

# DETECÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS POR CALORÍMETROS FINAMENTE SEGMENTADOS USANDO TRANSFORMADA DE HOUGH

LUCIANO MANHÃES DE ANDRADE FILHO\*, JOSÉ MANOEL DE SEIXAS\*

\*Laboratório de Processamento de Sinais  
COPPE/EP, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Emails: lucianom@lps.ufrj.br, seixas@lps.ufrj.br

**Abstract**— In High Energy Physics experiments, calorimeters are systems responsible to absorb and measure the energy of the target particle as long as it penetrates the detector material. Since modern calorimeters present a large amount of readout channels, their high segmentation design allows track detection to be performed as well. This work presents a cosmic detection algorithm for a Hadronic Calorimeter (TileCal), using the Hough Transform method. The algorithm uses the track information left by activated calorimeter cells, when specific particles (muons) cross the detector. Details of the proposed algorithm and experimental results are presented. Due to the low signal-to-noise ratio of the TileCal for cosmic rays, the proposed method possesses extensive efficiency superiority over existing line fitting algorithms such as least-square methods.

**Keywords**— Hough Transform, Cosmic ray detection, Calorimetry.

**Resumo**— Em experimentos de física de altas energias, calorímetros são sistemas responsáveis por absorver e medir a energia das partículas à medida que elas penetram no material do detector. Como calorímetros modernos são segmentados, o que produz uma grande quantidade de canais de leitura, uma detecção de traços também pode ser feita, graças à fina granularidade destes sistemas. Este trabalho apresenta um algoritmo de detecção de raios cósmicos com um Calorímetro Hadrônico (TileCal), usando o método da Transformada de Hough. A detecção é feita a partir dos traços (retas) deixados por partículas específicas (muons) ao longo do detector. Detalhes do algoritmo proposto e resultados experimentais são apresentados. Devido à baixa relação sinal-ruído do TileCal a raios cósmicos, o método proposto possui uma maior eficiência quando comparado a algoritmos de ajustes de curvas como, por exemplo, o método dos mínimos quadrados.

**Palavras-chave**— Transformada de Hough, Detecção de raios cósmicos, Calorimetria.

## 1 Introdução

Na área de física de altas energias (*High Energy Physics* - HEP), tipicamente são projetados gigantescos sistemas de detecção com dezenas de milhões de canais de leitura que devem operar simultaneamente a uma alta taxa de eventos. O objetivo destes detectores é comprovar a existência de partículas e fenômenos físicos previstos pela teoria, bem como gerar um ambiente favorável ao desenvolvimento de física nova. A quantidade de dados gerada nos experimentos e o crescente interesse por eventos raros exigem o projeto de um sistema sofisticado de filtragem *online* para reter somente os eventos que possam ser mensageiros da física de interesse, os quais são analisados detalhadamente em modo *offline*.

Em laboratórios de pesquisa de HEP, como o Centro Europeu para a Pesquisa Nuclear, em Genebra, na Suíça (CERN, 2008) são construídos modernos aparatos para detecção e estudo de partículas elementares, geradas por interações entre partículas subatômicas com altas energias. As interações podem ser feitas de forma controlada em gigantescos instrumentos, chamados de colisionadores de partículas, ou podem se aproveitar de interações que ocorrem na atmosfera, quando raios cósmicos (RC) viajam em direção à Terra. No primeiro caso, os detectores são geometricamente projetados em torno de um ponto de colisão, e suas

dimensões podem chegar a dezenas de metros.

O CERN, atualmente, está trabalhando na construção do *Large Hadron Collider* (LHC, 2008), que é uma máquina colisionadora de prótons de última geração, com 26,7 km de circunferência. Em um dos pontos de colisão do LHC está sendo montado o detector ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*) (ATLAS, 2008), um experimento de propósito geral (Figura 1), que tentará abranger toda a física proposta pelo LHC e procurar por física nova. O início de sua operação está previsto para meados de 2008. A alta taxa de colisão (40 milhões de colisões por segundo) aumenta a complexidade deste detector, que tem um enorme número de canais operando simultaneamente.

Em detectores como o ATLAS, uma grandeza importante a ser medida é a energia das partículas geradas. O sistema responsável por essa tarefa é o Calorímetro, que, no caso do ATLAS, se divide em uma parte Eletromagnética (LArg, 2008) e outra Hadrônica (TileCal, 2008), com o intuito de detectar partículas que interajam de forma eletromagnética e hadrônica, respectivamente. Calorímetros são detectores de fina granularidade com excelente performance, não apenas em termos de energia, mas também da resolução em posição. Tipicamente, calorímetros são transversalmente segmentados para obter informação da direção das partículas, bem como da energia depositada. Uma

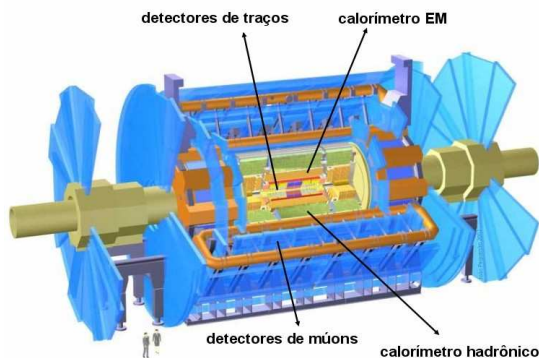


Figura 1: O Detector ATLAS e seus sub-detecores.

segmentação longitudinal também é feita, para obter informação da identidade da partícula, baseada na forma do chuvaire que ela produz.

O ATLAS está, no momento, em fase final de um detalhado processo de teste e calibração. A instalação e a certificação de toda a eletrônica e serviços do Calorímetro Hadrônico estão sendo finalizadas no ambiente subterrâneo. Para tal, uma bateria de testes, com medidas que utiliza RC como fonte, vem sendo realizada. Uma tarefa importante nesta etapa, é a medida da energia total depositada ao longo do traço (reta) deixado pela passagem destas partículas, mais especificamente, os muons. Portanto, um eficiente algoritmo de detecção de traços, a partir das células ativadas do TileCal, deve ser implementado. Dessa forma pode-se checar a coerência dos dados reconstruídos, procurar por problemas em potencial e testar a medida de uniformidade em energia do detector.

O método atual de detecção de raios cósmicos utilizado no ATLAS procura minimizar a soma quadrática das distâncias entre as células ativadas do TileCal e o traço desejado (*TileMuonFitter*, 2008). Contudo, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) tem uma limitação intrínseca: sua sensibilidade ao ruído (G. H. Golub, 1984). Em outras palavras, apesar de o MMQ conseguir eficientemente manipular erros de medida que aparecem como pequenas flutuações no conjunto de pontos utilizado, este não consegue tolerar ruídos que apareçam como falsos pontos neste mesmo conjunto; a existência de ruído, mesmo em pequena quantidade, tende a produzir resíduos, o que leva a um ajuste inadequado e inaceitável dos traços. Além disso, pelo seu próprio princípio de operação, o MMQ não é capaz de detectar múltiplas linhas em um conjunto de pontos, sem um conhecimento prévio de regiões de interesse feitas por um sistema especialista.

Este trabalho apresenta uma alternativa para a detecção de traços de RC no TileCal, usando o método da Transformada de Hough (TH). Esta é uma técnica bem difundida na detecção de retas

em imagens com alto teor de ruído (Hough, 1962) e pode ser adaptada para detecção de traços no espaço tridimensional. A TH provou ser capaz de lidar com o ruído de contaminação presente na detecção de traços de RC no TileCal, além de se mostrar potencialmente capaz de detectar múltiplos RCs de forma mais direta.

## 2 O Detector ATLAS

O ATLAS irá explorar a natureza fundamental da matéria e as forças básicas que controlam o universo a partir da colisão direta de prótons de energias extraordinariamente altas. O detector é um cilindro com um comprimento total de 42 m, um raio de 11 m e peso igual a 7000 toneladas (Figura 1). Três sub-detecores básicos compõem o ATLAS (em ordem do mais interno para o mais externo): o Detector de Traços, os Calorímetros Eletromagnético e Hadrônico, e o Detector de Muons.

O Detector de Traços circunda a região de interação das partículas. É formado por detectores discretos de alta resolução, fabricados de silício, definindo trajetórias de partículas carregadas com grande precisão. Os Calorímetros Eletromagnético e Hadrônico são detectores de fina granularidade com excelente performance em termos de energia e resolução de posição. O Calorímetro Eletromagnético mede a energia total de pósitrons, elétrons e fótons. O Calorímetro Hadrônico mede a energia total dos hádrons. Estes interagem com o denso material do detector, produzindo um chuvaire de partículas carregadas e neutras. A energia das partículas é então depositada e medida. O Detector de Muons, que envolve toda a calorimetria, tem o objetivo específico de detectar muons, partículas de difícil interação que atravessam as camadas mais internas do detector.

## 3 Calorímetro TileCal

No Calorímetro Hadrônico do ATLAS o material absorvedor de energia é o aço, com cintiladores em forma de telhas (TileCal) que amostram a energia depositada. O TileCal tem uma estrutura cilíndrica com raios interno e externo de 2,28 e 4,23 metros, respectivamente (Figura 2). A luz gerada nos cintiladores é coletada por fibras óticas em suas duas extremidades. Estas fibras são estrategicamente agrupadas e acopladas à fotomultiplicadoras, de modo a formarem células de leituras, para obter uma segmentação radial tridimensional. O TileCal é segmentado radialmente em três camadas, a Figura 3 mostra uma seção transversal da parte central do TileCal.

O TileCal é um dos sub-detecores que participam do sistema de *trigger* do ATLAS (Trigger, 2008), cujo objetivo é selecionar somente eventos de interesse a serem armazenados. Tal sistema

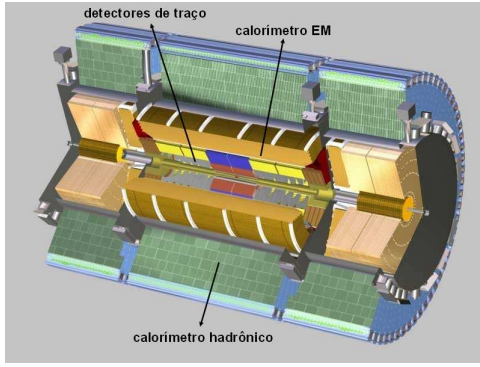


Figura 2: TileCal e detectores internos.

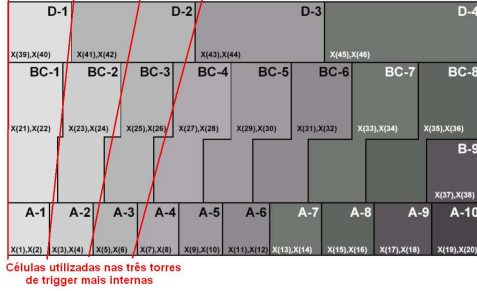


Figura 3: Segmentação do TileCal (parte central).

é dividido em três níveis de complexidade, onde o primeiro nível usa informação compactada do TileCal, obtida por suas torres de *trigger*. Essas torres correspondem à soma analógica dos sinais das PMTs de células sobrepostas para as três diferentes camadas do TileCal. A Figura 3 apresenta a disposição de algumas destas torres, com a primeira, por exemplo, correspondendo à soma analógica da células A1, BC1 e D1.

#### 4 Detecção de Raios Cósmicos

Para detectar raios cósmicos no TileCal, uma interface com uma discriminação por patamar e um sistema de coincidência foi especialmente projetada para gerar o sinal de *trigger* necessário (K. Anderson, 2004). Este sistema utiliza como entrada os próprios sinais analógicos gerados pelas torres de *trigger* do TileCal. A Figura 4 mostra o esquema de coincidência para geração do sinal de *trigger*. Se alguma célula da parte superior e inferior do TileCal for ativada dentro de um mesmo intervalo de tempo, programado pelo circuito de lógica *AND* da placa de coincidência, um sinal de *trigger* é gerado. Neste instante, os dados dos Calorímetros Eletromagnético e Hadrônico são armazenados com granularidade plena.

#### 5 Detecção de Traços com Transformada de Hough

A Transformada de Hough mapeia pontos no espaço de dados em funções em um espaço de parâ-

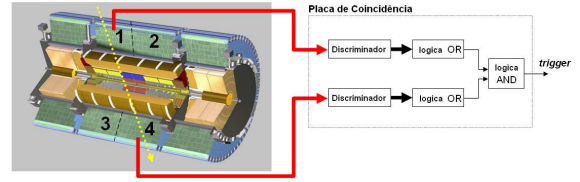


Figura 4: Sistema de trigger para detecção de raios cósmicos no TileCal.

metros. Em outras palavras, TH mapeia  $R^2$  em um espaço de retas ou funções senoidais. Para o caso de funções senoidais, o mapeamento é da forma

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

onde cada ponto  $(x, y)$  no espaço de dados é mapeado no espaço de parâmetros  $(\rho_0, \theta_0)$ . Desta forma, amostras localizadas sobre a reta  $\rho_0 = x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0$  são mapeadas em curvas no espaço de parâmetros, todas passando pelo ponto  $(\rho_0, \theta_0)$ . Os parâmetros  $\rho_0$  e  $\theta_0$  correspondem à distância da reta à origem e ao ângulo em que o vetor normal à reta faz com o eixo  $x$ , respectivamente.

Para ajustar uma reta a um conjunto de pontos, ambas as coordenadas  $\rho$  e  $\theta$  precisam ser quantizadas e, conseqüentemente, o espaço de parâmetros é interpretado como um acumulador bi-dimensional. Assim, para cada amostra do conjunto de dados, o conteúdo das células do espaço de parâmetros, por onde a correspondente curva passa, é incrementado. Depois, uma pesquisa é feita de forma a localizar picos no espaço de parâmetros.

A TH, conforme apresentada acima, possui um elevado custo computacional, já que um único ponto no espaço de dados gera vários pontos no espaço de parâmetros. Algumas variações da TH padrão foram propostas de forma a reduzir o custo computacional. Entre elas a TH Local (Ohlsson, 1992) e a TH Adaptativa (Illingworth, 1987) são usadas neste trabalho.

A TH Local (THL) procura pela melhor reta que pode ter gerado um dado conjunto de pontos no espaço de dados. Desta forma, a THL mapeia um par de pontos do espaço de dados em um único ponto no espaço de parâmetros. Se dois diferentes pares de pontos pertencem à mesma reta, eles irão incrementar a mesma célula no acumulador. Assim, como no caso da TH padrão, picos no acumulador representam uma alta probabilidade de se ter uma reta no espaço de dados.

Uma importante tarefa a ser realizada na aplicação prática da TH é determinar a correta granularidade do acumulador de forma a otimizar a eficiência de detecção. Se o número de *bins* é pequeno, será difícil de identificar os parâmetros da reta com boa acuidade. Por outro lado, uma fina granularidade irá espalhar a informação do pico

em várias células, já que os pontos não são perfeitamente colineares.

No caso da TH Adaptativa (THA), a idéia consiste em aplicar a transformada várias vezes para um dado conjunto de amostras, aplicando um *zoom* no acumulador na região em torno do pico para cada iteração. Dessa forma, mesmo para um acumulador com poucas células, uma detecção de alta resolução pode ser feita depois de um dado número de iterações.

## 6 Implementação da TH no TileCal

De forma a implementar a detecção de traços de RCs no TileCal usando TH, alguns passos devem ser executados antes de se aplicar a detecção propriamente dita. O procedimento é listado abaixo:

1. Aplicar um corte em energia para selecionar apenas células ativadas pela passagem do RC.
2. Substituir a geometria da célula pela posição  $(x, y, z)$  do seu ponto central.
3. Projetar o correspondente ponto central da célula em dois planos ortogonais (XY e ZY).
4. Encontrar a melhor reta em cada plano usando o método da TH.
5. Combinar a informação das duas retas em um único traço 3D.

As Figura 5 e 6 apresentam as disposições do ponto central para todas as células do TileCal, projetadas nos planos XY e ZY respectivamente. Obviamente, serão usados somente os pontos cujas células correspondentes tenham energia acima do patamar previamente escolhido. O algoritmo usado foi uma combinação da THL com a THA em duas iterações. A primeira iteração procura a posição de picos no espaço de parâmetros, buscando a célula do acumulador com a maior contagem. A segunda iteração computa os valores médios de  $\rho$  e  $\theta$  observando apenas as células em torno do pico encontrado pela primeira iteração. Como o procedimento de reconstrução de eventos do TileCal disponibiliza o valor da energia depositada em cada célula do calorímetro, essa informação é utilizada como um peso para o incremento do acumulador. Assim, o valor do incremento, computado para cada par de pontos, é o produto das energias das correspondentes células do calorímetro e é dado em  $GeV^2$ .

## 7 Resultados Experimentais

A Figura 7 mostra uma visualização tridimensional de um evento de RC visto pelo TileCal. As células ativadas são mostradas nesta figura. A cor das células representa uma escala crescente de energia, do amarelo para o vermelho. Neste

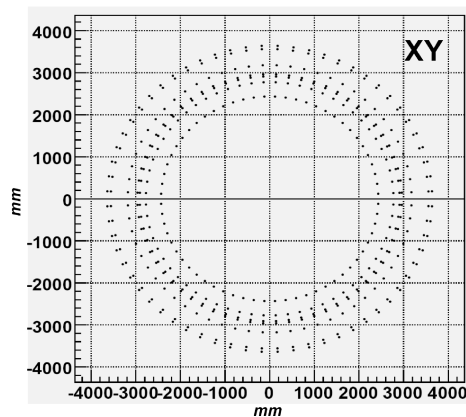


Figura 5: Projeção no plano XY do ponto central de todas as células do TileCal.

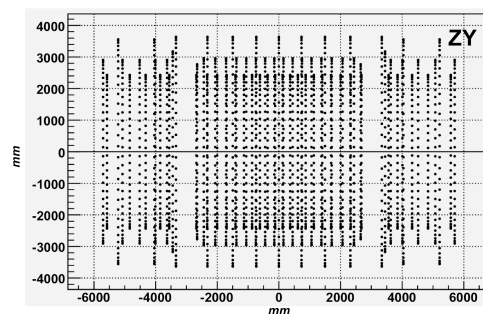


Figura 6: Projeção no plano ZY do ponto central de todas as células do TileCal.

evento apenas algumas dezenas de células na parte superior e inferior do detector estavam ligadas, resultando em uma configuração com pouca ou nenhuma célula de ruído. O rastro deixado pelo múon foi identificado corretamente pela técnica MMQ. A Figura 8 apresenta um evento capturado em outra fase de testes, onde a maior parte do calorímetro está ligada. Pode-se notar a presença de células de ruído em regiões distantes das células ativadas pelo RC propriamente dito. Estas células ruidosas fazem com que o MMQ falhe na detecção do traço. Na mesma figura é mostrado o traço computado com o método da TH. O conteúdo do acumulador para as projeções XY e ZY da primeira iteração é mostrado nas Figuras 9 e 10 respectivamente. Nela percebe-se que a localização do pico e portanto dos parâmetros corretos do traço, é fácil de ser identificada por uma simples pesquisa pela célula de maior conteúdo.

Sabe-se que a distribuição da energia total depositada pelos raios cósmicos no TileCal deve resultar em uma função Landau com uma borda de subida Gaussiana (*Cosmics Analysis*, 2008). A Figura 11 apresenta esta distribuição para o MMQ em eventos onde todas as células do calorímetro estavam ligadas. Nota-se a presença de um pico para valores de energia próximos de zero. Isso se deve ao fato de que os traços, na maioria das

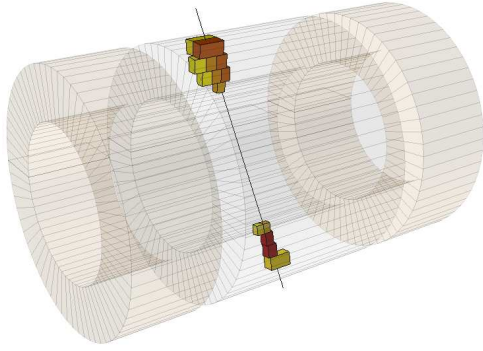


Figura 7: Evento de raio cósmico no TileCal, sem células de ruído.

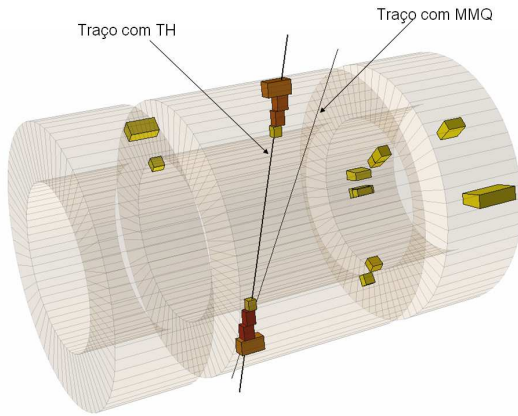


Figura 8: Evento de raio cósmico no TileCal, com células de ruído.

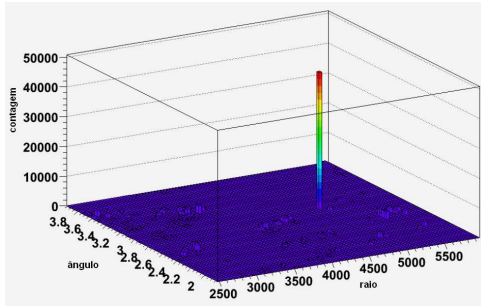


Figura 9: Acumulador do espaço de parâmetros para o evento da Figura 8 - projecção XY.

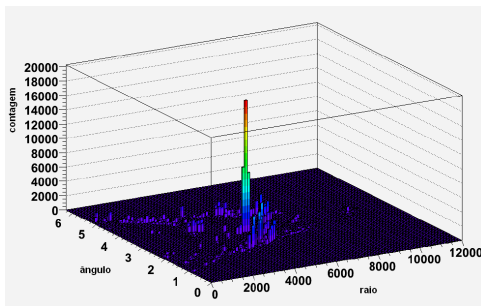


Figura 10: Acumulador do espaço de parâmetros para o evento da Figura 8 - projecção ZY.

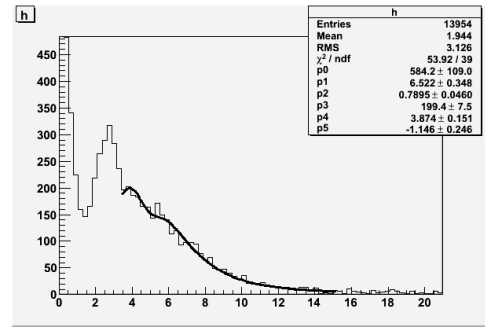


Figura 11: Distribuição da energia, em  $\text{GeV}$ , ao longo do traço para o MMQ.

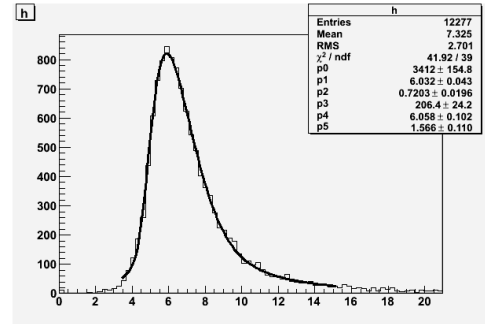


Figura 12: Distribuição da energia, em  $\text{GeV}$ , ao longo do traço para o método da TH.

vezes, não interceptam as células com energia depositada pelo RC, cruzando células onde apenas o ruído eletrônico está presente. O ajuste se torna aceitável somente na cauda da distribuição, onde as energias dos RCs são bem mais altas, aumentando a relação sinal-ruído nesta faixa. Por outro lado, para o caso da detecção dos traços usando o método da TH, a distribuição ocorre como esperado teoricamente (Figura 12).

TH permite ainda a detecção de múltiplos RCs. A Figura 13 mostra um evento onde dois RCs cruzam o detector simultaneamente. Através de uma busca simples pelo máximo global, o RC de maior energia é detectado corretamente, como se pode ver pelo traço desenhado nesta figura. Porém, devido à presença de um segundo RC, devem haver mais picos no acumulador do espaço de parâmetros (Figura 14). Isto mostra que uma busca mais detalhada por máximos locais possibilita a localização de múltiplos RCs no mesmo evento. Este processo de detecção de múltiplos RCs por procuras de picos no espaço de parâmetros, é um trabalho em andamento.

## 8 Conclusões

Uma detecção de raios cósmicos, em um ambiente altamente segmentado, como o Calorímetro Hadrônico do ATLAS, foi implementado usando o método da Transformada de Hough. A eficiência na detecção dos traços é tal que a distribuição da



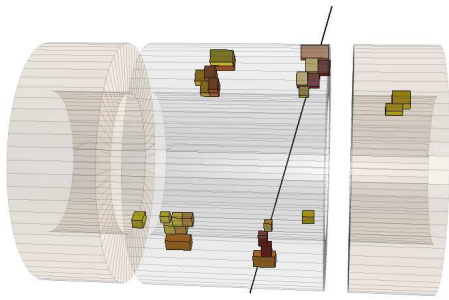


Figura 13: Visualização tridimensional de um evento com dois RCs no TileCal.

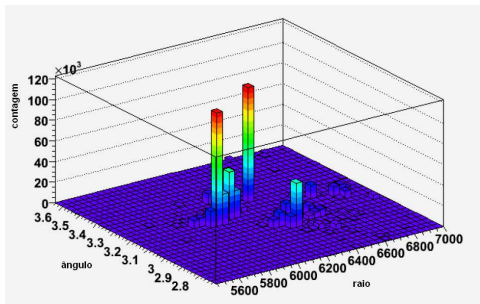


Figura 14: Espaço de parâmetros para a projeção XY do evento da Figura 13, mostrando dois picos principais.

energia total ao longo deste segue perfeitamente o padrão de deposição de energia de raios cósmicos previsto pela teoria. Este método se mostrou mais eficiente que métodos de ajuste de retas, como o método dos Mínimos Quadrados, devido à baixa relação sinal-ruído encontrada nos eventos de raios cósmicos no TileCal. O uso deste método tem se mostrado de suma importância na fase final de teste e calibração do TileCal, possibilitando desde análises mais simples, como a procura por células problemáticas ou ruidosas, à análises mais complexas, como comprovar a uniformidade de deposição de energia em diferentes regiões do detector. Além da sua alta eficiência na detecção de raios cósmicos, o método da Transformada de Hough facilita a detecção de traços múltiplos em um mesmo evento. Fato este que vem sendo explorado com o desenvolvimento de um algoritmo de localização de máximos locais no espaço de parâmetros.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, CNPq, FAPERJ e CERN (Suíça) pelo apoio a este projeto. Em especial, agradecemos aos colegas de trabalho da colaboração TileCal, por disponibilizar o conjunto de dados experimentais e pelas calorosas discussões com respeito à este trabalho.

### Referências

- ATLAS (2008). <http://www.atlas.ch>, mar. de 2008.
- CERN (2008). <http://www.cern.br>, mar. de 2008.
- Cosmics Analysis* (2008). <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/TileMobiDAQAnalysis>, mar. de 2008.
- G. H. Golub, C. F. V. L. (1984). *Matrix Computation*, Johns Hopkins Univ. Press.
- Hough, P. (1962). *Method and mean for recognizing complex patterns*, Patent 3 069 654.
- Illingworth, J. (1987). *The adaptive Hough transform*, Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, v.9, n.5, pp. 690-697.
- K. Anderson, J. Pilcher, H. S. F. T. e. R. T. (2004). *Stand-alone Cosmic Ray Trigger Electronics for the ATLAS Tile Calorimeter*, University of Chicago.
- LArg (2008). <http://atlas.web.ch/Atlas/GROUPS/LIQARGON/Organization/index.html>, mar. de 2008.
- LHC (2008). <http://lhc.web.cern.ch/lhc>, mar. de 2008.
- Ohlsson, M. P. (1992). *Track finding with deformable templates*, Computer Physics Communication, 71, 77-98.
- TileCal (2008). <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/SUBDETECTORS/TILE/tilecal.html>, mar. de 2008.
- TileMuonFitter (2008). <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/TileMuonFitter>, mar. de 2008.
- Trigger (2008). <http://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/TriggerDAQ>, mar. de 2008.