atmosféricos, pode-se calcular uma distribuição de comprimentos de trajetória percorridas pelos múons atmosféricos no detector (assumindo que todos irão atravessar todo o tanque) [19].

Como a trajetória vertical é a menor trajetória para um múon atravessando o topo e o fundo do tanque, a distribuição de comprimentos deve ter um súbito pico no valor dessa trajetória, pois somente outros percursos de contribuição muito inferior (como topo-lateral, lateral-lateral) podem contribuir para essas trajetórias menores, como pode ser visto no gráfico da figura 2.13.

A carga total induzida em todas as 3 PMTs é, em média, proporcional ao comprimento da trajetória de um múon em cada evento, mas há uma flutuação aleatória em razão dos processos fotoeletrônicos, que tem um desvio padrão conhecido. Por exemplo, na figura 2.14, é possível ver que os múons verticais atravessando o centro do tanque (VEM) produzem uma banda no histograma de carga e não um pico perfeitamente fino.

Assim sendo, o histograma de carga pra todos múons traz essencialmente uma convolução da distribuição de comprimentos com a distribuição de carga para cada comprimento, correspondendo ao segundo pico do histograma 3-fold na figura 2.14.

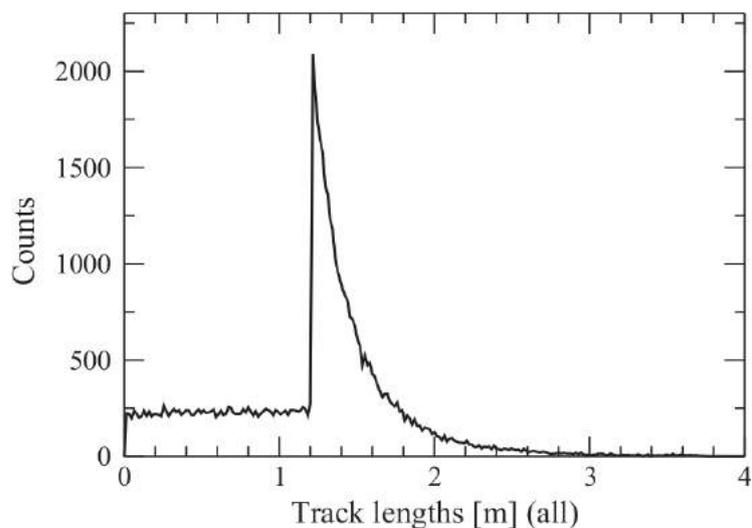


Figura 2.13: Distribuição de comprimentos de trajetória para múons em um WCD do Observatório Pierre Auger, simulado com método Monte-Carlo. O pico observado corresponde ao comprimento da trajetória vertical. Retirado de [19]

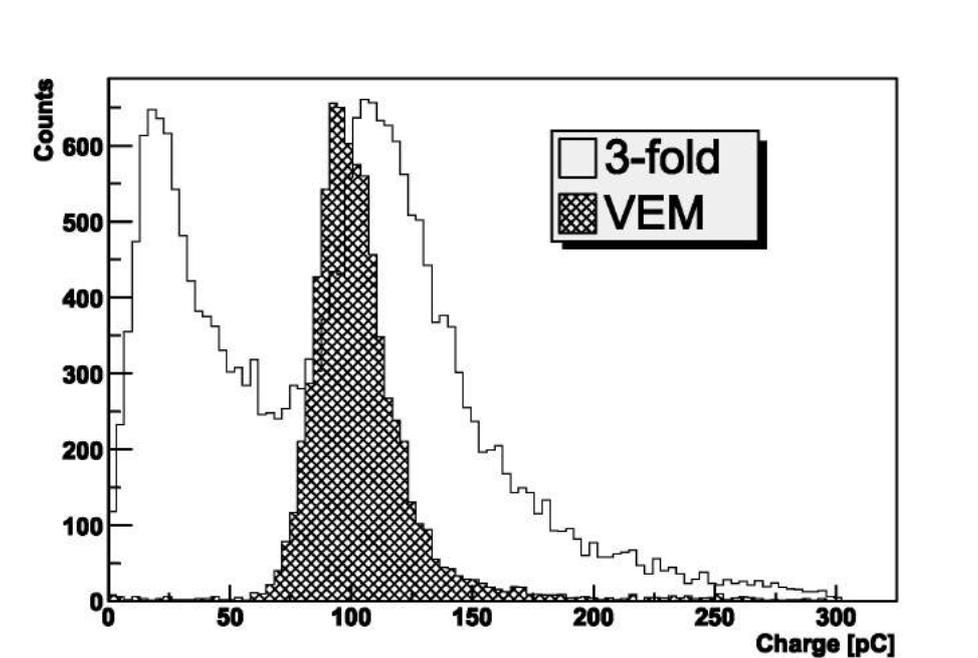


Figura 2.14: Histogramas de carga total para 2 diferentes tipos de *trigger*: Coincidência entre dois cintiladores, um acima e outro abaixo do centro do tanque (VEM); e coincidência entre as 3 PMTs com um baixo limiar de discriminação (3-fold). Retirado de [20]

O primeiro pico é um artefato do baixo limiar de discriminação do *trigger* utilizado para gerar esse histograma, que acaba por incluir como eventos fenômenos de

alta frequência porém baixa carga integrada, como contribuições da componente eletromagnética dos chuveiros (que penetra poucos centímetros na água), além de interferência e ruído eletrônico.

Sendo a relação entre o VEM e o segundo pico do histograma de carga total (3-fold) conhecida e bem definida, cada estação pode então obter dados para a calibração *offline* automaticamente², sem necessitar de processos de calibração manual com auxílio de outros detectores [20].

Foram exatamente mudanças nesses histogramas gerados pela UUB, em comparação com aqueles gerados pela UB, que trouxeram a necessidade de novos estudos de caracterização para se ajustar o processo de calibração no SD do *AugerPrime*.

2.2.2 Plastic Scintillator Detectors

Detectores de cintilador plástico, como o SSD do *AugerPrime*, são detectores que utilizam um polímero sólido transparente, dopado com um ou mais compostos orgânicos, que exibem luminescência em resposta à incidência de radiação ionizante [46].

A cintilação se inicia quando uma partícula ionizante transfere energia ao material por diferentes processos, seja excitando moléculas, ou ionizando-as e ejetando elétrons, ou até mesmo gerando cascatas de partículas secundárias no material, que também irão ionizar e excitar mais moléculas.

O processo termina conforme pares elétron-íon se recombinam e todas moléculas excitadas decaem ao estado fundamental, e nesse momento é importante que os decaimentos finais ocorram pela emissão de fótons nos dopantes.

Ou seja, é importante que a energia depositada no plástico seja transferida aos dopantes e emitida como fótons nos comprimentos de onda desejado. A probabilidade de um estado excitado do plástico levar à emissão de um fóton no dopante é a eficiência quântica do cintilador, que pode chegar próxima de 100% para alguns cintiladores plásticos modernos [46].

Assim sendo, a quantidade total de luz produzida na cintilação é proporcional à energia depositada pela partícula.

Uma partícula completamente frenada no cintilador irá depositar toda sua energia, mas uma partícula carregada que o atravesse irá depositar uma quantidade de energia proporcional à densidade do material do cintilador, ao comprimento da trajetória e ao *stopping power* da partícula.

Por isso, uma MIP, como um múon atmosférico, irá produzir o menor sinal possível para uma partícula capaz de atravessar todo o cintilador, o que torna o sinal produzido por múons uma referência útil e acessível para a calibração de cintiladores.

O SSD do *AugerPrime* é composto por dois módulos, cada um com 12 barras de cintilantes de 1 cm de espessura, por 10 cm de largura e 1.6 m de comprimento, feitas

²Há também um processo de calibração *online*, onde se utiliza um limiar pré-definido como *trigger* e se ajusta a alta tensão de cada PMT individualmente, até que cada uma produza cerca de 100 *triggers* por segundo [20].

de poliestireno cristal dopado com 0.1% PPO e 0.03% POPOP, co-extrudado com uma camada de TiO_2 para refletir a luminescência internamente e com 4 furos longitudinais para abrigar fibras óticas para a coleta da luz, que é realizada por fibras Y11(300)M S-type. [22].

As fibras vindas dos dois módulos se conectam a um acoplador ótico, que é conectado a uma PMT de 38 mm de diâmetro (Hamamatsu R9420), formando um sensor com área total de detecção de $\approx 3.8 \text{ m}^2$.

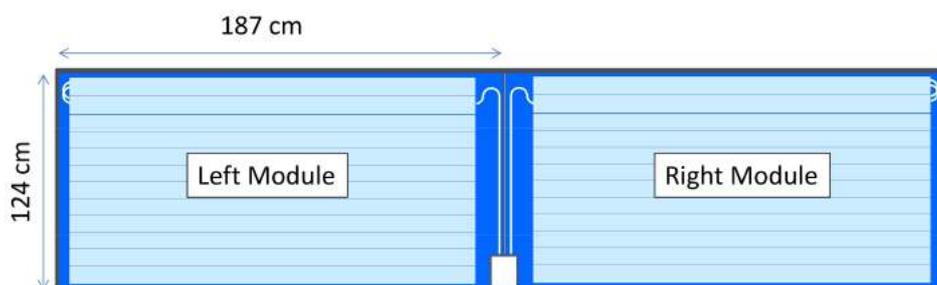


Figura 2.15: Estrutura interna do SSD, representando os dois módulos de 12 barras cintiladoras cada, com seus feixes de fibras óticas indo até o compartimento separado onde fica abrigada a PMT (quadrado branco no centro da figura). Retirado de [21].

O SSD é instalado sobre o WCD, de forma que cada estação do SD pode adquirir eventos em coincidência entre o SSD e o WCD se desejar, como forma de filtrar o *background* gerado por partículas de baixa energia no SSD e obter o espectro de carga gerado por múons (que será o espectro de MIPs).



Figura 2.16: Foto de um WCD, com um SSD instalado, no *array* do SD. Retirado de [22]

2.3 Hodoscópio

Hodoscópios são arranjos experimentais onde se utiliza detectores segmentados para determinar a trajetória de partículas, através da determinação de sua posição ao atravessar esses detectores. Esse tipo de arranjo pode ser usado para registrar o fluxo de partículas atravessando um corpo adjacente aos detectores, como se faz na tomografia de múons, ou mesmo para registrar o fluxo de partículas através de corpos situados dentro do arranjo, entre os detectores do hodoscópio

Esse segundo cenário pode ser explorado para a caracterização de detectores, colocando-se detectores dentro do espaço livre de um hodoscópio e se registrando dados tanto do hodoscópio quanto dos detectores em caracterização (que serão referidos daqui em diante como DeC) a cada evento.

Em função do grande volume de água do WCD, sua colocação dentro de um hodoscópio garante que virtualmente todas as partículas ionizantes dos chuueiros atmosféricos a atravessar o arranjo completo sejam múons, que não sofrem nenhuma deflexão relevante em suas trajetórias em nenhum dos detectores em questão.

Sendo retilíneas, essas trajetórias podem ser reconstruídas através da simples determinação da posição dos múons ao atravessar o plano horizontal acima e abaixo dos DeC, o que pode ser feito com dois detectores planos.

O arranjo experimental necessita ser capaz de detectar coincidências entre esses dois detectores planos e gerar *triggers* para a eletrônica dos DeC para que esta realize a captura dos sinais.

É interessante que esse arranjo tenha resposta rápida, eficiência alta na detecção de múons, e capacidade de medir o maior fluxo possível, afim de não perder eventos e conseguir obter a quantidade desejada o mais rápido o possível.

Por isso, o tipo de detector escolhido para a construção do hodoscópio para caracterização de detectores no Observatório Pierre Auger foi a Câmara de Placas Resistivas (*Resistive Plate Chamber*, RPC).

2.3.1 Resistive Plate Chambers

RPCs são detectores planos voltados à detecção da passagem de partículas ionizantes através de um fino volume de gás (um *gap*) que separa duas largas placas paralelas, ao menos uma delas sendo uma placa resistiva (PR) feita de material de alta resistividade, como Bakelite ou vidro. RPCs também podem ter múltiplos *gaps*.

No *gap* se estabelece um intenso campo elétrico, através de ao menos dois eletrodos planos entre os quais se aplica alta tensão em corrente contínua.

As PRs cumprem o papel de limitar a carga imediatamente disponível para eventuais descargas localizadas, limitando sua duração sem a necessidade de se utilizar outros métodos como alta tensão pulsada [50].

No que seria a configuração mínima de uma RPC, sinais elétricos poderiam ser captados diretamente nos mesmos eletrodos onde se aplica a alta tensão, como na figura 2.17.

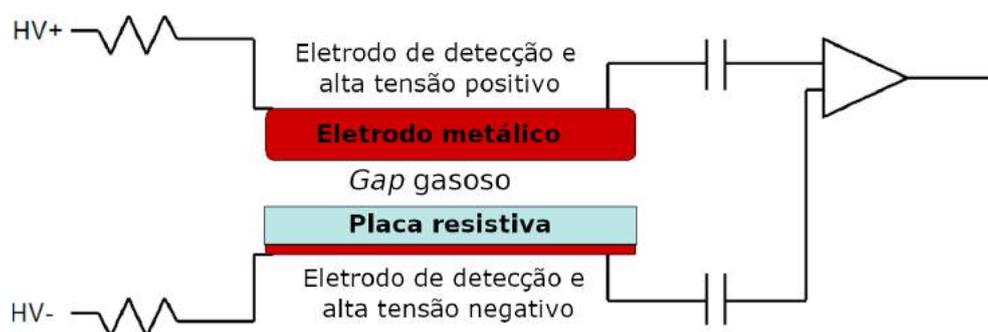


Figura 2.17: Diagrama em corte da configuração mínima de uma RPC. Adaptado de [23]

Os eventos elétricos de interesse se iniciam a partir do momento que fótons ou partículas carregadas de alta energia penetram a RPC e ionizam um certo número de átomos ou moléculas do gás, gerando pares cátion-elétron, que são então acelerados em direções opostas pelo campo elétrico estabelecido no *gap*.

Os elétrons, que tem menor massa, são acelerados até velocidades suficientes para ionizar mais átomos ou moléculas ao colidir com estas, gerando mais pares cátion-ion e assim por diante, produzindo uma avalanche de elétrons de crescimento exponencial, conhecida como Avalanche de Townsend.

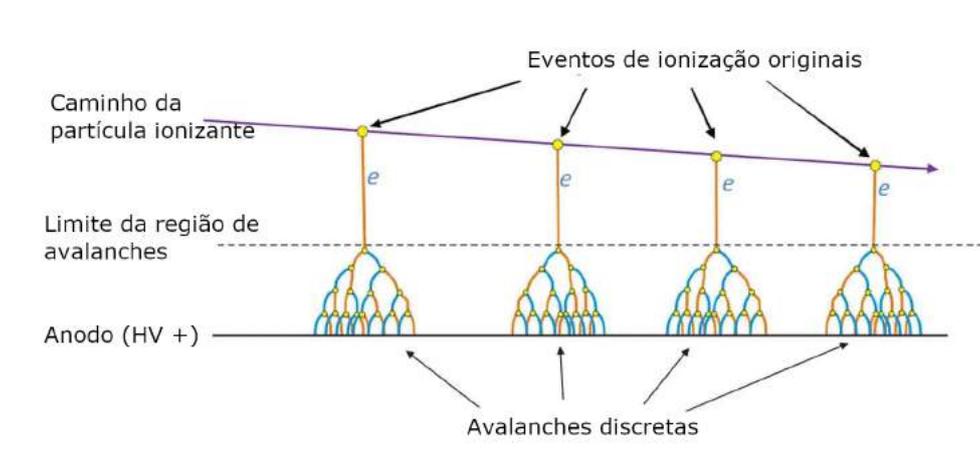


Figura 2.18: Várias avalanches discretas sendo produzidas por uma partícula ionizante cruzando um volume gasoso. Adaptado de [24]

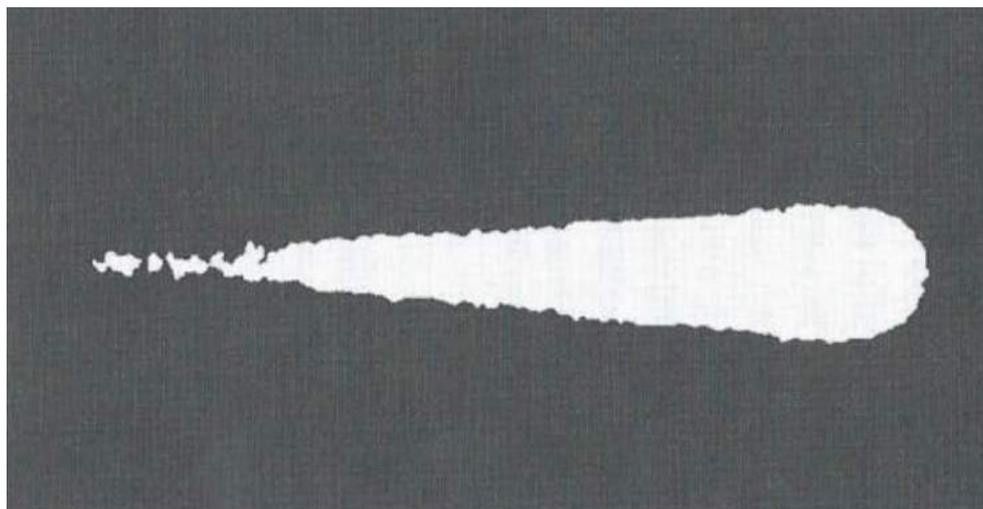


Figura 2.19: Foto de uma Avalanche de Townsend em uma câmera de nuvens, mostrando seu formato de "gota" devido à frente de crescimento exponencial. Retirado de [25]

A indução de sinal durante o desenvolvimento da avalanche pode ser explicada pelo teorema de Ramo [23], onde os elétrons em movimento polarizam e induzem uma corrente nos eletrodos. A pequena espessura do *gap* e a ausência de qualquer outro processo intermediário faz das RPCs detectores extremamente rápidos, sendo o tempo de propagação do sinal até a eletrônica de leitura de grande relevância, em comparação com o tempo entre a passagem da partícula e a indução de sinal no eletrodo.

Outros processos além de Avalanches de Townsend também podem se desenvolver no *gap*, e levar à ruptura dielétrica localizada do gás, produzindo uma centelha, que no jargão de RPCs são chamadas de "*streamers*". Estes induzem um sinal muito maior ao causar uma grande flutuação no potencial do eletrodo.³

Ao passo que as PRs limitam a duração dos *streamers*, estas precisam de um longo tempo para se recuperar e conseguir produzir novos *streamers* na mesma região, gerando um considerável *dead time* local (1-1000 ms a depender do material). Isso limita grandemente o fluxo máximo de partículas ionizantes que RPCs operando no "modo *streamer*" conseguem medir, além de que as frequentes descargas podem levar à degradação material do detector.

Avalanches, apesar de induzir sinais muito inferiores e requererem ampliações muito robustas, não geram nenhum *dead time* comparável ao dos *streamers*, o que permite a medição de fluxos muito superiores, além de permitir também melhor resolução temporal, e reduzir a degradação material sofrida durante a operação.

RPCs operando no "modo avalanche" se tornaram mais viáveis com avanços na eletrônica e com o desenvolvimento de misturas gasosas que permitem uma operação

³Não confundir com o que se chama de "*streamer*" na literatura convencional de eletricidade, que são estruturas de rápida propagação que se formam a partir de uma avalanche inicial, quando esta intensifica suficientemente o campo elétrico de fundo em certas regiões para gerar avalanches secundárias. [23]

estável e eficiente com tensões mais altas, aumentando o sinal induzido por avalanches e evitando *streamers*.

Designs convencionais

Diferentemente do exemplo mínimo demonstrado anteriormente, na maioria dos designs modernos a alta tensão é aplicada através de eletrodos de média resistividade (EMR), feitos com material como grafite.

Isolados dos EMR, instalam-se os planos de detecção (PD) que, uma vez livrados do papel de gerar o campo elétrico uniforme, podem ser segmentados em diferentes eletrodos de detecção, tendo bordas ao longo da área da RPC sem causar efeitos indesejáveis como descarga de corona⁴. Os PD são tipicamente segmentados em tiras finas (*strips*) ou em um mosaico de retângulos (*pads*).

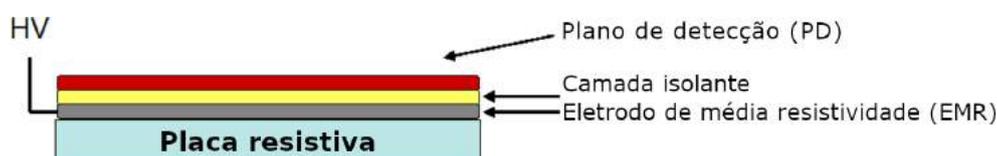


Figura 2.20: Exemplo de seção de uma RPC convencional com eletrodos de média resistividade e plano de detecção separados. Adaptado de [23]

A idéia é que, ao passo que os EMR são condutores o suficiente para manter um campo elétrico bem uniforme no *gap*, seus portadores de carga não conseguem se redistribuir rápido o suficiente a ponto de fazer dos EMR superfícies isopotenciais na escala de tempo dos eventos elétricos de interesse.

Nessa escala de tempo, as PRs e os EMR devem ser "eletricamente transparentes" tal como dielétricos, não impedindo sinais de serem induzidos no PD [23].

Adicionalmente, é comum, especialmente para o modo avalanche, a construção de RPCs com múltiplos *gaps*, que permite ter uma faixa dinâmica de sinal controlada, semelhante àquela de uma RPC de *gap* largo único, mas sem perder a resolução temporal que se consegue com *gaps* estreitos [51].

Esses designs podem ser construídos com materiais comuns e de baixo custo, como tinta à base de grafite para os EMR, vidro para as PRs, linhas de pesca para garantir o espaçamento do *gap*, placas de circuito impresso segmentadas para o PD, além de materiais comuns como acrílico, resina epóxi e alumínio para a construção do corpo do detector.

Não há a necessidade do emprego de componentes eletrônicos especializados como PMTs, nem de materiais especiais como os dopantes usados nos cintiladores plásticos, o que permite a construção de RPCs com materiais comerciais comuns e amplamente disponíveis tanto em lojas físicas quanto por encomenda *online*.

⁴Descargas provocadas pela ionização do gás próximo à bordas de um condutor de alta tensão, onde o campo elétrico é mais intenso e avalanches e *streamers* se formam mais facilmente.

A eletrônica necessária para ler e computar sinais de RPCs pode ser complexa no caso de RPCs de *strips*, mas RPCs de *pads* podem se aproveitar da mesma eletrônica utilizadas para leitura de PMTs para leitura de cada *pad*, pela similaridade do sinal elétrico produzido, bastando se discriminar os sinais de cada *pad* e identificar as *pads* discriminadas para fins de detecção e determinação de trajetória.

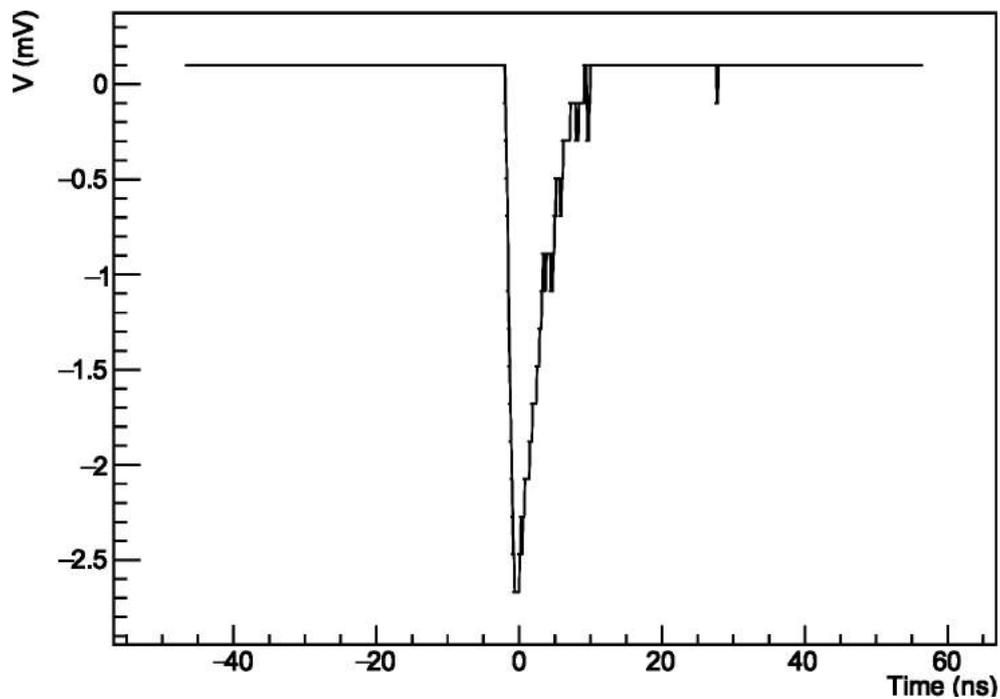


Figura 2.21: Sinal induzido em uma *pad* em função de uma avalanche. Sua forma é semelhante ao sinal de uma PMT, como na figura 2.12, porém com uma amplitude muito menor. Retirado de [26].

Capítulo 3

Materiais e Métodos

A nova instrumentação utilizada neste trabalho de mestrado foi inicialmente desenvolvida para o projeto MARTA (*Muon Array with RPCs for Tagging Air showers*) [26], um projeto desenvolvido por uma colaboração luso-brasileira (CBPF, LIP, Unicamp e USP-SC) como design candidato para o *AugerPrime*.

Nesse sistema, 4 RPCs são utilizadas, cada uma tendo uma placa de aquisição de dados própria, a *MARTA DAQ Front-End* (ou só *Front-End*), responsável pela recepção, amplificação, discriminação e digitalização dos sinais, assim como por armazenar dados temporariamente, para que uma unidade central, a *Central Unit* (CeU), possa obter estes dados. A CeU é responsável por gerar *triggers* para as *Front-Ends*, seja em função de uma coincidência entre as RPCs ou por um *trigger* externo recebido pela CeU, vindo de outro dispositivo.

Na caixa de alumínio de cada RPC também são integrados outros subsistemas auxiliares necessários à alimentação elétrica, controle e monitoramento da RPC, todos podendo ser controlados pela CeU, como representado no diagrama 3.1.

O sistema desenvolvido, porém, ainda não estava finalizado para operação com a CeU. Várias de suas funcionalidades estavam implementadas apenas para um sistema de comunicação FTDI (USB para UART), que permitiam a conexão entre as *Front-Ends* e um computador convencional via cabos USB. A realização de detecção de coincidências via CeU também não estava implementada no *software* de aquisição.

Por isso, foi necessário primeiramente realizar uma revisão geral e *upgrade* do *firmware* da *Front-End*, que foi inclusive aplicado ao projeto MARTA no Observatório Pierre Auger, para que então fosse possível implementá-lo no hodoscópio em Gianni Navarra.

Esses *upgrades* e o teste do novo sistema foram realizados no CBPF, no edifício do projeto MARTA, onde há duas RPCs do mesmo modelo daquelas utilizadas no projeto MARTA e em Gianni Navarra, todas tendo sido construídas pelo Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) em conjunto com o CBPF e USP-SC.

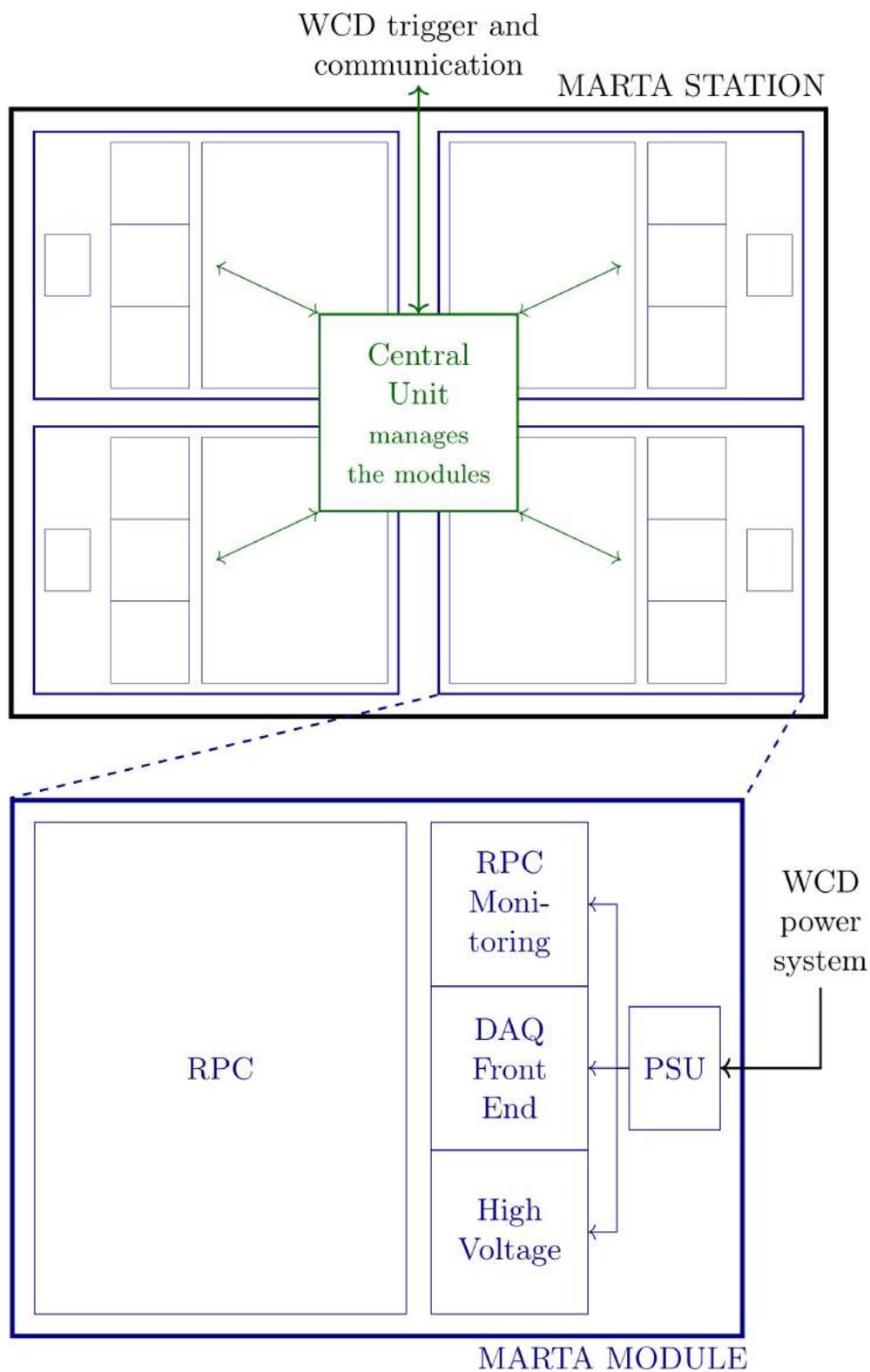


Figura 3.1: Esquema básico da conexão entre RPCs e CeU no projeto MARTA. Retirado de [26]

As seções abaixo descreverão mais sobre o *Hardware*, o *Firmware* e o *Software* comuns aos sistemas desenvolvidos durante o trabalho.

3.1 Hardware

3.1.1 RPCs

As RPCs utilizadas operam no modo avalanche, tendo na sua construção dois *gaps*, três PRs de vidro e dois EMR de tinta condutiva com base em grafite contidos em um volume gasoso formado por uma caixa selada de acrílico, através da qual há um lento fluxo de gás. Os *gaps* são separados por monofilamentos de nylon (linhas de pesca), que além de manter um espaçamento uniforme de 2 mm, forçam o gás a fluir em *zigzag* através do *gap*, de modo a percorrer todo detector, evitando regiões estagnantes. Há um único PD feito em placa de circuito impresso (cobre/FR4), que fica montado por fora do corpo de acrílico, do lado do EMR positivo, como na figura 3.2. Tudo isso fica contido em uma caixa de alumínio, que age como uma gaiola de Faraday, blindando o PD de interferências elétricas externas.

A caixa de alumínio também é percorrida pelo gás R134a, após este sair do volume gasoso (caixa de acrílico), tanto para manter a região do PD livre de umidade quanto para evitar contaminação do volume gasoso, pois o acrílico não é completamente impermeável à gases, sendo necessário que o volume externo à caixa de acrílico também esteja preenchido do mesmo gás.

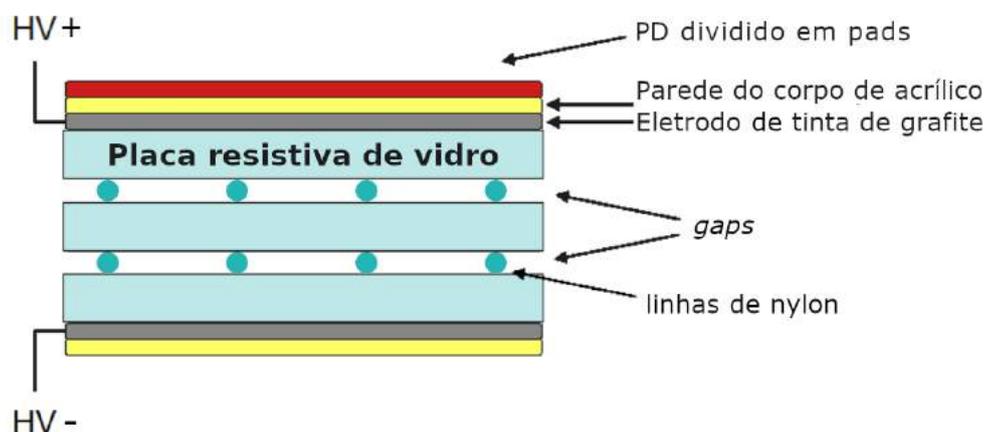


Figura 3.2: Esquema das camadas das RPCs utilizadas neste trabalho.

O PD é dividido em um mosaico 8x8, totalizando 64 *pads*, cada uma tendo 18x14 cm, distadas 1 cm de suas vizinhas por todos lados, tendo ao meio desse espaço uma malha de aterramento, para evitar *crosstalk* entre as *pads*. Assim, a área efetiva de cada *pad* é 19x15 cm, totalizando 1,824 m² de área de detecção.

São utilizados 64 cabos coaxiais para conectar as *pads* à eletrônica de captação, que utiliza uma terminação de $1\text{ M}\Omega$. O núcleo de cobre é soldado ao centro de cada *pad* e a blindagem à malha de aterramento ao lado da *pad*.

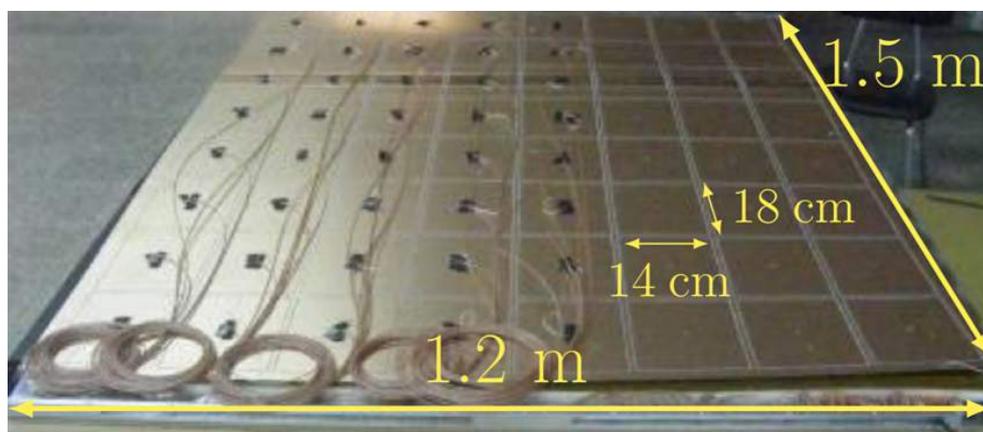


Figura 3.3: Foto mostrando o plano de detecção dividido em pads e os cabos coaxiais durante a montagem de uma das RPCs deste trabalho.

08	16	24	32	40	48	56	64
07	15	23	31	39	47	55	63
06	14	22	30	38	46	54	62
05	13	21	29	37	45	53	61
04	12	20	28	36	44	52	60
03	11	19	27	35	43	51	59
02	10	18	26	34	42	50	58
01	09	17	25	33	41	49	57

Lado da alta tensão

Figura 3.4: Esquema de numeração das *pads*.

As *pads* são fisicamente identificadas através de uma numeração, que por convenção tem a *pad* 1 sendo aquela no canto onde está a entrada de alta tensão (HV). A numeração

crece conforme se afasta deste canto, crescendo de 1 em 1 ao longo da maior dimensão da RPC (comprimento) e de 8 em 8 ao longo da menor dimensão (largura), conforme o mapa da figura 3.4.



Figura 3.5: Foto de uma RPC montada, com os cabos coaxiais, conectores para gás e HV à mostra. A *pad* 1 nesta RPC é a mais próxima da quina frontal esquerda.

É necessário, porém, comentar que algumas unidades foram montadas com o volume gasoso espelhado, com a entrada de HV no mesmo canto da entrada de gás. A princípio, a numeração também é espelhada, para que a *pad* 1 sempre seja aquela ao lado da entrada de HV. Porém, em arranjos utilizando as duas versões concomitantemente, foi decidido se utilizar sempre o mesmo mapeamento da versão mais antiga, onde a *pad* 1 fica do lado oposto à entrada de gás (como nas figuras acima).

Há também sensores de umidade, pressão e temperatura instalados na RPC, o primeiro sendo utilizado para detectar infiltrações e os dois últimos pela eletrônica de controle para ajuste do HV.

O gás utilizado neste trabalho é o gás de refrigeração R134a (Tetrafluoroetano), amplamente utilizado em RPCs por ser um gás não-inflamável, de alta rigidez dielétrica (permitindo a operação em altas tensões) e alta densidade à pressão atmosférica, o que leva à formação de mais *clusters* de ionização primária a cada evento [52]. O gás é suprido através de um cilindro de R134a de 13,6 kg, com reguladores de pressão e um conjunto de borbulhadores de vaselina, para a proteção contra sobrepressão e para a medição e indicação de fluxo.

3.1.2 *Front-End*

A *Front-End* é uma placa de circuito impresso que tem como coração dois circuitos integrados (CIs): O *Multi-Anode ReadOut Chip 3* (MAROC3), um CI desenvolvido pelo Orsay Micro-Electronics Group Associated (OMEGA) (e sucedido pelo MAROC3a do Weeroc [53]) para leitura de PMTs multi-anodo de até 64 anodos; e o Cyclone IV, um *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) desenvolvido pela Intel Corporação.

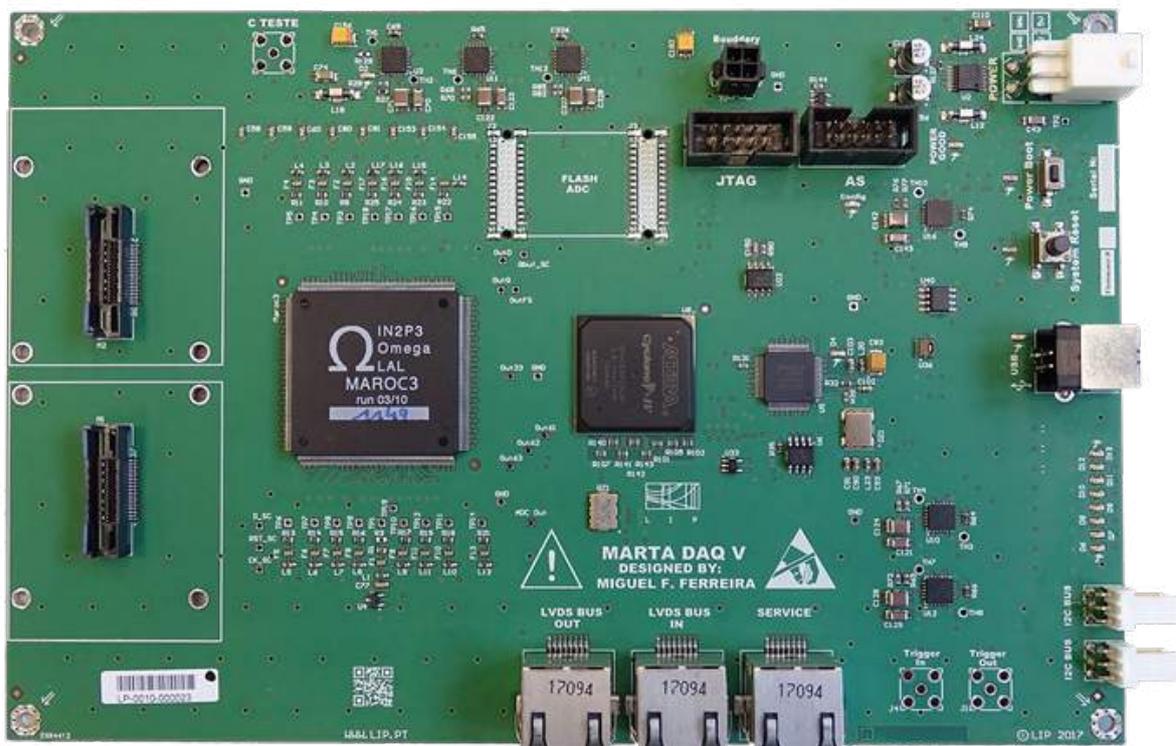


Figura 3.6: Foto de uma *Front-End*, igual a todas as utilizadas neste trabalho.

O MAROC3 tem 64 canais analógicos de entrada e 64 canais digitais de saída, cada um correspondendo ao estado discriminado de um canal de entrada (após passar por um pré-amplificador e um *signal shaper*, tendo duas opções de *shaper* configuráveis). Esses 64 canais discriminados de saída serão referidos daqui em diante como "64CD".

Os 64CD não correspondem diretamente à numeração das *pads*, essa relação depende da ordem de ligação de vários circuitos, como a *Mezzanine*, a placa responsável por receber os 64 cabos coaxiais da RPC e realizar a conexão com a *Front-End*, como registrado na figura 3.7. Um arquivo de tradução de canal do MAROC3 pra *pad* é utilizado posteriormente na análise de dados.

O limiar de discriminação de cada canal é configurável, assim como os ganhos dos canais e máscaras para desabilitar canais defeituosos.

O Cyclone IV da *Front-End* está conectado ao MAROC3, sendo responsável por seu controle, configuração e leitura, incluindo os 64CD.

Se tratando de um FPGA, o Cyclone IV não é controlado por um *software*, mas um *firmware*, que modifica sua configuração interna em blocos lógicos de forma a se obter os comportamentos desejados, permitindo que operações específicas sejam realizadas com grande velocidade e simultaneidade (paralelismo), em contraste do que faz um *software* em um processador, onde se obtém o comportamento desejado através de instruções executadas sequencialmente.

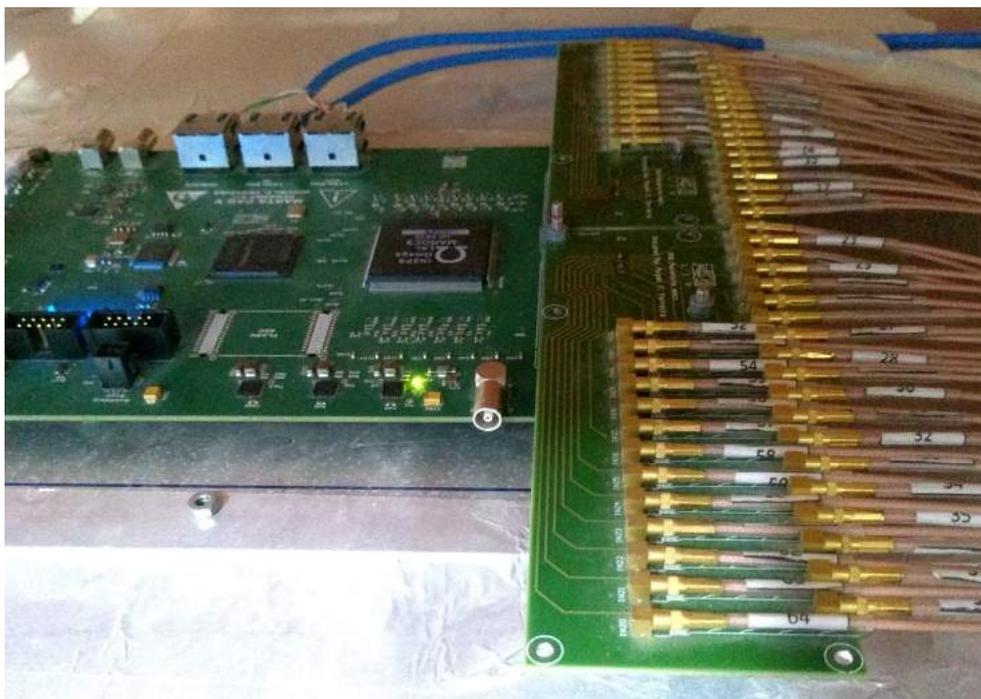


Figura 3.7: Foto de uma *Front-End* com uma *Mezzanine*, recebendo os cabos coaxiais de uma RPC.

Adicionalmente, a FPGA também permite dinamicamente assinalar seus pinos à diferentes blocos lógicos em seu *firmware*, dando flexibilidade para o interfaceamento com outros CIs (como o MAROC3) e portas de comunicação.

As principais portas de comunicação da *Front-End* são conectores RJ45, que são usados para implementar um sistema de comunicação serial próprio, no padrão de sinal *Low Voltage Differential Signaling* (LVDS).

Há duas portas LVDS na *Front-End*, uma de entrada e uma de saída (LVDS IN e LVDS OUT), que são usadas pra se conectar à CeU através de cabos UTP Cat5, os mesmos comumente usados para redes *ethernet*.

Cada par de fios trançados corresponde a uma linha, sendo essas: *Clock*, *Data*, *Chip Select* e *Trigger*. A ordem de crimpagem nas duas pontas deve ser a mesma, sendo um cabo direto. Porém, não se deve usar a mesma ordem de crimpagem utilizada para cabos de rede *ethernet*, pois aqui é necessário que todo par trançado se conecte a dois pinos vizinhos. A ordem de crimpagem utilizada e a correspondência entre os pares e linhas está descrita na figura 3.8.

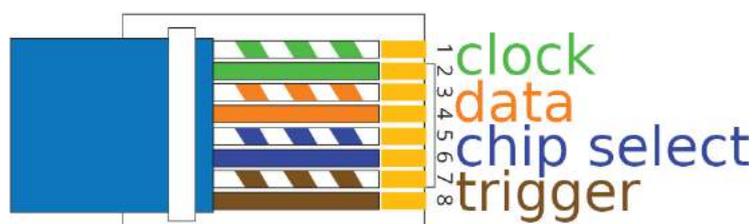


Figura 3.8: Ordem de crimpagem do cabo para utilização na comunicação LVDS.

Adicionalmente, há a porta SERVICE, outro conector RJ45, que não é utilizado diretamente neste trabalho, exceto para eventual substituição de linhas LVDS danificadas, pois há dois pares de pinos deste conector que podem ser assinalados a entradas LVDS do Cyclone IV via modificação no *firmware*.

As funcionalidades da *Front-End* quanto à aquisição de dados e configuração do MAROC3 estão descritas na seção 3.2.

3.1.3 Central Unit

A CeU é uma DE10-Standard, uma placa de desenvolvimento desenvolvido pela terasIC [54], que contém uma FPGA Cyclone V com um *Hard Processor System* (HPS) ARM-Cortex A9 integrado, além de vários conectores e barramentos distintos que permitem executar tanto *softwares* em sistemas operacionais embarcados (no HPS) quanto programar o Cyclone V e fazer interfaceamento entre *firmware* e *software*, através de "pontes de memória" entre o HPS e a FPGA.

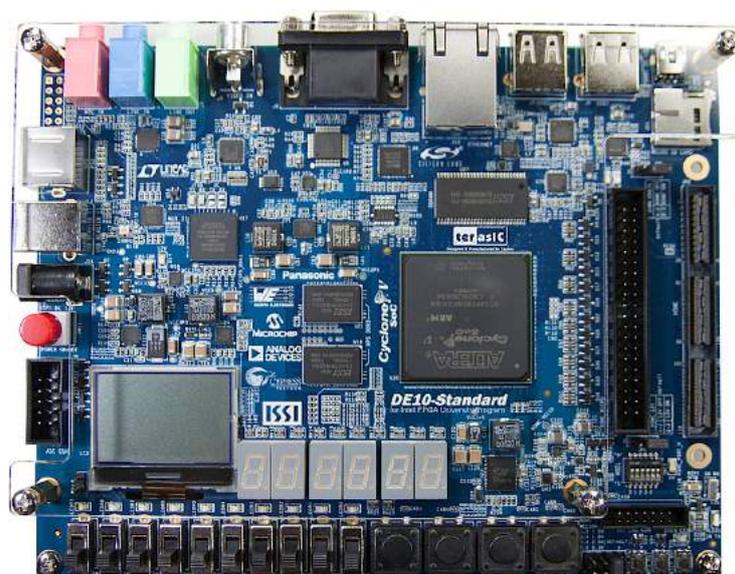


Figura 3.9: Placa de desenvolvimento DE10-Standard da Intel

Uma placa adicional, chamada de *interface*, foi desenvolvida para para implementar o sistema de comunicação LVDS na CeU, ligando seus conectores RJ45 ao conector HSMC da DE10, através de conversores e circuitos de proteção, que previnem danos à DE10.

A *Interface* tem um total de 4 canais LVDS (pares de porta LVDS IN e OUT) totalmente independentes, permitindo a conexão com até 4 RPCs. Cada IN de uma placa deve ser ligado ao OUT da outra, ou seja: o LVDS IN de uma *Front-End* deve ser ligado a um LVDS OUT da *Interface* e vice-versa.

A *Interface* também tem outras portas RJ45 para outros fins, como geração e recepção de *triggers* externos (ex.: vindos da UUB), e linhas de *slow-control* do sistema de controle e monitoramento nas RPCs do projeto MARTA.



Figura 3.10: CeU com uma *Interface* conectada, na qual estão conectados cabos UTP.

A CeU opera (como toda DE10 standard) com o SO Angstrom Linux, uma distribuição GNU/Linux compilada para o ARM-Cortex A9, que não tem interface gráfica, mas permite conexão com a internet e a execução de *softwares* comuns que não requeiram interface gráfica.

Assim sendo, através com o *Firmware* e o *Software* desenvolvido neste trabalho, a CeU pode desempenhar uma multitude de papéis, desde aqueles que requerem a instantaneidade de uma FPGA, como a geração de *triggers* a partir de coincidências entre as RPCs, até aqueles que requerem a versatilidade e capacidades de um computador convencional, como servir de estação de aquisição, permitir acesso remoto etc.

3.1.4 Controle e monitoramento

Além dos sistemas de aquisição, há ainda os sistemas necessários ao controle e monitoramento das RPCs, como a eletrônica de leitura dos sensores (de temperatura, pressão e fluxo), o sistema de HV, que fornece e ajusta a alta tensão de acordo com a temperatura e pressão, e a fonte de alimentação principal (PSU) que fornece as diferentes tensões de alimentação para os demais circuitos.

No modelo desenvolvido para o projeto MARTA, esses sistemas estão integrados ao corpo de alumínio da RPC, em uma expansão adicionada sobre a parte frontal (sem alterar suas dimensões horizontais). Todo controle é realizado pela CeU, de forma que as RPCs sejam conectadas apenas à linha de gás, à CeU, e a uma tensão única de alimentação de 24 VDC.

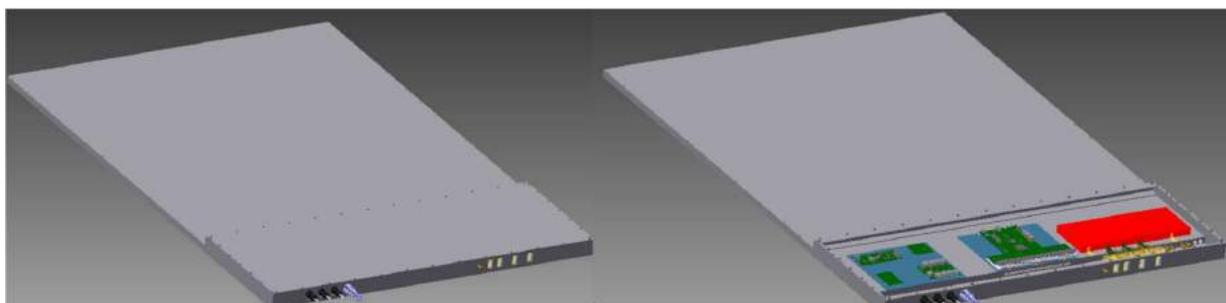


Figura 3.11: Modelo 3D da da RPC de MARTA, com a tampa da expansão fechada (esquerda) e aberta (direita). Retirado de [26]

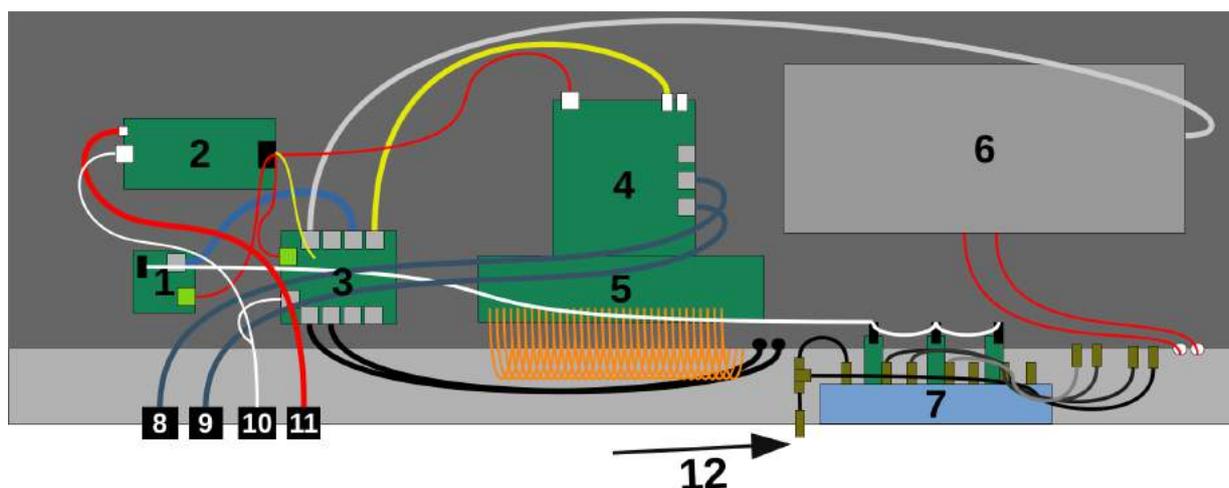


Figura 3.12: Esquema da eletrônica dentro da expansão. 1: multiplexador i2c da eletrônica dos borbulhadores; 2: PSU; 3: barramento i2c principal; 4: *Front-end*; 5: *Mezzanine*; 6: Fonte de HV; 7: borbulhadores e sua eletrônica; 8: LVDS IN; 9: LVDS OUT; 10: Porta de serviço; 11: conector para 24 VDC; 12: entrada de gás

Vale notar, porém, que essa integração não existe em todas as RPCs utilizadas neste trabalho. Nos hodoscópios, há RPCs onde os sistemas de leitura dos sensores, o fornecimento de alta tensão, e a alimentação elétrica geral são externos, sendo implementados com outra eletrônica.

Porém, as RPCs em si (seu design interno), e as *Front-Ends*, são exatamente as mesmas, e a curva de ajuste de alta tensão de acordo com temperatura e pressão também

são as mesmas, o que significa que a performance esperada é igual, apesar da utilização de outra eletrônica para fornecimento da alta tensão.

O mesmo *firmware* pode ser usado nas *Front-Ends* das RPCs com e sem essa integração, permitindo que sejam usadas em conjunto em um mesmo arranjo, desde que a CeU seja capaz de controlar também esses sistemas integrados.

Assim sendo, o *firmware* da CeU desenvolvido foi feito para suportar o modelo de RPC do projeto MARTA, pois assim suporta também todas as outras utilizadas neste trabalho.

3.2 Firmware

3.2.1 Firmware da Front-End

Como mencionado anteriormente, o sistema já desenvolvido para o projeto MARTA ainda não havia tido todas as funções implementadas para funcionamento com a CeU, pois nem todos os módulos do *firmware* estavam implementados para funcionar com a comunicação LVDS.

Então, a tarefa principal foi implementar a comunicação LVDS nos módulos restantes, assim como revisar os módulos e o protocolo de comunicação para mitigar possíveis falhas.

O *software* utilizado para o desenvolvimento e programação de todas as FPGAs foi o Intel Quartus Prime 18.1 [55], todos os *firmwares* tendo sido escritos em Verilog.

Nas próximas seções será discutido um pouco sobre os mecanismos e módulos existentes, sobre os upgrades realizados, e sobre suas funcionalidades.

Mecanismo de teste das linhas

Para permitir que a CeU diagnostique as linhas de comunicação LVDS, foi implementado um mecanismo onde a *Front-End* roteia as linhas da porta LVDS IN diretamente para suas respectivas linhas na porta LVDS OUT, por 60 segundos.

Somente após esse tempo a *Front-End* estará pronta para sua operação normal, ou seja, todos os comportamentos descritos nas próximas subseções ocorrem apenas após esse intervalo.

Esse mecanismo foi criado desta forma pois, se linhas da porta LVDS IN estiverem defeituosas, a *Front-End* não consegue receber nenhum comando em primeiro lugar. Então, é necessário que a *Front-End* entre e saia nesse modo sem nenhum comando externo.

Nesse intervalo, a CeU pode enviar sinais para a *Front-End* e deverá receber os mesmos sinais de volta com um pequeno atraso (da ordem de 10 a 100 ns).

Como nas RPCs do projeto MARTA a PSU é integrada e controlável pela CeU, a CeU tem a possibilidade de forçar a reinicialização da *Front-End*, podendo então aproveitar esse período de teste. Do contrário, é necessário reiniciar a *Front-End* manualmente.

Erros podem ser causados tanto por problemas nos cabos e conectores (como interrupções, atenuação, curtos, interferência, crosstalk etc) quanto nos circuitos e chips envolvidos (como entradas e saídas eletricamente danificadas).

Diagnosticar onde um erro está requer outras investigações adicionais, porém ao menos é possível verificar se a *Front-End* está recebendo os sinais corretamente.

Se os sinais retornados estiverem idênticos aos enviados, então pode-se descartar falha física nas linhas, seja nos cabos, conectores, ou nas entradas e saídas dos circuitos LVDS.

Geração de *trigger* para a CeU

Nesse trabalho, como se utiliza uma CeU, as *Front-Ends* recebem *triggers* apenas da CeU, pela linha de *trigger* da porta LVDS IN (da *Front-End*).

Enquanto isso, as *Front-Ends* enviam para a linha de *trigger* da sua porta LVDS OUT o OR lógico dos 64CD. Ou seja, sua linha de *trigger* será mantida a **1** enquanto houver sinal discriminado em ao menos um dos 64CD. Esse mecanismo começa assim que terminam os 60 segundos de teste e então funciona ininterruptamente, independentemente de qualquer outra ação sendo tomada pela *Front-End*.

A CeU utiliza essas linhas de *trigger*, vindas do LVDS OUT de cada *Front-End*, para realizar as coincidências.

Módulo de comunicação LVDS

O módulo de comunicação LVDS é responsável por lidar com as linhas de *clock*, *data* e *chip select* das portas de LVDS IN e LVDS OUT da *Front-End*, implementando o protocolo de comunicação serial desse projeto, que é regido por um relógio interno de 80 MHz e usa ordem de bits *big-endian* durante a transmissão.

A (linha) *clock* e a *data* ficam em **0** por padrão, ao passo que a *chip-select* fica em **1** por padrão, mudando para **0** ao início de toda comunicação.

Toda trama de comunicação, em ambos sentidos, é iniciada por uma mudança simultânea da *chip-select* para **0** e da *data* para o valor do primeiro bit da trama.

A *clock* inverte a cada ciclo do relógio de 80 MHz, começando em **0** durante o primeiro ciclo da trama, mudando para **1** no segundo ciclo, e assim por diante, fazendo da *clock* um relógio de 40 MHz.

O valor da *data* é atualizado a todo *falling edge* da *clock*, ao passo que esse valor é lido pelo destinatário a todo *rising edge* da *clock*, garantindo a leitura do valor atualizado e evitando erros de sincronia.

Toda trama se encerra com um *falling edge* da *Clock*, um *rising edge* da *Chip Select* e a *Data* sendo posta a **0** (independentemente do seu estado anterior), fazendo com que todas retornem aos valores padrão.

Todo processo de comunicação é iniciado pela CeU, que envia uma trama com uma requisição de gravação (*write request*) ou uma requisição de leitura (*read request*). Todos

requests especificam um endereço (*Address*) e o número de bytes a serem lidos ou gravados subtraído de 1 (*Nbytes-1*). O *write request* adicionalmente também tem uma porção de dados (*data*) e um verificador (*Checksum*).

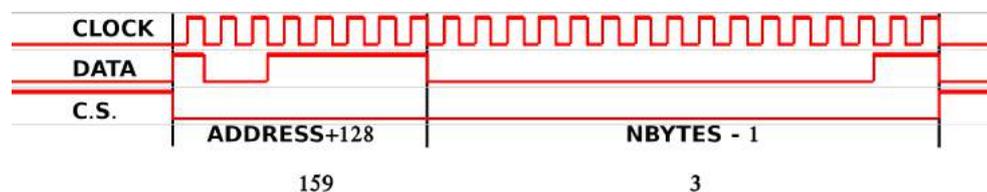


Figura 3.13: Uma trama de *read request*, pedindo 4 bytes do endereço 31, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.

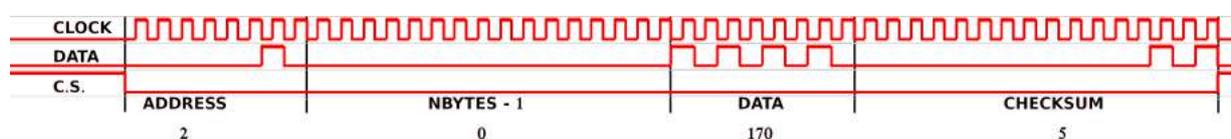


Figura 3.14: Uma trama de *write request*, ordenando a gravação de 1 byte, de valor 170, no endereço 2, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.

Para melhorar a detecção de erros na comunicação, foi implementada uma nova trama de resposta a todos os *requests*, a trama de *status report*.

No caso de um *write request*, o *status report* é a única resposta dada pela *Front-End*, indicando se recebeu os dados adequadamente ou não.

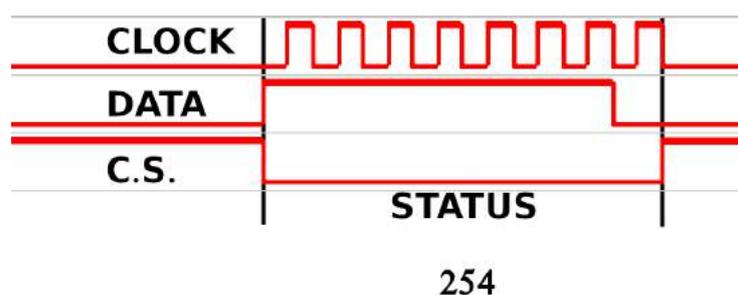


Figura 3.15: Uma trama de *satus report* indicando sucesso, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.

Os *read requests*, se bem recebidos, são respondidos com uma trama de resposta (*read response*) com os dados requisitados, seguida (após 10 ciclos de 80 MHz) de um *status report*, indicando que o *read request* foi bem recebido. Isso é feito dessa forma pois, se o *read request* for mal recebido, a única resposta da *Front-End* será o *status report* indicando a falha, e não haverá nenhum *read response*.

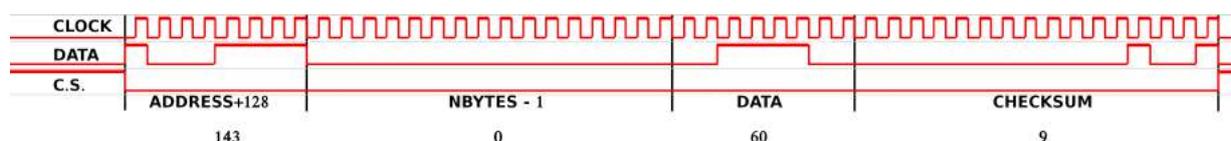


Figura 3.16: Uma trama de *read response*, retornando um byte de valor 60, após a requisição (de um byte) do endereço 15, conforme vista pelo Signal Tap do Intel Quartus 18.1.

A estrutura de cada tipo de trama se encontra na tabela 3.1.

Bloco	Nome	Tamanho (bytes)	Valor	Significado
write request (CU→FE, 4 blocos sequenciais)				
1	Address	1	0..127	Valor do endereço onde se quer gravar
2	Nbytes-1	2	0..65527	Número de bytes a serem gravados menos 1
3	Data	Número de bytes	-	Conteúdo a ser gravado
4	Checksum	2	0..65535	Total de bits 1 em toda trama antes do Checksum
read request (CU→FE, 2 blocos sequenciais)				
1	Address+128	1	128-255	128 + Valor do endereço do qual se quer ler
2	Nbytes-1	2	0..65527	Número de bytes a serem lidos menos 1
read response (FE→CU, 4 blocos sequenciais)				
1	Address+128	1	128-255	128 + Valor do endereço lido
2	Nbytes-1	2	0..65527	Número de bytes a lidos subtraído de 1
3	Data	Número de bytes	-	Conteúdo requisitado
4	Checksum	2	0..65535	Total de bits 1 em toda trama antes do Checksum
status report (FE→CU, 1 bloco)				
1	status	1	254 ou 255	254 = trama recebida corretamente 255 = falha na recepção da trama

Tabela 3.1: Estrutura de dados de cada trama.

A transferência dos dados em si (da porção de dados das tramas de *write request* e *read response*) é realizada byte a byte entre o módulo de comunicação e os demais módulos do *firmware* da *Front-End*.

Para a recepção de dados, um registro temporário é utilizado para receber cada bloco de 8 bits (byte). Ao terminar de receber um bloco, esse byte é copiado para outro registro de 1 byte, que pode ser lido pelos demais módulos. Um registro adicional de 1 bit é utilizado para sinalizar para os outros módulos que um novo byte foi recebido, transitando de 0 para 1 e para 0 novamente (um pulso) toda vez que um bloco de 8 bits termina de ser recebido.

Para o envio dos bytes no *read response*, há um registro de 1 byte por módulo, onde esses módulos colocam os dados byte a byte, conforme são requisitados pelo módulo de comunicação, através de pulsos em um registro de 1 bit.

Isso significa que todos os outros módulos têm que receber e responder em sincronia com o módulo de comunicação, que é quem dita o *timing* da comunicação.

Os outros módulos identificam o início de um processo de comunicação através de 3 registros de controle, um onde o módulo de comunicação coloca o endereço (quando recebe um *request*) e dois onde coloca o número de bytes (a ser lido ou gravado).

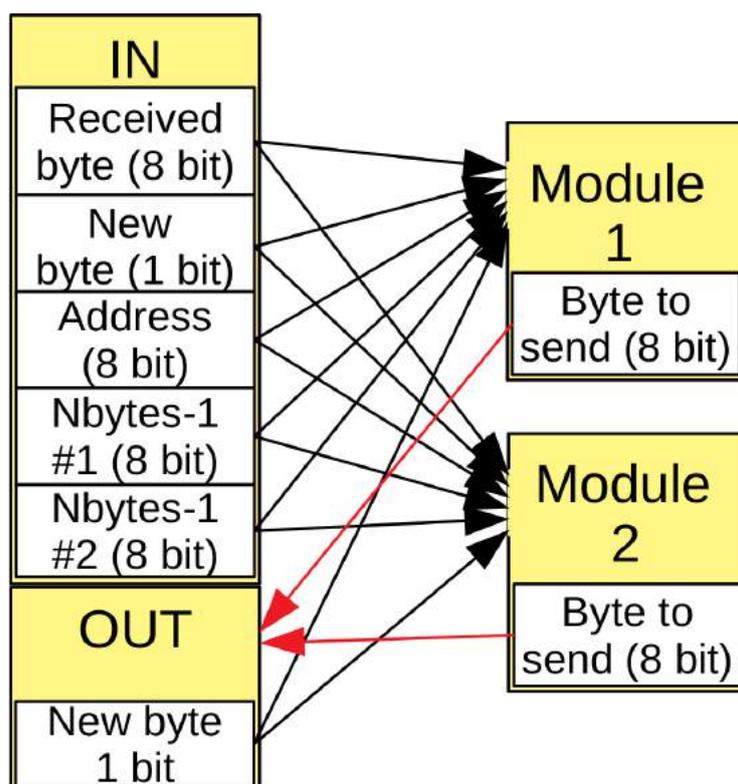


Figura 3.17: Esquema simplificado da comunicação entre módulos e as partes de entrada e saída do módulo de comunicação. Os demais módulos não podem gravar nos registros do módulo de comunicação, somente ler, e devem responder adequadamente às mudanças nestes. No envio de dados, eles devem colocar bytes nos seus próprios registros de byte a todo pulso do *New Byte*, para que o módulo de comunicação os leia.

Os demais módulos são tipicamente baseados em máquinas de estados finitos (FSMs),

tendo endereços para a inicialização e interrupção dessas máquinas de estados e outros endereços para requisições de leitura ou gravação de dados associadas a suas funções.

Os módulos, suas funcionalidades e respectivos endereços implementados neste trabalho serão explanados nas subseções a seguir.

Módulo de *slow control*

O módulo *slow control* contém as funcionalidades relativas à configuração do chip MAROC3.

Sua principal função é enviar os bits de configuração para o MAROC3, através de um *buffer First In First Out* (FIFO) que armazena esses dados vindos da CeU, para que possam ser enviados em velocidade inferior ao MAROC3, reiniciando-o após o envio.

Sua configuração completa se realiza através de um total de 829 bits, nos quais se configuram parâmetros como o ganho de cada canal, o limiar para os 64 discriminadores, máscaras, configurações dos ADCs, etc.

Como a comunicação trabalha em bytes, esses 829 bits devem ser empacotados em um total de 104 bytes (832 bits), sobrando 3 bits fúteis (os mais significantes do último byte). A ordem e significado desses bits pode ser encontrada no *datasheet* do MAROC3 [56], lembrando que o primeiro bit corresponderá ao LSB do primeiro byte, o nono bit ao LSB do segundo byte e daí em diante. A comunicação LVDS é *big-endian*, porém, e uma vez armazenados na FIFO de configuração, os bytes são enviados em ordem *little-endian* para o MAROC3.

A integração do *slow control* ao sistema de comunicação LVDS já estava implementada, porém foi necessário realizar correções para evitar erros de sincronia no preenchimento da FIFO de configuração, que levavam a falhas frequentes nesse processo.

É necessário comentar que, apesar de menos frequentes, erros de sincronia entre a FPGA e o MAROC3 ainda podem ocorrer e a configuração pode ter que ser repetida, portanto cabe ao usuário realizar uma medida do *rate* (ver próxima subseção) e verificar se os valores de taxa de fundo observados são coerentes.

Os endereços e suas respectivas funcionalidades se encontram na tabela 3.2.

Endereço	modo	nbytes	valor	função/significado
10	gravação	104	-	Armazena os 104 bytes de configuração em uma FIFO.
1	gravação	1	222	Inicia FSM que envia a FIFO para o MAROC3 (aguardar 500 μ s)
			220	Interrompe a FSM que envia a FIFO
21	gravação	1	15	Inicia FSM que reinicializa a saída do MAROC3 (aguardar 1 ms)
			240	Interrompe a FSM que reinicializa a saída

Tabela 3.2

Módulo de *rate*

O módulo de *rate* é utilizado para medir a taxa de fundo de cada *pad*, ou seja, quantas transições de **0** para **1** ocorre em cada um dos 64CD.

O número de transições é contado por 10 segundos em variáveis de 16-bit sem sinal, uma para cada canal.

Porém, como o número de transições é zero tanto para um canal preso em **0** quanto para um canal preso em **1**, o valor 65535 foi reservado para representar um canal que está preso a **1**. Portanto, a variável só conta o número de transições até chegar a 65534 e não incrementa a partir desse ponto.

Os dados obtidos nessa medição totalizam 128 bytes, 2 bytes (16 bits) para cada canal, e são recebidos na ordem crescente dos canais (canal 1 ... canal 64). A ordem dos bytes em cada par é *little-endian*, ou seja, o primeiro byte recebido é o menos significativo dos 2 bytes da variável de 16 bits.

Os endereços deste módulo e suas respectivas funcionalidades se encontram na tabela 3.3.

Endereço	modo	nbytes	valor	função/significado
76	gravação	1	15	Inicia FSM que realiza contagens
			240	Interrompe FSM de contagens
74	gravação	1	254	Inicia uma contagem (aguardar 11 s após)
75	leitura	128		Lê as taxas de fundos de cada canal

Tabela 3.3

Módulo de *hit*

O módulo de *hit* é o principal módulo envolvido na aquisição de dados de eventos neste trabalho.

Neste módulo, uma FIFO de 128 posições e 64 bits de largura recebe amostras dos 64CD, com uma taxa de amostragem de 80 MHz, até que a *Front-End* receba um *trigger* vindo da CeU. A última amostra é colocada no mesmo ciclo no qual a *Front-End* identifica o *trigger*) vindo da CeU.

A FIFO deverá então ser lida pela CeU, processo no qual ela é esvaziada e liberada para ser preenchida novamente.

A FIFO só aceita ser congelada se já estiver cheia, ou seja, uma vez que já recebeu ao menos 128 amostras desde a última vez que foi esvaziada.

Como forma de verificar se a *Front-End* recebeu o *trigger* e se a FIFO estava pronta quando o recebeu, há um endereço no qual se pode perguntar à *Front-End* se a FIFO está congelada e pronta para ser lida.

É importante notar que, como a FIFO é esvaziada no processo de leitura, não se pode ler a FIFO mais de uma vez. Em caso de falha na leitura, há de se verificar o tipo de falha. Se a falha ocorreu pelo mal recebimento de um *read request* e não houve

nenhum *read response*, então a FIFO não foi esvaziada e pode se repetir o *read request*. Mas em qualquer caso onde houver *read response*, a FIFO foi esvaziada e não há como se ler novamente, o evento há de ser descartado.

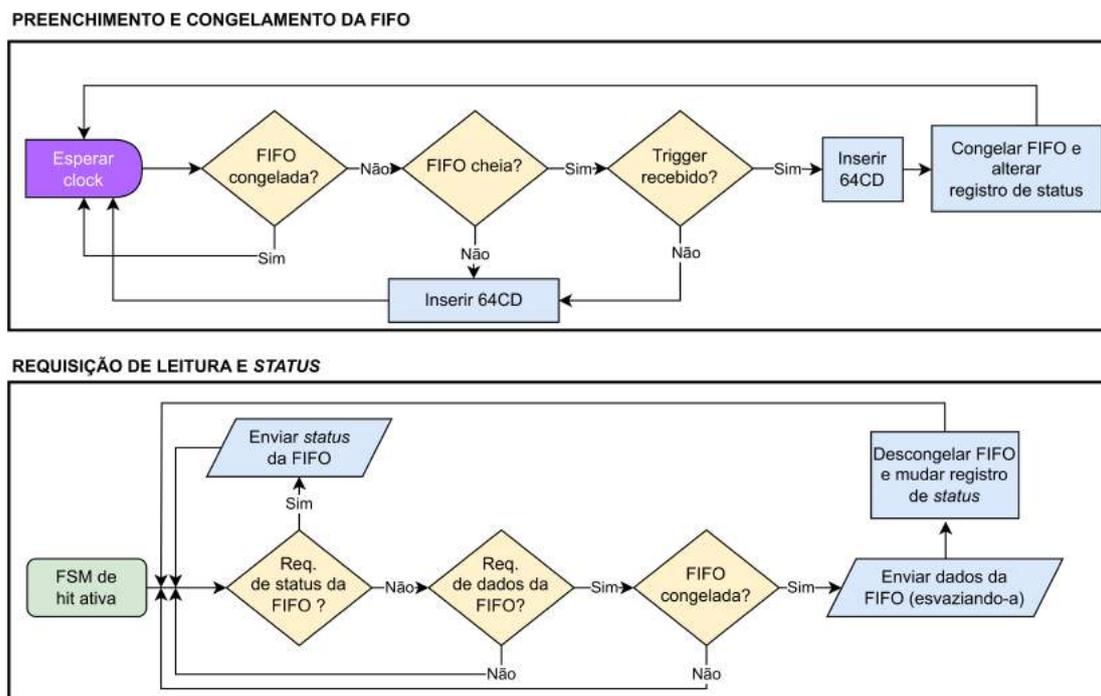


Figura 3.18: Fluxograma dos mecanismos do módulo de hit.

Como a FIFO tem 128 posições de 64 bits cada (8 bytes), há um total de 1024 bytes a serem lidos. Os primeiros 8 bytes lidos correspondem à amostra mais antiga na FIFO. O LSB do primeiro byte corresponde ao canal 1 e o MSB do oitavo byte corresponde ao canal 64. Os últimos 8 bytes correspondem à amostra mais recente, ou seja, àquela adicionada no momento do *trigger*.

Os endereços deste módulo e suas respectivas funcionalidades se encontram na tabela 3.4.

Endereço	modo	nbytes	valor	função/significado
33	gravação	1	15	Inicia FSM que maneja a FIFO de hits
			240	Interrompe FSM que maneja a FIFO de hits
31	leitura	1	24	A FIFO está congelada
			231	A FIFO não está congelada
32	leitura	1024	-	Lê os dados da FIFO, esvaziando-a

Tabela 3.4

3.2.2 Firmware da Central Unit

O *firmware* da CeU é responsável principalmente por manejar a comunicação LVDS e gerir os mecanismos de *trigger* do hodoscópio, desde a forma como detecta coincidências até a forma como recebe e envia *triggers* externos para outros dispositivos.

A integração entre *Firmware* e *Software* é realizada através de endereços de memória física compartilhados, que permite que programas sendo executados no HPS interajam diretamente com o *Firmware*.

Lógica de trigger

A CeU tem várias saídas de *trigger*, que dependem dos valores nos registros de modo de *trigger*, de lógica de *trigger* e de *trigger enable*, todos estes sendo manipuláveis pelo *software* de aquisição.

No modo de *trigger* utilizado no hodoscópio, a CeU realiza uma série de operações lógicas entre as linhas de *trigger* das 4 portas LVDS IN da *Interface* e os 16 bits do registro de lógica de *trigger*.

Essas operações podem ser resumidas como sendo o AND lógico da saída de 4 blocos idênticos de portas lógicas. Cada bloco tem 8 entradas, 4 sendo as linhas LVDS de entrada de *trigger* (as mesmas para todos), e as outras 4 sendo diferentes conjuntos de 4 bits do registro de lógica de *trigger* (o primeiro bloco usa os bits 0 a 3, o segundo 4 a 7 etc). A figura 3.19 resume a lógica descrita, expandindo o primeiro bloco.

Por exemplo, o modo de *trigger* utilizado nas RPCs de ambos hodoscópios deste trabalho faz apenas um AND entre os dois *triggers* vindos de cada RPC. Para uma CeU com uma RPC conectada aos canais 2 e 3 da *interface*, qualquer valor binário que tenha os blocos de bits 0100, 0010, e todo resto a 0, cumprirá a tarefa realizar esse AND, tal como o valor 0000000001000010 (0x0042), 0010000000000100 (0x2004) etc.

Após se definir o modo e a lógica de *trigger*, é necessário habilitar a produção de *triggers*, colocando-se o *trigger enable* a **0** e em seguida a **1**. Uma vez habilitada, assim que a saída do último AND lógico transitar de **0** para **1**, a CeU enviará um *trigger* (um pulso) para as linhas *trigger* de todas portas LVDS OUT da *Interface*, que será recebido por todas *Front-Ends* conectadas para que congelem suas FIFOs.

A depender do modo de *trigger* escolhido, a CeU também pode enviar *triggers* para outras saídas simultaneamente, o que é necessário para trigar os DeC.

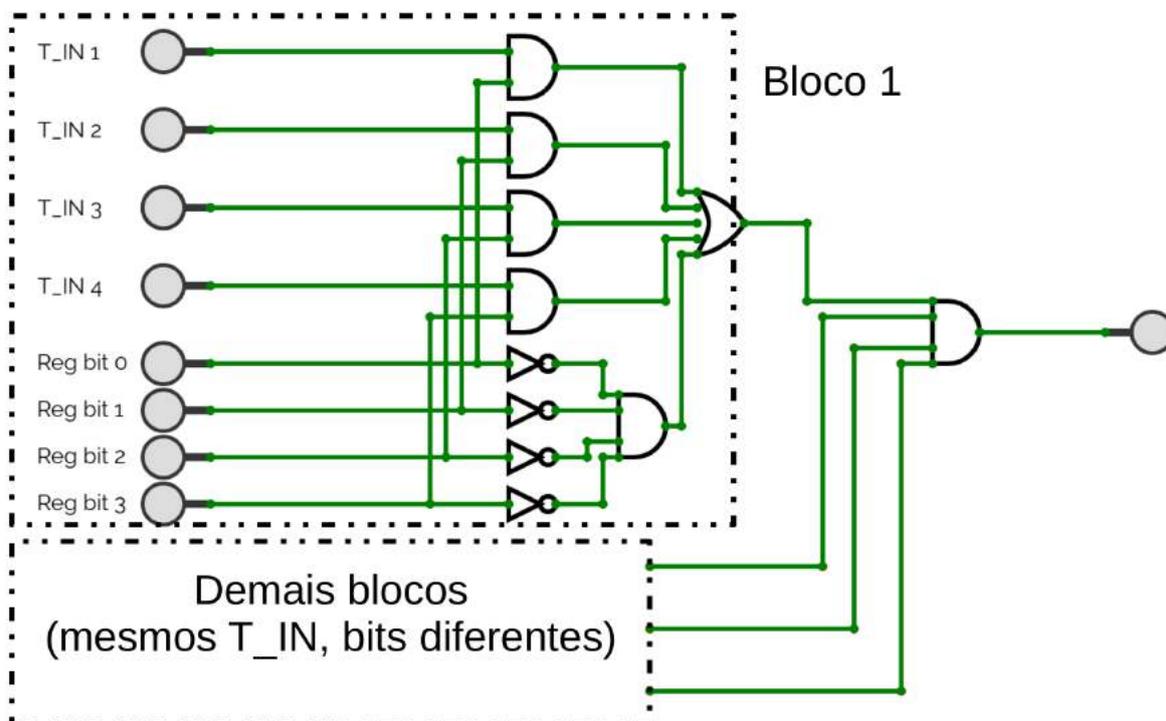


Figura 3.19: Diagrama da lógica de *trigger*. Cada T_IN corresponde às linhas de *trigger* das portas LVDS IN da *Interface*, enquanto Reg bit [x] corresponde aos bits do registro de lógica de *trigger*

A saída de *trigger* fica automaticamente bloqueada quando a CeU gera um *trigger out*, e é necessário habilitar a produção de *trigger* novamente.

Desde o momento em que o *trigger* é enviado até o momento em que for re-habilitado, um registro de ocorrência de *trigger*, o *trigger flag*, ficará com seu valor em 2, servindo para indicar ao *software* em execução na CeU que houve um *trigger* (o valores 1 é reservados para uso em outro modo de *trigger*).

Adicionalmente, a CeU tem um registro de *evt ID*, usado para armazenar um identificador recebido em uma resposta de *trigger* vinda de outro dispositivo, sendo vital neste trabalho para garantir a correlação entre os eventos registrados pelo hodoscópio e pelos DeC.

Os endereços dos registros de *trigger* se encontram na tabela 3.5.

O fluxograma na figura 3.20 representa o funcionamento do *trigger* da CeU no modo de *trigger 4*, onde utiliza o *trigger* lógico, que é o modo utilizado neste trabalho.

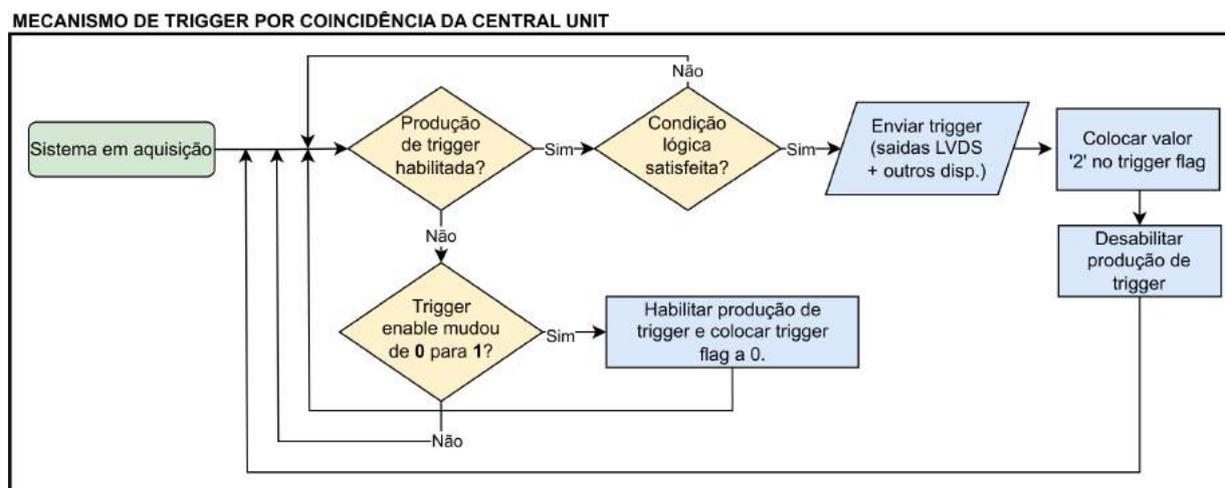


Figura 3.20: Fluxograma do mecanismo de *trigger* da CeU no modo de *trigger* 4, onde aplica operações lógicas às linhas de *trigger* de entrada (vindas das *Front-Ends*).

Comunicação LVDS

Na memória compartilhada entre HPS e FPGA na CeU, há 4 largos blocos de memória read/write (RW), um para cada canal LVDS da Interface, onde tanto se coloca dados para gerar *requests*, quanto se recebe dados em um *read response*.

Adicionalmente, há mais 4 blocos menores com registros de controle, como o registro onde se coloca o endereço do *request* e o registro onde se coloca o *status* após o recebimento de um *status report*.

Para enviar um *read request* ou *write request* para uma *Front-End* conectada a um determinado canal da interface, o *software* de aquisição deverá primeiramente colocar o registro de endereço relativo a esse canal a 0, e então colocar o valor do Nbytes-1 e os dados a enviar (se for um *write request*) nos endereços adequados do bloco de RW daquele canal (ver tabelas 3.5 e 3.6).

Então, o *software* deverá colocar o valor do endereço do *request* no registro de endereço do canal, valor esse que é sempre maior que 0. Feito isso, o *Firmware* fará com que a FPGA automaticamente envie a trama desejada, deixando o *software* livre.

Quando a CeU recebe um *read response* em um canal da Interface, a FPGA irá automaticamente gravar os dados recebidos no bloco de RW correspondente ao canal, sobre-escrevendo qualquer conteúdo anterior. Similarmente, o registro de *status* também é atualizado automaticamente ao receber um *status report*.

Como os endereços onde se coloca e onde se recebe dados são os mesmos em cada bloco, é impossível enviar e receber dados simultaneamente em um mesmo canal, fazendo com que a comunicação seja *half-duplex*, mas ainda sim totalmente independente entre diferentes canais, permitindo operações de gravação ou leitura em paralelo, reduzindo, por exemplo, o tempo morto associado à leitura das FIFOs das *Front-Ends* (que ficam congeladas até serem lidas).

Os endereços utilizados na CeU estão na tabela 3.5

Endereço	Tamanho (bytes)	nome	Significado
0xc0010000	65536	RW 1	Blocos de RW de cada canal, onde se coloca e recebe todos dados das tramas, com exceção do endereço e do status
0xc0020000	65536	RW 2	
0xc0030000	65536	RW 3	
0xc0040000	65536	RW 4	
0xFF201000	1	Ch 1 address	Registro onde se define o endereço para requests no canal LVDS #
0xFF202000	1	Ch 2 address	
0xFF203000	1	Ch 3 address	
0xFF204000	1	Ch 4 address	
0xFF20B0C0	1	Ch 1 status	Registro onde são armazenados status reports recebidos no canal LVDS #
0xFF20B0D0	1	Ch 2 status	
0xFF20B0E0	1	Ch 3 status	
0xFF20B0F0	1	Ch 4 status	
0xFF20A000	1	trigger flag	Indica se houve trigger
0xFF20A010	1	trigger enable	Habilita e re-habilita saída de trigger
0xFF20A020	4	evt id	Armazena identificador recebido em trigger response
0xFF20A030	1	trigger mode	Define o modo de trigger da CeU
0xFF20A040	2	trigger logic	Define a lógica de trigger da Ceu (para o modo que usa trigger lógico)

Tabela 3.5: Endereços físicos na memória compartilhada entre HPS e FPGA utilizados neste trabalho.

Início (bytes)	Tamanho (bytes)	Nome	Significado
0	2	Nbytes-1	Número de bytes subtraído de 1
2	2	icheck-rcheck	
4	2	icheck	Checksum gerado com base na trama recebida em um read response
6	2	rcheck	Checksum enviado pela Front-end em um read response
8	65528	data	Espaço para recepção de dados e preparação de dados para envio

Tabela 3.6: Estrutura interna de cada bloco de RW.

3.3 Arranjos experimentais

Com esses *Hardwares* e *Firmwares* descritos anteriormente, foram instrumentados e operacionalizados dois hodoscópios, um no CBPF e outro na estação experimental Gi-

anni Navarra, no Observatório Pierre Auger.

Os *softwares* de aquisição utilizados em cada um tem ligeiras modificações pela necessidade de diferentes coordenação entre diferentes equipamentos, e serão descritos cada um em sua seção.

Para todos casos, para que o hodoscópio esteja pronto para uma aquisição, é necessário primeiro garantir que todas RPCs estejam com alta tensão ativa, que todas *Front-Ends* energizadas e funcionais, que os MAROC3 de cada *Front-End* estejam configurados adequadamente, e que a taxa de fundo das *pads* é coerente, indicando que a configuração do MAROC3 foi bem sucedida. Esses últimos dois passos são realizados por pequenos softwares que se comunicam com os módulos de configuração e *rate* das *Front-Ends*, sendo os mesmos pra todos sistemas.

3.3.1 Hodoscópio do CBPF

O hodoscópio do CBPF conta com duas RPCs instaladas em uma estante de aço, estando horizontalmente alinhadas e distadas de 203 cm na vertical.

As RPCs são do mesmo tipo do projeto MARTA, porém não tem a integração dos sistemas de monitoramento de pressão e temperatura e do sistema de fornecimento de alta tensão. A instrumentação de leitura dos sensores é diferente, mas as fontes de alta tensão são as mesmas e seu controle é realizado através da mesma curva de ajuste.

No espaço entre as RPCs, foi instalado um pequeno WCD com uma única PMT, instalada no topo do tanque, tendo 300 L de água purificada em um saco de Tyvek® dentro do tanque.

A PMT deste WCD foi alimentada por uma fonte de alta tensão modular em um *Crate* para módulos NIM (*Nuclear Instrumentation Module*), e seu sinal foi capturado por um Osciloscópio R&S RTB2002, que recebia *triggers* vindos diretamente da CeU (por um circuito adicionado na *Interface*) e tinha seus dados capturados via rede por um *software* de aquisição na CeU.

O objetivo deste hodoscópio era principalmente testar novas versões de *firmware* e *software* de aquisição, assim como servir de exercício didático na 6ª Escola Avançada de Física Experimental (EAFEXp) do CBPF em 2023.

Como é composto somente por duas RPCs, a geração de *triggers* é feita por uma simples coincidência, um AND lógico entre os *triggers* enviados por cada RPC para a CeU.

O esquema geral da instrumentação deste hodoscópio está representado na figura 3.21, e a figura 3.22 trás uma foto do arranjo.

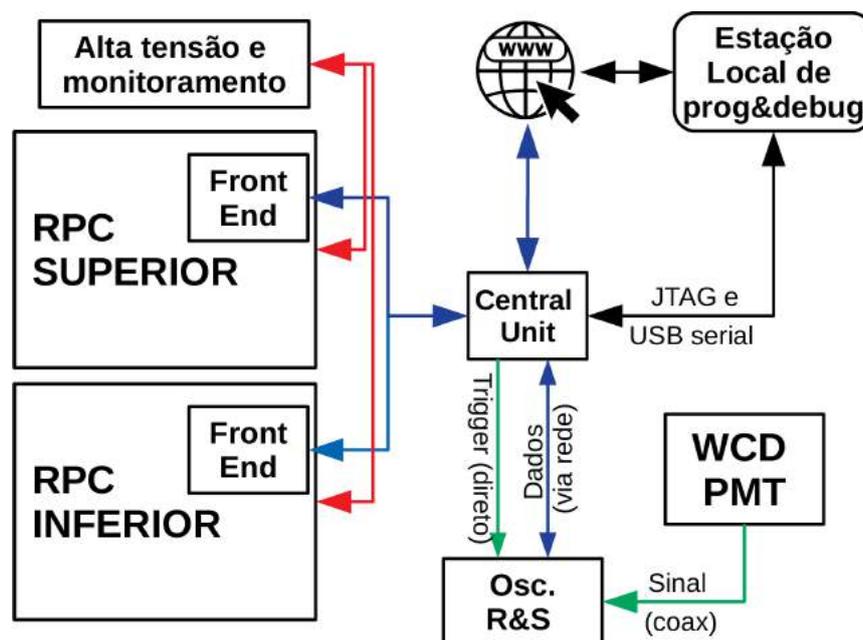


Figura 3.21: Diagrama geral de interconexão da instrumentação eletrônica do hodoscópio do CBPF.



Figura 3.22: Hodoscópio instalado no CBPF. 1: RPC inferior; 2: *Front-End* e *Mezzanine*; 3: *CeU* e *Interface*; 4: Sistema de monitoramento e alta tensão; 5: Fonte de alimentação geral; 6: Estação local de programação e debugging; 7: Cilindro de gás R143a; 8: WCD; 9: *Crate NIM* onde está a fonte de alta tensão da PMT do WCD. O Osciloscópio, assim como a RPC superior, estão fora do enquadramento da foto.

Para esse arranjo, foram desenvolvidos dois *softwares*, um em C++ para aquisição de dados no hodoscópio e outro em Python 3 para aquisição de dados do osciloscópio, ambos sendo executados na CeU. Foi criada uma coordenação de forma a garantir que todo *trigger* gerado fosse contado por ambos *softwares*, como representado nos fluxogramas nas figuras 3.23 e 3.24.

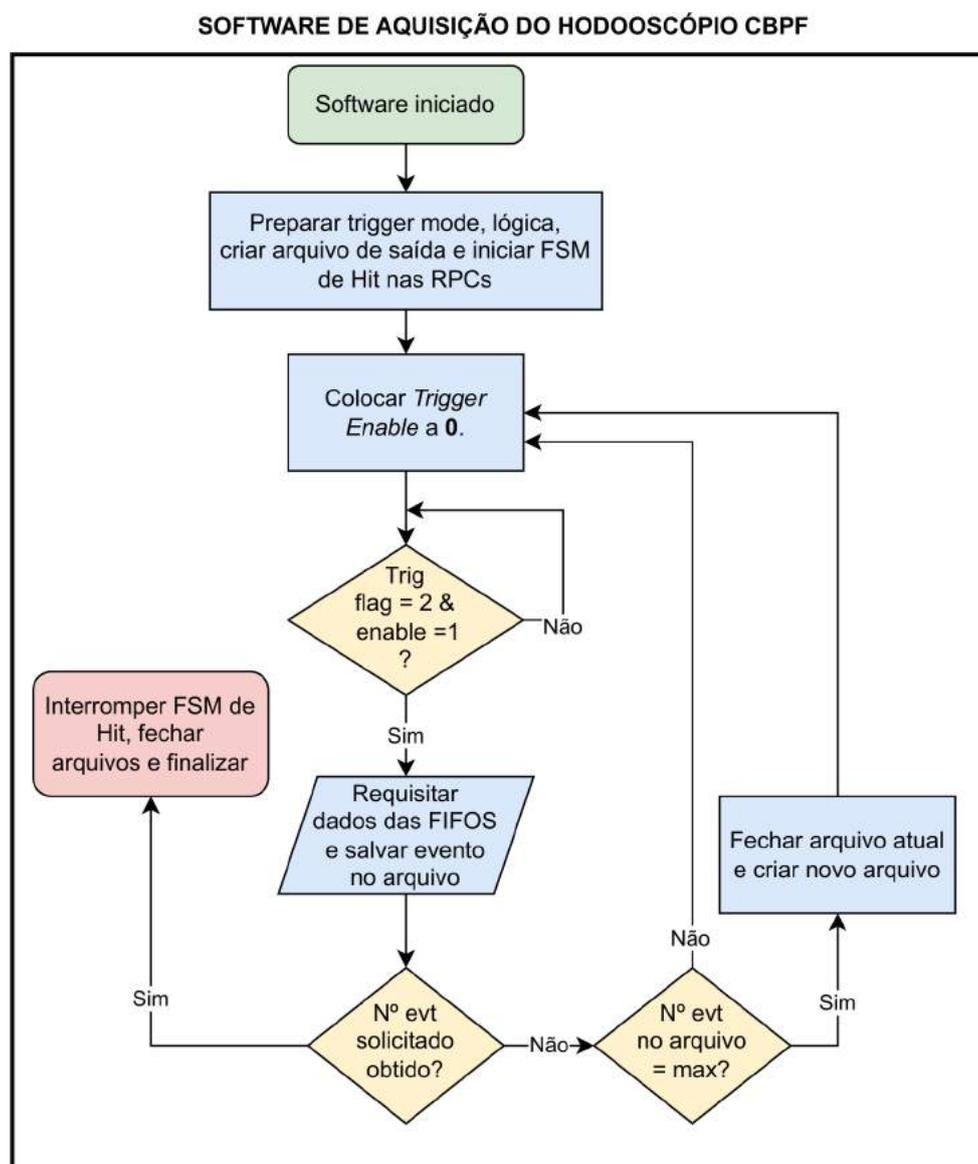


Figura 3.23: Fluxograma do *software* usado para a captura de dados do hodoscópio. Ver 3.24 para verificar sua coordenação.

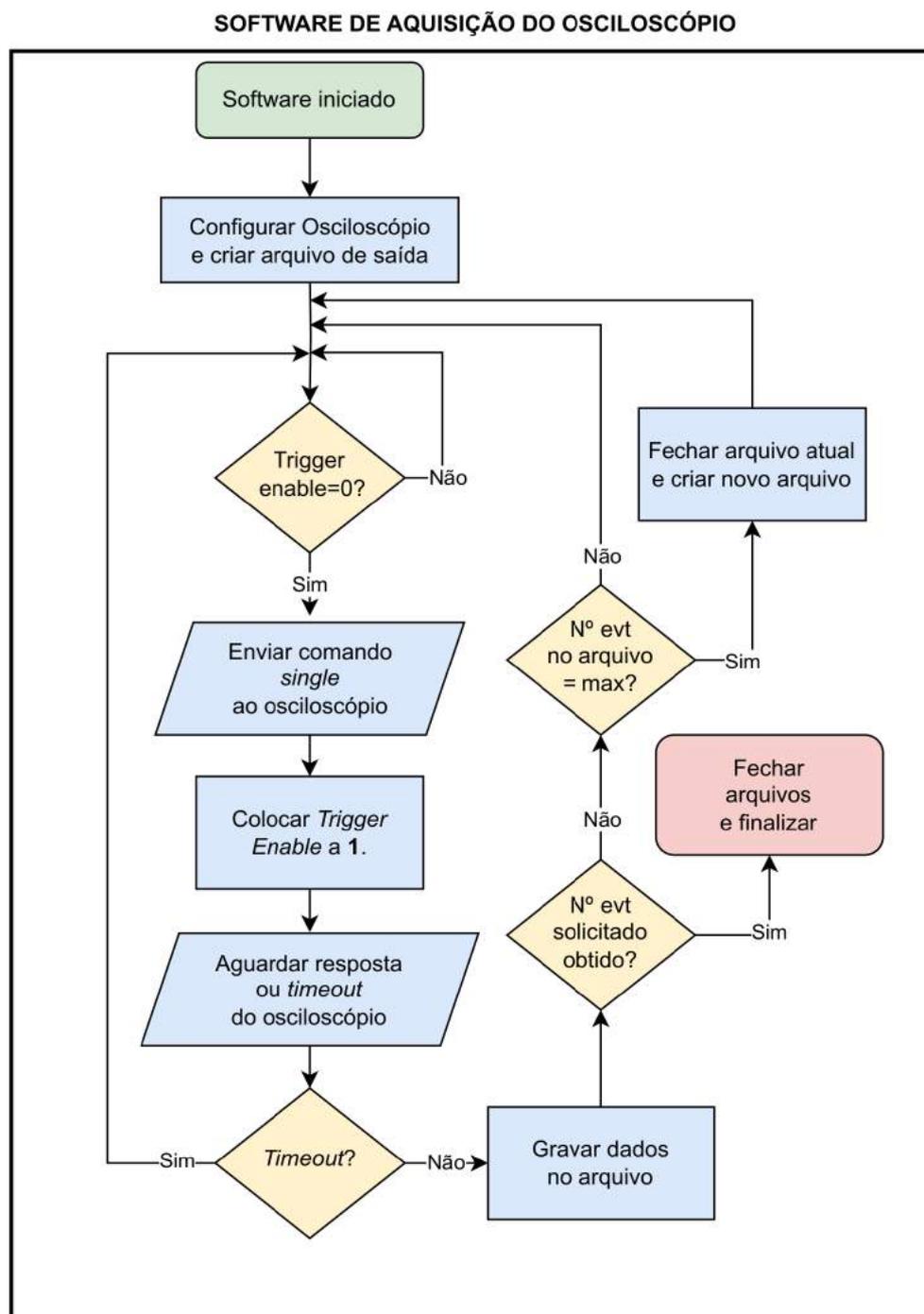


Figura 3.24: Fluxograma do *software* usado para a captura de dados do osciloscópio.

Em função dessa coordenação, há um grande tempo morto a cada evento, em função da baixa velocidade de comunicação do osciloscópio em comparação com o hodoscópio, que limitava o fluxo máximo a 5 eventos por segundo.

Para a medição de fluxo de múons, então, foi utilizada uma versão ligeiramente

diferente do *software* de aquisição, onde não havia coordenação nem obtenção de dados de nenhum outro detector, apenas do hodoscópio, com o próprio *software* reabilitando o *trigger* por conta própria ao final de cada evento.

Vale comentar que, pelo pequeno comprimento dos cabos, não havia nenhuma fração relevante de eventos onde a CeU gerasse *triggers* e alguma das *Front-Ends* não o recebesse com sucesso. Nenhum erro de comunicação foi observado durante sua operação.

Por isso, nesse arranjo, o *software* de aquisição do hodoscópio assumia que as FIFOs de todas *Front-Ends* estariam congeladas após detectar que a CeU havia enviado um *trigger*, partindo direto para a requisição dos dados das FIFOs (pelo endereço 323.4), sem antes requisitar o *status* das FIFOs (pelo endereço 31) para verificar se estavam congeladas.

3.3.2 Hodoscópio de Gianni Navarra

Geometria



Figura 3.25: Foto do WCD Gianni Navarra após a instalação do SSD e UUB. **1:** Domo metálico sob o qual fica instalada a UUB; **2:** SSD; **3:** RPC superior; **4:** WCD. A RPC Inferior está abaixo grade de aço que forma a base da estrutura.

O WCD em Gianni Navarra está instalado em uma estrutura metálica que ao mesmo tempo cria um espaço entre seu fundo e o chão e adiciona um trilho acima do seu topo, permitindo assim instalar uma RPC abaixo do tanque e outra acima, como na foto da figura 3.25. A RPC abaixo do tanque corre em um trilho separado instalado no chão, e teve que ser instalada descentrada por causa de uma das colunas de suporte da estrutura metálica. A figura 3.26 mostra a orientação dos trilhos em relação às barras de suporte do SSD.

As RPCs são instaladas dentro de carrinhos fechados que podem se movimentar sobre esses trilhos. A RPC inferior é instalada com sua maior dimensão paralela ao trilho inferior, enquanto a RPC superior é instalada perpendicularmente ao trilho superior, o que a torna quase perpendicular à RPC inferior também, estando rotacionada $87,5^\circ$ em relação a ela.

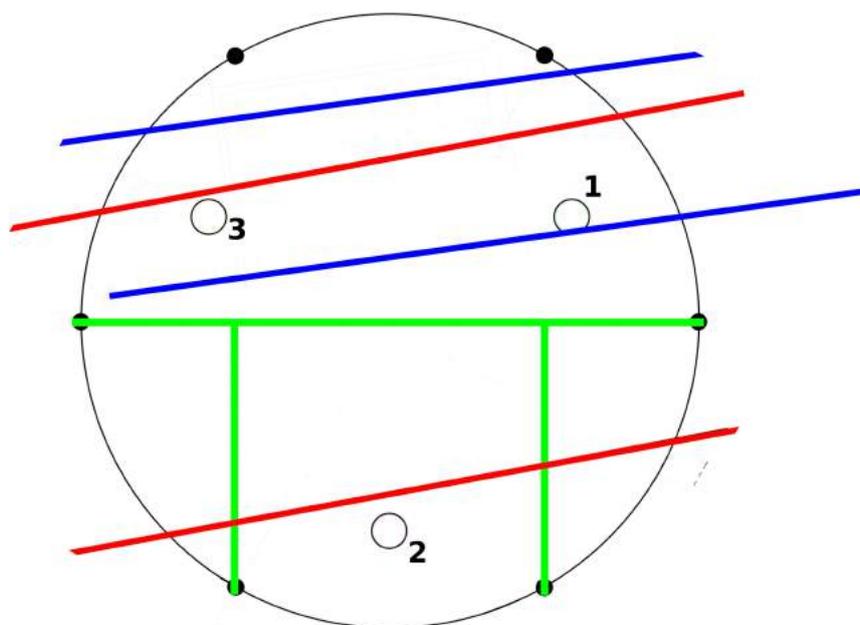


Figura 3.26: Orientação das barras de suporte do SSD (em verde) relativa ao trilho da RPC superior (vermelho) e da RPC inferior (azul). As PMTs do WCD estão identificadas pelos seus números, conforme a numeração que aparece nos dados. A PMT 1 fica imediatamente abaixo da UUB.

A geometria atual do hodoscópio é representada na figura 3.27, em um sistema de coordenadas com origem no centro do tanque e o eixo horizontal passando entre dois olhais de içamento diametralmente opostos.

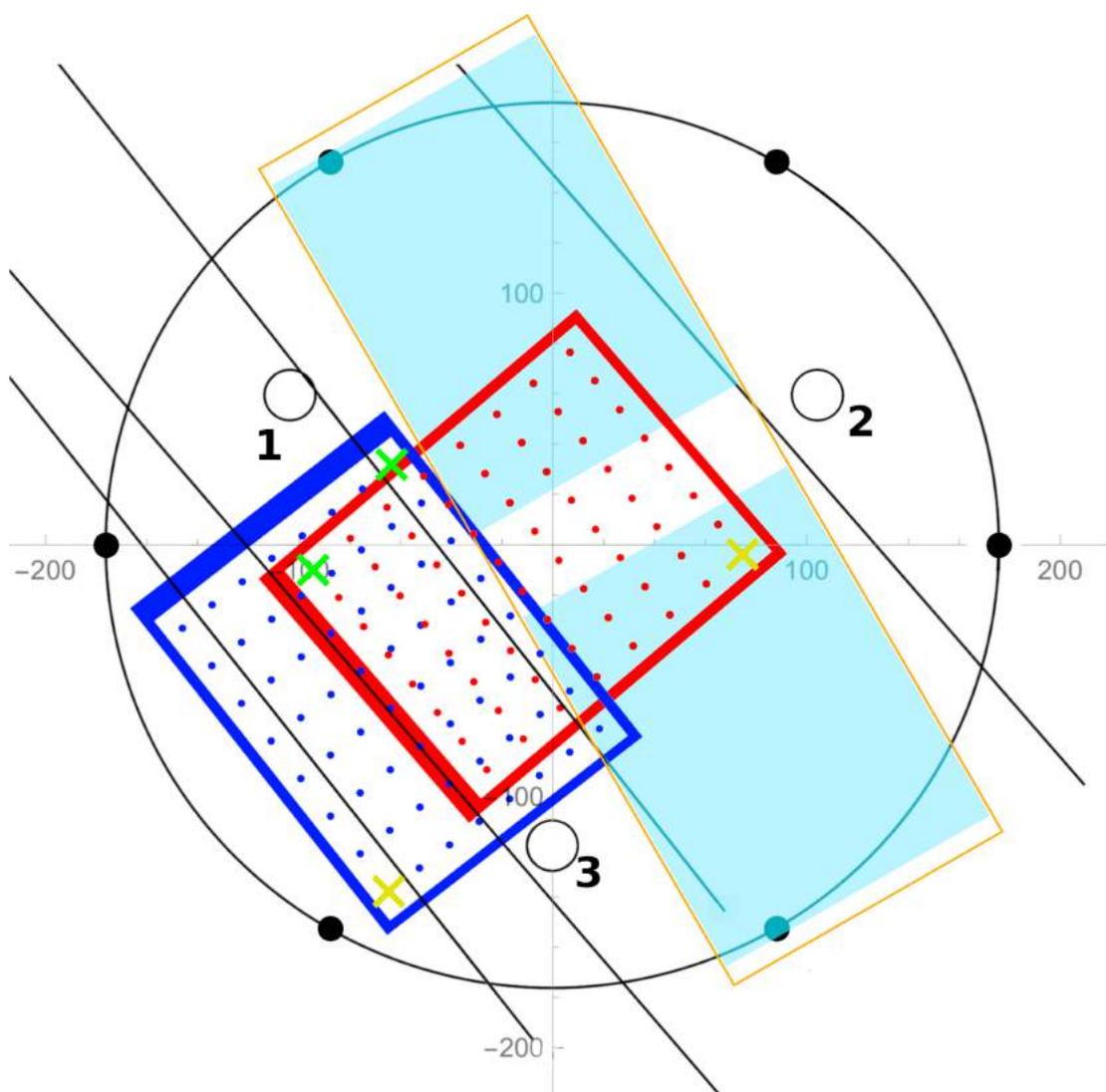


Figura 3.27: Geometria do hodoscópio. A RPC superior e o centro de suas *pads* estão representadas em vermelho, enquanto a RPC inferior está em azul. As cruzes verdes indicam a *pad* 1 de cada RPC, enquanto as cruzes amarelas indicam a *pad* 64 de cada. Os dois retângulos azuis semi-transparentes representam a região sensível do SSD.

A distância vertical entre as duas RPCs é de cerca de 2.3 m.

RPCs e eletrônica do hodoscópio

A RPC superior é uma RPC do EA do projeto MARTA, com toda eletrônica integrada e sendo controlada pela CeU.

Enquanto isso, a RPC inferior não contém esses sistemas integrados, mas tem a mesma *Front-End* e utiliza o mesmo *firmware* da *Front-end* da RPC superior.

Ambas RPCs se comunicam com uma CeU que fica abrigada dentro do *container* da estação *Gianni Navarra*.

Dentro do *container* também está a fonte de alta tensão da RPC inferior, que contém um computador Raspberry Pi que realiza a leitura de seus sensores de pressão e temperatura e ajusta a tensão aplicada.

Central Unit e esquema geral de interconexão

A CeU deste hodoscópio é uma DE10 tal como no hodoscópio do CBPF e no projeto MARTA.

Há duas conexões entre a UUB do tanque e a CeU, uma pela qual a CeU envia um *trigger* para a UUB quando detecta uma coincidência no hodoscópio, e outra pela qual recebe uma resposta de *trigger* vinda da UUB, contendo um identificador (ID) que posteriormente é usado pra correlacionar os eventos registrados na CeU e na UUB.

Além disso, conectados às *Front-Ends*, à CeU e à UUB, estão dois servidores de programação e depuração que permitem executar o *Signal Tap* do Intel Quartus e programar os FPGAs das *Front-Ends* e da CeU, além de permitir o acesso da UUB e CeU através de *console* Minicom (USB Serial), caso elas tenham algum problema de rede, mas os servidores ainda estejam acessíveis.

Por fim, dentro da sala de servidores do *Central Data Acquisition System* (CDAS), existe outro servidor utilizado para armazenamento e processamento dos dados de todo o arranjo em Gianni Navarra, o *Storage & Preprocess Server* (SPS). Ele recebe os dados da UUB em tempo real durante a aquisição (eventos e histogramas de calibração) e os dados do hodoscópio ficam inicialmente na CeU e são transferidos para o servidor manualmente após o término de uma aquisição.

Um esquema geral do sistema está representado na figura 3.28.

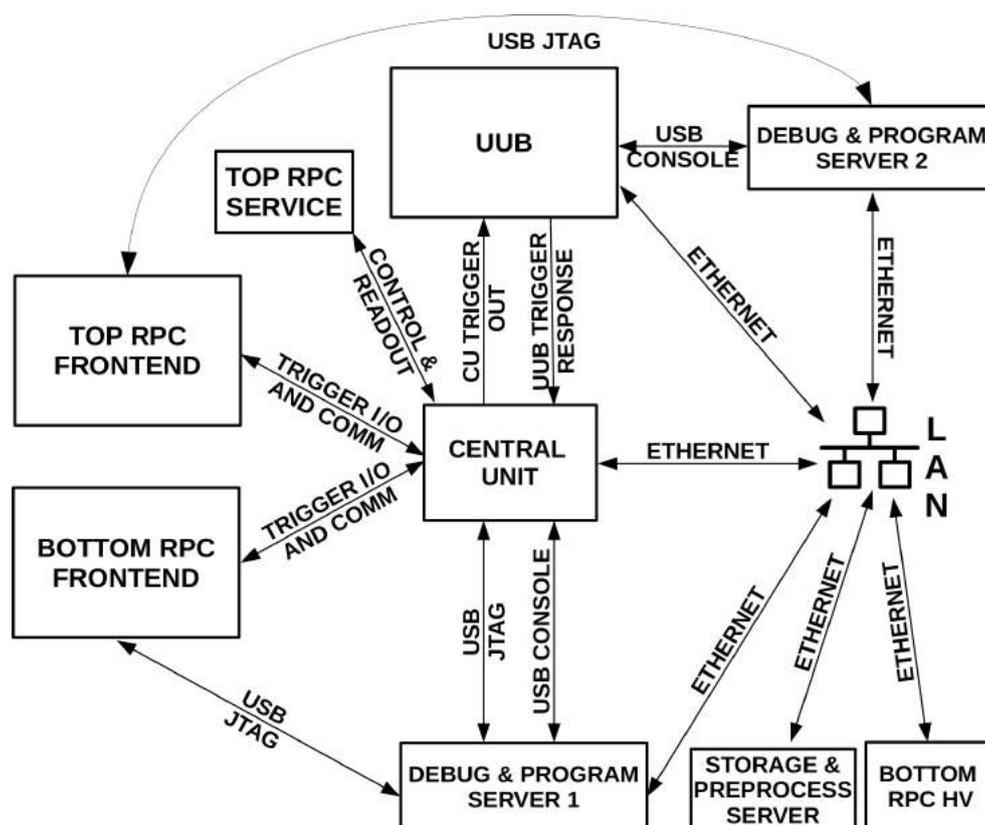


Figura 3.28: Esquema geral do sistema de hodoscópio + WCD + SSD no arranjo em Gianni Navarra.

Firmware e Software da UUB

Dentre as várias funcionalidades e mecanismos do *firmware* da UUB, nos interessa explicar aqui sobre os dois principais: O mecanismo de eventos e o mecanismo de *muon fill*, que operam junto aos *softwares* "clientes" de eventos e de histogramas. Estes, por sua vez, enviam dados para um computador remoto onde é executado o *software* "servidor" da UUB, que salva em arquivos binários todos dados recebidos de todos clientes, discriminando o tipo do cliente e o identificador do cliente.

No mecanismo de eventos, o *firmware* da UUB faz a constante amostragem (*sampling*) de diferentes canais para *buffers* na "memória de chuveiros", que é dividida em 5 blocos com dados de diferentes detectores. Destes 5 blocos, 4 são de interesse, pois contêm *samples* dos sinais do SSD e de cada PMT do WCD.

Cada bloco é dividido em 4 *buffers*, e cada *buffer* tem espaço para 2048 amostras (*samples*). Esses *buffers* aceitam *samples* continuamente, sobre-escrevendo os mais antigos quando ficam cheios.

Assim que iniciada, todos *buffers* estarão vazios e a UUB começará a colocar *samples* no primeiro *buffer* de cada bloco de memória, com uma taxa de amostragem de 120 MHz.

Para aceitar um *trigger* externo, a UUB requer que algum *buffer* esteja ativamente recebendo *samples*, e que já contenha no mínimo 660 *samples*.

Ao aceitar um *trigger*, UUB irá imediatamente enviar uma resposta de *trigger* com um identificador para o evento para sua saída de *trigger*, e irá colocar 1388 *samples* a mais no mesmo *buffer*, que ficará bloqueado depois disso.

Se o próximo *buffer* em cada bloco estiver livre, a UUB passará a colocar *samples* nele, e após 660 *samples* passará a aceitar *triggers* novamente. Se não estiver livre, a UUB irá aguardar que ele seja desbloqueado.

Cabe ao cliente de eventos ler e liberar os *buffers* bloqueados, enviando os dados para o servidor, evitando que a UUB fique bloqueada de aceitar novos *triggers*.

Os fluxograma nas figuras 3.30 e 3.29 resumem o mecanismo de eventos.

FIRMWARE DE EVENTOS DA UUB

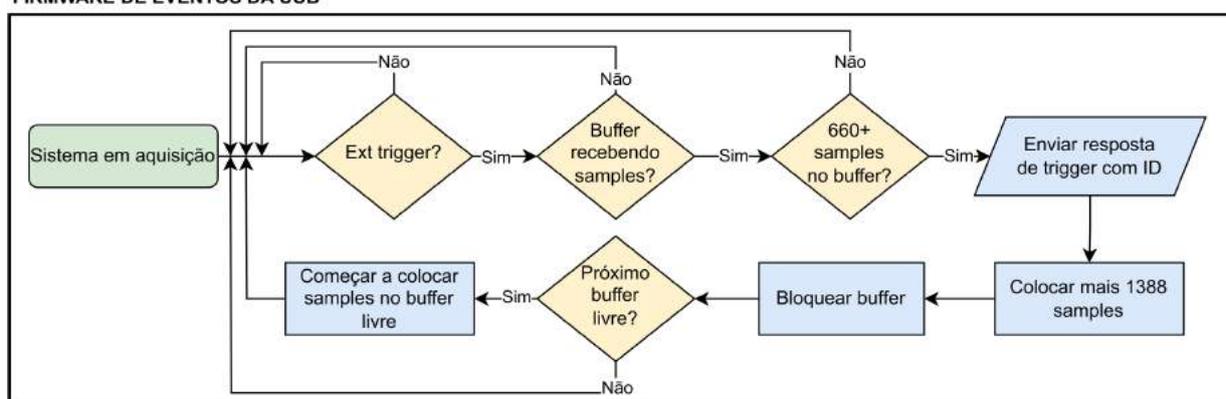


Figura 3.29: Fluxograma do *firmware* de eventos da UUB.

CLIENTE DE EVENTOS

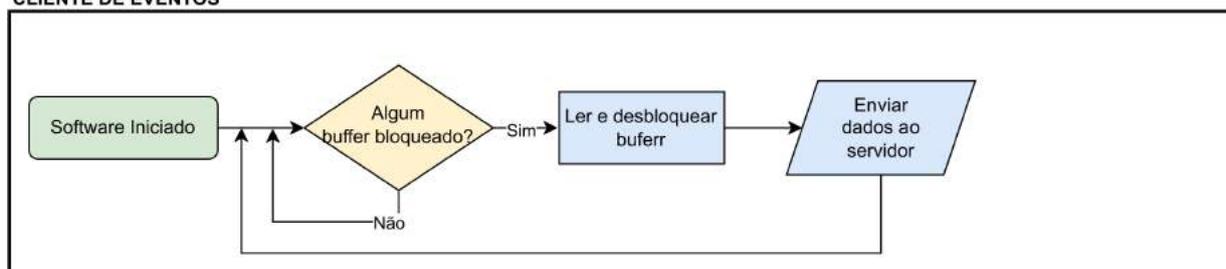


Figura 3.30: Fluxograma do cliente de eventos da UUB.

Enquanto isso, o mecanismo de *muon fill* opera de maneira diferente.

Sua memória também é dividida em blocos, com 4 *buffers* cada, porém, cada *buffer* é usado para armazenar vários eventos, e fica automaticamente bloqueado após receber 150 eventos, sua capacidade máxima.

Cada evento consiste de apenas 69 *samples* dos sinais em cada canal, que são adquiridos quando há um *muon trigger*, um *trigger* interno baseado na coincidência entre o sinal das 3 PMTs do WCD, com um baixo limiar de discriminação para cada sinal.

Essa quantidade de *samples* é suficiente pra contenção dos sinais nesse modo, onde a posição do sinal em relação ao *trigger* é bem conhecida e característica da própria UUB.

O cliente de histogramas coleta dados desses *buffers* conforme eles encham e ficam bloqueados, desbloqueando-os. Quando há dados suficientes, ele gera diferentes histogramas para cada canal (PMTs do WCD e SSD), os envia para o servidor, e começa a coletar dados novamente. No momento, ele está configurado para fazer histogramas com dados acumulados por um minuto.

Os fluxograma nas figuras 3.32 e 3.31 resumem o mecanismo de eventos.

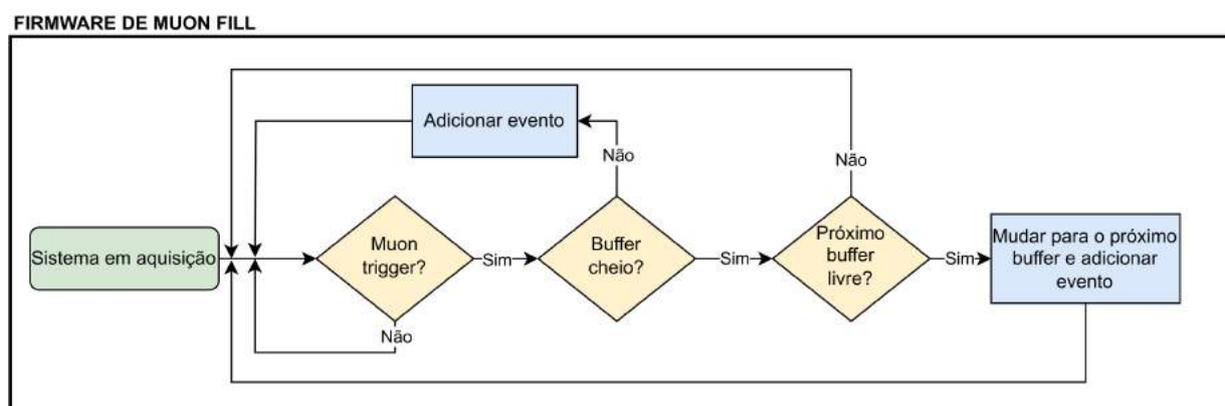


Figura 3.31: Fluxograma do *firmware* de *muon fill* da UUB.

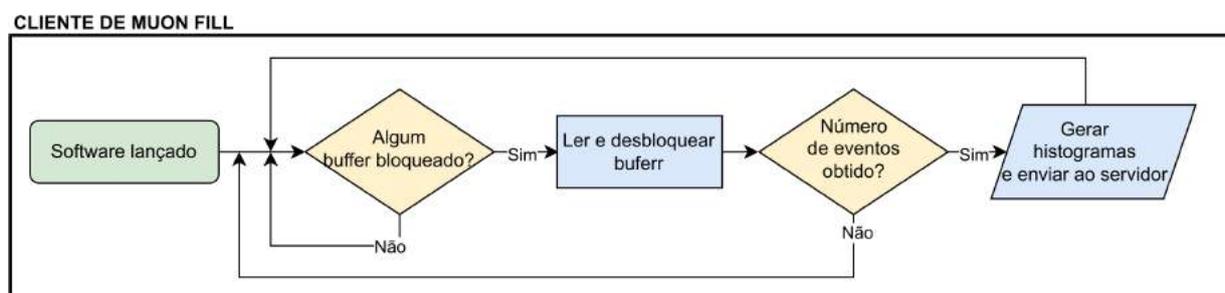


Figura 3.32: Fluxograma do cliente de *muon fill* da UUB.

Software de aquisição do hodoscópio

O *software* de aquisição do hodoscópio em Gianni Navarra é semelhante àquele do hodoscópio do CBPF, com duas principais diferenças:

1. Em função de uma taxa de erros de comunicação maior, o *software* irá verificar o *status* das FIFOs de cada *Front-End* antes de requisitar os dados, e descartar o evento se qualquer uma das duas não estiver com sua FIFO congelada e pronta para ser gravada.

2. O *software* irá verificar se foi recebido um *trigger response* com identificador do evento vindo da UUB. Se não, o evento é descartado. Se sim, ele é aceito e o identificador é registrado junto ao evento.

O fluxograma do *software* de aquisição está representado na figura 3.33.

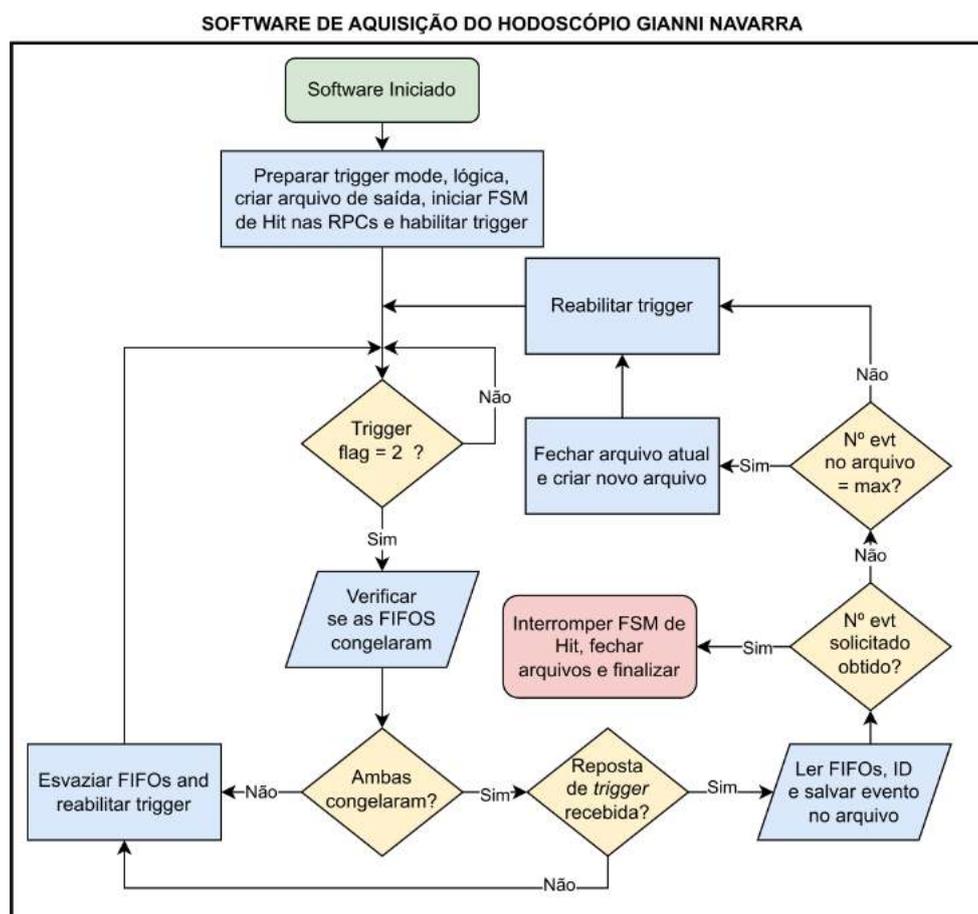


Figura 3.33: Fluxograma do *software* de aquisição de dados do hodoscópio em Gianni Navarra.

3.4 Análise de dados

3.4.1 Redução de dados

Primeiramente, após a operacionalização de um arranjo e primeira aquisição bem sucedida, é necessário definir a janela temporal no qual se encontram os sinais de interesse nos dados brutos de cada detector.

No das RPCs do hodoscópio, como os dados obtidos já representam o estado discriminado de cada canal em diferentes intervalos de tempo, essa análise é feita com base

em um histograma onde se mede a frequência relativa de 1s por posição da FIFO em cada RPC do arranjo, em uma aquisição de ao menos 10000 eventos.

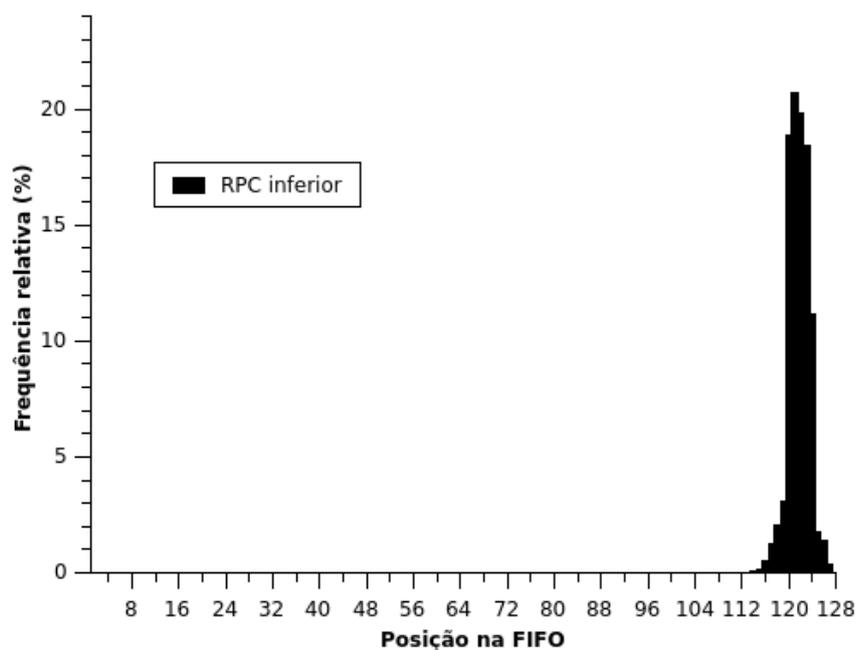


Figura 3.34: Frequência relativa de 1s por posição da FIFO, em 50000 eventos, da RPC inferior no hodoscópio do CBPF. Os eventos estão muito próximos da posição 128, pois desde o evento até a recepção do *trigger* vindo da CeU, se passam apenas cerca de 90 ns, dos quais cerca de 20 ns se devem à propagação do sinal nos cabos.

Isso permite realizar então um corte temporal nos dados, de forma a excluir eventuais sinais que não fazem parte dos eventos que produziram os *triggers* de coincidência, mas que ocorreram em proximidade temporal com estes.

Um processo similar é realizado para o sinal dos DeC, com a diferença que, nesse caso, como se obtém uma amostragem da amplitude do sinal com o tempo, é primeiro necessário discriminá-lo, com um certo limiar acima da linha de base (*baseline*) do sinal (que também precisa ser determinada), e então fazer histogramas semelhantes àqueles realizados com no hodoscópio.

Foi decidido se utilizar uma janela que, para cada detector, inclua 95% do total de 1s produzidos (após a discriminação) em um grande número de eventos (>10000). A janela é centrada na posição com maior frequência de 1s.

Essa análise só precisa ser repetida caso alguma alteração realizada possa afetar o tempo de propagação dos sinais, o tempo de geração e identificação de *triggers*, ou o modo de *trigger*.

O corte definido será então utilizado para redução de dados em cada análise, onde diferentes *softwares* são usados para reduzir os dados do hodoscópio e dos DeC, redu-

zindo a quantidade de informação por evento e gerando um único arquivo binário para cada detector por aquisição (ex: um para o hodoscópio, outro para a UUB).

3.4.2 Validação de eventos, Tradução e Correlação

Um outro *software* então é utilizado para realizar três tarefas a cada evento detectado pelo hodoscópio: validar o evento, determinar as *pads* envolvidas e correlacionar com o sinal do DeC.

Na validação, é verificado se, a cada evento no arquivo reduzido do hodoscópio, houve sinal discriminado em apenas uma *pad* por RPC, para garantir que o evento corresponde à passagem de um único múon, e não vários múons ou eventuais *streamers* (que podem se propagar lateralmente e envolver várias *pads*).

A cada evento que atender essa condição, será verificado também se há, nos dados do DeC, um evento com o mesmo identificador.

Se houver, o *software* irá então determinar a *pad* discriminada com auxílio de um arquivo tradutor, fornecido como argumento na execução do *software*, que traduz os 64C para *pads* no esquema de numeração padrão. Pode ser necessário um tradutor diferente para cada RPC, pois há dois padrões de ordem de ligação na *Mezzanine* nas RPCs deste trabalho.

Feito isso, o *software* irá registrar, em um arquivo de saída (binário ou texto), os dados de identificação do evento (identificador, tempo do evento, número do evento etc), o número da *pad* inferior, o número da *pad* superior, e os dados reduzidos do DeC para aquele evento.

Isso é realizado para todos eventos no arquivo reduzido do hodoscópio, gerando um único arquivo de saída. A figura 3.35 contém um fluxograma simplificado da tarefa deste *software*.

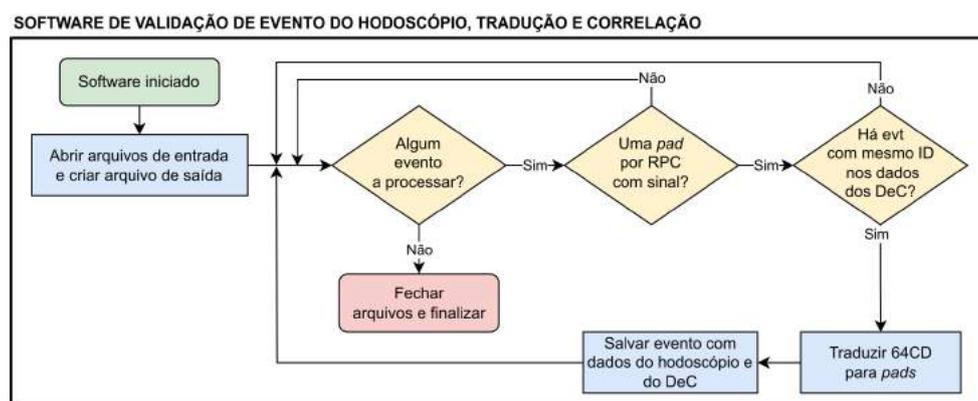


Figura 3.35: Fluxograma geral do *software* de validação, tradução e correlação de dados entre hodoscópio e DeC.

Esse arquivo pode então ser utilizados nas subsequentes análises, pois tem o necessário para se determinar a trajetória do múon e os sinais induzidos nos DeC a cada

evento.

3.4.3 Validação do hodoscópio

O arquivo reduzido do hodoscópio também é utilizado em outra tarefa: Comparar o fluxo de múons observado no hodoscópio contra simulações.

Ainda é necessária a validação dos eventos e a tradução dos canais para *pads*, mas não são necessários os sinais dos demais detectores.

Nessa análise, o objetivo é comparar a distribuição e volume de trajetórias observada com o esperado, dada a geometria sob o fluxo de múons atmosféricos na altitude em que se encontra o hodoscópio, ou mesmo sob o fluxo de todas partículas de chuviscos atmosféricos (para incluir eventos mais raros onde alguma outra partícula produz uma coincidência).

A trajetória do múon em cada evento é determinada a partir do conhecimento da geometria e orientação geográfica do arranjo, e das *pads* interseccionadas pelo múon.

O sistema que se utiliza para sua caracterização é o sistema horizontal de coordenadas, onde a trajetória é definida pelo ângulo azimutal, pelo ângulo zenital (complementar da elevação) e por um deslocamento, que pode ser definido, por exemplo, pela *pad* interseccionada na RPC superior.

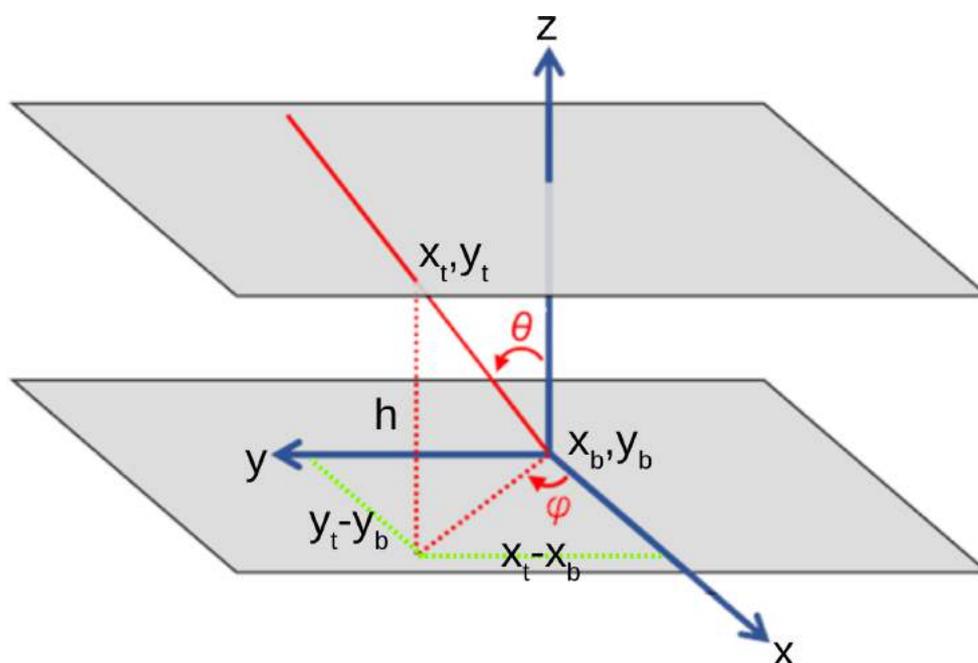


Figura 3.36: Diagrama da determinação dos ângulos da trajetória para dois detectores planos, horizontais, considerando que os dados conhecidos são as intersecções x_b, y_b e x_t, y_t . θ é o ângulo azimutal enquanto ϕ é o ângulo zenital, se considerando que o eixo x está paralelo ao eixo norte-sul, e apontando para o norte.

Conforme diagramado na figura 3.36, chamando $x_t - x_p$ de Δx e $y_t - y_p$ de Δy , o ângulo zenital (θ) e azimutal (ϕ) são dados por:

$$\phi = \arctan \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \quad (3.1)$$

$$\theta = 90 - \arctan \frac{h}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \quad (3.2)$$

Se o eixo x do sistema não estiver paralelo ao eixo norte-sul geográfico e com o sentido positivo na direção do norte, basta somar o azimute desse eixo ao azimute que foi medido conforme as equações acima.

A análise da distribuição zenital e azimutal em um grande número de trajetórias é utilizada como forma de validação do hodoscópio, comparando as distribuições observadas com as distribuições já bem estabelecidas de fluxo de múons e com simulações, permitindo validar o bom funcionamento do hodoscópio e detectar possíveis erros em sua configuração.

Além da distribuição de ângulos, também se pode simular e comparar o número de eventos registrados em cada *pad*, que também pode ser utilizado para medir o fluxo total de múons.

3.4.4 Medida de fluxo total

O número de eventos registrados em cada *pad* pode ser convertido em uma medida de fluxo através da expressão:

$$F_i = \frac{N_i}{R_i \cdot A_p \cdot \Delta t} \quad (3.3)$$

, onde F_i é o fluxo total na *pad*, N_i é o número de eventos registrados na *pad i*, A_p é a área de cada *pad*, Δt é o tempo da aquisição e R_i é a razão entre o fluxo que pode gerar coincidências e o fluxo total de múons pela *pad i*.

R_i depende da geometria particular da *pad i* em relação a todas outras *pads* da outra RPC, pois esta geometria que determinará qual fração do fluxo total de múons pode gerar coincidências para a *pad i*. Seu cálculo pode ser realizado via simulação ou analiticamente.

Se for considerado que a geração de coincidências correspondem a eventos discretos, aleatórios e independentes, seguindo uma distribuição de Poisson, então o desvio padrão do número de múons medido por *pad* é dado simplesmente por [57]:

$$\sigma_{N_i} = \sqrt{N_i} \quad (3.4)$$

Se adicionalmente for considerado que as outras medidas (de área, tempo etc) são números exatos, e que a eficiência eletrônica de todas *pads* é 100%, o desvio padrão do

fluxo por *pad* se torna:

$$\sigma_{Fi} = \frac{\sqrt{N_i}}{R_i \cdot A_p \cdot \Delta t} \quad (3.5)$$

Como o valor médio de N_i é proporcional a Δt , esse desvio padrão é inversamente proporcional à $\sqrt{\Delta t}$

O fluxo total e seu erro podem ser encontrados simplesmente se somando os valores de todas *pads* e propagando seus desvios padrões.

3.4.5 Mapeamento de sensibilidade

O hodoscópio pode ser utilizado para mapear a sensibilidade de um DeC em função da posição da intersecção dos múons com o DeC.

Num exemplo mais simples, em um DeC plano, colocado paralelo às RPCs do hodoscópio, pode ser mapeado pela fração de eventos verticais detectada em cada retângulo ao longo do DeC, revelando variações de sensibilidade/eficiência ao longo de sua área.

Em casos mais complexos, a análise das trajetórias e detecção ou não-deteção pelo DeC podem ser usadas para a construção de um mapa tridimensional de sensibilidade/eficiência.

Um arranjo visando a medida tridimensional de um DeC de geometria arbitrária necessitaria ou a rotação do DeC nos 3 eixos espaciais, ou o registro do fluxo de múons ao longo de 3 planos perpendiculares.

Mas, algumas geometrias permitem testes mesmo com apenas o registro ao longo de um único plano, sem necessitar rotacionar o DeC para se obter resultados coerentes.

Para o caso do hodoscópio do CBPF, foi desenvolvido um *software* teste que cria imagens tridimensionais em *voxels*, que são as unidades de uma grade cartesiana, sendo análogos tridimensionais dos *pixels*.

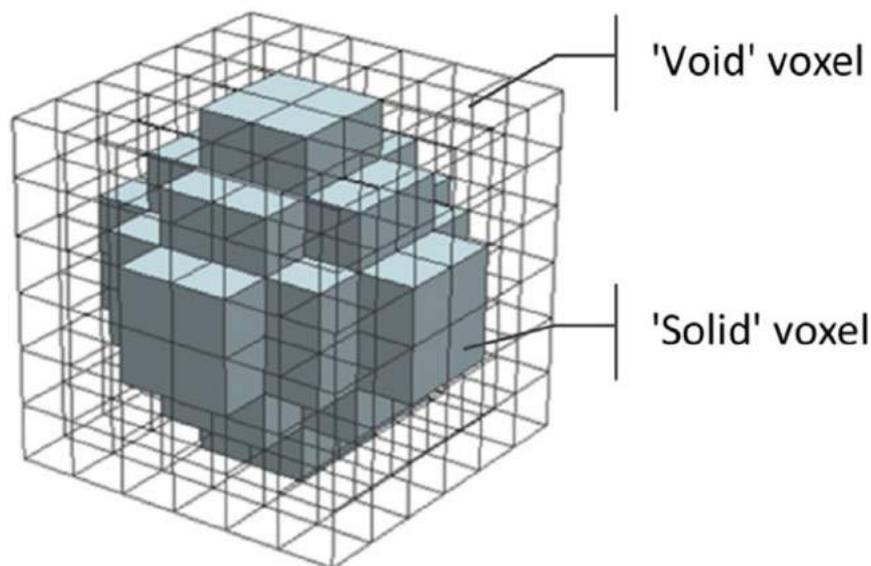


Figura 3.37: Um cubo de *voxels*, onde há *voxels* com cor sólida e *voxels* vazios. Retirado de [27].

O *software*, que foi desenvolvido em C, divide o espaço tridimensional contido pelas superfícies sensíveis das RPCs (152cm X 120cm X 203cm) em um paralelepípedo de 96x73x126 *voxels*, com uma paleta de cores de 256 tons de cinza.

Então, para mapear a localização e gerar uma figura do WCD dentro do hodoscópio, foi criado um algoritmo que "pinta" cada trajetória de acordo com a discriminação do sinal no WCD para aquele múon. A trajetória é pintada positivamente se houver sinal discriminação, adicionando um valor aos *voxels* no caminho, ou negativamente se não houver sinal discriminado, subtraindo um valor dos *voxels*.

O algoritmo de pintura simula o movimento de um paralelepípedo de *voxels*, que parte da *pad* da RPC superior e se move até a *pad* da RPC inferior, se movendo 1 *voxel* no sentido vertical a cada iteração (ocupando um diferente plano horizontal), e se movendo valores fracionários no plano horizontal.

Então, a cada iteração, os *voxels* naquele plano horizontal que estiverem totalmente cobertos pelo paralelepípedo terão um valor predeterminado adicionado ou subtraído, enquanto cada *voxel* que estiver parcialmente coberto pelo paralelepípedo terá uma apenas fração deste valor adicionada ou subtraída, de acordo com a fração da sua área que estiver coberta pelo paralelepípedo.

Esses processos estão representados nas figuras 3.38 e 3.39.

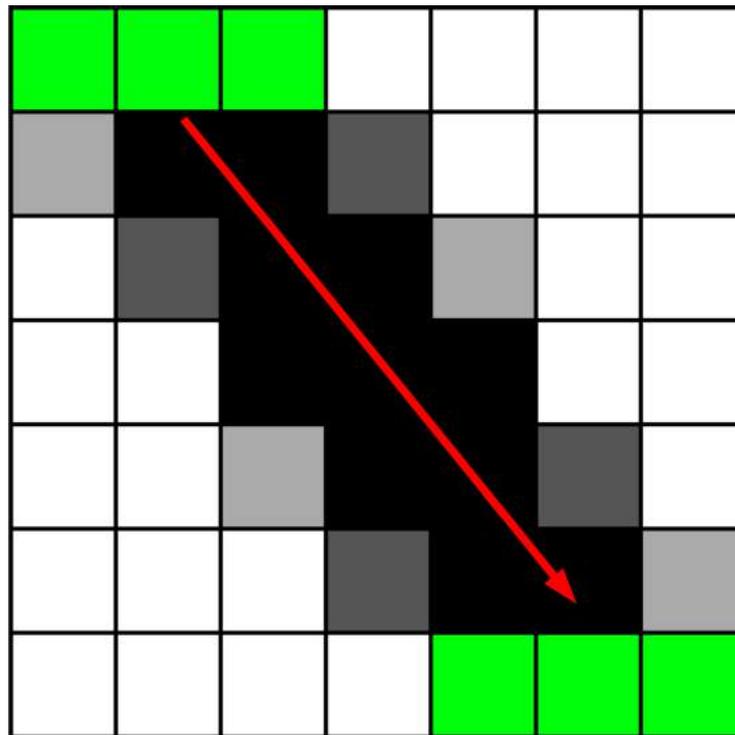


Figura 3.38: Visão frontal do processo onde um paralelepípedo (em verde) é movido ao longo da trajetória, pintando os *voxels* no caminho (em tons de cinza).

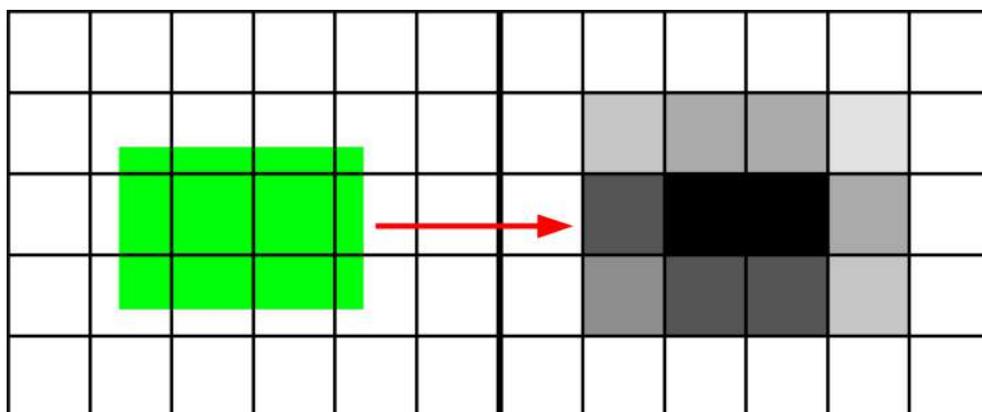


Figura 3.39: Visão *top-down* do paralelepípedo desalinhado em um plano horizontal de *voxels*, e a pintura produzida nesses *voxels* em função da passagem do paralelepípedo.

Ao final do processo, os *voxels* são normalizados, de forma que o *voxel* de maior valor seja branco (valor máximo = 255), e todos *voxels* com valor negativo são excluídos, ou seja, serão transparentes na imagem final e não bloquearão a visão do WCD.

Alternativamente, para tornar a visão mais clara, pode-se excluir *voxels* abaixo de um valor maior que zero.

Uma refinação desse processo também pode ser feita para que o valor adicionado a cada *voxel* seja proporcional ao pico ou à carga integrada do sinal do WCD a cada evento.

3.4.6 Caracterização de histogramas

Como mencionado anteriormente, detectores, como o SSD e o WCD, não conseguem discriminar a trajetória das partículas, e geram histogramas onde há a contribuição de múons vindos de todas direções.

Com os dados do hodoscópio, é possível fazer seleção de eventos baseadas nas trajetórias dos múons e então computar histogramas que correspondem à uma referência de evento, como múons verticais.

Primeiro, para isso, é necessário se estabelecer algumas métricas quanto à identificação e integração de sinais.

Na identificação, é necessário se estabelecer limiares para determinar se o detector registrou de fato algum evento ou se o *trigger* gerado pelo hodoscópio foi espúrio.

Na integração, é necessário determinar uma forma de calcular a *baseline* a cada evento, pois esta tem que ser subtraída para a integração; e também é preciso se delimitar a integração, para evitar integrar ruído ou eventuais *overshoots* do sinal. A figura 3.40 traz a métrica utilizada para cálculo de *baseline*, integração de carga e limiares para busca de sinal.

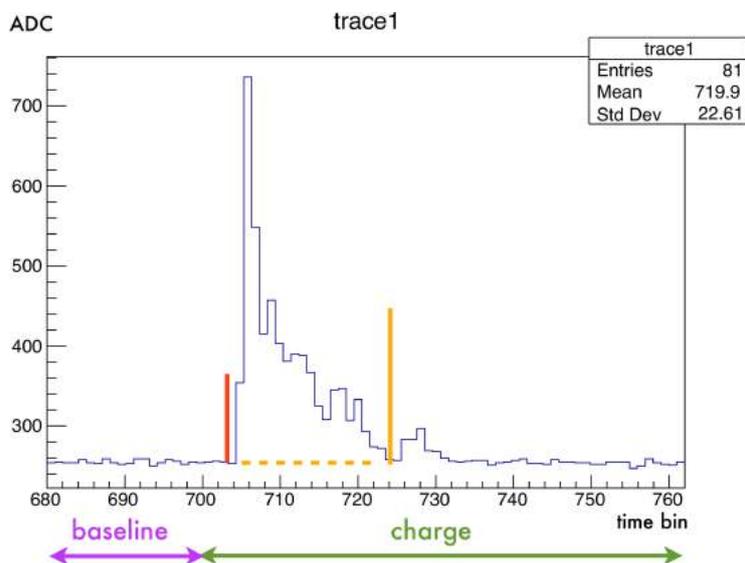


Figura 3.40: Métrica para busca e integração de sinais das PMTs do WCD. As regiões *baseline* e *charge* demarcam os intervalos usados para determinação da *baseline* e integração da carga, respectivamente. As linhas vermelha e laranja representam os limiares para busca de pico do sinal, o primeiro limiar sendo usado no intervalo de *bins* 700-720 e o segundo de 721 em diante.

Uma vez definidas as formas de identificação e integração, o *software* de análise pode

gerar histogramas de diversos tipos com o sinal, e filtrando os eventos em função das trajetórias dos múons.

Esses histogramas, sejam de carga (sinal integrado) ou de corrente pico (amplitude do sinal), terão um pico, um valor que é o mais frequente do histograma.

Chamemos a carga no pico de um histograma feito com uma seleção específica de eventos do hodoscópio de Q , conforme a nomenclatura usada em [45]. Se esse histograma fosse calculado apenas utilizando eventos onde múons verticais atravessam o tanque, a carga em seu pico seria o Q_{VEM} .

Enquanto isso, o segundo pico do histograma de carga gerado independentemente pela UUB com seu *trigger* que corresponde à múons verticais, é chamado de Q_{VEM}^{peak} .

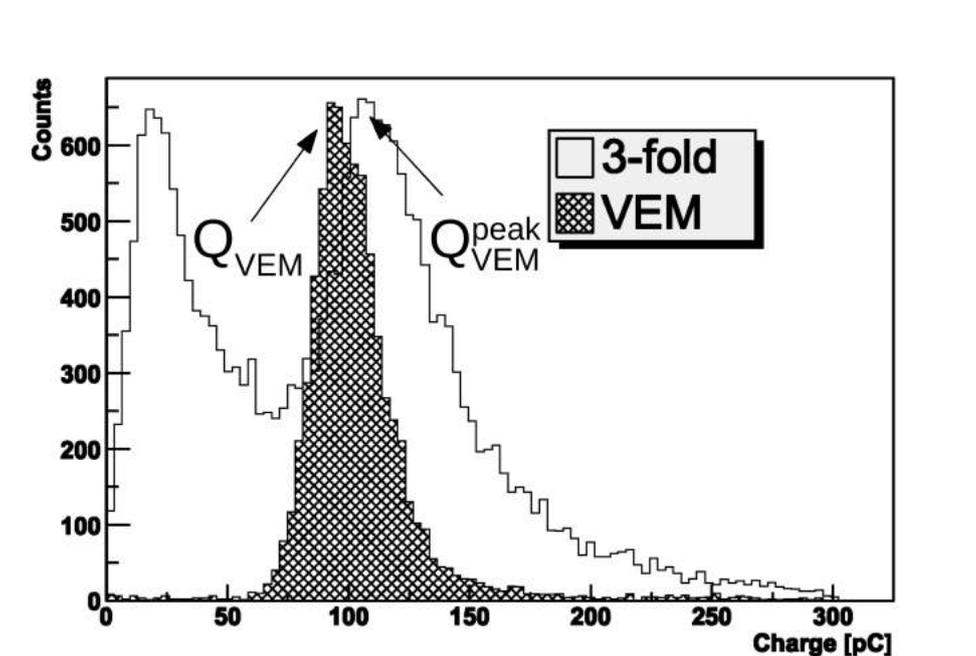


Figura 3.41: Mesma imagem da figura 2.14, porém discriminando os nomes dados a cada pico. Adaptado de [20].

O Q_{VEM}^{peak} tem um deslocamento em relação ao real Q_{VEM} , e se essa relação for fixa, se torna possível calibrar os dados dos detectores apenas se obtendo o Q_{VEM}^{peak} de tempo em tempo.

Porém, no hodoscópio de Gianni Navarra, pela impossibilidade de se ter uma RPC no centro do tanque, a análise tem que ser baseada em Q para várias seleções diferentes, para que se possa extrapolar Q_{VEM} .

Ao exemplo do trabalho de [45], é possível se medir Q para seleções de trajetórias que se deslocam sucessivamente em direção ao centro do tanque, e então extrapolar o comportamento para o centro do tanque.

Esse processo é semelhante ao que será feito para a análise do MIP do SSD, com visto

que múons se comporta como MIPs, e a trajetória vertical tem o menor comprimento possível.

A diferença é que, dada a geometria do SSD no tanque, não será possível conseguir trajetórias verticais, e o estudo dependerá também da extrapolação da resposta ao zênite dos múons.

3.5 Simulações

Como mencionado anteriormente, a análise e validação dos arranjos depende da comparação com valores de referência e simulações.

3.5.1 Hodoscópio do CBPF

Para a obtenção dos fatores de correção de fluxo R_i , foi desenvolvida uma simulação numérica em Python, onde em cada evento se sorteava o ângulo zenital seguindo uma distribuição probabilística $1/\cos^2(\theta)$, e o ângulo azimutal seguindo uma distribuição uniforme.

Essas trajetórias foram então utilizadas para calcular R_i em cada *pad* da RPC superior, verificando a fração das trajetórias que, tendo aqueles ângulos e interseccionando o centro daquela *pad*, interseccionariam também alguma *pad* da RPC inferior. Os resultados estão representados no mapa de calor da figura 3.42

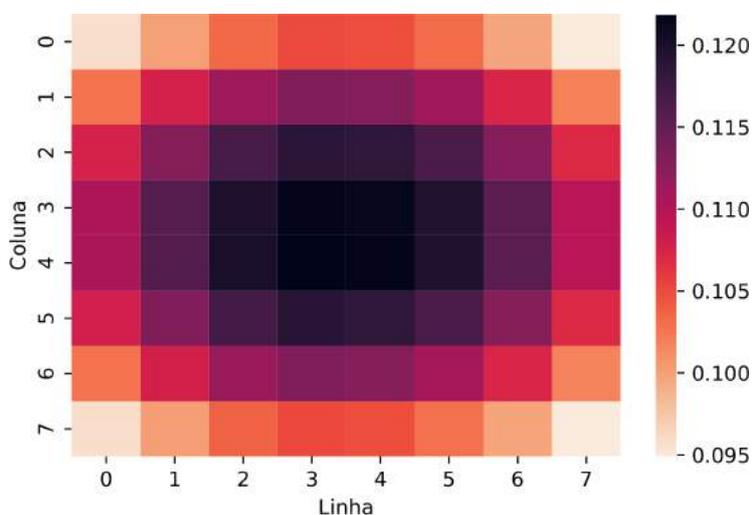


Figura 3.42: Mapas de calor dos fatores de fluxo R_i para cada *pad* da RPC superior.

Considerando a energia média dos múons atmosféricos a nível do mar, e a pequena probabilidade de outras partículas, a nível do mar, sejam capazes de atravessar a laje de concreto acima do laboratório, a consideração de que todas partículas gerando sinal

no hodoscópio são múons e de que todos irão atravessar todo arranjo não gera grandes incertezas, comparadas com as incertezas instrumentais e estatísticas envolvidas.

3.5.2 Hodoscópio do Gianni Navarra

O hodoscópio do Gianni Navarra conta com uma simulação mais robusta e completa, que inclui desde simulações de chuviros atmosféricos até a simulação dos detectores, incluindo a física nestes detectores e os materiais dos quais são construídos [28].

Primeiramente, se utiliza um *software* para simular o fluxo de todas partículas geradas em chuviros atmosféricos que sejam relevantes para o arranjo em questão, considerando a altitude e o campo magnético no local onde se encontra o arranjo.

Então, outro *software* é utilizado para, utilizando as partículas com energias e trajetórias simuladas inicialmente, reproduzir a resposta esperada do arranjo.

Para o primeiro passo, o *framework* CORSIKA [58] foi utilizado para simular um grande número chuviros atmosféricos com energias de 10^{10} a 10^{15} eV. O corte superior se deve à baixíssima frequência destes eventos, que não vão ser estatisticamente relevantes para o arranjo, e o corte inferior se deve ao limite geomagnético.

A distribuição multiplicidades para todas partículas e somente para múons foi computada para partículas atingindo uma área de 10 m^2 3.43.

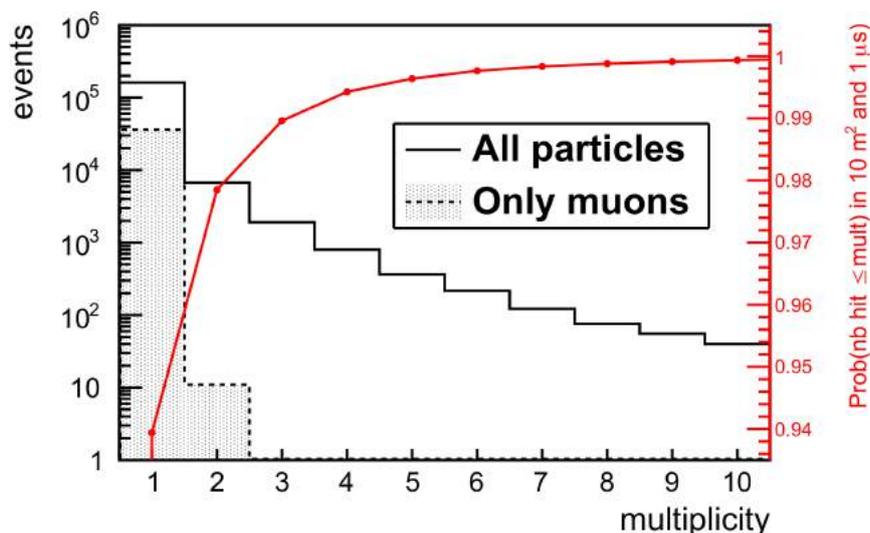


Figura 3.43: Histogramas de multiplicidade para múons (histograma tracejado) e para todas partículas em uma área de 10 m^2 sob o fluxo simulado. A curva em vermelho representa a probabilidade de que o número de *hits* numa RPC (de 1.824 m^2) seja igual ou maior que o número no eixo x (repare que essa escala não começa em zero). Retirado de [28]

No segundo passo, foi utilizado o *framework* Offline¹ [59] do Observatório Pierre Auger, onde a resposta do WCD às partículas incidentes é modelada usando o *software*

¹Em $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, o código para Offline é $\overline{\text{Offline}}$

GEANT4 [60], um *toolkit* criado pelo CERN para simular a passagem de partículas na matéria. As RPCs foram adicionadas à simulação no GEANT4 para ser possível simular todo o arranjo.

A geometria, materiais, as curvas de resposta dos detectores e até a taxa de amostragem dos sinais, limiares e lógica de *trigger* são levados em consideração para a geração de uma simulação realística da resposta que se espera no arranjo.

No momento, a simulação utilizada neste trabalho é a mesma utilizada em [28], visto que a geometria do arranjo ainda é essencialmente a mesma (com desvios de menos de 5 cm).

Uma nova simulação será realizada após uma atualização do modelo utilizado no Offline, utilizando a geometria exata da atual configuração.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Medidas com o hodoscópio do CBPF

O hodoscópio do CBPF foi utilizado durante todo o desenvolvimento do *Firmware* para as *Front-Ends* e também para o desenvolvimento dos *softwares* de aquisição, de configuração das *Front-Ends* e de medição da taxa de fundo das *pads*.

O seu principal teste foi realizado durante a 6ª EAFEXp do CBPF, em Janeiro de 2023, no qual uma grande aquisição de 1 milhão de eventos foi realizada apenas com o hodoscópio, e mais outra de 200 mil eventos em coordenação com o WCD.

4.1.1 Medida de fluxo

A aquisição de 1 milhão de eventos com o hodoscópio puro tomou cerca de 6h:12m, e com esta foram medidos os números de eventos por *pad*, e foi estimado o fluxo total de *múons*.

O número de eventos registrados por *pad* está registrado nos gráficos da figura 4.1 e nos mapas de calor da figura 4.2.

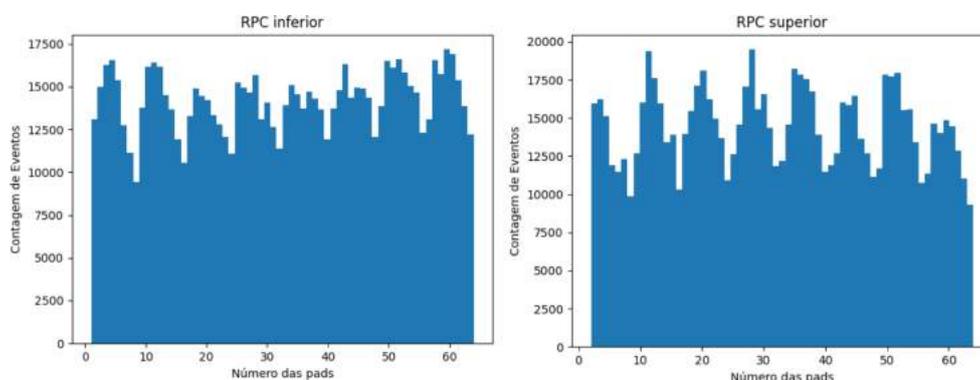


Figura 4.1: Número de eventos por *pad* durante a aquisição. Os picos e vales periódicos vem dos fatores geométricos que influenciam no fluxo gerador de coincidência para cada *pad*.

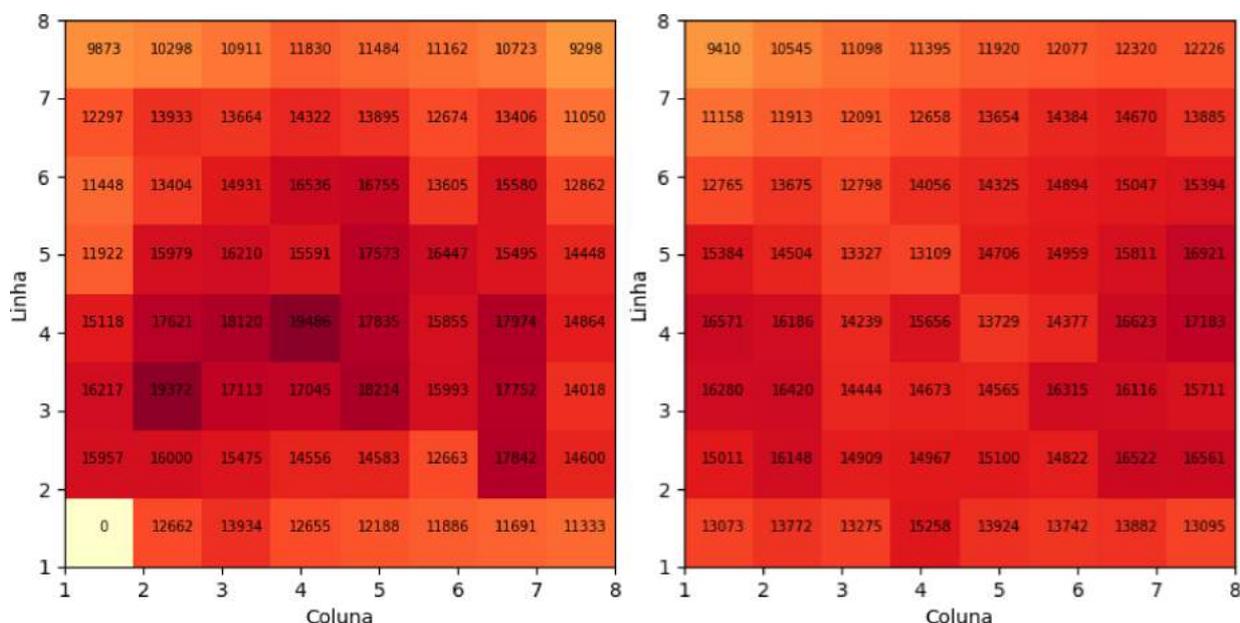


Figura 4.2: Mapas de calor da RPC inferior (esquerda) e superior (direita) durante a aquisição.

Uma vez com essas medidas, os fatores de correção simulados foram aplicados para a estimativa do fluxo médio durante toda a aquisição na RPC superior, chegando a um valor de $f = 203 \pm 15$ múons $m^{-2}s^{-1}$.

Esse valor é superior ao fluxo esperado para o nível do mar, e ainda não há explicação definitiva para esse valor, mas uma das possibilidades é que *triggers* espúrios estejam sendo gerados por ruído e *streamers* de longa duração, que mantém a saída de *trigger* de uma *Front-End* a 1 por um longo período, no qual gera falsas coincidências com a outra RPC.

4.1.2 Localização do WCD

O WCD de 300 L foi localizado de duas formas diferentes, se utilizando os 200 mil eventos capturados em coordenação com o osciloscópio do WCD.

A primeira, foi através da contagem de múons verticais em coincidência com sinais na PMT do WCD, o que gera uma "sombra" nas duas RPCs, como visto nos mapas de calor da figura 4.3.

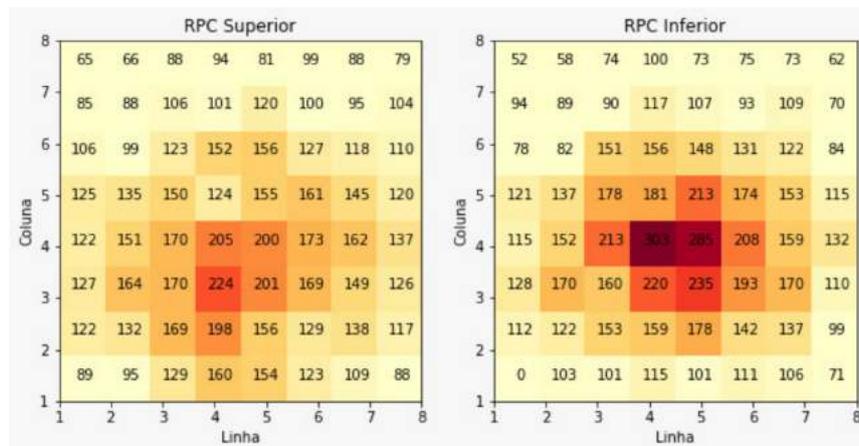


Figura 4.3: Mapa de calor das *pads* com mais eventos verticais em coincidência o WCD.

A segunda forma foi através do *software* de imageamento 3D mencionado anteriormente 3.4.5, que foi utilizado para gerar um arquivo no formato .vox, que pode ser visualizado no *software* MagicaVoxel.

A figura 4.4 apresenta um corte de um *screenshot* do MagicaVoxel com um arquivo gerado com os dados do hodoscópio, onde é bem visível o WCD. Medidas foram adicionadas para facilitar a compreensão.

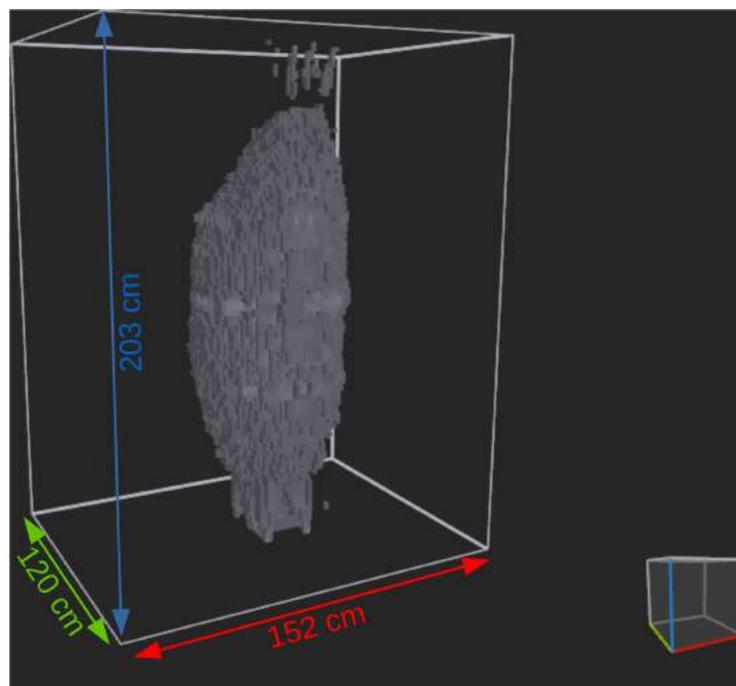


Figura 4.4: Visualização 3D do WCD baseado nos *voxels* interseccionados por trajetórias com sinal nos eventos. A *pad* 1 está no canto inferior direito frontal.

4.2 Medidas com o Hodoscópio do Gianni Navarra

As medidas realizadas com o hodoscópio em Gianni Navarra ainda estão em fase preliminar, havendo a necessidade da repetição de simulações para a geometria exata do sistema (que é ligeiramente diferente da anterior) e da correção do sistema de ajuste de alta tensão das RPCs, que não estava operacional na primeira fase de operação.

Foram realizadas 3 aquisições de 1 milhão de eventos (brutos) cada, uma em 26/03, outra em 03/04 e a última em 10/04 de 2023, cada uma tomando entre 14 e 18 h.

Dessas, foram analisadas as aquisições de 26/03 e 03/04.

A análise foi realizada em conjunto com pesquisadores do LIP, os mesmos que trabalharam com o hodoscópio anterior [45].

Na aquisição de 26/03, dos 1 milhão de eventos iniciais, 828258 sobreviveram à validação, onde se requiria que só uma *pad* por RPC tivesse sinal.

Destes, cerca de 70% foram eventos no qual houve um e somente um pico detectado em cada PMT do WCD. A maioria dos eventos restantes, cerca de 29%, foram *triggers* espúrios, onde não havia sinal nenhum registrado na UUB, mesmo sendo que a trajetória do múon deveria ter cruzado seu volume. Alguns exemplos de *traces* observados nos dados obtidos se encontram nas figuras 4.5 4.6 e 4.7

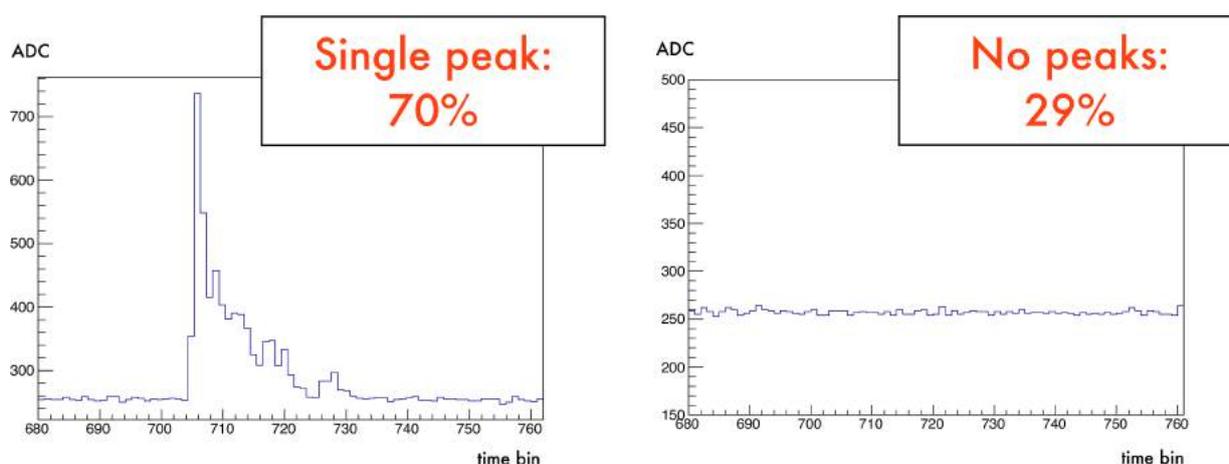


Figura 4.5: Exemplo de *trace* com um único pico (esquerda) e exemplo de um *trace* com nenhum pico, capturado por um *trigger* espúrio (direita).

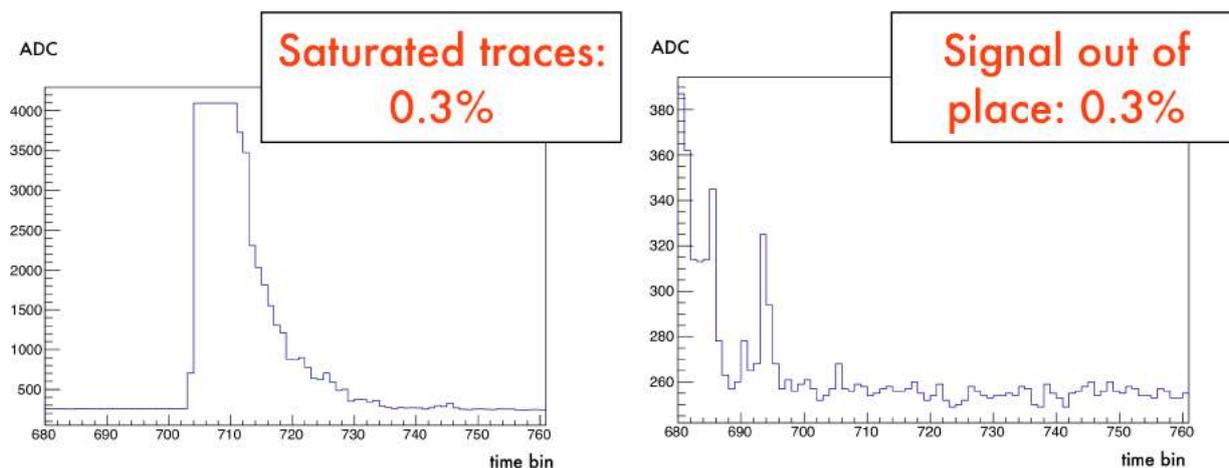


Figura 4.6: Exemplo de *trace* com sinal saturado (esquerda) e exemplo de um *trace* com sinal fora do janela recortada (direita).

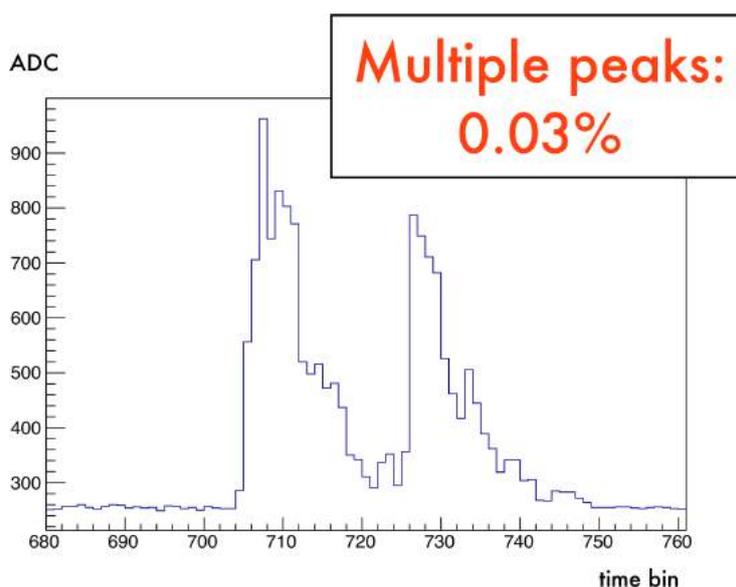


Figura 4.7: Exemplo de *trace* com mais de um pico.

O volume de *triggers* espúrios é um dos primeiros dados a chamar atenção, pois a coincidência temporal entre ruído em diferentes *pads* é improvável, exceto que alguma *pad* esteja extremamente ruidosa.

Analisando a frequência de *triggers* com o horário do dia na figura 4.8, é possível notar que é um horário no período da tarde, onde a temperatura é mais alta, no qual há um crescimento enorme no volume de *triggers* espúrios e uma queda de *triggers* associados com eventos com um único múon, conforme verificado através dos sinais das PMTs para os eventos neste horário.

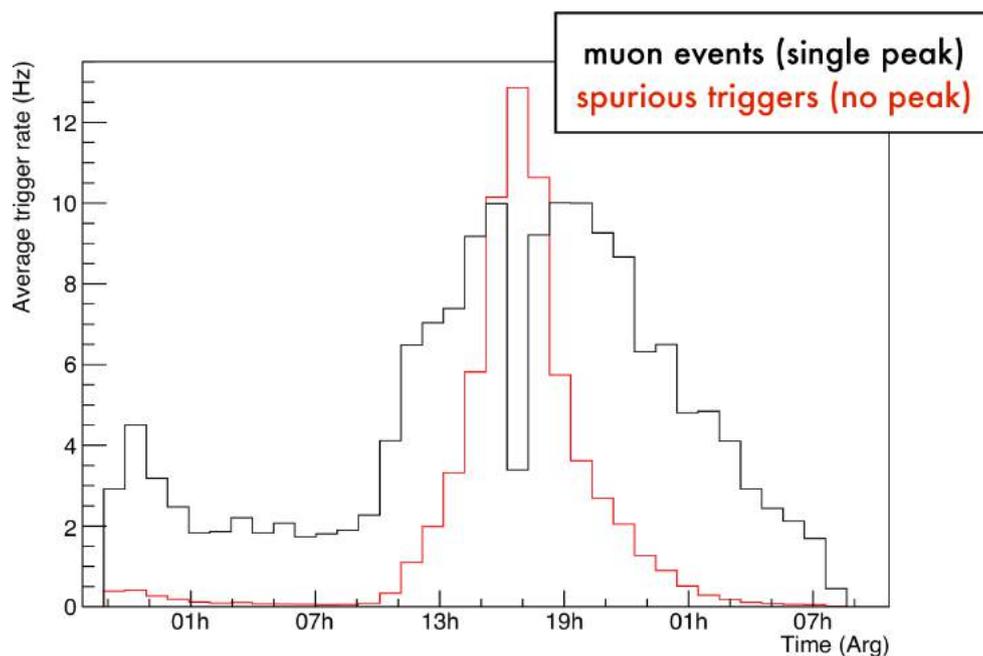


Figura 4.8: Volume de *triggers* espúrios e de *triggers* com um único múon registrado pelas PMTs.

A Mais adiante, a distribuição de número de eventos por *pad* para cada RPC apresenta relevantes discrepâncias entre a simulação e os dados, especialmente para a RPC superior:

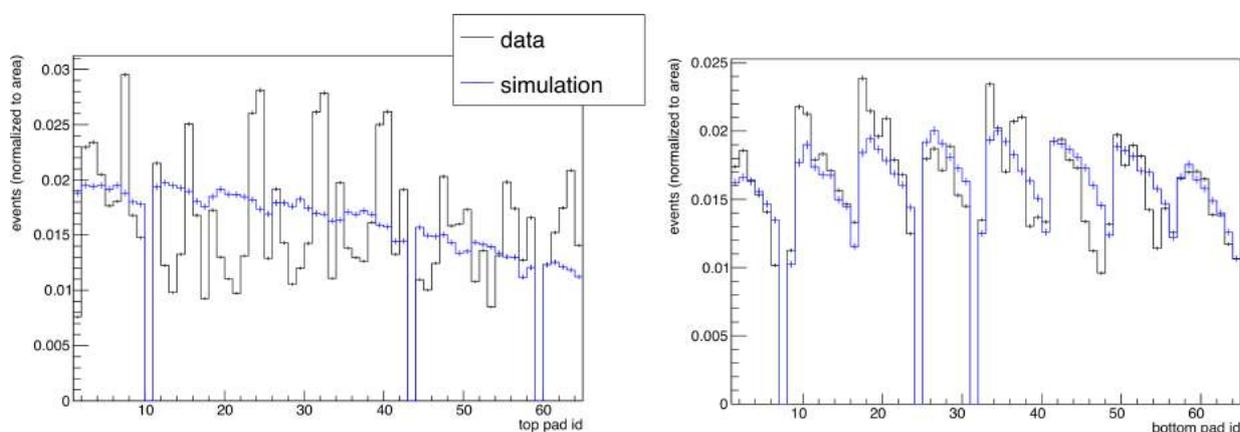


Figura 4.9: Distribuição (normalizada pela área abaixo da curva) do número de eventos detectados por *pad* na simulação, contra os valores encontrados nos dados. A discrepância é maior para o caso da RPC superior (esquerda).

A distribuição zenital e a distribuição de comprimentos de trajetória mostram uma boa concordância entre simulação e dados, como pode-se ver na figura 4.10, mas as discrepâncias ainda são muito grandes para serem explicadas apenas por flutuações estatísticas.

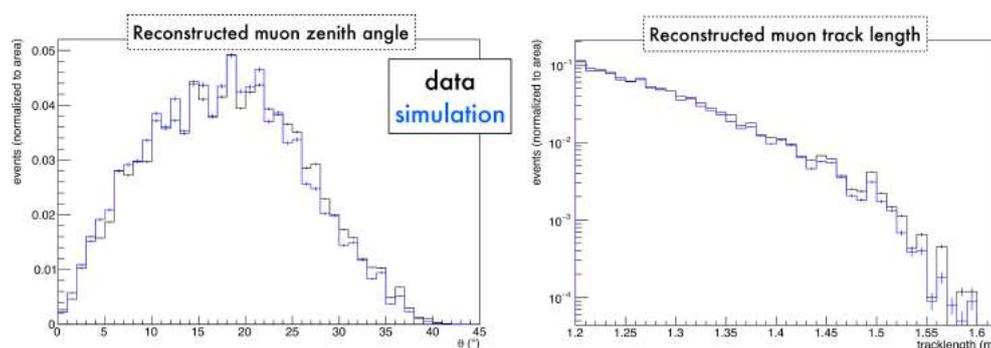


Figura 4.10: Simulação e reconstrução da distribuição zenital (esquerda) e dos comprimentos de trajetória (direita).

Também há alguma discrepância entre a simulação e os dados obtidos para a distribuição de carga nas PMTs para eventos de um único múon:

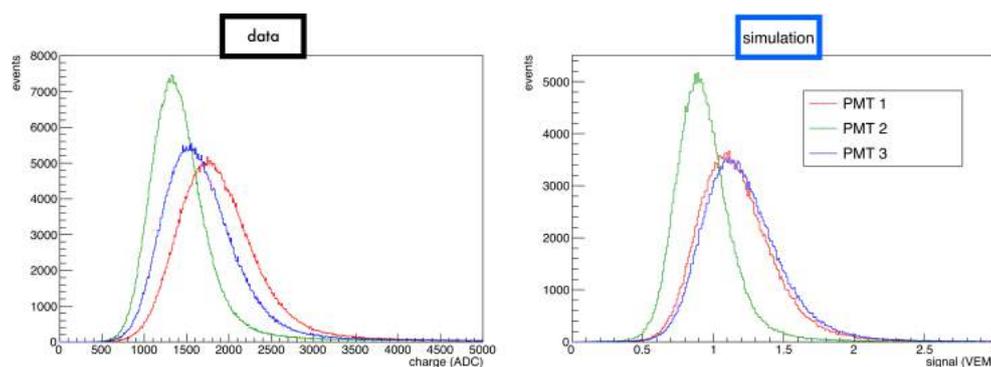


Figura 4.11: Na esquerda, a distribuição de carga de cada PMT para os eventos de um múon nos dados, e na direita a simulação.

Havia de certa forma uma discrepância causada por diferenças de geometria entre a simulação e o arranjo para a aquisição de 26/03.

O arranjo foi colocado na sua posição final no dia 01/04, e nessa posição final ele passou a ficar muito mais próximo (desvios de 5 cm no máximo) da geometria antiga, usada na simulação.

Também houve uma produção de *triggers* espúrios menor (12%) e um aproveitamento melhor de eventos de um múon (86% do total dessa aquisição).

Porém, a repetição das comparações ainda demonstra a mesma discrepância quanto a RPC superior e um grande aumento na produção de *triggers* espúrios durante a tarde.

Um outro bom indicador observado nessa aquisição é uma aproximação entre os dados e a simulação quanto à distribuição de carga das PMTs para eventos de um múon:

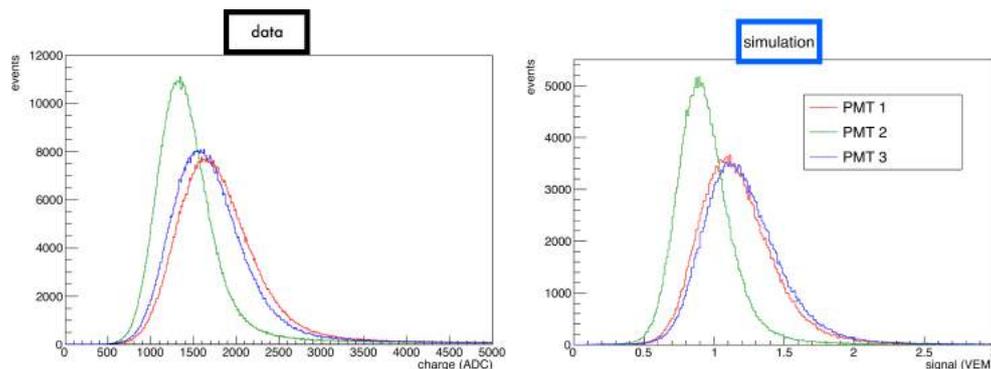


Figura 4.12: Na esquerda, a distribuição de carga de cada PMT para os eventos de um múon nos dados de 03/04, e na direita a simulação.

Os dados nos sugerem que são necessárias mais investigações quanto à produção de *triggers* espúrios, que podem inclusive ser responsáveis pelas distorções observadas.

Uma das prováveis causas de *triggers* espúrios é o excesso de ruído na RPC superior, que além de ficar em uma caixa metálica que é exposta a luz direta do Sol, está sendo alimentada por uma tensão constante de 5.2 kV, pois o sistema de ajuste automático não está operacional no momento.

É necessário então garantir o ajuste da alta tensão, investigar a geração de *triggers* espúrios e realizar novas simulações, para usar a geometria exata do arranjo.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

O sistema de aquisição desenvolvido durante este trabalho e os hodoscópios implementados se demonstraram funcionais, permitindo a obtenção de dados em grande volume, tendo o tempo de aquisição primariamente limitado pelo próprio fluxo de múons, exceto quando o arranjo está limitado pela velocidade de resposta de outro detector mais lento (como o osciloscópio controlado via rede no CBPF).

Adicionalmente, os arranjos desenvolvidos permitem acesso, controle e programação remotos, só sendo necessárias intervenções para modificações físicas nos arranjos, o que é de extrema importância para um projeto como o Observatório Pierre Auger, uma colaboração internacional onde a maioria dos pesquisadores não tem facilidade de acessar fisicamente.

Apesar dos resultados positivos até agora, mais investigações e desenvolvimentos se fazem necessários para compreender o comportamento do hodoscópio em Gianni Navarra e desenvolver um sistema mais robusto contra produção de *triggers* espúrios.

Um dos mecanismos atualmente em desenvolvimento para o *firmware* da *Front-End* implementará um detector de *rising edge* a cada um dos 64CD, e o *trigger* será produzido com base no OU lógico da saída desses detectores.

Ou seja, se alguma *pad* em algum momento se mantiver a **1** por um tempo prolongado, isso não irá gerar coincidências falsas, pois a saída de *trigger* da *Front-End* só vai gerar um pulso uma vez, e não se manter a **1** também.

Adicionalmente, o mecanismo de medição de taxa de fundo (o módulo de *rate*) está sendo modificado para que funcione continuamente, e automaticamente bloqueie *pads* ruidosas de interferir na produção de *triggers*, mas sem alterar os dados que são registrados na FIFO nos eventos.

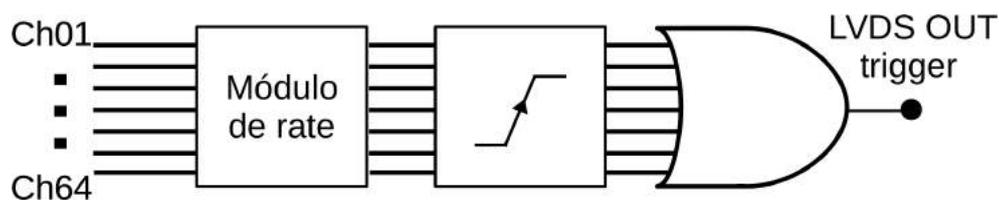


Figura 5.1: Sistema proposto. Os 64CD passam pelo módulo de *rate*, que irá bloquear quaisquer canais ruidosos demais, e saindo deste módulo irão passar por um detector de *rising edge* e daí então passar pelo OR lógico.

Essas modificações fazem parte também de uma proposta pra permitir o desenvolvimento de um sistema de aquisição contínua, que funcionará no CBPF e permitirá a medição constante do fluxo de múons sem impedir o uso do hodoscópio para outras funções, como caracterizar novos detectores em seu volume.

Com estes sistemas, será possível tanto a construção de hodoscópios de alta estabilidade e confiabilidade a para caracterização de detectores, quanto também será possível se utilizar o sistema para se obter séries históricas do fluxo de múons, e com isso ajudar na sua caracterização temporal na cidade do Rio de Janeiro.

Referências Bibliográficas

- [1] ZU₀⁹. *Goldleaf electroscope (1787) by Bennet, wood engraving, published 1880*, 2016.
- [2] Charging by Contact — Electric Charge and Electric Field, 2018.
- [3] Alessandro De Angelis. Atmospheric ionization and cosmic rays: Studies and measurements before 1912. *Astroparticle Physics*, 53(C):19–26, 2014.
- [4] Giuseppe Di Sciascio. Measurement of Energy Spectrum and Elemental Composition of PeV Cosmic Rays: Open Problems and Prospects. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(2), 2022.
- [5] KASCADE collaboration. The KASCADE Cosmic-ray Data Centre KCDC: granting open access to astroparticle physics research data. *European Physical Journal C*, 78(9):1–16, 2018.
- [6] C.M.G. Lattes, H. Muirhead, G.P.S. Occhialini, and C.F. Powell. Processes involving charged mesons. *Nature*, 159:694–697, 1947.
- [7] J. Abraham et al. The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 620:227–251, 2010.
- [8] Steven Saffi. Pierre Auger Observatory time lapse, 2013.
- [9] The Pierre Auger Collaboration. Features of the energy spectrum of cosmic rays above 2.5×10^{18} eV using the pierre auger observatory. *Physical Review Letters*, 125(12):1–9, 2020.
- [10] The Pierre Auger Collaboration. The Pierre Auger Observatory and its Upgrade. *Science Reviews - from the end of the world*, 1(4):8–33, 2020.
- [11] Spurio. *Particles and astrophysics*. 2016.
- [12] Prof. Dr. Peter K.F. Grieder (auth.). *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects A Tutorial, Reference Manual and Data Book*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition, 2010.
- [13] S. Cecchini and M. Spurio. Atmospheric muons: Experimental aspects. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 1(2):185–196, 2012.

- [14] Particle Data Group. Review of Particle Physics Particle Data Group. *Physical Review D*, 86(1), 2012.
- [15] Walter Knulst. Cherenkov radiation in the soft x-ray region : towards a compact narrowband source. 2004.
- [16] Erik Branger. Studies of Cherenkov light production in irradiated nuclear fuel assemblies. 2016.
- [17] Argonne National Laboratory. Advanced Test Reactor core, Idaho National Laboratory, 2009.
- [18] Mortimer Abramowitz and Michael W. Davidson. Photomultiplier Tubes, 2001.
- [19] A. Etchegoyen, P. Bauleo, X. Bertou, C.B. Bonifazi, A. Filevich, M.C. Medina, D.G. Melo, A.C. Rovero, A.D. Supanitsky, and A. Tamashiro. Muon-track studies in a water cherenkov detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 545(3):602–612, 2005.
- [20] Pierre Auger Observatory. Calibration and Monitoring of the. (June):813–816, 2009.
- [21] The Pierre Auger Collaboration. The Pierre Auger Observatory Upgrade - Preliminary Design Report. 2016.
- [22] T. Suomijärvi. The AugerPrime upgrade of the Pierre Auger Observatory. *Journal of Physics: Conference Series*, 2429(1), 2023.
- [23] P. Fonte. Survey of physical modelling in Resistive Plate Chambers. *Journal of Instrumentation*, 8(11), 2013.
- [24] Townsend Avalanche, 2019.
- [25] Pásztor Gabriella. Experimental methods in particle physics, 2019.
- [26] Ricardo Jorge Barreira Luz. *Development of the instrumentation and readout schemes of MARTA , an upgrade of the Pierre Auger Observatory*. PhD thesis, UNIVERSIDADE DE LISBOA, 2020.
- [27] A. O. Aremu, J. P.J. Brennan-Craddock, A. Panesar, I. A. Ashcroft, R. J.M. Hague, R. D. Wildman, and C. Tuck. A voxel-based method of constructing and skinning conformal and functionally graded lattice structures suitable for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 13:1–13, 2017.
- [28] The Pierre Auger Collaboration. Studies on the response of a water-Cherenkov detector of the Pierre Auger Observatory to atmospheric muons using an RPC hodoscope. *Journal of Instrumentation*, 15(9), 2020.

- [29] Charles Augustin de Coulomb. Troisième mémoire sur l'Electricité et le Magnétisme. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, page 612, 1785.
- [30] Michael Faraday. Experimental researches in electricity. II(0), 1844.
- [31] William Crookes. On electrical insulation in high vacua. *Proceedings of the Royal Society of London*, 28(190-195):347–352, 1879.
- [32] A H Bécquerel. Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 122:501, 1896.
- [33] R.W. Reid. *Marie Curie*. Saturday Review Press, 1974.
- [34] Theodor Wulf. On the radiation of high penetrating power that exists in the atmosphere. *Physikalische Zeitschrift*, 1:152–157, 1909.
- [35] Domenico Pacini. Penetrating radiation at the surface of and in water, 2017.
- [36] Victor F. Hess. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Phys. Z.*, 13:1084–1091, 1912.
- [37] G. Lemaître and M. S. Vallarta. On Compton's Latitude Effect of Cosmic Radiation. *Phys. Rev.*, 43(2):87–91, 1933.
- [38] Virendra Singh. Bhabha's contributions to elementary particle physics and cosmic rays research. *Resonance*, 14(5):430–454, 2009.
- [39] Pierre Auger and Roland Maze. Les grandes gerbes cosmiques de l'atmosphère. *Compt. Rend. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 207(3):228–230, 1938.
- [40] Pierre Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, and A. Freon Robley. Extensive cosmic ray showers. *Rev. Mod. Phys.*, 11:288–291, 1939.
- [41] The Pierre Auger Collaboration. Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 523(1-2):50–95, 2004.
- [42] Kenneth Greisen. End to the cosmic-ray spectrum? *Phys. Rev. Lett.*, 16:748–750, Apr 1966.
- [43] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min. Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 4:78, August 1966.
- [44] Luís Mendes. *HODOSCÓPIO DE MÚONS PARA A MEDIDA DE RAIOS CÓSMICOS*. PhD thesis, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2020.

- [45] P Assis, A Blanco, M Cerda, R Conceic, M Ferreira, P Ferreira, P Fonte, L Lopes, L Mendes, M Pimenta, R Sarmiento, R Sato, R Shellard, and H Wolters. Results on the Gianni Navarra tank VEM calibration using a RPC muon hodoscope. pages 1–18, 2017.
- [46] Michael F. L'Annunziata. *Handbook of Radioactivity Analysis*. Academic Press, 2 edition, 2003.
- [47] John David Jackson. *Classical electrodynamics*. Wiley, 3rd ed edition, 1999.
- [48] DAVID J. SEGELSTEIN. *The complex refractive index of water*. PhD thesis, University of Missouri-Kansas City, 1981.
- [49] Yoichiro Suzuki. The super-kamiokande experiment. *The European Physical Journal C*, 79, 04 2019.
- [50] Yi Wang and Yancheng Yu. Multigap resistive plate chambers for time of flight applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1):1–23, 2021.
- [51] Stefano Agosteo and Marco Silari. European Organisation for Nuclear Research European Laboratory for Particle Physics. 2001.
- [52] U. Amaldi, G. Borghi, M. Bucciantonio, R. Kieffer, J. Samarati, F. Sauli, and D. Watts. Development of TOF-PET detectors based on the Multi-Gap Resistive Plate Chambers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 778:85–91, 2015.
- [53] Weeroc. MAROC 3A. 2013.
- [54] TerasIC. DE-10 Standard, 2017.
- [55] Intel Corporation. Intel® Quartus® Prime Standard Edition Design Software Version 18.1 for Linux, 2021.
- [56] OMEGA. MAROC3 Datasheet.
- [57] Dominic Welsh Geoffrey Grimmett. *Probability: an introduction*. Oxford Science Publications. Oxford University Press, USA, 1986.
- [58] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. Corsika: A monte carlo code to simulate extensive air showers. Technical report, 1998. 51.02.03; LK 01; Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6019 (Februar 98).
- [59] S. Argirò, S.L.C. Barroso, J. Gonzalez, L. Nellen, T. Paul, T.A. Porter, L. Prado Jr., M. Roth, R. Ulrich, and D. Veberič. The offline software framework of the pierre auger observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580(3):1485–1496, oct 2007.

- [60] GEANT4 collaboration. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3):250–303, 2003.

Capítulo 6

Glossário

- **64CD** 64 saídas digitais do MAROC3 que correspondem ao sinal discriminado das 64 *pads*
- **CeU** Central Unit
- **DeC** Detector em Caracterização
- **FD** Fluorescence Detector
- **Trace** Forma de onda digitalizada de um sinal.
- **FE** Front-End
- **LDF** Lateral Distribution Function
- **Baseline** Linha de base, valor mantido
- **MIP** Minimum Ionizing Particle
- **PMT** PhotoMultiplier Tube
- **Interface** Placa de extensão montada na CeU para adicionar portas LVDS
- **Mezzanine** Placa de extensão montada na Front-End para adicionar entradas para os cabos coaxiais
- **SD** Surface Detector
- **SSD** Surface Scintillator Detectors
- **UTP** Unshielded Twisted Pair
- **VEM** Vertical Equivalent Muon
- **WCD** Water Cherenkov Detector