

# SISTEMA DIGITAL PARA REDUÇÃO DO EMPILHAMENTO EM MEDIÇÕES DE ENERGIA NUM DETECTOR DE PARTÍCULAS

MARCELO M. CAVALCANTI, EDUARDO F. SIMAS FILHO, PAULO C. M. A. FARIAS

*Laboratório de Sistemas Digitais, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia  
Rua Aristides Novis, 02, Federação, CEP 40210-630, Salvador, BA*

*E-mails:* marcelo.engufba@gmail.com, eduardo.simas@ufba.br, paulo.farias@ufba.br

LUCIANO M. ANDRADE FILHO

*Departamento de Circuitos Elétricos, Universidade Federal de Juiz de Fora  
Rua José Lourenço Kelmer, s/n, Campus Universitário – São Pedro, CEP 36036-330, Juiz de Fora, MG  
E-mail: luciano.andrade@engenharia.ufjf.br*

JOSÉ M. DE SEIXAS

*Laboratório de Processamento de Sinais, COPPE / Poli, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Centro de Tecnologia, Bloco G, Sala 146, Cidade Universitária, CEP 21941-972, Rio de Janeiro, RJ  
E-mail: seixas@lps.ufrj.br*

**Abstract**— ATLAS has been develop as a general-purpose particle detector and it is located at one of the collision points of the LHC (Large Hadron Collider), at CERN. Presently, the LHC and its detectors are following an extensive upgrade program in order to allow an increase in the collision energy and luminosity (event rate). This new scenario is challenging for the detector electronic readout systems due to detector occupancy increase, which results in pileup noise. In ATLAS, calorimeters play a major role as they measure the energy of the incoming particles and help in the particle identification process, which is extremely important for event selection. ATLAS calorimeters comprise more than 100,000 readout channels. As the pileup increases, the particle detection efficiency is severely affected. The purpose of this work is to propose an embedded electronic system for pileup compensation in ATLAS calorimeter system. This employs a bank of filters that are implemented in FPGA technology. Good results are shown from ATLAS simulation data.

**Keywords**— digital signal processing, digital filter, embedded systems, high energy physics, calorimeter.

**Resumo**— O ATLAS foi desenvolvido como um detector de propósito geral e está instalado num dos pontos de colisão do acelerador LHC (*Large Hadron Collider*), no CERN. Atualmente, o LHC e seus detectores estão passando por um programa extenso de atualização que visa aumentar a energia e a luminosidade (taxa de eventos) das colisões. Esse novo cenário é um desafio para os sistemas de instrumentação eletrônica dos detectores, pois com a elevação da taxa de eventos, mais informação será produzida. Um problema que será intensificado no sistema de medição de energia (calorímetro) do ATLAS é a sobreposição (empilhamento ou *pileup*) de eventos. O Calorímetro do ATLAS é composto por mais de 100.000 sensores e sua informação é fundamental para a identificação do tipo de partícula. Com o aumento da sobreposição de eventos, a eficiência de detecção é seriamente comprometida. O objetivo deste trabalho é propor um sistema eletrônico embarcado capaz de atenuar o efeito da sobreposição de eventos no calorímetro do ATLAS. O sistema proposto compreende a implementação em FPGA de diversos filtros digitais para processamento em paralelo das informações medidas. Os filtros são projetados para minimizar o efeito do canal de medição (filtros de deconvolução). Os resultados obtidos com dados simulados se mostraram satisfatórios.

**Palavras-chave**— processamento digital de sinais, filtragem digital, sistemas embarcados, física de altas energias, calorímetro.

## 1 Introdução

A Física de partículas (ou física de altas energias) é o ramo da Física que estuda as partículas subatômicas e suas interações, com o objetivo de encontrar os constituintes elementares da matéria. Os experimentos de física de altas energias são projetados para observar e caracterizar as partículas de interesse, que podem ser geradas por fontes naturais (ex. raios cósmicos) ou artificiais (aceleradores de partículas) (Fernow, 1986). A análise dos dados obtidos nestes experimentos é utilizada para validar modelos previstos por estudos teóricos, a exemplo do Bóson de Higgs, recentemente observado pelos detectores do

LHC (ATLAS Collaboration, 2012), e para possibilitar a criação de novas teorias. De modo a identificar as partículas geradas por tais colisões, são projetados detectores capazes de medir características que auxiliasssem na identificação das informações de interesse, tal como a carga elétrica e o perfil energético (Wigmans, 2000).

O ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) é um detector de partículas de propósito geral, um dos sete detectores do experimento LHC (*Large Hadron Collider* – Grande Colisor de Hâdrons), que está em operação desde 2008 no CERN (Centro Europeu para Pesquisa Nuclear), em Genebra, Suíça (Evans e Bryant, 2008). O LHC é o maior acelerador de partículas já construído (com um percurso de aproximadamente 20 km, a 100m abaixo do nível do solo) e

tem como objetivo produzir a colisão de feixes de prótons ou de íons pesados a uma velocidade próxima a da luz. Em cada colisão são produzidas inúmeras partículas que precisam ser observadas e identificadas pelos detectores.

O ATLAS é um complexo sistema de detecção de formato cilíndrico, que pode ser dividido em três subsistemas, como visto na Figura 1. Estes subsistemas são: o detector de trajetória (que marca o deslocamento das partículas quando imersas num campo eletromagnético), o calorímetro (capaz de medir a energia das partículas incidentes) e a câmara de múons (projetada para a detecção destas partículas, que não interagem significativamente com as outras partes do detector). As informações dos sensores são processadas por sistemas eletrônicos e computacionais dedicados, e por fim armazenadas para análises posteriores (ATLAS Collaboration, 2008).

O número de interações entre partículas produzidas por centímetro quadrado por segundo no LHC é chamado de luminosidade. Para aprimorar os estudos das propriedades físicas de partículas subatômicas, o LHC está em processo de atualização, que permitirá o aumento da luminosidade e da energia das colisões. Tal aumento, por consequência, irá gerar uma maior taxa de eventos a serem detectados e processados (Allport, 2010).

Considerando especificamente o sistema de calorímetros, a maior frequência de ocorrência de eventos pode ocasionar a sobreposição da informação entre eventos subsequentes (*pileup*). Este problema ocorre sempre que o intervalo de tempo entre dois eventos subsequentes localizados numa mesma região do detector é menor do que o tempo de resposta (latência) do sistema de medição.

O atual sistema eletrônico de processamento de sinais do ATLAS não é capaz de lidar com esse problema e a ocorrência do empilhamento de eventos prejudica a correta caracterização dos fenômenos físicos de interesse, comprometendo o desempenho do sistema *online* de seleção de eventos (*trigger*) do detector.

Neste trabalho está sendo proposto um sistema eletrônico para processamento dos sinais medidos no calorímetro do ATLAS, com foco na redução do efeito do empilhamento de eventos. Devido às restrições de tempo de processamento da aplicação (as colisões do LHC acontecem a uma taxa de 40 MHz), é necessária uma implementação em *hardware* dedicado. Para a implementação está sendo proposto o uso de FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*) de última geração, que serão programados para realizarem o processamento paralelo de um conjunto de sensores.

Os filtros digitais a serem embarcados no FPGA foram projetados utilizando um conjunto de dados simulados (que levam em conta toda a cadeia de medição atualmente em uso no detector). Para projeto dos filtros, foi utilizada a técnica da minimização do erro quadrático médio. Os filtros foram treinados em

modo *off-line* e colocados para operar de modo *online* (não há treinamento adaptativo).

Resultados obtidos com conjuntos de dados simulados indicam a eficiência da técnica proposta e sua adequação ao *hardware* eletrônico disponível.

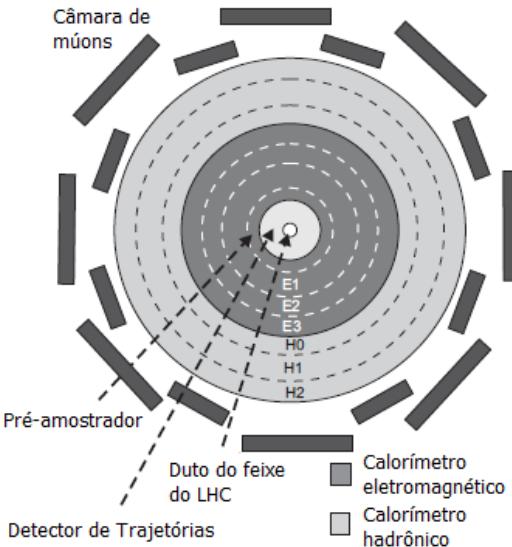


Figura 1. Diagrama do corte transversal do ATLAS, retirada de (Simas Filho, 2010).

## 2 Descrição do Problema

O sistema de seleção *online* de eventos (*trigger*) do ATLAS é fundamental para o desempenho do detector, pois é responsável por selecionar as assinaturas de interesse produzidas nas colisões do LHC (Gabaldon, 2012). No ATLAS o sistema de *trigger* é composto por três níveis sequenciais (conforme ilustrado na Figura 2) onde a seleção dos eventos de interesse é gradualmente refinada. As informações dos eventos do detector são armazenadas em memórias *pipeline* temporárias até que o processo de análise do sistema de trigger chegue a uma decisão final a respeito da aceitação ou rejeição do padrão em questão.

O primeiro nível do *trigger* recebe toda a informação produzida pelo LHC, que pode realizar até 40.000 colisões de feixes de prótons por segundo. Este nível é composto por critérios simples de seleção implementados em *hardware* dedicado, e, na atual configuração, recebe apenas parte da resolução disponível ao detector, devido à alta taxa de eventos e a necessidade de uma resposta rápida (em cerca de 2,5 µs). No sistema atual do ATLAS, para redução do tempo de processamento, os sinais de conjuntos de sensores são acumulados através de somadores analógicos (os resultados destas somas são denominados torres de *trigger*), que por sua vez são enviadas ao primeiro nível de filtragem (L1).

Apenas os padrões selecionados pelo primeiro nível do *trigger* passam para o próximo nível de filtragem enquanto o resto é rejeitado e descartado. O segundo nível de filtragem (L2) lida com uma taxa menor de eventos e dispõe de um tempo de resposta máximo maior comparado com o L1. O L2 é composto por critérios de seleção mais rigorosos, através de *software* especializado rodando em cerca de 700 computadores dedicados. Além disso, está disponível a resolução total dos calorímetros para este nível.

O último nível do *trigger* é o *event filter* (EF). Ele tem acesso a todas as informações disponíveis do evento de interesse, não consideradas pelos níveis anteriores e opera em cerca de 2000 computadores dedicados. Os eventos selecionados neste nível são então armazenados em mídia permanente.

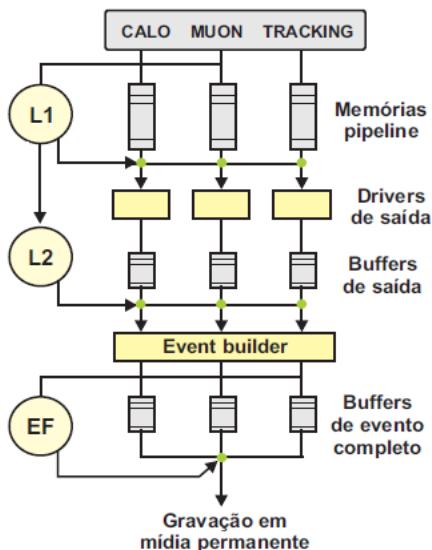


Figura 2. Diagrama de blocos do sistema de *trigger* do ATLAS

A eficiência da seleção de eventos depende fortemente da qualidade da informação adquirida pelo sistema de calorimetria (medidor de energia altamente segmentado). No ATLAS, o sistema de calorímetros é subdividido em dois módulos, um projetado para a detecção de partículas eletromagnéticas (elétrons e fôtons) e outro para a detecção de partículas hadrônicas (prótons, nêutrons, etc).

O sistema eletrônico de processamento de sinais proposto neste trabalho é dedicado ao calorímetro hadrônico do ATLAS (conhecido como TileCal ou calorímetro de telhas), que é composto por sensores em formato telhas de material cintilante. O TileCal tem formato cilíndrico (conforme mostrado na Figura 3), sendo o módulo mais externo do sistema de calorimetria. A interação das partículas com o material do detector ocasiona a produção de luz. Esta será propagada até sensores ópticos chamados PMTs (*photomultipliers* – fotomultiplicadores) (Hergert, 2006), que irão convertê-la em sinais elétricos. Estes sinais são, então, digitalizados, processados e transmitidos por equipamentos eletrônicos.

Para melhor caracterização das informações de interesse, o TileCal é segmentado em três camadas de sensores. Conforme mostrado na Figura 4 (corte longitudinal do TileCal), os módulos cintiladores da primeira camada são designados por A<sub>i</sub>, os da segunda camada B<sub>Ci</sub> e os da terceira camada D<sub>i</sub> (sendo i um indicador da posição do módulo na referida camada). A disposição dos módulos é aproximadamente radial (centrada no ponto de colisão). Cada módulo cintilador é conectado numa fibra óptica, que leva o sinal luminoso produzido na passagem das partículas para uma PMT (TileCal Collaboration, 2013).

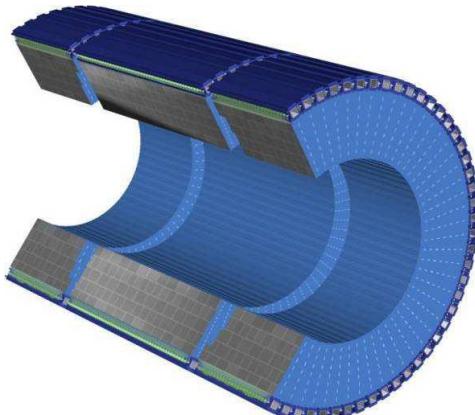


Figura 3. O detector TileCal

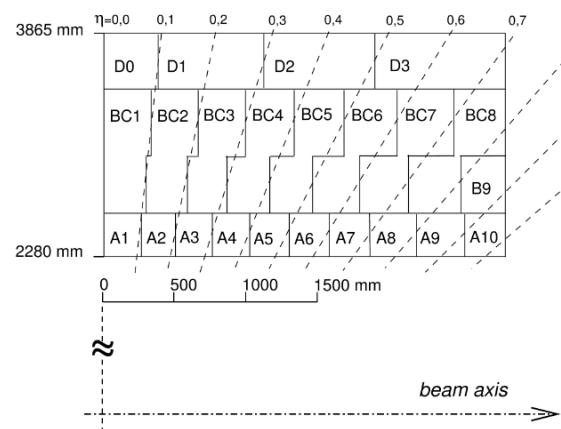


Figura 4. Segmentação de uma parte do TileCal

Com o aumento da taxa de ocorrência de eventos por área do detector (luminosidade), esperada para a nova fase de operação do LHC, a partir de 2015, um dos principais problemas gerados no ATLAS (no que diz respeito à seleção de eventos) é o empilhamento (ou *pileup*) de sinais: quando um evento distorce o padrão de deposição de energia do evento anterior. O resultado desta interferência seria uma mistura de sinais de eventos distintos, o que dificultaria a identificação e estudo dos mesmos.

O empilhamento ocorre devido ao tempo de resposta do sistema de medição. Conforme pode-se ob-

servar na Figura 5<sup>1</sup>, ao ser estimulado, um sensor do TileCal apresenta um pulso típico com duração da ordem de 150 ns. Como o intervalo entre duas colisões adjacentes é de 25 ns (pois a taxa de colisões é 40 MHz), um sensor permanece sensibilizado por até 6 colisões subsequentes. Se houver uma nova sensibilização do mesmo sensor nesse intervalo, haverá empilhamento. A Figura 6 mostra a ocorrência do empilhamento em dados simulados de um sensor do TileCal.

Uma das mudanças propostas pela colaboração do ATLAS para o sistema de *trigger* foi a de alterar a arquitetura do primeiro nível de filtragem (L1) baseado em calorimetria, que, conforme mostra a Figura 7-(a), operava baseado nas informações das torres de *trigger* (somadores analógicos utilizados para compactar a informação e diminuir o tempo de resposta do L1). A nova arquitetura (ver Figura 7-(b)), utiliza para a decisão do L1 os sinais de cada PMT. Para eliminar o problema do empilhamento, é necessário a adição de uma etapa de processamento de sinais (filtragem). Para lidar com a taxa de informação produzida para o L1 (da ordem de dezenas de Tbits por segundo), está sendo proposta uma arquitetura modular utilizando FPGA. Cada FPGA deverá ser capaz de lidar simultaneamente com 48 canais.

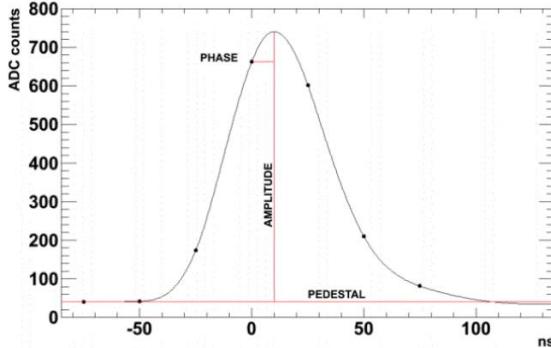


Figura 5. Resposta ao impulso típica de um canal de medição do Tilecal

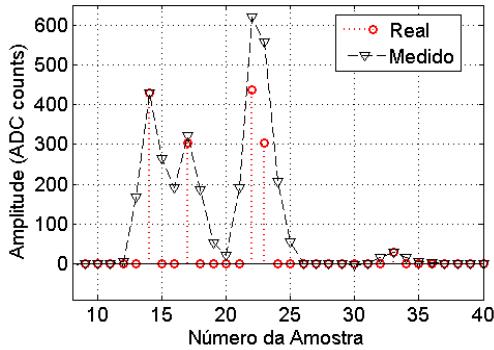


Figura 6. Ilustração do efeito do canal de medição gerando o empilhamento nos sinais medidos.

<sup>1</sup> Nesta Figura e em todo o restante desse trabalho a amplitude dos gráficos de energia é indicada em ADC counts (ou níveis de quantização). Para o TileCal os ADCs utilizam 10 bits (o que totaliza 1024 níveis de quantização) e cada nível corresponde, em unidades de energia, a aproximadamente 12 MeV.

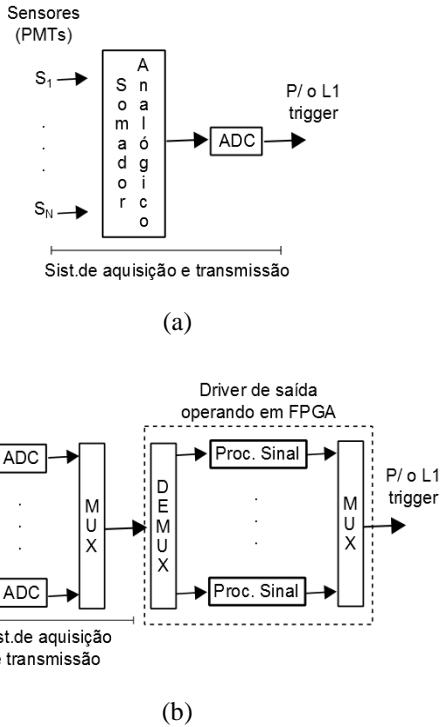


Figura 7. Sistema de aquisição e geração da informação para o primeiro nível (L1) de trigger, sendo (a) arquitetura utilizada anteriormente e (b) nova arquitetura em desenvolvimento.

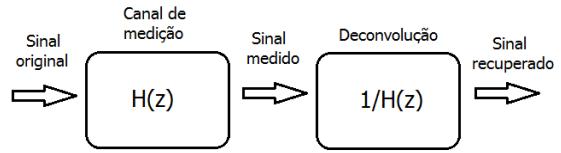


Figura 8. Ilustração da distorção do sinal de interesse pelo canal de medição e a sua recuperação através de um novo sistema

Neste trabalho foi proposta a atenuação do efeito do empilhamento a partir de uma filtragem inversa (deconvolução), conforme mostrado na Figura 8. Embora a função de transferência  $H(z)$  do canal de medição possa ser determinada experimentalmente para cada sensor, a expressão inversa obtida analiticamente ( $1/H(z)$ ) representa um filtro não realizável de modo causal (os pólos de  $1/H(z)$  estão fora do círculo unitário). Esse fato requer uma estimativa aproximada  $F(z) \approx 1/H(z)$ , que possa ter uma implementação causal. Para isso, está sendo proposta uma metodologia iterativa para estimar a função de transferência inversa do canal de medição.

A função de resposta ao impulso do filtro inverso está sendo restrita à estrutura de um filtro de resposta ao impulso finita (FIR – *finite impulse response*). O filtro é obtido após o treinamento off-line, com dados simulados. A seguir o filtro obtido é colocado para operar no sistema eletrônico embarcado. Mais detalhes serão apresentados a seguir.

### 3 Metodologia Proposta

Neste trabalho é proposta a utilização de um sistema digital embarcado para realizar um “pré-processamento” dos dados para redução do empilhamento de eventos. O processamento proposto acontecerá antes do primeiro nível de filtragem *online* do ATLAS (L1). O objetivo é projetar um filtro que tenha aproximadamente a resposta inversa do canal de medição (filtro de desconvolução).

Para este novo sistema, optou-se pelo uso de filtros do tipo FIR (*finite impulse response* – resposta ao impulso finita) (1), por possuir fase linear e pela sua estabilidade inerente (Haykin, 2002). Sendo  $f[k]$  a sequência de resposta ao impulso do filtro de desconvolução, e  $y[n]$  o sinal medido no TileCal (sujeito ao empilhamento), deseja-se na saída do filtro (Eq. (1)) obter uma aproximação  $g[n]$  dos sinais  $x[n]$  que idealmente representam a sensibilização dos elementos do detector. Um diagrama ilustrativo do método proposto é mostrado na Figura 9.

$$g[n] = \sum_{k=0}^N y[n-k] * f[k] \quad (1)$$

Para a remoção da distorção nos sinais medidos foi utilizado um filtro ótimo de mínimos quadrados, conforme definido em (Kay, 1993). Neste caso, o vetor de pesos do filtro  $\mathbf{f} = [f[1], f[2], \dots, f[N]]$  pode ser calculado a partir de:

$$\mathbf{f} = (\mathbf{y}' \mathbf{y})^{-1} \mathbf{y}' \mathbf{x} \quad (2)$$

sendo  $\mathbf{y}$  um conjunto de amostras do sinal medido e  $\mathbf{x}$  um conjunto de valores verdadeiros da energia. Neste trabalho as amostras dos vetores  $\mathbf{y}$  e  $\mathbf{x}$  foram obtidas a partir de um simulador que considera as características físicas do sistema de instrumentação do detector.

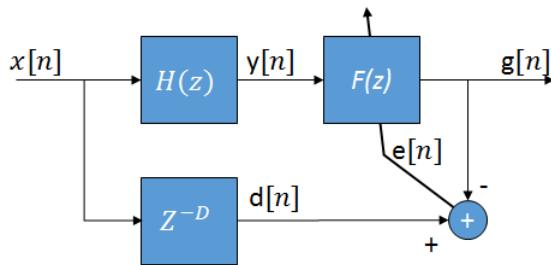


Figura 9. Esquema iterativo para estimativa do filtro de desconvolução (a iteração para cálculo dos coeficientes do filtro foi realizada em modo off-line, com dados simulados, na operação em FOGA o filtro não irá funcionar de modo adaptativo).

Para a implementação do novo sistema de processamento da informação, a colaboração do TileCal propôs a utilização de uma estrutura modular com FPGAs (Field Programmable Gate Arrays), que são dispositivos lógicos programáveis capazes de gerar circuitos lógicos extensos através programação por

HDLs (*hardware description languages* – linguagens de descrição de hardware).

Para as primeiras fases da atualização do ATLAS, espera-se que cada módulo de processamento deste novo sistema receba sinais de 48 PMTs divididos em 4 conexões seriais (12 PMTs por conexão). Os dados de cada PMT são demultiplexados e enviados, em paralelo, para o seu filtro FIR respectivo, (sendo, 48 filtros distintos operando em cada módulo de processamento). Testes foram feitos em simuladores, e comparados com resultados obtidos através de implementação semelhante no MATLAB®.

### 4 Resultados

Neste trabalho foram utilizados dados simulados que consideram a possível sensibilização de um sensor a cada colisão do LHC e também uma estimativa disponível na colaboração do TileCal para a resposta ao impulso típica de um canal de medição (mostrada anteriormente na Figura 5). Com o simulador foram geradas 100.000 amostras de ambos  $x[n]$  e  $y[n]$ , das quais 50 % foram utilizadas para o cálculo dos coeficientes do filtro e os outros 50 % para verificar o desempenho da atenuação do efeito da sobreposição dos eventos.

Nesta análise foi utilizado um filtro FIR de ordem 10. É mostrado na Figura 10 o resultado obtido com o filtro projetado. Percebe-se que o sinal recuperado (após a filtragem), se aproxima bastante do sinal de energia real. O efeito da remoção da sobreposição dos eventos pode ser melhor observado se a Figura 6 for utilizada como comparação aos resultados da Figura 10. Neste trabalho não foi abordada a questão da otimização da estrutura (número de coeficientes) do filtro utilizado, esse aspecto será tratado em trabalhos futuros.

Mostra-se na Figura 11 um gráfico de dispersão entre os valores estimados (após a desconvolução) e real (alvo) da energia amostrada no sensor. Observa-se que os pontos tendem para a primeira bisetriz, indicando a eficiência do método proposto. Adicionalmente, pode-se observar o histograma do erro de estimativa obtido com o filtro proposto na Figura 12. A maior concentração dos valores está em torno de zero.

Considerando a implementação em FPGA do sistema proposto, optou-se pela realização dos filtros FIR na forma transposta, com a possibilidade de carregar os coeficientes do filtro externamente sem mudança no código embarcado (Meyer-Baese, 2004). Os coeficientes dos filtros foram carregados com resolução ajustável (a resolução da implementação ainda será alvo de estudos futuros). Para realizar o desenvolvimento do código em HDL, optou-se, sempre que possível, por utilizar ferramentas proprietárias do fabricante do hardware utilizado. Pois isso, em geral produz circuitos otimizados tanto em ocupação do dispositivo, como em tempo de execução.

O código HDL desenvolvido para o módulo de processamento recebe 4 conexões seriais, cada uma carregando as informações multiplexadas por divisão no tempo de 12 PMTs (totalizando 48 PMTs por módulo de processamento). Os sinais de entrada são demultiplexados e enviados para seus filtros respectivos. Por fim, os resultados são organizados na mesma ordem de chegada da entrada, e multiplexados em um único barramento de saída por conjunto. Pode-se ver na Figura 13 o diagrama de blocos de um dos 4 sub-módulos do projeto (cada sub-módulo é responsável por processar os sinais de 12 sensores).

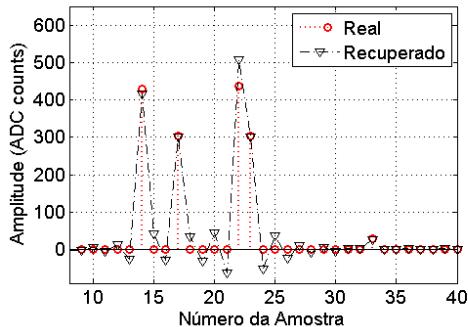


Figura 10. Amostras de energia medida pelo TileCal após redução do efeito do empilhamento (recuperado) em comparação com os valores alvo (reais).

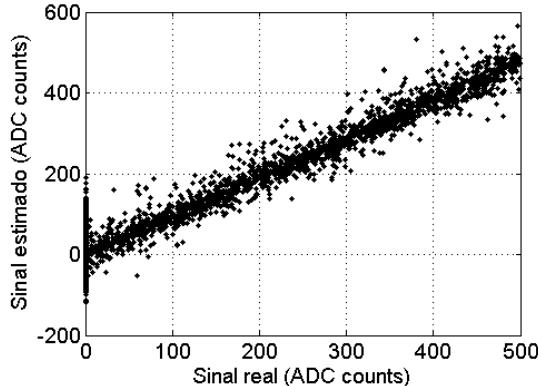


Figura 11. Gráfico de dispersão dos valores estimados e real da energia utilizando o filtro proposto.

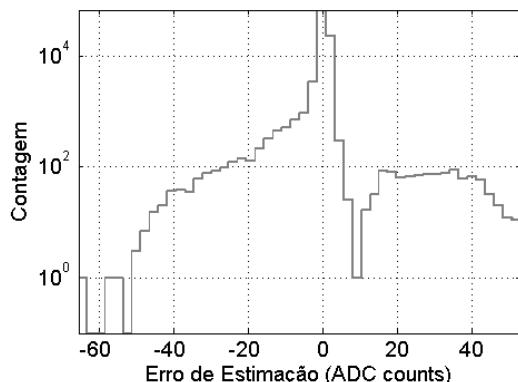


Figura 12. Histograma do erro de reconstituição obtido com o filtro proposto

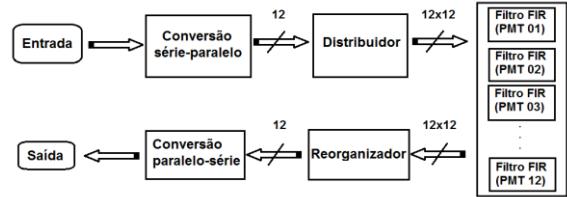


Figura 13. Diagrama de blocos de um dos 4 módulos da solução proposta

Os testes computacionais foram feitos no simulador embutido do software ISE, o ISim. Está demonstrada nas Figuras 14 e 15 a exatidão da solução implementada no FPGA, comparando os resultados simulados com os cálculos equivalentes feitos em MATLAB®. Para os resultados da Figura 14, foram utilizados coeficientes do filtro quantizados em 8 bits, e para a Figura 15 a quantização dos coeficientes foi realizada com 16 bits.

A quantização dos coeficientes em 16 bits demonstrou, em média, melhores resultados do que a de 8 bits. Porém uma desvantagem no aumento da resolução é o consequente aumento da utilização do dispositivo.

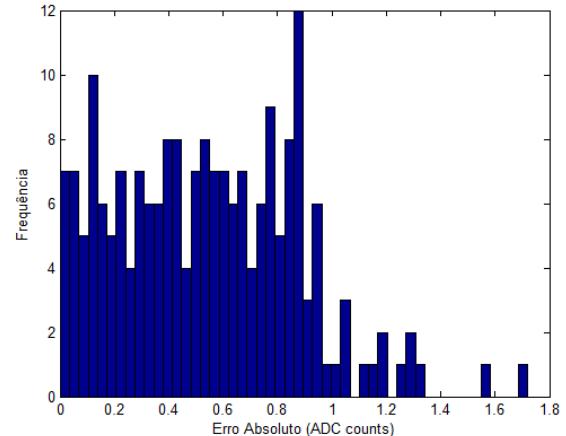


Figura 14. Histograma do erro absoluto (em ADC counts), com coeficientes quantizados em 8 bits

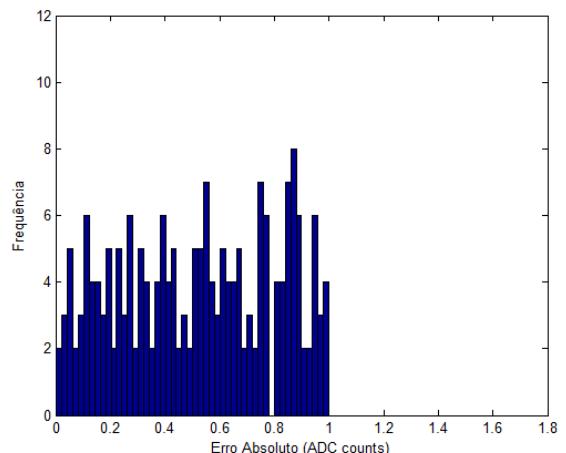


Figura 15. Histograma do erro absoluto (em ADC counts), com coeficientes quantizados em 16 bits

Além da quantização dos coeficientes, outro ajuste possível no sistema que alteraria a utilização do dispositivo é a ordem dos filtros FIR utilizados. Conforme mencionado anteriormente, os resultados mostrados neste trabalho consideram um filtro de 10 coeficientes, porém, um estudo a respeito da melhor ordem do filtro (no que diz respeito a um compromisso entre o erro de reconstituição e a utilização de recursos computacionais) ainda está em desenvolvimento e será tema de trabalhos futuros.

Com o sistema em resolução de 16 bits para os coeficientes do filtro, fez-se uma avaliação da utilização de recursos do FPGA para diferentes ordens de filtro. A partir das análises preliminares para o projeto do filtro, não espera-se que a ordem seja maior que 20, sendo este o limite máximo estabelecido. Nesta análise foi considerada a implementação de 48 filtros em paralelo (correspondentes a 4 módulos de 12 filtros).

Pode-se ver nas Figuras 16 e 17 a utilização de recursos para dois modelos de FPGA sugeridos pelo grupo de trabalho do TileCal/ATLAS, um Virtex 7 (XC7VX485T) e um Kintex 7 (XC7K480T). Considerou-se o uso de circuitos especializados em operações aritméticas (denominados DSP48E1) e de blocos de lógica configurável (denominados *Slice Registers*). Pode-se observar que para ambos os modelos testados o uso de recursos de DSP ficou abaixo de 50 %. Para os blocos de lógica configurável (que indicam a ocupação global do dispositivo), os valores ficaram sempre abaixo de 7 %.

## 5 Conclusão

Com o aumento da luminosidade do LHC, fez-se necessário o desenvolvimento de um novo sistema embarcado para a filtragem dos sinais provenientes dos sensores do calorímetro hadrônico (TileCal) do ATLAS. Cada módulo da solução proposta é composto por 48 filtros FIR em paralelo embarcados em um FPGA. Os resultados das simulações se mostraram satisfatórios considerando aspectos como a adequada remoção da sobreposição de eventos e a utilização de recursos do dispositivo digital. Os estudos de utilização do FPGA mostram que ainda é possível aumentar o nível de quantização dos coeficientes mesmo no caso mais extremo (com 48 filtros de ordem 20). E sobraria recursos também para implementar funções adicionais, caso se façam necessárias.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESB, ao CNPq, à RENAFAE, à FAPERJ, à FAPEMIG e à Vale SA pelo apoio financeiro. Somos gratos também aos membros da colaboração ATLAS por suas valiosas contribuições ao desenvolvimento deste trabalho.

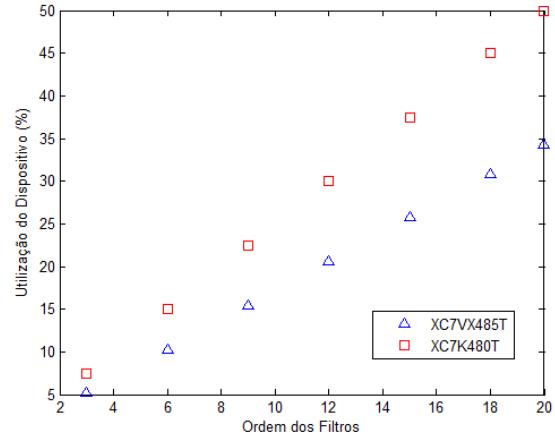


Figura 16. Utilização de DSP48E1 dos FPGAs Virtex 7 (triângulo) e Kintex 7 (quadrado)

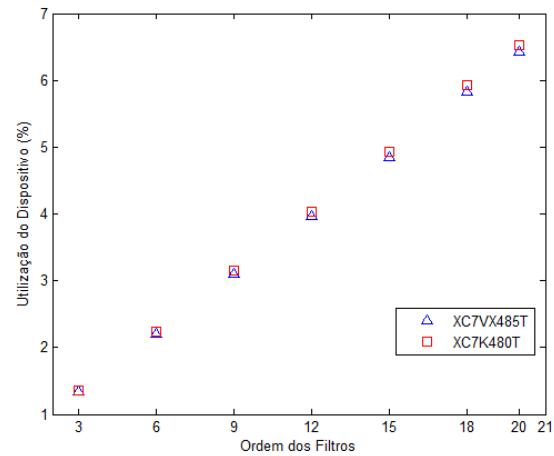


Figura 17. Utilização de *Slice Registers* dos FPGAs Virtex 7 (triângulo) e Kintex 7 (quadrado).

## Referências Bibliográficas

- ATLAS Collaboration. (2008). The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. *Journal of Instrumentation*. [Online] p1-18. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/3/08/S08003> [Acesso em: 08 de março de 2014].
- ATLAS Collaboration (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters. B (Print)*, v. 716, p. 1-29.
- Allport, P. (2010). *The ATLAS Experiment High Luminosity Upgrade*. [Online] Disponível em: <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/UPGRADE/> [Acesso em: 08 de março de 2014].
- Evans, L. Bryant, P. (2008). The LHC Machine. *Journal of Instrumentation*. [Online] p.1-2. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/3/08/S08001> [Acesso em: 07 de março de 2014].

- Fernow, R. C. (1986). *Introduction to Experimental Particle Physics*. Cambridge University Press, Reino Unido.
- Gabaldon, C. (2012). *Performance of the ATLAS Trigger System*. [Online] Disponível em: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/7/01/C0109> [Acesso em: 10 de março de 2014]
- Haykin, S. (2002). *Signals and Systems*. 2nd ed. Wiley, Estados Unidos.
- Hergert, E. (2006). *Detectors*. [Online] Disponível em: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25535> [Acesso em: 10 de março de 2014]
- Kay, S. E. (1993) *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Estimation Theory*, Prentice Hall.
- Meyer-Baese, U. (2004). *Digital Signal Processing With Field Programmable Gate Arrays*. 2nd ed. Springer, Alemanha.
- Simas Filho, E. F. (2010) Analise Não-Linear de Componentes Independentes para uma Filtragem Online Baseada em Calorimetria de Alta Energia e com Fina Segmentação, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ.
- TileCal Collaboration (2013) The optical instrumentation of the ATLAS Tile Calorimeter, Journal of Instrumentation, 8 P01005, p. 1-22. doi:10.1088/1748-0221/8/01/P01005.
- Wigmans, R. (2000). *Calorimetry: Energy Measurement in Particle Physics*. Clarendon Press, Reino Unido.