

# SISTEMA DETETOR PARA CALORIMETRIA DE ALTAS ENERGIAS EM CONDIÇÕES DE BAIXA RELAÇÃO SINAL RUÍDO

THIAGO CIODARO XAVIER\*, AUGUSTO SANTIAGO CERQUEIRA†, FERNANDO MIRANDA VIEIRA XAVIER†, LUCIANO MANHÃES DE ANDRADE FILHO†, JOSÉ MANOEL DE SEIXAS\*

\*Laboratório de Processamento de Sinais - COPPE/Poli - UFRJ  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

†Laboratório de Processamento de Sinais e Telecomunicações - UFJF  
Juiz de Fora, MG, Brasil

Emails: ciodaro@cern.ch, augusto.santiago@ufjf.edu.br, fernandomvx@gmail.com, luciano.ma.filho@gmail.com, seixas@lps.ufrj.br

**Resumo**— Este artigo apresenta os resultados do desenvolvimento de um receptor de sinais para o sistema de filtragem *on-line* de um detetor de partículas que opera num ambiente de alta taxa de eventos. Para o sistema de calorimetria (medição de energia), o receptor se dedica a processar sinais de partículas de interesse (múon), que possuem uma baixa relação sinal-ruído. O sistema soma analogicamente dois canais de leitura, de forma a aumentar a relação sinal-ruído, compatibiliza o sistema de calorimetria com o detetor específico de múons e envia o sinal de decisão para o sistema *on-line* de filtragem. O receptor utiliza, ainda, um filtro que compensa o efeito de limitação de banda dos cabos de transmissão de sinal (70 m de comprimento). Uma eficiência de detecção de 90 % é alcançada, para um falso alarme de 10 %, usando-se um detetor por patamar.

**Palavras-chave**— Instrumentação eletrônica, calorimetria, detecção de sinais

**Abstract**— This paper presents results from a signal receiver development for the on-line filtering system of a particle detector, which operates in a high event rate environment. For the calorimetry system (energy measurement), the receiver is dedicated to process the signals coming from particles of interest (muons), which have a low signal-to-noise ratio. The system sums analogically two readout channels in order to increase the signal-to-noise ratio, matches the calorimetry system with the specific muon detector and sends the final signal decision to the on-line filtering system. In addition, the receiver uses an active filter to compensate for the bandwidth limiting effect that arises from signal transmission cables (70 m long). A detection efficiency of 90 % is reached for a false alarm of 10 %, using a threshold discriminator.

**Keywords**— Electronic instrumentation, calorimetry, signal detection

## 1 Introdução

O CERN (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear), localizado na Suíça, construiu o maior acelerador de partículas de todos os tempos, o LHC (Grande Colisionador de Hádrons). O LHC é capaz de acelerar partículas a velocidades muito próximas a da luz, percorrendo um túnel circular de 27 km de comprimento, a 100 m de profundidade (L. Evans, 2008). Assim, dois feixes de prótons são acelerados em sentidos opostos e colidem frontalmente em pontos específicos ao longo do LHC, concentrando uma energia de aproximadamente 14 TeV no centro de massa. Como a física de interesse do LHC é muito rara, as colisões entre prótons ocorrerão numa frequência elevada (taxa de eventos, ou *bunch-cross*, de 40 MHz). Detetores de partículas são colocados ao redor desses pontos de colisão, de forma a analisar as informações geradas pelas colisões.

O ATLAS (do inglês *A Toroidal LHC Apparatus*) é um dos detetores de partículas mais importantes do LHC (G. Aad et al., 2008). Pesando 7.000 t, com um comprimento de 44 m e com 22 m de diâmetro, o ATLAS é um detetor de propósito geral, projetado para cobrir os principais canais de interesse do LHC: supersimetria, violação de CP, matéria escura, Bóson de Higgs, modelo padrão e

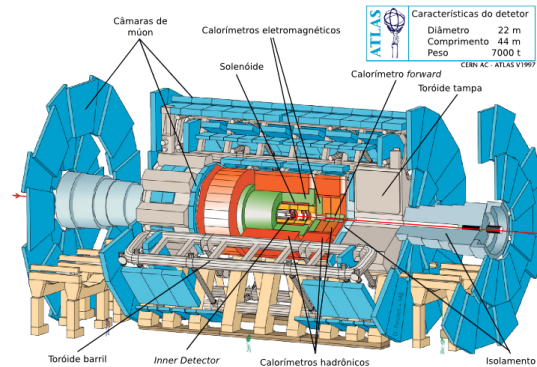


Figura 1: O detetor ATLAS.

muito mais (G. Aad et al., 2008). Os subdetetores do ATLAS são projetados para prover informação detalhada da colisão e seus subprodutos.

A Figura 1 mostra a estrutura do detetor. Ele é dividido em duas regiões de acordo com a sua posição ao longo do feixe do LHC: as regiões do barril (longo e estendido) e das tampas. Dentro dessas regiões, existem três subdetetores principais: o *Inner Detector*, responsável pela visualização da trajetória das partículas; os calorímetros eletromagnético e hadrônico, responsáveis pela medição da energia das partículas

incidentes; e as câmaras de múons, responsáveis pela detecção de múons, partículas que são importantes para a observação da física de interesse do LHC. O *Inner Detector* e as câmaras de múons são submetidos a um intenso campo magnético (até 2 T), de forma a curvar partículas eletricamente carregadas para a medição dos seus momentos.

Em conjunto, todos os subdetetores do ATLAS geram uma quantidade de informação da ordem de 1,5 MB de dados (K. Kordas et al., 2007). Levando em conta a alta taxa de eventos, um fluxo de dados da ordem de 60 TB por segundo é gerado, tornando inviável o armazenamento completo dessa informação para posterior análise *off-line*. Desta maneira, um sistema de filtragem *on-line* foi implementado em três níveis de análise para separar os eventos de interesse do ATLAS daqueles que não trazem informação nova e que formam, assim, o ruído de fundo para o experimento (K. Kordas et al., 2007). Os eventos selecionados pela filtragem *on-line* são, então, analisados em detalhes de forma *off-line*.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema receptor de sinais inserido no primeiro nível de filtragem do ATLAS. O sistema utiliza informação de calorimetria (R. Wigmans, 2000) para a detecção de sinais de múons, e, assim, auxiliar as câmaras de múons na identificação dos múons na região do barril.

Neste contexto, a próxima seção descreve o ambiente do ATLAS no qual o sistema está sendo desenvolvido. Na Seção 3, o sinal de múon é descrito em detalhes. Na Seção 4, é apresentado o sistema proposto para detecção de múons. Na Seção 5, as análises do sistema proposto e os seus resultados são discutidos, enquanto a Seção 6 mostra as conclusões deste trabalho.

## 2 O Ambiente de Desenvolvimento

Nesta seção, são apresentados, resumidamente, o sistema de filtragem *on-line* do ATLAS, o seu sistema para detecção de múons (câmaras de múons) e o calorímetro hadrônico de Telhas (TileCal).

### 2.1 Sistema de Filtragem On-Line

O sistema *on-line* de filtragem do ATLAS (chamado sistema de *trigger*) é implementado em três níveis conectados em cascata. Cada nível tem a sua própria taxa de corte de eventos e o seu tempo de latência. Um esquema do sistema de filtragem pode ser visto na Figura 2.

O primeiro nível de filtragem (L1) é responsável pelo maior corte na taxa de eventos, no menor tempo de latência possível (K. Kordas et al., 2007). De forma a diminuir a taxa de eventos de 40 MHz para 75 kHz, num tempo máximo de  $2,5\mu s$ , esse nível, além de ser implementado totalmente em *hardware*, faz uso de informação

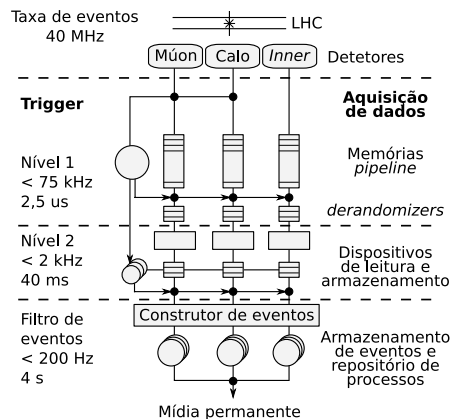


Figura 2: Sistema de filtragem *on-line* do ATLAS.

compactada do detetor, extraída somente dos calorímetros e do detetor de múons. Este nível, também, seleciona as regiões no detetor onde há deposição significativa de energia, chamadas de regiões de interesse (RoI, do inglês *Regions of Interest*).

Combinando o segundo e terceiro níveis, a frequência de eventos é adicionalmente reduzida para não mais que 200 Hz, num tempo de latência de, aproximadamente, 4 s. Estes níveis, por sua vez, são implementados em *software*, tendo acesso à granularidade plena do detetor dentro de cada RoI selecionada pelo L1 (K. Kordas et al., 2007).

### 2.2 Câmaras de Múons

As câmaras de múons são responsáveis pela detecção e medição do momento dos múons que atravessam o ATLAS, tanto na região do barril, como na região das tampas (F. Anulli et al., 2009). Ao passarem nas câmaras, os múons deixam informação referente à sua trajetória, permitindo que os seus momentos transversos sejam estimados. Para a região do barril, o detetor RPC (do inglês *Resistive Plate Chambers*) é utilizado para a detecção de múons.

O RPC é capaz de detectar muons a partir de 6 patamares de momento transversal ( $p_T$ ). Para isso, o detetor é formado por três planos distintos. Dependendo da configuração que um candidato a múon deixa no detetor, os patamares de  $p_T$  são aplicados e esse candidato é ou não confirmado como múon (F. Anulli et al., 2009).

Apesar disso, as câmaras de múons estão sujeitas a múons oriundos do espaço, na forma de raios cósmicos (T. Gaisser, 1990). A detecção desses múons pode levar à interpretação errônea de resultados físicos, constituindo assim ruído de fundo para o experimento. Além disso, efeitos da radiação produzida nas interações entre partículas podem elevar a taxa de *trigger* de falsos múons, degradando a performance do sistema. De forma a evitar esse cenário, foi vislumbrada a utilização

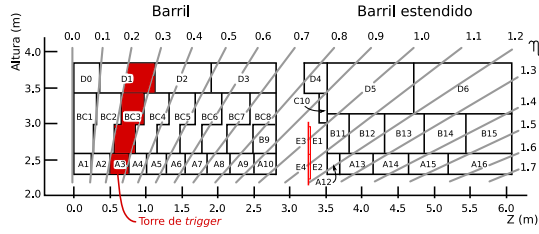


Figura 3: Distribuição das células do TileCal.

de informação de calorimetria para auxiliar a decisão das câmaras de múons.

### 2.3 Calorímetro Hadrônico - TileCal

iniciam um chuva, ou cascata, de partículas (R. Wigmans, 2000). Neste processo, a energia é depositada, coletada e medida. Tipicamente, os calorímetros são formados por materiais passivos, que sejam capazes de absorver a cascata de partículas, e ativos, que levem à medição da energia sendo depositada.

O TileCal é o calorímetro hadrônico do ATLAS (F. Ariztizabal et al., 1994). Sua arquitetura combina, lado a lado, placas de ferro, como material estruturante e absorvente de partículas, e telhas de plástico cintilante, como material ativo. As partículas subatômicas, ao desenvolverem a cascata no calorímetro, excitam o material cintilante. Fibras óticas são conectadas a essas telhas, de forma a transportar a informação luminosa até tubos fotomultiplicadores, que transformam o sinal luminoso em um sinal elétrico (K. Anderson et al., 2005).

A amplitude do sinal elétrico gerado é diretamente proporcional à energia depositada pela partícula nas placas de ferro. Depois de um condicionamento do sinal, esse sinal elétrico é lido pelos canais de leitura do TileCal (K. Anderson et al., 2005). De forma a aumentar a redundância na aquisição de dados, existem dois canais de leitura independentes, denominados canal esquerdo e direito.

O TileCal é segmentado em células de deposição de energia, dispostas em 3 camadas de acordo com a distância perpendicular em relação ao feixe de partículas (coordenada  $z$ ), e em 64 módulos ao longo do ângulo de rotação perpendicular à direção do feixe (coordenada  $\phi$ ). A Figura 3 mostra a geometria das células de deposição de energia do TileCal, para o barril e o barril estendido.

A interface entre o primeiro nível de filtragem do ATLAS e o TileCal é feita através do fornecimento de dois sinais: o sinal de torre e o sinal de múon. Como o L1 observa informação compactada do detetor, uma torre de *trigger* (a região sombreada da Figura 3) é definida, correspondendo a uma região de  $0,1 \times 0,1$  no plano  $\eta \times \phi$  ( $\eta$  é a pseudo-rapidez, que corresponde à

direção da trajetória das partículas resultantes da colisão (R. Wigmans, 2000)). Os sinais de leitura das células que residem dentro de uma dada torre de *trigger* são somados por circuitos somadores rápidos, formando o sinal de torre (A. Cerqueira et al., 2007a). Já o sinal de múon é formado pela amplificação do sinal de cada leitura das células da última camada do calorímetro (células D). Como estas células se localizam na camada mais externa do calorímetro, elas são menos sensibilizadas por cascatas hadrônicas (ATLAS/Tile Calorimeter Collaboration, 1996).

Atualmente, os sinais de múon do TileCal não estão sendo usados, mas estão disponíveis nos cabos que conduzem os sinais do TileCal ao L1. O sistema receptor desenvolvido neste trabalho utiliza os sinais de múon do TileCal para a detecção de múons no L1.

## 3 O Sinal de Múon

Por serem maiores em  $\eta$ , as células D pertencem a duas torres de *trigger*, fornecendo dois sinais de múon independentes. A largura do pulso é fixa em, aproximadamente, 50 ns pelo circuito condicionador do sinal (K. Anderson et al., 2005), enquanto que a sua amplitude é proporcional à energia depositada pela partícula. Sua capacidade de detecção foi intensamente estudada (A. Cerqueira et al., 2006) em experimentos controlados, nos quais feixes de múons com energia fixa (180 GeV) atravessavam o calorímetro em direções específicas de  $\eta$ , e digitalizadores conectados à saída múon dos circuitos somadores do TileCal, digitalizavam o sinal a 40 MHz, com 8-bits de faixa dinâmica.

A Figura 4 mostra sinais típicos de diferentes níveis de energia, vistos na leitura esquerda de uma célula (D1L). Nota-se que sinais provenientes de pequenas deposições energéticas têm amplitudes muito baixas. Pode-se ver, também, a deposição energética típica para essa mesma leitura. A linha preta representa a correspondente distribuição esperada (Gaussiana convoluída com Landau). O valor MOP (do inglês *Most Probable Value*) dessa distribuição representa a energia média depositada pelos feixes de múon (R. Leitner, 1997).

De forma a aumentar a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) para a detecção de múons, os dois sinais de múon provenientes de uma mesma célula D foram somados em *software*. Considerando que o ruído é aditivo e não é correlacionado com o sinal de múon, nem com o sinal de ruído das outras células, a SNR para o sinal somado seria aumentada por um fator de  $\sqrt{2}$ . Aqui, a SNR é definida como a razão entre o valor MOP da distribuição energética e o valor RMS do ruído, ambos em MeV.

A Figura 5 mostra a SNR para os sinais da leitura esquerda (DL), leitura direita (DR) e o sinal

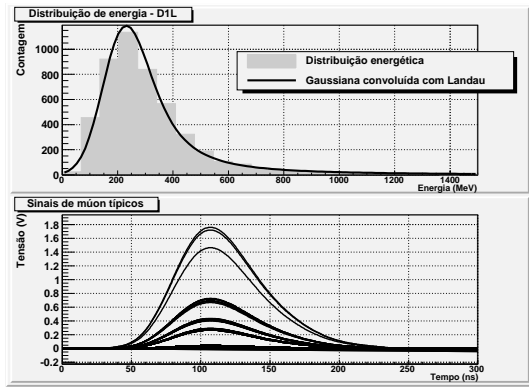


Figura 4: Distribuição energética e sinais típicos correspondentes a diferentes energias depositadas.

de soma, considerando feixes de múons acertando o calorímetro em diferentes direções de  $\eta$ . Pode-se ver que, em média, a razão entre a SNR do sinal de soma e a SNR média de DL e DR é próxima de  $\sqrt{2}$  ( $1,435 \pm 0,01$ ). A tendência de aumento da SNR conforme o valor de  $\eta$  aumenta é esperada. A deposição de energia do múon nas células do TileCal é proporcional à quantidade de material ativo encontrada pela partícula. Como pode ser visto na Figura 3, grandes direções de  $\eta$  levam a caminhos mais longos dentro de uma mesma célula, produzindo distribuições de energia com valores maiores de MOP.

O aumento da SNR leva a uma melhor discriminação de múons. A Figura 6 mostra a distribuição do pico (em contagens de ADC - do inglês, *Analog-to-Digital Converter*) do sinal de cada leitura, adquirido com múons atravessando o calorímetro em  $\eta = 0,15$ , e do sinal de ruído dessas mesmas leituras. Pode-se ver que a área de confusão entre o sinal de múon e ruído é menor quando o sinal de soma é considerado. Para um discriminador por patamar operando sobre esses sinais, dada uma eficiência de detecção fixa de 90 %, a correspondente taxa de falso alarme (ruído

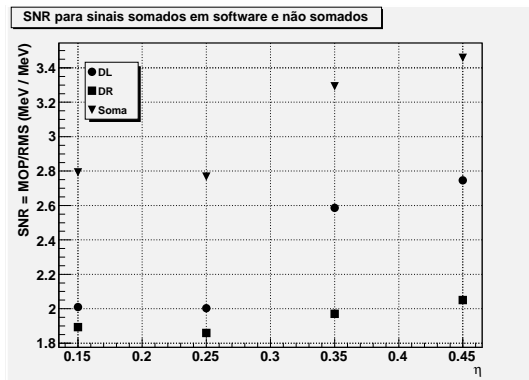


Figura 5: SNR para os sinais somados e não somados, com múons lançados a um módulo do TileCal em diferentes direções de  $\eta$ .

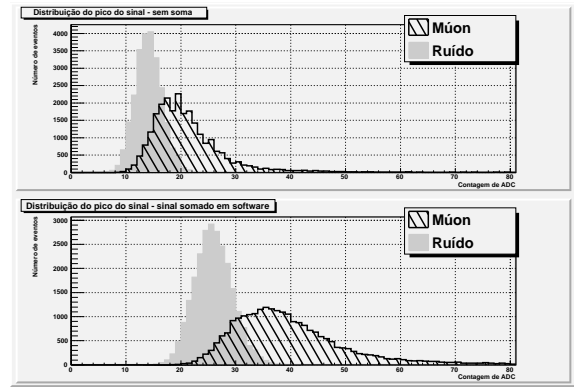


Figura 6: Distribuição do pico dos sinais de múon e ruído, para sinais de múons somados ou não.

erroneamente classificado) é menor (20 % contra 40 %) quando o sinal de soma é considerado.

Os sinais de múons do TileCal foram usados, também, para a aquisição de raios cósmicos. Para a fase de manutenção do detetor, um sistema *stand-alone* de *trigger* foi implementado. O sistema somava analogicamente os sinais de múons de uma mesma célula D e aplicava um discriminador por patamar de forma a evitar a aquisição de ruído (A. Cerqueira et al., 2007b). Testes confirmaram que o sinal resultante da soma permite o uso de patamares menores, fazendo com que sinais de múons com menor energia sejam também detetados.

#### 4 Receptor para o Sinal de Múon do TileCal

A experiência obtida durante a fase de manutenção e de experimentos controlados com o calorímetro levaram ao desenvolvimento do receptor de múons apresentado neste trabalho. O sistema foi desenvolvido com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema de *trigger* de primeiro nível de múons, principalmente no que se refere à deficiência na performance contra efeitos de radiação e raios cósmicos.

O sistema receptor deve fornecer uma informação de discriminação ao sistema de filtragem do ATLAS utilizando os dados de calorimetria do detetor. Para evitar vetos, as geometrias de *trigger* do TileCal e do L1Muon devem ser alinhadas, assim como a disponibilização do sinal de *trigger* nos instantes de colisão (*bunch-cross*) corretos (de forma a certificar que os múons detetados por ambos os sistemas vieram do mesmo evento).

##### 4.1 Implementação do Sistema

O sistema completo é dividido em dois subsistemas independentes (de acordo com o sinal de  $\eta$ ), devido às características físicas e mecânicas. Cada subsistema funciona num *crate* VME separado,

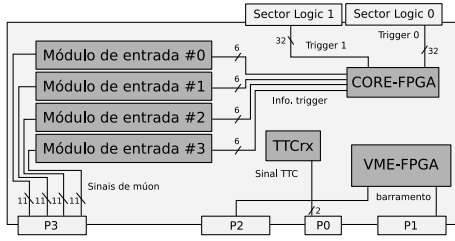


Figura 7: Esquema do módulo receptor.

com 16 módulos de recepção, um *single board computer*, que funciona como o controlador do *crate* e um módulo para recepção dos sinais de TTC do experimento (do inglês *Timing and Trigger Control*) (TTC, 2009).

A Figura 7 mostra o esquema de um módulo de recepção do sistema. Cada módulo é responsável por processar os sinais contidos em 4 cabos de múon, num total de 44 sinais de múon provenientes de 24 células D.

Primeiramente, cabos DB32 levam os sinais de múon do painel frontal de sinais do TileCal até placas passivas localizadas atrás do *crate* do receptor de múons. Cada placa se comunica diretamente com um módulo de recepção, localizado na parte frontal do *crate*, através do espaço P3 do barramento VME. As principais funções dos dispositivos presentes no módulo de recepção são descritas abaixo.

- **VME-FPGA:** dispositivo responsável pela comunicação entre o módulo e o controlador do *crate*, funcionando como um módulo escravo. Desenvolvido na tecnologia FPGA (do inglês *Field Programable Gate Array*) (S. Brown and Z. Vranesic, 2000), é conectado a todos os outros dispositivos FPGA do módulo, de forma a reconfigurá-los de forma *on-line*.
- **TTCrx:** é um dispositivo padrão nos experimentos do LHC, responsável pela decodificação das informações necessárias para a sincronização de qualquer módulo do ATLAS com o LHC (TTC, 2009). Os sinais de entrada do TTCrx vêm pelo conector P0 do VME, através de uma comunicação ponto-a-ponto com o módulo TTC localizado no *crate*. Os sinais decodificados são transmitidos a todos os outros dispositivos do módulo que necessitem ser sincronizados.
- **Módulo de entrada:** esta parte do circuito é responsável pela soma dos dois sinais de múon provenientes de uma mesma célula D, pela desabilitação de canais ruidosos, digitalização, classificação e identificação de *bunch-cross* do sinal somado (BCID). Cada módulo de entrada processa os 11 sinais presentes num cabo.

- **CORE-FPGA:** também desenvolvido em FPGA, esse dispositivo é usado para alinhar as geometrias de *trigger* do TileCal e das câmaras de múons. As informações de *trigger* enviadas pelos módulos de entrada são marcadas de acordo com o setor de *trigger*, ou *sector logic*, correspondente nas câmaras de múon. Finalmente, esse módulo é responsável por transmitir a informação final do módulo receptor para os sistemas do L1Muon.

Cada setor de *trigger* das câmaras de múons cobre uma região de  $1,05 \times 0,2$  no plano  $\eta \times \phi$ , enquanto o módulo receptor cobre uma região de  $1,4 \times 0,4$  em  $\eta \times \phi$ . Assim, cada módulo receptor cobre a região de 2 setores de *trigger*, mais uma região em  $\eta$  que não é vista pelo detetor de múons da região do barril. Ainda assim, a implementação atual processa todos os sinais de múons do TileCal.

Finalmente, o módulo TTC recebe as fibras óticas provenientes do processador central de *trigger* do ATLAS, converte a informação luminosa em elétrica e a transmite para os outros módulos de recepção do *crate*, através do conector P0 do barramento VME. Como as funcionalidades deste módulo são muito similares às funções do módulo TCM, utilizado pelo sistema de primeiro nível de filtragem de calorimetria do ATLAS, a sua implementação será baseada neste módulo (J. Garvey et al., 2004).

#### 4.2 Módulo de Entrada

A maior parte das funções de processamento de sinais é feita pelo módulo de entrada. Cada módulo de recepção possui 4 blocos de entrada, um para cada cabo DB32. A Figura 8 mostra um diagrama em blocos deste módulo.

Primeiramente, os sinais de múons provenientes do TileCal são transformados do modo diferencial para unipolar, sendo então, referenciados em relação ao terra do *crate*. Para isso, são utilizados transformadores de ganho unitário, com o secundário e o primário em configuração inversa (A0).

No estágio de entrada (A1), um amplificador operacional é utilizado como *buffer*. Esse amplificador possui um modo de desligamento, para mas-

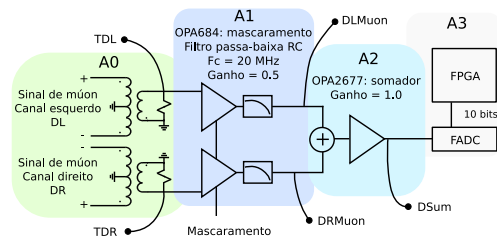


Figura 8: Diagrama em blocos do módulo de entrada.



carar canais ruidosos, e uma excursão de sinal de saída capaz de acompanhar o valor máximo do sinal de entrada (4 V). A sua saída é conectada a um filtro passa-baixa RC, com frequência de corte de 20 MHz, de forma a eliminar a contribuição de ruído de altas frequências. A banda do sinal de múon é de 8 MHz e não é significativamente afetada pelo filtro. Uma atenuação de 0,5 desse estágio impede que o sinal, ao ser somado, sature o amplificador do próximo estágio.

A soma dos dois sinais de múons de uma mesma célula D é feita em corrente, sendo convertida em tensão através de um amplificador operacional com ganho unitário (A2). O sinal de soma resultante é digitalizado por um FADC (do inglês *Flash Analog to Digital Converter*) (R. van de Plassche, 1994) e a palavra digital é lida por um dispositivo FPGA, que é responsável pela aquisição do sinal, BCID e discriminação. Sempre que uma amostra do sinal for maior do que um patamar pré-especificado, o FPGA envia a decisão de *trigger*, o BCID e qualquer outra informação necessária para o CORE-FPGA.

### 4.3 Problemas de Empilhamento do Sinal

Um dos principais problemas em detetores com elevada taxa de eventos é o efeito de empilhamento. Esse efeito se deve, basicamente, a três motivos: partículas resultantes de colisões consecutivas que excitam a mesma região do detetor, alargamento do sinal devido ao efeito de redução de banda passante produzido pelos cabos que conduzem os sinais, e excessiva demora no retorno de sinais saturados por uma deposição energética elevada (P. Nicholson, 1974).

Na cadeia do sinal de múon do TileCal, uma excessiva deposição energética gera um sinal elétrico que satura o circuito de leitura do TileCal, antes de chegar no receptor de múons. Ainda assim, o circuito de soma do módulo de entrada deve ser capaz de acompanhar o retorno da saturação imposto pela eletrônica de leitura do TileCal.

A Figura 9 mostra a quantidade de *bunch-crosses* necessários para o sinal retornar de 90 % a 10 % de seu valor máximo saturado. Os sinais de múons saturados adquiridos durante os testes com feixes de múons foram reamostrados de 40 MHz para 2 GHz e simulados pelo PS-pice (J. Tront, 2005) no circuito de soma do receptor de múons, de modo a melhorar a resolução para a medição do tempo de descida do sinal. A reamostragem foi feita através da interpolação do sinal original com um filtro polinomial de segunda ordem, aplicado, posteriormente, a um filtro passa-baixa de forma a limitar a sua banda em frequência. Pode-se ver que a maior parte dos sinais de soma (aproximadamente 90 %) necessita de 2 *bunch-crosses* para retornar da saturação.

O segundo problema é devido ao alargamento

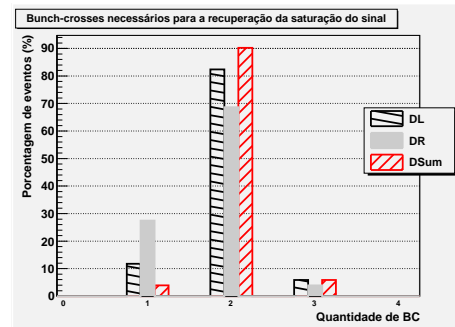


Figura 9: Número de *bunch-cross* necessário para o sinal retornar de 90% a 10% de seu valor máximo.

dos sinais, tanto nos cabos condutores, quanto nos estágios do circuito somador do módulo de entrada. De forma a restaurar a largura do sinal original, é proposto um filtro ativo de compensação, que reduz a largura do sinal de múon antes deste alimentar o módulo de entrada.

#### 4.3.1 Compensador de cabos

Para a compensação da resposta do cabo longo utilizado para a transmissão do sinal de múon do TileCal, podem-se utilizar técnicas baseadas na estimação da resposta ao degrau do cabo como apresentado em (J.M. de Seixas et al., 1991). Como não há informação experimental da resposta ao degrau do cabo em uso, considerou-se uma aproximação por um sistema passa-baixa de primeira ordem. Desta forma, pode-se estimar a largura de banda do sistema através do tempo de subida da resposta ao degrau e do tempo de subida do degrau na entrada do sistema.

Através da Equação (1), pode-se estimar a contribuição do cabo ( $ts_{cabo}$ ) no tempo de subida da resposta ao degrau ( $tr_{saida}$ ), onde  $ts_{entrada}$  representa o tempo de subida do degrau na entrada do sistema. A partir de  $ts_{cabo}$ , estima-se a frequência de corte em 3 dB ( $banda_{3dB}$ ) utilizando a Equação (2) (J. Millman and H. Taub, 2007).

$$ts_{cabo} = \sqrt{tr_{saida}^2 - ts_{entrada}^2} \quad (1)$$

$$banda_{3dB} = \frac{0,35}{ts_{cabo}} \quad (2)$$

Uma vez estimada a frequência de corte em 3 dB, podemos obter a função de transferência aproximada do cabo

$$H(s) = \frac{K}{\frac{s}{banda_{3dB}} + 1} \quad (3)$$

que queremos compensar.

Para compensar a resposta do cabo, pode-se utilizar um filtro cuja resposta em frequência tenha um zero na frequência  $banda_{3dB}$  e pelo menos

dois pólos (J.M. de Seixas et al., 1991) distantes do zero, conforme pode ser visto na Equação (4).

$$H(s) = \frac{K \left( \frac{s}{\text{banda}_{3dB}} + 1 \right)}{\left( \frac{s}{\omega_{p1}} + 1 \right) \left( \frac{s}{\omega_{p2}} + 1 \right)} \quad (4)$$

Desta forma, filtros analógicos podem ser usados para compensar a resposta dos cabos, recuperando a velocidade do sinal de múon no receptor. Estes filtros devem estar localizados logo após os amplificadores A1 na Figura 8.

## 5 Resultados

O circuito do módulo de entrada foi simulado no PSpice utilizando-se os sinais adquiridos durante os testes com feixes de múons, adquiridos a uma taxa de amostragem de 40 MHz. Os sinais de múon são provenientes das células D1 e D2, correspondendo a múons atingindo o TileCal em  $\eta = 0,15$  e  $\eta = 0,25$  (D1) e  $\eta = 0,35$  e  $\eta = 0,45$  (D2), totalizando um conjunto de, aproximadamente, 25 mil sinais para cada valor de  $\eta$ , tanto para múons quanto para aquisições de ruído.

A resposta em frequência do circuito de soma do módulo de entrada mostrou que a banda passante do sistema, sem o compensador de cabos, ficou em 19,50 MHz, suficiente para acomodar a banda do sinal de múon (8 MHz).

Como o sistema tem dois sinais de entrada, a SNR de saída é referenciada em relação à SNR média entre DL e DR. Assim, a SNR do sinal de saída é 1,472 vezes maior do que a SNR de entrada do sistema. Considerando a incerteza na estimativa da SNR, de 0,068, a razão entre a SNR de saída e de entrada se aproxima de  $\sqrt{2}$ , como esperado. A diferença em relação aos resultados obtidos durante os testes experimentais e os simulados se deve aos efeitos dos filtros RC do circuito.

A curva ROC (do inglês, *Receiver Operating Characteristics*) (H. Van Trees, 2001) foi utilizada para avaliar a eficiência dos discriminadores. A

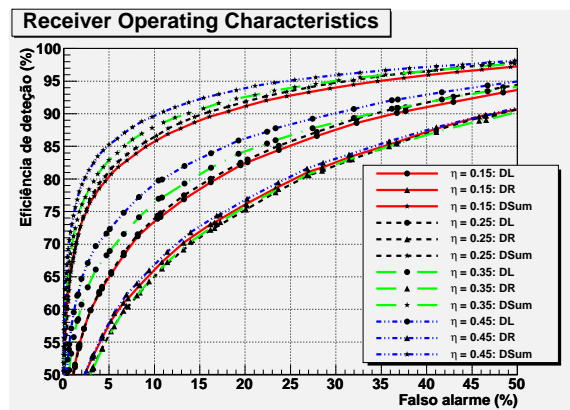


Figura 10: Curva ROC para os sinais DL, DR e DSum do circuito, para diferentes valores de  $\eta$ .

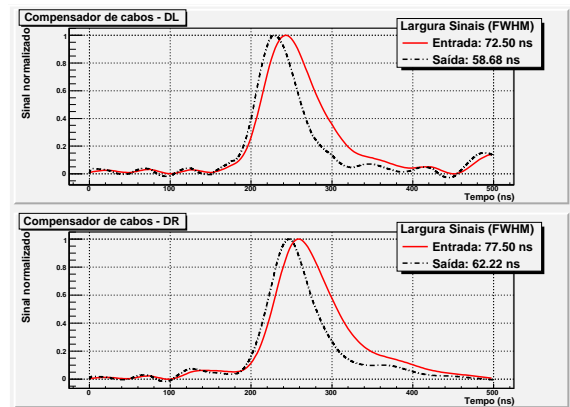


Figura 11: Pulsos de entrada e saída do compensador de efeito de cabo proposto para o receptor de múons.

Figura 10 mostra as curvas ROC para os sinais em DL, DR e DSum (sinal de soma). Fixando a eficiência de detecção de múons em 90 %, uma taxa de falso alarme de 17 %, 15 %, 13 % e 10 % é alcançada (para  $\eta = 0,15$ ,  $\eta = 0,25$ ,  $\eta = 0,35$  e  $\eta = 0,45$ , respectivamente) para o sinal de soma.

Com relação à compensação da resposta do cabo, primeiramente, a estimativa da frequência de corte do sistema passa-baixa de primeira ordem foi feita experimentalmente, com base em dados adquiridos durante a fase de manutenção do detector com raios cósmicos, cujo sinal resultante é idêntico aos sinais provenientes das colisões.

A Figura 11 mostra os pulsos de entrada e saída do compensador de cabos para duas leituras da célula D. Pode-se observar que a largura do pulso de saída foi reduzida significativamente: enquanto o pulso de entrada tem uma largura a meia altura de 72,50 ns, o pulso de saída tem 58,68 ns (para o sinal em DL de uma célula D qualquer do TileCal). O sinal de múon típico visto na saída do somador do TileCal tem, aproximadamente, largura de 58 ns, mostrando que o compensador proposto, apesar de simples, consegue recuperar a largura do sinal original.

## 6 Conclusões

Este artigo apresentou o desenvolvimento de um sistema receptor para sinais de um calorímetro do detector de partículas ATLAS. O sistema deve discriminar entre sinais de múon e ruído, de forma a auxiliar o sistema de filtragem de primeiro nível de múons do ATLAS. O sistema soma os dois sinais de múon provenientes de uma mesma célula de deposição de energia do calorímetro, aumentando a SNR, e levando a uma taxa de falso alarme até 20 pontos percentuais menor do que os sinais não somados, considerando uma eficiência detecção de múons fixa de 10 %.

Um compensador para o efeito de alargamento do pulso gerado pelos cabos condutores do

sinal foi desenvolvido. Apesar de simples, o compensador consegue reduzir a largura do pulso para valores próximos da largura original do sinal antes deste ser conduzido pelos cabos, levando a uma melhora do desempenho do circuito relativamente ao empilhamento de sinais.

Conforme mostram os resultados, o sistema receptor proposto consegue satisfazer os requisitos para a interface com o sistema de filtragem do ATLAS. Estudos têm sido realizados na direção da utilização de técnicas mais sofisticadas para a deteção dos sinais, como a utilização de filtros casados, redes neurais, entre outros. Desta forma, espera-se obter uma melhora adicional no desempenho do sistema, relativamente à deteção de múons.

## 7 Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer o suporte dado ao projeto pelo CNPq, FAPERJ e FAPEMIG (Brasil), bem como CERN e União Européia, através do programa HELEN. Também gostaríamos de agradecer aos colegas da colaboração ATLAS Tile-Cal e TDAQ por todo o apoio e pelas discussões frutíferas sobre os estudos apresentados nesse trabalho.

## Referências

- A. Cerqueira et al. (2006). Tilecal Trigger Signal Specifications and Testbeam Performance, *Technical Report ATL-TILECAL-PUB-2006-001*, CERN, Genebra.
- A. Cerqueira et al. (2007a). Analog System for Building the First-Level Triggering Signal Provided By the Hadronic Calorimeter of ATLAS Detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **570**: 117–125.
- A. Cerqueira et al. (2007b). Cosmic Ray Triggering Using Muon Signal Detected by the Hadronic Calorimeter of ATLAS, *The Journal of High Energy Physics* **ACAT**: 1–8.
- ATLAS/Tile Calorimeter Collaboration (1996). Tile Calorimeter Calorimeter Technical Design Report. CERN/LHCC 96–42.
- F. Anulli et al. (2009). The Level-1 Trigger Muon Barrel System of the ATLAS experiment at CERN. The Level-1 Trigger barrel System of the ATLAS Experiment at CERN, *J. Instrum.* p. P04010. 37 p.
- F. Ariztizabal et al. (1994). Construction and performance of an iron-scintillator hadron calorimeter with longitudinal tile configuration, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **349**: 384 – 397.
- G. Aad et al. (2008). The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider, *Journal of Instrumentation* **1**(2008 JINST 3 S08003).
- H. Van Trees (2001). *Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Vol. 1, John Wiley & Sons.
- J. Garvey et al. (2004). The ATLAS level-1 calorimeter trigger architecture, *IEEE Transactions on Nuclear Science* **51**(3): 356 – 360.
- J. Millman and H. Taub (2007). *Pulse, digital and switching waveforms*, McGraw-Hill.
- J. Tront (2005). *PSpice for Basic Circuit Analysis*, Vol. 2, McGraw-Hill.
- J.M. de Seixas et al. (1991). A simple method for cable compensation with fast pulse transmission applications., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **314**: 191–198. 20 p.
- K. Anderson et al. (2005). Design of the front-end analog electronics for the ATLAS tile calorimeter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **551**: 469–476.
- K. Kordas et al. (2007). The ATLAS Data Acquisition and Trigger: concept, design and status, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **172**: 178 – 182.
- L. Evans (2008). LHC machine, *Journal of Instrumentation* **1**(2008 JINST 3 S08001).
- P. Nicholson (1974). *Nuclear Electronics*, John Wiley & Sons.
- R. Leitner (1997). Parametrization of the Muon Response in the Tile Calorimeter, *Technical Report ATL-TILECAL-97-114*, CERN, Genebra.
- R. van de Plassche (1994). *Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters*, Kluwer Academic Publishers.
- R. Wigmans (2000). *Calorimetry: Energy Measurement in Particle Physics*, International series of monographs on physics, Clarendon Press, Oxford.
- S. Brown and Z. Vranesic (2000). *Fundamentals of Digital Logic with VHDL Design*, McGraw-Hill.
- T. Gaisser (1990). *Cosmic rays and particle physics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- TTC (2009). acessado em novembro de 2009. <http://ttc.web.cern.ch/TTC/intro.html>.