

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## ESTIMAÇÃO DE ENERGIA PARA O CALORÍMETRO DE TELHAS DO ATLAS BASEADA NA FILTRAGEM DE WIENER-HOPF

**Guilherme I. Gonçalves<sup>1</sup>** - ggoncalves@iprj.uerj.br

**Bernardo S. Peralva<sup>1</sup>** - bernardo@iprj.uerj.br

**Luciano M. A. Filho<sup>2</sup>** - luciano.andrade@ufjf.edu.br

**Augusto S. Cerqueira<sup>2</sup>** - augusto.santiago@ufjf.edu.br

**José M. Seixas<sup>3</sup>** - seixas@lps.ufrj.br

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico - Nova Friburgo, RJ, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Poli/COPPE - Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**Resumo.** Nos sistemas de calorimetria de altas energias, quando se opera em condições de alta luminosidade, há empilhamento de sinais. Desta forma, um modelo determinístico do sinal, tipicamente adotado para a estimativa da energia, torna-se inviável para níveis intensos de sobreposição. Este trabalho propõe um método de estimativa de energia para o calorímetro de telhas do experimento ATLAS no LHC, baseado na teoria do Filtro de Wiener-Hopf, onde um modelo para a representação dos dados não é necessário. Conjuntos de dados de simulação foram utilizados para projetar e avaliar a eficiência do método em condições de alta luminosidade. Os resultados mostram que a eficiência da abordagem baseada no Filtro de Wiener-Hopf proposta neste trabalho supera o método atualmente utilizado para estimativa da energia no calorimetria de telhas do ATLAS em condições severas de empilhamento de sinais.

**Palavras-Chave:** Reconstrução de sinal, Filtros de Wiener-Hopf, Filtragem ótima, Calorimetria de altas energias

### 1. INTRODUÇÃO

Motivada pelo objetivo de explicar fenômenos da natureza previstos por modelos teóricos, ou mesmo explorar comportamentos desconhecidos, a comunidade científica não poupa esforços para construir experimentos cada vez mais inovadores e complexos. Na área da física de altas energias, por exemplo, alguns dos equipamentos utilizados para estudar o comportamento de partículas elementares são os aceleradores de partículas (Edwards, 1992). Nesses equipamentos, feixes de partículas são acelerados próximos à velocidade da luz em sentidos opostos para serem colididos. Experimentos são construídos em torno do ponto de colisão de modo a farem a leitura dos subprodutos das colisões. Atualmente, o LHC (do inglês, *Large Hadron Collider*) (Evans & Bryant, 2008) é o maior e mais energético acelerador de partículas do mundo,

e se encontra em operação no CERN, em Genebra, colidindo feixes de prótons numa taxa de 40 MHz em um túnel circular de 27 km de perímetro e 100 metros abaixo da superfície terrestre. Uma das contribuições mais importantes do LHC foi a observação de uma partícula compatível com o Bóson de Higgs (ATLAS, 2012), partícula prevista pelo Modelo Padrão de Partículas e Campos (Cottingham & Greenwood, 1998) mas não observada anteriormente.

Visando ampliar o seu espectro de descobertas, o LHC está, gradualmente, aumentando a sua luminosidade, que é proporcional à densidade dos feixes de prótons injetados no acelerador (Ruggiero, 2004). Ou seja, mais interações entre partículas ocorrerão a cada colisão, produzindo mais subprodutos provenientes das colisões. Atualmente, o LHC atingiu o número médio de 60 interações por colisão e em, 2023, este número aumentará para 200. Entretanto, o aumento da luminosidade introduz desafios enormes aos sistemas de leitura dos experimentos.

Dentre os principais experimentos projetados para medir os subprodutos das colisões, encontra-se o ATLAS (do inglês, *A Toroidal LHC Apparatus*) (ATLAS, 2008), que depende fortemente de seu sistema de calorimetria (responsável por absorver e medir a energia das partículas produzidas nas colisões (Wigmans, 2000)). Neste contexto, este trabalho aborda o problema de estimação da energia de partículas no calorímetro de telhas (TileCal) (ATLAS, 2010) do ATLAS em condição de alta luminosidade, que é prevista para os próximos anos de operação do LHC. Os canais de leitura do TileCal sofrem com o efeito de empilhamento de sinais, especialmente os canais próximos ao ponto de colisão, devido a uma maior exposição. O efeito de empilhamento de sinais surge porque a resposta do calorímetro é mais lenta que o intervalo entre colisões.

Devido à alta taxa de eventos e considerando o aumento da luminosidade, o LHC opera atualmente em trens de colisões. Neste esquema de operação, um número definido de colisões ocorre a cada 25 ns, intercalando com um período sem colisões. Este fenômeno gera uma distribuição de ruído de empilhamento de sinais diferente para cada colisão, dependendo da sua posição no trem de colisões. Tal característica degrada显著mente a eficiência do método atualmente empregado para estimativa da energia no TileCal, principalmente nas células de maior ocupância, as quais possuem uma incidência maior de partículas (mais próximas ao feixe).

Atualmente, os métodos utilizados para estimar a energia dos canais de leitura do TileCal assumem um modelo de sinal determinístico imerso em ruído aditivo Gaussiano (Fullana et al., 2006). Tal suposição é válida em condições de baixa luminosidade, mas a eficiência do método é degradada consideravelmente em condições de empilhamento de sinais. Entretanto, quando o nível de empilhamento de sinais se torna muito severo, a utilização de um modelo simples torna-se inviável, uma vez que uma quantidade de sinais dentro e fora da janela de aquisição contribui na formação do sinal recebido, e uma quantidade enorme de parâmetros precisaria ser levada em conta no novo modelo em questão. Desta forma, este trabalho propõe um método de estimativa baseado em dados de simulação para a determinação do modelo de sinal em condições de alto nível de empilhamento de sinais. Tal estratégia é baseada no Filtro de Wiener-Hopf (Haykin, 2013), onde os coeficientes do filtro são computados considerando a correlação entre as amostras temporais dos sinais de entrada e a correlação entre a entrada e saída desejada, ambas informações obtidas diretamente dos dados de simulação. Além disso, como o padrão de empilhamento é diferente e dependente da posição da colisão no trem de colisões, um filtro é projetado para cada posição.

Uma vez que o Filtro de Wiener-Hopf supõe a utilização de ruído aditivo com média zero, uma adaptação é feita através da introdução de um coeficiente adicional, que tem a função de absorver o valor médio do ruído não estacionário na saída do estimador. Isto se fez necessário,

pois o ruído de empilhamento de sinais apresenta um valor médio positivo para pulsos unipolares como os do TileCal.

Na próxima seção, o TileCal será brevemente apresentado assim como o problema de empilhamento de sinais enfrentado pelo sistema de calorimetria do ATLAS. Na Seção 3, o método proposto é descrito, destacando suas vantagens. Os resultados, onde diferentes condições de empilhamento foram simuladas, são apresentados na Seção 4. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 5.

## 2. O CALORÍMETRO DE TELHAS DO ATLAS

O TileCal é o principal calorímetro hadrônico do ATLAS. Este sistema possui aproximadamente 10.000 canais de leitura que fornecem medidas precisas da energia das partículas que com ele interagem. As partículas produzidas nas colisões atravessam o TileCal e interagem com seu material pesado, depositando suas energias que são amostradas por telhas cintilantes intercaladas com o material pesado. A luz produzida pelas telhas são transmitidas por fibras ópticas até células fotomultiplicadoras (PMT, do inglês *Photo Multiplier Tube*), que convertem o sinal luminoso em sinal elétrico. A Figura 1 ilustra o princípio de detecção do TileCal.

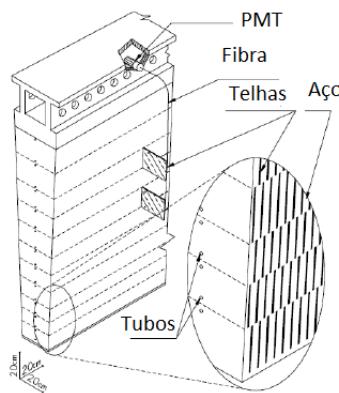


Figura 1- Princípio de absorção de energia e coleta do sinal no TileCal.

O pulso analógico na saída da PMT é conformado de modo que sua amplitude seja proporcional à energia depositada pela partícula. Desta forma, a energia depositada pela partícula em um dado canal de leitura pode ser recuperada através da estimativa da amplitude do sinal adquirido de cada canal. Em seguida, o sinal é amostrado numa taxa de 40 MHz e uma janela de 150 ns representa todo o pulso (Anderson et al., 1998). Por fim, as amostras digitais são transmitidas para os chamados *Read-Out-Drivers*, onde o processamento digital é realizado.

### 2.1. Estimação da energia no TileCal

O algoritmo atualmente utilizado pelo TileCal para estimação da energia é o Filtro Ótimo (OF, do inglês *Optimal Filter*) (Fullana et al., 2006). O método OF estima a amplitude do pulso digitalizado através da soma ponderada entre as amostras temporais recebidas  $s[k]$  de uma dada janela de leitura

$$\hat{A}_{OF} = \sum_{k=1}^N c[k]s[k], \quad (1)$$

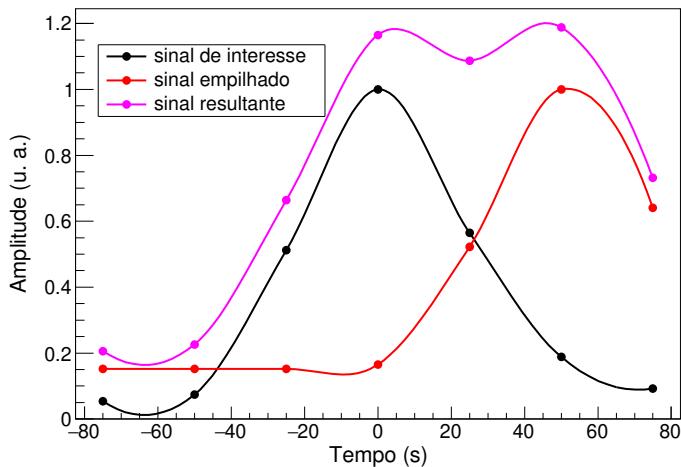


Figura 2- Ilustração do efeito de empilhamento de sinais observado numa janela de leitura do TileCal. O sinal de interesse tem seu pico no instante 0 ns e um sinal adicional fora de fase é sobreposto, distorcendo o sinal resultante (pulso com dois picos).

em que  $c[k]$  representam os coeficientes do método OF, e  $N$  é o número de amostras disponíveis. Tais coeficientes são obtidos a partir da forma do pulso e a matriz de covariância do ruído eletrônico. O procedimento de otimização visa minimizar a contribuição do ruído na estimativa da amplitude utilizando os multiplicadores de Lagrange (Bertuccio & Gatti, 1992). Vale ressaltar que, atualmente, a matriz de covariância do ruído é substituída pela matriz identidade, representando somente o ruído eletrônico, que é descrito por uma função gaussiana multivariada com amostras descorrelacionadas.

Porém, devido à operação em alta luminosidade do LHC e resposta lenta do TileCal, sinais provenientes de colisões adjacentes podem ser observados dentro de uma mesma janela de leitura do TileCal, caracterizando o efeito de empilhamento de sinais (ver Figura 2). Além disso, o LHC introduz outro desafio para o processamento digital de sinais. A operação em alta luminosidade do LHC gera um aumento da atividade dos sistemas do ATLAS. Visando controlar o volume de informação disponível em um dado intervalo de tempo, as colisões no ATLAS ocorrem de acordo com os chamados trens de colisões. Ou seja, durante um determinado tempo (400 ns, por exemplo), o LHC opera com colisões a cada 25 ns, conforme projetado. Passado o período de colisões, segue-se um outro período de tempo (100 ns, por exemplo) em que os feixes não se colidem. Desta forma, tal “tempo de repouso” permite que os sistemas do experimento, como o TileCal, descarreguem as informações que acumularam durante um dado trem de colisões.

Desta forma, o modelo para o empilhamento de sinais torna-se complicado à medida que o LHC aumenta sua luminosidade. Além disso, tal modelo deve ser adaptado com a posição da colisão no trem de colisões, de modo que uma abordagem mais correta seria o projeto de um filtro para cada índice (posição) no trem de colisões. Estes fatores fazem com que seja difícil a obtenção de tais modelos para o projeto dos filtros OF. Entretanto, através da simulação da resposta do calorímetro, é possível obter as diversas configurações de empilhamento de sinais em cada índice no trem de colisões. Embora a modelagem para cada posição seja difícil, a informação necessária se encontra nos dados simulados e, portanto, estes podem ser utilizados para o projeto de estimadores baseados nos dados e no valor alvo desejado (conhecido a

partir da simulação).

### 3. MÉTODO PROPOSTO

O método proposto é baseado na teoria do Filtro de Wiener-Hopf. O problema de filtragem ótima consiste em projetar um filtro linear digital  $w[1], w[2], \dots, w[N]$  em que a saída  $y[n]$  fornece uma estimativa da resposta desejada  $d[n]$ , dado um sinal de entrada com  $N$  elementos  $x[1], x[2], x[3], \dots, x[N]$ , em que

$$y[n] = \sum_{k=1}^N w[k]x[n-k], \quad (2)$$

tal que o erro  $e[n] = d[n] - y[n]$  (diferença entre o valor desejado e o valor estimado) seja minimizado. Tipicamente, o procedimento de otimização visa minimizar o valor esperado do quadrado do erro

$$J = E\{e[n]^2\}, \quad (3)$$

em que  $E\{\cdot\}$  representa o operador esperança.

Para que  $J$  seja minimizado, é necessário que sua derivada em função dos coeficientes  $w[k]$  seja calculada e igualada a zero. Tal manipulação matemática é conhecida como princípio da ortogonalidade (Haykin, 2013), resultando na seguinte equação matricial

$$\mathbf{w}\mathbf{R} = \mathbf{p}, \quad (4)$$

em que  $\mathbf{w}$  corresponde ao vetor de coeficientes ótimos (filtro de Wiener-Hopf). Os parâmetros  $\mathbf{R}$  e  $\mathbf{p}$  representam a matriz de autocorrelação das amostras temporais dos sinais de entrada, e a matriz de correlação cruzada (unidimensional) entre as amostras temporais dos sinais de entrada e os valores desejados, respectivamente. Pode-se reescrever este resultado como

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p}. \quad (5)$$

Tais parâmetros podem ser estimados diretamente dos dados, usando uma série de estimadores de estatística de segunda ordem encontrados em abundância na literatura (Kay, 1993). Por simplicidade, neste trabalho serão usados estimadores não-bayesianos da forma como apresentados nas equações

$$R[i, k] = E\{\mathbf{x}[n-k]\mathbf{x}[n-i]\} \quad (6)$$

e

$$p[k] = E\{\mathbf{x}[n-k]\mathbf{d}[k]\}. \quad (7)$$

Porém, é esperado que estimadores de estatística de segunda ordem mais resilientes a *outliers* (Rousseeuw & Driessen, 1999) apresentem resultados ainda mais eficientes.

Vale ressaltar que o filtro de Wiener-Hopf resulta no filtro ótimo no sentido da minimização do erro quadrático (dispersão do erro), em que o ruído possui média zero. Entretanto, o ruído de empilhamento de sinais unipolares, como é o caso do TileCal, produz um ruído resultante de média diferente de zero, o qual introduz uma tendência na medida final da energia. Para

contornar o problema da média do ruído, este trabalho propõe a inclusão de um coeficiente adicional de valor constante igual a 1 (um), como último elemento em cada sinal de entrada no processo de otimização do filtro de Wiener-Hopf. Desta forma, o sinal de entrada no processo de otimização possui  $N + 1$  elementos e, consequentemente, o vetor de coeficientes também é acrescido de um elemento. O objetivo da inclusão do elemento adicional é absorver o valor médio do ruído e compensar tal contribuição (tendência) na medida da amplitude do sinal recebido. Como resultado, a estimativa da amplitude  $\hat{A}_{FW}$  do filtro de Wiener-Hopf proposto é dada pela soma dos produtos das amostras temporais do sinal de entrada  $\mathbf{x}$  e os  $N$  primeiros coeficientes de  $\mathbf{w}$ . Ao fim da operação, o coeficiente  $w[N + 1]$  é somado ao resultado, compensando o valor médio do ruído conforme mostrado na Equação (8).

$$\hat{A}_{FW} = \left[ \sum_{i=1}^N w[i]x[i] \right] + w[N + 1] \quad (8)$$

## 4. RESULTADOS

Inicialmente o conjunto de dados utilizado é descrito. Em seguida, os resultados de eficiência são apresentados e discutidos. Três métodos são confrontados: o método atualmente utilizado pelo TileCal (OF) em que um único conjunto de coeficientes é utilizado para todos os índices no trem de colisões, o método proposto baseado no Filtro de Wiener-Hopf, projetado para cada índice no trem de colisões (Filtro de Wiener-Hopf Otimizado), e uma versão generalizada do filtro de Wiener-Hopf (Filtro de Wiener-Hopf Generalizado), em que um único conjunto de coeficientes é projetado para todas os índices no trem de colisões.

### 4.1. Conjunto de dados

Um conjunto de dados de simulação produzido pela colaboração ATLAS (Chapman, 2011) foi utilizado para o teste de eficiência. Neste conjunto, o LHC opera com o trem de colisão de 450 ns e um tempo de repouso de 100 ns. Ou seja, 18 colisões são realizadas sucessivamente (primeiro trem de colisões), seguidas de 4 cruzamentos de feixes sem colisões (tempo de repouso), seguidos novamente por 18 colisões (segundo trem de colisões). Desta forma, é possível avaliar a eficiência em diferentes situações, no início, fim e dentro do trem de colisões.

No que tange o nível de luminosidade, o conjunto de dados apresenta uma média de 200 interações de partículas por colisão. Este número é considerado alto e o LHC alcançará tal cenário em 2023. Também foi considerado um canal de leitura com maior incidência de partículas, caracterizando um cenário adverso de alto empilhamento de sinais. Este conjunto de dados representa o ruído presente no TileCal, composto pelo empilhamento de sinais e o ruído eletrônico. As Figuras 3(a) e 3(b) mostram a média dos eventos de ruído, em contagens de ADC (do inglês, *Analog to Digital Converter*), nas janelas de leitura do TileCal no início e fim do trem de colisões, considerando as 7 primeiras colisões e 7 últimas colisões, respectivamente. Pode ser observado como o efeito do empilhamento de sinais se comporta para diferentes índices no trem de colisões. Cada índice no trem de colisões possui aproximadamente 30.000 sinais.

Este conjunto de dados foi dividido em dois subconjuntos, metade representando o conjunto de desenvolvimento e a outra metade, o conjunto de teste. O conjunto de desenvolvimento visa projetar os filtros digitais, enquanto o conjunto de teste é utilizado para o teste de eficiência dos filtros projetados. Para o método proposto, foi adicionado um sinal de interesse de amplitude

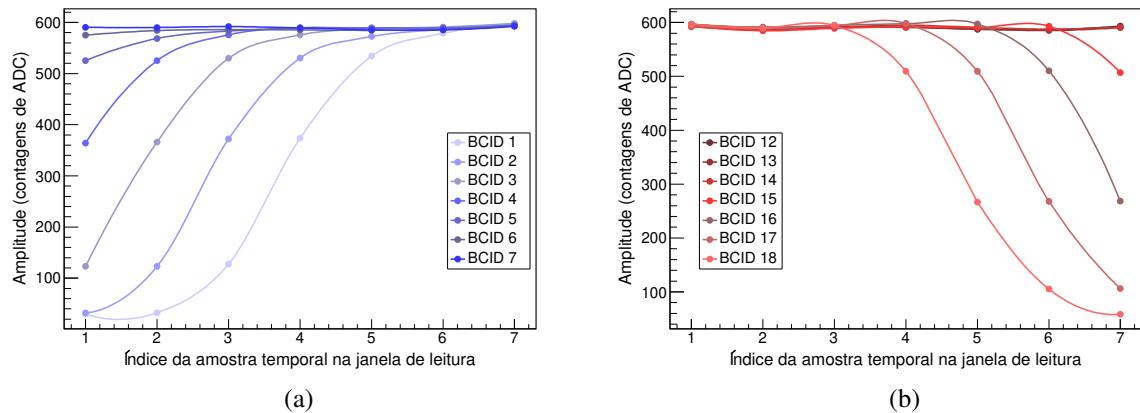


Figura 3- Ruído médio (em contagens de ADC) presente nas 7 primeiras janelas de aquisição do primeiro trem de colisões (a) e nas 7 últimas janelas de aquisição do primeiro trem de colisões (b).

aleatória conhecida e distribuída uniformemente. Tal sinal de interesse possui as características reais de operação do TileCal, tal como desvio de fase seguindo uma distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão igual a 3 ns e deformação do pulso de 1%.

#### 4.2. Análise de eficiência

Para a análise de eficiência, dois parâmetros foram considerados: a dispersão e o valor médio do erro de estimativa. O erro de estimativa é calculado pela diferença entre o valor desejado (conhecido da simulação) e o valor estimado. Estes dois parâmetros, dispersão e média do erro, caracterizam a resolução e a tendência associada aos métodos, respectivamente. Ou seja, quanto menor a dispersão (medida pelo desvio padrão da distribuição de erro) e a média do erro, mais eficiente é o estimador.

A fim de demonstrar o comportamento do histograma do erro associado a cada método, a Figura 4 mostra o erro de estimativa, em GeV (Giga elétron-Volt), referente ao segundo índice do primeiro trem de colisões. Vale ressaltar que os resultados são mostrados em termos de contagens de ADC, convertidos para a escala em energia, em que 1 contagem de ADC é equivalente a 12 MeV (Mega elétron-Volt).

A Tabela 1 mostra os valores referentes à média e ao desvio padrão. Uma vez que apresenta a menor média (tendência) e menor desvio padrão (dispersão), a eficiência do método proposto (Filtro de Wiener-Hopf) para a estimativa de energia supera o método atual utilizado pelo TileCal.

Tabela 1- Parâmetros associados aos histogramas do erro de estimação.

	OF atual	Wiener-Hopf Otimizado	Wiener-Hopf Generalizado
Média (GeV)	3,41	-0,04	0,42
Desvio Padrão (GeV)	2,12	1,38	1,47

A fim de caracterizar a eficiência para todos os índices dos dois trens de colisões, a Figura 5 mostra a média e desvio padrão dos métodos considerados. Novamente, o método baseado no

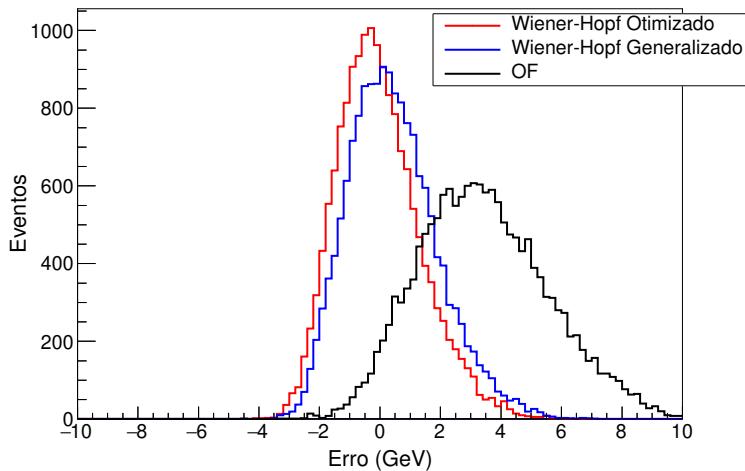


Figura 4- Histograma do erro de estimação associado a cada método.

Filtro de Wiener-Hopf apresenta a melhor eficiência, demonstrando ser uma opção ao TileCal para enfrentar o cenário de alta luminosidade proposto pelo LHC.

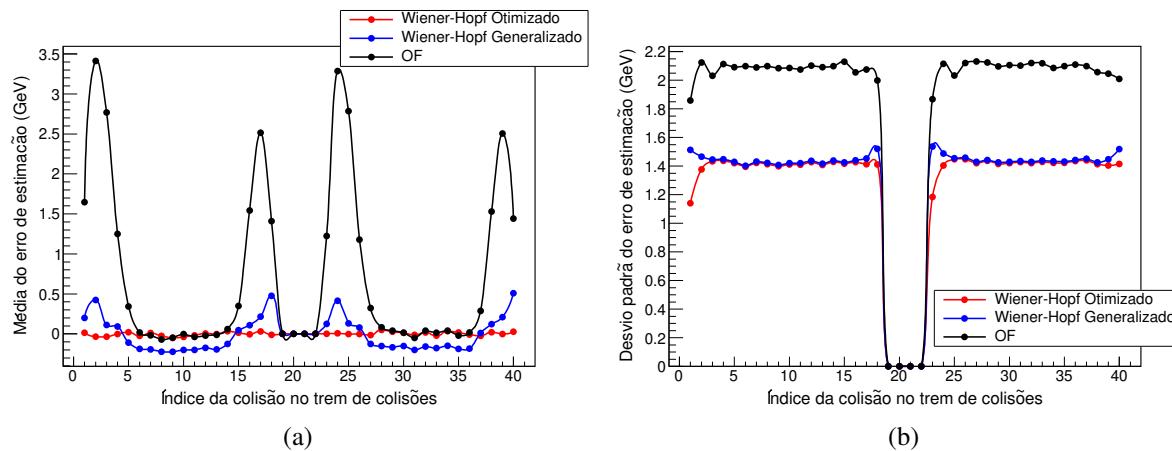


Figura 5- Média (a) e desvio padrão (b) do erro de estimação para todas as posições (índice) de colisões em trens de colisões.

A baixa eficiência do método OF pode ser explicada pelo fato do ruído no início e fim dos trens de colisões possuir um ruído de empilhamento de sinais com médias diferentes para cada amostra temporal (ver Figura 3). Adicionalmente, o método OF assume o sinal de interesse como determinístico e utiliza somente a matriz de covariância do ruído para absorver as incertezas nos dados. Desta forma, a estatística do empilhamento de sinais e as incertezas do sinal de interesse (fase e deformação) não são utilizadas no processo de otimização.

Em favor da legitimidade dos resultados aqui apresentados e do fomento à colaboratividade da pesquisa, este trabalho adere ao conceito de pesquisa reproduzível, onde o leitor pode ter acesso ao material desenvolvido e, com isso, reproduzir os resultados obtidos. Tanto o material quanto as instruções de como utilizá-lo, podem ser acessados pelo link <https://github.com/ingoncalves/enmc-2018>.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método alternativo para estimar a amplitude (energia) dos sinais do Calorímetro de Telhas (TileCal) do experimento ATLAS em condições severas de empilhamento de sinais. O método atualmente empregado (OF, do inglês *Optimal Filter*) no TileCal assume um modelo fixo para o ruído e sua eficiência é degradada, visto que o empilhamento de sinais produz um ruído não gaussiano. O método proposto é baseado no filtro de Wiener-Hopf, e utiliza um conjunto de dados de simulação para calcular os coeficientes que minimizem o erro de estimação. Desta forma, a estatística presente nos dados (ruído mais sinal) é utilizada, independente do modelo de ruído presente. Adicionalmente, o método é adaptado para compensar o valor médio do ruído resultante do empilhamento de sinais unipolares do TileCal, o qual introduz uma tendência na medida final da amplitude. Foram mostradas duas abordagens para o filtro de Wiener-Hopf, considerando os filtros otimizados para cada condição de empilhamento de sinais e também considerando uma versão generalizada, onde um mesmo conjunto de coeficientes é estimado considerando todas as condições de empilhamento. Ambas as propostas baseadas no filtro de Wiener-Hopf apresentaram uma eficiência superior ao método OF atualmente empregado, considerando as condições previstas para a operação em alta luminosidade do LHC (do inglês *Large Hadron Collider*).

O filtro de Wiener-Hopf está atualmente sendo testado no TileCal para operar de modo *offline* no canal de leitura de maior ocupância utilizando dado reais adquiridos durante operação nominal do LHC em 2018. Testes com métodos alternativos para estimar as matrizes de correlação entre as amostras dos sinais de entrada e a correlação cruzada entre os sinais de entrada e os valores desejados estão em andamento.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o CNPq, CAPES, RENAFAE (MCTIC), FAPERJ e FAPEMIG pelo apoio financeiro. Os autores também agradecem a colaboração TileCal e ATLAS.

## REFERÊNCIAS

- Anderson, K. et al. (1998), *Front-end Electronics for the ATLAS Tile Calorimeter*, Proceedings of Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome.
- Bertuccio, G.; Gatti, E. and Sapietro, M. (1992), *Sampling and optimum data processing of detector signals*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, v. 322, pp.271-279.
- Chapman, J. (2011), *ATLAS Simulation Computing Performance and Pile-Up Simulation in ATLAS*, LPCC Detector Simulation Workshop, CERN.
- Cottingham, W. N. and Greenwood, D. A. (1998), *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. Cambridge University Press.
- Edwards, D. A. and Syphers, M. J. (1992), *An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators*, 1 edição, Wiley-VCH.
- Evans, L. and Bryant, P. (2008), *LHC Machine*, JINST 3 S08001.
- Fullana, E. et al. (2006), *Digital Signal Reconstruction in the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter*, IEEE Transactions On Nuclear Science, v.53, n.4.
- Haykin, S. (2013), *Adaptive Filter Theory*, 5 edição, Pearson.
- Kay, S. M. (1993), *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Estimation Theory*, Prentice Hall.
- Rousseeuw, P. and Driessen, K. (1999), *A Fast Algorithm for the Minimum Covariance Determinant Estimator*, Technometrics, vol.4,n.3,pp.212-223.
- Ruggiero, F. (2004), *LHC Accelerator R&D and Upgrade Scenarios*, The European Physical Journal C-Particles and Fields,v.34, pp.433-442.
- The ATLAS Collaboration (2008), *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST 3 S08003.

- The ATLAS Collaboration (2010), *Readiness of the ATLAS Tile Calorimeter for LHC collisions*, EPJC 70, pp.1193-1236.
- The 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, v. 716, pp. 1-29.
- Wigmans, R. (2000), *Calorimetry: Energy Measurements in Particle Physics*. Clarendon Press.

## ENERGY ESTIMATION BASED ON WIENER-HOPF FILTERING FOR THE ATLAS TILE CALORIMETER

**Abstract.** *In high-energy calorimeter systems operating in high-luminosity conditions, the signal pile-up effect is observed. Therefore, the deterministic approximation typically employed for energy estimation becomes unrealistic in severe signal pile-up conditions. This work presents an approach for energy estimation in the ATLAS experiment at LHC, based on the Wiener-Hopf Filter theory where the data modeling is not required. Simulation datasets were used for design and performance evaluation considering severe signal pile-up conditions. The results showed that the proposed approach of the Wiener-Hopf Filter estimator outperforms the current method used for energy estimation in the ATLAS tile calorimeter, with severe pile-up conditions.*

**Keywords:** *Signal reconstruction, Wiener-Hopf filters, Optimal filters, High-energy calorimetry*