

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Graduação em Engenharia Elétrica, Habilitação em Sistemas Eletrônicos

Pedro Esperidião dos Santos Neto

**Testes e Sugestões de Aplicação de Filtros Digitais Lineares Online ao
Detector TileCal do Projeto ATLAS**

Juiz de Fora
2016

Pedro Esperidião dos Santos Neto

**Testes e Sugestões de Aplicação de Filtros Digitais Lineares Online ao
Detector TileCal do Projeto ATLAS**

Orientador: Luciano Manhães de Andrade Filho

Juiz de Fora

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Esperidião, Pedro.

Testes e Sugestões de Aplicação de Filtros Digitais Lineares Online ao
Detector TileCal do Projeto ATLAS / Pedro Esperidião dos Santos Neto.
– 2016.

49 f. : il.

Orientador: Luciano Manhães de Andrade Filho

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia. Graduação em Engenharia Elétrica, Habilitação
em Sistemas Eletrônicos, 2016.

1. Processamento Digital de Sinais. 2. Detecção. 3. Deconvolução. 4.
Filtro Casado. I. Andrade Filho, L. M. II. Testes e Sugestões de Aplicação
de Filtros Digitais Lineares ao Detector TileCal do Projeto ATLAS.

Pedro Esperidião dos Santos Neto

**Testes e Sugestões de Aplicação de Filtros Digitais Lineares Online ao
Detector TileCal do Projeto ATLAS**

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Manhães de Andrade Filho -
Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Leandro Rodrigues Manso Silva
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Bernardo Sotto-Maior Peralva
Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho aos meus pais, Cícero e Yara.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo gostaria de agradecer a meus meus pais, senhores Cícero e Yara. Se hoje me formo engenheiro eletrônico é por motivo de muita dedicação e, por muitas vezes, privações por sua parte. Agradeço a meu pai, por ser o exemplo de que trabalhar com o que gosta é gratificante e que o esforço empregado é recompensado. À minha mãe agradeço por todos os conselhos e dedicação e também por repetidas vezes dizer "Estude, Pedro. Estude, que isso só assim você vai ser alguém." Principalmente, gostaria de agradecer todas as vezes em que foram compreensivos e me deram o suporte que precisei, mesmo que não concordassem. (E não foram poucas!)

A meus irmãos João e Marianna, por todas as vezes que me estimularam a ser melhor, pessoal e profissionalmente. Também por todo o suporte e carinho recebidos. O apoio de vocês não tem preço.

Agradeço também à minha namorada, amiga e colega de profissão, Eduarda. Ela, mais que ninguém, acompanhou de perto todos os altos e baixos ao longo destes anos de Engenharia. Neste tempo estudamos juntos, nos desesperamos com provas e prazos juntos, tivemos conquistas juntos e sonhamos juntos com este momento para ambos. Obrigado por tudo isso e por tudo que aprendi contigo, que mais conquistas venham!

À minha amiga e mãe da minha namorada, Zaneth, que muitas vezes me "adoçou" e abriu as portas de sua casa para que seu genro sempre tão enrolado com tantos compromissos concluisse algum trabalho ou estudo.

A meus colegas de curso, que hoje são colegas de profissão. Especialmente a Eduarda (sim, novamente!), Thales, Verônica, Igor e André, com quem dividi salas de aula, risadas e alguns cabelos perdidos.

A todos os mestres com quem tive a oportunidade de aprender. Principalmente àqueles que dedicaram parte de seu tempo fora das salas de aula para construir uma universidade melhor, mesmo quando sujeitos a contratempos gerados por fatores externos e internos.

Ao meu orientador, Luciano, pela oportunidade oferecida e pelo entusiasmo com que realiza a sua pesquisa.

A Bernardo, que me aconselhou sobre vários pontos durante os testes e sempre tinha uma explicação (e paciência) para cada tópico que eu não entendia sobre a pesquisa e cuja contribuição foi fundamental para a formulação deste trabalho.

Por fim, gostaria de dizer o meu muito obrigado a todos que acreditaram em mim e em minha competência. Sem dúvida, parte do que sou hoje e do que consegui vem da confiança em mim empregada. Ela foi muitas vezes o meu motor, me dedicando justificá-la. E ela veio muitas pessoas além das citadas até aqui.

RESUMO

O detector ATLAS do CERN, Conselho Europeu para Pesquisa Nuclear, é um complexo monumental de subdetectores de partículas para várias formas de interação da matéria. O ATLAS conta com um sistema de transdutores e uma eletrônica de aquisição de dados muito complexa e de alta performance. Nos calorímetros do ATLAS, detectores responsáveis por medir a energia das partículas, estas interações geram pulsos elétricos característicos que precisam ser corretamente interpretados para a busca de sua ocorrência e a reconstrução precisa de sua amplitude. Este trabalho é uma reunião de estudos, suposições, testes e sugestões feitas para a colaboração brasileira do experimento ATLAS. Partimos do questionamento sobre como o aumento da luminosidade (aumento no número de interações por colisão) impactaria a detecção e reconstrução de sinais de referência. Portanto revisamos os dois filtros inicialmente discutidos quando este trabalho foi iniciado; o Filtro Ótimo já empregado no CERN e a sugestão brasileira do Filtro Casado. Face às dificuldades potenciais da alta significativa de luminosidade e, então, ocorrência de sinais não sincronizados, duas novas técnicas de detecção são postas à prova; o Filtro Ótimo Generalizado e a Deconvolução. Matematicamente ambos são os análogos de vários sinais para o Filtro Ótimo e o Filtro Casado, respectivamente. Como será visto, chegou-se à conclusão de que a menos que seja garantida a possibilidade de ocorrência de sinais defasados, a generalização destes filtros penaliza a precisão da reconstrução, embora consigam detectar sinais que antes não eram previstos e até mesmo estimar também suas amplitudes. Diante da dualidade detecção *versus* reconstrução que não havia para luminosidades baixas, é feita uma sugestão de combinação de técnicas para garantir ambos objetivos.

Palavras-chave: Experimento ATLAS. CERN. Detecção. Reconstrução de sinais. Filtro Casado. Deconvolução. Filtro Ótimo. Filtro Ótimo Generalizado. Alta luminosidade.

ABSTRACT

The CERN's ATLAS detector is a monumental complex of subdetectors for several forms of matter interaction which comprises a transconductors system and a very complex and high performance acquisition electronic system. Inside ATLAS' calorimeters, detectors responsible for measuring absorbed energy from travelling particles, those interactions generate characteristic electric impulses that need to be correctly interpreted for the search of occurrence and their precise amplitude reconstruction. This work is a collection of studies, suppositions, tests and suggestions made for the ATLAS Experiment's Brazilian collaboration. We start from questioning the impact brought by the rise in luminosity (number of interactions per collision) on the detection and reconstruction of reference signals. Therefore we review the two filters initially discussed as this work got started; Optimal Filter (already in use at CERN) and the then Brazilian group's suggestion, Matched Filter. Given the potential difficulties imposed by the significant rise in luminosity and, so, the occurrence of not synchronized signals, two other techniques were tested; the Generalized Optimal Filter and the Deconvolution. Mathematically, both are the equivalent to, respectively, Optimal Filter and Matched Filter for many simultaneous signals. As we will see, unless it is certain there may be signals out of sync, those generalized filters penalize reconstruction precision, though they detect signals that were not before and even estimate their amplitudes. In the light of the duality detection vs reconstruction that did not exist for low luminosity, a suggestion about combining techniques for reaching both goals is made.

Keywords: ATLAS Experiment. CERN. Detection. Signal reconstruction. Matched Filter. Deconvolution. Optimal Filter. Generalized Optimal Filter. High luminosity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Forma de onda para o pulso de referência	13
Figura 2 – Localização do CERN	16
Figura 3 – Representação do detector ATLAS.	18
Figura 4 – Camadas do ATLAS e o alcance das partículas em seu interior.	19
Figura 5 – Sistema de calorimetria do ATLAS.	20
Figura 6 – Esboço da estrutura do Calorímetro Eletromagnético e sua segmentação.	21
Figura 7 – Visão tridimensional de um módulo do TileCal, mostrando as telhas dispostas perpendicularmente à direção do feixe.	23
Figura 8 – Divisão do TileCal em barril central e barril estendido.	24
Figura 9 – Divisão do TileCal em barril central e barril estendido.	24
Figura 10 – Forma do Pulso de Referência entregue pelo <i>shaper</i>	25
Figura 11 – Diagrama de blocos da eletrônica de leitura do ATLAS	26
Figura 12 – Pulso de referência digitalizado	28
Figura 13 – Sistema de Trigger do ATLAS	29
Figura 14 – Pulso de Referência Digitalizado.	30
Figura 15 – Expressão para o Filtro Ótimo	32
Figura 16 – Amplitudes para sinais e ruídos para um banco de dados do ATLAS estimadas pelo Filtro Casado	33
Figura 17 – ROC para uma aplicação do Filtro Casado a um banco de dados do ATLAS	33
Figura 18 – Expressão origem do método de deconvolução	34
Figura 19 – Cálculo das amplitudes pelo método da Deconvolução	35
Figura 20 – Projeto dos pesos para \mathbf{W}_0	36
Figura 21 – Cálculo dos pesos para \mathbf{W}_0	37
Figura 22 – Erros médios das estimativas de amplitude pelos filtros testados	38
Figura 23 – Variâncias das respostas	39
Figura 24 – Erro médio das respostas dos filtros sem sinais adiantados	39
Figura 25 – Variância do erro das respostas dos filtros sem sinais adiantados . . .	40
Figura 26 – Matrizes de covariância de ruído para baixa luminosidade	40
Figura 27 – Matrizes de covariância de ruído para alta luminosidade	41
Figura 28 – Matriz de covariância "gaussiana"para baixa luminosidade	41
Figura 29 – Matriz de covariância "gaussiana"para alta luminosidade	41
Figura 30 – Erro médio para baixa luminosidade	42
Figura 31 – Variância para baixa luminosidade	42
Figura 32 – Erro médio para alta luminosidade	43
Figura 33 – Variância para alta luminosidade	43
Figura 34 – Sistema de coordenadas do Projeto ATLAS	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
CERN	Counseil Européen de Recherche Nuclueaire, ou Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear
LHC	Large Hadron Collider, Grande Colisor de H��drons
ATLAS	A Toroidal Lhc ApparatuS
CMS	Compact Muon Solenoid
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
LHCb	Large Hadron Collider beauty
TileCal	Tile Calorimeter
LArg	Liquid Argon Calorimeter
TDAQ	Trigger and Data Acquisition
ROD	Read-Out Buffer
PU	Processing Unit, Unidade de Processamento
DSP	Digital Signal Processor
FPGA	Field Gate Array, tecnologia de semicondutores
HEC	Hadronic End Cap
PMT	Photo Multiplier Tubes
FPGA	Field Programmable Gate Array
OF	Optimal Filter
MF	Matched Filter
ADC	Analog to Digital Converter
DC	Direct Current, ou Corrente Cont��nua
MATLAB	Matrix Laboratory; software utilizado para modelagem matem��tica
CPU	Central Processing Unit, Unidade Central de Processamento
GPS	Global Positioning System, Sistema de Posicionamento Global

LISTA DE SÍMBOLOS

MHz	Mega Hertz, unidade de frequência
Tev	Tera elétron-volt, unidade de energia
ns	Nanosegundo, um bilionésimo de segundo
ns	Microsegundo, um milionésimo de segundo
R	Vetor de amostras do TileCal
N	Vetor de Ruído aditivo às amostras do TileCal
S	Vetor pulso de referência
W	Vetor de pesos do filtro linear aplicado
C	Matriz de covariância de ruído do TileCal
a	Amplitude do sinal de referência capturado
A	Amplitude estimada pelo filtro linear aplicado
λ	Multiplicador de Lagrange
Ped	Pedestal; polarização presente nas PMTs do TileCal
\Re^7	Espaço vetorial real de sete dimensões
δ	Função delta de Dirac discreta
OF_{Id}	Matriz OF Generalizada por identidade
OF_{Cov}	Matriz OF Generalizada por covariância
\forall	Para todo
SNR	Relação sinal/ruído
θ	Ângulo azimutal
ϕ	Ângulo zenital
η	Pseudo-rapidez
γ	Radiação gama
$p - p$	Interações do tipo próton-próton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO	12
1.2	OBJETIVO	14
1.3	METODOLOGIA	14
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	14
2	O LHC e o Detector ATLAS	16
2.1	CERN	16
2.2	LHC	16
3	O PROJETO ATLAS	18
3.1	O DETECTOR DE TRAJETÓRIA	19
3.2	CALORÍMETROS	20
3.2.1	Calorímetro Eletromagnético	21
3.2.2	Calorímetro Hadronico, TileCal	21
3.3	O DETECTOR DE MÚONS	22
4	TILE CALORIMETER, TileCal	23
4.1	A Eletrônica de Leitura	25
4.2	<i>READ-OUT DRIVERS</i>	26
5	PROCESSAMENTO DE SINAIS	27
5.1	O PROCESSAMENTO ONLINE DE SINAIS	27
5.2	O PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	27
5.3	SELEÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS NO ATLAS	28
5.4	PILE-UP	29
6	FILTROS DIGITAIS UTILIZADOS	31
6.1	FILTRO ÓTIMO (OF, OPTIMAL FILTER)	31
6.2	FILTRO CASADO (MATCHED FILTER)	32
6.3	MATRIZ DE DECONVOLUÇÃO (DECONVOLUTION MATRIX)	34
6.4	OF GENERALIZADO OU FILTRO ÓTIMO (GENERALIZED OF)	35
7	TESTES	38
7.1	PRIMEIRO TESTE OF_{Id} vs OF_{Cov} vs $Deconv$	38
7.2	TESTE SEM SINAIS ADIANTADOS	39

7.3	TESTE COM ALTA LUMINOSIDADE PARA UM BANCO DE DADOS DE UM CANAL DO TILECAL	40
8	RESULTADOS	44
8.1	QUANTO À DETECÇÃO DE SINAIS CENTRAIS	44
8.2	QUANTO À DETECÇÃO DE SINAIS DEFASADOS	44
9	SUGESTÃO	45
9.1	Reconstrução em duas etapas	45
9.2	Fatores de correção	46
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXO A – Sistema de Coordenadas do ATLAS	49

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de sensores chegou ao *mainstream*. Um cidadão comum hoje porta um celular dotado de giroscópio, câmeras, termômetros, módulos wi-fi. O meio de transmissão de dados de cada um dos sensores citados ao CPU do aparelho é um canal; a informação é capturada pelo sensor, opcionalmente pré-processada e então transmitida à unidade central. Este é um sistema ainda relativamente simples, mas dificuldades surgem conforme suas dimensões escalam. A situação tem soluções ainda mais difíceis quando é exigida resposta imediata à informação entregue.

Imagine um satélite geoestacionário de um sistema de posicionamento global (GPS). Este satélite deve, ao receber a solicitação de informação de posicionamento de um cliente, processar o sinal recebido para estimar a sua posição e então enviar o resultado de volta ao solicitante. Suponha ainda que este satélite dispõe apenas de uma CPU para várias dezenas de canais. É sabido que esta CPU é incapaz de processar dados para todos os canais dentro do prazo necessário. Também é sabido que pouquíssimos canais são solicitados simultaneamente em uma situação habitual.

Nestas condições o projeto deste satélite deve ser capaz de identificar rapidamente em quais canais há de fato uma solicitação, estabelecer os canais prioritários se for o caso e corrigir ocorrências de interferências intersimbólicas e interferências entre canais que possam ocorrer. Como os canais ativos com informação válida simultaneamente são poucos, um sistema eficiente de identificação de tais canais deve garantir o seu correto funcionamento. Este é apenas um dos vários exemplos possíveis em que o aumento em escala de canais com um prazo curto (ou mesmo instantâneo) de resposta demandam soluções otimizadas sob a ameaça de não atendimento de exigências.

Em casos como o citado acima, em que há processamento *online* (ou seja, a informação é processada conforme é recebida e a resposta deve ser entregue o tão rápido quanto possível) de uma quantidade proibitiva de dados, tem seu sucesso dependente de uma filtragem eficiente de dados. Filtros são técnicas para identificação ou separação de informações de interesse. Um bom filtro deve atender às condições de hardware impostas, como área ocupada reduzida (como no caso dos celulares) ou baixa potência dissipada (como no caso de um satélite), tempo de resposta reduzido (especialmente em sistemas *online*) e, principalmente, alta seletividade (probabilidade de identificação de informações de interesse tendendo a 100 % e de falso alarme tendendo a zero).

1.1 MOTIVAÇÃO

O ambiente de Física de Altas energias é crítico quanto à coleta e processamento de dados. O método padrão de se investigar as interações entre partículas subatômicas e suas interações é colidindo estas partículas após elas serem energizadas (aceleradas por

campos elétrico e/ou magnético). Após a colisão as partículas envolvidas se fragmentam em outras ainda menores, nas conhecidas hoje como partículas fundamentais, e fôtons, gerando jatos de partículas e radiação espalhados ao longo de todo o ângulo sólido.

As flutuações de carga envolvendo a aceleração de partículas, a eletrônica de front-end, a sensibilidade dos sensores receptores e a taxa de eventos são alguns dos fatores que podem afetar diretamente a eficiência e até mesmo a validade de um filtro aplicado ao ambiente.

O TileCal, um dos subdetectores do ATLAS, parte integrante do LHC, contém mais de 10.000 canais e uma taxa de eventos de 40MHz. Com isso, gera um volume descomunal de dados a cada 25ns. Porém, pouquíssimos canais são ocupados com informação válida após cada colisão, já que os jatos não alcançam alta densidade de ocorrência em todo o ângulo sólido. Nesta situação, filtros eficientes que consigam responder dentro do tempo previsto são necessários. Eles devem reduzir drasticamente o volume de dados armazenados frente ao gerado a cada colisão; isto deve ocorrer mediante alta eficiência na separação de ocorrências de interesse dos falsos alarmes. Para este fim o ATLAS conta com um sistema de disparo e aquisição de dados, o TDAQ, *Trigger and Data Acquisition*, que dispõe de três níveis e em cada reduz enormemente a quantidade de eventos classificados como de interesse.

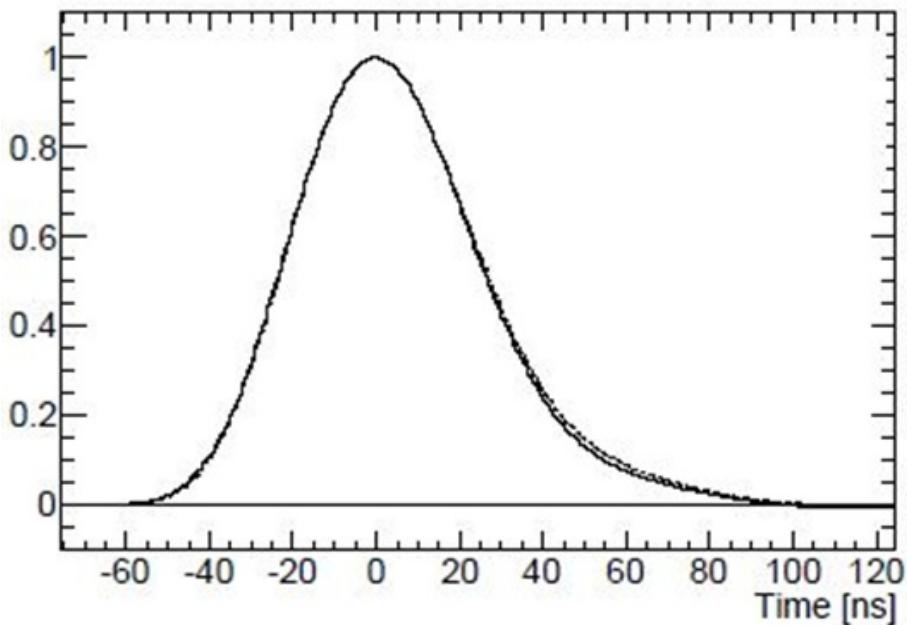


Figura 1 – Forma de onda para o pulso de referência

Resumidamente, o sistema de filtros do TileCal deve buscar por formas de onda iguais à da figura 1 e reconstruir sua amplitude, que será usada para mais testes até que se conclua que houve mesmo a detecção ou se trata de alarme falso. Um problema que pode ocorrer é a sobreposição de dois sinais de mesma forma de onda, porém afastados

temporalmente. Essa situação recebe o nome de pile-up. Esta é uma possibilidade real para o TileCal após o aumento da luminosidade dos feixes acelerados a partir de 2018.

1.2 OBJETIVO

O desenvolvimento deste trabalho é voltado para o sistema de trigger. Seu objetivo é questionar o filtro então aplicado no TileCal para a identificação dos pulsos de referência e reconstrução de amplitude e responder à pergunta: "para o ambiente de altas energias, com SNR degradada, ruído auto correlacionado (ainda que pouco) e ainda com a ocorrência de pile-up devido à alta luminosidade, o filtro aplicado é a melhor alternativa?". No caso de negativa devemos buscar filtros mais adequados, já que há alternativas.

1.3 METODOLOGIA

Quando do início deste trabalho a discussão sobre a escolha do filtro a ser utilizado no TileCal já acontecia e já havia a defesa para a substituição do Filtro Ótimo (OF) pelo Filtro Casado. Este é o ponto de partida deste trabalho. Foram feitas simulações do ambiente do TileCal em MATLAB, usando bancos de runs de calibração do ATLAS como banco de dados. À época o detector trabalhava em situações mais amenas; a SNR era alta e o ruído podia ser considerado gaussiano branco, completamente descorrelacionado.

Entretanto, os planos do CERN para as próximas atualizações do LHC são de aumentar a energia das colisões e aumentar a luminosidade, o número de partículas geradas pelos feixes. Nesta situação o ATLAS é um ambiente mais hostil; a SNR cai, porque o ruído deixa de ser branco para ter algum grau de correlação e a flutuação de sua amplitude aumenta e o mais defensor: a possibilidade de ocorrência de sinais deslocados no tempo, podendo haver mais de um simultaneamente amostrados no mesmo canal.

Para os casos de maior luminosidade foram utilizadas runs de calibração de luminosidades mais elevadas. Com estes bancos foram simulados sinais em diferentes situações, com o ruído aditivo já modelado. Em seguida esses sinais simulados foram submetidos aos filtros desenvolvidos para este ambiente com pile-up e comparados os resultados, a Deconvolução e o Filtro Ótimo Generalizado, buscando sinais deslocados simultâneos e reconstruir múltiplas amplitudes para o mesmo canal na mesma janela de captura.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No segundo capítulo é feita uma apresentação ao CERN e ao LCH, seu complexo de detectores.

O terceiro capítulo se dedica ao projeto ATLAS, entrando em maiores detalhes sobre suas subdivisões.

No Quarto capítulo são dados maiores detalhes do TileCal e seu funcionamento.

No quarto capítulo é dado um enfoque ao TileCal e à sua eletrônica de leitura e amostragem.

No quinto capítulo são apresentados os conceitos de Processamento Digital e Processamento Online de sinais, e, em seguida, apresentados como estes conceitos se aplicam ao projeto ATLAS.

No sexto capítulo são apresentados os filtros digitais utilizados e seus fundamentos matemáticos. Nesta seção são demonstradas as formulações da Deconvolução e do Filtro Ótimo Generalizado e duas variações deste.

No sétimo capítulo os filtros digitais apresentados no capítulo anterior são submetidos a testes para diferentes condições de luminosidade e incidência de pile-up e são confrontados.

No capítulo 8 estes resultados são interpretados e comentados, separando as duas situações: quando se deseja detectar apenas sinais bem sincronizados sem incidência de pile-up e quando se deseja detectar também outros sinais, defasados de um ou mais períodos de amostragem, que possam ocorrer, talvez até simultaneamente a um sinal sincronizado no mesmo canal.

O Capítulo 9 reúne os argumentos levantados no capítulo anterior para propor uma abordagem na implementação filtros ao sistema de trigger e aquisição de dados.

2 O LHC e o Detector ATLAS

2.1 CERN

O *Council Européen de Recherche Nucléaire*, CERN, é um dos maiores centros de pesquisas científicas mundiais, possivelmente o mais respeitado em estudos sobre Física de Partículas. O CERN está localizado na fronteira entre Suíça e França, próximo Genebra, capital Suíça. O CERN é uma instituição continental, contando hoje com 21 Estados membros, após a entrada do primeiro não-europeu, Israel (como pode ser visto em [6]), além de observadores, associados e vários colaboradores. Neste grupo se encontra o Brasil.

Seu principal propósito é estudar questões fundamentais, como a composição da matéria, como esta está estruturada e como suas subpartes interagem entre si, a matéria escura, e a expansão do universo. Dentre as contribuições já realizadas pelo conselho, a maior de sua história recente foi a confirmação da existência do bóson de Higgs, que reforça o modelo atômico padrão atual, pode explicar o desequilíbrio entre as quantidades de matéria e anti-matéria no universo observável e conferiu ao físico inglês Peter Higgs o prêmio Nobel de Física em 2013, por ter sido o primeiro a prever sua existência.

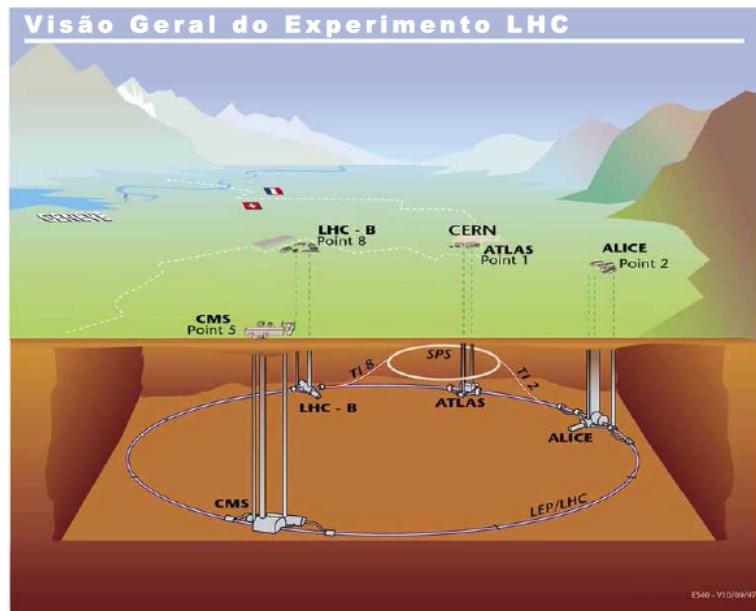


Figura 2 – Localização do CERN

Fonte: Colaboração CERN [7]

2.2 LHC

O LHC, *Large Hadron Collider*, é o colisor de partículas do CERN e sua localização está mostrada na figura 2. É composto por aceleradores de partículas dos tipos LINAC, *Linear Particle Accelerator* e PS, *Proton Synchrotron*, e por detectores de partículas.

Este tipo de aparato é necessário para a observação de partículas subatômicas. Os aceleradores fornecem a feixes de prótons por campo elétrico e são defletados por campos magnéticos. A cada experimento são acelerados feixes em sentidos opostos da trajetória circular, que recebem energia até colidirem frontalmente. A energia acumulada é suficiente para fragmentar os prótons em subpartículas elementares. Estes elementos depositam energia nos detectores, onde começa o processamento.

O LHC possui quatro detectores principais, CMS e ATLAS são de propósito mais geral quando contrastados com ALICE e LHCb. Os dois primeiros são complementares. O LHC tem forma circular com 27,4 km de comprimento, 100m abaixo do solo. Esta geometria facilita a aceleração dos prótons ao longo do trajeto e esta localização subterrânea, blinda os experimentos de interferências que possam ser provocadas por radiações de origens externas à Terra, raios cósmicos, como explosões solares ou emissões de outras galáxias.

Atualmente, as colisões geradas no LHC ocorrem a uma taxa de 40MHz, portanto, espaçando 25ns entre uma colisão e a seguinte, com feixes de 14TeV. Estuda-se aumentar a taxa de colisões através do aumento de luminosidade e a frequência com que elas ocorrem, o que requer melhorias tanto na eletrônica utilizada, como nos métodos de detecção e reconstrução de sinais. Os principais experimentos do CERN estão listados a seguir, bem como sua aplicação específica:

1. Compact Muon Solenoid, CMS

Detector de propósito geral, se propõe a estudar temas que variam do modelo padrão à busca por dimensões extras e partículas que possam formar a matéria escura. Possui 21 metros de comprimento, 15 metros de largura e 15 metros de altura.

2. A Toroidal LHC Apparatus, ATLAS

Também de propósito geral, sua principal função quando concebido era a detecção do bóson de Higgs, que se concretizou em 2013. Possui os mesmos objetivos que o CMS, mas com diferente estrutura. Maior, suas dimensões são 46 metros de comprimento, 25 metros de diâmetro.

3. A Large Ion Collider Experiment, ALICE

Detector de íons pesados através de colisões nucleares. Estuda a formação do plasma de quarks e glúons.

4. Large Hadron Collider beauty, LHCb

Dedica-se a estudar as diferenças entre matéria e anti-materia através de observações do quark bottom.

3 O PROJETO ATLAS

O projeto ATLAS, *A Toroidal LHC Apparatus*, é primeiramente um experimento de colaboração internacional que conta com a contribuição de 177 instituições de 38 países atualmente. Seus objetivos são a investigação das interações e partículas fundamentais que constroem o universo que conhecemos.

Os estudos desenvolvidos podem passar por confirmação de dimensões extras, entendimento sobre a formação de buracos negros microscópicos e vislumbramento de portadores de matéria escura. Apesar de todas as incertezas acerca do que poderá ser confirmado ou até surpreender a comunidade científica, este projeto já tem o prestígio do alcance de seu maior objetivo, que foi encontrar o Bóson de Higgs. Esta desoberta alimenta os ânimos por mais pesquisas.

O detector ATLAS tem a forma de barril. Em seu interior os feixes de prótons energizados percorrem o seu comprimento em sentidos opostos. Para a detecção das partículas geradas (ou defletidas) da colisão, há células sensíveis a tais partículas envolvendo este comprimento e também as "tampas" deste barril, cobrindo praticamente todo o ângulo sólido de 4π .

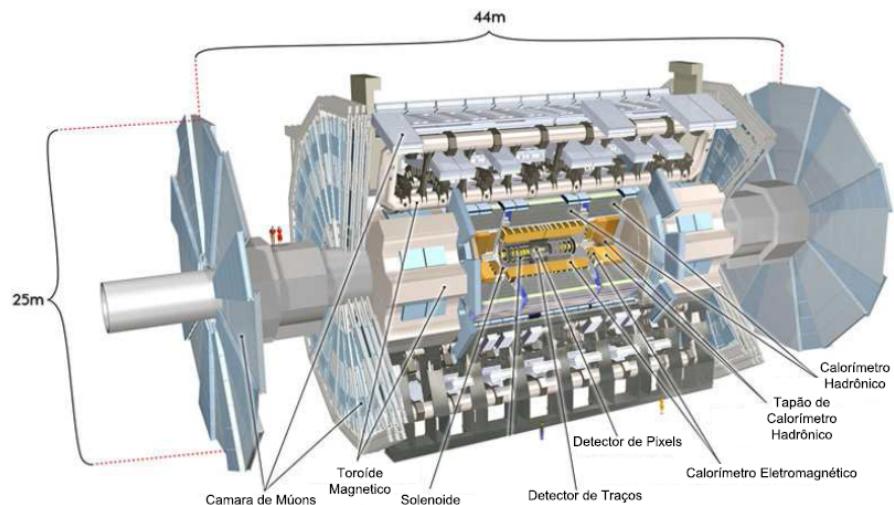


Figura 3 – Representação do detector ATLAS.

Fonte: Extraído de [8]

Como em toda a extensão do LHC, magnetos compõem o ATLAS, conduzindo o feixe de partículas a serem colisionadas e auxiliando na medição. O Detector ainda se divide também em três subdetectores básicos dispostos em camadas: o detector de trajetórias, os calorímetros eletromagnético e hadrônico e o detector de mísseis, seguindo a ordem das camadas mais internas para as externas. As camadas do ATLAS estão ilustradas na figura 4.

O objetivo deste trabalho é o estudo de ferramentas matemáticas aplicadas ao Calorímetro Hadrônico do ATLAS, Tile Calorimeter ou mais comumente TileCal.

3.1 O DETECTOR DE TRAJETÓRIA

O Detector de Trajetória, *Inner Detector*, é o mais interno do ATLAS. Seu objetivo é estimar o ponto e o momento onde houve a colisão. Este subdetector possui fina granularidade por ser o primeiro a interagir com as partículas resultantes de uma colisão. No Detector de Trajetória são utilizados dois sistemas de detecção, baseados em semicondutores (PIXEL e SCT) e radiação (TRT, *Transition Radiation Tracker*).

O sistema de semicondutores abrange a região de $|\eta| < 2,5$ (veja o anexo A) em uma área de $61m^2$ dispondo de mais de 6 milhões de canais de leitura e resolução na ordem microns.

Já o detector TRT é usado para o reconhecimento de partículas. É composto por tubos preenchidos por uma mistura gasosa de xenônio, dióxido de carbono e oxigênio. Entre os tubos há um preenchimento para que as partículas produzam fôtons com a mudança de meio de propagação, a radiação de transição. Estes fôtons interagem com os átomos de xenônio que produzem descarga elétrica por efeito fotoelétrico. Os sinais elétricos resultantes tem sua amplitude variada de acordo com partícula, seja ela um elétron ou um píon, sendo possível diferenciá-las.

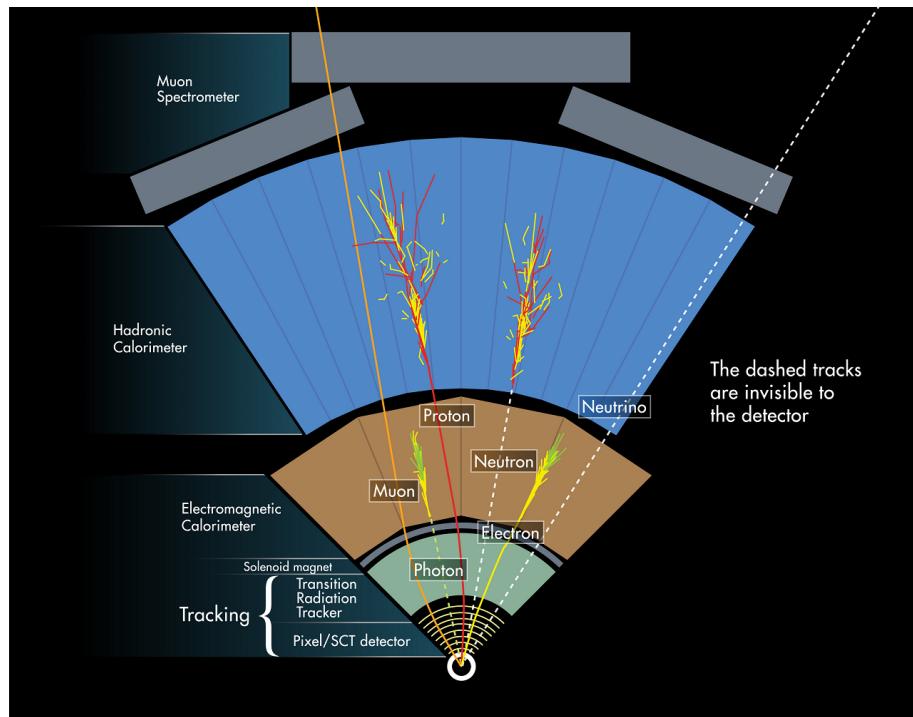


Figura 4 – Camadas do ATLAS e o alcance das partículas em seu interior.

Fonte: Extraído de [5]

3.2 CALORÍMETROS

Os calorímetros são componentes chave para a maioria dos experimentos em Física de Altas Energias. O mecanismo sob o qual trabalham é composto basicamente dos três seguintes passos; serem sensibilizados com energia depositada por partícula passante, coletar esta energia e medi-la. Para a obtenção da direção das partículas, costumam ser longitudinalmente segmentados. Também podem o ser, transversalmente, a fim de diferenciar partículas por meio das formas dos chuveiros que elas produzem.

Entre as principais vantagens da utilização de calorímetros em experimentos em Física de Altas energias, especialmente no ATLAS, listamos:

1. São sensíveis a partículas, independentemente de serem eletricamente carregadas ou não.
2. Conseguem diferenciar as partículas pela forma como a energia foi depositada.
3. Sua profundidade para a medição de cascatas de objetos a serem medidos aumenta logaritmicamente com a energia das partículas envolvidas, proporcionalmente mais lentamente portanto. Isto os tornam mais compactos.
4. São capazes de medir a trajetória dos jatos ao serem segmentados.
5. Possuem alta velocidade de resposta, abaixo dos 50ns. Ideal para ambientes de alta taxa de eventos.
6. A informação obtida pelos calorímetros pode ser utilizada para melhorar a seletividade de eventos.

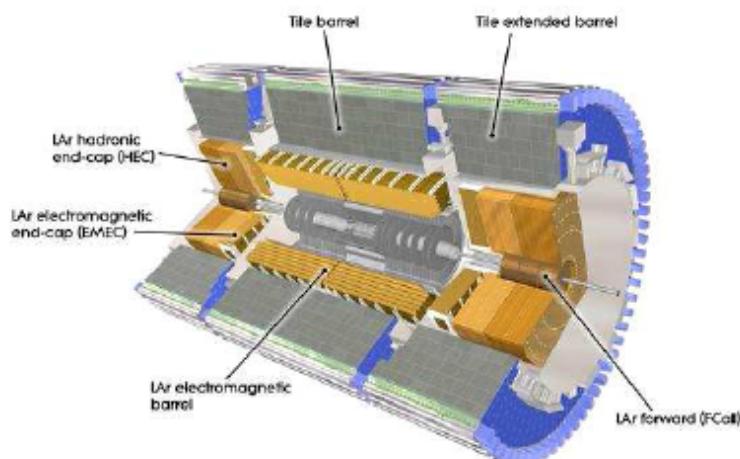


Figura 5 – Sistema de calorimetria do ATLAS.

Fonte: CERN Document Server - CERN-GE-0803015

3.2.1 Calorímetro Eletromagnético

O calorímetro eletromagnético do ATLAS utiliza chumbo como material absorvedor e seus amostradores são eletrodos de chumbo em forma de acordeão (figura 6) imersos em argônio líquido. Por isso o calorímetro eletromagnético do ATLAS recebeu o nome de *Liquid Argonic*, ou simplesmente LArg.

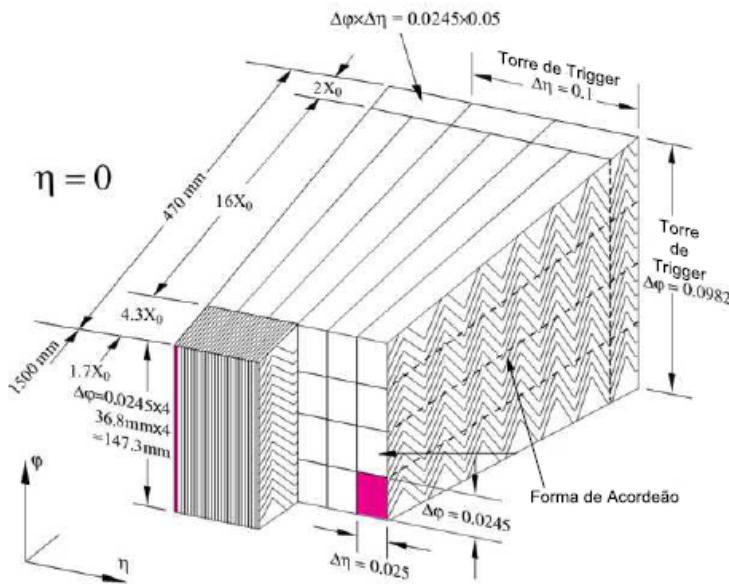


Figura 6 – Esboço da estrutura do Calorímetro Eletromagnético e sua segmentação.

Fonte: Extraído de [10]

Estes eletrodos estão dispostos ao longo da direção de pseudo-rapidez no intervalo $|\eta| < 3,2$. (Veja o anexo A). O calorímetro eletromagnético também conta com um sistema de resfriamento para minimizar o ruído gerado pela eletrônica de *front-end* e pelos campos magnéticos. Ele também Conta com um pré amostrador, para a correção da energia perdida por elétrons e fótons antes de atingirem o calorímetro.

O LArg ainda é subdividido em três camadas. Cada uma delas possui granularidade específica, sendo nas três constantes na direção ϕ e variável em η . As subdivisões são o barril central (*barrel*) e as tampas externas (*extended caps*).

3.2.2 Calorímetro Hadrônico, TileCal

O calorímetro hadrônico do ATLAS recebe o nome de Calorímetro de Telhas, *Tile Calorimeter* ou TileCal, porque seus cintiladores material absorvedor são placas de aço em forma de telha. A exemplo do LArg é dividido em duas "tampas hadrônicas", *Hadronic End Cap*, HEC ou barris estendidos, e o corpo do barril.

Da interação dos cintiladores com prótons e neutrons são produzidos fótons, que serão capturados e transmitidos por fibras ópticas até células fotomultiplicadoras, *Photo*

Multiplier Tubes ou PMTs, onde serão convertidos em sinais elétricos e condicionados é a eletrônica de leitura do TileCal.

O TileCal abrange a região de $|\eta| < 1,7$ do sistema de coordenadas do ATLAS (anexo A) e possui formato cilíndrico de raios interno de 2,3m e externo de 4,3m. Este calorímetro também possui alta segmentação, com mais de 10.000 canais de leitura.

Como este trabalho é voltado para o TileCal, este calorímetro será melhor abordado na seção 4.

3.3 O DETECTOR DE MÚONS

Ao fim do ATLAS, na parte mais externa se encontra o detector de múons. Múons são imperceptíveis para os detectores mais internos e possuem período de vida longo. O detector de múons utiliza técnicas especiais a fim de detectá-los.

4 TILE CALORIMETER, TileCal

O TileCal, como calorímetro hadrônico do ATLAS, coleta energia de partículas que interagem através da força forte, decaindo. Este é o caso principalmente de hádrons neutros. Um hádron de alta energia ao penetrar um bloco de matéria provavelmente encontrará e interagirá com um núcleo atômico, gerando mésons. Parte da energia original do hádron é convertida nas novas partículas, a outra é convertida em energia é transferida ao núcleo. Este núcleo excitado libera novamente esta energia por meio de núcleons seguidos de raios gama (γ) de baixa energia. Estas transmissões de energia ainda podem disparar novas interações e reações, em um efeito cascata ou chuveiro. As cascatas geradas por hádrons geralmente são mais penetrantes que as geradas por decaimentos de elétrons e fôtons, mas também podem se comportar como estes últimos, tornando sua detecção por vezes impossível com a utilização exclusiva de calorímetros.

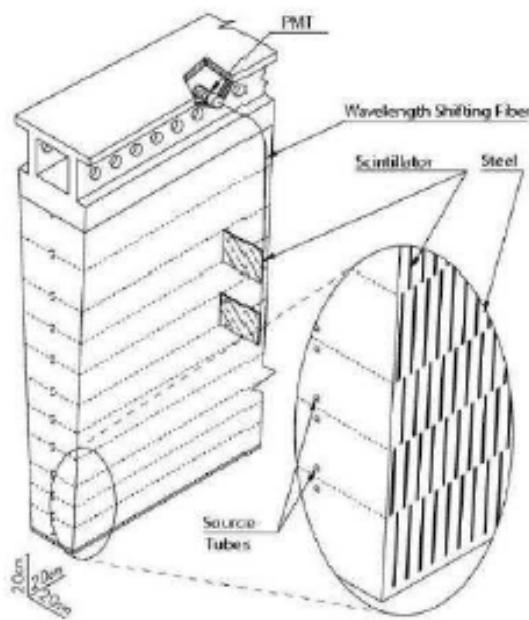


Figura 7 – Visão tridimensional de um módulo do TileCal, mostrando as telhas dispostas perpendicularmente à direção do feixe.

Fonte: THE ATLAS COLLABORATION. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”, *Journal of Instrumentation, JINST 3 S08003*, 2008.

O principal objetivo do TileCal é a reconstrução da energia dos jatos gerados pelas interações próton-próton e auxiliar o cálculo do momento tranverso faltante (*missing P_T*). Por isso ele deve ter boa resolução de energia, boa linearidade e excelente uniformidade, em todas as direções.

Como foi dito anteriormente, o TileCal é dividido em barril e barris estendidos, abrangendo a região de $|\eta| < 1,7$. Dessa região, o barril cobre a região $|\eta| < 1,0$ e as

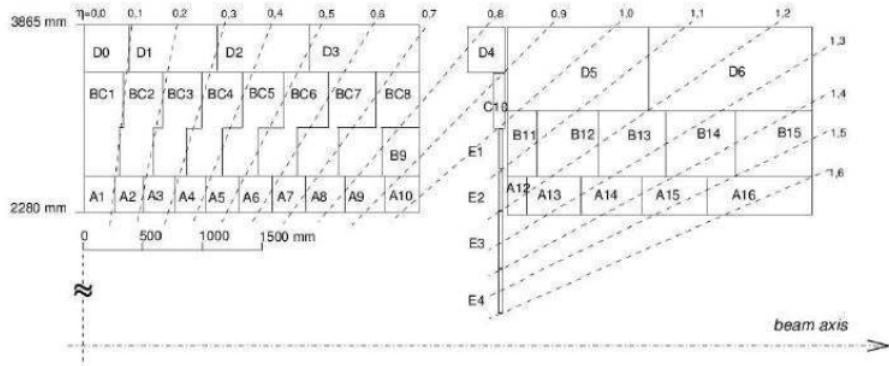


Figura 8 – Divisão do TileCal em barril central e barril estendido.

Fonte: THE ATLAS COLLABORATION. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”, *Journal of Instrumentation, JINST 3 S08003*, 2008.

extensões, $0,8 < |\eta| < 1,7$. A estensão, porém, não dispõe dos mesmos detectores de telhas do corpo principal, mas em formato de acordões imersos em argônio líquido, como ocorre no LArg. Sua granularidade também é mais uniforme, dadas as maiores flutuações geradas nas medidas de energia por chuveiros hadrônicos. É necessário ainda um espaço entre o barril e os barris estendidos, para a eletrônica de comunicação com o TileCal. Esta "resolução" do TileCal é de 0,1 em η e de 5,625 graus (o arco de 360 graus dividido em 64 intervalos iguais) em ϕ .

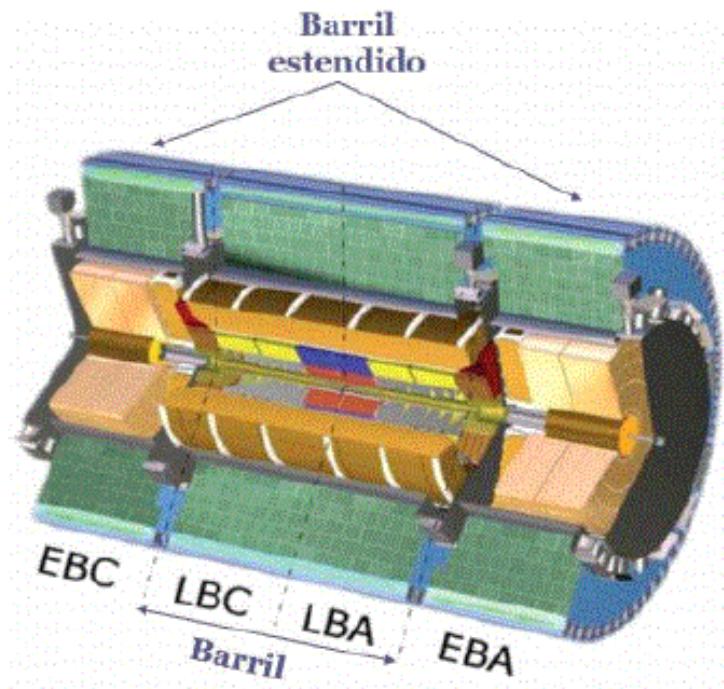


Figura 9 – Divisão do TileCal em barril central e barril estendido.

Fonte: Extraído de [5].

No TileCal, os cintiladores estão dispostos perpendicularmente à direção do feixe de partículas (figura 7), intermediados por placas de aço de 4 a 5 cm, formando um arranjo quase periódico com as telhas de aço de 3cm de espessura. Para a captura de fótons há redundância de dados de modo que uma PMT recebe sempre informações de dois fótons.

A eletrônica de leitura se encontra nas chamadas gavetas e inclui circuitos de leitura e digitalizadores de sinais, projetados para a alta velocidade e o baixo ruído das PMTs.

4.1 A Eletrônica de Leitura

Em um módulo do TileCal, esboçado na figura 7, as telhas cintilantes amostram a energia aborvida das partículas que com elas interagem. A luz resultante desta interação é coletada e duas fibras ópticas a transportam até uma PMT. Estes dois componentes estão interfaceados por misturador de luz. Com os sinais ópticos misturados, as posições das fibras e a área da PMT são descorrelacionadas.

Uma vez que a PMT recebe o impulso luminoso, ela o converte em sinal elétrico e o entrega ao circuito conformador *shaper*. É ele que gera a forma de onda mostrada na figura 1, também mostrada a seguir, na figura 10.

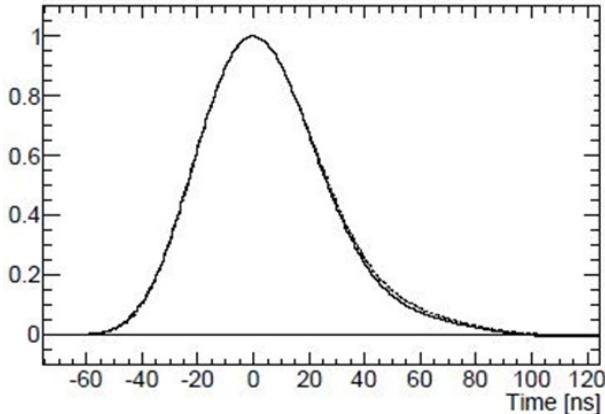


Figura 10 – Forma do Pulso de Referência entregue pelo *shaper*

O pulso gerado pelo circuito *shaper* tem sua amplitude proporcional à energia recebida pela PMT. Este pulso é amplificado por um amplificador operacional, que tem suas saídas *high gain* e *low gain* enviadas para um circuito somador.

Blocos digitalizadores recebem as respostas *low gain* e *high gain* e os convertem em ADCs a uma taxa de 40MHz, gerando amostras a cada 25ns. Estas amostras são realizadas 7 vezes para cada colisão, levando a um intervalo de 150ns entre a primeira e a última amostragem. Preferencialmente o sinal *high gain* é utilizado, mas caso sature o ADC, sua versão *low gain* é utilizada para a conversão.

O circuito de pipeline possui 256 estágios, gerando uma latência de $6,4\mu s$. Este valor é muito alto para o ATLAS. Ele é necessário para o nível 1 do trigger poder testar os

sinais recebidos. Os sinais que passam no teste do nível 1, são enviadas para as *Read-Out Buffers*, RODs, que reconstroem o evento e o armazenam.

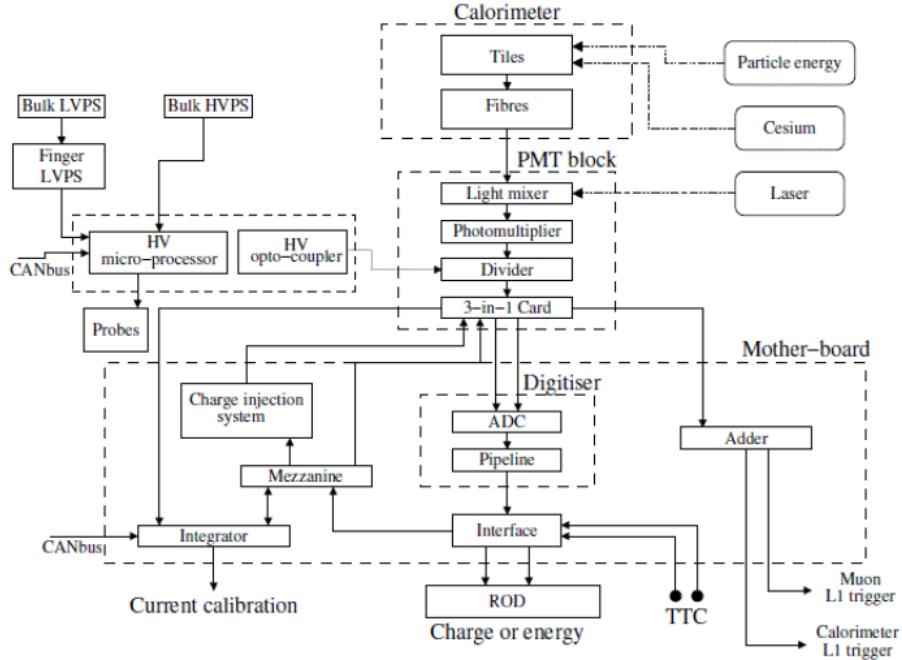


Figura 11 – Diagrama de blocos da eletrônica de leitura do ATLAS

4.2 READ-OUT DRIVERS

As RODs são os circuitos responsáveis por implementar o segundo nível do trigger, para o qual se destinam os testes aplicados neste trabalho. Elas são dotadas por duas unidades de processamento, PUs, *processing units*, que tem por fim estimar a energia e o tempo das amostras digitalizadas recebidas.

Cada PU era dotada de dois DSPs cada e cada. Estes DPSs implementavam algoritmos de reconstrução de energia para dois módulos do TileCal cada. Recentemente a ROD foi atualizada e agora utiliza FPGAs, em vez de DPSs, devido à maior capacidade de processamento paralelo da FPGA. Para não comprometer a taxa de aquisição do primeiro nível de trigger, o tempo de resposta para cada módulo do TileCal não pode ser superior a $10\mu s$

5 PROCESSAMENTO DE SINAIS

5.1 O PROCESSAMENTO ONLINE DE SINAIS

O processamento online de sinais ocorre de modo concomitante à captura de dados, cumprindo um prazo limite para entrega dos resultados de um processamento. Seu funcionamento ocorre da seguinte maneira; os canais do detector coletam os dados instantâneos devidamente amostrados por cada PMT, e os transfere para a unidade de processamento quando um sinal de aceite do sistema de trigger é gerado. Neste instante, são então transferidas 7 amostras consecutivas de cada canal para a interface de processamento. Esta aplica o filtro de forma a estimar sua amplitude, além de outras informações relevantes ao experimento, como o local de coleta de dados e o momento. Em seguida encaminha as informações para o banco de dados. Todo este processo deve ocorrer muito rapidamente, anteriormente a uma nova coleta de dados ou, pelo menos, antes que os dados a serem adquiridos em seguida precisem utilizar os mesmos recursos que anteriormente a este ter sido seu processamento finalizado.

Esta é uma prática comum quando os filtros são simples o suficiente e há disponibilidade de uma unidade de processamento aplicada e eficiente o suficiente para executar estas funções no tempo necessário. No projeto ATLAS há três chamados níveis de *trigger*, que são técnicas implementadas em hardware para a detecção de um evento de interesse. Quando uma região maior passa no teste de detecção de eventos de interesse para um refinamento maior, diz-se que esta região avançou um *nível de trigger*, online. Isto, porém, não impede que estudos mais esmiuçados necessitem ser executados offline, ou seja, aplicados em banco de dados devida e estavelmente salvo em que o tempo de execução não seja um fator crítico.

5.2 O PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Processamento de Sinais envolve um conjunto de técnicas essencialmente matemáticas e computacionais para uma melhor interpretação dos dados físicos já recebidos. Desta forma é possível colher informações relevantes, mas é necessário que se conheça o ambiente de onde foram colhidos os dados de forma a eliminar possíveis informações enganosas para uma separação eficiente entre dado (informação relevante) e ruído (todo outro tipo de informação coletada). Como lidamos com máquinas digitais, não é possível conseguir detectar toda a forma de onda do pulso de referência em uma ocorrência comum, portanto o que o processamento digital busca de fato é sua forma digitalizada, indicada na Figura 12.

Para uma detecção (e estimativa de energia ou amplitude) eficiente, é necessário conhecer o ambiente em que ocorre o projeto para uma melhor elaboração do filtro digital

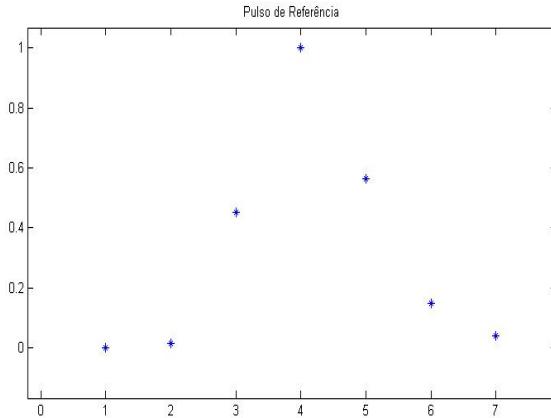


Figura 12 – Pulso de referência digitalizado

a ser utilizado para a detecção do sinal de referência. Para isso, ao longo do projeto, foram elaborados, discutidos e testados vários modelos filtros bem como de distribuições estatísticas do ruído, de modo a procurar o filtro que possua melhor eficiência, ou seja, consiga encontrar o máximo de eventos (ocorrências de detecções verdadeiras) e incida o mínimo de alarmes falsos (indicação de detecção, quando na realidade não é) no ambiente em que é inserido, ao mesmo tempo que seja eficiente na estimativa do pulso detectado.

Apresentaremos e discutiremos neste trabalho os principais modelos utilizados, o filtro casado (matched filter), o filtro ótimo (OF, optimum filter, utilizado no CERN), a deconvolução e o filtro ótimo generalizado (Generalized OF). Os dois últimos focam na detecção simultânea em uma mesma PMT de mais de um pulso e de pulsos adiantados ou atrasados. Embora diferentes distribuições de ruído tenham sido testadas, para a maioria uma distribuição gaussiana foi o suficiente, cabendo a cada situação modelar o ruído apenas quanto aos parâmetros sensíveis a esta distribuição; média e variância de sua amplitude.

5.3 SELEÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS NO ATLAS

Com cerca de 10.000 canais [1] o TileCal produz um volume colossal de dados. Mais ainda, quando em operação a taxa de colisão é de 40MHz, gerando novos dados a cada 25ns.

Nesta situação é inviável buscar eventos de interesse imediatamente em cada canal. Menos ainda é armazenar toda a informação gerada e processá-la offline; não haveria espaço e o esforço computacional ainda seria hercúleo.

O ATLAS conta com um sistema progressivo de detecção e estimativa de sinais, o *Trigger and Data Acquisition*, TDAQ, ou simplesmente sistema de trigger. O sistema de trigger refina as regiões de interesse conforme os dados coletados forem processados e

passarem pelos critérios de seleção. O objetivo deste sistema é reduzir a taxa de eventos de 40MHz para uma de aproximadamente 100Hz de eventos de interesse para armazenamento permanente e processamento offline, ao longo de três níveis, como sugere a figura 13.

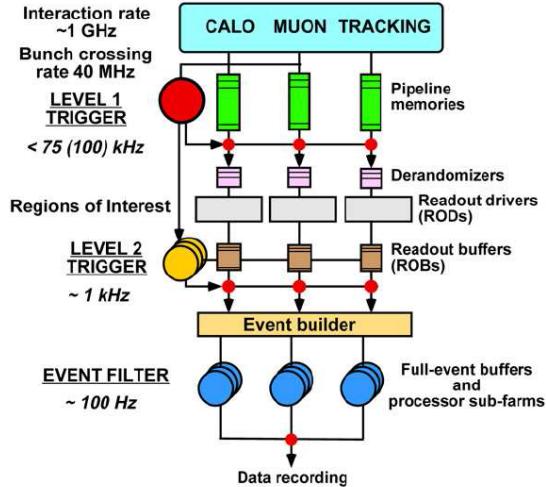


Figura 13 – Sistema de Trigger do ATLAS

Fonte: Retirado de [9]

O primeiro nível de trigger trabalha com granularidade reduzida e processa os dados capturados com hardware de baixa programabilidade dos calorímetros eletromagnético e hadrônico do ATLAS. Neste caso a detecção de regiões de interesse deve ser reduzir a frequência de eventos de 40MHz a 100kHz.

Caso uma região de baixa granularidade passe pelos critérios do nível 1 a região de interesse é avaliada com granularidade total e a taxa de eventos de interesse não deve ultrapassar 1kHz. É para esta parte do sistema do trigger que se destinam as aplicações de filtros digitais deste trabalho.

Já no terceiro nível, implementado por redes rápidas interligadas, a taxa de eventos pode cair a até 100Hz. [2]

5.4 PILE-UP

Este trabalho se destina a propor técnicas para identificação e reconstrução eficientes dos fôtons capturados pelas PMTs no TileCal. As colisões ocorrem no interior do ATLAS com partículas carregadas a 14TeV a cada 25ns, gerando a necessidade de coletar amostras a uma taxa de 40MHz. Isto produz uma quantidade colossal de dados para um intervalo muito curto. Portanto, se fazem necessárias técnicas que possam descartar de imediato eventos comuns, mantendo apenas os eventos de potencial interesse.

Para o caso do TileCal, isto significa identificar rapidamente o pulso de referência

mostrado na figura 14. Note que este sinal apresenta sete pontos. A cada colisão são feitas sete coletas de amostras. Há propostas de aumento no número de amostras.

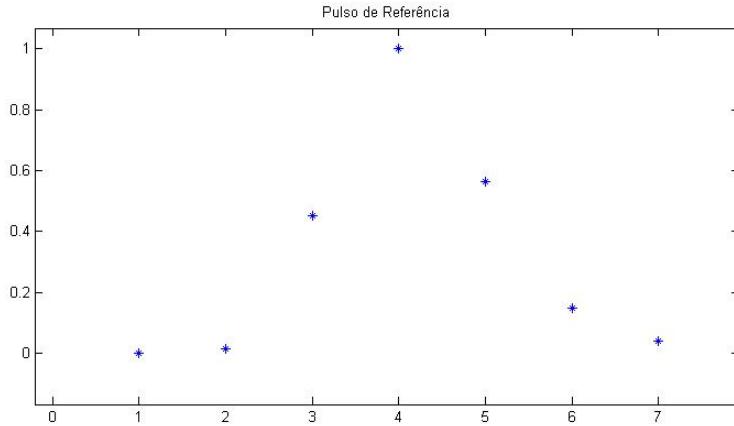


Figura 14 – Pulso de Referência Digitalizado.

A detecção deste sinal não tem sido problemática com a aplicação de duas ferramentas bem conhecidas, os filtros Filtro Casado e Filtro Ótimo, que serão discutidos mais adiante. Entretanto, o aumento da luminosidade das colisões pretendido pelo CERN ameaça a performance destes, já que pode haver a presença de mais de um pulso com o formato do de referência, apenas defasados por algumas amostras.

Os filtros digitais como estão aplicados conseguem identificar os sinais de interesse com razoável precisão, mesmo que sofra uma interferência intersimbólica. Porém, não estão projetados para contribuições significativas advindas de sinais laterais (outros pulsos de interesse ocorridos fora de sincronia).

6 FILTROS DIGITAIS UTILIZADOS

Ao longo deste projeto, diferentes filtros digitais foram propostos e testados. Seguem os principais modelos propostos e testados. Em todos eles consideramos que o ruído é branco e aditivo, ou seja, podemos modelar os dados capturados como

$$\mathbf{R} = \mathbf{N} + a\mathbf{S} \quad (6.1)$$

Em que \mathbf{R} é o vetor representante da palavra recebida na PMT, \mathbf{N} é o vetor ruído, \mathbf{S} é o vetor pulso de referência e a é sua amplitude a ser estimada.

Também consideraremos casos em que existam mais de um pulso capturado em uma única amostragem. Nesta situação a modelagem é

$$\mathbf{R} = \mathbf{N} + \sum_j a_j \mathbf{S}_j \quad (6.2)$$

Em que j é a defasagem do sinal \mathbf{S}_j em relação à temporização do detector.

A ideia de todos os filtros digitais utilizados neste projeto é aplicar um operador discreto linear, ou linear seguido de offset, no caso do filtro casado.

6.1 FILTRO ÓTIMO (OF, OPTIMAL FILTER)

O Filtro Ótimo, normalmente chamado de OF era, durante o início deste projeto de iniciação científica, o filtro corrente no detector ATLAS, no CERN. Sua ideia central é basicamente encontrar os pesos (coeficientes) do filtro digital que minimizam a resposta do ruído por um lado e maximizam a probabilidade de identificar a resposta do pulso de referência de outro e se apoia em princípios de Cálculo para minimização/maximização.

A equação de aplicação do OF é

$$A = \mathbf{W}^T \mathbf{R} \quad (6.3)$$

A Amplitude a ser estimada pelo OF

W Pesos calculados para o filtro OF

Denotando o vetor digitalizado do pulso de referência como \mathbf{S} e a matriz de covariância do ruído por C , o vetor de pesos \mathbf{W} do Filtro Ótimo são calculados pela expressão da expressão na Figura 15, em que λ é um multiplicador de Lagrange.

Nos ambientes testados, em que não há sobreposição de sinais defasados entre e o ruído é branco (ou seja, uma amostra tomada independe das demais) o OF tem

$$\begin{bmatrix} C_{7 \times 7} & | & S \\ \hline & | & -1 \\ & | & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \hline S^T & | & \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{7 \times 1} \end{bmatrix}$$

Figura 15 – Expressão para o Filtro Ótimo

rendimento parecido com o filtro casado e divide com este sua desvantagem para capturas mal sincronizadas com a ocorrência de eventos.

6.2 FILTRO CASADO (MATCHED FILTER)

O filtro casado é uma técnica de detecção bem conhecida e assim como boa parte das técnicas na área basea-se em princípios de Álgebra Linear. Para este caso as amostras, que são sempre amostradas em sete pontos, são submetidas a um produto interno canônico. Ou seja, se procuramos uma onda com mesma forma que o pulso de referência, faremos o produto interno entre a informação obtida e o pulso de referência normalizado, para que a resposta obtida seja o valor da amplitude da onda detectada, caso haja uma.

Algumas vezes é importante levar em conta a presença de offsets de ruído e que este também produz uma resposta relevante ao produto interno. Por este motivo é importante estudar seu comportamento e procurar desconsiderar esta contribuição ao produto. A este valor chamamos pedestal, representado por *Ped*. Cada PMT pode possuir um valor diferente para o pedestal e este valor é obtido experimentalmente.

Desta forma, a amplitude estimada pelo filtro casado *A* é dada por

$$A = \mathbf{W}^T \mathbf{R} - Ped \quad (6.4)$$

Já seus pesos \mathbf{W} e seu pedestal *Ped* são calculados como em 6.5 e 6.6.

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|^2} \quad (6.5)$$

$$Ped = \overline{\mathbf{W}^T \mathbf{N}} = \mathbf{W}^T \overline{\mathbf{N}} \quad (6.6)$$

O filtro casado se mostra de enorme eficiência para ambientes de alta SNR (signal to noise ratio, ou relação sinal/ruído) quando se consegue sincronizar aquisição de dados e recepção do fóton. Este é o caso do detector ATLAS e um resultado específico neste

ambiente é mostrado nas figuras 16 e 17. Neste caso também há apenas aquisição nos instantes em que é esperado um evento, uma vez que sua ocorrência é controlada.

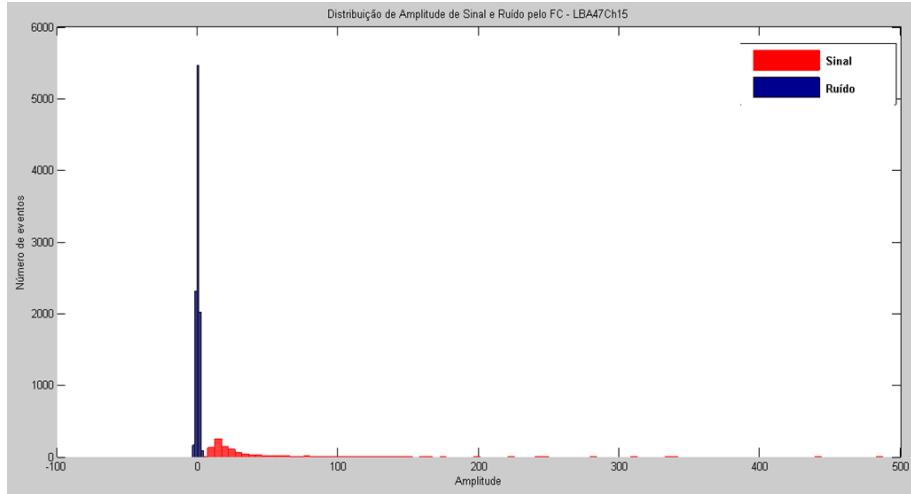


Figura 16 – Amplitudes para sinais e ruídos para um banco de dados do ATLAS estimadas pelo Filtro Casado

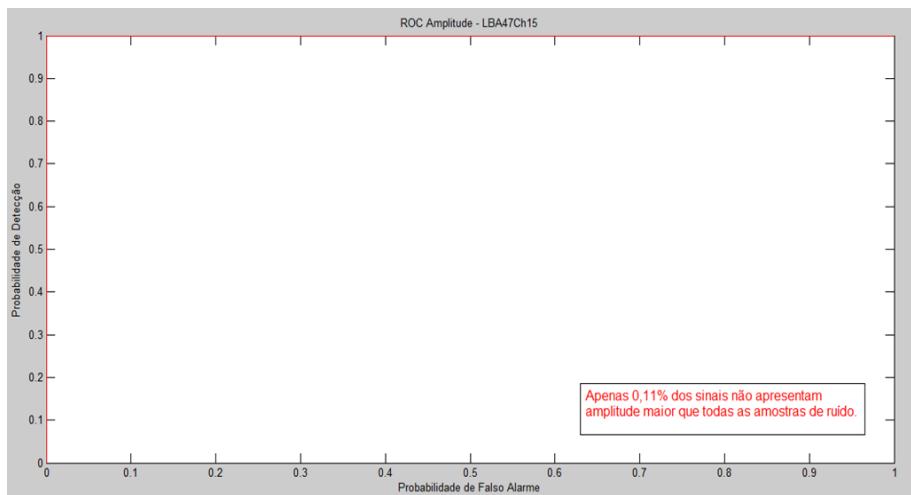


Figura 17 – ROC para uma aplicação do Filtro Casado a um banco de dados do ATLAS

A Figura 16 ilustra a boa separação entre sinal e ruído para o caso estudado. A Figura 17 torna isto mais evidente, através da curva ROC. Nesta curva cada ponto representa uma amplitude de corte, valor de estimação a partir do qual consideraremos que a amplitude obtida corresponde a uma detecção. Conforme aumentamos a amplitude de corte, menos falsos alarmes ocorrem, porém é possível que alguns eventos passem indetectados.

Embora seja comprovada sua eficiência, o filtro casado não funciona bem para eventos defasados, adiantados nem de alta luminosidade, em que há possibilidade de mais de um evento simultâneo e o comportamento do ruído começa a se tornar autocorrelacionado.

6.3 MATRIZ DE DECONVOLUÇÃO (DECONVOLUTION MATRIX)

O processo de deconvolução admite a priori que toda palavra recebida contém sinais atrasados e adiantados em relação à temporização do detector, além do ruído. Portanto o seu trabalho não é exatamente detectar um sinal, uma vez que já se consideram que todos estejam presentes, mas decompor a palavra recebida em componentes correspondentes aos sinais que se consideram presentes.

Como já foi mencionado, foi considerado que o ruído fosse estacionário. Disso resulta que o ruído médio é um sinal constante, ou melhor, um múltiplo de um vetor constante. Da amostragem de cada palavra recebida em sete pontos, sete amostras temporais, resulta que o espaço vetorial trabalhado é o \mathbb{R}^7 e é possível decompor a palavra recebida apenas em sete sinais distintos.

Neste ambiente, sabendo que quanto mais distantes da sincronização com a temporização do detector estiverem as detecções de eventos, menos impacto estes causam à estimativa do sinal central, é razoável ignorá-los. Desta forma, os eventuais eventos com pior temporização são sacrificados (talvez sejam até detectados em outra coleta de dados) para se assegurar que é possível estimar todos os eventos centrais, como chamaremos os eventos ocorridos aproximadamente sincronizados com a temporização do detector.

Desta forma, o filtro por Deconvolução basicamente é um operador (linear e inversível) em \mathbb{R}^7 , de decomposição em vetores linearmente independentes. Para os testes foram considerados como sinais centrais os sinais S_{-2} , S_{-1} , S_0 , S_1 , S_2 e S_3 , em que cada um destes sinais representa uma defasagem de um pulso com a forma de onda do pulso de referência; seu índice indica em quantas amostras o pulso está adiantado (índice negativo) ou atrasado (índice positivo) em relação à temporização do detector. Além dos pulsos defasados, claro, também faz parte do projeto do filtro, e da base escolhida para o referido espaço vetorial, o vetor de pedestal do ruído, $\mathbf{1}$.

Logo, segundo a proposta do filtro por deconvolução, cada palavra $\mathbf{R}^T = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5 \ r_6 \ r_7]$ recebida pode ser expressa pela sobreposição do ruído e dos sinais defasados com amplitudes n , a_{-2} , a_{-1} , a_0 , a_1 , a_2 e a_3 através da expressão da Figura 18.

$$\begin{bmatrix} 1 & | & S_{-2} & | & S_{-1} & | & S_0 & | & S_1 & | & S_2 & | & S_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n \\ a_{-2} \\ a_{-1} \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \\ r_7 \end{bmatrix}$$

Figura 18 – Expressão origem do método de deconvolução

Então, para se descobrir os valores das amplitudes envolvidas, basta inverter a matriz de pulsos à esquerda do membro da esquerda da expressão da Figura 19.

$$\begin{bmatrix} n \\ a_{-2} \\ a_{-1} \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_{-2} & S_{-1} & S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \\ r_7 \end{bmatrix}$$

Figura 19 – Cálculo das amplitudes pelo método da Deconvolução

Portanto, o filtro por deconvolução é apenas a matriz inversa à matriz de sinais defasados e ruído. Sob este modelo é necessário calcular o filtro apenas uma vez e o mesmo filtro pode ser aplicado em todos os canais do detector.

6.4 OF GENERALIZADO OU FILTRO ÓTIMO (GENERALIZED OF)

O filtro ótimo, anteriormente discutido, apresentava bons resultados, porém era incapaz de tratar sinais defasados. Não apenas isso, mas a ocorrência destes sinais, quando não levados em consideração para a criação de um banco de dados de ruído, levava a detecções falseadas, podendo indicar eventos de detecção de pulso central, quando na verdade não havia algum. Mesmo que estes sinais fossem levados em consideração para o banco de sinais, o máximo que se poderia conseguir é um OF um pouco menos preciso e ainda capaz de detectar apenas o pulso central. Por força do hábito, o nome utilizado neste trabalho será OF Generalizado, apesar de não ser, a rigor, o nome correto em Português ou Inglês.

A ideia do OF Generalizado é a mesma do OF simples, com acréscimo de restrições. Ao contrário da deconvolução, em que todo o filtro é computado de uma vez só e uma única vez, o OF Generalizado precisa ser atualizado conforme são obtidas novas informações sobre o ruído, além de serem calculados separadamente pesos para cada sinal defasado que se deseje detectar.

Portanto, da sua versão mais simples, o OF Generalizado herda a minimização da variância do erro. Para cada vetor de pesos, \mathbf{W}_j , acrescenta-se à estimativa da amplitude do sinal $\mathbf{a}_j \mathbf{S}_j$, sua imunidade aos demais sinais defasados, ou seja, $\mathbf{W}_j^T \mathbf{S}_i = 0, \forall i \neq j$. Resumidamente,

$$\mathbf{W}_j^T \mathbf{S}_i = \delta(j - i) \quad (6.7)$$

Em que δ é a função Delta de Dirac discreta.

Entretanto, existe uma característica importante neste método. Cada uma destas restrições insere uma equação linear a que o vetor de pesos \mathbf{W}_j deve satisfazer. A minimização do ruído por si só insere sete equações, a estimativa do sinal objeto de detecção mais uma e cada condição de imunidade insere uma equação cada. Neste ambiente, em que são procurados os valores ótimos para sete pesos, $\mathbf{W}_j^T = [w_{j_1} \ w_{j_2} \ w_{j_3} \ w_{j_4} \ w_{j_5} \ w_{j_6} \ w_{j_7}]$, o sistema é indeterminado.

Digamos que além das sete condições impostas aos pesos do filtro \mathbf{W}_j ainda sejam impostas outras n condições, entre equação de estimativa de amplitude buscada e imunidade aos demais sinais. Então serão inseridas ao sistemas de equações outras n variáveis, λ_i , $i = 1, \dots, n$, componentes de um vetor $\lambda^T = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3 \ \lambda_4 \ \lambda_5 \ \lambda_6 \ \lambda_7]$, o vetor de multiplicadores de Lagrange. Estes multiplicadores aparecerão nas condições de minimização da variância do erro contribuindo com as parcelas $\lambda_i \cdot \mathbf{W}_j^T \mathbf{S}_{i-1-m}$, em que m é o máximo adiantamento de um sinal de referência a que o filtro pretende imunizar os pesos \mathbf{W}_j .

Para maior clareza, segue o exemplo da expressão resultante para filtro \mathbf{W}_0 , na Figura 20. Neste projeto é exigido a \mathbf{W}_0 imunidade aos sinais \mathbf{S}_{-2} , \mathbf{S}_{-1} , \mathbf{S}_1 e \mathbf{S}_2 .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{7x7} & \begin{matrix} S_{-2} & S_{-1} & S_0 & S_1 & S_2 & 1_{7x1} \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_{-2}' \\ S_{-1}' \\ S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ 1_{7x1}' \end{matrix} & \mathbf{0}_{6x6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{0_{7x1}} \\ \lambda_{6,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Figura 20 – Projeto dos pesos para \mathbf{W}_0

Pode-se observar que para o exemplo dado também foi imposta a condição de imunidade ao ruído. Ela se faz necessária pois a alimentação de cada canal pode inserir uma polarização DC em cada PMT. \mathbf{C} é a matriz de covariância do ruído que surge de sua minimização. Vale notar que nesta expressão, para se obter um vetor de pesos \mathbf{W}_1 basta “descer” o valor 1 em uma posição no vetor da direita, para um vetor \mathbf{W}_{-1} , “subir”, e assim por diante.

É possível ainda calcular cada \mathbf{W}_j de forma ainda mais independente, inserindo restrições distintas para cada vetor de pesos. Por exemplo, caso fosse sabido que sempre que ocorre a detecção de um sinal \mathbf{S}_2 um \mathbf{S}_0 não ocorre, não seria necessário inserir a imunidade de \mathbf{W}_2 a \mathbf{S}_0 e assim poupar um multiplicador de Lagrange. Isto também significa que não há restrição ao número de sinais que se queira detectar, cabendo ao projetista apenas escolher restrições razoáveis baseado no comportamento conhecido do ambiente. Assim, o OF simples é um OF Generalizado em que nenhuma condição além da

minimização do e estimação da amplitude central é imposta ao vetor \mathbf{W}_0 . Um cuidado que o projetista deve tomar é de sempre manter o valor 1 na mesma linha em que esteja o sinal objeto de estimação na matriz da esquerda no membro da esquerda.

De fato este Filtro Ótimo menos generalizado chegou a ser projeto de testeado. A esta variação do OF Generalizado foi dado o nome de OF Livre, pois cada vetor de pesos \mathbf{W}_j teria que obedecer a menos restrições que no caso do OF (Totalmente) Generalizado - geralmente havendo imposição extras apenas quanto à imunidade aos sinais adjacentes \mathbf{W}_{j-1} e \mathbf{W}_{j+1} .

Vale ressaltar, desta forma, que cada condição inserida reduz a precisão, ou melhor, aumenta a variância, da resposta do filtro. Por isso é recomendável inserir apenas condições de imunidade que sejam necessárias e projetar pesos para sinais que se sabe que podem estar presentes no ambiente.

Por fim, segue o cálculo do vetor de pesos \mathbf{W}_0 do exemplo na Figura 21. Note que apenas os primeiros sete valores compõem o vetor de pesos procurado. Os demais são desnecessários.

$$\begin{bmatrix} W_{07x1} \\ \lambda_{6,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_7x7 \\ S_{-2}' \\ S_{-1}' \\ S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ 1_{7x1}' \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Figura 21 – Cálculo dos pesos para \mathbf{W}_0

7 TESTES

Todas as modelagens e proposições apresentadas no projeto foram testadas em simulações no software MATLAB e usando suas bibliotecas. Seguem alguns dos resultados mais relevantes deste projeto.

7.1 PRIMEIRO TESTE OF_{Id} vs OF_{Cov} vs $Deconv$

No início do projeto ainda havia dúvidas quanto a necessidade de se calcular a matriz de covariância do ruído sempre que fosse necessário calcular um novo vetor de pesos \mathbf{W}_j uma vez que o ruído era considerado branco e gaussiano, portanto, sua matriz de covariância seria próxima da identidade ou um múltiplo seu. Por outro lado também era necessário testar a sugestão da Deconvolução contra o novo OF generalizado.

Nesse contexto, foi criado um banco de dados artificial de 1000 palavras. Em todas elas havia os sinais \mathbf{S}_{-2} , \mathbf{S}_{-1} , \mathbf{S}_0 , \mathbf{S}_1 , e \mathbf{S}_2 acrescidos em uma matriz de ruído \mathbf{N} . Com $C = cov(\mathbf{N})$ foi calculado $\mathbf{W}_{OF_{Cov}}$, enquanto para $\mathbf{W}_{OF_{Id}}$ utilizada a matriz identidade. Para o projeto da matriz de deconvolução era necessário, além do vetor constante de ruído $\mathbf{1}$, mais um sinal a ser estimado. Por comodidade, o sinal escolhido foi \mathbf{S}_3 , mesmo se sabendo que não havia possibilidade de detectá-lo por não estar presente.

Neste banco de dados um banco de amplitudes foi criado com o seguinte comando; $A = [randi([0,8],1000,1) randi([0,10],1000,1) randi([8,18],1000,1) randi([3,14],1000,1) randi([0,10],1000,1)];$. Ou seja, os sinais centrais não só poderiam ocorrer sempre, como também o sinal central (correspondente às amplitudes da coluna "randi([8,18],1000,1)") sempre ocorrem com amplitude elevada contra amplitudes sempre baixas dos sinais mais afastados. O objetivo deste teste era simular a filtragem para eventos sincronizados em ambiente de luminosidade muito alta.

Os resultados estão expressos graficamente nas figuras 22 e 23.

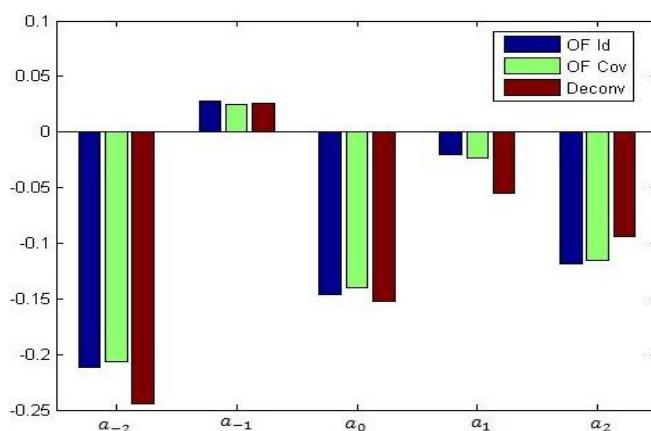


Figura 22 – Erros médios das estimativas de amplitude pelos filtros testados

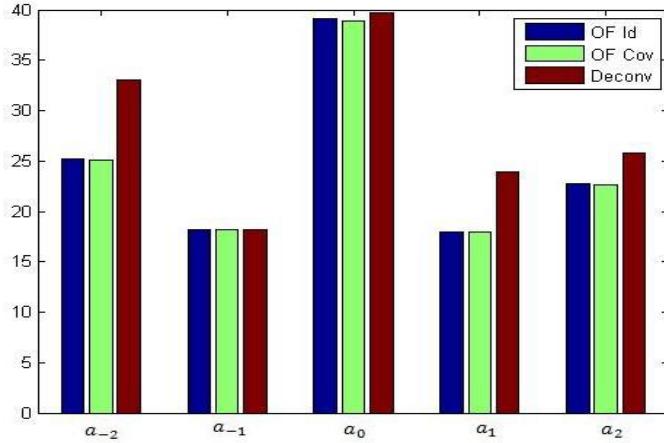


Figura 23 – Variâncias das respostas

7.2 TESTE SEM SINAIS ADIANTADOS

Neste teste foram levados em conta além dos três filtros anteriores, também o filtro OF Livre, brevemente tratado anteriormente. Neste caso, o OF Livre foi comparado com os demais filtros em um ambiente sem sinais adiantados em relação à temporização do detector, isto é, $\mathbf{a}_j = 0, \forall j < 0$. Esta informação valiosa foi levada em conta durante o projeto do OF Livre, assim, não foi necessário implementar a imunidade a tais sinais com $j < 0$.

O banco de dados deste teste é praticamente o mesmo que do teste anterior, havendo apenas esta remoção dos sinais com $j < 0$.

Os resultados do teste foram representados nas figuras 24 e 25.

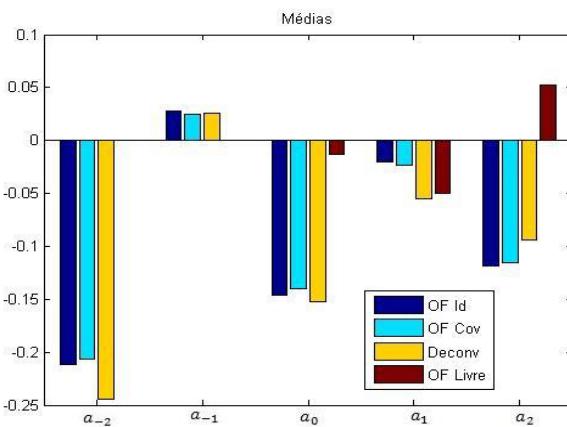


Figura 24 – Erro médio das respostas dos filtros sem sinais adiantados

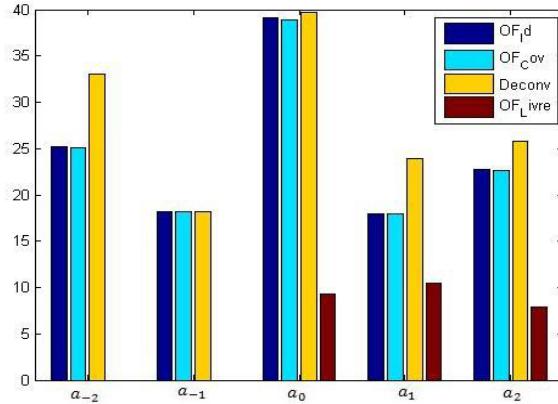


Figura 25 – Variância do erro das respostas dos filtros sem sinais adiantados

7.3 TESTE COM ALTA LUMINOSIDADE PARA UM BANCO DE DADOS DE UM CANAL DO TILECAL

O passo seguinte com as simulações é passar a testar dados reais. De alguns bancos de dados de colisão do ATLAS foram extraídos dados cuja distribuição se aproximasse de uma gaussiana. Esta abordagem e os testes foram realizados sobre os dados de menor e maior luminosidades possíveis.

Seguem nas figuras 26 e 27 as matrizes de covariância para luminosidades baixa e alta, respectivamente para os dados da "região gaussiana" (metade esquerda da matriz) e do banco completo (metade da direita).

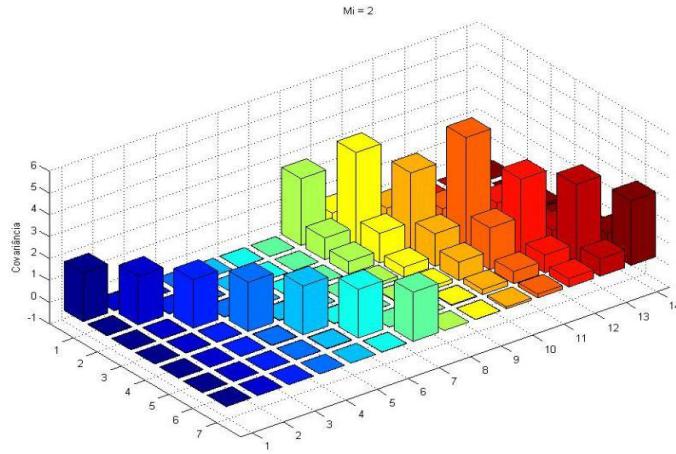


Figura 26 – Matrizes de covariância de ruído para baixa luminosidade

Por fim, as matriz de covariância das "regiões gaussianas" são representadas em separado nas figuras 28 e 29.

Com os dados referentes a estas regiões gaussianas separados, foram aplicados os filtros OF_{Id} , OF_{Cov} e de Deconvolução. Seus resultados são expressos nas figuras de 30 a

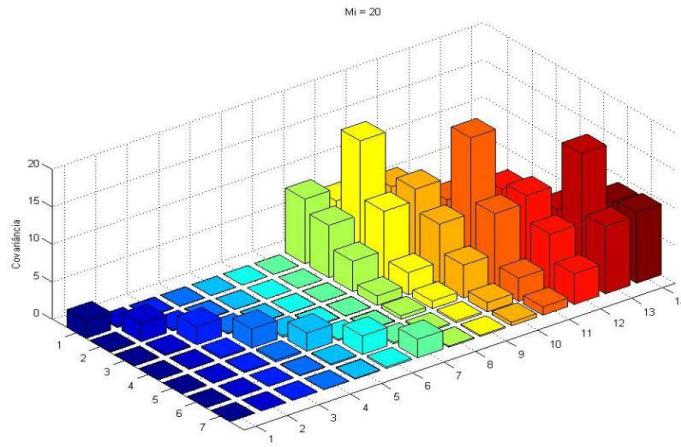


Figura 27 – Matrizes de covariância de ruído para alta luminosidade

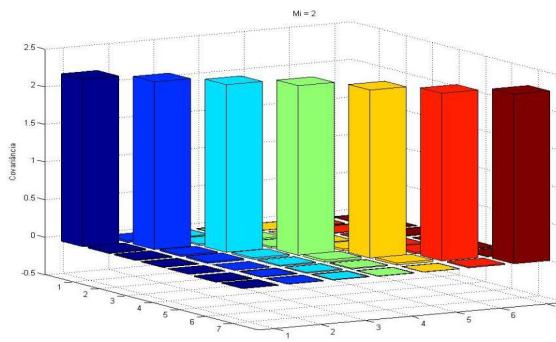


Figura 28 – Matriz de covariância "gaussiana" para baixa luminosidade

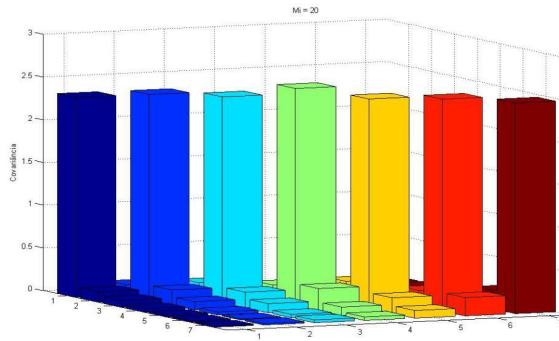


Figura 29 – Matriz de covariância "gaussiana" para alta luminosidade

33.

Note que há diferença significativa de performance para todos os filtros aplicados quando o ambiente muda de baixa para alta luminosidade.

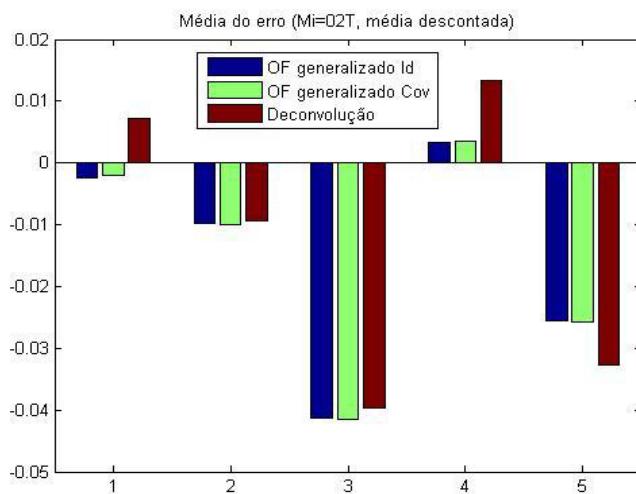


Figura 30 – Erro médio para baixa luminosidade

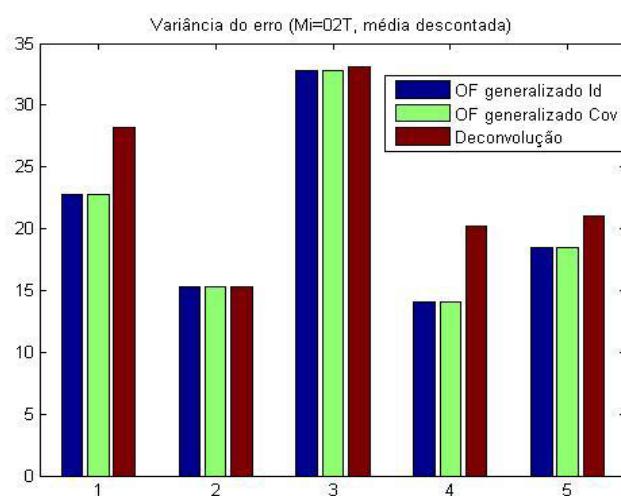


Figura 31 – Variância para baixa luminosidade

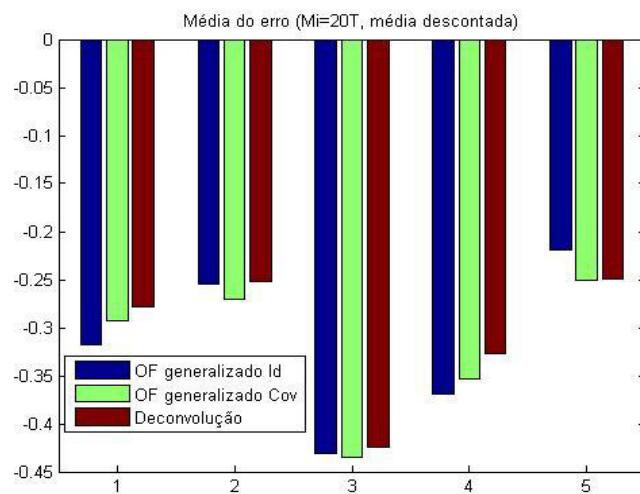


Figura 32 – Erro médio para alta luminosidade

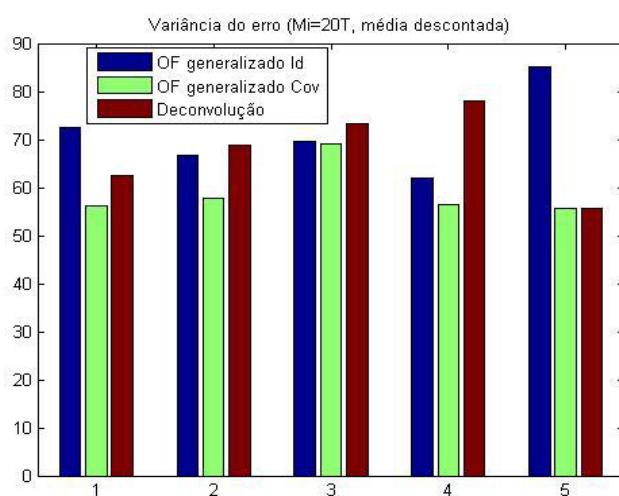


Figura 33 – Variância para alta luminosidade

8 RESULTADOS

8.1 QUANTO À DETECÇÃO DE SINAIS CENTRAIS

Este tópico, apesar de ter tomado a menor parte das discussões é de grande importância. Não só serviu de base para os demais casos, mas é a situação em que a maior parte das detecções é ocorrida. Na comparação OF contra filtro casado, o filtro casado apresentou vantagens em todas as situações de banco de dados real. Deve-se ressaltar que nestes casos a luminosidade era baixa ou moderada, todos os eventos estavam bem sincronizados e o ruído era gaussiano branco.

Entretanto, em ambientes mais hostis, principalmente quando o ruído começa a ser autocorrelacionado, é necessário que o filtro faça previsões de seu comportamento. Neste caso o OF tem vantagem.

Como, para detecções bem sincronizadas em que não há sinais defasados predomina-se o ambiente de ruído branco com alta SNR, é preferível o uso do filtro casado.

8.2 QUANTO À DETECÇÃO DE SINAIS DEFASADOS

Dos testes realizados com simulação de sinais defasados simultâneos, pode-se notar que em todos eles há uma vantagem do OF generalizado, mesmo que seja aparentemente pouca. Seu projeto voltado para a minimização dos efeitos de flutuação do ruído, se adaptando a suas características lhe confere uma resposta com margem de erro mais estreita. Conceitualmente não haveria vantagem alguma em se optar pelo OF_{Id} em detrimento do OF_{Cov} .

Entretanto, deve-se levar em consideração dois pontos; o real ambiente em que haverá detecção e o esforço computacional envolvido. Observe que para haja vantagem significativa em performance do OF generalizado foi necessário utilizar ambientes de altíssima luminosidade até mesmo para os padrões mais elevados do detector ATLAS. Um rigor tão alto começa a perder o sentido quando outras características do projeto são sacrificadas.

É importante também poupar a unidade de processamento de esforços desnecessários. No quesito de eficiência computacional, Deconvolução e mesmo OF_{Id} levam vantagem, pois são filtros que não precisam de uma matriz de covariância calculada sobre um banco de dados de ruído imenso para sua modelagem. Assim, bastaria calcular o vetor de pesos do filtro uma única vez para ambos os casos. Portanto, caso a capacidade de processamento online se torne um gargalo para o projeto, estes seriam os filtros mais indicados, restando escolher o filtro mais confiável para o ambiente em questão. Entretanto, no geral, OF_{Id} leva vantagem.

9 SUGESTÃO

Apesar de toda a vantagem que o uso do OF generalizado, especificamente o OF_{Cov} , apresentou, este não é necessariamente o melhor filtro a ser utilizado, mesmo quando a unidade de processamento é robusta o suficiente ou mesmo quando o processo tem um prazo estendido. Isto se deve ao fato observado de que quanto mais restrições impostas ao OF, mais imprecisa será a sua resposta. Ou seja, quanto mais condições são impostas ao filtro, mais incertezas a essa condição são injetadas na filtragem a cada evento.

No dilema entre imposição de imunidades e estimativa de amplitudes, surge a necessidade de se dividir o processamento em duas etapas; a primeira é a simples detecção e a segunda é a estimativa de amplitudes. Duas possibilidades para esta primeira etapa são descritas a seguir.

9.1 Reconstrução em duas etapas

Na primeira, seu funcionamento se baseia nos testes realizados para o OF simples. São projetados um OF simples para cada sinal defasado, sem qualquer restrição aos demais sinais. Estes filtros seriam aplicados em um primeiro momento às palavras recebidas e um corte em amplitude para cada uma das defasagens retorna simplesmente se uma detecção ocorreu ou não. De posse destes resultados, seriam aplicados os OFs destas defasagens, desta vez projetados com as restrições aos demais sinais desta vez já comprovadamente presentes e pouRANDO aos demais. Sua eficiência seria próxima à do filtro OF_{Livre} das figuras 24 e 25 para os casos em que um ou dois pulsos de referência apenas são encontrados.

Na segunda, poderia ser aplicado a Deconvolução e, também, os testes de limiares para cada temporização do sinal de referência. Apesar da Deconvolução ter apresentado eficiência menor para a reconstrução de energias, é filtro de aplicação mais fácil e rápida, dispensando a estimativa da matriz de covariância de ruído e, portanto, continuando válido para mudanças relativamente pequenas da caracterização deste. A exemplo da sugestão anterior, os sinais cuja energia estimada supere os limiares pré-estabelecidos passarão a filtros ótimos generalizados direcionados para os sinais encontrados, maximizando também a fidelidade dos sinais reconstruídos.

O grande problema por trás de ambas as técnicas seria o enorme banco de dados necessário para armazenar $2^7 - 1 = 127$ ($127 + 7 = 134$ para a segunda sugestão) filtros para cada PMT e o tempo do processamento. Para o primeiro caso deve-se usar o tempo que seria apenas para a aplicação de um OF sem restrições para aplicar os 7 filtros sem restrições de imunidade, decidir a ocorrência de eventos para cada aplicação e ainda carregar os pesos do filtro eleito pela etapa de detecção. Apesar de ser um filtro mais simples, a Deconvolução também deveria aplicar, agora 6 filtros individuais, testar limiares e então selecionar e carregar o filtro final escolhido.

9.2 Fatores de correção

Apesar disso, o primeiro caso tem uma vantagem em relação ao segundo. Como as reconstruções prévias de cada sinal deslocado foi realizada com filtros ótimos sem restrições extras que se baseiam na mesma matriz de covariância de ruído que cada um dos demais OFs, as amplitudes estimadas são relacionadas, podendo se fazer a correção das amplitudes estimadas já com os valores encontrados para cada sinal aprovado na primeira etapa individualmente, em vez se aplicar novo filtro ao sinal original. Esta seção propõe também uma outra sugestão à segunda etapa da reconstrução, que deve ser combinada, obrigatoriamente, à primeira sugestão da reconstrução em duas etapas.

Como os sinais são sobrepostos aditivamente e os todos os filtros aplicados até aqui são lineares, retomemos à equação 6.2 e apliquemos o filtro ótimo como na equação 6.3. A amplitude estimada é para o sinal de distanciado temporalmente do sinal central em i amostras é

$$A_i = W_i^T \mathbf{R} \quad (9.1)$$

Expandindo \mathbf{R} em todos os sinais possivelmente presentes,

$$A_i = W_i^T \cdot \left(\sum_j a_j \mathbf{S}_j \right) \quad (9.2)$$

$$A_i = \sum_j a_j \cdot (W_i^T \mathbf{S}_j) \quad (9.3)$$

Defina então c_{ij}^T .

$$c_{ij} := W_i^T \mathbf{S}_j \quad (9.4)$$

Note, então, que podemos reformular a expressão 9.2 como

$$\mathbf{A} := \mathbf{c}\mathbf{a} \quad (9.5)$$

em que

A Vetor coluna de amplitudes estimadas na primeira etapa

c Matriz dos fatores c_{ij} anteriormente definidos

a Vetor coluna das amplitudes reais a serem reconstruídas

No caso de todos os sinais laterais estarem presentes, bastaria inverter a matriz \mathbf{c} para a obtenção de todas as amplitudes. No entanto, como buscamos a minimização da imprecisão do valor obtido para os a_i , devemos excluir do cálculo as amplitudes já descartadas na primeira etapa. Para isso defina ainda a matriz $\mathbf{k}[i_1, \dots, i_m]$. Esta matriz contém informações relacionadas apenas aos sinais S_{i_1}, \dots, S_{i_m} presentes no evento. Portanto, excluindo as linhas e colunas i diferentes de i_1, \dots, i_m .

Podemos, portanto, aplicar a matriz inversa à $\mathbf{k}[i_1, \dots, i_m]$, chamada aqui de matriz de fatores de correção $\mathbf{f}[i_1, \dots, i_m] = k^{-1}[i_1, \dots, i_m]$.

$$\mathbf{a} := \mathbf{f}\mathbf{A} \quad (9.6)$$

Esta técnica garante uma utilização de matrizes menores (portanto aplicação mais rápida) e com a mesma resposta que a aplicação do filtro ótimo em duas etapas, em que as restrições são conduzidas de modo a maximizar a fidelidade das amplitudes reconstruídas.

REFERÊNCIAS

- [1] Luciano Manhães de Andrade Filho. Detecção e Reconstrução de Raios Cósmicos Usando Calorimetria de Altas Energias. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [2] Davis Pereira Barbosa. Reconstrução de Energia Para Calorimetria em Física de Altas Energias Utilizando Técnicas Baseadas em Representação Esparsa. Defesa de Qualificação para Doutorado. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.
- [3] Fernando Miranda Vieira Xavier. Recepção do Sinal de Múons no Calorímetro Hadronico do Experimento ATLAS. Dissertação; Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.
- [4] Página online do CERN. *Website:* cern.ch.
- [5] Página online do Projeto ATLAS. *Website:* atlas.ch.
- [6] Estados membros do CERN. *Website:* <http://home.cern/about/member-states>
- [7] The CERN Collaboration. “CERN - the European Organization for Nuclear Research”. *Website:* <http://public.web.cern.ch/public/>, Janeiro 2012.
- [8] The ATLAS Collaboration. “ATLAS Collaboration”. *Website:* <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Collaboration/>, Janeiro 2012.
- [9] The ATLAS Level-1 Trigger Group. *ATLAS Level-1 Trigger - Technical Design Report*. Relatório Técnico ATLAS TDR-12, CERN, 1998.
- [10] THE ATLAS COLLABORATION. *Liquid Argon Calorimeter Technical Design Report*. Relatório Técnico CERN/LHCC 96-41, CERN, 1996.

ANEXO A – Sistema de Coordenadas do ATLAS

Ao longo do detector ATLAS, a trajetória dos feixes de prótons até a colisão é retilínea. Após o choque, prótons e seus fragmentos são espalhados ao longo de todo o ângulo sólido de 4π , com origem no centro geométrico deste cilindro, em novas trajetórias retilíneas. Neste contexto, torna-se mais eficaz um mapeamento do detector baseado nas angulações das trajetórias geradas no plano da seção reta do cilindro e com ele próprio, quando confrontado com o sistema cartesiano. De fato, uma abordagem como o sistema de coordenadas esféricas torna-se mais viável, com as variáveis ϕ e θ constantes e r variando de 0 a inf para a trajetória de cada partícula resultante das colisões.

Basta determinar estas duas angulações para se obter toda a trajetória de uma partícula gerada no detector ATLAS, considerando ela sempre retilínea gerada exatamente no centro do detector. Por este motivo usa-se o par (η, ϕ) . Veja a figura 34.

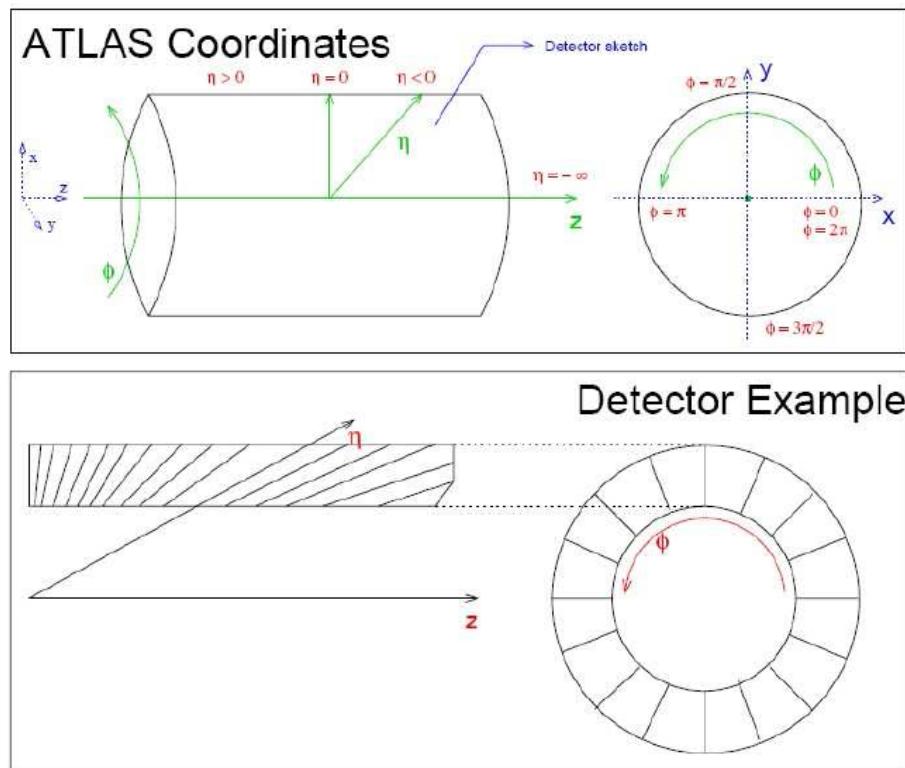


Figura 34 – Sistema de coordenadas do Projeto ATLAS

O ângulo azimutal ϕ pode ser identificado na imagem. Já o ângulo zenital θ é expresso na variável η , chamada pseudo-rapidez. A pseudo-rapidez é dada por

$$\eta = -\log \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (\text{A.1})$$