

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Programa de Mestrado Profissional em Física

Ênfase em Instrumentação Científica

Hodoscópio de Múons para a medida de Raios Cósmicos

Dissertação
Mestrado Profissional de Instrumentação Científica

Luis Miguel Domingues Mendes

Rio de Janeiro

2020

LUIS MIGUEL DOMINGUES MENDES

HODOSCÓPIO DE MÚONS PARA A MEDIDA DE RAIOS CÓSMICOS

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 Profissional em Física com ênfase em Instrumentação Científica.

Orientador: Prof. D. Sc. Ronald Cintra Shellard

Coorientador: Prof. D. Pedro Jorge dos Santos de Assis

LUIS MIGUEL DOMINGUES MENDES

HODOSCÓPIO DE MÚONS PARA A MEDIDA DE RAIOS CÓSMICOS

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 Profissional em Física com ênfase em Instrumentação Científica.

Banca examinadora composta por:

Ronald Cintra Shellard – Orientador CBPF

Germano Pinto Guedes – UEFS

Herman Pessoa Lima Júnior – CBPF

Agradecimentos

Quero começar por agradecer todo o apoio e compreensão dos meus orientadores e coordenadores: Ronald Shellard, Pedro Assis e Mário Pimenta e de toda a equipe do projeto MARTA, LIP e CBPF. Tanto pela colaboração e espírito de equipe para a construção de novos detetores, como pela forte contribuição para implementação do arranjo experimental de MARTA.

Um agradecimento especial aos meus pais e especialmente à minha companheira Renata Oliveira, por todo o apoio e compreensão, por todos aqueles dias que estive ausente, trabalhando no Observatório Pierre Auger, para ser possível a implementação de todos os arranjos experimentais deste projeto e dissertação.

.

A vida não é um corredor reto e tranquilo que nós percorremos livres e sem empecilhos, mas um labirinto de passagens pelas quais devemos procurar nosso caminho. Porém, se tivermos fé, uma porta se abrirá...

(Cronin)

Aqui, no entanto, nós não olhamos para trás por muito tempo, nós continuamos seguindo em frente, abrindo novas portas e fazendo coisas novas, porque somos curiosos... E a curiosidade continua nos conduzindo por novos caminhos

(Walt Disney)

LUIS MIGUEL DOMINGUES MENDES

HODOSCÓPIO DE MÚONS PARA A MEDIDA DE RAIOS CÓSMICOS

MESTRADO PROFISSIONAL EM FÍSICA

ÊNFASE EM INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

RIO DE JANEIRO, 2020

Resumo

MENDES, L. M. D. Hodoscópio de múons para a medida de raios cósmicos. 2020.
Dissertação (Mestrado Profissional em Física com ênfase em Instrumentação Científica) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2020.

O presente trabalho inicia com uma apresentação sucinta da origem dos raios cósmicos, nomeadamente múons e dos detetores (RPC). Apresentando protótipos de hodoscópios desenvolvidos para medida de trajetórias e fluxo de múons. Estes últimos foram de importância relevante para o projecto MARTA e colaboração internacional Observatório Pierre Auger. Com os quais para além de proporcionar estudos de princípios fundamentais de fluxo de múons e distribuições angulares, foi possível medir e comprovar que o VEM (energia média depositada por múons penetrantes na vertical) dos detetores de superfície (SD) do Observatório Pierre Auger, não sofreram envelhecimento ao longo dos últimos anos desde a sua instalação. Terminando com a prova de conceito de um hodoscópio para testar os novos detetores de upgrade do projecto Auger Prime.

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

LUIS MIGUEL DOMINGUES MENDES

MUONS HODOSCOPE TO MEASURE COSMIC RAYS

MASTER IN PHYSICS

EMPHASIS ON SCIENTIFIC INSTRUMENTATION

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

RIO DE JANEIRO, 2020

Abstract

MENDES, L. M. D. Muon Hodoscope to measure cosmic rays. 2020. Dissertation (Professional Master in Physics with Emphasis on Scientific Instrumentation) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2020.

The present work begins with a succinct presentation of the origin of cosmic rays, namely muons and detectors (RPC). Presenting prototypes of hodoscopes developed to measure trajectories and muon flow. The latter were of relevant importance for the MARTA project and international collaboration with Pierre Auger Observatory. With which in addition to providing studies of fundamental principles of muon flow and angular distributions, it was possible to measure and prove that the VEM (average energy deposited by vertically penetrating muons) of the Pierre Auger Observatory surface detectors (SD) does not have suffered aging over the past few years since its installation. Ending with a hodoscope proof of concept to test the new upgrade detectors for the Auger Prime project.

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

List of Figures

2.1 Hess no cesto do balão entre 1911 e 1912; Fonte: VF Hess Society, Schloss Pöllau/Áustria (STAFF, phys.org) 5
2.2 Espectro dos Raios Cósmicos; 6
2.3 Ilustração mostrando como acontece a formação do chamado "chuveiro" na atmosfera; Fonte: Simon Swordy (U. Chicago), (APOD, NASA) 7
2.4 Representação de um chuveiro atmosférico, ilustrando suas componentes (physicsopenlab.org) 8
2.5 Diagrama do sítio do Observatório Pierre Auger, onde cada ponto representa um dos 1 600 detetores do tipo SD, dispostos no arranjo experimental. São mostrados, também, os quatro sítios dos telescópios FD e disposição dos experimentos HEAT, AERA, XLF e CLF [1]. 10
2.6 Ilustração geometria de um telescópio de florescencia (FD). A luz passa pela abertura, coberta por um filtro UV e um anel corretor, e é refletida por um espelho segmentado para a câmera de pixel com 440 fotomultiplicadores [2]. 10
2.7 Esquerda: O esquema para um detector SD Auger e seus componentes; Direita: Foto de um detector Auger SD e uma linha de detectores separados por 1.5 km [3] 11
2.8 O espectro em energia obtido pela combinação dos chuveiros verticais medidos pelo SD, mais chuveiros inclinados, hibridos e realizados pela parte mais densa da rede. A incerteza sistemática na escala de energia é de 14 % [4]. 12
2.9 Ilustração de um arranjo experimental de MARTA em uma estação SD de AUGER. Composta por 4 RPCs embaixo de um tanque de radiação Cherenkov [5] 13
2.10 Efeito de avalanche (principio de funcionamento das RPCs de MARTA) . . 14
2.11 Plano de PADs das RPCs de MARTA [5] 15
2.12 Camadas internas das RPCs de MARTA: volume gasoso da RPC (1), plano de PADs de leitura (2), camada de espuma com sensores I2C (3), base da caixa de alumínio, tampa e junção (4a, 4b, 5) conecções para gás e alta tensão (6) [5] 15

2.13 RPC de MARTA, em uma caixa de alumínio fechada, que atua como uma gaiola de Faraday [5] . . . 15
2.14 Vista esquemática da reconstrução da trajetória de um múon, num hodoscópio com duas matrizes de 16 × 16 [6] . . . 17

3.1 Diagrama de bloco do PREC. . . . 20
3.2 Roteamento eletrônico da *Motherboard* do PREC e identificação das FPGAs e interface de comunicação 21
3.3 Protótipo do PREC com 8 *Front End*s em uma crate 6U, conectadas à *Motherboard*. . . . 21
3.4 Diagrama de blocos da *Front End* do PREC. . . . 22
3.5 Roteamento eletrônico da *Front End* do PREC. . . . 22
3.6 Amplificador e discriminador de cada canal do *Front End* do PREC. . . . 23
3.7 *Front End* do PREC. . . . 23
3.8 *Mother Board* do PREC. . . . 24
3.9 Diagrama de blocos da arquitetura do ASIC do MAROC3 [7]. . . . 25
3.10 A placa *Front End* do MAROC. . . . 26
3.11 Diagrama de blocos da instrumentação do protótipo denominado MAROC. 27
3.12 Tanque Gianni Navarra no Observatorio Pierre Auger. . . . 28
3.13 Arranjo experimental do hodoscópio do tanque Gianni Navarra. . . . 29
3.14 Diagrama de blocos do Hodoscópio Gianni Navarra. . . . 30
3.15 Diagrama de blocos do modúlo de coincidencias e *trigger* do Hodoscópio do CBPF; em baixo: estrutura do pacote de dados enviado com *trigger* rápido e identificador (ID) de 24 bits [8]. . . . 31
3.16 Diagrama de blocos de *trigger*. . . . 31
3.17 Arranjo experimental do hodoscópio do CBPF. . . . 32
3.18 Primeiro protótipo de testes do Hodoscópio AB AUGER. . . . 33
3.19 Acima: posicionamento do cintilador de testes; abaixo: Diagrama do primeiro protótipo de testes do Hodoscópio AB AUGER. . . . 34
3.20 Acima: Princípio de conceito do Hodoscópio AB para testar os cintiladores do upgrade de Auger, abaixo: modulo SSD do upgrade de AUGER. 34

4.1 Posicionamento da RPCs no hodoscópio Gianni Navarra . . . 36
4.2 Esquerda: Vista do posicionamento das RPCs no Hodoscópio. Direita: A geometria da reconstrução das 54 trajetórias de múons possíveis a partir da reconstrução de 9 PADs da RPC superior e 6 PADs da RPC inferior, assumindo o centro das PADs [9]. . . . 37
4.3 Distribuições do picos de carga do VEM em função da distância das fotomultiplicadoras (PMTs) a trajectória do múon [9]. . . . 38
4.4 Distribuição do pico da carga do VEM da média das fotomultiplicadoras (PMTs) [9]. . . . 39
4.5 Distribuição do pico da carga do VEM da soma das fotomultiplicadoras (PMTs) [9]. . . . 39

4.6 Número de eventos por bin para cada RPC em coincidência 40
4.7 Número de eventos por PAD (dados adquiridos Vs simulação). 40
4.8 Distribuição azimutal do hodoscópio CBPF (dados adquiridos Vs simulação). 41
4.9 Distribuição zenital do hodoscópio CBPF (dados adquiridos Vs simulação). 41
4.10 Gráfico de intensidade por PAD na RPC1 em coincidência (dados adquiridos Vs simulação). 41
4.11 Gráfico de intensidade por PAD na RPC2 em coincidência (dados adquiridos Vs simulação). 42
4.12 Primeiro Hodoscópio de testes instalado na AB (*Assembly Building*) de Auger. Na prateleira superior e inferior foram instaladas RPCs sobre uma palete de madeira. Na prateleira do meio foi colocado um pequeno cintilador para testes, condicionado numa caixa de madeira. 43
4.13 Distribuição angular ($\Phi - zenital, \Theta - azimutal$) 44
4.14 (cima): Distribuição azimutal do hodoscópio AB Auger; (em baixo): Distribuição zenital do hodoscópio AB Auger 45
4.15 Diagrama de posições do primeiro protótipo de testes do Hodoscópio AB Auger 46
4.16 Detecção da posição/eficiencia do cintilador de testes no hodoscópioAB Auger 46

Contents

Agradecimentos iii
Resumo v
Abstract vi

Lista de Figuras **vii**

1 Introdução **1**
1.1 O grande problema/Objetivo 1
1.2 Apresentação 1

2 Fundamentação **3**
2.1 Raios cósmicos 4
2.2 Observatório Pierre Auger 9
2.3 Projeto MARTA 12
2.4 Detectores 13
2.5 Hodoscópio 17

3 Materiais e Métodos **19**
3.1 Instrumentação 19
3.2 Arranjos Experimentais 27

4 Resultados **35**
4.1 Hodoscópio Gianni Navarra 35
4.2 Hodoscópio CBPF 40
4.3 Hodoscópio AB Auger 43

5 Conclusões **47**

Chapter 1

Introdução

1.1 O grande problema/Objetivo

Qual é a real composição de um chuveiro de raios cósmicos? Discriminando com maior precisão a componente muônica, poderemos discernir detalhes suficientes entre a componente eletromagnética e componente muônica, de modo a descobrir a composição subatómica das partículas segundárias?

Estes foram os desafios que levaram ao desenvolvimento desde projecto, de modo a contribuir para o melhoramento da discriminação da componente múonica, nos chuveiros de raios cósmicos.

1.2 Apresentação

Esta tese tem como tema principal o desenvolvimento de equipamentos (hodoscópios) para fazer a aquisição de dados, monitoramento e calibração, recorrendo a uma classe especial de detectores, as *Resistive Plate Chambers* (RPC) desenvolvidas para aplicações na medida e caracterização de raios cósmicos, em particular, os raios cósmicos de altíssimas energias. As RPCs usadas foram desenvolvidas originalmente para aplicações na detecção de raios cósmicos no Observatório Pierre Auger, na Argentina.

No segundo capítulo desta tese faremos uma descrição sucinta da física associada aos raios cósmicos, explicando sua origem e seu impacto em toda a física de partículas ao longo do século XX. Descreveremos também o Observatório Pierre Auger, o maior detector de raios cósmicos no mundo e descreveremos alguns de seus resultados mais importantes.

Uma breve explicação sobre o projeto MARTA (*Muon Array for Tagging Air Showers*), a construção e operação de RPCs será ainda exposta neste capítulo, assim como a descrição de hodoscópio, correntemente usado em experimentos de física de partículas para detectar a passagem de partículas carregadas e determinar suas trajetórias.

No terceiro capítulo explicamos toda a instrumentação associada ao projeto, descrevendo a eletrônica de aquisição de dados e monitoramento. Descrevemos ainda,

os arranjos experimentais montados para as medidas apresentadas.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nos diversos arranjos experimentais, implementados ao longo do trabalho desta tese.

Chapter 2

Fundamentação

O entendimento da natureza do ponto de vista microscópico, tem sido um processo desafiador do ponto de vista experimental, que vem se desenvolvendo desde os gregos com o conceito do atomismo [10].

Historicamente a pesquisa em Física das Partículas de Altas Energias, começou com as pesquisas com raios cósmicos na primeira metade do século XX e, a partir da segunda metade, com a pesquisa feita com auxílio de aceleradores. Os aceleradores de partículas, fornecem energia a feixes de partículas subatômicas, eletricamente carregadas, concentrando uma grande energia em pequeno volume e em posições arbitradas e controladas de forma precisa. Por outro lado, na linha de pesquisa com raios cósmicos, é possível observar e estudar partículas milhares de vezes mais energéticas do que as que são possíveis recriar em aceleradores. No entanto, nos raios cósmicos não é possível controlar a posição de sua chegada e nem sua energia, em contraste com os aceleradores.

Em ambas direções de trabalho, a complexidade dos experimentos foi se tornando, com o tempo, cada vez mais elaborada e isso levou à criação de grandes colaborações, internacionais em sua natureza, juntando vários laboratórios, cada um contribuíndo com suas competências específicas, dentro do projeto científico, de modo a ser possível a construção e operação de grandes laboratórios e observatórios [11].

No início do século XXI, o acelerador mais complexo em existência, foi construído no CERN,em Genebra, na Suíça. É o LHC (*Large Hadron Collider*).

Já, na exploração dos raios cósmicos, foi construído o Observatório Pierre Auger, na cidade de Malargüe, na Província de Mendoza, na Argentina, cobrindo uma área de 3 000 km^2, com detectores que serão descritos mais adiante, nesta dissertação [1]. Parte dos arranjos experimentais descritos nesta dissertação foram implementados neste observatório, ao qual vamos nos referir apenas como AUGER. Mais especificamente, descreveremos um detector, chamado MARTA (*Muon Array with* RPC*s for Tagging Air showers*) desenvolvido especialmente para operar no ambiente do AUGER [12].

2.1 Raios cósmicos

O estudo dos raios cósmicos teve origem no início do século XX, como resultado da observação da ionização em gases contidos em recipientes fechados. Até então, os estudos da ionização da atmosfera da Terra eram baseados na ideia de que, quanto mais distante da superfície terrestre, menor seria a radiação, visto se acreditar que a ionização do ar era proveniente da radioatividade da Terra.

O físico italiano Domenico Pacini (1878-1934) fez medidas comparando a taxa de ionização em montanhas em altitudes diferentes, na superfície terrestre, a 300 m de profundidade, na superfície de lagos, na superfície do mar. Tendo em 1911 submergido um eletroscópio em 3 m nas águas do Golfo de Gênova para medir a condutividade residual do ar contido no interior do equipamento (a caixa de cobre que submergiu o eletroscópio), encontrando uma redução significativa da radioatividade (20% com 4.3 σ) comparativamente com a superfície. Ele poderia então demonstrar que uma certa parte da ionização seria devida a outras fontes além da radioatividade natural da Terra [13], contribuindo assim para a descoberta dos raios cósmicos [14].

Contudo, foi em 1912 que o físico austríaco Victor Francis Hess (1883-1964), comprovou que a radiação ionizante vinha do espaço exterior, ao fim de uma série de experimentos realizados em um balão de ar quente (Figura 2.1). Nos quais considerou variáveis meteorológicas (pressão, temperatura, umidade etc.) e tendo especial cuidado com as condições experimentais: procurando minimizar a radiação de seu próprio dispositivo de medida (um eletrômetro de Wulf associado a um eletroscópio de folhas). Tendo alcançado a bordo de um balão a altitude considerável de 5.350m, verificando um aumento evidente da taxa de ionização com a altitude, tendo constatado que a essa altitude a radiação era cerca de três vezes maior que ao nível do mar. [15].

A descoberta de Victor Hess, sobre a natureza cósmica da radiação presente em qualquer locação na Terra, foi comprovada por outros cientistas usando também balões, como foi o caso do físico alemão Werner Kolhörster (1887-1946), que repetiu os experimentos de Hess em 1913, subindo num balão a uma altitude superior à atingida do Hess, atingindo 9 300 m, comprovando que a ionização residual a essa altitude era aproximadamente dez vezes maior que a observada ao nível do mar [16].

Com essa descoberta, Hess veio a ganhar o prêmio Nobel de Física, em 1936, juntamente com Carl D. Anderson, que recebeu o prêmio pela descoberta dos pósitrons.

Essa radiação, que não tinha relação com a radioatividade natural emanada da Terra e foi rotulada como Raios Cósmicos por Robert Andrews Millikan (1868-1953), porque se originavam no *cosmos* ou Universo.

Durante a maior parte da primeira metade do século XX, o estudo das partículas fundamentais da natureza foi realizado pelo estudo das características dos raios cósmicos.

Um pouco antes do início da segunda guerra mundial, o físico francês Pierre Victor Auger (1899-1993) descobriu uma correlação entre raios cósmicos que incidiam numa área restrita numa janela de tempo muito pequena e identificou o que hoje chamamos de chuveiros atmosféricos [17].

Em 1938 Auger instalou dois detectores de radiação ionizante na região dos Alpes



Figure 2.1: Hess no cesto do balão entre 1911 e 1912; Fonte: VF Hess Society, Schloss Pöllau/Áustria (STAFF, phys.org)

franceses e identificou a correlação entre o alto fluxo de partículas em ambos os detectores separados espacialmente, demonstrando que seriam provenientes da mesma fonte de radiação ionizante, descobrindo assim que eram partículas secundárias, provenientes de uma mesma partícula primária. Nesta ocasião, Pierre Auger testava os primeiros exemplos de sistemas de aquisição, com tecnologia de eletrônica rápida, que veio a ser importante componente em experimentos de Física, mais tarde.

Auger estimou que a energia da partícula primária que criavam os chuveiros medidos, deveria ser de pelo menos 10^{15} elétron-volts (eV), uma energia fantástica à época. Desse modo, os esforços desses e de outros cientistas possibilitaram novas descobertas em física, principalmente nas áreas de Física de Partículas e Física Nuclear.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, uma importante descoberta foi feita usando raios cósmicos. Foi a descoberta do méson pi (píon), que teve a participação de um físico brasileiro, César Lattes, fundador do CBPF [18–20]. Logo após esta descoberta Lattes participou de uma descoberta, que ironicamente tirou o protagonismo dos raios cósmicos na descoberta novas partículas, quando ajudou a identificar píons nas colisões produzidas no Ciclotron de Berkeley [21, 22].

Hoje, sabe-se que os raios cósmicos são originados fora da Terra, produzidos tanto pelo Sol quanto por outras fontes dentro da galáxia e que os raios cósmicos de maior energia se originam muito além da Via Láctea [23], por fontes extragaláticas, sendo estas partículas milhares de vezes mais energéticas do que as partículas geradas nos aceleradores fabricados pelo homem. Quando eles atingem a atmosfera e interagem com as partículas que a compõem, formam uma reação em cadeia, que gera um chuveiro com uma gama de partículas e radiação eletromagnética. A este fenómeno, é dado o

nome de *chuveiros atmosféricos extensos* [24].

Hoje, o espectro medido dos raios cósmicos cobre 12 décadas de potência em energia, indo de energias da ordem de GeV (10^9 eV) até pouco mais de 10^{20} eV. Já o fluxo varia em 32 décadas de potência (Figura 2.2 (esquerda)). A grosso modo, o espectro decresce com o cubo da energia, tendo, no entanto, alguma estrutura, provavelmente relacionada com mudanças na origens dos raios cósmicos. A Figura 2.2 (direita), mostra o mesmo gráfico com um pouco mais de detalhe, onde o fluxo multiplicado pelo quadrado da energia é mostrado de modo a enfatizar alguns aspectos do espectro. No eixo da energia, nesta figura são indicadas as energias equivalentes dos grandes aceleradores terrestres.

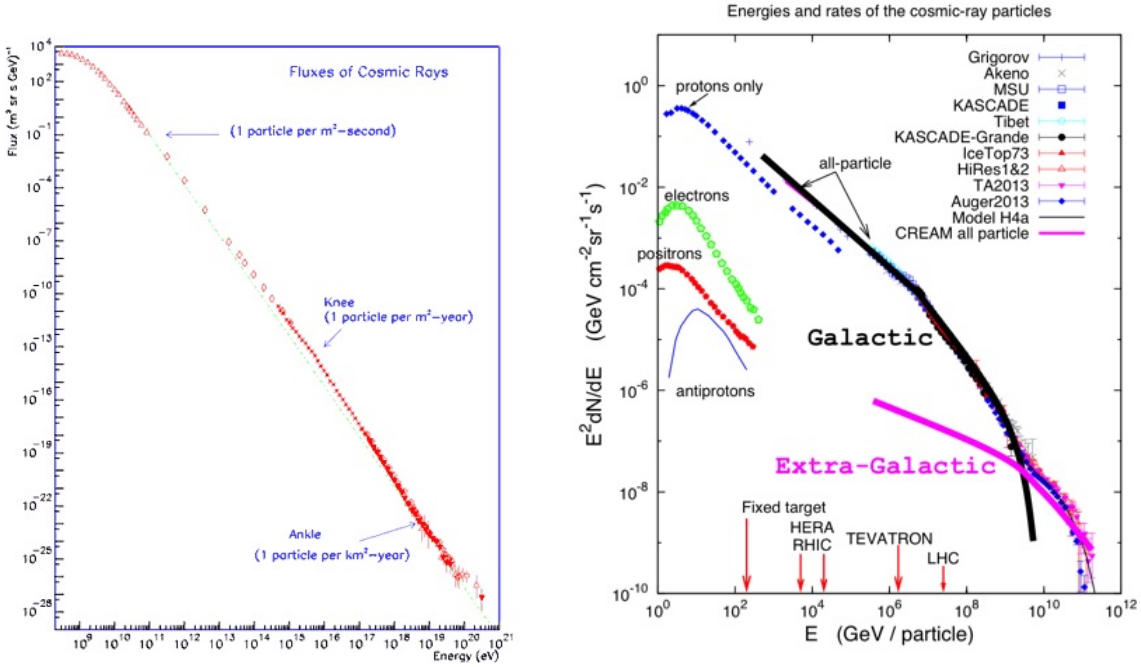


Figure 2.2: Espectro dos Raios Cósmicos;

Os raios cósmicos com energias menores do que GeV são defletidos pelo campo magnético da Terra. Há várias técnicas desenvolvidas para medir os raios cósmicos, tanto na Terra [25, 26], quanto no espaço [27] e vamos descrever alguma das realizadas em detectores terrestres mais adiante.

2.1.1 Chuveiros Atmosféricos

Os chuveiros cósmicos ou chuveiros atmosféricos são o resultado da interação das partículas primárias de altíssima energia com os núcleos dos átomos da atmosfera. Estas interações iniciais ocorrem em dezenas de quilometros acima do nível do mar e geram fragmentos de partículas secundárias, ainda muito energéticas, que por sua vez geram interações secundárias, num processo em que o número de partículas vai se multiplicando progressivamente, espalhando-se por uma área cada vez maior. O processo

começa a arrefecer, quando a energia de cada fragmento não é suficiente para provocar novas interações e estas partículas se propagam até a superfície da Terra ou são absorvidas pela atmosfera. Assim, a medida das partículas na superfície da Terra dá uma indicação da energia original, da partícula primária. Esse processo é ilustrado na Figura 2.3.

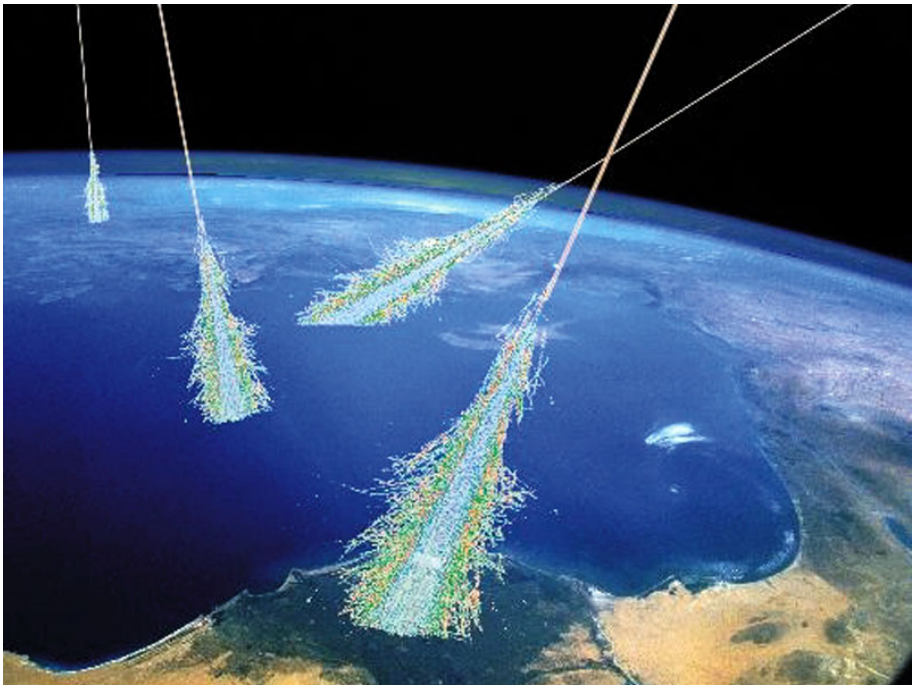


Figure 2.3: Ilustração mostrando como acontece a formação do chamado "chuveiro" na atmosfera; Fonte: Simon Swordy (U. Chicago), (APOD, NASA)

Nas colisões dos raios cósmicos com os núcleos da atmosfera são dominados por duas classes de fragmentos, os remanescentes hadrônicos e mésons secundários, principalmente píons carregados e neutros. Os hádrons remanescentes se propagam até perder a energia e chegam à Terra, mas são pequena parte do chuveiro, dominados pelos píons. Os píons neutros decaem imediatamente após a colisão resultando em gamas, que por sua vez darão origem à componte eletromagnética do chuveiro. Já os píons carregados são capazes de sobreviver e percorrer grandes distâncias. Porém, devido à sua secção de choque grande voltam a interagir com outros núcleos da atmosfera, ou então decaem em um múon e um neutrino. Os múons, como tem grande energia, sobrevivem até atingir a superfície da Terra. Grande parte dos raios cósmicos observados ao nível do mar são múons, fragmentos de colisões ocorridas em grandes altitudes, adicionados à componente electromagnética, resultante dos píons neutros. Os gamas da componente electromagnética do chuveiro convertem-se rapidamente em pares de eléctrons e pósitrons, que por sua vez emitem radiação gama pelo efeito Compton, gerando assim uma cascata de pares eléctrons-pósitrons e gamas, até a energia de cada componente não ser suficiente para geração de novas partículas.

Na Figura 2.4 mostramos uma representação mais detalhada deste processo.

Quanto mais energética a componente primária dos raios cósmicos, maior será o número de partículas secundárias geradas e maior será a área onde elas estarão distribuídas ao atingir o solo. Um único próton incidindo no topo da atmosfera gera uma reação em cascata de bilhões de partículas que chegam ao solo em uma área de até dezenas de km^2, formando uma cascata de partículas conhecida como chuveiro atmosférico extenso.

O chuveiro atmosférico, se fossemos acompanhá-lo fisicamente, parece uma frente de partículas, uma espécie de panqueca, com pequena espessura, que vai se expandindo e viajando à velocidade muito próxima à velocidade da luz. A medida das características de um raio cósmico de altíssima energia essencialmente busca fazer amostragens desta panqueca de partículas, pois suas características trazem informações sobre o raio cósmico primário.

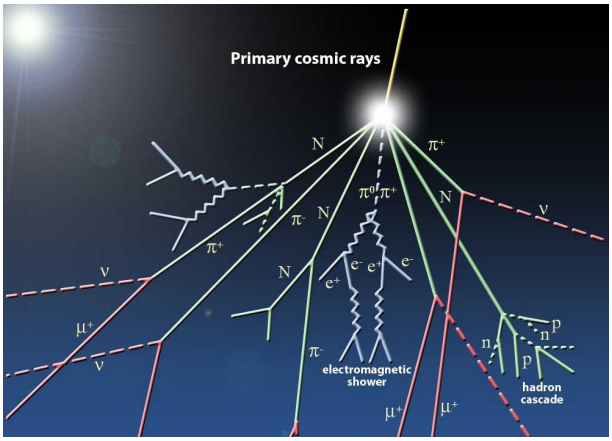


Figure 2.4: Representação de um chuveiro atmosférico, ilustrando suas componentes (physicsopenlab.org)

2.1.2 Múons

Dentre as partículas secundárias originadas nos chuveiros cósmicos, temos a formação de uma classe de léptons muito importante: os múons. Os múons são partículas aproximadamente duzentas vezes mais massivas do que o elétron, e possuem um alto poder de penetração na matéria se comparados a outros tipos de radiação, como os raios X. Isto se dá por dois motivos principais: primeiro porque não são tão facilmente absorvidos se comparados com outras partículas menos massivas; segundo, porque não perdem quantidade considerável de energia em sua trajetória até à superfície terrestre. Além disto, ao serem produzidos nos chuveiros cósmicos, essas partículas se movem com velocidade próxima à da luz, de modo que os efeitos relativísticos permitem que possamos detectá-las na superfície da Terra.

Esta detecção pode ser feita com diferentes tipos de instrumentos. Dentre eles, estão os detectores Cherenkov, os cintiladores e as Câmaras de Placas Resistivas, estas últimas denominadas de RPC (*Resistive Plate Chambers*), como é o caso dos detectores utilizados no projeto MARTA (descrito mais adiante na secção 2.3), estudados e usados nos arranjos experimentais desta dissertação. Estas detecções permitiram avanços nos estudos de Física de Partículas e, em especial, a descoberta de aplicações tecnológicas. Dentre essas aplicações, podemos citar a Tomografia por Espalhamento de Múons (MST – *Muon Scattering Tomography*) ou Tomografia de Múons (*Muon Tomography*) desenvolvida no CERN), que consiste numa técnica de formação de imagens tridimensionais através de espalhamentos de Coulomb. Basicamente, funciona da seguinte forma: os múons chegam ao material e são defletidos devido à interação com os elétrons que formam o objeto. Isso permite medir os ângulos de deflexão dessas partículas antes e depois da colisão com o objeto, revelando então informações sobre ele. Com isto, estão sendo desenvolvidas técnicas para estudos interdisciplinares, como exemplo, a descoberta de uma câmara secreta da pirâmide de Khufu, em Gizé [28] e aplicações em Medicina, como o uso de MST para realizar exames de imagem para, por exemplo, diagnóstico de câncer (*Medical Imaging*, CERN).

2.2 Observatório Pierre Auger

O Observatório Pierre Auger é hoje o maior, em extensão, observatório do mundo, dedicado à medida de raios cósmicos de altíssimas energias. Está localizado no Hemisfério Sul, na Província de Mendoza, na Argentina. Sua construção é fruto do esforço de vários países na Europa e na América, incluindo Brasil e Portugal. Sua área extende-se por 3.000 km^2, a Nordeste da cidade de Malargüe, 300 km ao Sul da cidade de Mendoza. A construção do observatório teve início em 2004 e foi terminada em 2008, com a instalação de 1.600 detectores do tipo SD – *Surface Detectors* – que são tanques de água, que registram a passagem de partículas, pela radiação do tipo Cherenkov emitida pelas partículas carregadas ao atravessar a água. Estes detetores estão dispostos nos vértices de uma grade triangular, com separação de 1 500 m entre eles como ilustrado na Figura 2.5) [1].

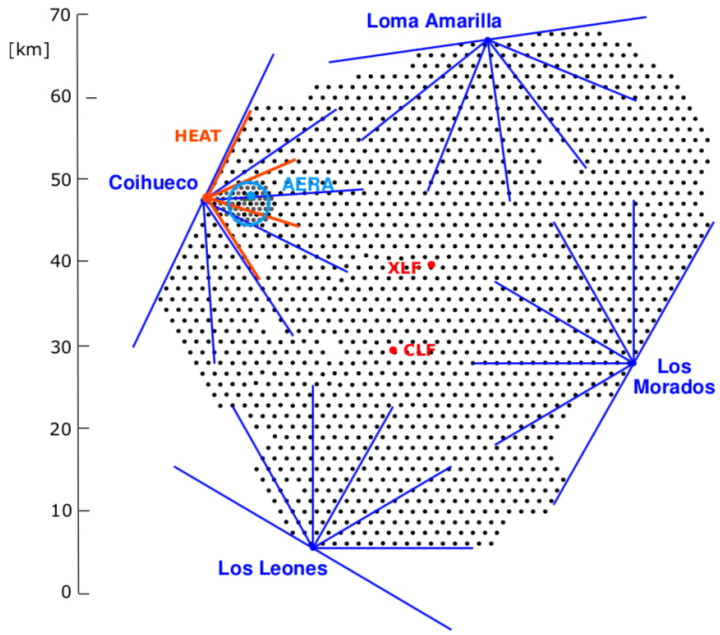


Figure 2.5: Diagrama do sítio do Observatório Pierre Auger, onde cada ponto representa um dos 1 600 detetores do tipo SD, dispostos no arranjo experimental. São mostrados, também, os quatro sítios dos telescópios FD e disposição dos experimentos HEAT, AERA, XLF e CLF [1].

No entorno desta área há quatro edifícios, cada um com seis telescópio (ilustrado na Figura 2.6) do tipo FD – *Fluorescence Detectors* – projetados para detectar a fluorescência da atmosfera induzida pela passagem das partículas do chuveiro atmosférico. Cada telescópio cobre um campo de visão na faixa zenital do horizonte até 30 ° e uma amplitude de 30 ° na faixa azimutal.

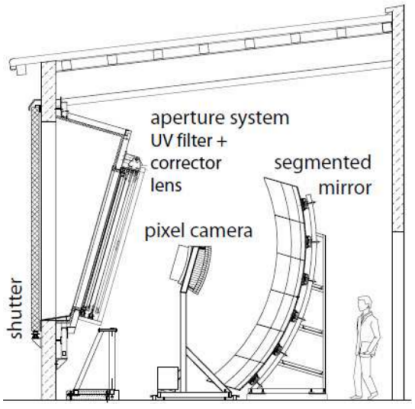


Figure 2.6: Ilustração geometria de um telescópio de florescencia (FD). A luz passa pela abertura, coberta por um filtro UV e um anel corretor, e é refletida por um espelho segmentado para a câmera de pixel com 440 fotomultiplicadores [2].

Os detectores de superfície são tanques rotomoldados, com um forro interno de tyvek®, capaz de refletir a radiação de Cherenkov, essencialmente ultra-violeta, gerada pela passagem de partículas carregadas pela água. O tanque tem um diâmetro de 3,6 m e a linha de água tem 1,2 m de altura, e é sensível, também, a fótons de altas energias, que geram pares de e^+e^- na água [1] [29].

A intensidade da luz medida, associada à quantidade de partículas penetrando o detector, é coletada por três tubos fotomultiplicadores (PMTs), de oito polegadas de diâmetro, distribuídos simetricamente na superfície superior da água, direcionados para baixo (Figura 2.7). A razão para isto é que eles coletam a luz refletida nas paredes do tanque e não são influenciados pela incidência direta da radiação de Cherenkov, exceto nos casos de chuveiros quase horizontais.

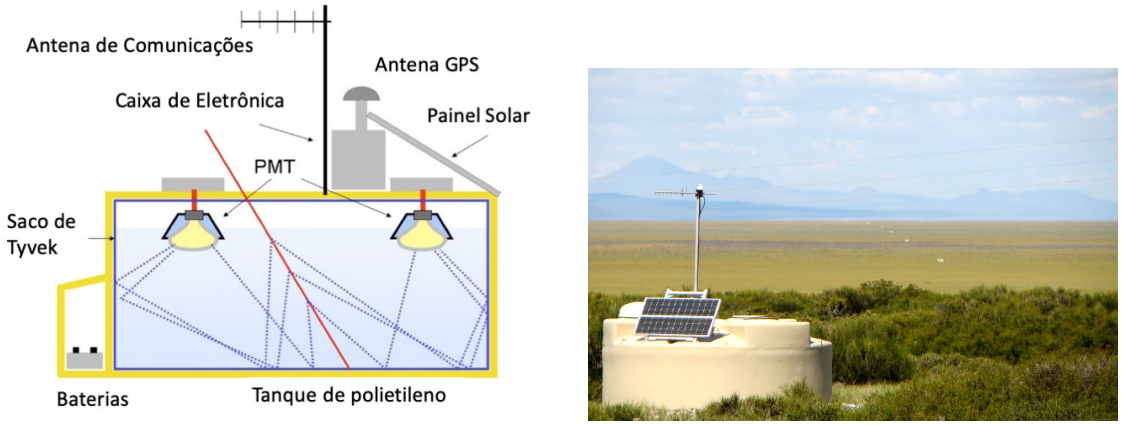


Figure 2.7: Esquerda: O esquema para um detector SD Auger e seus componentes; Direita: Foto de um detector Auger SD e uma linha de detectores separados por 1.5 km [3]

Cada detector conta com um receptor GPS, que funciona como relógio, ou base de sincronismo, do detector, com uma resolução temporal da ordem de 10 ns e um sistema de comunicação, com a estação central de aquisição de dados (CDAS).

O sistema de gatilho (disparo da aquisição) dos tanques depende da medição da carga média coletada pelo PMT usando como referência a carga gerada pela passagem de um único muon vertical, denominado *Vertical Muon Equivalent* (VEM) [9].

Cada estação envia um sinal para o CDAS quando o limiar do sinal de disparo é ultrapassado, que então compara-se com um padrão. Quando pelo menos três estações vizinhas são disparados em uma janela de tempo de dezenas de μs, um gatilho é transmitido para estas estações e estações vizinhas para transmitir seus dados.

Os dados são então coletados, classificados e pré-analisados no CDAS (*central data acquisition station*) e disponibilizados para toda a colaboração.

2.2.1 Resultados físicos

Uma medida importante para o Auger é a do fluxo de raios cósmicos com energias extremas (acima de 10^{18} eV ou 1 EeV) e o resultado está mostrado na Figura 2.8. O espectro [4] mostra um comportamento de acordo com uma lei de potência. No entanto, há características marcantes no espectro, como a mudança espectral à energia E = 5.08 EeV, indicando, possivelmente mudança da origem dos raios cósmicos de galácticos a extragalácticos. Por outro lado, a supressão de raios cósmicos em energias muito altas, devido, muito provavelmente, ao processo GZK [30, 31] – pelo qual os raios cósmicos com energias muito elevadas, dissipam sua energia em interação com a radiação de fundo do Universo, através da reação $\gamma + p \rightarrow \Delta(1232) \rightarrow$ hadron + pion.

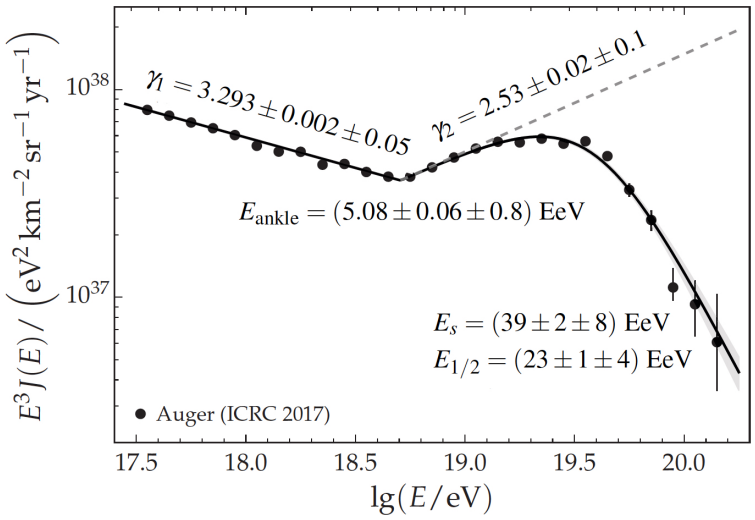


Figure 2.8: O espectro em energia obtido pela combinação dos chuveiros verticais medidos pelo SD, mais chuveiros inclinados, hibridos e realizados pela parte mais densa da rede. A incerteza sistemática na escala de energia é de 14 % [4].

2.3 Projeto MARTA

MARTA (Muon Array for Tagging Air Shower) é um experimento que conta com a colaboração internacional de vários países. Com participação de Brasil, Portugal, Itália, Espanha e República Tcheca.

Basicamente o detector é formado por uma ou mais RPC's, dependendo da arquitetura, para detecção de múons do chuveiro atmosférico de raios cósmicos ou gama.

A RPC é dividida em PAD's para aumentar a resolução espacial. Além disso, o MARTA também possui uma eletrônica embarcada para aquisição de dados e controle das RPC's.

A detecção ocorre evento a evento, com eficiência da ordem de 90%, e boa resolução (15% a $10^{19,5}$ eV).

As RPC's são bastante robustas, apresentando uma alta confiabilidade. Apresentam uma larga faixa de temperatura de operação, o que é um requisito fundamental para operação em campo. A resolução espacial é determinada pelas dimensão dos PAD's, (15 x 20 cm). Possui resolução temporal da ordem de ns, o que significa que pode-se diferenciar eventos que ocorram com essa diferença de tempo.

O MARTA pode ser utilizado em estações combinadas com outros detectores, seja em tanques de radiação Cherenkov (Com ilustrado na Figura 2.9), cintiladores ou outra RPC. Esse tipo de montagem facilita a calibração, pois pode ser feita de maneira cruzada. A definição de qual detector será o gatilho vai depender das resoluções temporais e eficiências de cada um.

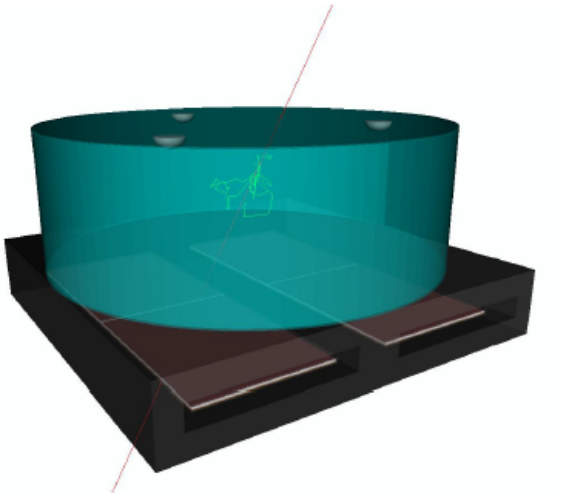


Figure 2.9: Ilustração de um arranjo experimental de MARTA em uma estação SD de AUGER. Composta por 4 RPCs embaixo de um tanque de radiação Cherenkov [5]

2.4 Detectores

Este trabalho se focalizou na detecção dos múons e sua trajetória e se baseia em detetores gasosos, nomeadamente as Câmaras de Placas Resistivas, também designadas como RPC. Foram implementados três arranjos experimentais, utilizando RPCs do projeto MARTA.

2.4.1 RPC's

As RPCs são câmaras de placas resistivas, onde a interação dos múons com a matéria se dá por meio de um gás confinado, podendo ter um, dois ou mais *gaps*, intervalos

entre as placas preenchidos por gás.

A Figura 2.10 ilustra o princípio de funcionamento do detector, funcionando em modo avalanche onde a corrente é induzida pelo movimento dos elétrons livres, quando uma particula carregada passa pelo gás, ionizando, resultando num par ion-eletron. O elétron, arrancado do gás, é acelerado pela diferença de potencial e ioniza outros átomos do gás, criando um efeito cascata. Esta descarga elétrica é detectada pelos *pads* do plano do detector.

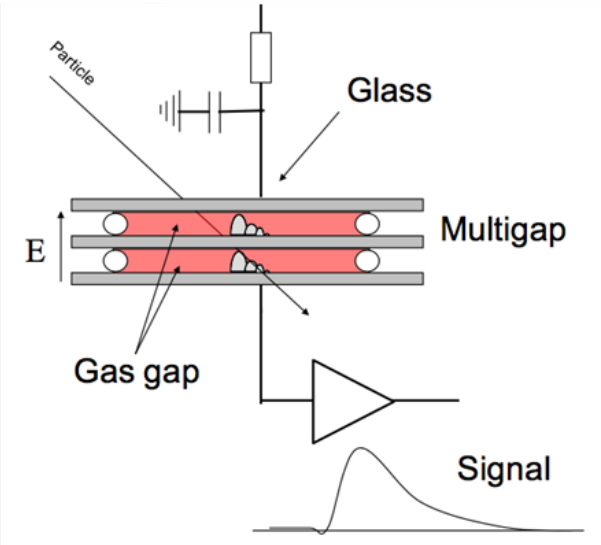


Figure 2.10: Efeito de avalanche (principio de funcionamento das RPCs de MARTA)

O detector utilizado contém dois *gaps* situados entre 3 eletrodos de alta resistividade. Sobre o volume gasoso é posta uma placa de circuito impresso, com substrato em fibra de vidro, com um arranjo de 64 *pads* (Figura 2.11), que são responsáveis pela coleta das cargas (sinais); coloca-se uma espuma protetora sobre plano de *pads*, assim a espuma preenche o espaço entre o plano de *pads* e a tampa de alumínio (como ilustrado na Figura 2.12), dessa forma, ao colocar o gás no volume gasoso, este não aumenta o espaço entre os eletrodos, o que diminuiria a eficiência no centro do detector.

Por fim, todo o detector é colocado dentro de uma caixa de alumínio fechada (Figura 2.13), para garantir a estrutura mecânica do detector, ligada ao potencial terra (GND) que atua como uma gaiola de Faraday. A caixa de alumínio deve ser hermeticamente fechada, agindo, assim, como um segundo volume gasoso, pois o acrílico que envolve o volume gasoso interno tem porosidades e isso permite a entrada de impurezas, daí é colocado o mesmo gás dentro da caixa de alumínio e dessa maneira previne-se a contaminação do volume gasoso interno.

Cada RPC possui um arranjo de 64 (8 x 8) *pads* de 15 x 19 cm (região coletora efetiva 14 x 18 cm) formando uma área total de 1,2 x 1,5 m^2. Dessa área total, 85% corresponde a área coletora. Cada *pad* possui um canal dedicado, podendo a eletrônica ler os 64 pads

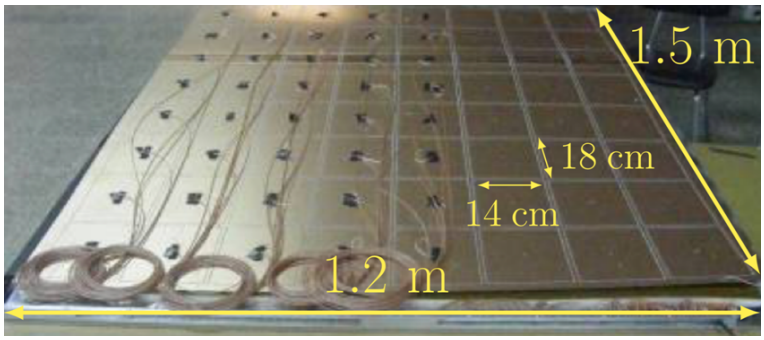


Figure 2.11: Plano de PADs das RPCs de MARTA [5]

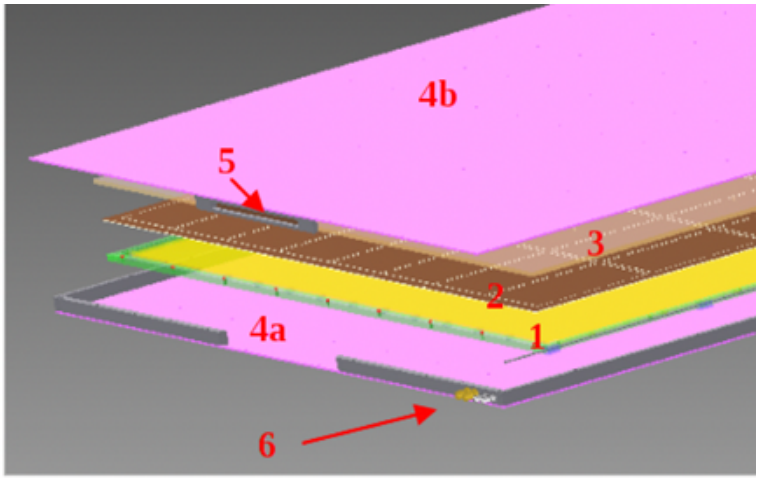


Figure 2.12: Camadas internas das RPCs de MARTA: volume gasoso da RPC (1), plano de PADs de leitura (2), camada de espuma com sensores I2C (3), base da caixa de alumínio, tampa e junção (4a, 4b, 5) conecções para gás e alta tensão (6) [5]

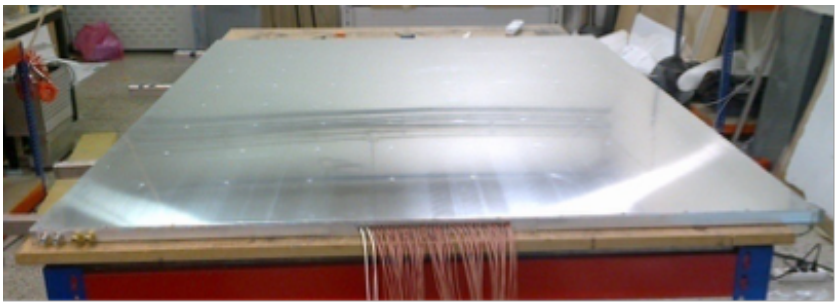


Figure 2.13: RPC de MARTA, em uma caixa de alumínio fechada, que atua como uma gaiola de Faraday [5]

simultaneamente. Os *pads* são separados por anéis de guarda ligados ao potencial de terra, o que impede interferência entre *pads* adjacentes.

O desenho interno é composto por três eletrodos de vidro espesso, separados por 2 *gaps* de gás de 1 mm. Os eletrodos são separados por monofilamentos de Nylon. Esse sanduíche é fechado por placas de acrílico. Os eletrodos são conectados a alta tensão utilizando uma cola resistiva. O módulo é envolto em placas de alúminio de 3 mm de espessura, que além de aprisionar o gás no interior da RPC, também a protege de condições ambientais desfavoráveis.

A aplicação de alta tensão gera um campo elétrico constante de 50 kV/cm nos gaps de gás. Quando uma partícula carregada atravessa o gás, ioniza seus átomos gerando pares íon/elétron que são acelerados ionizando novos átomos e provocando uma avalanche, anteriormente descrita.

2.5 Hodoscópio

Um hodoscópio é um instrumento correntemente usado em experimentos de física de partículas para detectar a passagem de partículas carregadas e determinar suas trajetórias. Seu nome vem do grego, onde *hodos* significa direção ou caminho, e *skopos* como observador [32]. Consiste num arranjo de matrizes de detetores de raios cósmicos, composta por dois ou mais planos (dois ou mais detetores), ativadas quando uma única partícula carregada (múon) penetra (atravessa) todo o dispositivo. Se os dois detectores das extremidades têm um disparo em coincidência (quase ao mesmo tempo), é validada uma aquisição. Com a posição onde a partícula passou em cada detetor, é possível determinar e reconstruir a sua trajetória, conforme ilustrado na Figura 2.14.

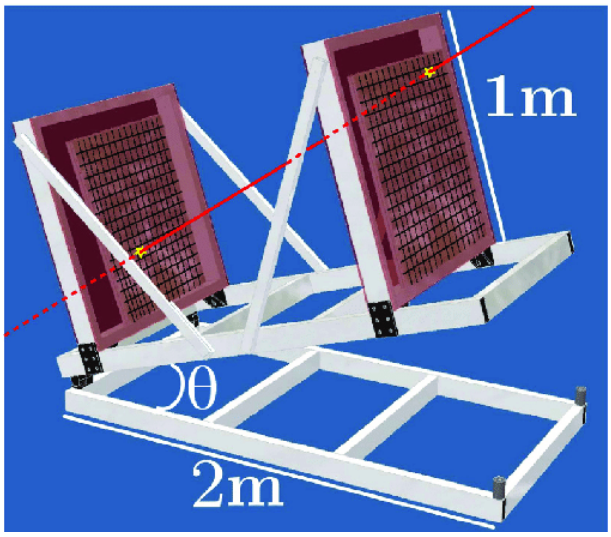


Figure 2.14: Vista esquemática da reconstrução da trajetória de um múon, num hodoscópio com duas matrizes de 16 × 16 [6]

Hodoscópios podem ser construídos a partir de detetores cintilantes (cintiladores plásticos) ou detetores gasosos. Compostos por diversos segmentos em cada plano (detetor), segmentando a área de cada detetor em pequenos blocos ou por *strips* (fios ou tiras) dispostas perpendicularmente, para ser possível determinar as coordenadas X e Y de cada um dos planos.

Chapter 3

Materiais e Métodos

No âmbito do projeto MARTA e Auger, foi necessário desenvolver e implementar três hodoscópios para atender as necessidades dos projetos. No decorrer deste desenvolvimento, a instrumentação dos arranjos experimentais foi evoluindo, de modo a atender as necessidades dos mesmos com maior eficiência.

3.1 Instrumentação

Os sistemas de aquisição de dados (*data acquisition* - DAQ), desenvolvidos e implementados nos três arranjos experimentais, foram gradualmente desenvolvidos e posteriormente atualizados de modo a melhorar o desempenho. Inicialmente procedeu-se com o desenvolvimento da instrumentação do primeiro arranjo experimental com o desenvolvimento de uma *Front End* de aquisição de dados de baixo ruído.

Uma *Front End* consiste em uma placa de circuito impresso de entrada dos sinais analógicos dos detetores, composta de um conjunto de circuitos de condicionamento de sinal analógico, com amplificadores de sinal e os respectivos discriminadores. Esta primeira *Front End* foi realizada recorrendo a componentes de eletrônica discreta, pela segurança do controle e domínio de todas as componentes. Posteriormente, comprovado o conceito e a robustez dos detetores (RPCs) do projeto MARTA, se passou para uma solução embarcada, na qual se recorreu a um circuito integrado de aplicação específica (*Application Specific Integrated Circuits* - ASIC), para minimizar o tamanho da instrumentação e o consumo de energia; viabilizando desta forma a sua implantação em campo, com alimentação por sistema de painéis fotovoltáicos.

3.1.1 PREC

O PREC (*Prototype Readout Electronics for Counting particles*) é um protótipo experimental (com o diagrama de blocos ilustrado na Figura 3.1) composto por até 13 *Front End*s de 8 canais de entrada cada, conectadas a uma *Mother Board* (placa mãe) de aquisição de dados.

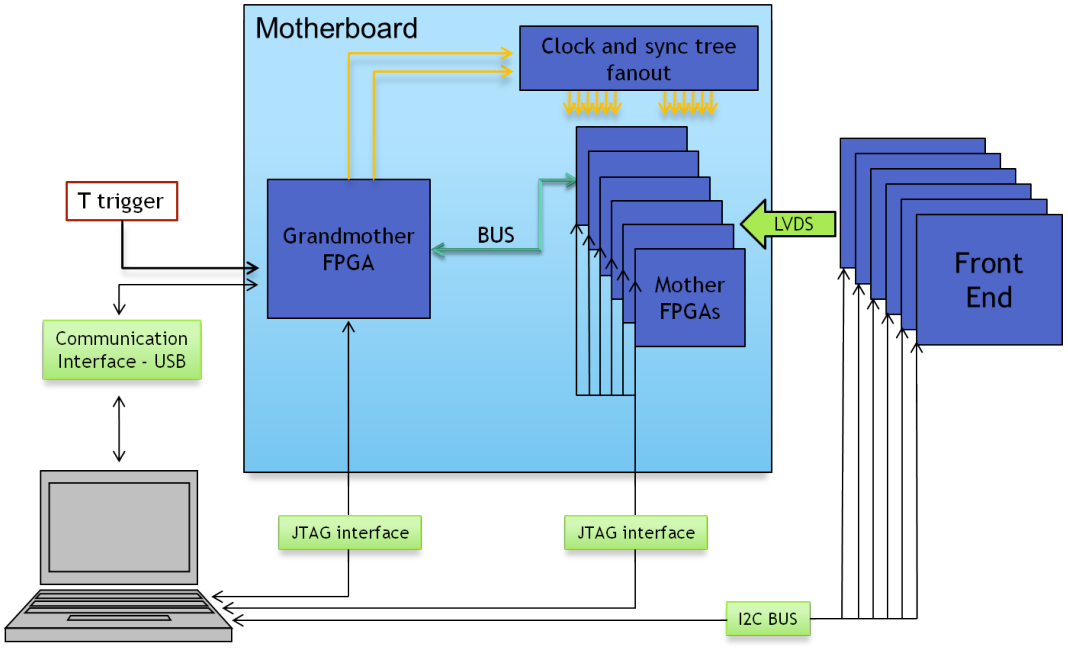


Figure 3.1: Diagrama de bloco do PREC.

A *Motherboard* (placa mãe) do PREC (figura 3.2), é composta por 13 FPGAs secundarias (denominadas de Mother FPGAs), responsáveis por processar os dados das *Front End* (uma FPGA por *Front End*). Podendo se conectar até treze *Front End*s. As respectivas *Mother* FPGAs estão conectadas a uma FPGA central (denominada de *Grand-Mother*) responsável por processar as condições de *trigger* e gerenciar a aquisição de dados adquiridos pelas 13 FPGA secundárias, disponibilizando os mesmos via USB. Cada FPGA secundária, para além de memorizar os BIN do evento de cada canal, a mesma é responsável por contabilizar as taxas de background de cada um dos canais da *Front End*, cortando a contribuição dos mais ruidosos para a geração de *trigger*, reduzindo deste modo a sua contribuição para *trigger*s falsos.

Para obtenção de uma *Front End* de baixo ruído de modo que o número de canais do sistema de aquisição de dados fosse facilmente escalonável, foi desenvolvida uma *Front End* para acoplar numa crate 6U (figura 3.3). Uma crate 6U consiste em um chassi de design compacto, com medidas padronizadas e um padrão de conectores de acoplamento internos para alimentação e comunicação das placas acopladas. A crate pode ser usado como uma unidade de mesa ou ser instalado em um rack de 19 polegadas. As *Front End*s (Figura 3.4) deste protótipo foram desenvolvidas com componente de eletrônica discreta, sendo possível o controle e domínio de todas as componentes. Possuindo uma programação digital (I2C) do threshold individual por canal, com o objectivo de facilitar ajustes mais finos por canal. Estando cada *Front End* equipada com um circuito integrado que possui uma identificação (ID) de fábrica (diferenciada de chip para chip), otimizando a identificação de cada *Front End* no barramento de dados I2C.

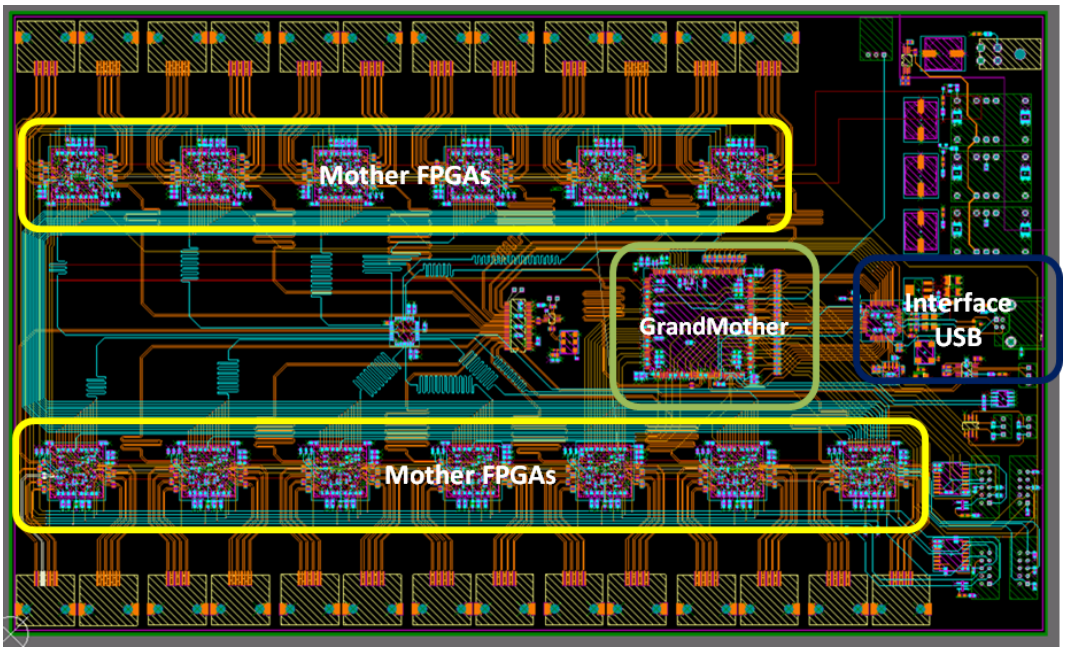


Figure 3.2: Roteamento eletrônico da *Motherboard* do PREC e identificação das FPGAs e interface de comunicação .

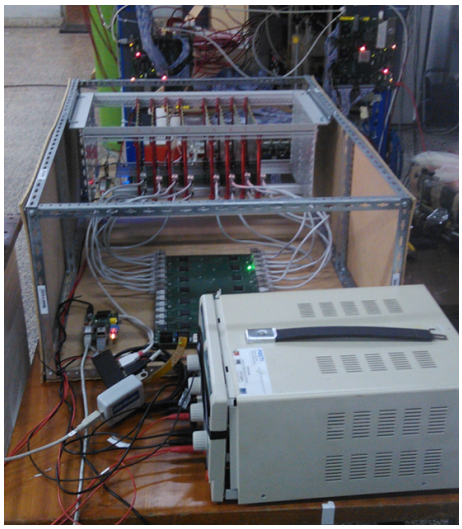


Figure 3.3: Protótipo do PREC com 8 *Front End*s em uma crate 6U, conectadas à *Motherboard*.

A *Front End* possui baixo ruído e foi desenvolvida com quatro camadas de circuito impresso. As duas camadas interiores foram reservadas para plano de alimentações e plano de massa. Simplificando o roteamento eletrônico da placa (figura 3.5) e colaborando para uma redução do nível de ruído, com a menor impedância possível

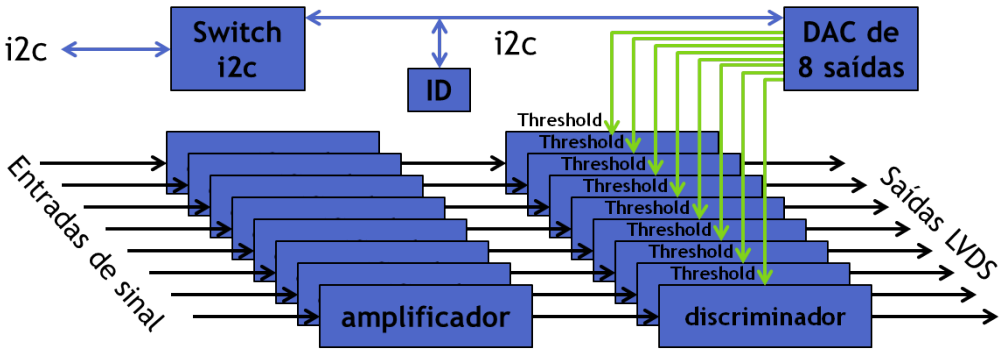


Figure 3.4: Diagrama de blocos da *Front End* do PREC.

nas alimentações e a obtenção de um plano de massas uniforme de baixa impedância. Este último é muito importante para dimensionar as trilhas (canais de transmissão) de impedância controlada (50 Ω) para todo o sistema analógico de sinais. E também para dimensionar a impedância controlada (100 Ω) dos pares de trilhas diferenciais de saída dos discriminadores.

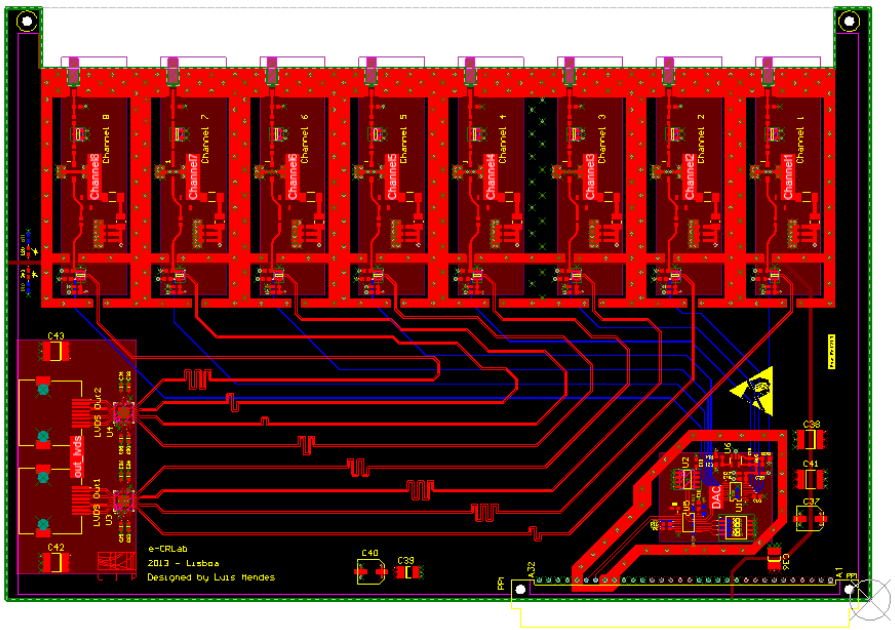


Figure 3.5: Roteamento eletrônico da *Front End* do PREC.

Cada *Front End* possui oito canais, compostos pelo amplificador e discriminador ilustrado na Figura 3.6. Para além dos cuidados em relação as impedâncias controladas dos canais de transmissão, foram adicionados capacitores de desacoplamento cerâmicos, década a década, para melhorar o desempenho e resposta do amplificador.

Tambem foram adicionados diodos *schottky* na entrada para proteger o amplificador de picos de entrada.

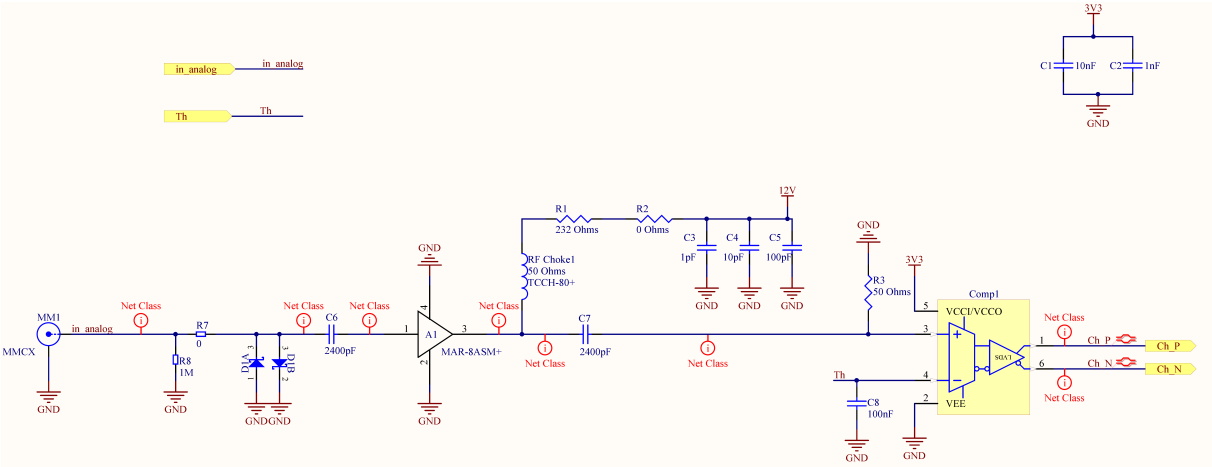


Figure 3.6: Amplificador e discriminador de cada canal do *Front End* do PREC.

Para protecção de interferências externas, todos os canais foram protegidos por uma gaiola de Faraday, implementada na placa de circuito impresso (figura 3.7) e as saídas dos discriminadores em LVDS (Low-voltage differential signaling), sinal diferencial de baixa voltagem, com o objetivo de estarem menos vulneráveis a interferências ao longo do canal de transmissão.

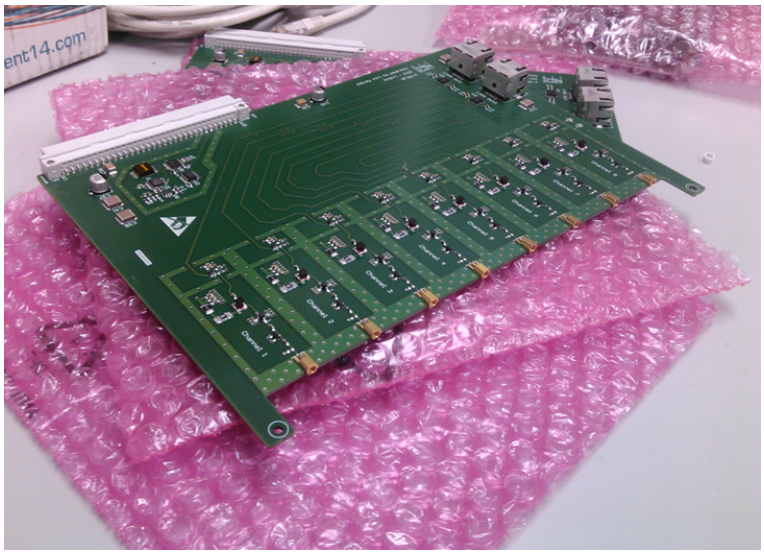


Figure 3.7: *Front End* do PREC.

A fim de processar as condições de *trigger* e aquisição de dados das diversas *Front End*s, foi implementada no protótipo a *Motherboard* (placa mãe) ilustrada na Figura 3.8, com 104 canais diferenciais (LVDS), linha de entrada de *trigger* externo e uma interface USB para comunicação e aquisição de dados.

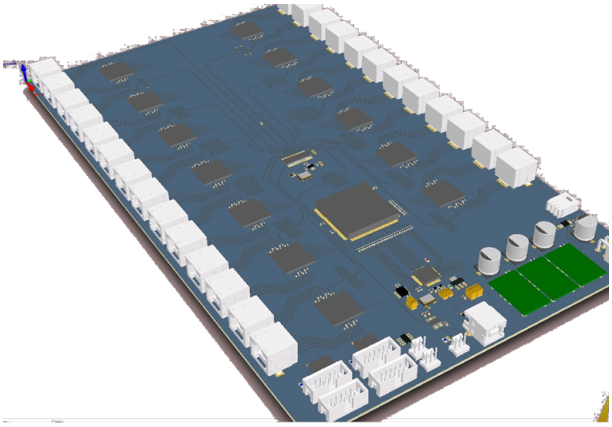


Figure 3.8: *Mother Board* do PREC.

3.1.2 MAROC e Control Unit

De modo a minimizar a instrumentação e o consumo energético da mesma, a fim viabilizar a sua implantação em campo utilizando energia solar, recorreu-se a uma solução embarcada em uma *Front End* (figura 3.9) com uma FPGA (Cyclone IV) *low-power* e do ASIC MAROC, que se trata de um circuito integrado de aplicação específica (*Application Specific Integrated Circuits* - ASIC).

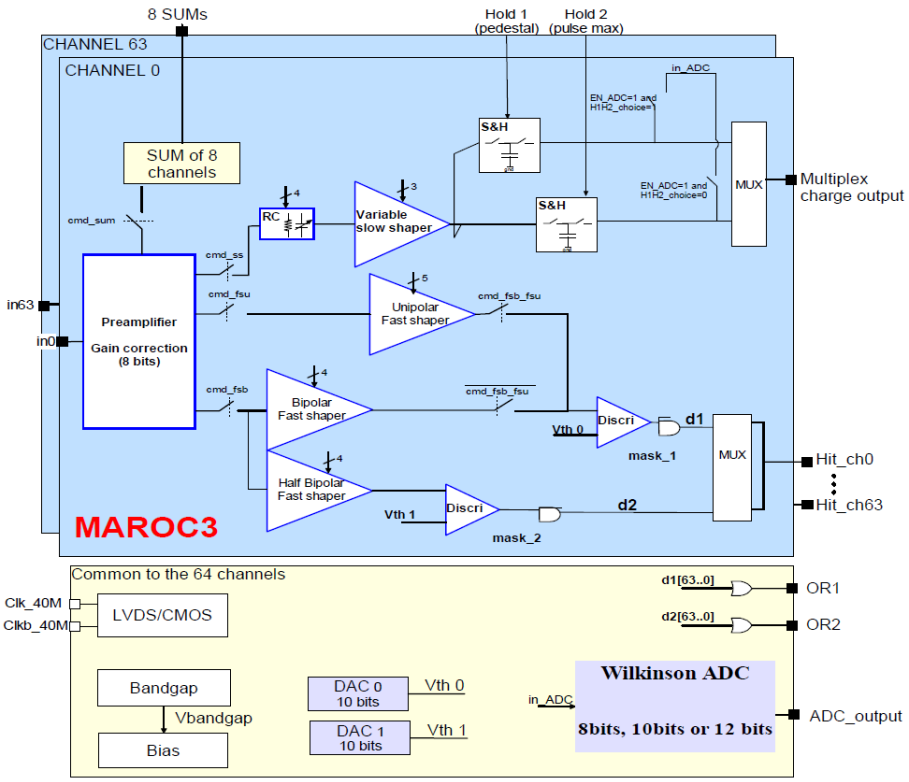


Figure 3.9: Diagrama de blocos da arquitetura do ASIC do MAROC3 [7].

O MAROC3 é um ASIC de *Front End* com 64 canais, com baixa impedância de entrada ajustável (50-100 Ω), projetado para ler pulsos rápidos negativos de corrente. Ele fornece um sinal modelado proporcional à carga de entrada e 64 saídas de disparo dos discriminadores de cada canal. O ganho de cada canal pode ser ajustado entre 0 e 4, com uma precisão de 1%, graças a um pré-amplificador de ganho variável de 8 bits, que permite compensar a não uniformidade entre os canais do detector. Cada uma das 64 saídas de disparo são provenientes de um *shaper* (condicionador de sinal) rápido e seu discriminador de baixo deslocamento temporal , a fim de obter uma taxa de eficiência de disparo de 100% para um sinal de entrada próximo a 10 fC ou um *shaper* (condicionador de sinal) rápido bipolar com ganho mais baixo seguido por seu discriminador, permitindo disparar para uma carga maior de entrada sem saturação. Há uma opção

para selecionar entre o primeiro e o segundo tipo de disparo. Os limites dos discriminadores são definidos por dois DACs internos de 10 bits (DAC 0 e DAC 1). Uma saída de carga digital é fornecida por um ADC Wilkinson integrado de 8, 10 ou 12 bits. Cada um dos 64 canais dispõe de um *shaper* (condicionador de sinal) lento variável (50 - 150ns), combinado com dois capacitores (*Sample e Hold*) permite armazenar a carga de até 5 pC, bem como a linha de base. Fornecendo uma medição de carga multiplexada com uma velocidade de leitura de 5 MHz [7].

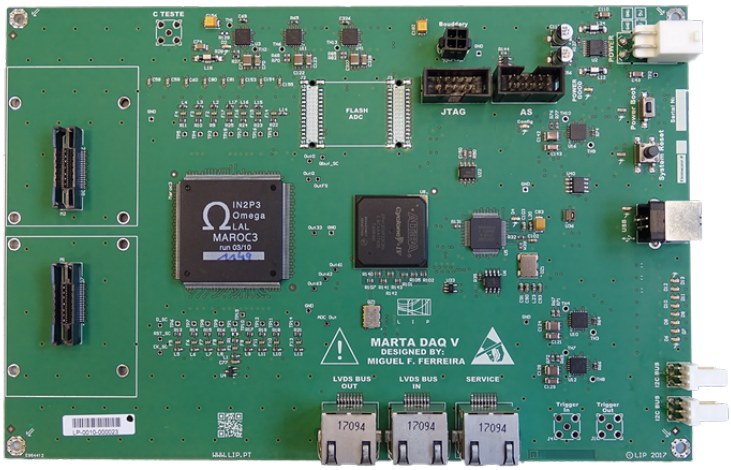


Figure 3.10: A placa *Front End* do MAROC.

A placa *Front End* MAROC (figura 3.10), é composta por um ASIC MAROC3 controlado por uma FPGA (Cyclone IV), possuindo como interfaces JTAG, porta USB e barramentos comunicação LVDS conectados a FPGA. Para além de dois conectores MICTOR, para conectar 32 entradas analógicas cada, a configuração dos parâmetros de controle do ASIC é realizada pela FPGA interna da *Front End*, a partir de configuração enviada pela porta USB ou barramentos comunicação LVDS; sendo a mesma (FPGA) responsável por manter actualizado numa FIFO, as ultimas 128 amostras dos sinais dos 64 canais de cada RPC, afim de ser possível reconstruir a trajectória dos *single* múons (múons isolados).

A *Central Unit* é a unidade central de processamento e aquisição de dados, composta por uma placa com uma FPGA Cyclone V (com um processador ARM embarcado), que corre um sistema operacional Linux embarcado.

No processamento em condição de *trigger* é gerado um *trigger* rápido (Tr) com identificador enviado para as diversas *Front Ends* conectadas na *Central Unit* (figura 3.11), para o cruzamento de dados entre os detectores de MARTA. Esta identificação é de extrema importância, tanto na identificação dos eventos para cruzamento na reconstrução da trajetória dos múons, bem como para cruzamento com os dados dos eventos dos detetores de superfície (SD) de AUGER, através do GPS timestamp (horário ultrapreciso de GPS enviado pelos satélites), lido (o GPS *timestamp*) pela eletrônica dos tanques de Auger e reenviado para o exterior por SPI pela *Front End* da mesma.

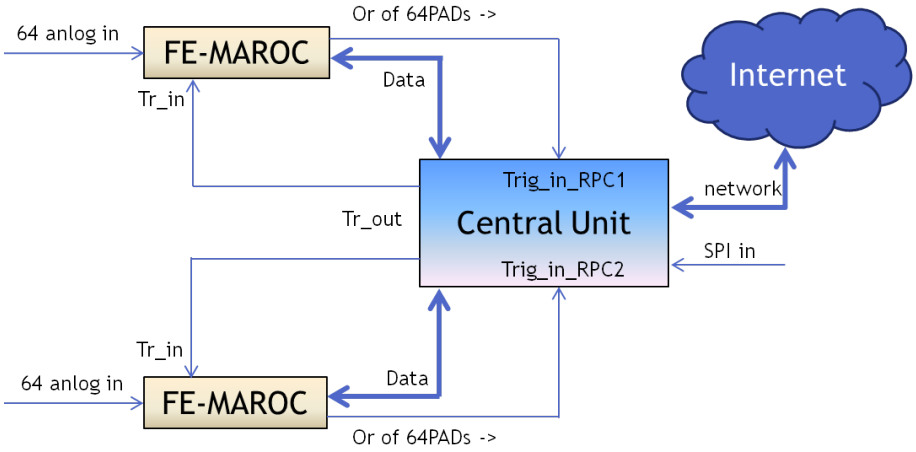


Figure 3.11: Diagrama de blocos da instrumentação do protótipo denominado MAROC.

3.2 Arranjos Experimentais

No decorrer dos primeiros testes e implementação do projeto MARTA, surgiu no seio da colaboração internacional de AUGER, uma enorme necessidade do conhecimento preciso da resposta dos detetores de água Cherenkov aos múons, para estimar a quantidade de múons contida em cada chuveiro atmosférico extenso. Para tal era de extrema importância uma medição precisa da carga do VEM (*Vertical Equivalent Muon*) dos múons [9], porque estudos anteriores tinham mostrado como diferentes fatores de envelhecimento dos detetores de água Cherenkov de Auger afetam a calibração do VEM [33, 34].

Os fatores de conversão para a calibração do VEM foram realizadas há mais de dez anos, nos detectores de água Cherenkov Laura, Capisa e Larabelle. O último foi renomeado para Gianni Navarra, detetor no qual foi implementado o hodoscópio Gianni Navarra.

Com os avanços dos testes de caracterização do VEM dos detetores de água Cherenkov de Auger e das RPCs do projeto MARTA, surgiu a necessidade de minimizar o tamanho e consumos da instrumentação do sistema de aquisição de dados, para uma solução embarcada em um circuito integrado (MAROC) de aplicação específica (*Application Specific Integrated Circuits* - ASIC). Foi o primeiro arranjo experimental de testes e desenvolvimento de *firmware* de *trigger* e cruzamento de dados, implementado no CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas), para obter medições, para determinar taxas de múons e distribuição angulares, para estudos de princípios fundamentais.

Este arranjo experimental com o novo sistema de aquisição de dados MAROC, após devidamente testado, foi replicado na AB (*Assembling Building*) do observatório Pierre Auger (um galpão destinado às construções e montagens de detetores de Auger). Com o qual se iniciou a prova de conceito para os testes e controle de qualidade dos cintiladores do projeto de *upgrade* de Auger (*AugerPrime*).

3.2.1 Tanque Gianni Navarra

O tanque Gianni Navarra se trata de um dos primeiros tanques de Auger, instalado no sítio do Observatório; foi sobre este tanque que foram realizados todos os testes de calibração utilizados como referência em todos os 1600 tanques instalados no arranjo experimental do observatório. Para atestar a existência ou não de efeitos de envelhecimento dos tanques, este tanque foi escolhido. Ademais, por se tratar do tanque de referência, localizado no sítio do observatório (fácil acesso), possui um *container* (figura 3.12) sem limitações de rede elétrica e de dados.



Figure 3.12: Tanque Gianni Navarra no Observatorio Pierre Auger.

Para se estudar a calibração do VEM (*Vertical Equivalent Muon*), dos múons verticais que passam cerca do centro do tanque Gianni Navarra, foi instalado um hodoscópio com uma RPC sobre o tanque e uma segunda por baixo do tanque, afim de ser possível detectar (*single muon*) trajetórias isoladas de múons.

Neste primeiro arranjo experimental se recorreu a instrumentação de eletrônica discreta, anteriormente designada por PREC, tendo instalado junto a cada RPC as respectivas *Front Ends* em uma crate 6U, enviando os cabos de sinal LVDS para a *Mother Board* instalada dentro do container, onde a mesma gera um gatilho (*trigger*) interno de coincidência e um gatilho externo para acionar a *Unit Board* (UB) eletrônica do tanque conforme figura 3.13.

Neste arranjo experimental 6 FPGAs secundárias supervisionavam os sinais das *Front Ends* da RPC de cima, outras 6 FPGAs supervisionavam os sinais das *Front Ends* da RPC de baixo e a 13^a FPGA era responsável por definir o processo de coincidência entre RPCs acionando o PREC e a UB (eletrônica do tanque de Auger).

Nesta configuração a FPGA principal da *Mother Board* era responsável pelo gerenciamento da respectiva aquisição de dados das *Front Ends* adquirindo em paralelo por

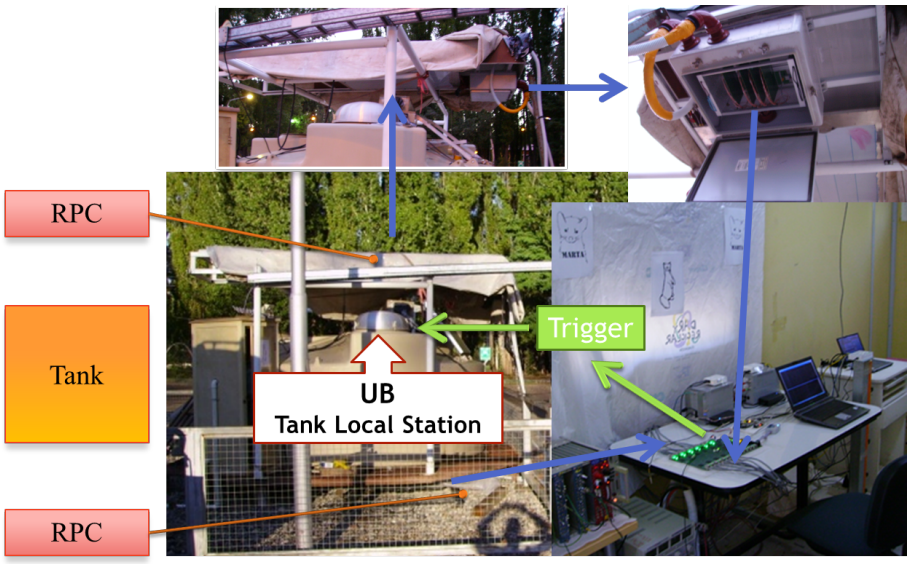


Figure 3.13: Arranjo experimental do hodoscópio do tanque Gianni Navarra.

SPI (*Serial Peripheral Interface*) o GPS *timestamp* do evento coincidente na eletrônica dos tanques de Auger.

Os valores de *threshold* (tensão de threshold, a partir da qual é gerado um disparo no discriminador sempre que o potencial de entrada excede esse valor) dos 96 canais instrumentados (48 canais por RPC) são programados/definidos por um barramento I2C (*Inter-Integrated Circuit*), conectado ao notebook conforme representado na figura 3.14.

Para o sucesso deste experimento foi necessário operar a UB (eletrônica do tanque de Auger) de um modo não standard, onde a mesma estava preparada para ter uma taxa de 100 HZ de eventos T1, com uma taxa de eventos solicitados para o exterior (CDAS) de 100 a 200 por dia.

Operando neste novo modo de *trigger* invertido (*trigger* externo) atingíamos taxas muito mais elevadas não sendo rentável a aquisição dos sinais do 3 PMTs individual por evento, tendo sido elaborado um programa interno no sistema operacional OS-9000 a correr no *powerPC* da UB (eletrônica do tanque de Auger) controlado por um script em kermit, o qual guardava e compactava os dados dos sinais a cada 80 eventos, transferindo por kermit os mesmos para o notebook de aquisição.

Devido as variações de eficiência das fotomultiplicadoras (PMTs) com a temperatura e as grandes variações térmicas (20°) ao longo do dia em Malargüe-Mendoza-Argentina, foi necessário implementar um script em Kermit capaz de modificar o modo de operação da UB a cada 800 eventos, realizando a recalibração das três fotomultiplicadoras (PMTs), adquirindo os respectivos histogramas de calibração, reinicializando todo os sistema operacional, efetuando novo login, lançando nova aquisição após obtenção de sinal de GPS.

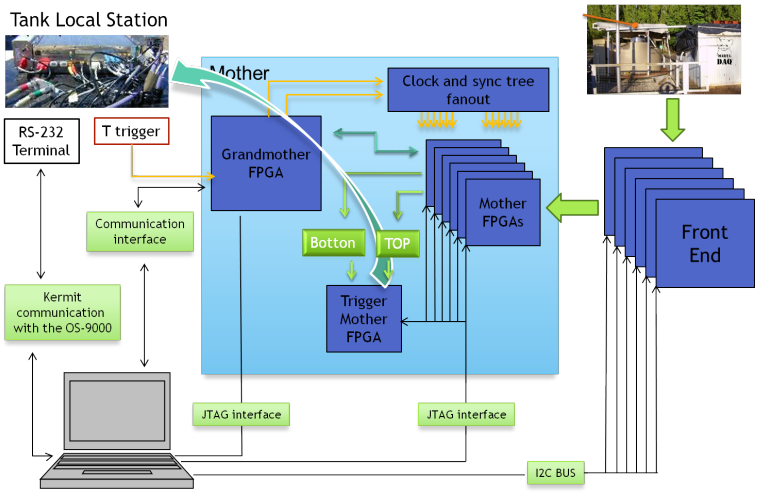


Figure 3.14: Diagrama de blocos do Hodoscópio Gianni Navarra.

O script de controle de todo o sistema teve de ser implementado com inúmeras verificações de estado, para obter um sistema de redundância o mais eficiente possível, devido à falta de estabilidade da UB (eletrônica do tanque de Auger) trabalhando neste modo, com uma taxa muito superior a padrão utilizada no arranjo experimental dos detectores de superfície (SD) do AUGER.

3.2.2 Hodoscópio CBPF

Após comprovado o conceito e a robustez dos detetores (RPCs) do projeto MARTA, para minimizar a instrumentação e os consumos energéticos da mesma, se passou para uma solução embarcada composta por *Front Ends* com o ASIC MAROC e uma unidade central (central unit) composta por uma FPGA (Cyclone V) com um processador ARM embarcado. Tendo sido este o primeiro arranjo experimental do projeto MARTA a realizar aquisições com com 128 canais (instrumentado por completo duas RPCs).

Foi implementado um *OR* lógico das 64 pads (3.15) em cada *Front End* MAROC, que é enviado para a unidade central (*Cental Unit*) e gera o Tr (*trigger* rápido com identificador de evento de 24 bits) por cada evento em coincidência (figura 3.16).

Em conjunto com o *trigger* rápido é enviado um identificador de evento (ID) que é gerado na unidade central (*Central Unit*), para identificação individual dos eventos, permitindo o cruzamento de dados entre detectores.

Após receber o *trigger*, as Front-Ends suspendem a aquisição e mantêm em memoria os valores das amostras contidas na FIFO, aguardando que a unidade central efetue a sua leitura e envie o comando para iniciar uma nova aquisição.

Com este novo arranjo experimental (Figura 3.17)foi possivel baixar os consumos de energia significativamente, possibilitando a sua futura implementação em campo, com uma alimentação por um sistema de paineis fotovoltaicos de baixo custo.

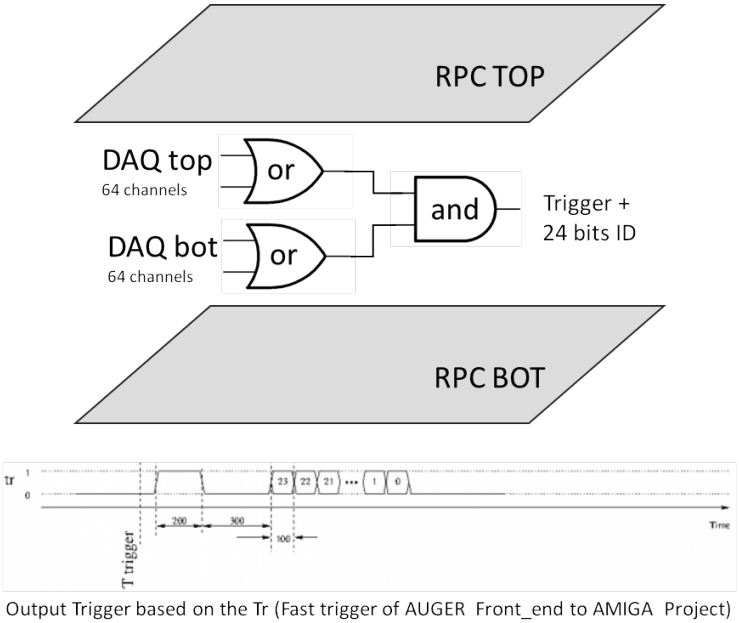


Figure 3.15: Diagrama de blocos do modúlo de coincidencias e *trigger* do Hodoscópio do CBPF; em baixo: estrutura do pacote de dados enviado com *trigger* rápido e identificador (ID) de 24 bits [8].

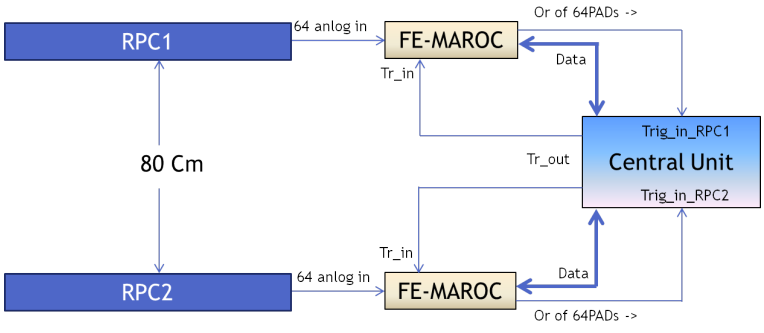


Figure 3.16: Diagrama de blocos de *trigger*.

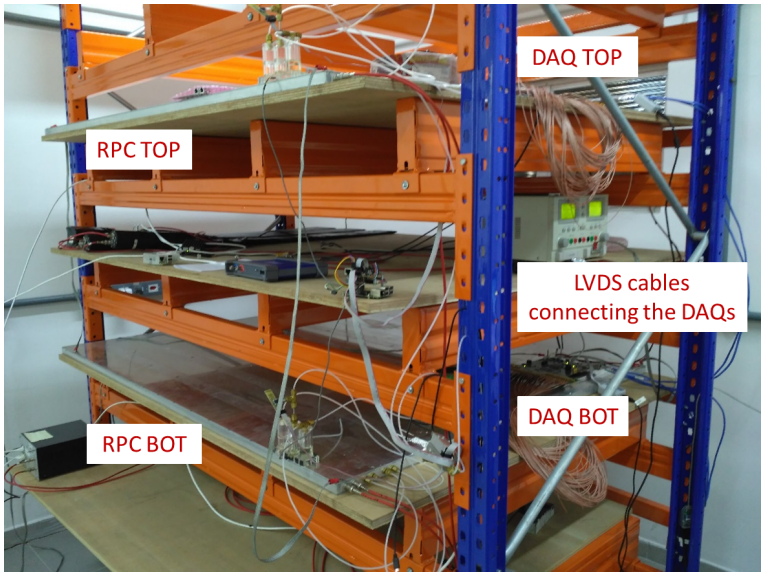


Figure 3.17: Arranjo experimental do hodoscópio do CBPF.

3.2.3 Hodoscópio AB AUGER

Com a chegada de um novo sistema de upgrade de Auger (denominado Auger-Prime), que consiste em instalar um enorme cintilador em cima de cada um dos 1600 tanques do Auger (detectores de superfície), surgiu a necessidade interna na colaboração internacional de Auger, em possuir um instrumento capaz de validar o estado de cada um destes cintiladores (denominados de SSD). Importante levar em consideração que eles são produzidos em países diferentes e são suscetíveis a um mal manuseamento durante o processo de transporte até ao observatório Pierre Auger.

Os primeiros testes foram realizados numa estante de testes do projecto MARTA dentro da AB (*Assembly Build*) do observatório Pierre Auger, onde foi introduzido um pequeno cintilador de testes entre as duas RPCs, conforme ilustrado na figura 3.18.

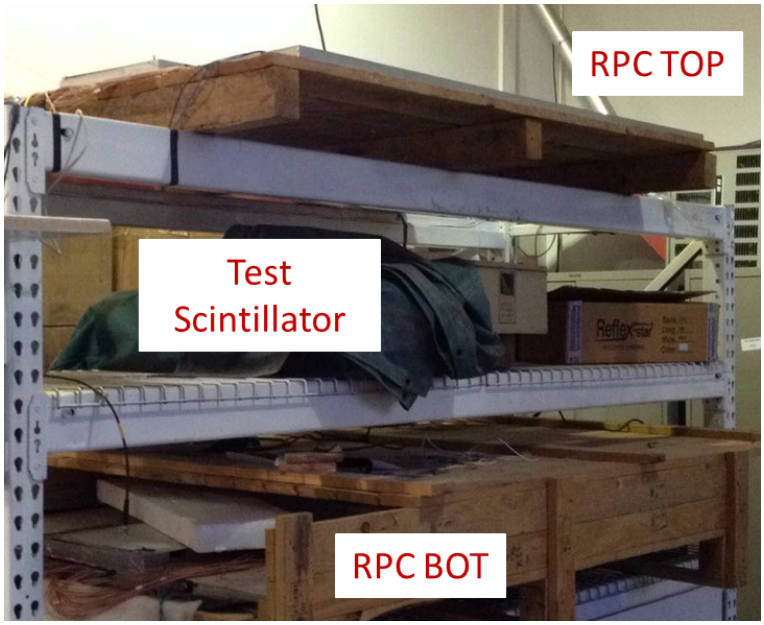


Figure 3.18: Primeiro protótipo de testes do Hodoscópio AB AUGER.

A instrumentação deste primeiro arranjo experimental de teste de conceito, foi transferida do hodoscópio desenvolvido no CBPF para este novo arranjo experimental. Tendo sido o sinal da fotomultiplicadora foi adquirido por um picoscope, e o pulso de um simples *threshold* enviado diretamente para uma FPGA, a fim de ser possível validar a posição do cintilador em relação ao hodoscópio, conforme ilustrado na Figura 3.19.

Comprovado o conceito, foi montado um hodoscópio com dimensões para acolher um cintilador de upgrade de Auger, conforme ilustrado na Figura 3.20.

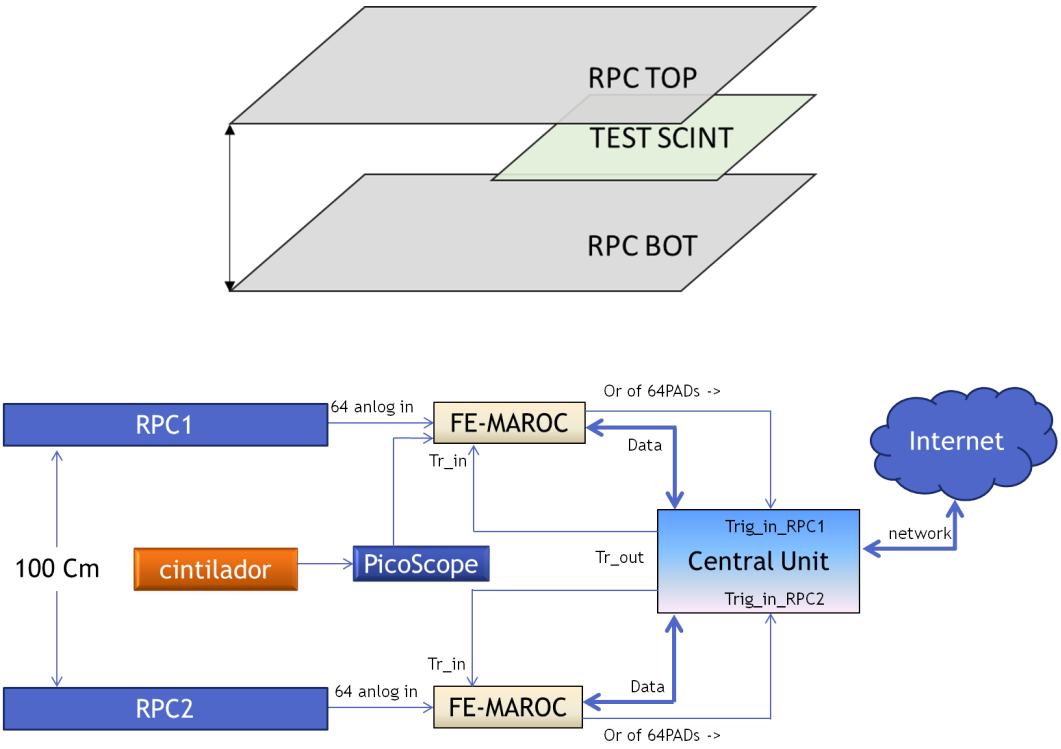


Figure 3.19: Acima: posicionamento do cintilador de testes; abaixo: Diagrama do primeiro protótipo de testes do Hodoscópio AB AUGER.

Figure 3.20: Acima: Princípio de conceito do Hodoscópio AB para testar os cintiladores do upgrade de Auger, abaixo: modulo SSD do upgrade de AUGER.

Chapter 4

Resultados

Esse capítulo detalha os programas desenvolvidos para a aquisição e análise dos dados do MARTA, premissas utilizadas, lógica de gatilho e comparações dos resultados com as simulações e previsões teóricas para o fluxo de raios cósmicos. Também é apresentada uma metodologia para caracterização e calibração das RPC's que foram fabricadas e caracterizadas no laboratório MARTA Rio para serem utilizadas em experimentos futuros, como o LATTES e AUGER.

4.1 Hodoscópio Gianni Navarra

O hodoscópio de múons instalado no tanque Gianni Navarra foi utilizado para estudar a calibração do VEM (*Vertical Equivalent Muon*). A calibração usada nos seus 1600 detectores de superfície de Auger é baseada na energia média depositada por um múon vertical atravessando o centro do tanque. Esta calibração é necessária para determinação precisa da energia depositada quando ocorre um chuveiro de raios cósmicos atmosféricos, sendo o VEM e os parâmetros restantes necessários para manter essa calibração em toda a faixa de energia e avaliação da qualidade do detector [35].

Para este estudo o hodoscópio foi posicionado (Figura 4.1) de modo a adquirir amostras das três fotomultiplicadoras (PMTs) da passagem (de single trace) de múons praticamente verticais o mais próximo possível do centro do tanque, adquirindo sequencialmente histogramas de calibração do tanque, sendo possível medirmos os valores presentes dos fatores de conversão usados na calibração VEM nos detectores de superfície(SD).

Visto não existir efeito directo de luz e a quantidade de luz de *Cherenkov* que atinge a fotomultiplicadora (PMT) depender principalmente do número de reflexões e da distancia do caminho da luz na água, é esperado que a resposta da fotomultiplicadora (PMT) aos múons verticais dependa principalmente da distância da trajetória do múon até à fotomultiplicadora PMT. Portanto, foi realizado o estudo da resposta individual das fotomultiplicadoras (PMTs) em função da sua distancia à trajectória do múon.

Foi observada a tendência na diminuição do sinal com o aumento da distância em todas fotomultiplicadoras (PMTs), conforme ilustrado na figura 4.3, onde estão plotadas



Figure 4.1: Posicionamento da RPCs no hodoscópio Gianni Navarra

as distribuições dos picos de carga do VEM em função da distância às fotomultiplicadoras (PMTs), tanto dos dados adquiridos, como dos simulados e a respectiva relação entre ambos, onde as barras de erro correspondem às incertezas nos ajustes.

Na primeira fotomultiplicadora (PMT 1) foram observados três grupos de pontos com aproximadamente o mesmo valor e saltos entre os grupos, que correspondem às três linhas de PADs da RPC inferior que são quase perpendiculares à direcção da RPC para a fotomultiplicadora (PMT 1) (Figura 4.2). Este fato é reproduzido na simulação, o que indica que o sinal é sensível ao ponto de saída do múon do tanque. Nesta fotomultiplicadora (PMT) foi observado uma mudança sistemática entre dados adquiridos e a simulação, onde os dados adquiridos estão em média 3% superiores à simulação. Não tendo sido encontrada nenhuma explicação para essa diferença, com exceção que esta fotomultiplicadora (PMT) tinha sido recentemente substituída, devendo a mesma ser submetida a mais testes.

Por sua vez na segunda fotomultiplicadora (PMT 2) se observou dois grupos de pontos com um salto entre ambos, que corresponde às duas linhas de PADs aproximadamente perpendiculares à direcção da RPC para a fotomultiplicadora (PMT 2), apresentando uma diferença relativa media inferior a 1% entre os dados adquiridos e simulados, uma excelente concordância tambem observada na terceira fotomultiplicadora (PMT 3). No entanto, esta última fotomultiplicadora (PMT 3) apresentou uma resposta linear com a distância, porque os pontos de impacto não seguem nenhum dos padrões de direção particular.

Os resultados demonstraram que o simulador offline de Auger tem uma excelente resposta ao descrever os dados calibrados do VEM para o nível percentual, incluindo seu valor absoluto em trajetórias de múons específicas e diferenças finas entre trajetórias

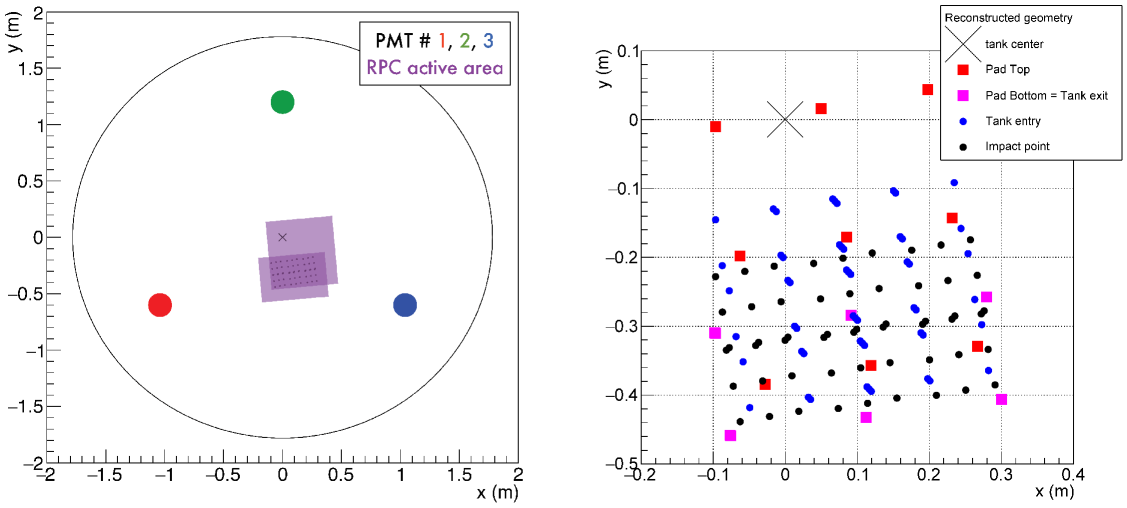


Figure 4.2: Esquerda: Vista do posicionamento das RPCs no Hodoscópio. Direita: A geometria da reconstrução das 54 trajetórias de múons possíveis a partir da reconstrução de 9 PADs da RPC superior e 6 PADs da RPC inferior, assumindo o centro das PADs [9].

muito próximas, com excepção da primeira fotomultiplicadora (PMT 1), que apresentou um desvio de 3%, efeito que introduz uma pequena diferença entre o resultado observado e o simulado, conforme mostrado na Figura 4.4. Esse efeito não é traduzido, dada a incerteza do método, na determinação do fator de conversão.

Na Figura 4.5 é demonstrado o resultado da comparação da soma dos dados adquiridos nas fotomultiplicadoras (PMTs) em concordância com a simulação do offline inferior a 1%.

Os resultados correspondem aos medidos inicialmente em Auger, mostrando que não houve efeito de envelhecimento na calibração do VEM deste tanque. A comparação dos dados adquiridos com a simulação offline, mostram uma concordância dentro de 1% para a duas ultimas fotomultiplicadoras (PMT 2 e PMT 3) e apresenta uma diferença sistemática de 3% em relação à terceira fotomultiplicadora (PMT 1), que foi substituída por apresentar problemas [9].

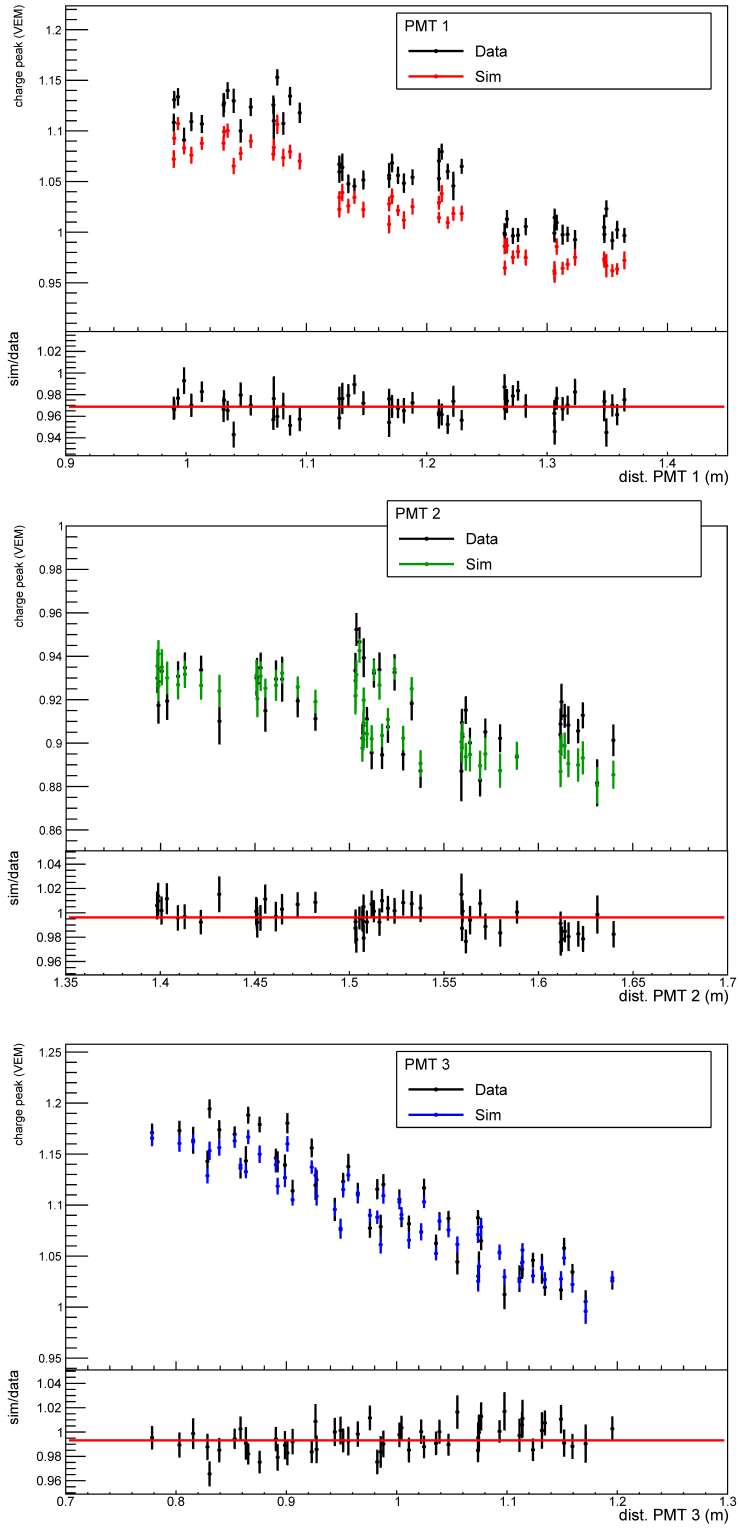


Figure 4.3: Distribuições do picos de carga do VEM em função da distância das fotomultiplicadoras (PMTs) a trajectória do múon [9].

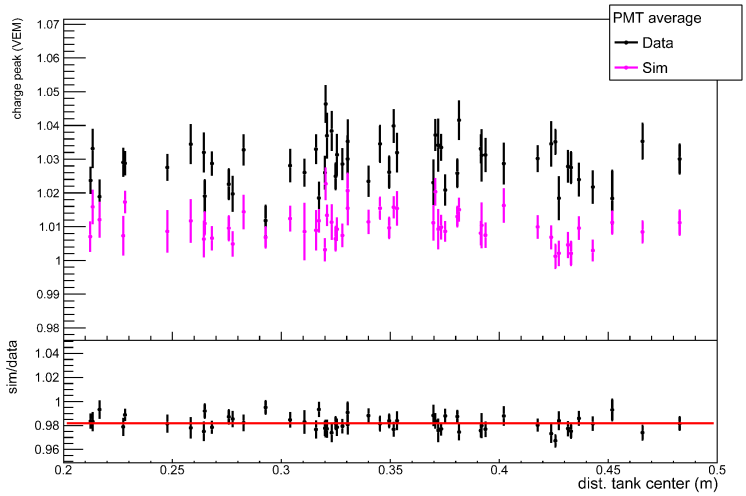


Figure 4.4: Distribuição do pico da carga do VEM da média das fotomultiplicadoras (PMTs) [9].

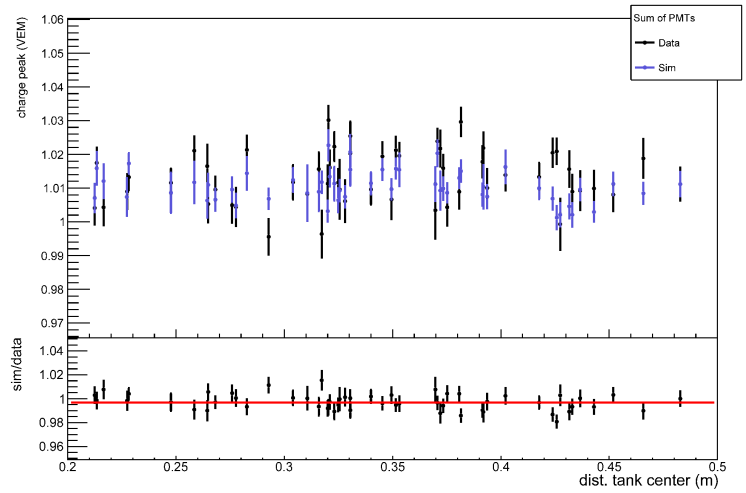


Figure 4.5: Distribuição do pico da carga do VEM da soma das fotomultiplicadoras (PMTs) [9].

4.2 Hodoscópio CBPF

O hodoscópio de múons desenvolvido e instalado no laboratório de MARTA no CBPF, foi utilizado para desenvolvimento de firmware, testes de hardware, medição de taxas de múons e distribuições angulares. Os frutos deste meu desenvolvimento foram utilizados para estudos de princípios fundamentais, para além de estudos de duas dissertações de mestrado de alunos do programa de física académica, formação de três bolsistas de iniciação científica e três cursos na escola avançada de física experimental do CBPF. Este foi o primeiro hodoscópio com aquisição de 128 canais, com duas *Front Ends* com o ASIC MAROC, conectadas a uma unidade central (*central unit*), desenvolvida neste hodoscópio, afim de poder atender as necessidades do projecto MARTA e Auger.

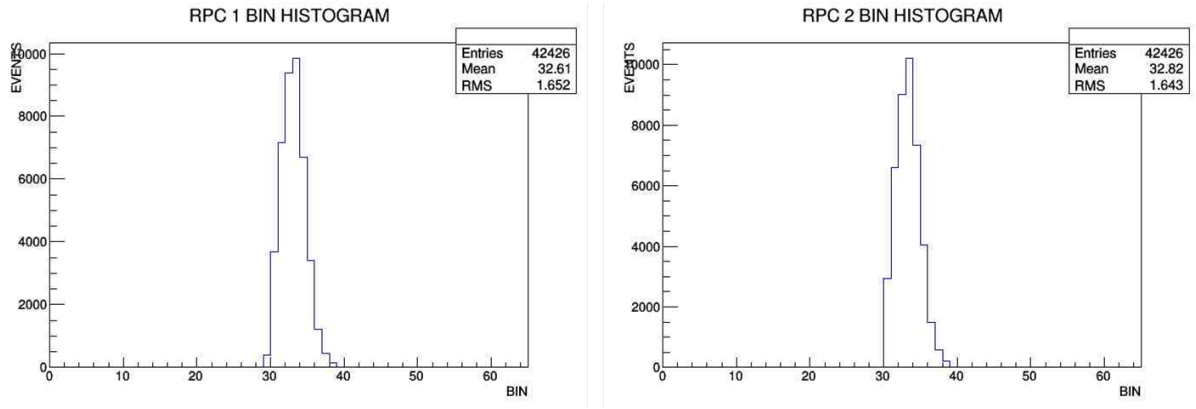


Figure 4.6: Número de eventos por bin para cada RPC em coincidência

.

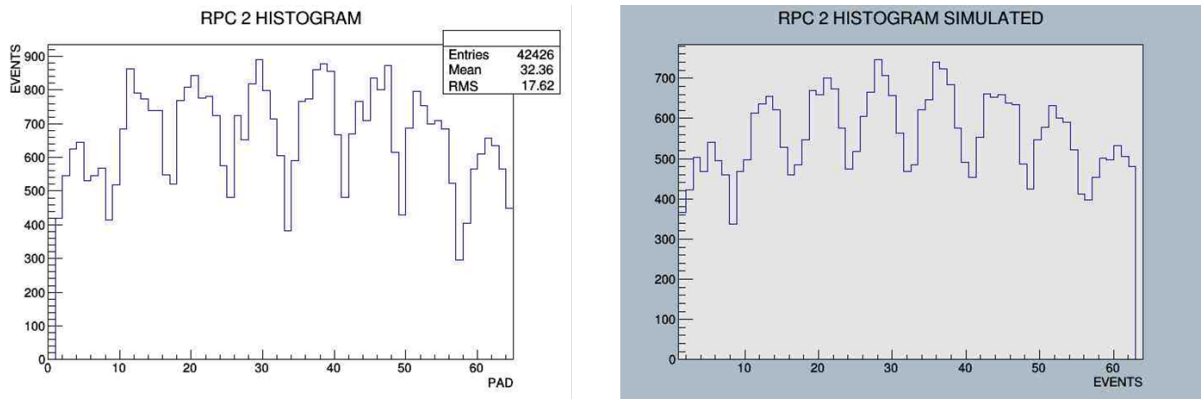


Figure 4.7: Número de eventos por PAD (dados adquiridos Vs simulação).

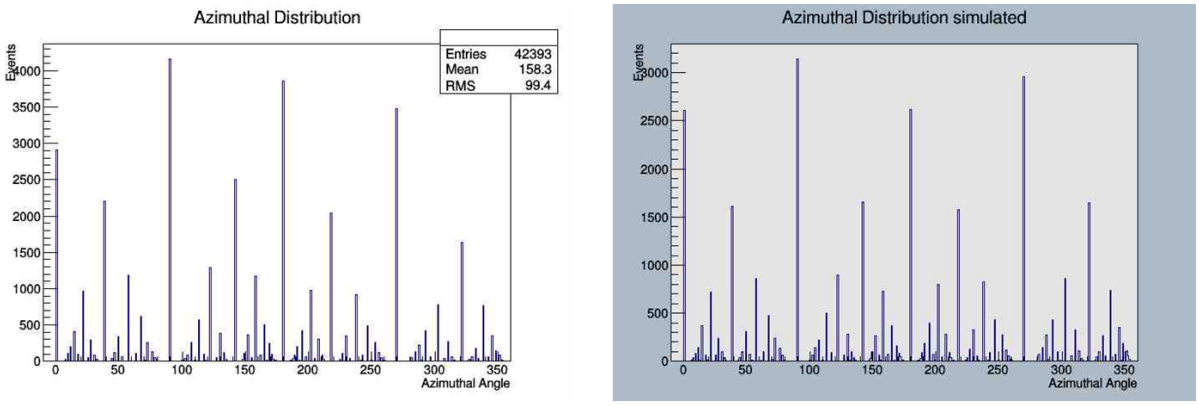


Figure 4.8: Distribuição azimutal do hodoscópio CBPF (dados adquiridos Vs simulação).

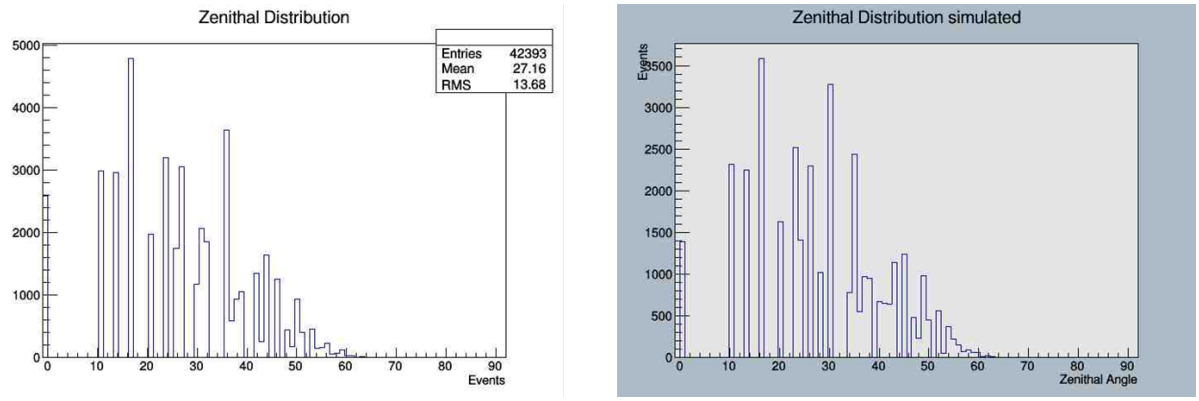


Figure 4.9: Distribuição zenital do hodoscópio CBPF (dados adquiridos Vs simulação).

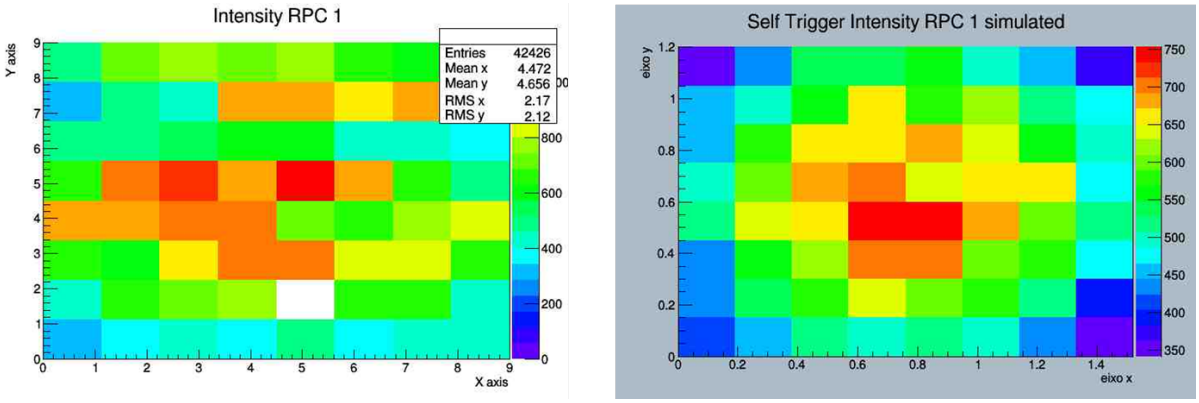


Figure 4.10: Gráfico de intensidade por PAD na RPC1 em coincidência (dados adquiridos Vs simulação).

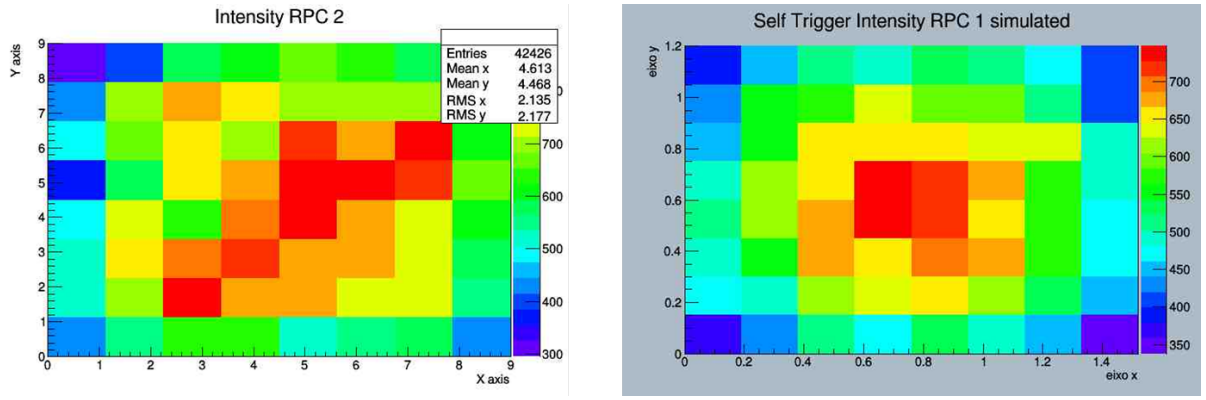


Figure 4.11: Gráfico de intensidade por PAD na RPC2 em coincidência (dados adquiridos Vs simulação).

4.3 Hodoscópio AB Auger

O hodoscópio de múons (figura 4.12) instalado na AB (*Assembly Building*) do observatório Pierre Auger, foi utilizado como prova de conceito, para a realização de medições de controle de qualidade dos cintiladores que fazem parte do *upgrade* de AUGER, detectores do projeto denominado de *AugerPrime* [36]. Este hodoscópio será um equipamento necessário para realizar o controle de qualidade dos novos detectores, após a sua chegada ao observatório.

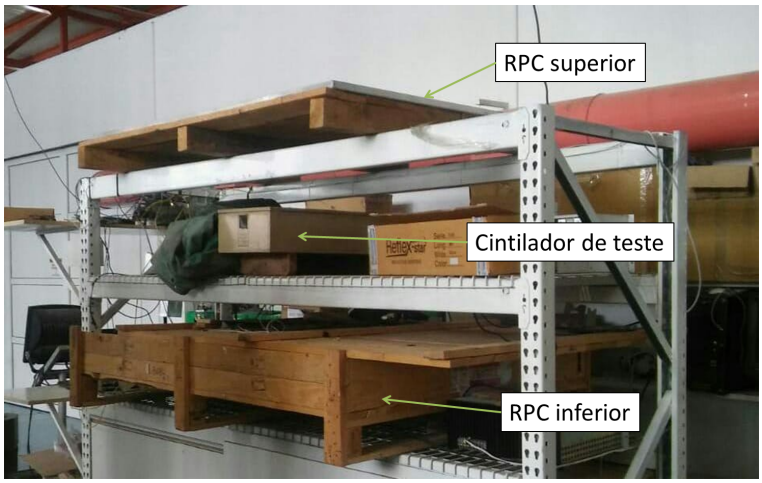


Figure 4.12: Primeiro Hodoscópio de testes instalado na AB (*Assembly Building*) de Auger. Na prateleira superior e inferior foram instaladas RPCs sobre uma palete de madeira. Na prateleira do meio foi colocado um pequeno cintilador para testes, condicionado numa caixa de madeira.

Com as duas RPCs alinhadas nas coordenadas x e y, a uma distância de 107 cm na coordenada z, se realizou uma primeira aquisição para testar o arranjo experimental. Como primeiro teste, foi feita uma aquisição em *self trigger* (*trigger* automático), entre as duas RPCs. Sempre que existia pelo menos uma PADs activa em simultâneo em cada RPC, a unidade de central disparava um trigger, enviando o mesmo acompanhado de um indentificador para cada *Front Ends* das duas RPC, interrompendo a memória FIFO. Sempre que as *Front Ends* recebiam um trigger interrompiam o enchimento da memória FIFO, aguardando pela leitura dos dados, realizada pelo computador de aquisição via USB. Com estes primeiros dados se realizou uma primeira analise da distribuição angular (figura 4.13), onde se obteve uma distribuição azimutal e zenital (figura 4.14) compatível com a simulação e com os resultados do Hodoscópio CBPF. Esta primeira análise demonstrou o bom funcionamento do hodoscópio e do disparo do sinal de trigger.

Após o teste de funcionamento do hodoscópio, se adicionou o sinal da fotomultiplicadora (PMT) no PicoScope, ligando a saída de trigger do mesmo a uma entrada digital da FPGA Master, afim de ser possível guardar o estado de detecção de sinal do cintilador pela fotomultiplicadora (PMT). Com o cintilador posicionado (Figura 4.15) junta à ex-

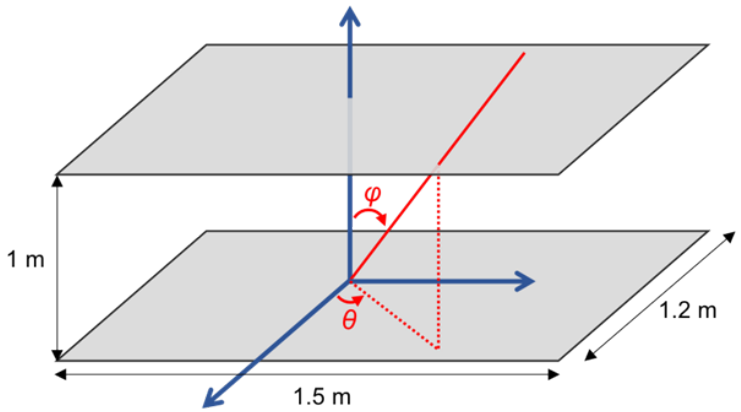


Figure 4.13: Distribuição angular ($\Phi - zenital, \Theta - azimutal$) do hodoscópio AB Auger [8]

tremidade central das duas RPCs, se realizou nova aquisição, podendo se obter detecção do cintilador de teste (figura 4.16) e o primeiro resultado preliminar de prova de conceito para a realização de medições de controle de qualidade de cintiladores.

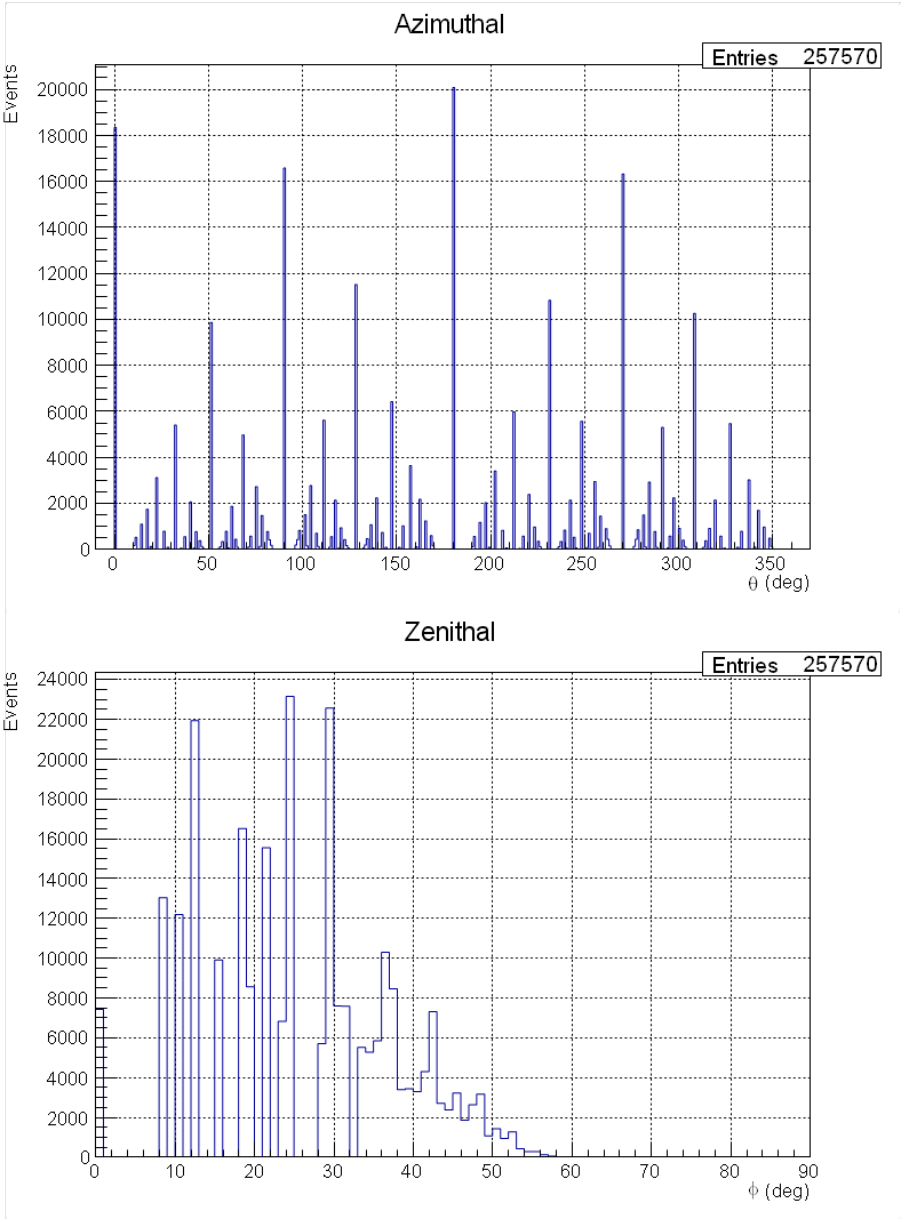


Figure 4.14: (cima): Distribuição azimutal do hodoscópio AB Auger; (em baixo): Distribuição zenital do hodoscópio AB Auger

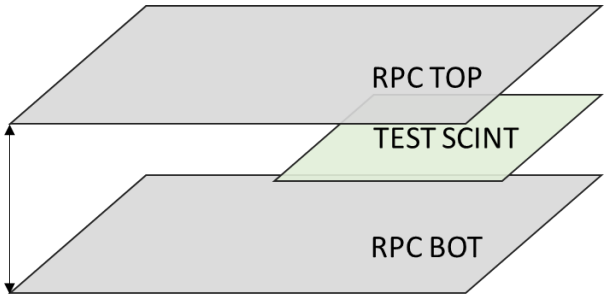


Figure 4.15: Diagrama de posições do primeiro protótipo de testes do Hodoscópio AB Auger

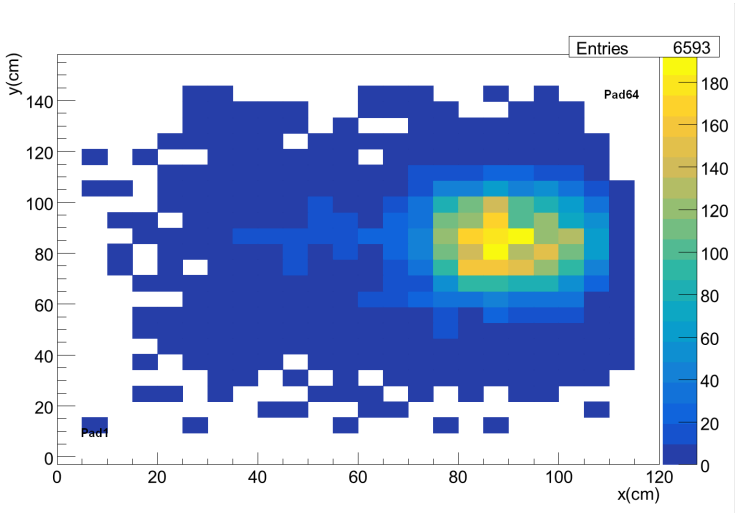


Figure 4.16: Detecção da posição/eficiencia do cintilador de testes no hodoscópioAB Auger

Chapter 5

Conclusões

Apresentamos nesta secção os resultados e conclusões gerados por essa dissertação. Os três arranjos experimentais, desenvolvidos e implementados, foram de extrema importância pois com eles foi possível o desenvolvimento de *firmware* e testes de *hardware*. Para além da medição da taxas de múons e distribuição angulares para estudos de princípios fundamentais no CBPF, foi possível medir e comprovar que a escala de energia absoluta nos detetores de superfície de Auger, caracterizada pelo chamado *Vertical Equivalent Muon* (VEM) – que é a energia média depositada por múons penetrantes na vertical atravessando o centro do tanque – não sofreu envelhecimento (no detetor Gianni Navarra) ao longo dos últimos dez anos.

Este arranjo experimental foi vantajoso pelo fato que o mesmo permitiu o estudo de diferentes tipos de múons e ponto de impacto, permitindo que a colaboração possa testar com precisão, de modo *offline*, o sistema de simulação dos detectores de superfície (SD). Com o objetivo de estudar a calibração do VEM e como ela pode afetar o sinal dos detetores de superfície (SD), foi realizada uma avaliação da carga calibrada do VEM, usando os valores padrão dos fatores de conversão. Os resultados correspondem com os medidos inicialmente em Auger, mostrando que não houve efeito de envelhecimento na calibração do VEM deste tanque. A comparação dos dados adquiridos com a simulação offline, mostram uma concordância dentro de 1% para a duas últimas fotomultiplicadoras (PMT 2 e PMT 3) e apresenta uma diferença sistemática de 3% em relação à terceira fotomultiplicadora (PMT 1), que foi substituída por apresentar problemas [9].

O último arranjo experimental desenvolvido (Hodoscópio AB AUGER), será de grande importância para a colaboração internacional AUGER, pois a partir dele estamos a desenvolver e a instalar um equipamento para testar os novos detetores do projeto de atualização, o Auger Prime.

Bibliography

[1] Alexander Aab et al. The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 798:172–213, 2015.

[2] Petr Nečesal et al. The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory. *Journal of Physics: Conference Series*, 293:012036, apr 2011.

[3] Ronald C. Shellard. First results from the Pierre Auger Observatory. *Braz. J. Phys.*, 36:1184–1193, 2006.

[4] F. Fenu. The cosmic ray energy spectrum measured using the Pierre Auger Observatory. *Proc. of Science (ICRC2017)*, ICRC2017:486, 2017.

[5] P. Abreu et al. MARTA: a high-energy cosmic-ray detector concept for high-accuracy muon measurement. *Eur. Phys. J. C*, 78(4):333, 2018.

[6] N. Lesparre, J. Marteau, Y. Déclais, D. Gibert, B. Carlus, F. Nicollin, and B. Kergosien. Design and operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 1(1):33–42, April 2012.

[7] 2012. MAROC3 Datasheet - grupo Omega.

[8] Mendes, L. and et al. *Torre RPC para a atualização do Observatório Pierre Auger*, 2018. https://indico.cern.ch/event/719214/contributions/3082834/attachments/1695509/2728970/rpc_tower.pdf.

[9] P. Assis et al. *Results on the Gianni Navarra tank VEM calibration using a RPC muon hodoscope*. 2017.

[10] C.M. Porto. O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35:1 – 11, 12 2013.

[11] Alessandro De Angelis and Mário João Martins Pimenta. *Introduction to Particle and Astroparticle Physics: Questions to the Universe*. Springer, 2015.

[12] P. Assis et al. A large area TOF-tracker device based on multi-gap Resistive Plate Chambers. *JINST*, 11(10):C10002, 2016.

[13] D. Pacini. Penetrating radiation at the surface of and in water. *Nuovo Cim.*, 8:93–100, 1912.

[14] Per Carlson and Alessandro De Angelis. Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays. *Eur. Phys. J. H*, 35:309–329, 2010.

[15] V. Hess. Observations of the penetrating radiation on seven ballon flights. *Physik. Zeitschr.*, 13:1084, 1912.

[16] Brigitte Falkenburg and Wolfgang Rhode, editors. *From Ultra Rays to Astroparticles: A Historical Introduction to Astroparticle Physics*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2012.

[17] Pierre Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, and A. Freon Robley. Extensive cosmic ray showers. *Rev. Mod. Phys.*, 11:288–291, 1939.

[18] C.M.G. Lattes, H. Muirhead, G.P.S. Occhialini, and C.F. Powell. Processes involving charged mesons. *Nature*, 159:694–697, 1947.

[19] C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, and C.F. Powell. Observations on the tracks of slow mesons in photographic emulsions. 1. *Nature*, 160:453–456, 1947.

[20] C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, and C.F. Powell. Observations on the tracks of slow mesons in photographic emulsions. 2. *Nature*, 160:486–492, 1947.

[21] E. Gardner and C.M.G. Lattes. Production of mesons by the 184-inch Berkeley Cyclotron. *Science*, 107:270–271, 1948.

[22] J. Burfening, E. Gardner, and C.M.G. Lattes. Positive mesons produced by the 184-inch Berkeley Cyclotron. *Phys. Rev.*, 75:382–387, 1949.

[23] Alexander Aab et al. Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} ev. *Science*, 357(6537):1266–1270, 2017.

[24] M.S. Longair, editor. *High-energy astrophysics. Vol. 1: Particles, photons and their detection*. 1992.

[25] Giuseppe Di Sciascio. Detection of cosmic rays from ground: an introduction. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1263(1):012002, 2019.

[26] Luis A. Anchordoqui. Ultra-high-energy cosmic rays. *Phys. Rep.*, 801:1–93, 2019.

[27] Andrei Kounine and Samuel Ting. The latest results on high energy cosmic rays. *PoS*, ICHEP2018:732, 2019.

[28] Kunihiro Morishima et al. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552(7685):386–390, 2017.

[29] I. Allekotte et al. The Surface Detector System of the Pierre Auger Observatory. *Nucl. Instrum. Meth.*, A586:409–420, 2008.

[30] Kenneth Greisen. End to the cosmic ray spectrum? *Phys. Rev. Lett.*, 16:748–750, 1966.

[31] G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin. Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *JETP Lett.*, 4:78–80, 1966.

[32] http://stratocat.com.ar/stratopedia/221.htm.

[33] Pierre Billoir. *Possible ageing effects on the VEM calibration and the attenuation curve*, volume 2013-024.

[34] Pierre Billoir. *Aging effects on the calibration of the Surface Detector through the Vertical Equivalent Muon*, volume 2015-047. 2015.

[35] J. Abraham et al. Calibration and monitoring of the Pierre Auger Observatory. *arXiv*, 0906.2358, 2009.

[36] Alexander Aab et al. The Pierre Auger Observatory Upgrade - Preliminary Design Report. *arXiv*, 1604.03637, 4 2016.

Anexo A - Publicações

Artigos completos publicados em periódicos:

Results on the Gianni Navarra tank VEM calibration using a RPC muon hodoscope. **P.Assis, A.Blanco, M.Cerda, R.Conceição, M.Ferreira, P.Ferreira, P.Fonte, L.Lopes, L.Mendes, M.Pimenta, R.Sarmento, R.Sato, R.Shellard, B.Tome, H.Wolters.** s.l. : Auger Collaboration, 2017, Vols. GAP-2017-027

Long term experience in Autonomous Stations and production quality control. **LOPES, L. ; ALVES, A.B. ; ASSIS, P. ; BLANCO, A. ; CAROLINO, N. ; CERDA, M.A. ; CONCEIÇÃO, R. ; CUNHA, O. ; DOBRIGKEIT, C. ; FERREIRA, M. ; FONTE, P. ; DE ALMEIDA, L. ; LUZ, R. ; MARTINS, V.B. ; MENDES, L. ; NOGUEIRA, J.C. ; PEREIRA, A. ; PIMENTA, M. ; SARMENTO, R. ; DE SOUZA, V. ; TOMÉ, B.** . Journal of Instrumentation JCR, v. 14, p. C07002-C07002, 2019.

MARTA: a high-energy cosmic-ray detector concept for high-accuracy muon measurement. **ABREU, P. ANDRINGA, S. ASSIS, P. BLANCO, A. MARTINS, V. BARBOSA BROGUEIRA, P. CAROLINO, N. CAZON, L. CERDA, M. CERNICCHIARO, G. COLALILLO, R. CONCEIÇÃO, R. CUNHA, O. DE ALMEIDA, R. M. DE SOUZA, V. DIOGO, F. DOBRIGKEIT, C. ESPADANAL, J. ESPIRITO-SANTO, C. FERREIRA, M. FERREIRA, P. FONTE, P. GIACCARI, U. GONÇALVES, P. GUARINO, F. , *et al.*;** EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C JCR, v. 78, p. 78, 2018.

Design and characterization of the PREC (Prototype Readout Electronics for Counting particles). **ASSIS, P. ; BROGUEIRA, P. ; FERREIRA, M. ; LUZ, R. ; MENDES, L.** Journal of Instrumentation JCR, v. 11, p. T08004-T08004, 2016.

Outdoor field experience with autonomous RPC based stations. **LOPES, L. ; ASSIS, P. ; BLANCO, A. ; CAROLINO, N. ; CERDA, M.A. ; CONCEIÇÃO, R. ; CUNHA, O. ; FERREIRA, M. ; FONTE, P. ; LUZ, R. ; MENDES, L. ; PEREIRA, A. ; PIMENTA, M. ; SARMENTO, R. ; TOMÉ, B.** Journal of Instrumentation JCR, v. 11, p. C09011-C09011, 2016

A large area TOF-tracker device based on multi-gap Resistive Plate Chambers. **ASSIS, P. ; BERNARDINO, A. ; BLANCO, A. ; CLEMÊNCIO, F. ; CAROLINO, N. ; CUNHA, O. ; FERREIRA, M. ; FONTE, P. ; LOPES, L. ; LOUREIRO, C. ; LUZ, R. ; MENDES, L. ; MICHEL, J. ; NEISER, A. ; PEREIRA, A. ; PIMENTA, M. ; SHELLARD, R. ; TRAXLER, M.** . Journal of Instrumentation JCR, v. 11, p. C10002-C10002, 2016.

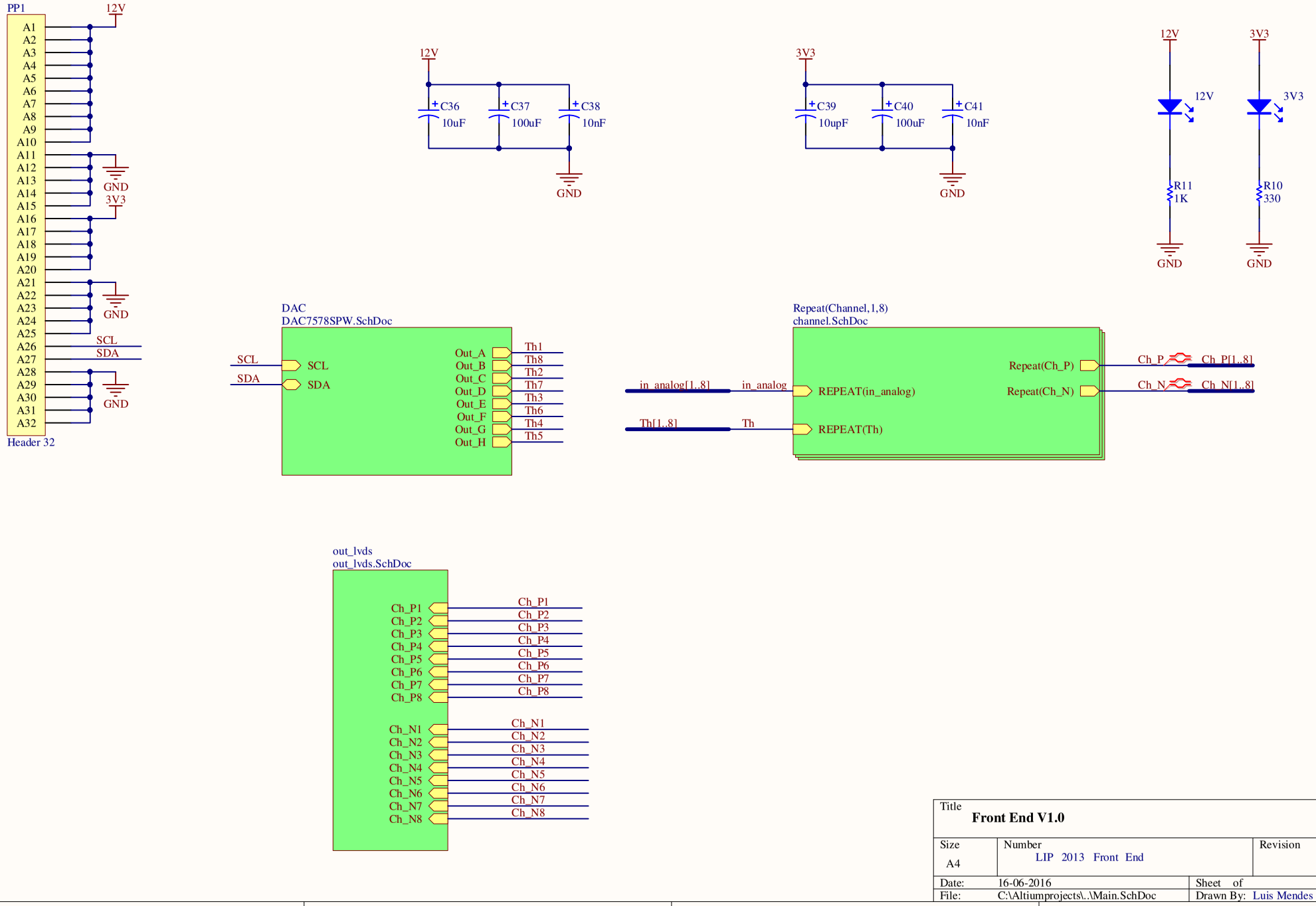
Resistive Plate Chambers for the Pierre Auger array upgrade. **LOPES, L. ; ASSIS, P. ; BLANCO, A. ; CERDA, M.A. ; CAROLINO, N. ; CUNHA, O. ; FERREIRA, M. ; FONTE, P. ; MENDES, L. ; PALKA, M. ; PEREIRA, A. ; PIMENTA, M. ; TOMÉ, B**. Journal of Instrumentation JCR, v. 9, p. C10023-C10023, 2014.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos:

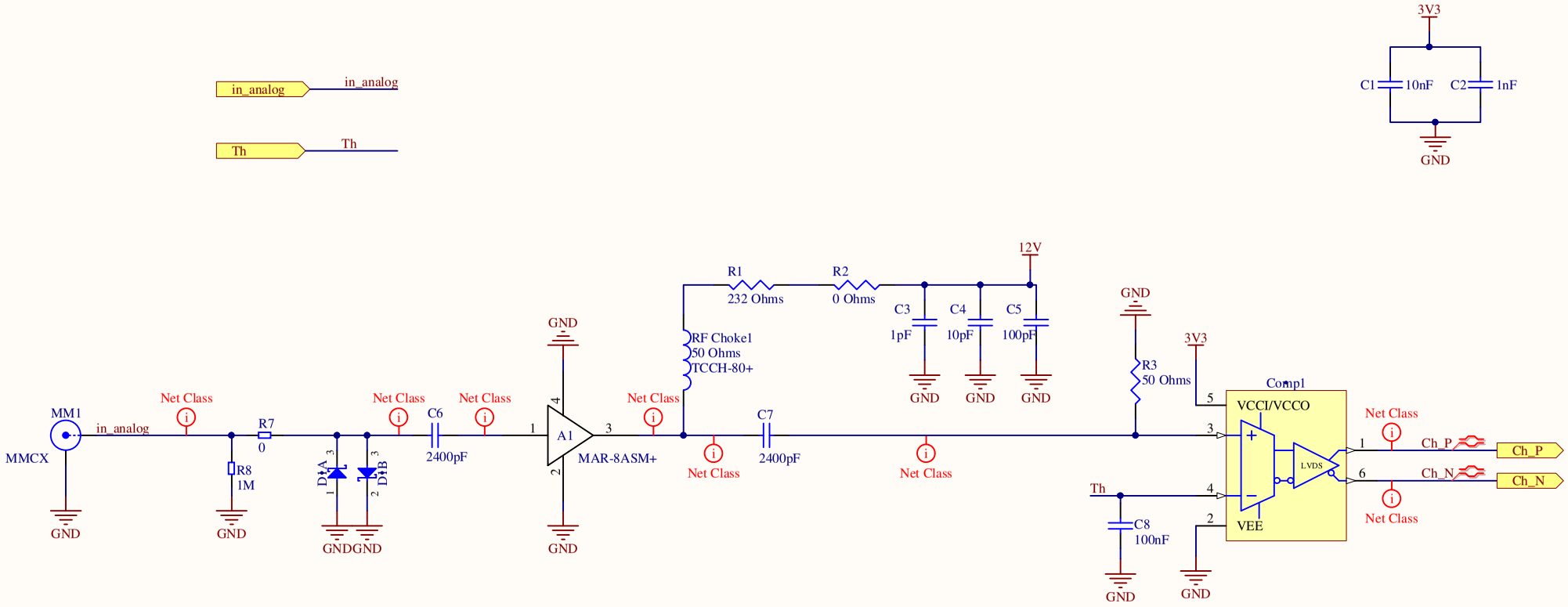
Autonomous RPCs for a Cosmic Ray ground array. In: 35th International Cosmic Ray Conference, 2017. **CONCEIÇÃO, RÚBEN ; BLANCO, ALBERTO ; PEREIRA, AMÉRICO ; TOMÉ, BERNARDO ; LOPES, LUIS ; MENDES, LUIS ; PIMENTA, MÁRIO ; FERREIRA, MIGUEL ; CAROLINO, NUNO ; CUNHA, ORLANDO ; FONTE, PAULO ; ASSIS, PEDRO ; LUZ, RICARDO ; SARMENTO, RAUL ; DOBRIGKEIT, CAROLA ; SHELLARD, RONALD ; MARTINS, VITOR ; DE SOUZA, VITOR.** Bexco. Proceedings of 35th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2017), 2017. p. 379.

Muon Array with RPCs for Tagging Air showers (MARTA). In: The 34th International Cosmic Ray Conference, 2016, **SARMENTO, RAUL ABREU, PEDRO ANDRINGA DIAS, SOFIA ASSIS, PEDRO BLANCO CASTRO, ALBERTO BROGUEIRA, PEDRO CAROLINO, N. CAZON, LORENZO CERDA, MARCOS CERNICCHIARO, GERALDO COLALILLO, ROBERTA CONCEIÇÃO, RÚBEN CUNHA, ORLANDO DIOGO, FRANCISCO ESPADANAL, JOÃO FERREIRA, MIGUEL FONTE, PAULO GIACCARI, UGO GONCALVES, PATRICIA GUARINO, FAUSTO LOPES, LUIS LUZ, RICARDO MAURIZIO, DANIELA MAZUR, PETER MENDES, LUIS , *et al.;*** The Hague. Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2015), 2015. v. 236. p. 629.

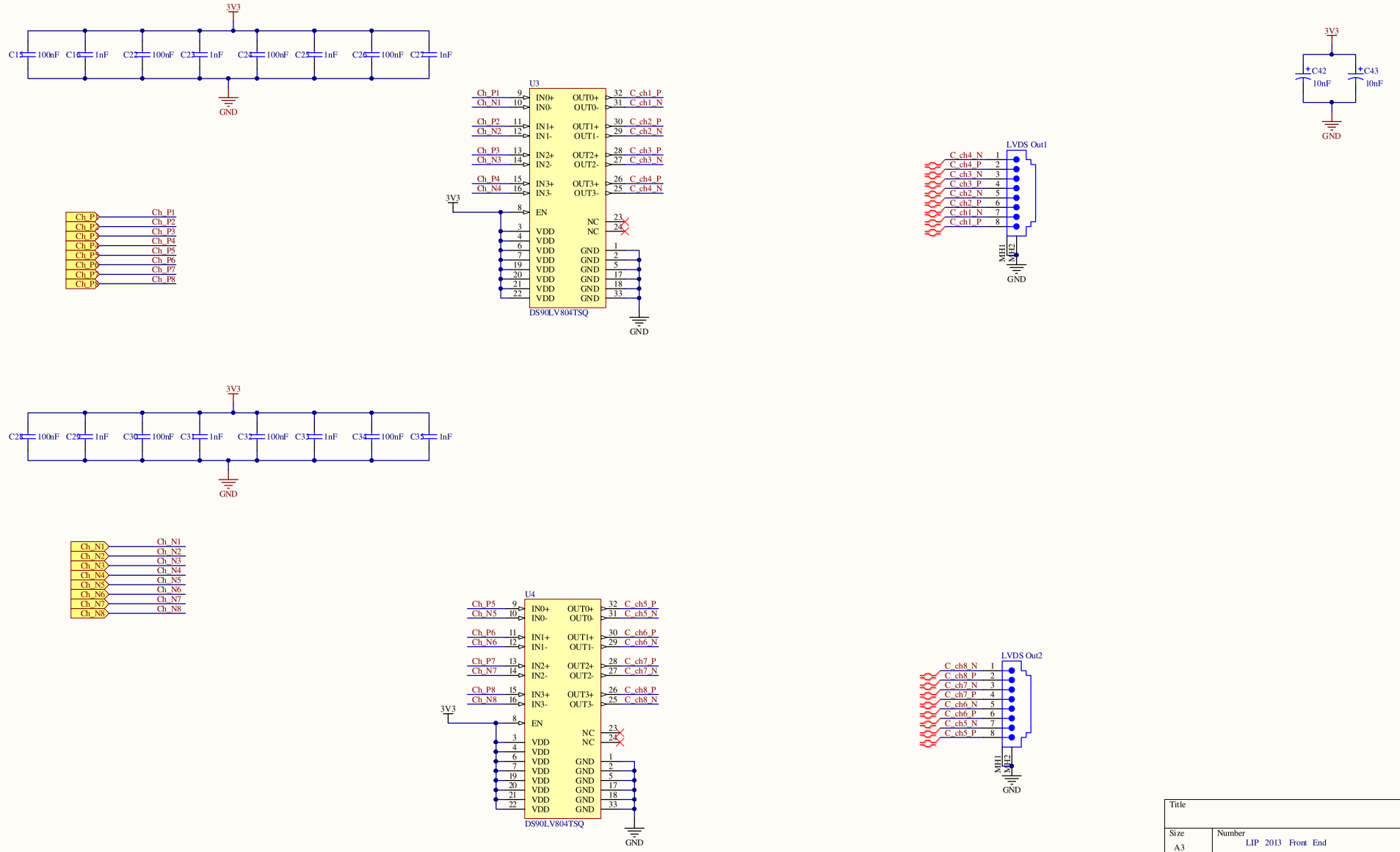
Anexo B - Esquemas do PREC

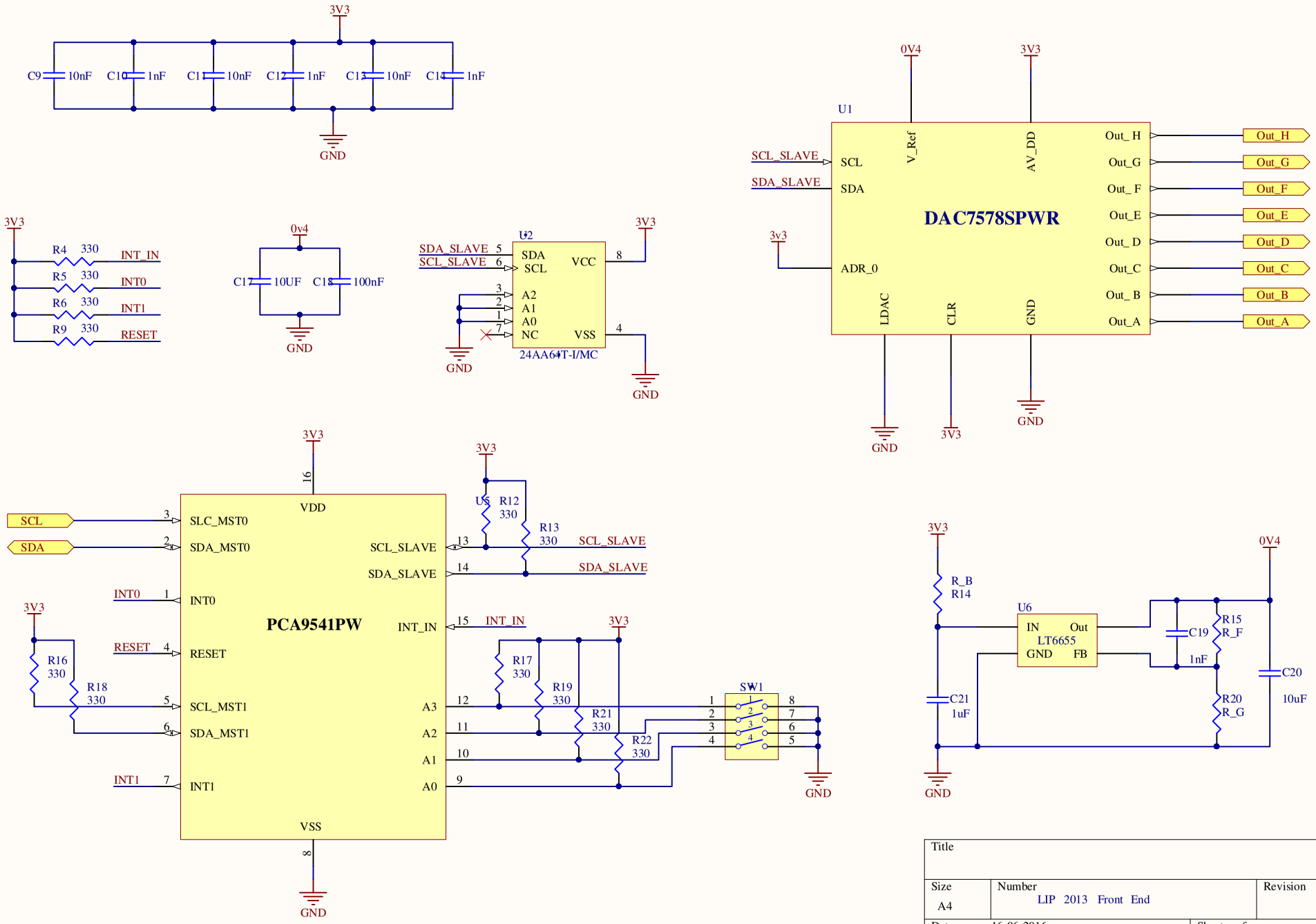


Title	**Front End V1.0**	
Size: A4	Number: LIP 2013 Front End	Revision:
Date: 16-06-2016		Sheet of
File: C:\Altiumprojects\..\Main.SchDoc		Drawn By: Luis Mendes



Title		
Size: A4	Number: LIP 2013 Front End	Revision:
Date: 16-06-2016		Sheet of
File: C:\Altiumprojects\..\channel.SchDoc		Drawn By: Luis Mendes


3V3
C15 100nF C16 1nF C22 100nF C23 1nF C24 100nF C25 1nF C26 100nF C27 1nF
GND
U3
Ch_P1 9 IN0+ OUT0+ 32 C_ch1_P
Ch_N1 10 IN0- OUT0- 31 C_ch1_N
Ch_P2 11 IN1+ OUT1+ 30 C_ch2_P
Ch_N2 12 IN1- OUT1- 29 C_ch2_N
Ch_P3 13 IN2+ OUT2+ 28 C_ch3_P
Ch_N3 14 IN2- OUT2- 27 C_ch3_N
Ch_P4 15 IN3+ OUT3+ 26 C_ch4_P
Ch_N4 16 IN3- OUT3- 25 C_ch4_N
3V3
8 EN
NC 23
NC 24
3 VDD
4 VDD
6 VDD GND 1
7 VDD GND 2
19 VDD GND 5
20 VDD GND 17
21 VDD GND 18
22 VDD GND 33
DS90LV804TSQ
GND
Ch_P Ch_P1
Ch_P Ch_P2
Ch_P Ch_P3
Ch_P Ch_P4
Ch_P Ch_P5
Ch_P Ch_P6
Ch_P Ch_P7
Ch_P Ch_P8
LVDS Out1
C_ch4_N 1
C_ch4_P 2
C_ch3_N 3
C_ch3_P 4
C_ch2_N 5
C_ch2_P 6
C_ch1_N 7
C_ch1_P 8
MH1
MH2
GND
3V3
C42 10nF
C43 10nF
GND
3V3
C28 100nF C29 1nF C30 100nF C31 1nF C32 100nF C33 1nF C34 100nF C35 1nF
GND
Ch_N Ch_N1
Ch_N Ch_N2
Ch_N Ch_N3
Ch_N Ch_N4
Ch_N Ch_N5
Ch_N Ch_N6
Ch_N Ch_N7
Ch_N Ch_N8
U4
Ch_P5 9 IN0+ OUT0+ 32 C_ch5_P
Ch_N5 10 IN0- OUT0- 31 C_ch5_N
Ch_P6 11 IN1+ OUT1+ 30 C_ch6_P
Ch_N6 12 IN1- OUT1- 29 C_ch6_N
Ch_P7 13 IN2+ OUT2+ 28 C_ch7_P
Ch_N7 14 IN2- OUT2- 27 C_ch7_N
Ch_P8 15 IN3+ OUT3+ 26 C_ch8_P
Ch_N8 16 IN3- OUT3- 25 C_ch8_N
3V3
8 EN
NC 23
NC 24
3 VDD
4 VDD
6 VDD GND 1
7 VDD GND 2
19 VDD GND 5
20 VDD GND 17
21 VDD GND 18
22 VDD GND 33
DS90LV804TSQ
GND
LVDS Out2
C_ch8_N 1
C_ch8_P 2
C_ch7_N 3
C_ch7_P 4
C_ch6_N 5
C_ch6_P 6
C_ch5_N 7
C_ch5_P 8
MH1
MH2
GND
Title
Size A3
Number LIP 2013 Front End
Revision
Date: 16-06-2016
Sheet of
File: C:\Altiumprojects\..\out_lvds.SchDoc
Drawn By: Luis Mendes


3V3
C9 10nF
C10 1nF
C11 10nF
C12 1nF
C13 10nF
C14 1nF
GND
0V4
3V3
U1
SCL_SLAVE
SDA_SLAVE
3v3
SCL
SDA
ADR_0
V_Ref
AV_DD
LDAC
CLR
GND
DAC7578SPWR
Out_H
Out_G
Out_F
Out_E
Out_D
Out_C
Out_B
Out_A
R4 330
R5 330
R6 330
R9 330
INT_IN
INT0
INT1
RESET
0v4
C17 10UF
C18 100nF
U2
SDA_SLAVE 5
SCL_SLAVE 6
SDA
SCL
VCC
A2
A1
A0
NC
VSS
24AA64T-I/MC
8
4
3
2
1
7
3V3
GND
3V3
16
VDD
SCL
SDA
3
2
SLC_MST0
SDA_MST0
SCL_SLAVE
SDA_SLAVE
13
14
INT0
1
INT0
RESET
4
RESET
SCL_MST1
5
6
SDA_MST1
INT1
7
INT1
INT_IN
15
A3
12
A2
11
A1
10
A0
9
VSS
8
PCA9541PW
R12 330
R13 330
SCL_SLAVE
SDA_SLAVE
R16 330
R18 330
R17 330
R19 330
R21 330
R22 330
SW1
1
2
3
4
8
7
6
5
GND
R_B
R14
U6
IN
Out
LT6655
GND
FB
C19
1nF
R15
R_F
C20
10uF
C21
1uF
R20
R_G
GND
Title
Size
A4
Number
LIP 2013 Front End
Revision
Date: 16-06-2016
Sheet of
File: C:\Altiumprojects\..\DAC7578SPW.SchDoc
Drawn By: Luis Mendes