

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

**Detecção de Raios Cósmicos em Calorímetros Altamente  
Segmentados Usando Transformada de Hough Aleatória**

Autor:

---

Rodrigo Araujo Pereira

Orientador:

---

Prof. José Manoel de Seixas, D.Sc.

Orientador:

---

Prof. Luciano M. de Andrade Filho, D.Sc.

Examinador:

---

Prof. André Massafferri Rodrigues, D.Sc.

Examinador:

---

Prof. Leandro Salazar de Paula, D.Sc.

Examinador:

---

Prof. Marcello Luiz Rodrigues de Campos, Ph.D.

DEL

Setembro de 2011

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho. Dedico este trabalho aos meus pais, José Luiz e Alzinete pelo suporte e apoio nos momentos difíceis. À minha irmã Renata pela paciência e pelo apoio. Aos meus orientadores e amigos Luciano e Seixas, pela confiança que depositaram em mim e pelo alto nível das discussões e do trabalho. Aos amigos e professores do LPS e da turma de Eletrônica e Computação 2005/2 que contribuíram para minha formação.

## RESUMO

Em detectores de partículas de altas energias como do ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*), o maior detector do acelerador de partículas LHC, o responsável por absorver e medir a energia das partículas é o calorímetro. O calorímetro do ATLAS se divide em uma parte Eletromagnética (Larg) e uma Hadrônica (TileCal), com o intuito de detectar partículas que interajam de forma eletromagnética ou hadrônica respectivamente. Para a certificação experimental dos 10.000 canais de leitura do TileCal, raios cósmicos foram utilizados durante a fase de comissionamento. Através da energia depositada pelos raios cósmicos em células no calorímetro, reconstruímos suas trajetórias. Devido às características dos raios cósmicos, o sinal detectado pelo TileCal possui uma baixa relação sinal-ruído, sendo necessário assim um método eficiente para a reconstrução de trajetórias. O método proposto neste trabalho se baseia numa variante da Transformada de Hough. A TH mapeia o espaço da dados (células do calorímetro ativadas pela energia absorvida) num espaço de parâmetros, na busca de reconhecer os traços (em linha reta) deixados pelos raios cósmicos. Este trabalho apresenta e descreve o método da Transformada de Hough Aleatória, que é capaz de reconhecer traços oriundos de múltiplos raios cósmicos. A validação do método com dados de MC obteve uma eficiência de 99,8% na reconstrução das trajetórias, comprovando a boa eficiência do método desenvolvido.

Palavras-Chave: Processamento de Sinais, Transformada de Hough, CERN, Física de Partículas.

## ABSTRACT

In high energy particle detectors as the ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) the biggest detector of LHC particle accelerator, calorimeters are the systems responsible for absorb and measure energy of particles. The ATLAS calorimeter is compound of an Eletromagnetic Calorimeter (LAr) and a Hadronic Calorimeter (TileCal), each one responsible to detect particle interacting electronically and hadronically. To an experimental certification of the 10000 TileCal channels, cosmic rays were used during the commissioning phase. The cosmic rays trajectories can be reconstructed from the energy deposited in the calorimeter cells. Because of the characteristics of cosmic rays the signal detected by TileCal has a low signal-to-noise ratio, because of this a more efficient method was necessary in the trajectory reconstruction. The method proposed in this work is based on a variant of the Hough Transform, which through a convergent mapping transforms the data space (active calorimeters cells) in a space of parameters, in seeking to recognize the straight line trajectories left by the cosmic rays. This work will present and describe the Randomized Hough Transform method capable of recognizing multiple tracks left by cosmic rays. The method validation using MC data obtained an efficiency of 99,8% in the reconstruction of trajectories, proving the method efficiency.

Key-words: Processing Signals, Hough Transform, CERN, Particle Physics.

# SIGLAS

ALICE - *A LArge Ion Collider Experiment*

ATLAS - *A Toroidal LHC Apparatus*

BT - *Barrel Toroid*

CERN - Centro Europeu para Pesquisa Nuclear

CIS - *Charge Injection System*

CMS - *Compact Muon Solenoid*

CS - *Central Solenoid*

EAS - *Extensive air showers*

EB - *Extended Barrel*

ECT - *End-Cap Toroids*

IF - Instituto de Física

ID - *Inner Detector*

LAr - *Liquid Argon*

LB - *Long Barrel*

LHC - *Large Hadron Collider*

LHCb - *Large Hadron Collider beauty*

LPS - Laboratório de Processamento de Sinais

MB - *Minimum Bias*

MC - Monte Carlo

MMQ - Método dos Mínimos Quadrados

MS - *Muon Spectrometer*

PMT - *Photo Multiplier Tube*

RC- Raio Cósmico

ROI - *Region of Interest*

SCT - *SemiConductor Tracker*

SLAC - *Stanford Linear Accelerator Center*

TH - *Transformada de Hough*

THA - *Transformada de Hough Adaptativa*

THP - *Transformada de Hough Padrão*

THL - *Transformada de Hough Local*

THR - *Transformada de Hough Randômica*

TileCal - *Tile Calorimeter*

TMF - *Tile Muon Fitter*

TRT - *Transition Radiation Tracker*

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

UV - Ultra Violeta

WLS - *Wavelength shifting*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Tema . . . . .	2
1.2 Justificativa . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.4 Descrição . . . . .	3
<b>2 O Experimento LHC</b>	<b>4</b>
2.1 Física de Altas Energias . . . . .	4
2.1.1 Aceleradores de Partículas . . . . .	5
2.2 O Modelo Padrão . . . . .	6
2.2.1 Bósons . . . . .	6
2.2.2 Férmions . . . . .	7
2.3 CERN . . . . .	8
2.4 LHC - <i>Large Hadron Collider</i> . . . . .	8
2.5 O Detector ATLAS . . . . .	9
2.5.1 Coordenadas Geométricas do ATLAS . . . . .	10
2.5.2 Sistema Magnético do ATLAS . . . . .	12
2.5.3 Detectores de Traço - <i>Inner Detector</i> . . . . .	13
2.5.4 O Detector PIXEL . . . . .	13
2.5.5 O Detector SCT . . . . .	14
2.5.6 O Detector TRT . . . . .	14
2.5.7 O Espectrômetro de Múons . . . . .	15

2.5.8	Calorímetro Eletromagnético . . . . .	15
2.6	Calorímetro Hadrônico - TileCal . . . . .	16
2.6.1	Fotomultiplicadores - PMT . . . . .	18
2.6.2	Segmentação do TileCal . . . . .	19
2.6.3	Sistemas de Calibração do TileCal . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Raios Cósmicos</b>	<b>22</b>
3.1	Histórico . . . . .	22
3.2	Características dos Raios Cósmicos . . . . .	23
3.3	Chuveiros Cósmicos . . . . .	24
3.3.1	Múon . . . . .	25
3.3.2	Características do Múon . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Transformada de Hough</b>	<b>28</b>
4.1	Transformada de Hough . . . . .	28
4.2	Transformada de Hough Padrão . . . . .	29
4.2.1	Parametrização de Retas por Funções Senoidais . . . . .	31
4.2.2	Discretização do Espaço de Parâmetros . . . . .	32
4.2.3	Considerações . . . . .	33
4.3	Transformada de Hough Local . . . . .	34
4.3.1	Mapeamento Convergente . . . . .	34
4.3.2	Considerações . . . . .	35
4.4	Transformada de Hough Adaptativa . . . . .	36
4.4.1	Considerações . . . . .	36
4.4.2	Comparação entre as Eficiências da THP e da THA . . . . .	37
4.5	Transformada de Hough Randômica . . . . .	38
4.5.1	Introdução . . . . .	39
4.5.2	Fundamentos Básicos . . . . .	39
4.5.3	Mecanismos . . . . .	40
4.5.4	Considerações . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Reconstrução de Raios Cósmicos no TileCal</b>	<b>43</b>
5.1	Introdução . . . . .	43
5.2	Comissionamento do TileCal com RC . . . . .	44

5.2.1	Descrição do TileMuonFitter . . . . .	44
5.3	O Ambiente de Desenvolvimento ROOT . . . . .	47
5.4	Visualização de Raios Cósmicos com CaloViewer 3D . . . . .	47
5.5	Detecção de Traços com TH . . . . .	48
5.5.1	Limitação da <i>versão1</i> do algoritmo de detecção de TH . . . . .	49
5.6	Detecção de Múltiplos Traços com Transformada de Hough . . . . .	52
5.6.1	Regiões de Interesse e Exclusão . . . . .	52
5.6.2	Metodologia . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>59</b>
6.1	Algoritmo de Múltiplas Trajetórias . . . . .	59
6.2	Medida da Multiplicidade de RC em Eventos no TileCal . . . . .	61
6.3	Validação do Algoritmo com dados de Monte Carlo . . . . .	63
6.4	Distribuição Angular . . . . .	68
6.5	Deposição de energia por unidade de comprimento . . . . .	69
6.6	Ajuste Fino da Trajetória . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>76</b>
7.1	Trabalhos Futuros . . . . .	77
<b>Bibliografia</b>		<b>78</b>
<b>A Produção Científica</b>		<b>81</b>

# **Lista de Figuras**

2.1	Partículas do Modelo Padrão.Fonte:[1]	7
2.2	LHC e seus detectores [2].	9
2.3	ATLAS e seus principais detectores e dimensões.Fonte:[3].	11
2.4	Sistema de coordenadas cartesianas do ATLAS.Fonte:[3].	12
2.5	Sistema de coordenadas cilíndricas do ATLAS.Fonte:[3].	13
2.6	<i>Barrel Toroid</i> do ATLAS.Fonte:[3].	14
2.7	Layout do <i>Inner Detector</i> do ATLAS.Fonte:[3].	15
2.8	Calorímetro Eletromagnético do ATLAS.Fonte:[3].	16
2.9	Calorímetro Hadrônico.Fonte:[3].	17
2.10	Disposição dos cintiladores e fibras óticas no TileCal.Fonte:[4].	18
2.11	Fotomultiplicador. Fonte:[2].	19
2.12	Segmentação do TileCal.Fonte:[5].	20
2.13	Diagrama do sistema óptico e eletrônico de leitura, e dos sistemas de calibração e monitoramento do TileCal.	21
3.1	Fluxo de Raios Cósmicos vs. Energia das Partículas. Fonte: [2].	24
3.2	Distribuição das partículas provenientes dos raios cósmicos encontradas na superfície terrestre. Fonte: [2]	25
3.3	Desenvolvimento de um chuveiro cósmico na atmosfera. Fonte:[6].	26
4.1	Exemplo do mapeamento feito pela THP.	30
4.2	Exemplo do espaço de parâmetros da THP, mapeamento pela equação da reta.	30
4.3	Mapeamento senoidal de uma reta.	31
4.4	Espaço de parâmetros em um mapeamento senoidal de uma reta.	32
4.5	Fluxograma de funcionamento da THL.	35

4.6	Fluxograma de funcionamento da THA. . . . .	37
4.7	Critério de validação de curvas.[7] . . . . .	40
5.1	Comparação entre a <i>versão1</i> da TH e o Método dos Mínimos Quadrados vista no CaloViewer 3D.Fonte:[8] . . . . .	46
5.2	Um evento de Raio Cósmico reproduzido pelo CaloViewer 3D. . . . .	48
5.3	Projeções ortogonais do ponto central das células do TileCal. . . . .	49
5.4	Evento com múltiplos RC no TileCal. . . . .	50
5.5	Acumulador das projeções ortogonais do evento da Figura 5.4. . . . .	50
5.6	Segundo acumulador criado pela THA das projeções ortogonais do evento da Figura 5.4. . . . .	51
5.7	Evento de múltiplos RC no TileCal reconstruído pela <i>versão1</i> . . . . .	51
5.8	Regiões de Interesse ou Exclusão na forma de um hiperbolóide de duas folhas. . . . .	53
5.9	Fluxograma do algoritmo de detecção de múltiplas retas. . . . .	55
5.10	Típico evento com <i>halo muon</i> reconstruído com o algoritmo de múltiplas trajetórias. . . . .	56
5.11	Evento com múltiplos raios cósmicos reconstruído com o algoritmo de múltiplas trajetórias. . . . .	57
5.12	Evento com múltiplos raios cósmicos reconstruído com o algoritmo de múltiplas trajetórias. . . . .	58
6.1	Distribuição do percentual de células necessárias para se reconstruir retas em eventos com múltiplos RC. . . . .	60
6.2	Acumuladores do primeiro traço encontrado no evento da Figura 5.11. . .	61
6.3	Acumuladores do segundo traço encontrado no evento da Figura 5.11. . .	61
6.4	Distribuição da quantidade de mísulas por eventos detectados com o método da TH para traços múltiplos.Fonte:[8] . . . . .	62
6.5	Eventos de RC com alta multiplicidade de mísulas. Esquerda: um evento com 8 mísulas é reconstruído com boa precisão. Direita: devido ao grande número de células ativadas, a maioria dos traços reconstruídos não são confiáveis. . . . .	63
6.6	Distribuição dos parâmetros ( $\theta, \phi$ ) para MC.Fonte:[9] . . . . .	64

6.7	Distribuição dos parâmetros ( $\theta, \phi$ ) para o TMF.Fonte:[9]	65
6.8	Precisão angular para os ângulos $\theta$ e $\phi$ .Fonte:[10]	65
6.9	Cálculo do erro de comprimento entre dois traços.Fonte:[9]	66
6.10	Distribuição dos parâmetros ( $X, Z$ ) para MC.Fonte:[9]	67
6.11	Distribuição dos parâmetros ( $X, Z$ ) para o TMF.Fonte:[9]	67
6.12	Precisão das coordenadas X e Z dos traços no plano (Y=0).Fonte:[10]	68
6.13	Distribuição angular de RC em relação ao ângulo $\phi$ . Fonte:[8]	69
6.14	RC projetivos e verticais atravessando o TileCal.Fonte:[8]	70
6.15	Distribuição de energia pelo comprimento ( $\frac{dE}{dx}$ ) dos RC nas primeiras 9 torres de trigger do TileCal.	71
6.16	Segmentação dos calorímetros do ATLAS, construída com o pacote de geometria do ROOT. Fonte:[8].	72
6.17	Evento com múltiplos raios cósmicos onde células dos calorímetros internos do ATLAS podem ser utilizadas para ajustar a trajetória.	73
6.18	Na esquerda o evento reconstruído apenas com células do TileCal e a direita o mesmo evento utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético.	73
6.19	Na esquerda a distribuição de X e Z das retas reconstruídas apenas com células do TileCal e a direita a distribuição de X e Z das mesmas retas utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético. Em destaque as diferenças encontradas entre as distribuições.	74
6.20	Na esquerda a distribuição de $\rho$ e $\theta$ na projeção XY das retas reconstruídas apenas com células do TileCal e a direita a distribuição de $\rho$ e $\theta$ das mesmas retas utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético. Em destaque as diferenças encontradas entre as distribuições.	74
6.21	Na esquerda a distribuição de $\rho$ e $\theta$ na projeção ZY das retas reconstruídas apenas com células do TileCal e a direita a distribuição de $\rho$ e $\theta$ das mesmas retas utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético. Em destaque as diferenças encontradas entre as distribuições.	75

## Lista de Tabelas

# Capítulo 1

## Introdução

Este Capítulo irá apresentar uma visão geral do projeto, o seu contexto e a organização do documento.

Em experimentos de física de altas energias, os calorímetros são sistemas responsáveis por absorver e amostrar a energia das partículas que serão estudadas. Os experimentos modernos exigem que estes calorímetros sejam cada vez mais acurados, possuindo uma grande quantidade de canais de leitura que devem operar simultaneamente a uma alta taxa de eventos. Laboratórios de pesquisa de física de altas energias, como o Centro Europeu para Pesquisa Nuclear, localizado na fronteira da França e Suíça (CERN), estudam a estrutura da matéria através das partículas elementares geradas na colisão de feixes partículas contra um alvo fixo ou contra um outro feixe de partículas, ambos acelerados por campos eletromagnéticos. Para estudar as partículas resultantes dessa colisão, existem em torno do ponto de colisão, detectores que registram as diversas interações e decaimentos que ocorrem em cada evento. Afim de certificar o bom funcionamento dos diversos sistemas envolvidos em cada detector, uma longa fase de comissionamento se fez necessária antes que o acelerador de partículas do CERN, o LHC (*Large Hadron Collider*) entrasse em operação.

## 1.1 Tema

Para que não se perca nenhum tipo de informação importante durante as colisões no detector ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*), é necessário que testes periódicos sejam realizados nos detectores a fim de corrigir problemas nos calorímetros e nos sistemas de aquisição de dados. No calorímetro hadrônico (*TileCal*) do ATLAS, uma série de testes e calibrações podem ser realizadas nos diversos níveis do sistema de aquisição de dados. Porém, o único teste que pode ser realizado com praticamente as mesmas configurações e em conjunto com os demais detectores são os testes realizados com o uso de raios cósmicos. Por ser uma fonte natural de partículas de altas energias, o comissionamento utilizando raios cósmicos tornou-se um dos principais meios de se testar os calorímetros e sistemas do LHC.

## 1.2 Justificativa

Durante o período de comissionamento do calorímetro hadrônico do ATLAS, técnicas de reconstrução de traços de raios cósmicos foram desenvolvidas, pois é a partir do comprimento, direção e energia dos mísions cósmicos que passam pelo *TileCal* que foram realizados diversos estudos de calibração de tempo e energia e onde problemas foram encontrados e corrigidos. Devido a baixa relação sinal-ruído do TileCal em eventos de raios cósmicos e a ocorrência de múltiplos raios cósmicos em um mesmo evento de detecção, o método de reconstrução deve possuir uma maior eficiência quando comparado a algoritmos de ajustes de curvas como, por exemplo, o método dos mínimos quadrados.

## 1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um algoritmo capaz de detectar e reconstruir a trajetória de múltiplos raios cósmicos detectados pelo calorímetro Hadrônico do ATLAS, utilizando como ferramenta principal uma das variantes da Transformada de Hough. O algoritmo deve ser capaz de reconstruir traços de RC de forma acurada permitindo calibrar o detector e certificar os seus 10.000 canais de leitura.

## 1.4 Descrição

No Capítulo 2 será apresentado um resumo da principal área de estudo deste trabalho: a física de partículas. Será apresentado também o CERN e seus diversos detectores de partículas. Em especial, o calorímetro hadrônico do experimento ATLAS.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição do que são raios cósmicos e como ao longo da história eles ajudam os experimentos com física de altas energias na descoberta de novas partículas. O capítulo também descreve a principal partícula utilizada no estudo de raios cósmicos, o múon.

O Capítulo 4 apresenta e descreve a ferramenta de processamento de imagem utilizada neste trabalho, bem como suas principais variações vantagens e desvantagens.

O Capítulo 5 apresenta como foi realizada a reconstrução de múltiplos raios cósmicos em um calorímetro altamente segmentado utilizando Transformada de Hough.

O Capítulo 6 apresenta os resultados e a validação do trabalho desenvolvido.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho apresentado e trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos.

O Apêndice A apresenta uma lista da produção científica realizada durante o desenvolvimento do projeto.

# Capítulo 2

## O Experimento LHC

Neste capítulo, será apresentada uma breve explicação e um histórico da física de altas energias, além de um resumo do modelo de referência, o modelo padrão. A seguir, será apresentado o CERN e seu experimento mais importante na atualidade, o acelerador de partículas LHC. O maior detector do LHC, o ATLAS e os seus subdetectores serão explicados com mais detalhes.

### 2.1 Física de Altas Energias

A ideia de que toda a matéria do universo fosse composta por partículas mínimas e indivisíveis foi proposta pelos gregos a milhares de anos atrás. Eles deram a essas partículas o nome de átomos. Mais de dois mil anos após essa suposição dos gregos, e embora a identidade dessas partículas fundamentais tenha sofrido numerosas revisões, a comunidade científica ainda acredita nela, e não mede esforços na tentativa de criar experimentos que comprovem a existência de novas partículas previstas por novas teorias físicas, que procuram descrever as forças e as partículas fundamentais da matéria. No século XIX, os cientistas notaram que substâncias como o carbono e o oxigênio possuíam um limite mínimo para seu tamanho e atribuíram a eles o nome de átomos. O nome permaneceu, porém a ideia de que os átomos fossem indivisíveis já não existe mais. O trabalho conjunto de J. J. Thomson (descoberta do elétron), Ernest Rutherford (desenvolveu o conceito da estrutura do átomo), Niels Bohr e James Chadwick (provou a existência do nêutron), contribuíram para o modelo do átomo como um núcleo composto por prótons e nêutrons envolvido por elétrons orbitais.

tantes, semelhante à estrutura do sistema solar. Durante algum tempo acreditou-se que os nêutrons, prótons e elétrons fossem as partículas fundamentais dos gregos, porém muitas questões ainda não haviam sido respondidas sobre a estrutura dos núcleos dos átomos, sua estabilidade, entre outras. Sendo assim, os cientistas precisaram desenvolver ferramentas que os ajudassem a responder essas questões. No começo do século, os cientistas utilizavam pequenos detectores como, por exemplo, câmaras de nuvens e câmaras de bolhas para estudar radiação e partículas que chegam à superfície da Terra, a maioria resultante das colisões dos raios cósmicos com as partículas de nossa atmosfera. Porém, devido a necessidade de se entender mais sobre a matéria, os cientistas precisaram reproduzir as interações partículas em ambientes controlados, surgiram então os primeiros aceleradores de partículas.

### 2.1.1 Aceleradores de Partículas

Um acelerador de partículas é um equipamento utilizado para acelerar feixes de partículas como, por exemplo, elétrons, prótons, pósitrons entre outras, a altas velocidades, utilizando poderosos campos eletromagnéticos. O acelerador de partículas pode ser do tipo linear, como por exemplo, o Stanford Linear Accelerator Center - SLAC [11], ou circular como, por exemplo, o Large Hadron Collider - LHC [12]. Quando o feixe de partículas atinge a energia desejada, ele é direcionado para colidir contra um alvo. O alvo pode ser outro feixe de partículas, igualmente acelerado por um campo magnético, ou um alvo fixo. A colisão produz partículas elementares. Quanto mais se deseja aprofundar o estudo sobre os elementos fundamentais da matéria através de um experimento de colisão de partículas, maior deverá ser a energia cinética das partículas envolvidas na colisão. Para estudar o resultado dessas colisões, os experimentos modernos contam com grandes detectores posicionados ao redor do ponto de colisão. Cada detector possui camadas de subdetectores responsáveis por identificar e medir a energia das partículas resultantes.

Ao longo do século XX o estudo das partículas resultantes dessas colisões permitiu aos cientistas a descoberta de diversas partículas elementares. Em 1968, experiências realizadas no *Stanford Linear Accelerator Center* para pesquisar a natureza microscópica da matéria [13] revelaram que os prótons e nêutrons não eram

partículas indivisíveis, e sim formadas por três partículas ainda menores chamadas quarks, nome fictício retirado de uma passagem do livro Finnegans Wake de James Joyce, e dado pelo físico teórico Murray Gell-Mann que, anteriormente, já havia previsto teoricamente a existência desta partícula. Os estudos mostraram ainda que prótons e nêutrons são constituídos por dois tipos de quarks diferentes: *up* e *down*. O próton é formado por dois quarks *up* e um *down*, e o nêutron é formado por dois quarks *down* e um *up*. Tudo o que conhecemos no mundo e no universo parece ser formado pelas combinações de elétrons, quarks *up* e *down*. Até hoje, não há nenhuma indicação de que estas partículas sejam formadas por outras partículas ainda menores. Os físicos continuaram a provocar choques entre partículas usando novas tecnologias e cada vez mais energia, recriando condições nunca vistas antes. Dos resultados dessas colisões, eles foram descobrindo uma série de novas partículas fundamentais que foram se somando a uma lista de outras partículas que hoje fazem parte de uma teoria conhecida como Modelo Padrão.

## 2.2 O Modelo Padrão

O Modelo Padrão é uma teoria física que tenta unir e descrever as forças conhecidas da natureza, bem como os componentes fundamentais que formam a matéria. O modelo atual abrange a força forte, fraca e eletromagnética, além das partículas conhecidas que formam a matéria; o modelo padrão separa as partículas em dois tipos fundamentais: os bósons e os férmions.

### 2.2.1 Bósons

Os bósons são partículas com spin inteiro responsáveis por transmitir algum tipo de força. Até hoje, os físicos foram capazes de comprovar experimentalmente a existência de quatro bósons: o fóton, responsável pela força eletromagnética, o glúon, responsável pela força forte<sup>1</sup> e os bósons W e Z responsáveis pela força fraca<sup>2</sup>. O modelo padrão ainda prevê a existência do bóson de Higgs, que seria o bóson

---

<sup>1</sup>É a força que mantém os quarks do tipo *up* e *down* unidos para formarem nêutrons e prótons.

<sup>2</sup>Força mais conhecida por ser responsável pela desintegração radioativa de alguns elementos como o urânio.

responsável pela massa inercial de todas as partículas. Até o presente, o bóson de Higgs não foi observado em nenhum experimento, espera-se que as colisões de partículas no LHC com energias nunca experimentadas antes possa produzir bósons de Higgs observáveis.

## 2.2.2 Férmons

Os férmons são partículas com spin semi-inteiro e basicamente correspondem as partículas que descrevem a matéria. Os férmons podem ser divididos em duas famílias: os quarks e os léptons, com três gerações de partículas. Como pode ser visto na Figura 2.1, existem seis quarks que também são divididos em três gerações: *up/down*, *charm/strange* e *top/bottom*. Os léptons são: elétron, múon e tau, além de seus respectivos neutrinos. Toda a matéria hadrônica no universo é composta pela primeira geração de férmons, a segunda e terceira geração dos léptons são compostas por partículas raras e instáveis que decaem rapidamente em partículas da primeira geração.

Three Generations of Matter (Fermions)			
	I	II	III
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name→	u up	c charm	t top
Quarks	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>
mass→	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
charge→	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name→	d down	s strange	b bottom
Quarks	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>
mass→	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV
charge→	0	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name→	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino
Leptons	<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>
mass→	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV
charge→	-1	-1	-1
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name→	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
Leptons	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>
Bosons (Forces)			
mass→			91.2 GeV
charge→			0
spin→			1
name→			Z weak force
Bosons (Forces)			<b>Z</b>
mass→			80.4 GeV
charge→			$\pm 1$
spin→			1
name→			$W^\pm$ weak force
Bosons (Forces)			<b><math>W^\pm</math></b>

Figura 2.1: Partículas do Modelo Padrão.Fonte:[1]

## 2.3 CERN

A Organização Européia para Pesquisa Nuclear (antigo Conselho Europeu para Pesquisa Nuclear, em francês, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire - CERN) foi fundado em 1954, e localizado na fronteira Franco-Suíça próximo a cidade de Genebra, na Suíça. É atualmente o maior centro de pesquisa de física de partículas do mundo. Ficou conhecido mundialmente por suas inúmeras experiências com detectores de partículas, a descoberta dos bósons W e Z e os diversos prêmios Nobel ganhos por seus pesquisadores. Um dos resultados mais aguardados pela comunidade científica com o início das colisões de partículas no LHC é a comprovação ou não da existência do bóson de Higgs, a partícula que seria responsável pela massa das partículas fundamentais da física. O detector de partículas ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) um dos quatro detectores principais do LHC, foi construído numa colaboração entre 150 institutos de pesquisa de 65 países dentre os quais a Universidade Federal do Rio de Janeiro participa através do Laboratório de Processamento de Sinais e do Instituto de Física.

## 2.4 LHC - *Large Hadron Collider*

O LHC o maior acelerador de partículas do mundo, é um acelerador de partículas de última geração, localizado a 100 metros de profundidade e com 26,7 km de circunferência. Em Novembro de 2009, entrou em operação no CERN o acelerador de partículas LHC (*Large Hadron Collider*), e já com algumas semanas de funcionamento se tornou o maior acelerador de partículas do mundo realizando colisões entre prótons com energia total de 2,2 TeV no centro de massa. No dia 30 de Março de 2010 realizou uma colisão próton-próton com energia de 7 Tev no centro de massa. Os quatro detectores mais importantes do LHC (ATLAS, CMS, ALICE e LHCb) implementam sistemas síncronos de aquisição para operar com eventos na taxa de 40 MHz:

- O detector CMS (*Compact Muon Solenoid*) é um experimento de propósito geral para estudos do bóson de Higgs, de partículas supersimétricas e de física de íons pesados.

- O ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) é o único experimento do LHC inteiramente dedicado à física de colisões nucleares. Seu objetivo é estabelecer e estudar a formação do plasma de quarks e glúons.
- O LHCb (*Large Hadron Collider beauty experiment for precision measurements of CP-violation and rare decays*) é um experimento cuja principal finalidade é o estudo da violação de CP no setor do quark b, o detector também estuda decaimentos raros dos mésons B.

O presente trabalho está relacionado com o experimento ATLAS que será descrito com mais detalhes a seguir.

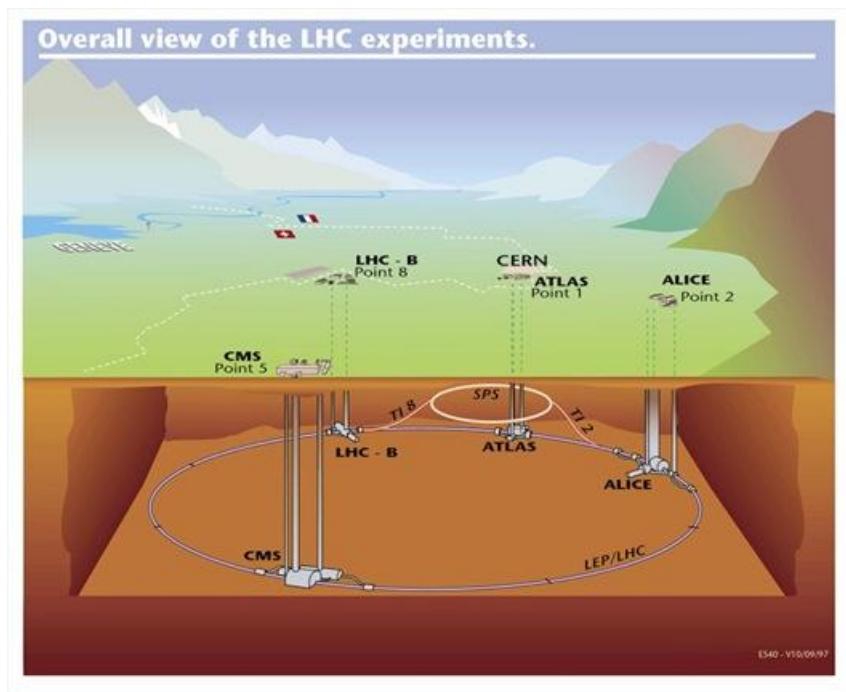


Figura 2.2: LHC e seus detectores. Fonte:[12]

## 2.5 O Detector ATLAS

O detector de partículas ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) é um experimento de propósito geral para detectar partículas resultantes da colisões entre partículas no LHC. Está localizado em um dos pontos de colisão do acelerador circular LHC,

possui 44m de comprimento, 25m de altura e pesa aproximadamente 7000 toneladas, peso equivalente ao da Torre Eiffel, sendo assim a maior máquina já construída pelo Homem Figura 2.3. Foi construído por uma colaboração entre diversos institutos de pesquisa de 65 países [12]. A Universidade Federal do Rio de Janeiro participa através da Escola Politécnica e do Instituto de Física. O ATLAS possui como objetivo, estudar o maior número de fenômenos físicos passíveis de serem gerados nas colisões no LHC. Seus objetivos principais são aprender sobre as forças básicas que moldaram o nosso Universo desde o início do tempo, e que irão determinar seu destino. Os principais estudos são sobre a origem da massa (provar ou não a existência do Bóson de Higgs), dimensões extras do Universo, buracos negros microscópicos e as provas para os candidatos a matéria escura no Universo.

O detector é composto por diversos sub-sistemas, cada um com características e funcionalidades diferentes, esses são:

- *Solenoid e Toroid Magnets*: Sistema magnético desenvolvido para contribuir na medição do momento das partículas.
- *Inner Detector*: sub-detector composto por outros três sub-detectores (*Pixel Detector*, *Semiconductor Tracker* (SCT) e *Transition Radiation Tracker* (TRT)) responsáveis por medir o momento das partículas carregadas.
- *Muon Spectrometer*: Sub-detector desenvolvido para identificar, filtrar e medir o momento dos múons.
- Calorímetro Eletromagnético e Hadrônico: O Calorímetro Eletromagnético e o Calorímetro Hadrônico (TileCal) do ATLAS são subdetectores desenvolvidos para medir a energia das partículas que reagem de forma eletromagnética e hadrônica respectivamente.

### 2.5.1 Coordenadas Geométricas do ATLAS

O sistema de coordenadas do ATLAS utiliza o sistema de coordenada da mão-direita: o eixo  $x$  aponta para o centro da circunferência do LHC (ver Figura 2.2), e o eixo  $z$  acompanha sua circunferência, o eixo  $y$  é ligeiramente inclinado em relação a

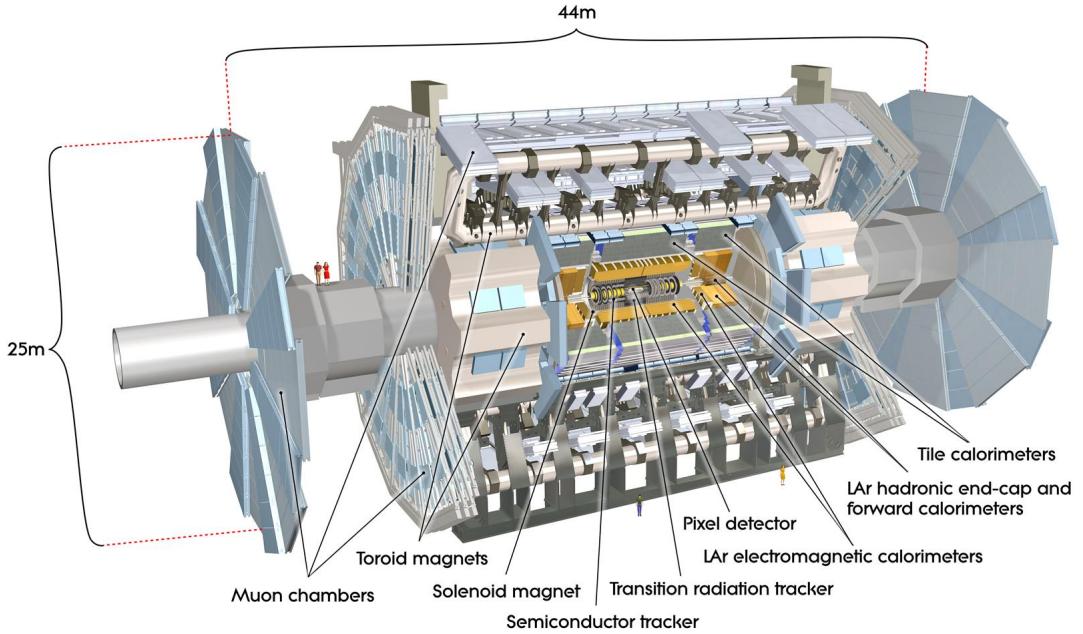


Figura 2.3: ATLAS e seus principais detectores e dimensões. Fonte:[3].

vertical. O sistema de coordenadas cartesianas do ATLAS é mostrado na Figura 2.4. A maioria das análises físicas e reconstruções de trajetórias feita no ATLAS, inclusive no presente trabalho, utiliza o sistema de coordenadas cilíndricas, onde o eixo das abscissas representa a coordenada  $z$ , o eixo da ordenada representa os raios ( $\rho$ ) dos cilindros e o ângulo azimutal  $\phi$  completam o sistema de três coordenadas desse sistema, como mostrado na Figura 2.5, onde também podemos observar o ângulo polar  $\theta^3$ , que fornece através da equação 2.1 a pseudo-rapidez<sup>4</sup> ( $\eta$ ) da partícula, e o momento da partícula  $p_t$  perpendicular ao eixo  $z$ .

$$\eta(\theta) = -\log(\tan \frac{\theta}{2}) \quad (2.1)$$

---

<sup>3</sup>Ângulo entre o momento da partícula e o eixo do feixe.

<sup>4</sup>Coordenada espacial comumente usada em experimentos de física de partículas para descrever o ângulo de uma partícula em relação ao eixo do feixe.

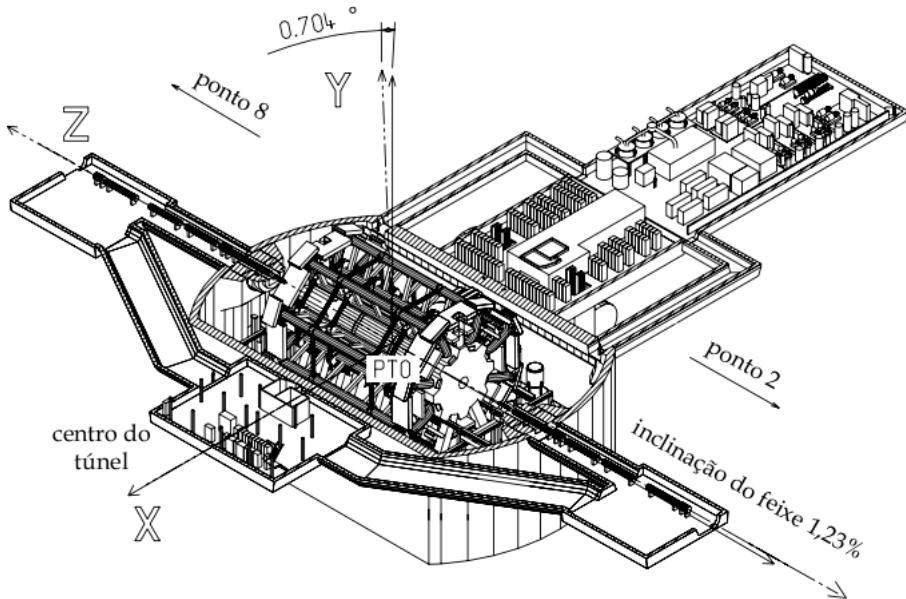


Figura 2.4: Sistema de coordenadas cartesianas do ATLAS. Fonte:[3].

### 2.5.2 Sistema Magnético do ATLAS

O sistema magnético do ATLAS é composto por quatro subsistemas: *central solenoid*, *barrel toroid* e dois *end-cap toroids*. O Solenóide Central (CS) do ATLAS tem comprimento de 5,3 m com um diâmetro de 2,4m, pesa cerca de 5,7 toneladas e opera com uma corrente de 7.600 A. Ele foi projetado para fornecer um campo magnético de 2 Tesla com picos de 2,6 Tesla. O *Barrel Toroid* (BT) é composto por oito bobinas supercondutoras, cada uma com 25 metros de comprimento e 5 metros de largura agrupados em forma de um toróide e são sustentados por 16 anéis de suporte, cada bobina pesa cerca de 40 toneladas como mostra a Figura 2.6. O conjunto total do *Barrel Toroid* tem um diâmetro exterior de 20 metros e pesa aproximadamente 830 toneladas. O toróide opera com uma corrente de 20.500A e o campo magnético produzido pode chegar a 4 Tesla de pico. Os dois *End-Cap Toroids* (ECT) estão inseridos no *Barrel Toroid* e encontram-se nas extremidades do Solenóide Central. Cada ECT possui um comprimento de 5m, um diâmetro de 10.7m e pesa cerca de 240 toneladas. Os *End-Cap Toroids* estão conectados em série com o *Barrel Toroid* e opera igualmente com uma corrente de 20.500A fornecendo um campo magnético de 4 Tesla.

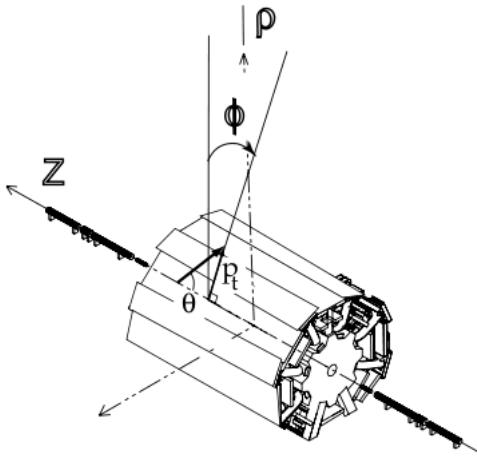


Figura 2.5: Sistema de coordenadas cilíndricas do ATLAS.Fonte:[3].

### 2.5.3 Detectores de Traço - *Inner Detector*

O *Inner Detector* é formado por um conjunto de três detectores: o *Pixel Detector*, o *Semiconductor tracker* (SCT) e *Transition radiation tracker* (TRT), por ser o detector mais próximo ao vértice de colisão das partículas, é de sua responsabilidade medir as direções, o momento e as cargas das partículas eletricamente carregadas. O momento e o vértice de colisão requer uma alta precisão e deve ser feita por detectores com fina granularidade devido a grande quantidade de partículas liberadas em cada colisão. Uma breve descrição dos subdetectores que formam o *Inner Detector* será dada a seguir e na Figura 2.7 podemos observar cada um dos subdetectores descritos.

### 2.5.4 O Detector PIXEL

O detector de Pixel foi desenvolvido para fornecer uma alta precisão e granularidade o mais próximo possível do ponto de colisão, o sistema ao todo possui cerca de 140 milhões de elementos de detecção. A segmentação bidimensional de seus sensores fornecem pontos no espaço sem nenhuma das ambiguidades associadas com geometrias projetivas, porém, requer o uso de avançadas técnicas de eletrônica e conexões para a leitura.

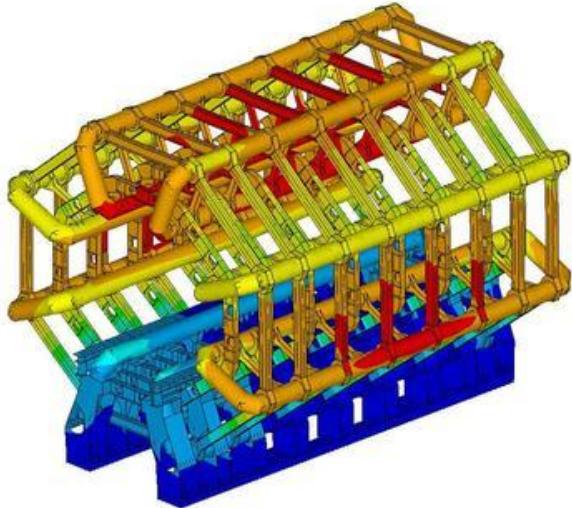


Figura 2.6: *Barrel Toroid* do ATLAS.Fonte:[3].

### 2.5.5 O Detector SCT

O SCT é um detector de tiras de silício cujo barril utiliza oito camadas de detectores de microtubos de silício para fornecer pontos precisos nas coordenadas  $R\phi$  e  $z$  utilizando um pequeno ângulo estéreo para fornecer a medida em  $z$ . O detector contém  $61m^2$  de detectores de silício, com 6.2 milhões de canais de leitura. No detector SCT trajetórias de partículas podem ser distinguidas se separadas por uma distância maior que aproximadamente  $200\mu m$ .

### 2.5.6 O Detector TRT

O TRT é baseado no uso de detectores de tubo que podem operar em altas taxas de eventos, como ocorre no LHC, em virtude do seu pequeno diâmetro e ao isolamento do sensor elétrico dentro de cada volume individual de gás. O detector possui cerca de 500.000 tubos preenchidos com uma mistura de gases, principalmente Xenônio (Xe), que ao ser atravessado por uma partícula eletricamente carregada gera por ionização uma corrente de elétrica que é coletada através de um fio no interior de cada tubo. Essa leitura permite a detecção da partícula que ionizou o gás no interior do tubo. Cada tubo do detector possui um diâmetro de 4mm e em seu interior encontra-se um fio banhado a ouro de  $30\mu m$  de diâmetro responsável pela

leitura, cada tubo possui no máximo 144cm de comprimento. O detector possui um total de 420.00 canais de leitura que adicionam ao sistema de reconhecimento de padrões cerca de 36 pontos por trajetórias permitindo que métodos simples de reconstrução de trajetórias sejam implementados.

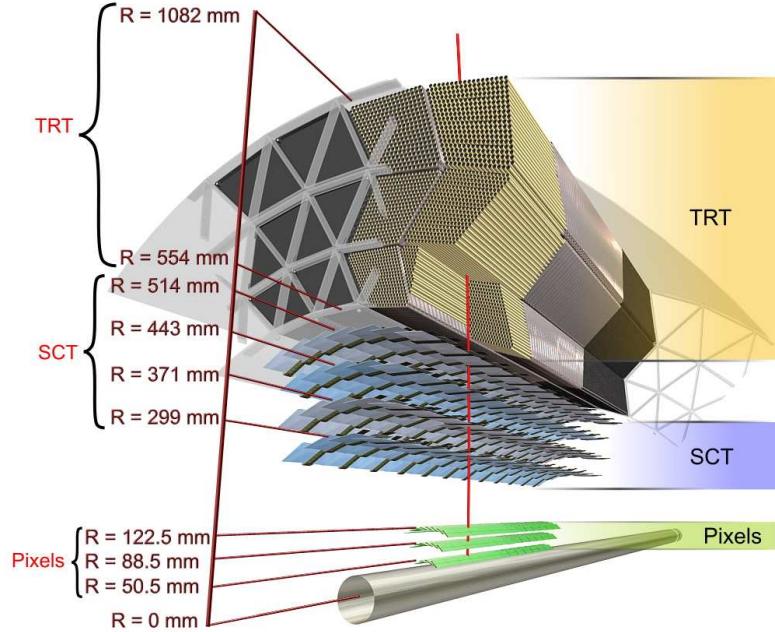


Figura 2.7: Layout do *Inner Detector* do ATLAS. Fonte:[3].

### 2.5.7 O Espectrômetro de Múons

O espectrômetro de múons localiza-se ao redor dos calorímetros do ATLAS e é responsável por medir as trajetórias dos múons para determinar sua direção, sua carga e seu momento. As câmaras de múons, também conhecida por MDT (*Monitored Drift Tubes*), são os elementos de detecção do espectrômetro e são formadas por milhares de tubos de metal preenchidos com gás e com um fio em seu centro, possui o mesmo princípio de detecção do detector TRT.

### 2.5.8 Calorímetro Eletromagnético

O calorímetro eletromagnético possui a função de observar e amostrar os componentes eletromagnéticos do decaimento das partículas. Isto é crucial para a separação

das partículas que produzem chuveiros eletromagnéticos daquelas que produzem jatos de partículas hadronicas. O calorímetro eletromagnético é um calorímetro de amostragem que utiliza Argônio líquido (LAR) como material sensível e chumbo como material absorvedor. Sua estrutura interna possui a forma de um acordeão. Essa geometria fornece ao calorímetro uma completa simetria em  $\Phi$ , eliminando assim zonas mortas. O calorímetro EM é dividido em um barril ( $|\eta| < 1.475$ ) e dois *end-caps* ( $1.375 < |\eta| < 3.2$ ) como pode ser visto na Figura 2.8.

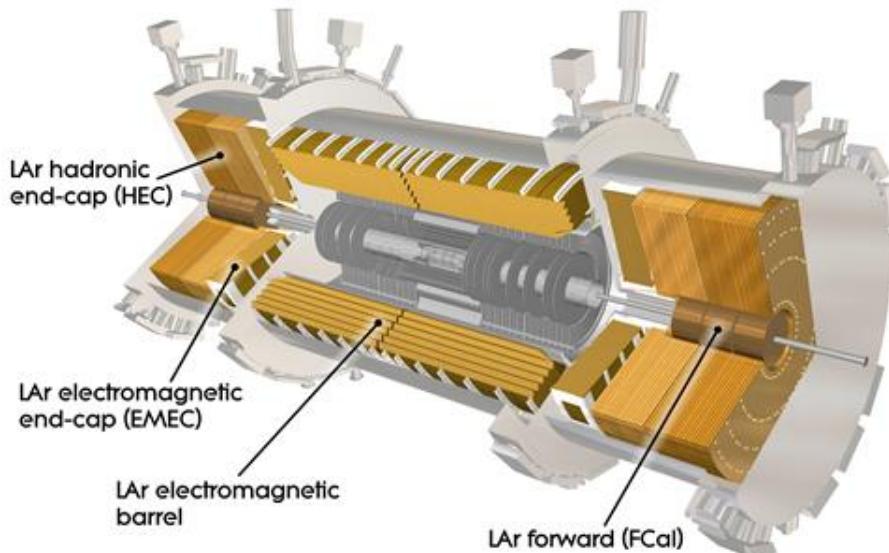


Figura 2.8: Calorímetro Eletromagnético do ATLAS.Fonte:[3].

## 2.6 Calorímetro Hadronico - TileCal

O calorímetro hadrônico do ATLAS foi desenvolvido para ser um *sampling calorimeter* composto por placas cintiladoras, responsável por amostrar a energia das partículas, e por um material absorvedor feito de aço. Ele é dividido em três partes ao longo do eixo  $z$ : um barril central (LB em inglês) de 5,64 metros de comprimento e dois barris extendidos (EB em inglês) de 2,91 metros com raio interno de 2,28m e raio externo de 4,23m, a existência desse vão entre o barril central e os barris ex-

ternos se fez necessário para que cabos e equipamentos dos detectores mais internos pudessem ser montados. Os módulos do TileCal são mostrados na Figura 2.9.

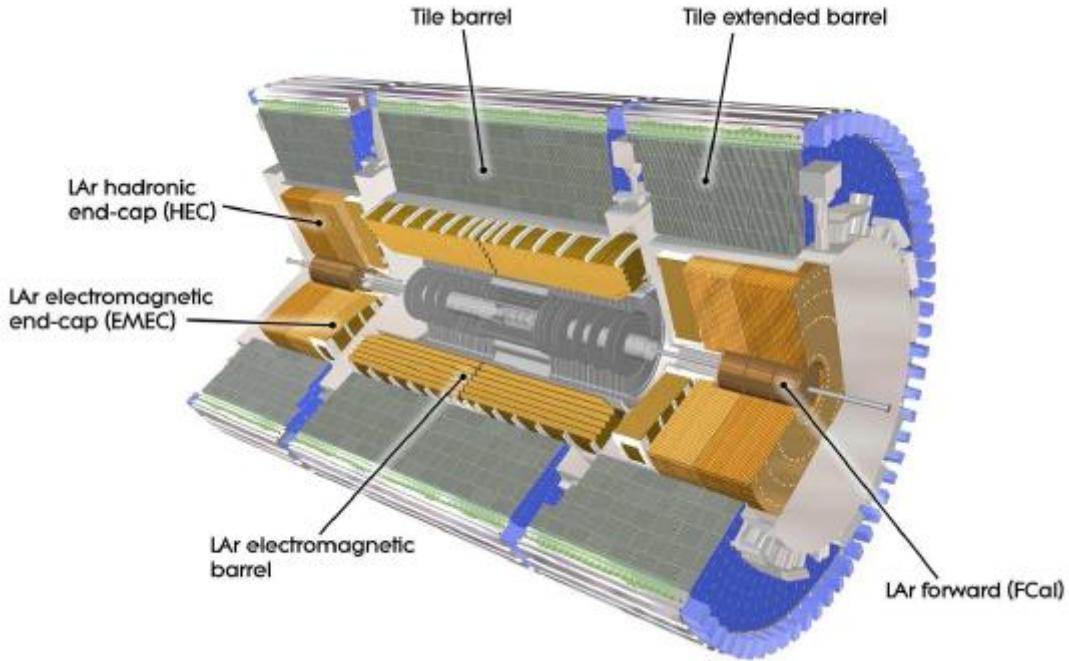


Figura 2.9: Calorímetro Hadrônico.Fonte:[3].

O TileCal é dividido em seções transversais, cada seção é dividida em três camadas de células (A, BC e D) de diferentes tamanhos, como será explicado com maior detalhes na subseção 2.6.2. Cada célula representa um conjunto de cintiladores agrupados de forma a medir em conjunto a energia de uma partícula que passe através da célula. Uma novidade em calorimetria proposta pelo TileCal é a disposição dos cintiladores perpendicularmente ao feixe de colisão (ao eixo  $z$ ) ,como pode ser visto na Figura 2.10, isso permitiu uma excelente resolução em  $\phi$ .

O responsável por amostrar a energia das partículas hadrônicas que atravessam o TileCal é o cintilador. O cintilador é um material de poliestireno em formato de telha (*Tile*) dopado com material cintilante, que ao interagir com uma partícula transforma a energia depositada pela partícula em feixe de luz. A luz produzida nas telhas cintiladoras está na faixa do Ultra Violeta (UV) e sua intensidade é

proporcional a energia depositada pela partícula. A luz se propaga dentro da telha para suas bordas através de reflexões. Esse feixe de luz é então transmitido através de uma fibra óptica (*wavelength shifting* - WLS) até um fotomultiplicador PMT (Photo Multiplier Tube) que então transforma esse feixe de luz em um sinal elétrico. Esse sinal elétrico é enviado então para o sistema de *trigger* onde sinais de interesse são separados dos sinais ordinários. Cada telha é lida por fibras óticas que são conectadas a dois fotomultiplicadores. Esta configuração foi realizada para obter redundância no sinal coletado. A configuração e disposição de um módulo do TileCal pode ser vista na Figura 2.10.

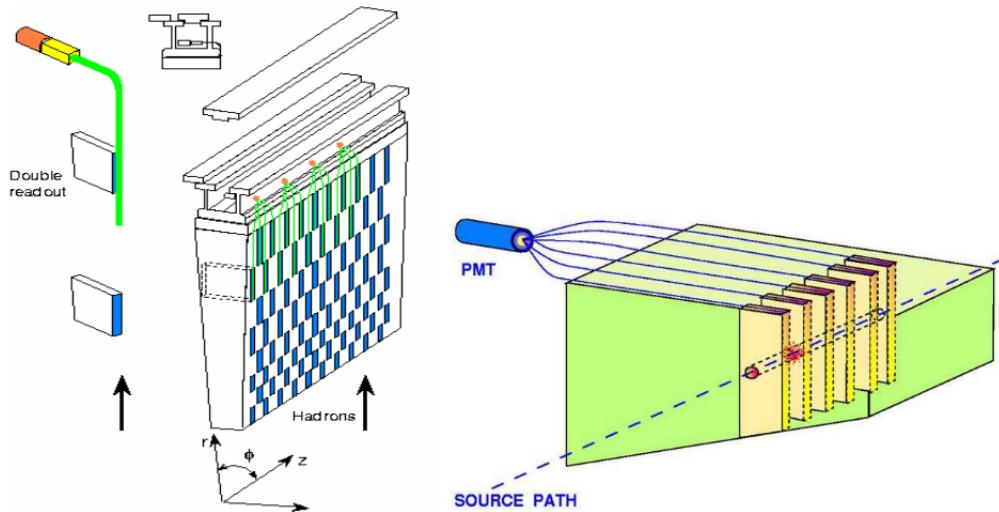


Figura 2.10: Disposição dos cintiladores e fibras óticas no TileCal. Fonte:[4].

### 2.6.1 Fotomultiplicadores - PMT

O fotomultiplicador (*Photo Multiplier Tube* - PMT) utiliza-se do efeito fotoelétrico e da emissão secundária para amplificar um feixe de luz incidente e de pouca energia. O efeito fotoelétrico, cuja explicação satisfatória foi dada por Albert Einstein em 1905, consiste na emissão de elétrons por um material quando excitado por uma radiação eletromagnética como a luz. O efeito da emissão secundária de elétrons é um fenômeno onde elétrons adicionais, chamados de elétrons secundários, são emitidos da superfície de um material quando uma partícula carregada, como íons

ou elétrons, incide em sua superfície com energia suficiente. O fotomultiplicador consiste de uma série de eletrodos chamado dinodos e um anodo. Um feixe de luz incide em um photocatodo depositado na superfície de entrada do fotomultiplicador, este quando excitado pelo feixe libera elétrons pelo efeito fotoelétrico. Esses elétrons são direcionados para incidir em eletrodos onde os elétrons são multiplicados pelo processo de emissão secundária. Esses elétrons em um número maior são acelerados até o segundo dinodo, e assim sucessivamente, multiplicando o número de elétrons produzidos a cada estágio. Finalmente, este acúmulo de carga chega ao anodo produzindo um pulso de corrente que pode assim ser medido pela eletrônica do experimento. Isto é, o que o fotomultiplicador faz é transformar luz em corrente elétrica, esse processo pode ser visto na Figura 2.11.

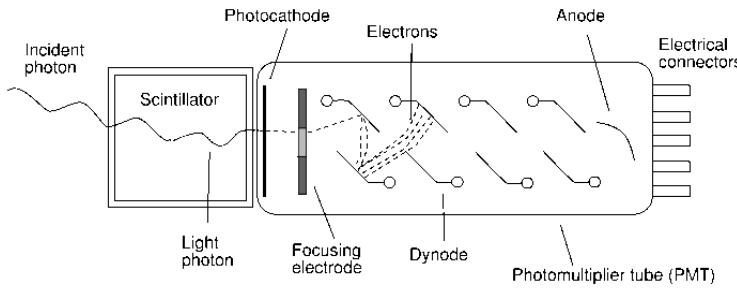


Figura 2.11: Fotomultiplicador.Fonte:[2].

Os fotomultiplicadores são capazes de multiplicar o sinal produzido pela luz incidente em milhões de vezes, permitindo que pequenos fluxos de fótons sejam detectados. No TileCal o fotomultiplicador utilizado é o Hamamatsu R7877.

## 2.6.2 Segmentação do TileCal

O TileCal é composto por três cilindros: um barril central (LB - *Long Barrel*) e dois barris extendidos (EB - *Extended Barrel*). Cada metade do LB e cada EB forma uma partição independente de leitura. O LB é dividido em duas partes (LBA e LBC) com 22 células de leitura em cada, e cada EB possui 14 células de leitura. Cada partição é dividida azimutalmente (em  $\phi$ ) em 64 módulos, com uma segmentação

de 0.1 radianos. Cada módulo do TileCal possui 48 posições para PMTs, porém somente 45 PMTs são utilizadas no barril central e 32 nos barris extendidos. Com exceção das células D0, E1, E2, E3 e E4 que só possuem uma PMT para leitura, as demais células são lidas por duas PMT. O barril central cobre uma região de pseudorapidez de  $|\eta| < 1.0$ , e os barris extendidos cobrem a região de  $0.8 < |\eta| < 1.7$  em cada lado do barril. O mapa completo de um dos módulos do TileCal pode ser visto na Figura 2.12.

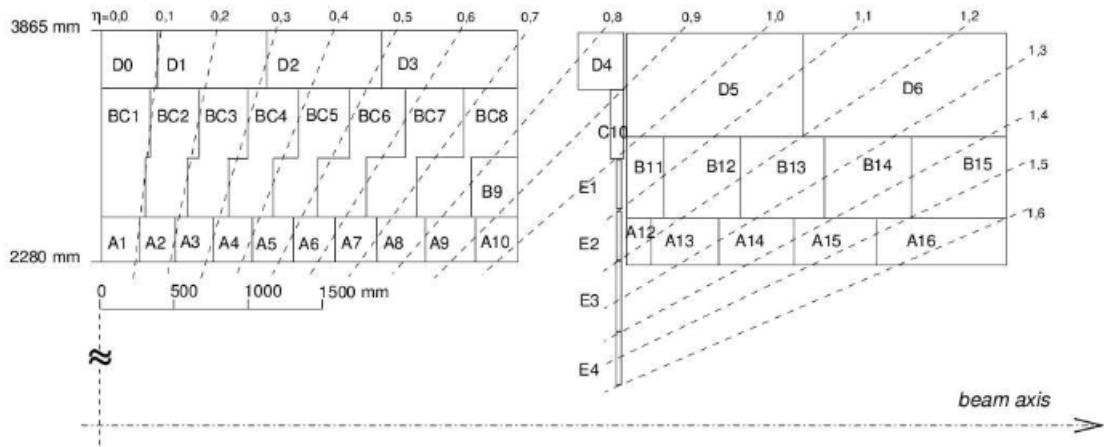


Figura 2.12: Segmentação do TileCal. Fonte:[5].

### 2.6.3 Sistemas de Calibração do TileCal

Diversos sistemas são utilizados para calibrar e monitorar a performance do calorímetro hadrônico do ATLAS. Os sistemas a serem testados podem ser divididos em três partes: parte óptica(telhas cintiladoras e fibras óticas); os tubos fotomultiplicadores (PMT); e toda a eletrônica de leitura que molda, amplifica e digitaliza o sinal vindo das PMTs. Os principais sistemas de calibração e monitoramento são:

- Sistema de Injeção de Cargas (CIS): O sistema de injeção de cargas é usado para calibrar a resposta da parte eletrônica de leitura dos fotomultiplicadores.
- O sistema de Laser: O sistema de Laser foi desenvolvido para calibrar e monitorar a resposta dos fotomultiplicadores, em geral, a estabilidade do seu ganho e sua linearidade.

- Sistema de fonte radioativa de Césio ( $Cs^{137}$ ): foi desenvolvido para verificar a qualidade e uniformidade da resposta ótica de cada célula do calorímetro, e também para equalizar a resposta ao sinal de todas as células.

O esquema da Figura 2.13 apresenta os sistemas de calibração e monitoramento encontrados no TileCal.

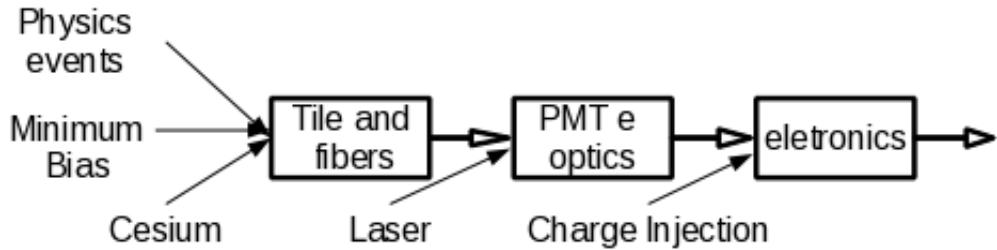


Figura 2.13: Diagrama do sistema óptico e eletrônico de leitura, e dos sistemas de calibração e monitoramento do TileCal.

Além dos sistemas de calibração e monitoramento descritos anteriormente, raios cósmicos também foram utilizados durante a fase de comissionamento do TileCal. O comissionamento realizado com raios cósmicos no TileCal será descrito em detalhes no Capítulo 5.

# Capítulo 3

## Raios Cósmicos

Neste capítulo será apresentado um histórico e uma introdução ao estudo e comportamento dos raios cósmicos (RC). Será apresentado como se formam os chuveiros cósmicos na atmosfera terrestre e seus principais componentes. Por fim, será apresentado as características da principal partícula utilizada no estudo dos raios cósmicos, o mûon.

### 3.1 Histórico

No início do século passado, o termo *raios cósmicos* ainda não havia sido usado para explicar estranhos fenômenos observados por cientistas que realizavam experimentos eletrostáticos. Um dos primeiros a relatar esses fenômenos foi o físico francês Charles Augustin Coulomb, que ainda no final do século 18, notou que uma esfera carregada, pendurada em um fio de seda fino e longo, gradualmente perdia sua carga. Por volta de 1900, outros pesquisadores observaram a presença de radiação em seus instrumentos de medida mesmo estando longe de qualquer fonte de radiação. A princípio eles acreditaram que o fenômeno fosse causado pela radioatividade natural do solo, e sendo assim a ionização deveria diminuir quanto maior fosse a altitude. Em 1906, Richardson [15] propôs que o Sol fosse o causador da interferência, porém, essa hipótese foi descartada pelo fato desse fenômeno ocorrer independentemente da hora do dia. A hipótese de que a fonte da radiação fosse o solo foi descartada graças a medidas feitas por Theodor Wulf e Gockel [14], no alto da Torre Eiffel, com eletroscópios presos em balões. Eles mediram a diferença entre

e radiação encontrada no solo com a medida em altitudes elevadas, e para surpresa de todos a radiação crescia a medida que a altitude aumentava, descartou-se assim a hipótese de que a fonte da radiação fosse o solo. Os cientistas então especularam que a fonte de radiação poderia estar vindo do espaço.

A prova de que essa radiação tinha origem extraterrestre foi encontrada pelo físico austríaco Victor Hess, que entre 1911 e 1913 em uma série de voos com balões atmosféricos equipados com eletroscópios à uma altura de 5,2 km (altura superior à atingida pelo balão do experimento de Gockel) obteve dados confirmado a hipótese de que os raios viriam de uma fonte desconhecida além da atmosfera terrestre, este trabalho lhe rendeu o prêmio Nobel de física em 1936. Em 1925, Robert A. Millikan e seus colaboradores usaram o termo Raios Cósmicos para se referir a radiação estudada, pois acreditavam que a radiação em questão era provocada por raios gamma oriundo de estrelas em formação. Os raios cósmicos foram a única fonte de partículas de altas energias até a construção dos primeiros aceleradores de partículas.

O estudo dos raios cósmicos e sua constituição permitiu a cientistas de todo o mundo a descoberta de partículas fundamentais da física, como por exemplo, a descoberta do pósitron ( $e^+$ ) em 1932 pelo norte-americano Carl D. Anderson pela qual ganhou o prêmio Nobel em 1936; alguns anos mais tarde a descoberta do múon ( $\mu$ ) feita por Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer paralelamente com J. C. Street e E. C. Stevenson; e a descoberta dos píons em 1947, feita pela equipe do inglês Cecil Powell na qual o brasileiro César Lattes teve papel importante.

## 3.2 Características dos Raios Cósmicos

Os raios cósmicos são partículas elementares de alta energia provenientes do espaço exterior que bombardeiam constantemente a Terra de forma igualmente distribuída. Os raios cósmicos são formados principalmente por núcleos ( 90% de prótons, 9% de partículas alfa e o restante por núcleos pesados)[14]. Essa radiação pode apresentar grandes flutuações quanto a sua energia, podendo variar da ordem de  $10^5$  eV a  $10^{21}$  eV, sendo que o fluxo de raios cósmicos, ou seja, a quantidade deles por

metro quadrado, diminui quanto maior a energia da partícula (para cada fator 10 no aumento de energia, o fluxo de raios cósmicos cai por um fator de quase mil) como observado na Figura 3.1. A cada segundo cerca de 200 partículas com energias de  $10^6$ eV atingem cada metro quadrado de nosso planeta, porém partículas acima de  $10^{18}$ eV, chegam a uma taxa de uma a cada semana em uma área de  $1km^2$ .

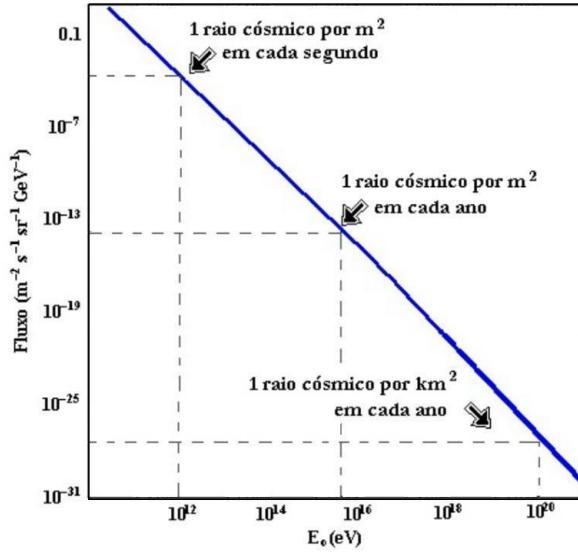


Figura 3.1: Fluxo de Raios Cósmicos vs. Energia das Partículas. Fonte: [2].

### 3.3 Chuveiros Cósmicos

Ao penetrar na atmosfera, as partículas de altas energias que formam os raios cósmicos colidem com as partículas que formam a atmosfera,  $N_2$  e  $O_2$  em geral, formando assim uma cascata de partículas secundárias sob forma semelhante a de um chuveiro conhecida como chuveiro atmosférico extenso (*extensive air showers* EAS, em inglês) Figura 3.3. A propagação de um raio cósmico pela atmosfera pode ser entendida como um movimento browniano relativístico. A interação primária desses núcleos com a atmosfera geram principalmente píons neutros ou carregados,  $\pi^0$  ou  $\pi^+$  e  $\pi^-$ , podendo também produzir outros hadrons como K-meson, prótons, neutrons e suas anti-partículas. Os píons neutros ( $\pi^0$ ) decaem e produzem em sua grande maioria fótons ( $\gamma$ ), já os píons carregados ( $\pi^{+-}$ ) decaem rapidamente

gerando mûons ( $\mu$ ), esta cascata de partículas pode continuar interagindo com a atmosfera terrestre, desde que haja energia para tal, até que a cascata atinja a superfície da Terra. Ao chegar a superfície terrestre o chuveiro cósmico é constituído principalmente de fôtons, elétrons e mûons, como mostra a distribuição da Figura 3.2. Os fôtons e elétrons possuem pouco poder de penetração e são facilmente absorvidos pela matéria. Já os mûons por apresentarem um alto poder de penetração são as partículas carregadas mais abundantes na superfície terrestre, perdendo em número total apenas para os neutrinos.

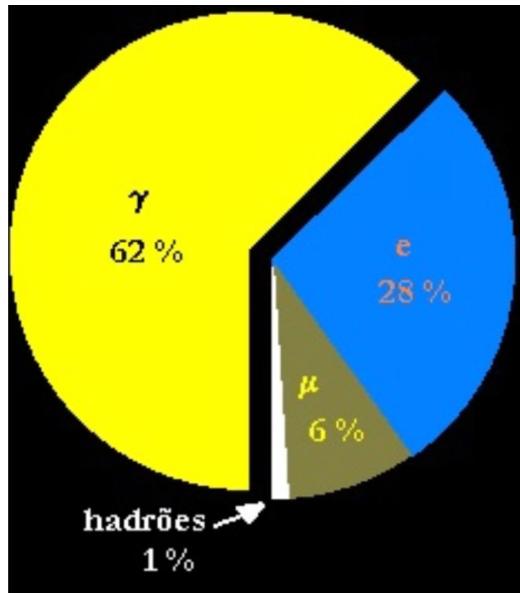


Figura 3.2: Distribuição das partículas provenientes dos raios cósmicos encontradas na superfície terrestre. Fonte: [2]

### 3.3.1 Múon

O mûon foi descoberto em 1937 por J. C. Street e E. C. Stevenson [15] juntamente com Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer [16] em trabalhos independentes, através de experimentos utilizando raios cósmicos após previsões teóricas da existência de uma partícula com massa intermediária entre o elétron e o próton realizada em 1935 pelo japonês Hideki Yukawa, prêmio Nobel de física em 1949. Inicialmente, acreditava-se que o mûon fosse a partícula prevista por Yukawa, porém a descoberta do píon ( $\pi$ ) em 1947 mostrou que esta era a partícula prevista. A princípio, a

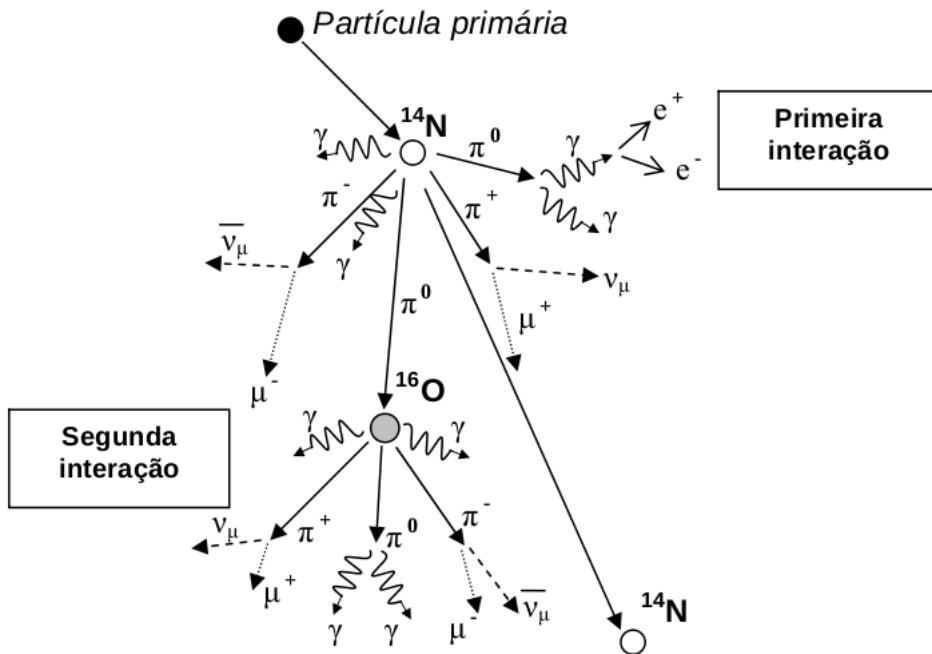


Figura 3.3: Desenvolvimento de um chuveiro cósmico na atmosfera. Fonte:[6].

partícula recebeu o nome de méson ( $\mu$ ), mais tarde tornando-se conhecida como múon.

### 3.3.2 Características do Múon

Os múons são partículas parecidas com o elétron e conhecida pela comunidade científica por serem carregadas ( $\mu^-$  e  $\mu^+$ ) e pelo seu alto poder de penetração na matéria. Esta última característica esta relacionada a massa do múon e ao fato do múon não interagir hadrônicaamente. Possui uma massa de  $105,658 \text{ MeV}/c^2$  (cerca de 200 vezes a massa do elétron) e uma vida média de  $2,2 \mu\text{s}$ . O fluxo de múons a uma altura de 15000m é de  $220 \text{ partículas}/m^2$ , já na superfície terrestre esse fluxo cai para  $110 \text{ partículas}/m^2$ .

O múon é uma partícula instável que decai espontaneamente através da interação fraca da seguinte forma:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (3.1)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (3.2)$$

onde,  $e^+$  representa o pósitron, anti-partícula do elétron ( $e^-$ ),  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$  representam o neutrino do elétron e múon respectivamente, e  $\bar{\nu}_\mu$  e  $\bar{\nu}_e$  representam os anti-neutrinos do múon e do elétron.

Mesmo chegando à superfície da Terra com velocidade próxima à da luz, com valor médio de  $v = 0,998c$ , o tempo que o múon levaria para percorrer os 15Km de atmosfera, segundo a mecânica clássica, seria de  $t = 50,54\mu s$ . O que equivale a um tempo 22,97 vezes maior do que a vida média do múon. Portanto, o fluxo de múons na superfície terrestre só pode ser explicado graças aos efeitos previstos na Teoria da Relatividade Restrita de Einstein, em particular a contração do comprimento e a dilatação do tempo. Segundo a Teoria da relatividade restrita o tempo não é o mesmo para diferentes sistemas inerciais de referência e depende do movimento relativo dos sistemas. Sendo assim, no sistema de referência do múon, a distância percorrida pelo múon para alcançar a superfície da Terra, é de somente 317 m, e o tempo que os múons levam para percorrer esta distância é de aproximadamente  $1,06 \mu$  segundos.

Graças ao seu poder de penetração na matéria, os múons podem atravessar todo o detector ATLAS tendo pouca interação e sem ser absorvido pelos sub-detectores. Essa característica faz com que o sinal detectado pelo TileCal possua uma baixa relação sinal-ruído, sendo necessário assim, um método mais eficiente na reconstrução de sua trajetória, como a Transformada de Hough que será descrita no próximo capítulo. Como os magnetos do ATLAS não encontravam-se ligados durante boa parte do período de comissionamento, a trajetória deixada por um múon cósmico ao atravessar os sub-detectores do ATLAS era retilínea.

# Capítulo 4

## Transformada de Hough

Neste capítulo iremos apresentar e descrever a Transformada de Hough (TH), um breve histórico de sua origem, além da análise e características de algumas das principais variações da TH que foram citadas neste trabalho.

### 4.1 Transformada de Hough

A Transformada de Hough é uma técnica de processamento de imagens criada para atender a crescente demanda do campo de física de altas energias em reconhecer a trajetória de partículas em imagens obtidas pelos detectores de partículas, na época, fotografias produzidas por câmaras de bolhas. Foi proposta inicialmente em 1959 por Paul V. C. Hough, um pesquisador que trabalhava no CERN, para ser utilizada em conjunto com um equipamento de análise de fotografias de câmaras de bolhas conhecido como *Flying Spot Digitizer* ou *Hough-Powell Device* [17]. Posteriormente, em 1962, a técnica foi patenteada por Paul Hough nos Estados Unidos (U.S. Patent 3.069.654), e foi descrita por completo no artigo intitulado “*Method and means for recognizing complex patterns*” [18], porém só ganhou visibilidade quando publicada em 1969 por A. Rosefeld no artigo “*Picture Processing by Computer*”[19].

A técnica tinha inicialmente o objetivo de detectar linhas retas, ou seja, os rastros deixados pelas partículas carregadas nas câmaras de bolhas na ausência de campo externo, mas em 1972 no trabalho de Richard Duda e Peter Hart intitulado ”*Use of the Hough transform to detect lines and curves pictures*”[20], a transformada

de Hough foi generalizada para detectar qualquer forma geométrica que possa ser parametrizada, como por exemplo, retas, círculos e elipses, tornando-a uma das principais técnicas utilizadas até hoje no processamento digital de imagens e visão computacional.

## 4.2 Transformada de Hough Padrão

A Transformada de Hough Padrão foi a primeira abordagem da TH. Ela consiste do mapeamento dos pixels de uma imagem  $\vec{d}_j = (x, y) \in \Re^2$ , em um espaço de retas ou funções senoidais através de uma função  $f(\vec{a}, \vec{d}_j)$ , onde  $\vec{a}$  são os dois parâmetros que definem a reta, no caso de  $n = 2$ . Também podemos definir a TH como o mapeamento de um determinado espaço de dados em um espaço de parâmetros. No caso do mapeamento do espaço de dados através de retas, um conjunto de pontos no  $\Re^2$  com coordenadas  $(x, y)$  é mapeado pela equação 4.1.

$$c = -mx + y \quad (4.1)$$

Isso significa que para cada ponto  $(x_0, y_0)$  no conjunto de dados, será definida uma reta com equação igual a  $c = -mx_0 + y_0$  no espaço de parâmetros (plano mc), onde a interseção destas retas, ponto  $(m_0, c_0)$ , representa o parâmetro da reta que melhor representa o conjunto de pontos do espaço de dados, onde  $m_0$  e  $c_0 \in \Re$ .

A Figura 4.1 apresenta um exemplo. Dado os pontos  $(1,9)$ ,  $(3,7)$ ,  $(5,5)$ ,  $(7,3)$  e  $(9,1)$  no plano-xy. Estes pontos encontram-se ao longo de uma reta definida pela equação 4.1 com parâmetros  $m = -1$  e  $c = 10$ .

A Transformada de Hough Padrão irá mapear os pontos indicados em funções, como na equação 4.1, da seguinte forma.

$$\begin{aligned} (1, 9) &\rightarrow c = -1m + 9 \\ (3, 7) &\rightarrow c = -3m + 7 \\ (5, 5) &\rightarrow c = -5m + 5 \\ (7, 3) &\rightarrow c = -7m + 3 \\ (9, 1) &\rightarrow c = -9m + 1 \end{aligned}$$

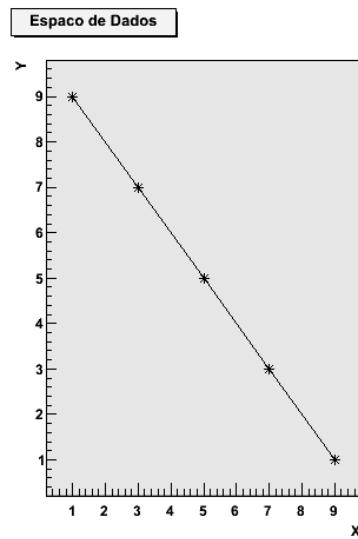


Figura 4.1: Exemplo do mapeamento feito pela THP.

As retas que representam essas equações podem ser vistas no espaço de parâmetros da Figura 4.2.

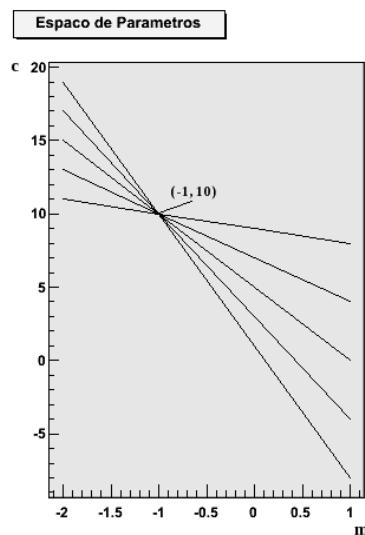


Figura 4.2: Exemplo do espaço de parâmetros da THP, mapeamento pela equação da reta.

Este tipo de mapeamento, porém, possui uma instabilidade, pois tanto o coeficiente angular quanto o ponto de interseção da reta em  $y$  podem tender ao infinito quando a reta se aproxima da vertical. Podemos resolver este problema utilizando o mapeamento através de funções senoidais, que será explicado na seção a seguir.

#### 4.2.1 Parametrização de Retas por Funções Senoidais

Neste tipo de mapeamento, a parametrização do espaço de dados é realizada por funções senoidais através da equação 4.2.

$$\rho = x\cos(\theta) + y\sin(\theta) \quad (4.2)$$

onde  $\rho$  e  $\theta$  são representados na Figura 4.3.

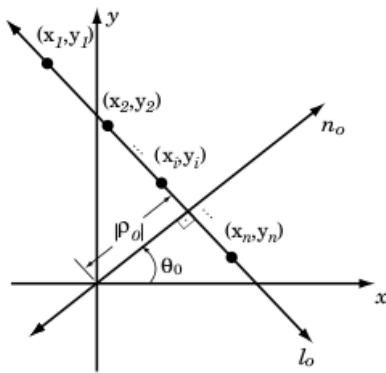


Figura 4.3: Mapeamento senoidal de uma reta.

Para realizar a discretização do espaço de dados em um espaço de parâmetros por funções senoidais é necessário algumas considerações:

Seja a reta  $n_o$  a reta normal à  $l_o$  que passa pela origem do plano-xy,  $\theta_0$  é o ângulo que a reta  $n_o$  forma com o eixo das abscissas e  $|\rho_0|$  o módulo da distância entre o ponto  $(0, 0)$  a reta  $l_o$ . A Figura 4.3 ilustra a relação entre  $n_o$ ,  $l_o$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta_0$ . Na THP cada ponto  $(x_i, y_i)$ ,  $1 \leq i \leq n$ , no espaço de dados, será representado por uma curva de equação  $\rho = x_i\cos(\theta) + y_i\sin(\theta)$ , onde  $\theta \in [0, \pi]$  e  $\rho \in \mathbb{R}$ , a reta  $l_o$  será representada por um ponto  $(\rho_0, \theta_0)$  no espaço- $\rho\theta$ . Deste modo, uma curva senoidal

$\rho = x_i \cos(\theta) + y_i \sin(\theta)$  no plano- $\rho\theta$ , que represente um ponto qualquer  $(x_i, y_i)$  no plano-xy, passará pelo ponto  $(\rho_0, \theta_0)$  se e somente se este ponto pertencer a reta  $l_0$ .

Sendo assim, o mapeamento em funções senoidais dos dados do exemplo anterior será feito da seguinte forma.

$$(1, 9) \rightarrow \rho = 1 \cos(\theta) + 9 \sin(\theta)$$

$$(3, 7) \rightarrow \rho = 3 \cos(\theta) + 7 \sin(\theta)$$

$$(5, 5) \rightarrow \rho = 5 \cos(\theta) + 5 \sin(\theta)$$

$$(7, 3) \rightarrow \rho = 7 \cos(\theta) + 3 \sin(\theta)$$

$$(9, 1) \rightarrow \rho = 9 \cos(\theta) + 1 \sin(\theta)$$

O gráfico dessas funções está representado na Figura 4.4, onde o ponto de encontro dessas senoides representará o parâmetro da reta  $(\rho = 7, \theta = 0, 79)$ .

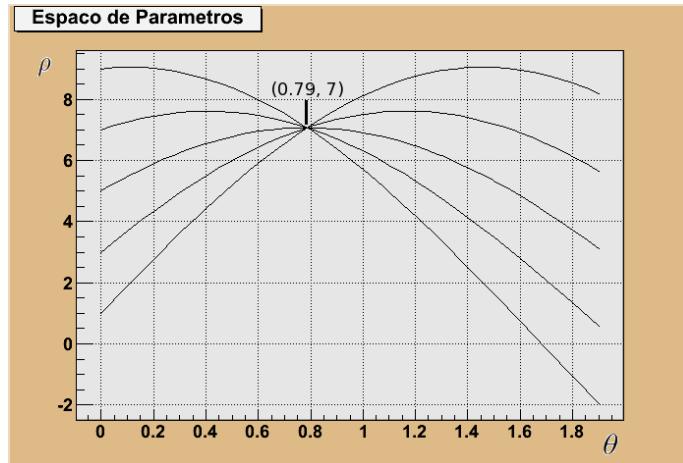


Figura 4.4: Espaço de parâmetros em um mapeamento senoidal de uma reta.

#### 4.2.2 Discretização do Espaço de Parâmetros

Para quantizar o número de interseções das retas ou funções senoidais, para que seja possível determinar o parâmetro da reta, devemos discretizar o espaço de parâmetros  $mc$  ou  $\rho\theta$ . Logo, o espaço de parâmetros se comportará como um histograma de  $(n + 1)$  dimensões (sendo  $n$  o número de parâmetros que definem a

curva), onde devemos delimitar o número de divisões (*bins*) do histograma conforme a precisão desejada em cada parâmetro, além dos limites mínimos e máximos desses parâmetros. Sendo assim, para cada ponto no conjunto de dados, uma célula do acumulador será incrementada. Ao final da parametrização a célula da matriz de acumulação com o máximo local será selecionada e suas coordenadas no espaço de parâmetros definirá a reta no plano-xy.

#### 4.2.3 Considerações

Apesar de ser um método simples para detecção de retas, o mapeamento divergente usado na THP possui alguns problemas, dentre os quais, seu elevado custo computacional e a quantidade de picos falsos no acumulador.

Isto porque, para detectar curvas em uma imagem através de *pixels* em meio a ruído, vemos que, os *pixels* pertencentes a retas verdadeiras contribuem não somente para os picos destas curvas mas também para formar picos de curvas falsas. Estes picos de curvas falsas no acumulador atrapalham a distinção dos máximos locais, e podem ser confundidos com picos verdadeiros fazendo com que curvas que não existam na imagem sejam detectadas. Além disso, para se detectar curvas dentro de uma imagem com acurácia, é necessário que os parâmetros que definem a curva tenha uma boa precisão, ou seja, é necessário uma fina granularidade no acumulador (elevado número de bins), entretanto, quanto mais fina a granularidade maior o custo computacional e utilização de memória. Portanto, um acumulador inapropriadamente escolhido pode acarretar um dos seguintes problemas: falhar ao tentar detectar determinada curva; dificuldades em encontrar o máximo local; baixa acurácia; utilização de muita memória; baixa velocidade do algoritmo. Devido a essas limitações, outras variações da TH foram consideradas, como por exemplo a TH Local (Ohlsson e Peterson, 1992) [21], a TH Adaptativa (Illingworth, 1987) [22] e a TH Randômica (Lei Xu e Erkki Oja, 1989) [23].

## 4.3 Transformada de Hough Local

De modo a contornar os problemas encontrados na THP, surgiu a ideia da TH Local (THL). Sua principal inovação consiste do uso de um mapeamento convergente do espaço de dados para construir o espaço de parâmetros, ou seja, no caso de reconstrução de retas, número de parâmetros  $n = 2$ , a THL procura encontrar a melhor reta que possa ter gerado um determinado par de pontos no espaço de dados.

Sendo assim, cada par de pontos  $(\vec{d}_i, \vec{d}_j)$  no espaço de dados gera duas equações do tipo 4.1 ou 4.2, e a resolução deste sistema gera um único ponto  $\vec{a}_j$  no espaço de parâmetros. Logo para cada par de pontos do espaço de dados, apenas a célula do acumulador que possua as coordenadas dadas por  $\vec{a}_j$  será incrementada. Da mesma forma como na THP, os picos no acumulador representam uma grande probabilidade de se encontrar uma reta. Porém, o uso do mapeamento convergente melhora a distinção entre os máximos locais verdadeiros dos gerados por ruído, além de diminuir drasticamente o custo computacional. Este fato será detalhado a seguir.

### 4.3.1 Mapeamento Convergente

O mapeamento convergente se contrapõe ao mapeamento divergente utilizado na THP e tornam claros dois aspectos vantajosos no uso desse tipo de mapeamento. Primeiramente, o seu uso torna mais nítidos e diferenciados os picos do acumulador, tornando a identificação de um máximo local uma tarefa mais fácil e mais eficiente. O aumento da relação entre as alturas dos picos que representam curvas verdadeiras e dos que representam curvas falsas pode ser quantificado, com descrito em [7], da seguinte forma: seja  $c_1$  uma curva verdadeira com  $n_1$  pixels e  $c_2$  uma curva falsa com  $n_2$  pixels (claramente  $n_1 > n_2$ , caso contrário  $c_1$  não é uma curva verdadeira ou  $c_2$  não é uma curva falsa). No mapeamento divergente, a relação entre os picos gerados por  $c_1$  e  $c_2$  será chamada de  $R(n_1, n_2, 1)$  e é claramente igual a  $n_1/n_2 > 1$ , uma vez que nesse tipo de mapeamento, a altura de um pico é diretamente proporcional ao número de pixels que pertencem a uma determinada curva. No mapeamento convergente, a relação será chamada de  $R(n_1, n_2, n)$ , já que agora os pixels serão tomados  $n$  a  $n$ , e será dada por:

$$R(n_1, n_2, n) = \frac{C_{n_1}^n}{C_{n_2}^n} = \frac{n_1(n_1 - 1)\dots(n_1 - n + 1)}{n_2(n_2 - 1)\dots(n_2 - n + 1)} > R(n_1, n_2, 1) = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.3)$$

Denominando  $n_1/n_2 = \gamma$ , temos que  $R(n_1, n_2, n) \simeq \gamma^n$ , já que em geral  $n_1$  e  $n_2$  são bem maiores que  $n$ . Como  $\gamma > 1$ , temos que  $R(n_1, n_2, n) > R(n_1, n_2, 1)$ , portanto provamos que a relação entre os picos gerados por uma curva verdadeira e uma falsa no mapeamento convergente é maior do que no mapeamento divergente. A segunda vantagem desse mapeamento é a possibilidade de se utilizar outros tipos de estruturas computacionais para acumular os parâmetros encontrados, como por exemplo, listas encadeadas. A Figura 4.5 mostra o fluxograma de funcionamento do algoritmo da THL.

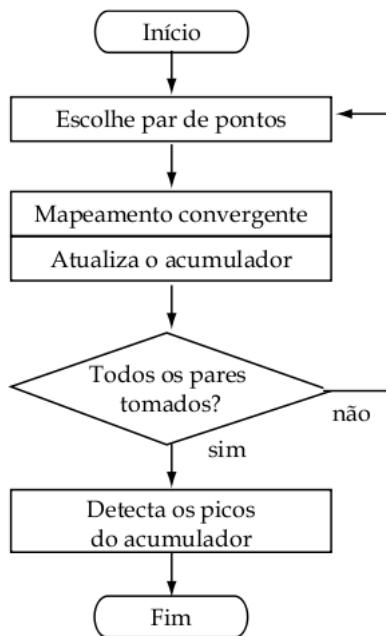


Figura 4.5: Fluxograma de funcionamento da THL.

### 4.3.2 Considerações

O mapeamento convergente utilizado na TH Local tornam consideravelmente mais nítidos e diferenciados os picos máximos no acumulador, tornando assim mais fácil identificá-los. Porém, a THL não nos fornece uma maneira de identificar múltiplas

retas e melhorar a precisão dos parâmetros da reta sem que seja criado um acumulador maior.

## 4.4 Transformada de Hough Adaptativa

A transformada de Hough Adaptativa (THA) foi concebida por J. Illingworth e J. Kittler no artigo intitulado "*The Adaptive Hough Transform*" [22]. Possui como característica principal realizar o processo da THP ou THL repetidamente para um conjunto de dados, aplicando um *zoom* no pico do acumulador. Essas iterações são utilizadas para aumentar a precisão na detecção dos parâmetros  $\vec{a}_j$  da curva. As iterações terminam quando, após uma verificação ao término de cada iteração, a resolução desejada para os parâmetros é alcançada. Desta forma, a THA resolve o problema visto na THP de se encontrar os parâmetros de uma curva com boa acurácia sem o excessivo uso de memória para armazenar um grande aumulador. Isto porque, inicialmente, a THA constrói um acumulador com um número pequeno de *bins* (pouca resolução) apenas para encontrar o pico máximo. Uma vez encontrado o pico máximo, constrói-se um novo acumulador, com uma resolução maior ou igual ao anterior, na região vizinha ao pico encontrado, fazendo com que os parâmetros deste pico seja encontrado com maior precisão a cada iteração. A Figura 4.6 mostra o fluxograma de funcionamento do algoritmo da THA.

### 4.4.1 Considerações

O ganho computacional da THA é a principal vantagem em relação a THP e a THL, pois o acumulador gerado pela THA a cada iteração, é menor do que o acumulador fixo gerado pela THP e THL. Desta forma, apesar de ter que varrer o acumulador a cada iteração, o tempo total para se encontrar uma reta com a THA é menor do que na THP e THL. Além disso, devido ao zoom realizado em cada iteração, a precisão no valor do parâmetro obtido é muito maior. Porém, somente com a THA ainda não é possível a detecção de múltiplos traços de uma maneira eficiente.

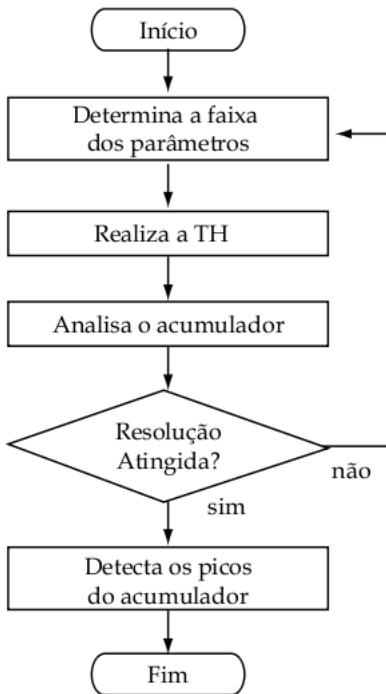


Figura 4.6: Fluxograma de funcionamento da THA.

#### 4.4.2 Comparação entre as Eficiências da THP e da THA

Faremos aqui uma comparação entre as eficiências relativas da THP e da THA para o caso de detecção de retas. Sendo a dimensão do acumulador fixo usado na THP igual a  $\alpha \times \alpha$  e  $\beta \times \beta$  a dimensão do acumulador usado na THA, sendo  $\beta < \alpha$ . A razão entre o tamanho dos acumuladores será dada por:

$$R_s = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 \quad (4.4)$$

Para que a THA atinja a mesma resolução do acumulador da THP, será necessário  $l$  iterações da THA. Onde a cada iteração a resolução da THA aumenta na medida que se diminui a faixa dos parâmetros coberta pelo novo acumulador. Cada parâmetro terá sua faixa dinâmica reduzida por um fator de  $\frac{1}{\xi}$ . Sendo assim, para que a THA atinja a resolução da THP devemos ter:

$$\left(\frac{1}{\xi}\right)^l = \frac{1}{\alpha} \quad (4.5)$$

$$l = \frac{\log(\alpha)}{\log(\xi)} \quad (4.6)$$

Sendo o número de pontos no espaço de dados grande, praticamente todo o tempo gasto no processamento da transformada é devido a operação de retroprojeção e construção do acumulador. Na THP a varredura utilizada na construção do acumulador requer que se calculem a cada iteração  $\alpha$  valores para um dos parâmetros (exemplo  $\rho$ ), enquanto se varia o outro parâmetro dentro de sua faixa dinâmica (exemplo  $\theta \in [0, 2\pi]$ ). Como na THA o número de verificações de interseções entre curvas projetadas e as células do acumulador é de  $2(\beta + 1)$  para cada iteração, temos que em uma iteração a THA é  $\frac{\alpha}{2(\beta+1)}$  mais rápida que a computação da THP. Portanto, a eficiência entre a THA e a THP é dada por:

$$R_c = O\left(\frac{\alpha}{2(\beta+1)} \frac{\log(\alpha)}{\log(\xi)}\right) \quad (4.7)$$

Logo, para o caso em que se deseja encontrar apenas uma reta em um espaço de dados, esta variação da TH é mais eficiente. Porém, ela começa a não ser muito vantajosa quando há no espaço de dados um número grande de retas. No caso em que temos, por exemplo,  $n$  ( $n > 1$ ) retas no espaço de dados, a eficiência da THA dada pela equação 4.7 cairá para:

$$R_c = O\left(\frac{\alpha}{2n(\beta+1)} \frac{\log(\alpha)}{\log(\xi)}\right) \quad (4.8)$$

e a razão entre os tamanho dos acumuladores cairá para  $\frac{\alpha}{n\beta}$ . Como o acumulador inicial da THA possui uma resolução pobre, pode não ser possível distinguir os picos máximos no acumulador. Assim um único pico escolhido na primeira iteração pode representar na verdade mais de uma reta verdadeira. E nas iterações seguintes da THA poderá aparecer mais de um pico no acumulador, sendo difícil determinar qual destes picos é o correto, essa situação será ilustrada na seção 5.5.1.

## 4.5 Transformada de Hough Randômica

Nesta seção vamos apresentar e descrever a Transformada de Hough Randômica (*Randomized Hough Transform* THR), também conhecida como Transformada de

Hough Aleatória. Veremos seus fundamentos e descreveremos seus mecanismos e vantagens.

### 4.5.1 Introdução

A THR foi baseada na estrutura de uma classe especial de grades neurais conhecida como mapa auto-organizável, proposta pelo finlandês Teuvo Kohonen em 1982 com o trabalho “*Self-organized formation of topologically correct feature maps*” [24], este trabalho inspirou outros dois pesquisadores, Lei Xu e Erkki Oja, a aplicar esta técnica na detecção de curvas no trabalho “*Extended self-organizing map for curve detection*” [23]. Com base neste trabalho, estes pesquisadores juntamente com Pekka Kultanen publicaram em 1990 o trabalho “*A new curve detection method: Randomized Hough Transform*” [25], onde propuseram pela primeira vez este novo método de detecção de curva, definindo as ideias básicas de seu funcionamento e comparando seu desempenho com a THP. A consolidação do método e sua formalização matemática só se deu a partir da publicação do trabalho “*Randomized Hough Transform (RHT): Basic Mechanisms, Algorithms, and Computational Complexities*” em 1993 [26].

### 4.5.2 Fundamentos Básicos

O objetivo da THR consiste em determinar tantos parâmetros quantas forem as curvas existentes no espaço de imagens. O método segue alguns fundamentos básicos para detecção/reconstrução de traços. Esses fundamentos estão baseados nas definições a seguir:

**Definição 1.** A THR busca um conjunto de vetores  $\vec{\alpha}_i = [\alpha_1 \dots \alpha_n]^t, \vec{\alpha} \in \Re^n$ , onde cada  $\vec{\alpha}_i$  representa os parâmetros da função que define uma curva, tais que para determinados pontos  $\vec{d}_j = (x, y) \in \Re^2$ , satisfaça  $f(\vec{d}_j, \vec{\alpha}_i) = 0$ , isto significa que cada  $\vec{\alpha}_i$  representa uma curva qualquer  $c_i$  no espaço de dados. As curvas desse conjunto serão validadas seguindo os critérios a seguir;

**Definição 2.** A THR definirá  $B(c_i)$ , um conjunto de pontos  $\vec{d}_j$ , de modo que cada  $\vec{d}_j \in B(c_i)$  esteja dentro da região de interesse (ROI)  $\delta$  de uma dada curva  $c_i$ , isto é, a distância euclidiana de cada  $\vec{d}_j$  a esta curva será menor que  $\delta$ , onde  $\delta$

é um número pré-determinado que forma uma região ao redor da curva  $c_i$ . A THR irá considerar a curva  $c_i$ , definida por  $\alpha_i$ , como sendo verdadeira se houver dentro da região  $\delta$  uma quantidade de pontos maior que um valor mínimo pré-determinado  $m_{min}$ , sendo  $m_{min} > n$ , sendo  $n$  o número de parâmetros que definem a curva. Essa situação de validação de curvas pode ser vista na Figura 4.7;

**Definição 3.** Tendo a função de parametrização  $f$  definida, assim como os valores pré-determinados  $\delta$  e  $m_{min}$ , os passos seguintes são:

- Determinar o número  $M_k$  de curvas verdadeiras.
- Determinar o valor dos parâmetros  $\vec{\alpha}_i$  para cada uma das curvas  $M_k$ .
- Definir se cada *pixel* da imagem pertence a alguma curva, ou classificá-lo como um *pixel* de ruído.

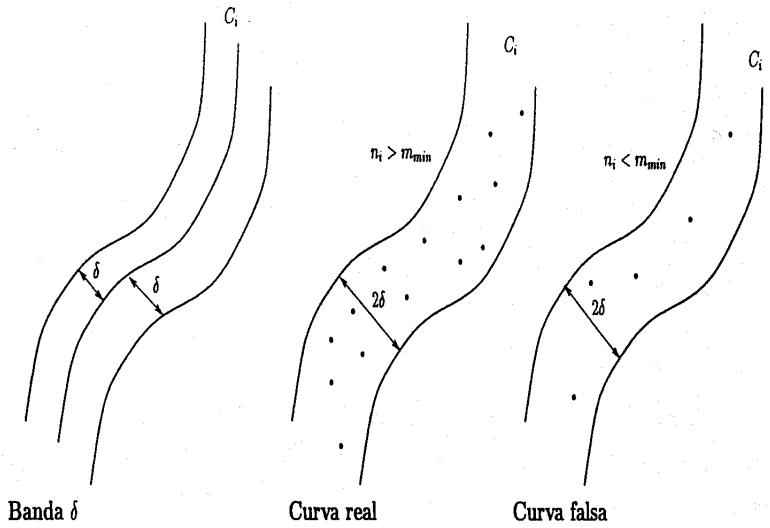


Figura 4.7: Critério de validação de curvas.[7]

#### 4.5.3 Mecanismos

Nesta subseção iremos esclarecer alguns mecanismos que tornam a THR uma excelente ferramenta de detecção de múltiplos traços em uma imagem. Por se tratar

de uma ferramenta de detecção de múltiplos traços em imagens, onde o número de *pixels* a serem tratados é muito grande, a THR se utiliza de um mecanismo de *sorteios simples* aleatórios de *pixels* no espaço de dados, por isso ela recebe o nome de TH Aleatória ou Randômica. Os *sorteios* consistem em escolher aleatoriamente  $n$  (número de parâmetros) *pixels* da imagem ( $\vec{d}_j, j \in [1, \dots, n]$ ), de maneira que todos os *pixels* tenham a mesma probabilidade de serem escolhidos. Após o *sorteio* aplica-se sobre os  $n$  *pixels* o mecanismo de mapeamento convergente apresentado anteriormente. Como resultado obtemos o conjunto de parâmetros  $\vec{\alpha}_i = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^t$  que é a solução das  $n$  equações  $f(\vec{d}_j, \vec{\alpha}_i)$ , formadas pelos  $n$  *pixels* sorteados.

O próximo passo consiste em acumular  $\vec{\alpha}_i$  em uma estrutura que chamaremos de *acumulador*. Como vimos anteriormente, o mapeamento convergente nos permite utilizar várias opções para armazenar  $\vec{\alpha}_i$ , dentre elas podemos destacar: o acumulador padrão tal como fazemos desde a THP, podemos usar lista linear dinâmica, estrutura em árvore, entre outras. As principais vantagens de se utilizar outros tipos de estruturas diferentes do acumulador padrão estão descritas em [25], e consistem basicamente de dois aspectos:

- O acumulador padrão, uma matriz de  $n + 1$  dimensões pré-alocada, só representa uma fatia do espaço de parâmetros, uma vez que o tamanho do acumulador fica limitado devido a relação precisão-custo de memória. Sendo assim, se um dado  $\vec{\alpha}_i$  ultrapassar os limites do acumulador ele não poderá ser armazenado, consequentemente perderemos informação.
- A precisão limitada dos parâmetros deste acumulador é a segunda desvantagem nesse tipo de armazenador.

Uma vez que  $\vec{\alpha}$  foi armazenado no acumulador escolhido, outros *sorteios* ocorrem de forma a acumular um número suficiente de parâmetros no acumulador. Após esse período de sorteios e armazenamento, o máximo local  $\vec{\alpha}_i$  é encontrado no acumulador. Com os parâmetros desse pico máximo, podemos agora encontrar a curva  $c_i$  que os representam no espaço de dados, essa curva será então validada conforme visto na Definição 2. Caso a curva  $c_i$  seja aceita como verdadeira, todos os *pixels* associados a esta curva, ou seja, todos que estiverem dentro da região  $\delta$ , serão re-

movidos da próxima iteração. A THR só termina quando não houver mais curvas a serem detectadas.

#### 4.5.4 Considerações

O que torna este método eficiente é o fato de que a cada iteração a THR remove do espaço de dados da próxima iteração, todos os pontos que tiverem sido associados a alguma curva verdadeira, uma vez que não devem mais contribuir para a detecção de nenhuma outra reta, reduzindo assim o tamanho do novo acumulador, e evitando o aparecimento de picos falsos, uma vez que os pontos pertencentes a curvas verdadeiras quando combinados com pontos de ruído geram curvas falsas. Além disso, o processo da THR só é finalizado quando não houver mais retas a serem detectadas, possibilitando assim a detecção de múltiplos eventos de RC. Devido a estas características, esta poderosa variação da TH apresentou-se como uma ótima alternativa para a implementação do algoritmo de reconstrução de traços tridimensionais produzidos por raios cósmicos no Calorímetro Hadrônico do ATLAS. A forma como essa e as outras variações da TH foram utilizadas neste trabalho será descrita no capítulo 5.

# Capítulo 5

## Reconstrução de Raios Cósmicos no TileCal

Este Capítulo descreve a importância e a contribuição dada pelos raios cósmicos durante a fase de comissionamento do TileCal. O método de reconstrução de múltiplas trajetórias de múons, tema deste trabalho, também será descrito em detalhes.

### 5.1 Introdução

A instalação do detector ATLAS na caverna localizada no ponto 1 de colisão do acelerador LHC ocorreu entre 2005 e 2009. Durante este período todos os subdetectores, sistemas e equipamentos do ATLAS foram submetidos a diversos tipos de testes e calibrações que prepararam o detector para o início das colisões que ocorreu em Novembro de 2009. Neste período, conhecido como comissionamento, os múons provenientes de raios cósmicos desempenharam uma função muito importante, pois devido as suas características apresentadas no Capítulo 3, pouca interação com a matéria e alto poder de penetração, os múons provenientes dos raios cósmicos se tornaram a única fonte de partículas de altas energias disponíveis para os testes.

## 5.2 Comissionamento do TileCal com RC

O comissionamento do TileCal utilizando m úons de raios c ósmicos teve in ício em 2005, tr és anos antes do Inner Detector e do Espectr ômetro de M úons iniciarem sua operac ão. O principal objetivo do trabalho de comissionamento do TileCal foi a validac ão e calibraç ão, especialmente o estudo da estabilidade e uniformidade da resposta do tempo e energia do detector. Para a realizaç ão desses estudos uma das principais medidas a serem feitas é a da distribuiç ão de energia depositada por um RC ao longo de sua trajetória quando cruza o calorímetro. A fim de calcular sua trajetória com o m áximo de exatidão, um algoritmo de detecção eficiente que olha para as células ativas do calorímetro deveria ser implementado. Desta forma, p ôde-se verificar a coerênc ia dos dados reconstruídos, procurando possíveis problemas e testar a uniformidade de energia no calorímetro.

Durante a fase de comissionamento do TileCal, uma ferramenta de análise *offline* chamada TileMuonFitter (TMF) foi criado para realizar a detecção e reconstrução das trajetórias dos raios c ósmicos que atravessavam o detector utilizando as informaç ões obtidas pelas células de leitura do TileCal. Durante todo o comissionamento com raios c ósmicos, este pacote foi extensivamente utilizado na analise de dados e monitoramento, n ão apenas para o TileCal mas tamb ém como entrada para medidas realizadas em outros subdetektors.

### 5.2.1 Descrição do TileMuonFitter

O TileMuonFitter (TMF) é uma ferramenta que identifica as células com energia depositada resultantes da passagem de um m úon c ósmico. Estas células s ão utilizadas para reconstruir as trajetórias desses m úons. O TMF pode utilizar tanto dados de eventos reais de c ósmicos quanto dados simulados via Monte Carlo (MC). Os dados simulados de MC s ão utilizados para a validac ão do TMF e de seus algoritmos. As principais motivações para o desenvolvimento do TMF foram:

- Identificar *regiões de interesse* nos calorímetros Lar e TileCal.
- Determinaç ão do comprimento da trajetória do m úon no TileCal. Esta medida é especialmente importante para o estudo da uniformidade da resposta em

energia nas células do calorímetro. A resposta em energia  $\frac{dE}{dx}$  (Mev/mm) é aproximadamente constante, ou seja, a média de energia depositada nas células do TileCal é aproximadamente proporcional a trajetória do múon. Apesar da energia depositada nas células do TileCal estar disponível para a reconstrução feita pelo TMF, o comprimento da trajetória é de extrema importância para esta análise.

- Determinação de um tempo de referência para os eventos com RC.

O objetivo fundamental do TMF é determinar todos os parâmetros associados a linha reta que descreve a trajetória de cada múon. Após detectar a trajetória do múon, o TMF retorna como resultado a direção da trajetória definida pelos ângulos azimutal ( $\phi$ ) e polar ( $\theta$ ), o comprimento do traço (em mm), além do ponto  $Q(x, y, z)$  onde o múon cruza o plano  $y = 0$ . Outra saída do TMF é o tempo  $t$  em que o múon atravessa o plano  $y$ . Este tempo é estimado através do traço reconstruído e pelo tempo associado a cada um dos canais individuais usados no ajuste. Assume-se que o tempo de cada canal corresponde ao tempo que o múon levou para atravessar a célula.

A primeira tarefa do TMF consiste em rejeitar, de forma simples, as células que não farão parte do algoritmo de reconstrução de trajetórias. O algoritmo rejeita células que possuam energia superior a um *threshold* de 250 MeV e um tempo  $|T_{diff}| > 6ns$ . Esse tempo consiste da diferença do tempo de leitura das duas PMTs de uma célula. O algoritmo também rejeita eventos que possuam apenas células ativas na parte superior ou inferior ao plano  $y = 0$  do detector, num processo chamado *topological cut*. A informação das células que passam por essa seleção estarão agora disponíveis para a aplicação do algoritmo de reconstrução. A seguir, será dada uma breve descrição dos métodos que foram adotados pelo TMF para a reconstrução de trajetórias:

**Método dos Mínimos Quadrados (MMQ):** Esse foi o primeiro método utilizado no TMF. Para cada evento uma linha reta era calculada com o conjunto de células (posições ortogonais de seu centro) disponíveis em cada evento. O método procura minimizar a distância ortogonal do centro de cada célula a

reta para melhor estimar os parâmetros da mesma. Porém, este método é muito sensível às células ruidosas do calorímetro, além de não ser capaz de detectar múltiplos RC em um mesmo evento.

**Transformada de Hough (*versão1*):** A primeira abordagem utilizando Transformada de Hough para a reconstrução de RC no TileCal foi adotada em 2006 para superar algumas das deficiências do método anterior, sua descrição completa pode ser encontrada em [8]. O método combinou a THL juntamente com a THA para reconstruir a trajetória de RC no TileCal. Este método se mostrou mais eficiente que o Método dos Mínimos Quadrados pois é menos sensível ao ruído. Um exemplo disto pode ser visto na Figura 5.1. Porém, esta versão não era capaz de reconstruir múltiplos traços.

**Transformada de Hough (*versão2*):** Esta versão é o tema central deste trabalho e foi desenvolvida para ser capaz de detectar múltiplos traços de RC no calorímetro Hadronico do ATLAS. Nesta versão foi utilizada uma combinação da THL junto com a THR. A descrição completa de seu funcionamento será dada na seção 5.6.

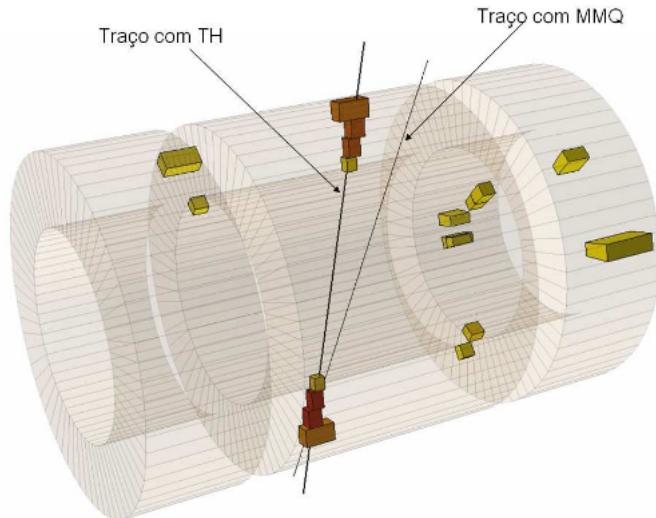


Figura 5.1: Comparação entre a *versão1* da TH e o Método dos Mínimos Quadrados vista no CaloViewer 3D. Fonte:[8]

## 5.3 O Ambiente de Desenvolvimento ROOT

De modo a atender e paralelizar o desenvolvimento de sistemas na área de física de altas energias, pesquisadores do CERN desenvolveram um *framework* de análise de dados chamado ROOT capaz de analisar um grande número de dados de maneira eficiente.

O ROOT possui uma eficiente hierarquia de classes e utiliza a linguagem de programação C++, possui um grande número de ferramentas de análises estatísticas (histogramas multidimensionais, ajuste de curva, gráficos e *fittings*) que facilitam a análise e visualização dos dados gerados nos experimentos realizados no CERN. O presente trabalho foi desenvolvido neste ambiente.

## 5.4 Visualização de Raios Cósmicos com CaloViewer 3D

Além de integrar o pacote TMF, o algoritmo desenvolvido nesse trabalho também é utilizado para reconstruir as trajetórias de RC no visualizador de eventos CaloViewer 3D, desenvolvido por Dsc. Luciano Manhães de Andrade Filho [8]. Este visualizador foi desenvolvido com o pacote de geometria contido no ambiente de desenvolvimento ROOT, e é capaz de reproduzir com detalhes todas as células dos calorímetros do ATLAS (TileCal e LAr), como pode ser visto na Figura 5.2. A escala de energia das células do TileCal variam do amarelo ao vermelho de forma crescente de energia. O CaloViewer 3D, juntamente com a Transformada de Hough, tornou-se uma ferramenta importante no estudo e análise de raios cósmicos do experimento ATLAS. Graças ao seu desempenho e qualidade gráfica, o CaloViewer 3D é utilizado por toda a colaboração na sala de controle do ATLAS não apenas para a visualização de RC, mas também na identificação de células ruidosas dos calorímetros do ATLAS.

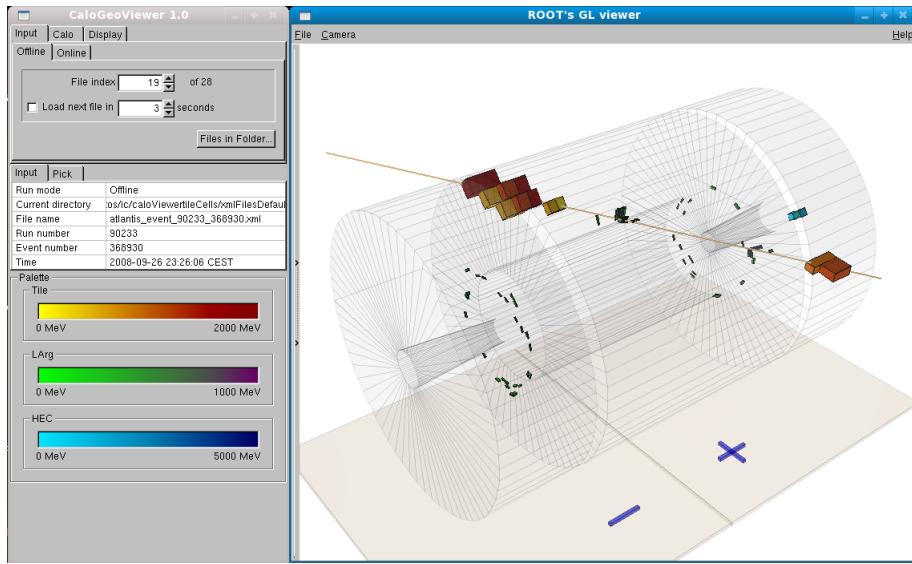


Figura 5.2: Um evento de Raio Cósmico reproduzido pelo CaloViewer 3D.

## 5.5 Detecção de Traços com TH

Para implementar a detecção de traços de RC no TileCal usando a TH, alguns passos devem ser realizados antes de se aplicar a detecção. Esses passos serão listados a seguir:

1. Aplica-se um método de seleção de células para minimizar a quantidade de células ruidosas no espaço de dados. A eficiência do algoritmo de reconstrução de traços depende da aplicação desse método.
2. Substitui-se a geometria das células pelo seu ponto central  $(x, y, z)$ , o conjunto desses pontos formarão a base de dados  $D$  para a aplicação da TH.
3. Para aplicar a TH a fim de encontrar os traços tridimensionais dos RC é preciso projetar o ponto central da célula nas suas projeções ortogonais XY e ZY. As projeções das células do TileCal podem ser vistas na Figura 5.3.
4. Aplica-se a TH nos planos projetivos XY e ZY separadamente. Dessa forma teremos dois acumuladores, que representam os parâmetros que definem uma reta  $\theta$  (em radianos) e  $\rho$  (em mm).

5. Combina-se a informação das retas encontradas em cada plano projetivo para reconstruir o traço tridimensional.

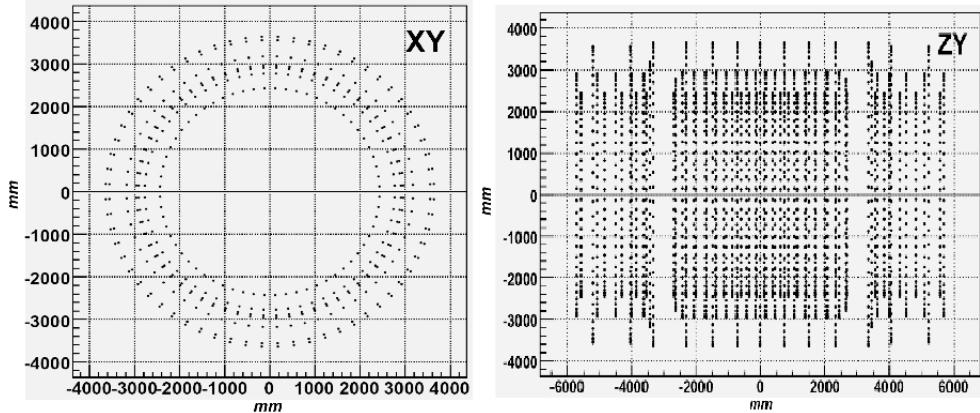


Figura 5.3: Projeções ortogonais do ponto central das células do TileCal.

### 5.5.1 Limitação da *versão1* do algoritmo de detecção de TH

Nesta subseção será explicado a principal motivação para a realização deste trabalho. Abordaremos a limitação da *versão1* do algoritmo de detecção de trajetórias (que utiliza a THA) em detectar múltiplas retas em um mesmo evento. Essa limitação foi explicada detalhadamente na subseção 4.4.2 e será aqui ilustrada com um exemplo real de múltiplos raios cósmicos atravessando o TileCal. A Figura 5.4 ilustra essa situação apresentando um evento típico com múltiplos RC. Podemos observar que há mais de um RC atravessando o TileCal, além disso também há uma considerável quantidade de células de ruído nesse evento.

A *versão1* do algoritmo de detecção realiza o mapeamento convergente de cada projeção ( $XY$  e  $ZY$ ) e cria seus respectivos acumuladores (os acumuladores do evento visto na Figura 5.4 podem ser vistos na Figura 5.5. Os picos máximos no acumulador indicam que a probabilidade de se encontrar uma reta com os respectivos valores de  $\rho$  e  $\theta$  é alta. Podemos observar na Figura 5.5 a existência de múltiplos máximos locais nos acumuladores, isto porque o evento visto na Figura 5.4 possui mais de um RC. Podemos ver também a existência de vários picos menores causados

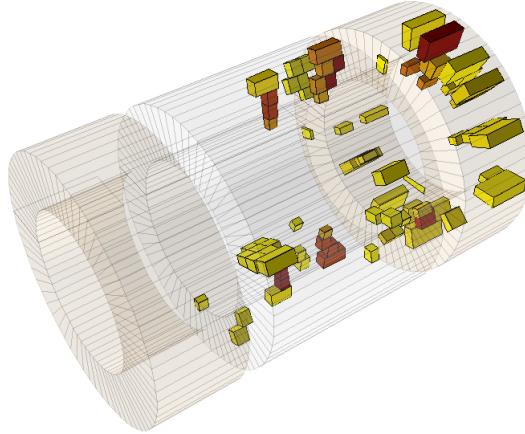


Figura 5.4: Evento com múltiplos RC no TileCal.

tanto pelas células ruidosas como também pela interferência que ocorre entre os picos verdadeiros. Observando o acumulador da projeção XY deste evento, vemos que os picos máximos estão muito próximos um do outro. Portanto, como foi explicado na Subseção 4.4.2, mesmo utilizando a THA para realizar um *zoom* ao redor do pico máximo, o próximo acumulador construído pela THA apresentará mais de um pico máximo, sendo difícil assim determinar qual destes picos é o correto. A Figura 5.6 apresenta o segundo acumulador gerado pela THA, nela podemos observar a presença de mais de um máximo local.

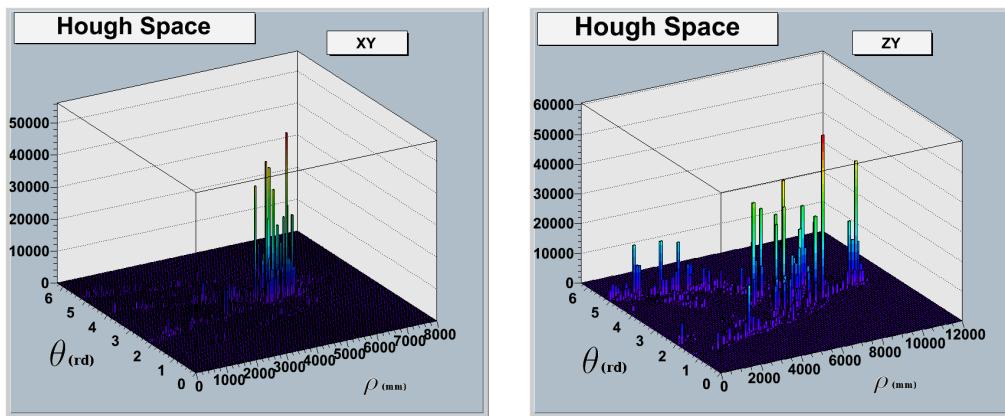


Figura 5.5: Acumulador das projeções ortogonais do evento da Figura 5.4.

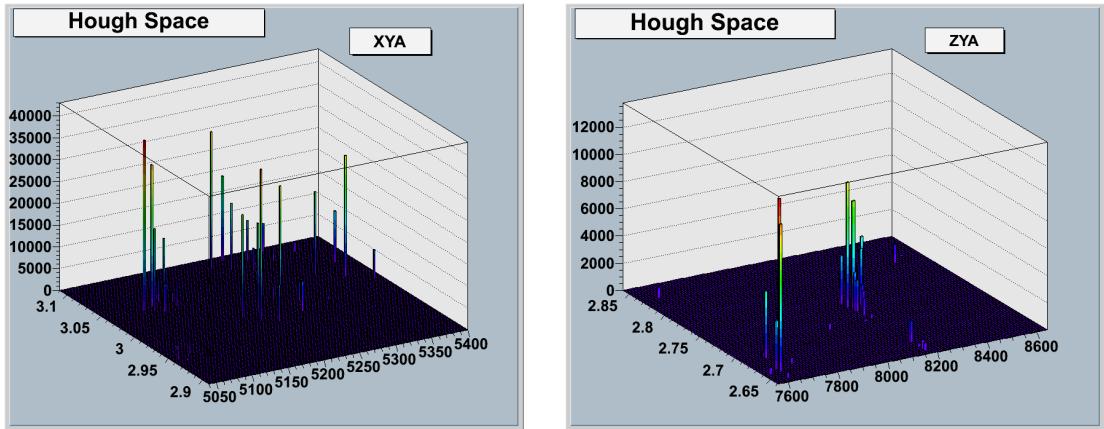


Figura 5.6: Segundo acumulador criado pela THA das projeções ortogonais do evento da Figura 5.4.

A Figura 5.7 demonstra que o algoritmo da *versão1* falhou ao tentar reconstruir uma trajetória em um evento com mais de um RC. Por esta limitação foi necessário a implementação do algoritmo que será apresentado a seguir.

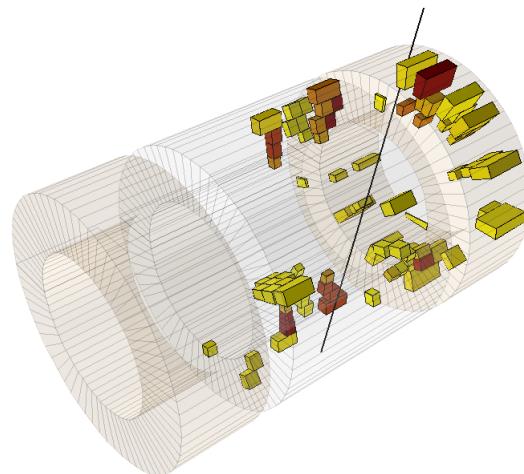


Figura 5.7: Evento de múltiplos RC no TileCal reconstruído pela *versão1*.

## 5.6 Detecção de Múltiplos Traços com Transformada de Hough

No início de 2008, o comissionamento do TileCal estava em sua fase final, e praticamente todo o calorímetro se encontrava em operação. Devido ao uso total do volume do detector, eventos com múltiplos RC atravessando o TileCal eram muito mais comuns do que eventos com um único RC, sendo assim muitas informações a respeito de RC não eram detectadas pois a *versão 1* não conseguia detectar múltiplos RC.

O algoritmo desenvolvido neste trabalho, utilizou algumas das principais características das transformadas de Hough apresentadas no Capítulo 4, porém o maior diferença desta versão para a *versão 1* do algoritmo de reconstrução foi o uso de duas das principais características da THR descritas no Capítulo 4:

1. A busca e criação de pequenos espaços de dados (*Region of Interest*, ROI) antes de aplicar a parametrização do espaço de dados.
2. A eliminação das células contidas dentro de um espaço (*Region of Exclusion*, ROE) ao redor da reta encontrada em cada iteração para que estas não interfiram na próxima iteração do algoritmo.

### 5.6.1 Regiões de Interesse e Exclusão

Segundo a teoria da THR, discutida no Capítulo 4, a região de interesse ao redor da curva encontrada possuía um valor fixo  $\delta$ , como pode ser visto na Figura 4.7, e para o caso da curva ser uma reta, essa ROI tomava a forma de um retângulo na região de vizinhança da reta, porém, no algoritmo aqui descrito a forma dessa região teve que ser adaptada. Como foi mostrado no Capítulo 2, o calorímetro Hadrônico do ATLAS possui três camadas de células diferentes (A, BC e D), estas células possuem diferentes dimensões (ver Tabela 5.1), portanto quando o algoritmo necessita criar uma região ao redor de uma reta (ROI ou ROE), o algoritmo calcula a distância do ponto central de uma célula à reta, caso esta distância seja menor ou igual a metade da dimensão do tipo de célula em questão, significa que esta célula

Camada	A	BC	D
Long Barrel	300 mm	375 mm	860 mm
Extended Barrel	750 mm	750 mm	1700 mm

Tabela 5.1: Diâmetro da ROI ou ROE para cada camada.

pertence a região. As regiões criadas ao redor das trajetórias reconstruídas com este algoritmo tomam uma forma aproximada a de um hiperbolóide de duas folhas, como pode ser visto na Figura 5.8.

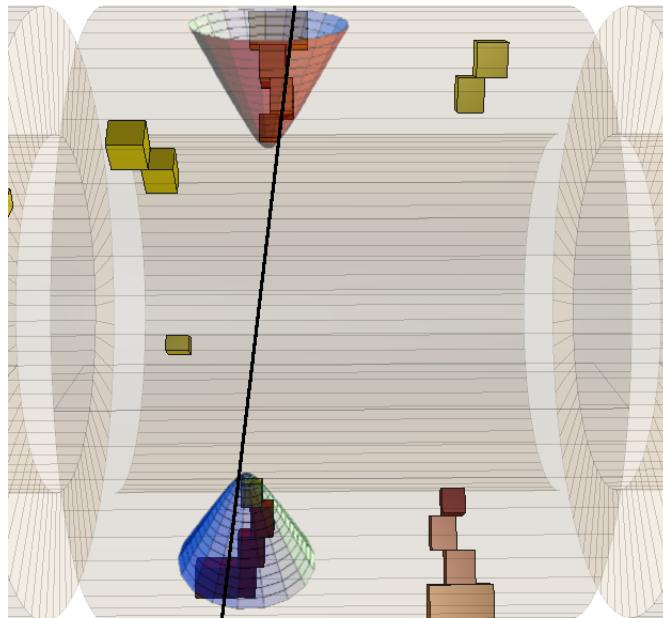


Figura 5.8: Regiões de Interesse ou Exclusão na forma de um hiperbolóide de duas folhas.

### 5.6.2 Metodologia

Cada iteração realizada por este algoritmo é constituída por quatro etapas principais, que são repetidas até que não haja mais ROI válidas, e consequentemente retas a serem encontradas. Estas etapas serão descritas a seguir:

1. O espaço de dados  $D$  é percorrido de duas em duas células, o algoritmo então

calcula a reta que passa por essas duas células, e ao redor desta reta criamos uma região de interesse ROI. Se esta região de interesse contiver um número mínimo (3) e máximo (500) de células que possam descrever um evento de RC, então o algoritmo passa para a próxima etapa. O próximo critério de seleção dessa ROI é feita pela sua quantidade de energia, se a soma de energia das células pertencentes a ROI for maior que 2.3 GeV, essa ROI é considerada válida e ficará disponível para o mapeamento da TH como um novo espaço de dados  $d_i$ . A criação da ROI utilizando a quantidade de células e a quantidade de energia acumulada é coerente com a forma como o RC passa pelo TileCal e acumula energia em suas células. Intrisicamente esse processo exclui as células de ruído do calorímetro do processamento da TH. Dessa forma, o espaço de dados  $D$  será da forma  $D = \sum_{i=1}^n d_i$ .

2. O algoritmo mapeia o espaço de dados  $d_i$  utilizando o mapeamento convergente e acumula os parâmetros  $(\theta, \rho)$  encontrados em um espaço de parâmetros  $S$ . O espaço  $S$  utilizado neste trabalho foi um histograma tridimensional. Como explicado no Capítulo 4 outros tipos de espaço de acumulação podem ser utilizados, porém graças ao método de seleção de células aplicado antes do algoritmo de detecção e ao método de seleção de ROI, o número de células utilizadas para realizar o mapeamento diminui consideravelmente. Por esta razão, o ganho computacional que poderia ser obtido utilizando outro tipo de espaço  $S$  não seria considerável, pois só é perceptível quando existe um grande número de pixels a serem analisados, como por exemplo em imagens muito ruidosas. Portanto o uso de um acumulador foi computacionalmente viável. O acumulador utilizado possui uma granularidade de 100 milímetros para  $\rho$  e 0.05 radianos para  $\theta$ .
3. Caso o espaço  $S$  possua algum pico maior do que um dado limiar, o processamento prossegue. O pico máximo do acumulador é localizado e os parâmetros  $(\rho_i, \theta_i)$  da reta  $i$  considerada verdadeira é encontrada.
4. Após a etapa anterior, de encontrar uma reta válida, a próxima etapa do algoritmo consiste em criar uma região de exclusão (ROE) ao redor desta nova reta. Após criarmos esta região, o algoritmo percorre o espaço de dados

$D$  para remover da próxima busca as células dessa região de exclusão. Isto é feito para que estas células não atuem como ruído na próxima recursão do algoritmo.

Apesar do método de mapeamento convergente já diferenciar os picos verdadeiros dos picos de ruído no acumulador, como explicado na Seção 4.3.1, utilizamos neste trabalho a informação disponível de energia acumulada em cada célula para melhorar ainda mais a diferença entre os picos. Isto porque as células que realmente foram atravessadas por um mísseis, teoricamente possuem mais energia acumulada do que as células ruidosas. Contudo, como cada camada de células do acumulador possui diferentes dimensões tivemos que normalizar a energia, assim nós dividimos a energia da célula pelo seu respectivo volume, e usamos o produto das densidades de energia das células envolvidas no mapeamento convergente como um peso para o incremento do acumulador.

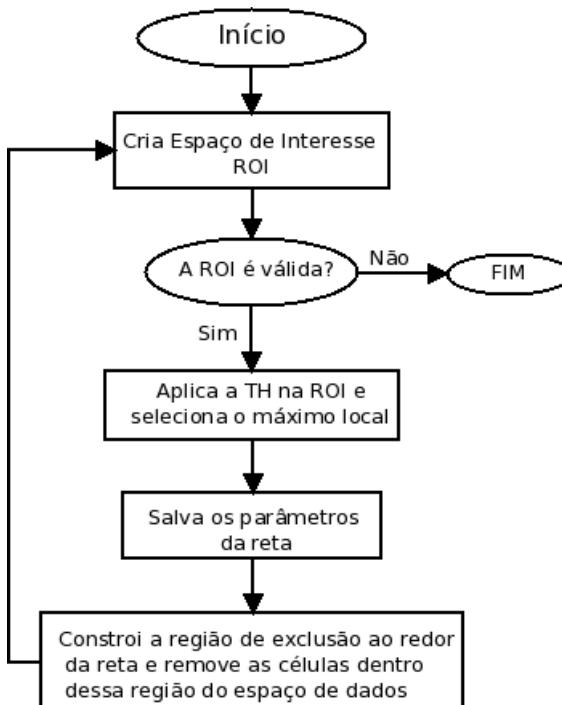


Figura 5.9: Fluxograma do algoritmo de detecção de múltiplas retas.

Após a integração deste algoritmo ao TMF, feita em 2008, o TMF passou a retornar outros parâmetros de saída além dos apresentados anteriormente, como por exemplo, o número de traços encontrados em cada evento e qual desses traços possui a maior energia acumulada, ou seja, qual o RC mais energético a passar no calorímetro no mesmo evento. Para cada traço também é retornado o número de células dentro da ROI e a soma de células utilizadas em cada evento para a reconstrução dos traços.

Apesar desse algoritmo ter sido originalmente desenvolvido para a reconstrução de traços de raios cósmicos, ele também foi capaz de reconstruir trajetórias de partículas secundárias, *halo muons*, produzidas pelas primeiras circulações de feixes no LHC. A Figura 5.10 mostra um evento típico de *halo muons*. As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam alguns eventos com múltiplos RC reconstruídos com esse algoritmo.

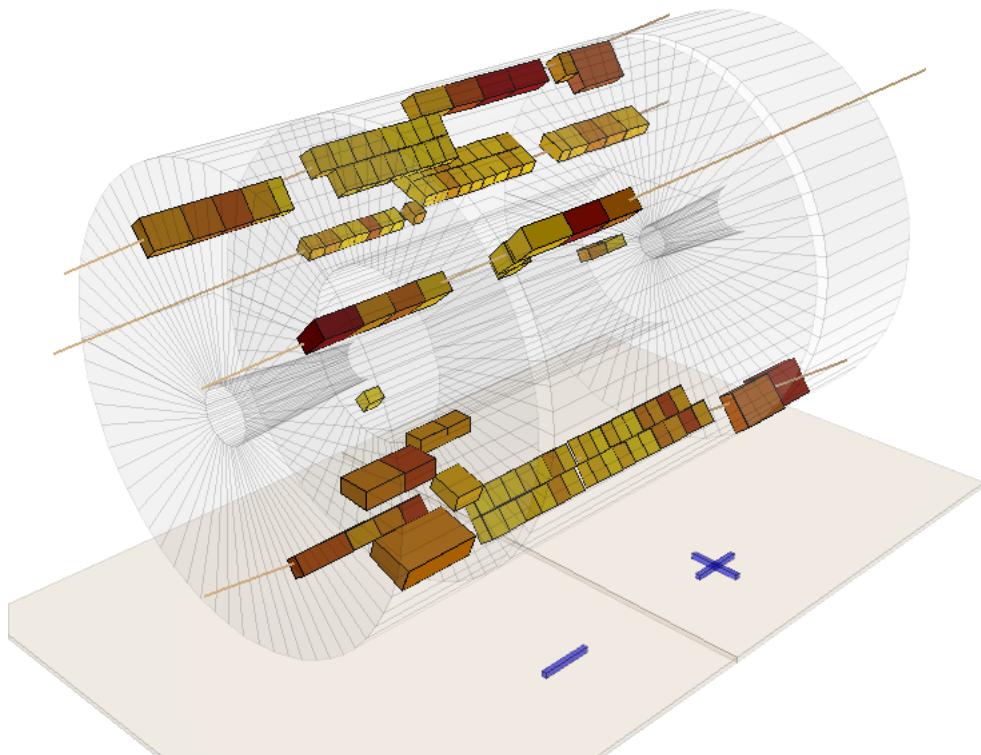


Figura 5.10: Típico evento com *halo muon* reconstruído com o algoritmo de múltiplas trajetórias.

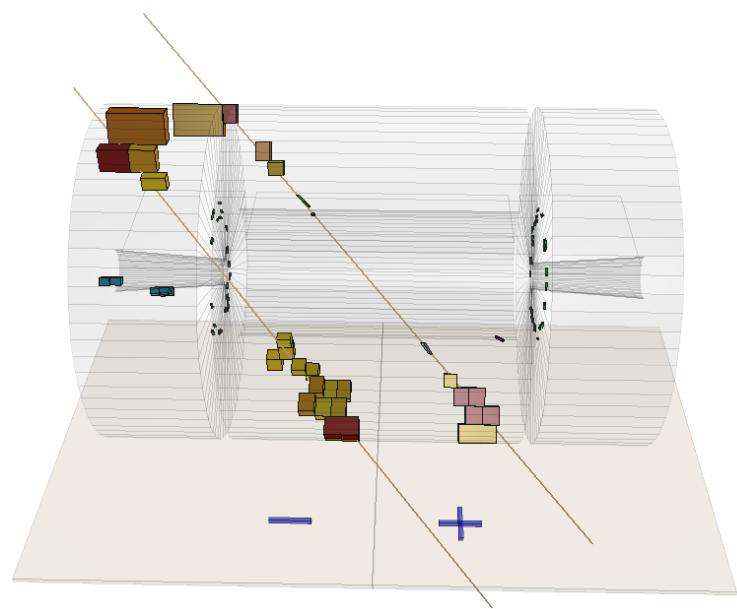


Figura 5.11: Evento com múltiplos raios cósmicos reconstruído com o algoritmo de múltiplas trajetórias.

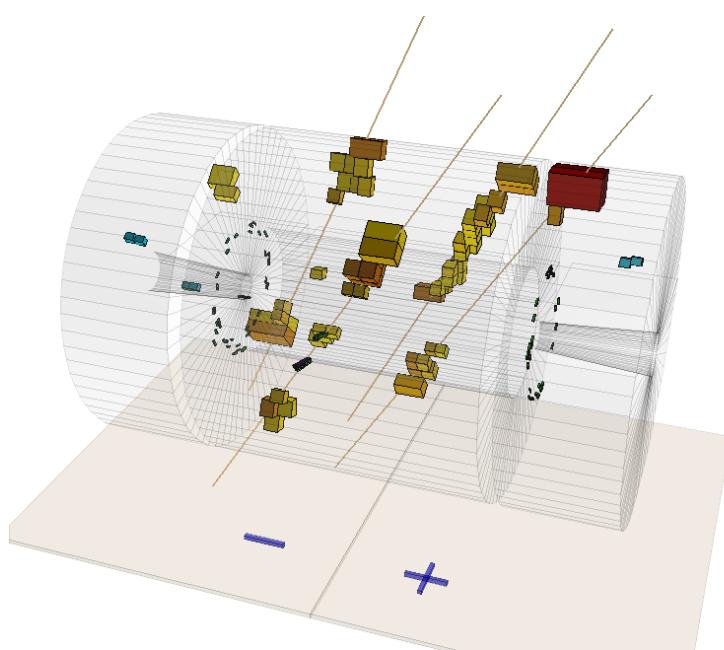


Figura 5.12: Evento com múltiplos raios cósmicos reconstruído com o algoritmo de múltiplas trajetórias.

# Capítulo 6

## Resultados Experimentais

Desde que o algoritmo de detecção de múltiplas trajetórias foi incorporado ao TMF, diversos trabalhos e estudos foram realizados utilizando a trajetória dos m úons. Este capítulo apresenta os resultados obtidos e a validação do algoritmo de reconstrução de múltiplas trajetórias baseado na Transformada de Hough.

### 6.1 Algoritmo de Múltiplas Trajetórias

O algoritmo desenvolvido neste trabalho conseguiu realizar a tarefa de reconstruir múltiplas trajetórias de m úons em eventos detectados pelo calorímetro hadrônico do ATLAS, conforme os exemplos mostrados nas Figuras 5.11 e 5.12. Além da capacidade de detectar múltiplos RC, o algoritmo apresenta duas grandes vantagens, se comparado com a *versão1* do algoritmo de detecção com TH. Essas vantagens advêm do fato do algoritmo realizar o mapeamento convergente e criar o acumulador apenas com as células contidas dentro de uma ROI. Na *versão1*, o algoritmo precisava utilizar todas as células do evento para realizar o mapeamento convergente e criar o primeiro acumulador, com vistas a reconstruir uma única trajetória. Já o algoritmo da *versão2* necessita de apenas uma parte do total das células de um evento para reconstruir as trajetórias dos RC. Esta característica pode ser vista no gráfico da Figura 6.1, que mostra a quantidade média utilizada do total de células em um evento para a reconstrução das trajetórias de m úons em um mesmo evento.

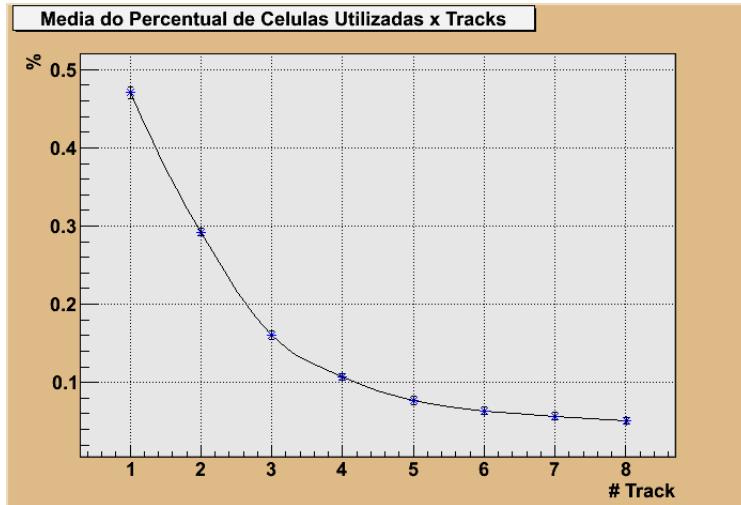


Figura 6.1: Distribuição do percentual de células necessárias para se reconstruir retas em eventos com múltiplos RC.

Além disso, na *versão1* do algoritmo, era necessário aplicar a THA no primeiro acumulador criado para obter os parâmetros da reta com boa precisão. Sendo que o primeiro acumulador criado deveria cobrir toda a região possível de  $\theta$  ( $\theta \in [0, 2\pi]$ ) e  $\rho$  ([0,8000] em XY e [0,12000]) em ZY, pois ela utiliza todas as células do evento para fazer a acumulação dos parâmetros, como pode ser visto na Figura 5.5. Isto significa que, para encontrar uma trajetória de uma reta, a *versão1* utilizava dois acumuladores iniciais para as projeções XY e ZY e mais dois para realizar a THA.

O algoritmo da *versão2*, por usar um pequeno número de células para reconstruir o traço dentro de um ROI, elimina a necessidade de se aplicar a THA no acumulador para melhorar a precisão. Isto porque a busca por ROI intrinsecamente já realiza esta tarefa de forma mais eficiente. Sendo assim, os acumuladores criados já possuem uma boa acuidade. O algoritmo precisa de apenas dois acumuladores (um para cada projeção) para encontrar uma trajetória. Isso pode ser visto nas Figuras 6.2 e 6.3 que apresentam os acumuladores de cada reta encontrada no evento mostrado na Figura 5.11.

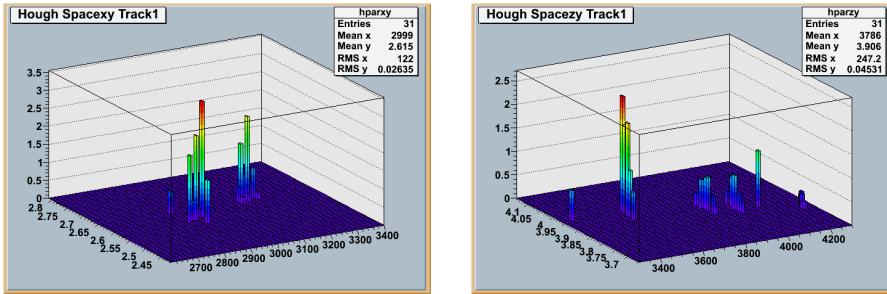


Figura 6.2: Acumuladores do primeiro traço encontrado no evento da Figura 5.11.

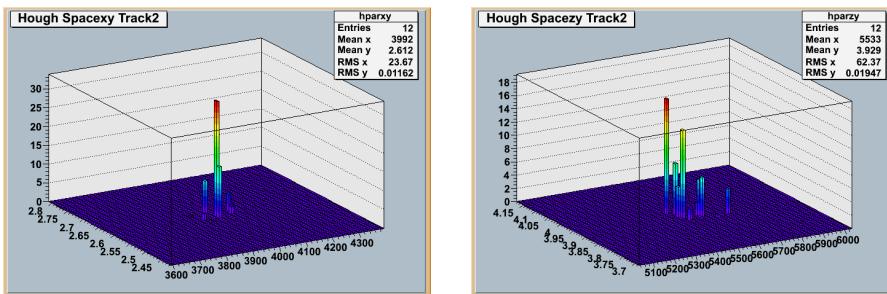


Figura 6.3: Acumuladores do segundo traço encontrado no evento da Figura 5.11.

## 6.2 Medida da Multiplicidade de RC em Eventos no TileCal

Um estudo sobre o número de mûons encontrados por evento foi realizado utilizando o algoritmo de detecção de múltiplos traços. A distribuição mostrada na Figura 6.4 foi feita com uma tomada de dados de 11 horas de duração. Podemos observar que, em um único evento, foram detectados um máximo de 26 mûons. Devido à granularidade do TileCal, a qualidade do processo de reconstrução diminui com a multiplicidade, de modo que um número limite que garantisse uma boa reconstrução de cada trajetória foi encontrado. Verificou-se, visualmente utilizando o CaloViewer que, para uma multiplicidade acima de 8, a maioria dos eventos não apresenta uma boa qualidade de reconstrução em todos os traços, devido ao alto número de células ativadas no TileCal.

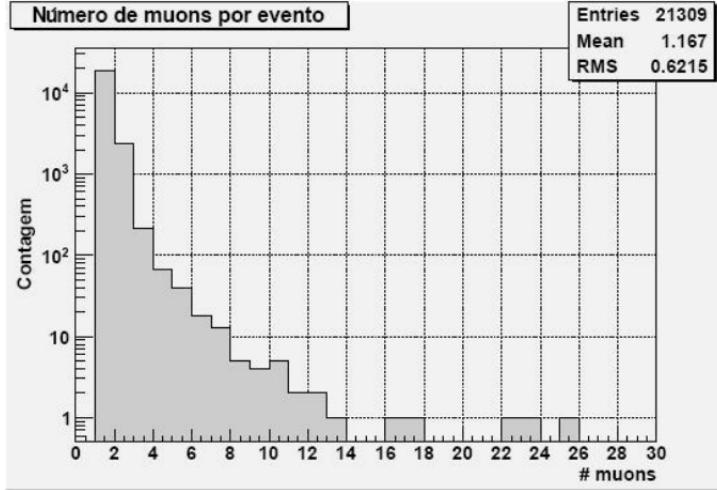


Figura 6.4: Distribuição da quantidade de mísseis por eventos detectados com o método da TH para traços múltiplos. Fonte:[8]

Múltiplos mísseis cósmicos detectados em um mesmo evento são gerados por uma única partícula primária de alta energia que chega na atmosfera terrestre. Estes mísseis alcançam a superfície da Terra em trajetórias praticamente paralelas. Este comportamento foi observado durante a realização deste trabalho, com a ajuda do visualizador CaloViewer3D [8] e foi usado para medir a relação entre a qualidade de reconstrução e a multiplicidade de mísseis. Estes eventos são de fundamental importância em estudos de RC. A Figura 6.5 mostra dois eventos com alta multiplicidade de mísseis. No evento da esquerda, 8 trajetórias quase paralelas foram identificadas, sugerindo que a detecção de um RC altamente energético foi feita com boa precisão. No evento da direita, 24 traços foram detectados, observa-se pelo número de células ativadas que não é possível identificar trajetórias individuais. Porém, podemos observar que algumas das trajetórias reconstruídas possuem um padrão de paralelismo, isto indica que no começo da reconstrução o número de células ativadas prejudicou a detecção de trajetórias individuais, porém como o número de células diminuiu a reconstrução dos traços pela TH é melhorada.

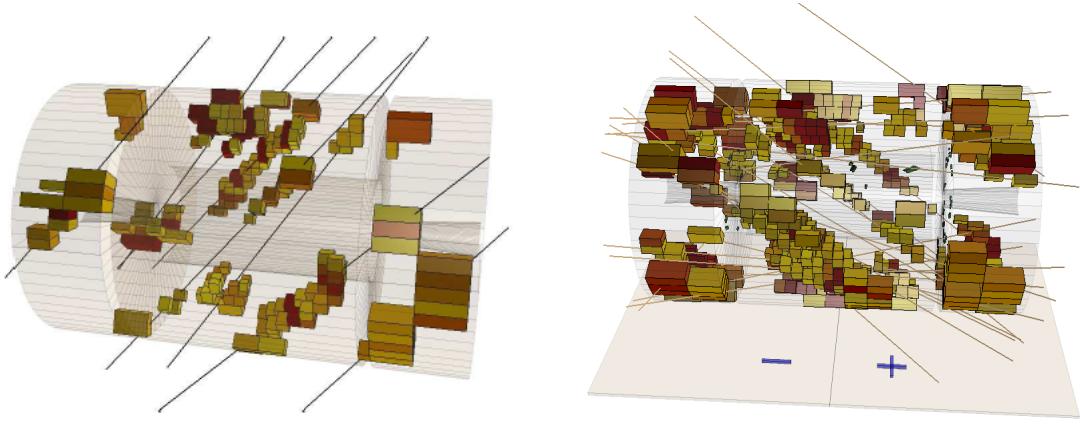


Figura 6.5: Eventos de RC com alta multiplicidade de m úons. Esquerda: um evento com 8 m úons é reconstruído com boa precisão. Direita: devido ao grande n úmero de células ativadas, a maioria dos traços reconstruídos n ão s ão confiáveis.

### 6.3 Validação do Algoritmo com dados de Monte Carlo

Uma das melhores formas de estudar a performance das trajetórias encontradas pelo algoritmo é utilizando dados simulados gerados por MC e comparando o resultado com os parâmetros (verdadeiros) fornecidos pela simulação de MC. Os dados simulados via MC retornam os seguintes parâmetros dos traços  $\tau_{truth} = (d_0, z_0, \phi_0, \theta_0, k)$ . O algoritmo TMF nos fornece as informações geométricas do traço reconstruído  $\tau_{TMF} = (\phi_{TMF}, \theta_{TMF}, X, Y, Z)$ . Para comparar os dados de MC com os dados do TMF, é necessário identificar cada um dos traços de MC e os traços reconstruídos com o TMF para garantir a compatibilidade. Sendo assim, para cada evento, foram criados os seguintes vetores  $t_{MC} = (track_{MC,1}, \dots, track_{MC,N})$  para os traços de MC e o vetor  $t_{TMF} = (track_{TMF,1}, \dots, track_{TMF,M})$  para os traços reconstruídos pelo TMF (onde  $M \leq N$  devido aos pré-processamentos aplicados antes da TH). Então para cada  $track_{MC,i} \in t_{MC}$  e  $track_{TMF,j} \in t_{TMF}$  pertencentes a um mesmo evento, sua distância euclidiana no espaço de parâmetro  $(\eta, \phi)$  foi calculada da seguinte forma:

$$R_{ij} = \sqrt{(\eta_{TMF,j} - \eta_{MC,i})^2 + (\phi_{TMF,j} - \phi_{MC,i})^2} \quad (6.1)$$

onde,  $\eta_{TMF,j}$  e  $\eta_{MC,i}$  são as pseudo-rapidez associadas ao ângulo  $\theta$  do traço TMF e MC respectivamente, calculadas pela equação 2.1. Depois de calculado todos os  $R_{ij}$  para todos os traços em  $t_{TMF}$  e  $t_{MC}$  em cada evento, o par  $(track_{MC,i}, track_{TMF,j})$  que possuir  $R_{ij} < 0,25$  é considerado como sendo igual, ou seja, são considerados como sendo o mesmo traço.

Em [9], foi utilizado um banco de dados com 100.000 eventos de dados simulados por MC, com um conjunto total de 105.717 traços verdadeiros. O procedimento descrito acima foi utilizado para a validação: 105.505 desses traços reconstruídos pelo TMF foram considerados iguais aos traços verdadeiros, uma eficiência de 99,8%. Outra maneira de validar o algoritmo é observando a distribuição dos principais parâmetros que definem a reta  $\theta$  e  $\phi$ . As Figuras 6.6 e 6.7 mostram a distribuição de  $(\theta, \phi)$  para os traços simulados de MC e para os traços reconstruídos com o TMF, onde pode-se notar que as distribuições são muito similares.

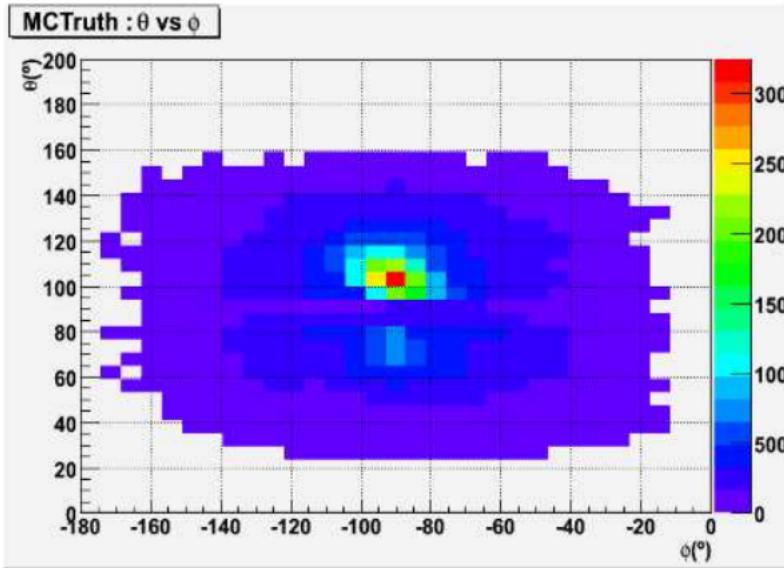


Figura 6.6: Distribuição dos parâmetros  $(\theta, \phi)$  para MC. Fonte:[9]

Esta similaridade é mais perceptível e pode ser melhor quantificada pela distribuição da precisão angular dos traços  $(\Delta\theta, \Delta\phi)$ , onde  $\Delta\theta = \theta_{MC} - \theta_{TMF}$  e  $\Delta\phi = \phi_{MC} - \phi_{TMF}$ . As distribuições da precisão de ambos os ângulos podem

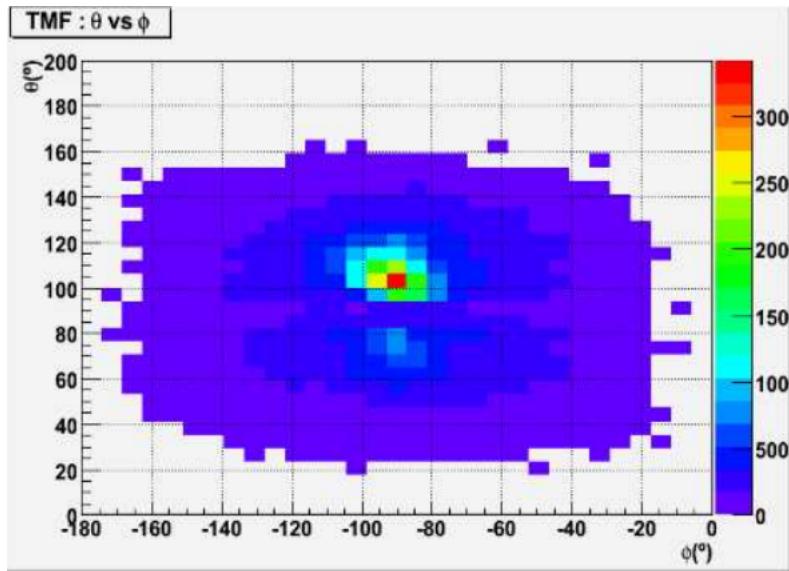


Figura 6.7: Distribuição dos parâmetros  $(\theta, \phi)$  para o TMF. Fonte:[9]

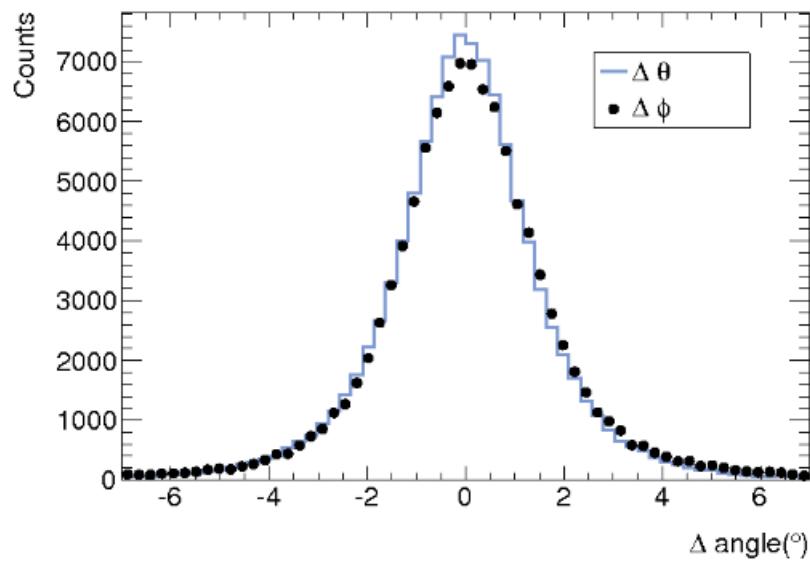


Figura 6.8: Precisão angular para os ângulos  $\theta$  e  $\phi$ . Fonte:[10]

ser vistas na Figura 6.8. O erro angular obtido pelo desvio padrão da distribuição para  $\theta$  e  $\phi$  foi de aproximadamente  $\sigma\theta = \sigma\phi \approx 1.6^\circ$  [9].

A partir desse desvio, outra estimativa pode ser obtida, calculando-se o erro do cálculo do comprimento do traço feito pelo TMF. Essa estimativa foi feita considerando-se o pior caso possível do maior evento projetivo<sup>1</sup> de RC que possa passar pelo calorímetro. Desta maneira, a estimativa do erro será o maior erro no cálculo do comprimento que pode ser computado, usando-se os desvios dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ . O cálculo do erro do comprimento será dado por  $\Delta P = P' - P$ , onde  $P$  é o comprimento verdadeiro da trajetória de um RC, e  $P'$  o comprimento considerando-se o desvio angular. A Figura 6.9 representa essa situação. Fazendo a soma quadrática do  $\Delta P$  associado com o  $\delta(\theta)$  e o  $\Delta P$  associado com o  $\delta(\phi)$ , o erro encontrado no cálculo do comprimento do traço pelo TMF foi de 2,4% [9].

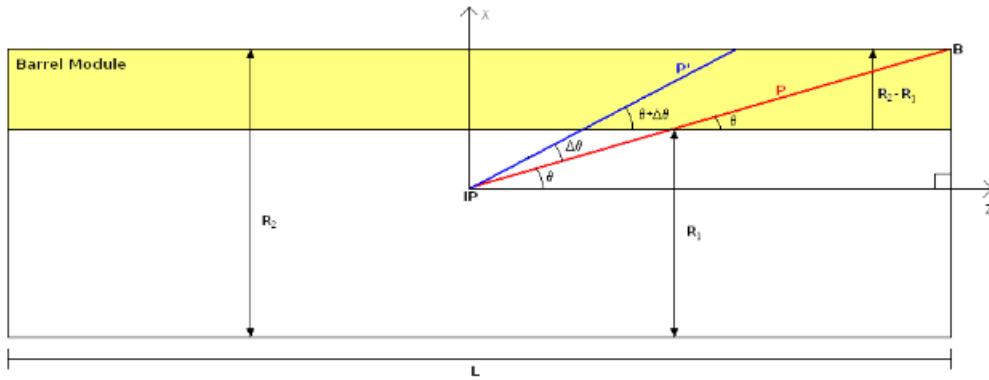


Figura 6.9: Cálculo do erro de comprimento entre dois traços. Fonte:[9]

Os parâmetros  $(X, Z)$  onde o traço intercepta o plano  $(Y = 0)$  dos traços reconstruídos pelo TMF também foram comparados com os traços da simulação de MC. Como a simulação de MC não fornece esses parâmetros, foram utilizadas as equações 6.2 e 6.3 para o cálculo. As distribuições de  $X$  e  $Z$  para cada um dos traços simulados (MC) e reconstruídos (TMF) são mostradas nas Figuras 6.10 e 6.11, respectivamente. Assim, como no caso da distribuição angular, a melhor forma de quantificar a diferença entre os parâmetros é através das distribuições de  $\Delta X$  e  $\Delta Z$ , que são dadas por  $\Delta X = X_{MC} - X_{TMF}$  e  $\Delta Z = Z_{MC} - Z_{TMF}$ , e podem ser vistas na Figura 6.12.

---

<sup>1</sup>Raio cósmico que passa pelo ponto de interação do calorímetro ( $x=0, y=0, z=0$ ).

$$X = d_0[\sin \phi_0 + \cot \phi_0 \times \cos \phi_0] \quad (6.2)$$

$$Z = z_0 + d_0 \times \cot \theta \times \cot \phi_0 \quad (6.3)$$

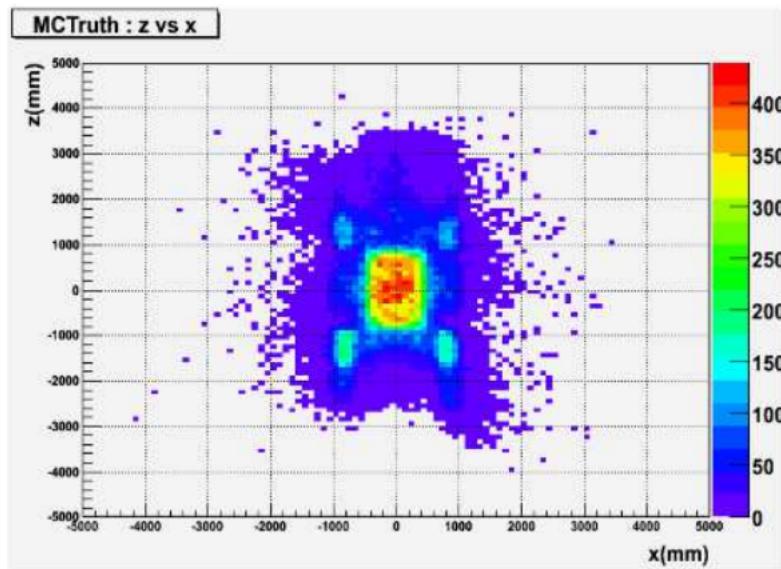


Figura 6.10: Distribuição dos parâmetros ( $X, Z$ ) para MC. Fonte:[9]

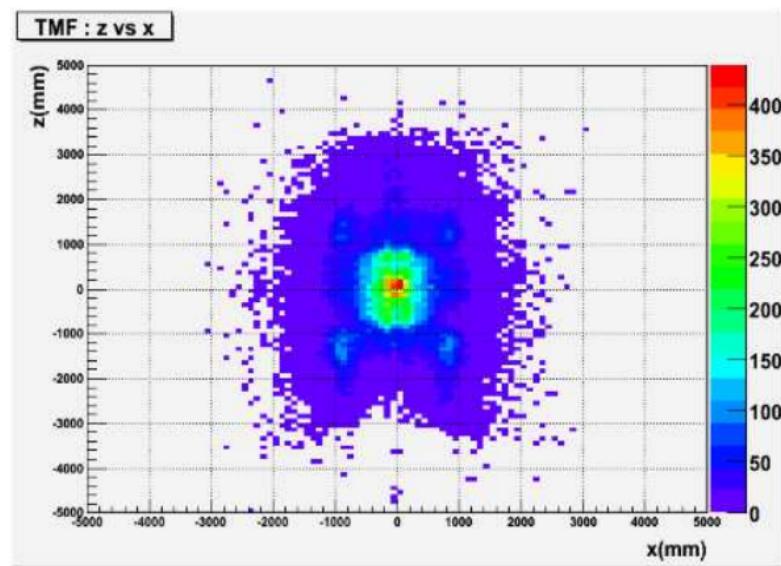


Figura 6.11: Distribuição dos parâmetros ( $X, Z$ ) para o TMF. Fonte:[9]

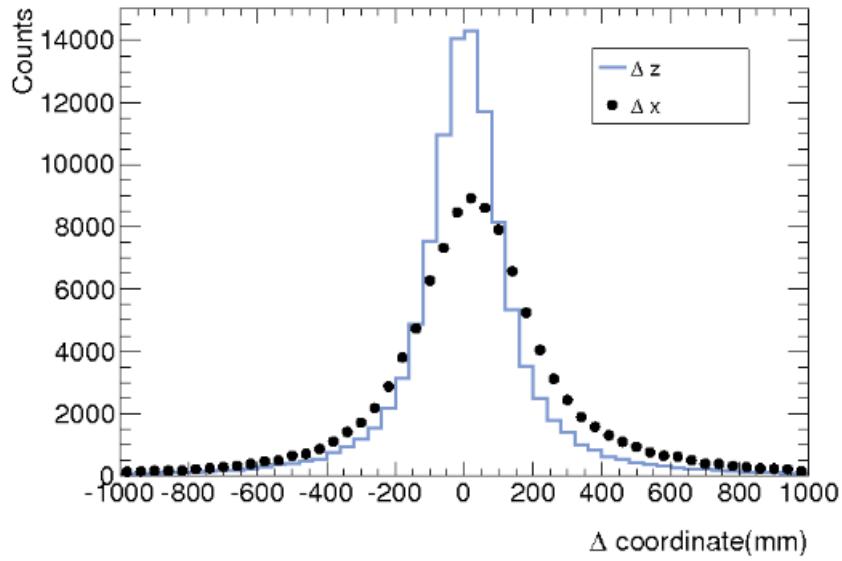


Figura 6.12: Precisão das coordenadas X e Z dos traços no plano ( $Y=0$ ).Fonte:[10]

A precisão obtida para os dois ângulos foi de  $1.6^\circ$  e, como visto anteriormente, esse desvio angular produz, no máximo, uma diferença de 2.4% no comprimento de um traço reconstruído. Para as coordenadas em XZ, os resultados são apresentados na Figura 6.12. O desvio padrão em ambos os histogramas correspondentes às coordenadas X e Z é da ordem de 200 mm. A precisão encontrada está de acordo com a largura das células do Tilecal (ver Tabela 5.1). Na realidade, como o valor de 200 mm corresponde aproximadamente à largura da menor célula de leitura do TileCal (célula do tipo A do Barril Central-LB), este valor é a melhor precisão possível que poderia ser alcançada devido à granularidade do calorímetro.

## 6.4 Distribuição Angular

O fluxo de mísseis de baixa energia na superfície da Terra decai com o ângulo zenital  $\Phi$  por causa do aumento da quantidade de matéria atmosférica que o mísseis atravessa, fazendo com que a perda de energia seja maior. A distribuição zenital de RC para ângulos menores que  $75^\circ$  (1.31 rad) é da forma  $\cos^2$  [27].

Sendo assim, pôde-se utilizar esta característica para aferir a reconstrução de RC no TileCal. Para tal, foi realizado um corte para selecionar somente eventos perpendiculares ao eixo z, para que esta medida seja realizada em relação ao plano XY (ângulo  $\phi$ ). Também evitaram-se traços com valores de  $z < |200cm|$ , de modo a evitar eventos que passem diretamente pelo buraco da caverna do ATLAS. Desta forma, a distribuição angular mostrada na Figura 6.13 foi feita somente para mûons que atravessaram a grande coluna de terra acima da caverna do ATLAS. Levando-se em consideração a baixa estatística de eventos e os problemas de calibração entre o TileCal e o sistema de *trigger* do ATLAS, no momento em que estes dados foram tomados, este pode ser considerado um bom resultado preliminar, estabelecendo uma confiabilidade no uso deste aparato para estudo de física de raios cósmicos, tão logo o detector se encontre em condições estáveis e uma maior estatística de eventos seja adquirida.

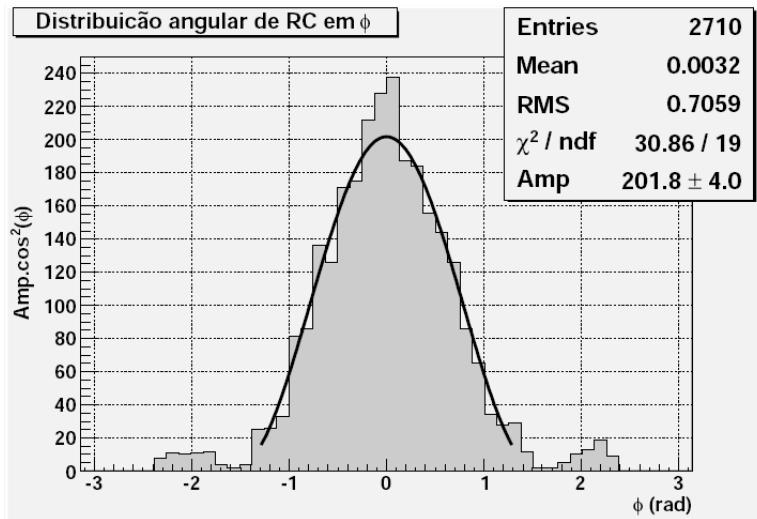


Figura 6.13: Distribuição angular de RC em relação ao ângulo  $\phi$ . Fonte:[8]

## 6.5 Deposição de energia por unidade de comprimento

Esta análise mostra a homogeneidade da deposição de energia por unidade de comprimento ( $\frac{dE}{dx}$ ) nas primeiras 9 torres de trigger do calorímetro TileCal ( $0.1 <$

$|\eta| < 0.9$ ). A energia total dentro de um ROI é dividida pelo comprimento do traço. Para realizar este estudo, somente eventos projetivos foram selecionados. Eventos projetivos são RC que passam pelo centro do detector e interceptam torres de trigger simétricas no plano  $\eta \times \phi$ , como pode ser visto na Figura 6.14. Uma importante limitação neste tipo de estudo está relacionada a baixa taxa de eventos projetivos que se consegue detectar, requerendo longos períodos de aquisição. Percebe-se uma estatística de eventos baixa nas torres de número 8 e 9, isto porque, o fluxo de RC diminui com o ângulo em relação a vertical. Nota-se ainda uma maior dispersão na distribuição de energia da primeira torre, o que era previsto devido a incidência de RC verticais. A Figura 6.15 mostra a distribuição de energia por unidade de comprimento para eventos projetivos reconstruídos com o método da THR, nas primeiras 9 torres de trigger do TileCal. Nota-se a homogeneidade nas distribuições da deposição de energia nas torres.

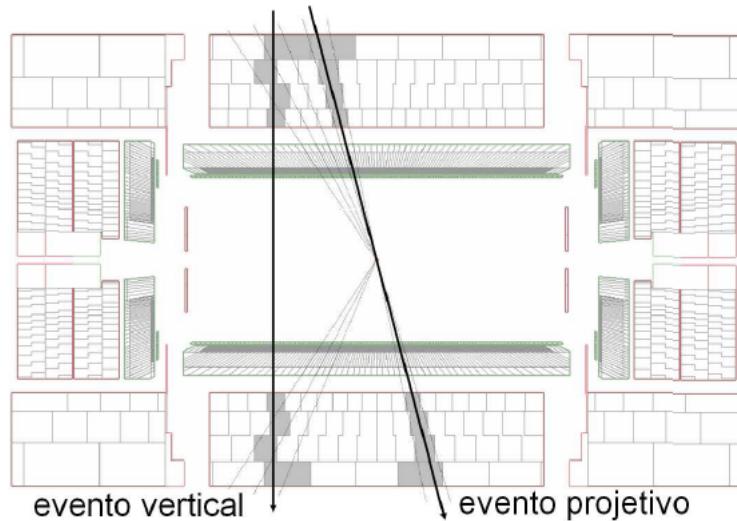


Figura 6.14: RC projetivos e verticais atravessando o TileCal. Fonte:[8]

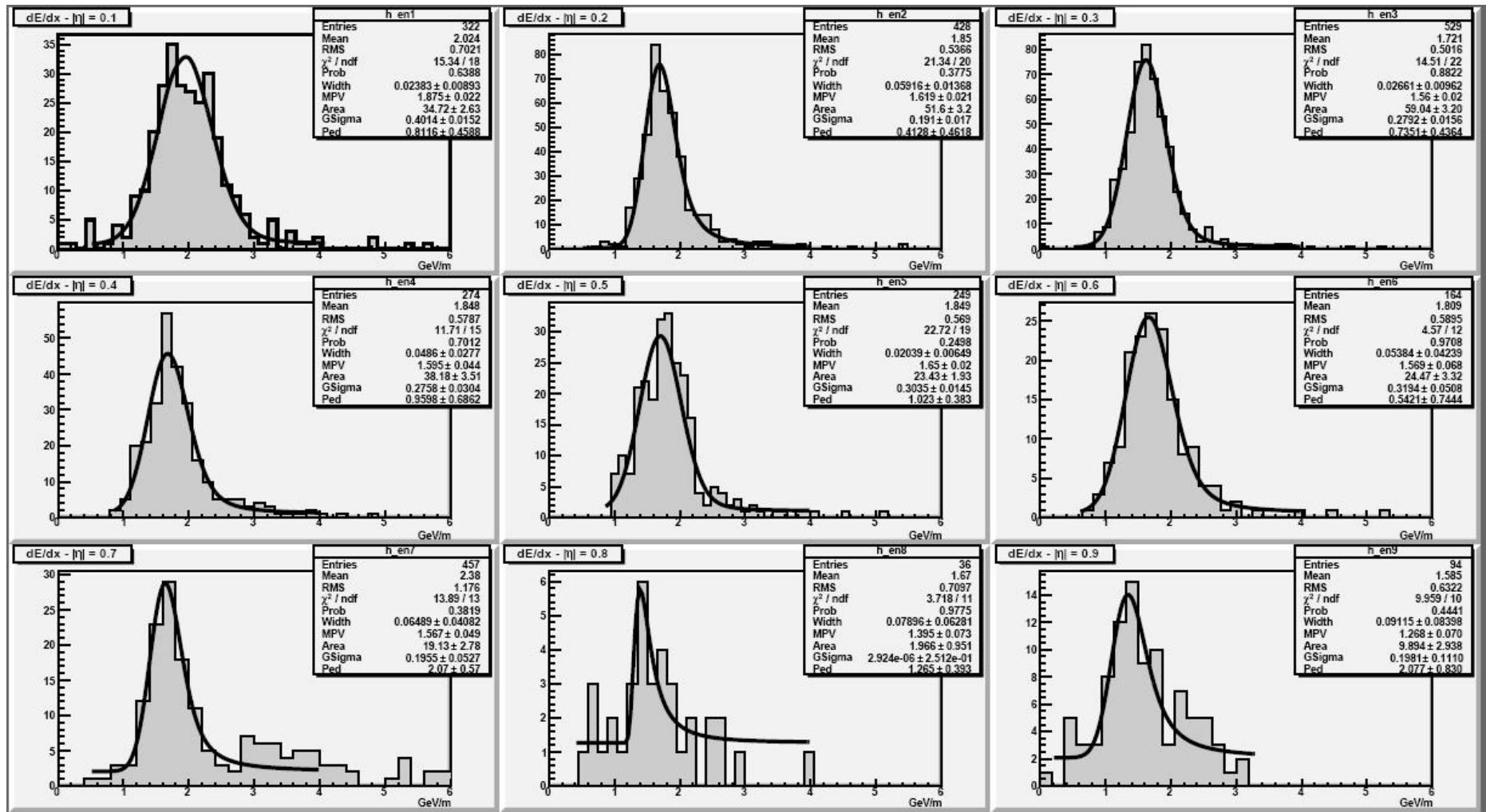


Figura 6.15: Distribuição de energia pelo comprimento ( $\frac{dE}{dx}$ ) dos RC nas primeiras 9 torres de trigger do TileCal.

## 6.6 Ajuste Fino da Trajetória

Um ajuste fino na reta reconstruída pode ser realizado no algoritmo desenvolvido através da adição de células do calorímetro eletromagnético (Lar) do ATLAS no espaço de dados da Transformada de Hough. Apesar deste calorímetro por si só não ser capaz de detectar e reconstruir os raios cósmicos com a mesma eficiência do calorímetro hadrônico, devido a baixa relação sinal-ruído na detecção de múons. As células do calorímetro eletromagnético localizadas dentro de uma ROI podem ser usadas para realizar um ajuste na inclinação da reta encontrada pelo algoritmo da THR, graças a maior segmentação deste calorímetro. Esta segmentação pode ser observada na Figura 6.16.

A integração das células do calorímetro eletromagnético no algoritmo desenvolvido neste trabalho foi realizada e já apresenta bons resultados. Podemos observar no evento da Figura 6.17 que células dos calorímetros eletromagnéticos podem ser utilizadas para se realizar o ajuste fino em uma das retas encontrada. O lado esquerdo da Figura 6.18 mostra que a reta encontrada utilizando apenas células do TileCal não passa através das células dos calorímetros eletromagnéticos. Porém quando utilizamos estas células juntamente com as células do Tilecal um ajuste pode ser observado na trajetória reconstruída.

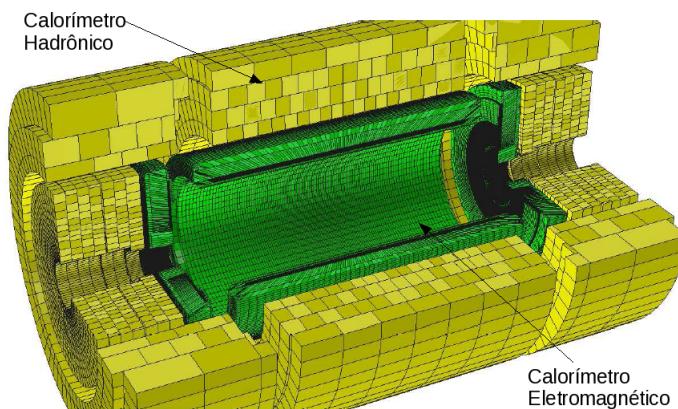


Figura 6.16: Segmentação dos calorímetros do ATLAS, construída com o pacote de geometria do ROOT. Fonte:[8].

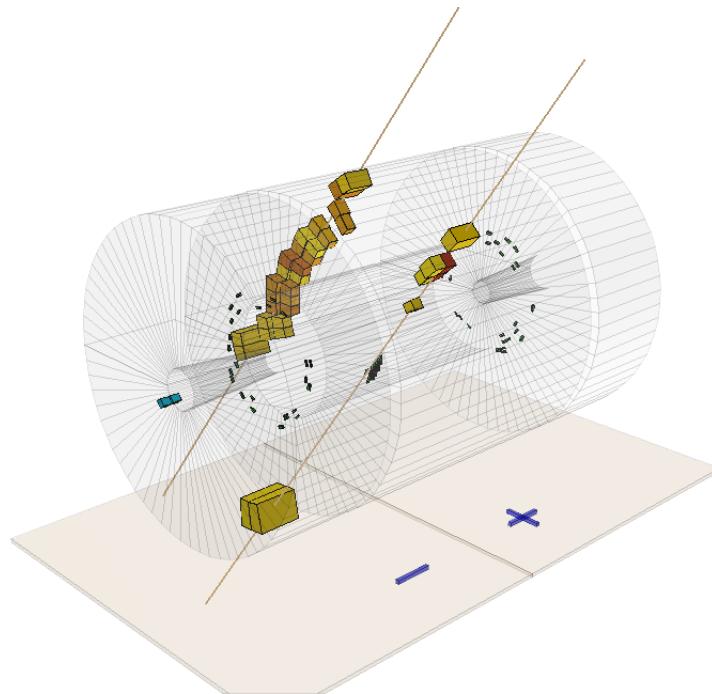


Figura 6.17: Evento com múltiplos raios cósmicos onde células dos calorímetros internos do ATLAS podem ser utilizadas para ajustar a trajetória encontrada.

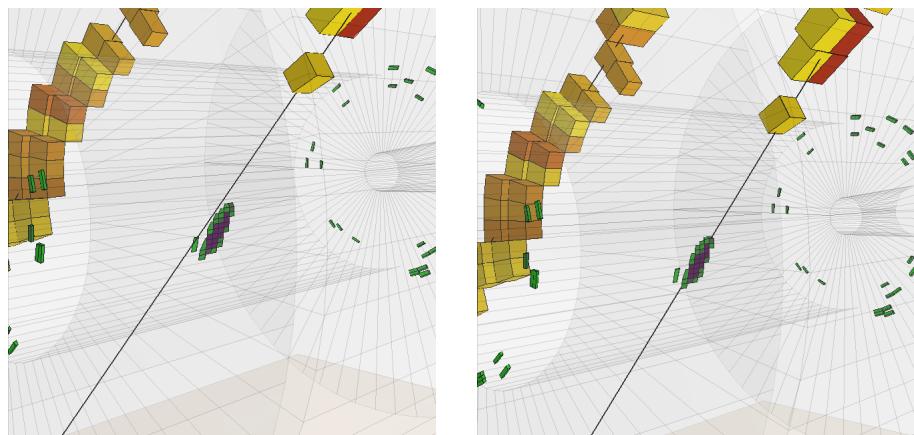


Figura 6.18: Na esquerda o evento reconstruído apenas com células do TileCal e a direita o mesmo evento utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético.

Para observar melhor este ajuste, realizamos as distribuições das posições X e Z e dos parâmetros  $\rho$  e  $\theta$  das retas encontradas utilizando somente as células do Tilecal, e das mesmas retas encontradas utilizando as células do TileCal juntamente com

as do Calorímetro Eletromagnético. Podemos observar na Figura 6.19 que houve pequenos ajustes nas posições X e Z de algumas retas. Essas diferenças também podem ser visualizadas nas distribuições de  $\rho$  e  $\theta$  na Figura 6.20 e 6.21.

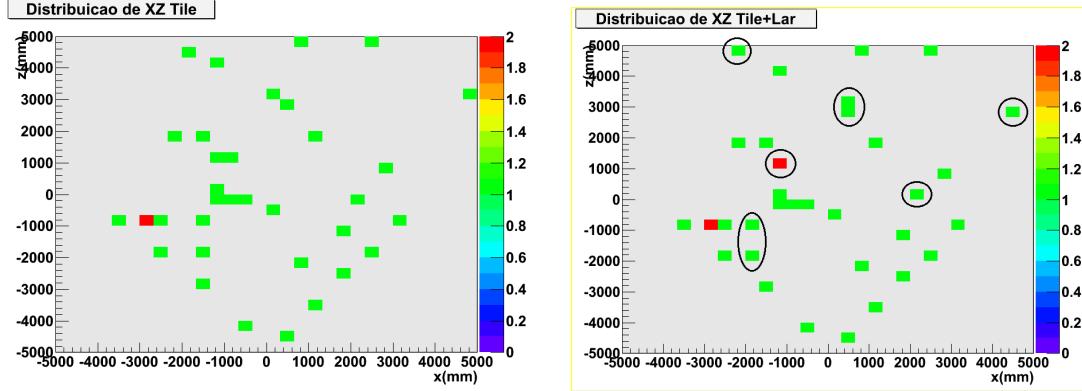


Figura 6.19: Na esquerda a distribuição de X e Z das retas reconstruídas apenas com células do TileCal e a direita a distribuição de X e Z das mesmas retas utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético. Em destaque as diferenças encontradas entre as distribuições.

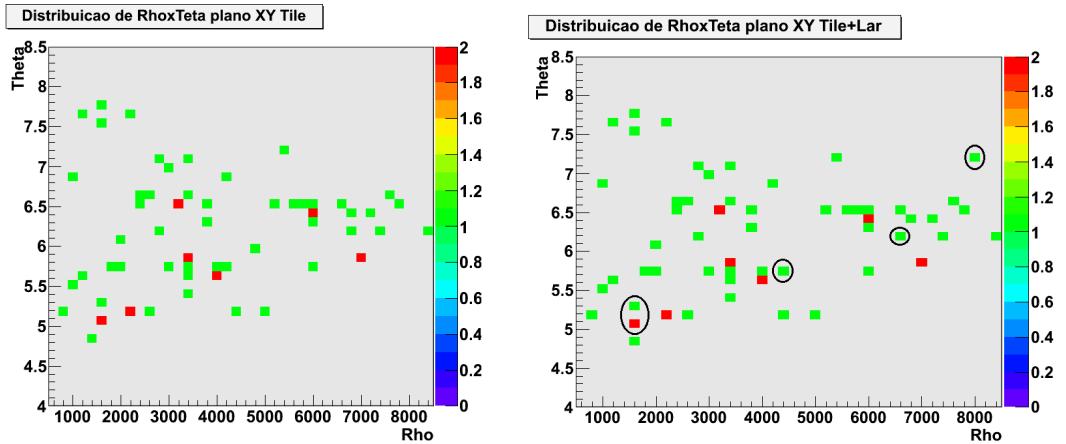


Figura 6.20: Na esquerda a distribuição de  $\rho$  e  $\theta$  das retas reconstruídas apenas com células do TileCal e a direita a distribuição de  $\rho$  e  $\theta$  das mesmas retas utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético. Em destaque as diferenças encontradas entre as distribuições.

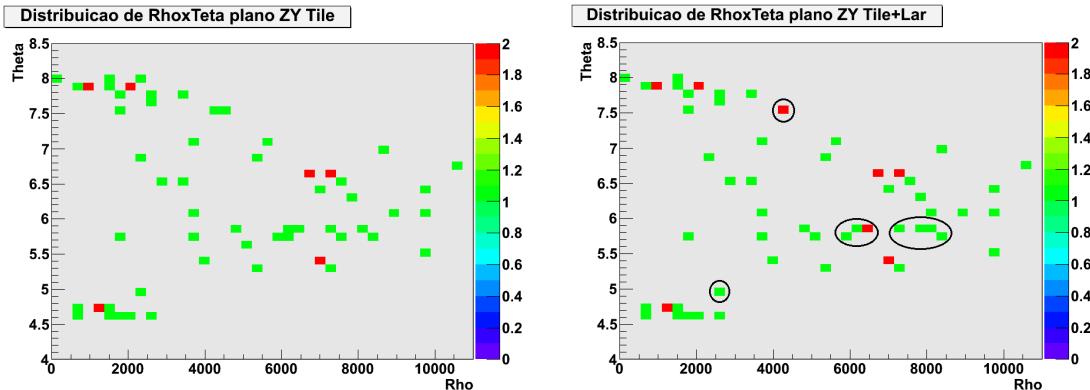


Figura 6.21: Na esquerda a distribuição de  $\rho$  e  $\theta$  na projeção ZY das retas reconstruídas apenas com células do TileCal e a direita a distribuição de  $\rho$  e  $\theta$  das mesmas retas utilizando células do TileCal e do Calorímetro Eletromagnético. Em destaque as diferenças encontradas entre as distribuições.

Porém, pelos testes realizados até então e as Figuras mostradas acima, principalmente a Figura 6.18, podemos concluir que o algoritmo desenvolvido neste trabalho mais uma vez se mostra muito eficiente pois o ajuste observado nas retas encontradas é mínimo mesmo utilizando um calorímetro muito mais segmentado para fazer o ajuste. Esse estudo demonstra que o método de reconstrução desenvolvido neste trabalho pode ser aplicado em outros calorímetros e também na reconstrução de outros tipos de curvas simplesmente alterando a função de parametrização da curva a ser detectada.

# Capítulo 7

## Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvido um novo método para a reconstrução de trajetórias de raios cósmicos para o calorímetro hadrônico do ATLAS, afim de calibrar e certificar os 10.000 canais de leitura do calorímetro. Importantes parâmetros de calibração do TileCal durante sua fase de comissionamento dependeram de uma boa reconstrução das trajetórias de múons cósmicos que atravessam o detector. Devido as características dos múons cósmicos, o sinal detectado pelo TileCal possui uma baixa relação sinal-ruído, sendo necessário assim, um método mais robusto para reconstruir as trajetórias dos RC detectados. O método desenvolvido neste trabalho utilizou uma ferramenta de processamento de imagens conhecida como Transformada de Hough Randômica.

O método desenvolvido obteve uma boa eficiência quanto a detecção de múltiplas trajetórias em um mesmo evento de raios cósmicos. A Transformada de Hough Randômica mostrou-se mais eficiente do que o método anterior, que utilizava somente a Transformada de Hough Adaptativa e a Transformada de Hough Local. Isto porque a THR utiliza o método de seleção de ROI, o que diminui consideravelmente o número de células requeridas para a reconstrução das trajetórias, além de eliminar a necessidade de se aplicar um *zoom* ao acumulador, como no caso da THA, pois ao aplicar a THL somente na ROI selecionada, o algoritmo já está intrinsecamente aumentando a precisão dos parâmetros da reta. Além disso, a seleção de ROIs diminui a interferência das células de ruído no processo de reconstrução.

As análises realizadas utilizando o visualizador CaloViewer3D mostraram que os múltiplos cósmicos detectados apresentam trajetórias praticamente paralelas, assim como esperado para este tipo de evento. A validação realizada com dados de Monte Carlo mostraram que os traços encontrados obtiveram uma eficiência de 99,8%, com um desvio angular em  $\theta$  e  $\phi$  de  $\approx 1.6^\circ$  e com um desvio padrão nas coordenadas X e Z da ordem de 200 mm, produzindo uma diferença máxima de 2.4% no comprimento de um traço reconstruído.

O algoritmo de reconstrução desenvolvido neste trabalho foi integrado ao pacote de análises de múons *offline* conhecido como *TilMuonFitter* (TMF) responsável pela reconstrução de múons cósmicos no TileCal. Além disso, o algoritmo também integra o CaloViewer3D, o principal visualizador de eventos de raios cósmicos do TileCal utilizado pela colaboração na sala de controle do ATLAS.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Como visto na Seção 6.6, um ajuste fino na reta reconstruída pode ser realizado no algoritmo desenvolvido, através da adição de células do Calorímetro Eletromagnético do ATLAS. Este estudo precisa ser mais aprofundado utilizando-se mais dados para quantificar melhor o ajuste realizado nas retas encontradas e o impacto desse ajuste nos parâmetros da reta. Espera-se que esse ajuste diminua a diferença máxima de 2.4% no comprimento de um traço reconstruído encontrado na validação com MC.

# Referências Bibliográficas

- [1] “A Aventura das Partículas”, <http://www.aventuradasparticulas.ift.unesp.br>, (Acessado em Janeiro de 2010).
- [2] NETTLE, P., “Raios Cósmicos”, <http://www.lip.pt/>, (Acessado em 28 Agosto de 2009).
- [3] “Atlas”, <http://atlas.web.cern.ch/Atlas>, (Acessado em Julho de 2011).
- [4] DI GIROLAMO, B., “An overview of the ATLAS TILECAL hadronic calorimeter”, *ATLAS Internal Note*, , September 1996.
- [5] “The ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”, *Journal of Instrumentation*, v. JINST, n. 3 S08003, 2008.
- [6] M. D. CONSALTER, F. C. A., “Raios Cósmicos Detectados Através De Um Telescópio De Partículas”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, , 2007.
- [7] DANTAS, A. C. H., *Transformada de Hough para Detecção de Traços em um Sistema Rastreador de Física de Partículas*. Ph.D. dissertation, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2001.
- [8] FILHO, L. M. D. A., *Detecção e Reconstrução de Raios Cósmicos Usando Calorimetria de Altas Energias*. Ph.D. dissertation, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Março 2009.
- [9] RIBEIRO, N. M., *Comissioning of the TileCal ATLAS HAdronic Calorimeter with cosmic rays and the LHC single beam*. M.Sc. dissertation, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2009.

- [10] L. M. A. FILHO, J. MANEIRA, J. M. S., “Energy Response Uniformity of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter with Calorimeter-based Reconstruction to Cosmic Muons”, *ATLAS NOTE*, , 2011.
- [11] “SLAC”, <http://www.slac.stanford.edu/>, (Acessado em Agosto de 2011).
- [12] “CERN”, <http://www.cern.ch/>, (Acessado em Agosto de 2010).
- [13] GREENE, B., *O Universo Elegante*. Cia da Letras, 1999.
- [14] GAISSER, T. K., “Cosmic Rays and Particle Physics”, *Cambridge Univ. Press*, , 1990.
- [15] J.C. STREET, E. S., “New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron”, *Physical Review*, v. 52, pp. 1003–1004, 1937.
- [16] C.D. ADERSON, S. N., “Note on the NAture of Cosmic-Ray Particles”, *Physical Review*, v. 51, pp. 884–886, 1937.
- [17] HOUGH, P. V. C., “Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures”, *International Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation CERN*, , 1959.
- [18] HOUGH, P. V. C., “Method and mean for recognizing complex patterns, Patent 3069 654”, *United States Patent Office*, , Dezembro de 1962.
- [19] ROSENFIELD, A., “Picture Processing by Computer”, *University of Maryland College Park*, , 1969.
- [20] R.O. HART, P. E. D., “Use of the Hough Transform to Detect Lines and Curves in Pictures”, *Communications of the ACM*, Vol 15., , 1972.
- [21] M. P. OHLSSON., C. P., “Track finding with deformable templates”, *Computer Physics Communication*, , 1992.
- [22] ILLINGWORTH J., K. J., “The Adaptative Hough Transform”, *Pattern Analysis and Machine intelligence*, v. 9, pp. 690–697, 1987.

- [23] XU, L., E. O., “Extended self-organizing map for curve detection”, *IEE Symposium on Circuits and Systems*, , 1989.
- [24] KOHONEN, T., “Self-organized formation of topologically correct feature maps”, *Biological Cybernetics*, v. 43, pp. 59–69, 1982.
- [25] XU, L., E. O., KULTANEN, P., “A new curve detection method: Randomized Hough Transform (RHT)”, *Pattern Recognition Letter*, v. 11, pp. 331–338, 1990.
- [26] XU, L., E. O., KULTANEN, P., “Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities”, *CVGIP: Image Understanding*, v. 57, pp. 131–154, 1993.
- [27] CONSALTER, A. C. F. A. C. G. D. M., “Medida da vida média do múon”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, , 2010.

# Apêndice A

## Produção Científica

Este apêndice apresenta a lista de congressos e encontros em que este trabalho foi apresentado.

- [1 ] Andrade Filho, L. M. de, Pereira, R. A., Seixas, J. M., XXIX Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos. “Transformada Aleatória de Hough para a Detecção de Raios Cósmicos com o Calorímetro Hadronico do ATLAS”. Setembro de 2008.
- [2 ] Andrade Filho, L. M. de, Pereira, R. A., Seixas, J. M., XXX Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural. “Transformada de Hough Aleatória para a Detecção de Múltiplos Raios Cósmicos com um Calorímetro de Altas Energias”. Outubro de 2008.
- [3 ] Andrade Filho, L. M. de, Pereira, R. A., Seixas, J. M., Workshop Física Experimental de Altas Energias e Tecnologias Associadas: 20 Anos de Colaboração com o CERN. “Transformada de Hough Aleatória para a Detecção de Múltiplos Raios Cósmicos com um Calorímetro de Altas Energias“. Dezembro de 2008.