

Redes Neurais como um método de redução do *Crosstalk* entre sensores no calorímetro eletromagnético do experimento ATLAS.

Marton S. dos Santos
Paulo C. M. A. Farias
Eduardo F. de Simas Filho
Laboratório de Sistemas Digitais - LSD,
UFBA, Salvador, Brazil
msandesd@cern.ch
paulo.farias@ufba.br
eduardo.simas@ufba.br

Bertrand Laforge
*Laboratoire de Physique Nucléaire
et de Hautes Energies - LPNHE*
Sorbonne, Paris, France
laforge@lpnhe.in2p3.fr

José M. de Seixas
Laboratório de Processamento
de Sinais - LPS, COPPE/Poli
UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil
seixas@lps.ufrj.br

Resumo—ATLAS is the biggest experiment of the LHC accelerator complex at CERN. It is located at one of the collision points in the accelerator tunnel and is composed of a set of specialized sub-detectors to characterize the particles produced by LHC's collisions. One of those specialized detectors is the liquid argon (LAr) calorimeter, with around 187k sensors cells to characterize electromagnetic showers. The LAr has a high cell density, which in association with the high collision rates and the mechanical and electronic structure of the detector readout, produce crosstalk (XT) effects between sensor-cells. XT degrades the reconstruction of energy and time of incident particles. To treat this challenge a electromagnetic shower simulator based on ATLAS LAr was developed, together with a machine learning approach to mitigate the XT effects. The results indicate that the high energies are reconstructed very close to the target, and on other hand, low energies needs a specialized method to treat and normalize data before applying a neural network to reconstruct energies.

Index Terms—ATLAS, Electromagnetic Calorimeter, Liquid Argon (LAr), Crosstalk, Neural Networks, Simulator, Regression.

Resumo—O ATLAS é o maior experimento do complexo do acelerador de partículas LHC no CERN. Está localizado em um dos pontos de colisão no túnel do acelerador e é composto de um conjunto de sub-detecores especializados para caracterizar as partículas produzidas nas colisões do LHC. Um desses detectores especializados é o calorímetro de Argônio Líquido (LAr), com cerca de 187k sensores para rastreamento e registro de chuvisos eletromagnéticos. O LAr tem uma granularidade fina e alta densidade de células que em associação com as altas taxas de colisão, estrutura mecânica e eletrônica e o sistema de leitura do detector produz efeitos de *crosstalk* (XT) entre células dificultando o processo de reconstrução da energia e do tempo de voo da partícula incidente. Para tratar este desafio, foi um desenvolvido um simulador de chuvisos eletromagnético de partículas baseado no calorímetro LAr do ATLAS, junto com uma abordagem de aprendizagem de máquina para mitigar os efeitos do XT. Os resultados indicam que para altas energias a reconstrução se aproxima dos valores alvo e, por outro lado, em baixas energias é necessário um método especializado para tratar e normalizar os dados antes de aplicar uma rede neural para reconstruir os valores das energias.

Palavras-chave—ATLAS, Calorímetro Eletromagnético, Argônio Líquido, *Crosstalk*, Redes Neurais, Simulador, Regressão.

I. INTRODUÇÃO

O ATLAS é o maior experimento do LHC (*Large Hadron Collider*) [1], que é o acelerador de partículas de maior luminosidade em operação atualmente. Os experimentos desenvolvidos no LHC buscam por respostas sobre a natureza fundamental da matéria, que agora é bem descrita pelo Modelo Padrão (MP) [2], procuram por validação de modelos físicos e por física desconhecida e nova. Este enorme conjunto de experimentos está localizado no CERN (*Centre Européen pour la Recherche Nucléaire*) na fronteira entre a França e a Suíça em um túnel a 100 metros de profundidade.

O LHC possui uma estrutura densa e complexa, constituída pelos seguintes experimentos: ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*); ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*), CMS (*Compact Muon Solenoid*), e LHCb (*Large Hadron Collider beauty*). O túnel do acelerador tem cerca de 27 km de comprimento e colisões de feixes de prótons podem ocorrer a uma taxa de até 40×10^6 vezes por segundo [1].

O ATLAS, ver Fig. 1a, é um detector de uso geral formado de um conjunto de subdetecores: detector de traços; calorímetros eletromagnético e hadrônico; e a câmara de múons seguindo seguindo a forma cilíndrica, natural, fornecida pela configuração dos feixes de colisão. O volume de dados online produzidos no ATLAS é de cerca de 68 TB/s, e esta taxa de colisão resultou, em 2010, num total de 1 PB gerados [3].

O centro do experimento ATLAS é um dos pontos de colisão dos feixes de prótons do LHC. Para absorver e medir a energia dos eventos de colisão, uma série de sensores são organizados em camadas, na tentativa de medir e identificar as várias partículas produzidas nas colisões, exceto neutrinos, ou possíveis candidatos à matéria escura, cuja produção é inferida através da conservação energia-momento da interação. A camada responsável pelo registro da energia depositada por

fótons e elétrons consiste em um calorímetro eletromagnético (EMCal) de argônio líquido (LAr) como material ativo.

A elevada densidade das células sensoras presentes no ATLAS, a estrutura mecânica e eletrônica do sistema de leitura do canais sensores do detector e os altos níveis de energia nas colisões permitem o aparecimento de efeitos de cruzamento (*crosstalk* - XT) de informação entre os canais, os quais podem ser de natureza resistiva, indutiva ou capacitiva. Como consequência, as amostras obtidas de cada célula são contaminadas por sinais das células vizinhas, afetando o processo de reconstrução do verdadeiro valor da energia que foi depositada pela partícula em cada célula.

II. ATLAS - ESTRUTURA

O ATLAS, ver Fig. 1a, possui 46 m de comprimento, 25 m de diâmetro, 7000 toneladas, e cerca de 100 milhões de sensores capazes de rastrear, medir e identificar todas as partículas produzidas nas colisões do LHC, exceto neutrinos. Este conjunto de experimentos tem mais de 3000 cientistas de 174 institutos em 38 países trabalhando nos diferentes subdetectores no ATLAS [4]. Somente os Calorímetros de LAr, ver Fig. 1b, possuem, aproximadamente, 187k canais que são divididos em barril, e duas tampas terminais.

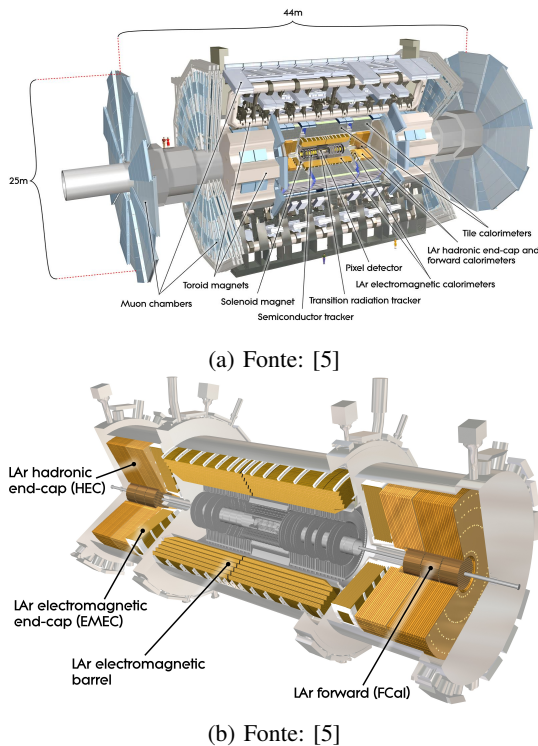


Figura 1: Detector ATLAS com seus vários subdetectores (a) e detalhe para o conjunto de calorímetros em LAr (b).

A. Calorímetro LAr - Estrutura

O calorímetro, LAr, do ATLAS é uma estrutura cilíndrica com granularidade diferente entre as camadas, ver Fig. 2, cobrindo todo o ângulo de ϕ em torno do eixo dos feixes,

e $|\eta| < 4.75^1$ [6]. As células do LAr são construídas por uma estrutura sobreposta usando diferentes materiais, ver Fig. ??; camadas de chumbo formam absorvedores nos quais os chuveiros eletromagnéticos (EM) se desenvolvem, principalmente, enquanto as lacunas polarizadas, de argônio líquido são usadas para coletar a carga de ionização produzida por e^\pm dentro do chuveiro EM durante o desenvolvimento [5], [7], [8]. Na Fig. 4 é exibida uma foto do módulo do LAr no qual a carga coletada é proporcional ao número de e^\pm no chuveiro numa célula e reflete a perda de energia pelo chuveiro naquela célula principalmente nos absorvedores de chumbo.

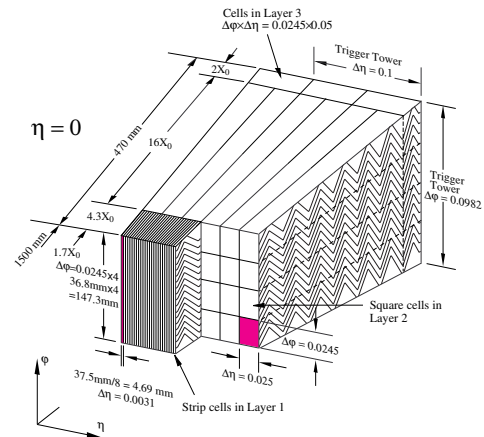


Figura 2: Diagrama de um trecho do calorímetro eletromagnético em LAr do ATLAS exibindo a diferente granularidade entre as camadas. Fonte [5]

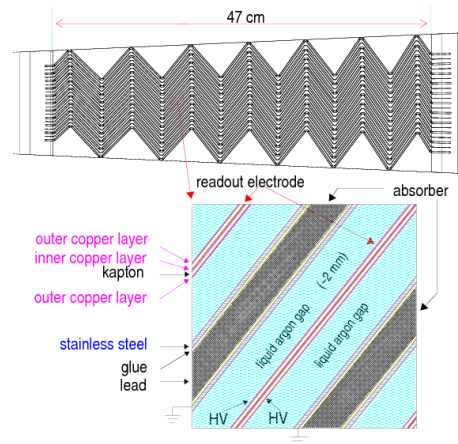


Figura 3: Diagrama da estrutura, multicamada, que compõe uma célula sensora no calorímetro LAr. Fonte: [5]

¹ $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$ - pseudorapidez - utilizada para definir o ângulo de uma partícula em relação ao eixo do feixe.

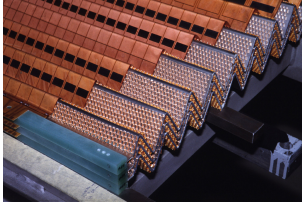


Figura 4: Fotografia de um trecho de um módulo do calorímetro LAr. Fonte: [9]

B. Sinal da célula ionizada

O bloco da Fig. 5 [10] realiza o processamento do sinal de cada célula sensora que registra um sinal proporcional à energia depositada pela partícula após a colisão, ver Fig. 6. Quatro amostras por célula são usadas para reconstruir a informação da energia e o tempo de voo da partícula utilizando a técnica de Filtragem Ótima (FO) [11], ver Eqs. (1) and (2). Infelizmente o XT afeta o sinal medido, e distorce o sinal de ionização da célula prejudicando a reconstrução.

$$A = \sum_{i=1}^4 a_i S_i \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^4 b_i S_i \quad (2)$$

onde A é a amplitude energia reconstruída, a_i são os coeficientes associados à amplitude, b_i são os coeficientes associados ao tempo de voo (τ) para a partícula e S_i são as amostras do sinal da célula.

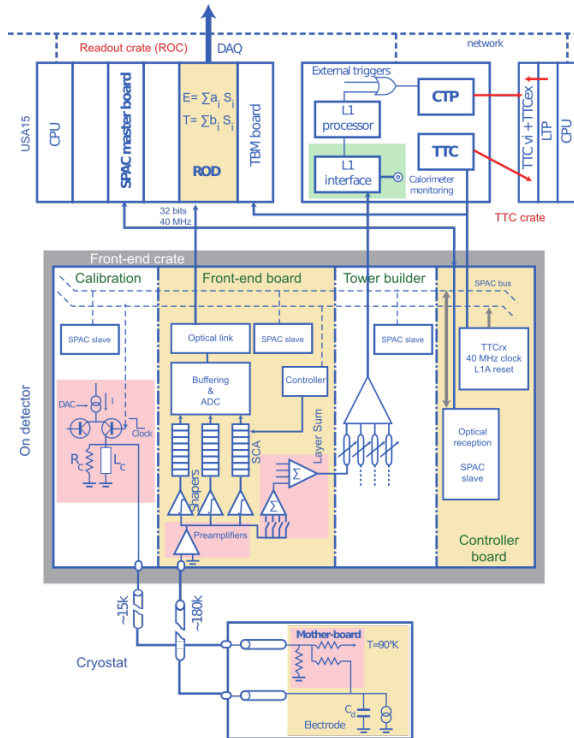


Figura 5: Arquitetura atual do sistema eletrônico de leitura e processamento dos sinais do LAr. Fonte: [10]

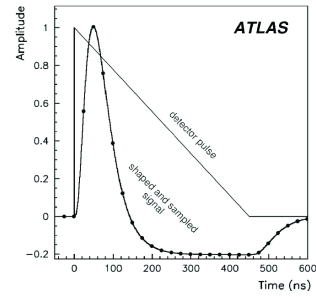


Figura 6: Sinal de ionização para uma célula do LAr sensibilizada. Os pontos indicam os instantes de amostragem, a cada 25 ns. Fonte: [5]

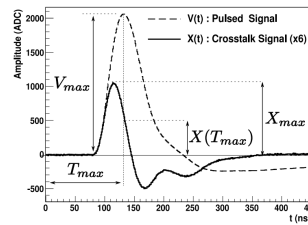
C. Sinal de XT

Nas Eqs. (1) and (2) é exibida uma descrição genérica para o cálculo dos coeficientes do FO. A Eq. (3) mostra a composição, real, de cada amostra (i) para uma célula (j) no LAr, que recebe contribuição do XT de uma célula vizinha (k). $S_j^{rec}(t_i)$ é a energia da amostra medida pelo circuito de leitura enquanto, $S_j^{truth}(t_i)$ é a amostra da energia verdadeira depositada na célula (j), $XT_{k \rightarrow j}(t_i)$ é a amostra gerada na célula (j) a partir da contribuição XT para uma célula vizinha e o sinal b_j modela a contribuição de ruído eletrônico na célula (j).

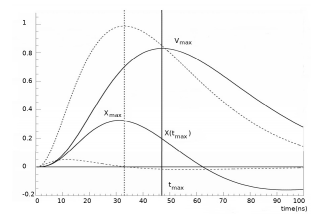
$$S_j^{rec}(t_i) = S_j^{truth}(t_i) + \sum_k XT_{k \rightarrow j}(t_i) + b_j(t_i) \quad (3)$$

Para medir os efeitos do XT, são adotadas duas definições em [12], [13], uma mais realista e mais relevante porque o sinal é amostrado neste momento, e a outra mais pessimista, mas que dá uma compreensão mais precisa do XT. As definições para o XT são:

- Pico-a-Pico – Valor percentual sinal de XT em relação à amplitude máxima do sinal de ionização registrado na célula: $X_{max} = \max(X(t)/V_{max})$;
- Sob o Pico – Percentual da amplitude do sinal de XT avaliada no instante de máxima amplitude do sinal de ionização da célula sensibilizada: $X_{tmax} = (X(t_{max})/V_{max})$;
- Um terceiro método foi introduzido em [14] para estimar a contribuição do XT utilizando, diretamente, as equações do FO, método utilizado no presente estudo.



(a) Fonte: [15]



(b) Fonte: [12]

Figura 7: Duas definições de XT: Sob pico e de Pico-a-Pico (a) e distorção no sinal de ionização casada pelo sinal de XT (b).

Existem duas consequências devidas ao XT: a primeira é a mudança na amplitude do pulso. Isto afeta o valor real da energia registrada na célula; a segunda é mais crítica para a medição do tempo, pois gera a mudança no instante de pico do pulso. Esta mudança acrescenta um erro no tempo de voo da partícula da ordem de 94 ps [14].

Algumas suposições foram consideradas no desenvolvimento deste estudo: O acoplamento XT além da primeira vizinhança não é significativo, e, de acordo com os estudos e resultados de [14], o XT resistivo não foi considerado, pois não induz deslocamento temporal ou mudanças na forma do sinal. Para estudar o XT foi escolhido uma região contendo 25 células de tamanho $(5 \times 0,025) \times (5 \times \frac{\pi}{128})$ (η , ϕ). Com estas considerações, o modelo adotado para acoplamento, na primeira vizinhança, é mostrado na Fig. 8. A célula vermelha é a célula de interesse na região, para reconstruir energia e tempo sem XT, as células amarelas são a primeira vizinhança que adicionam o acoplamento indutivo e capacitivo XT.

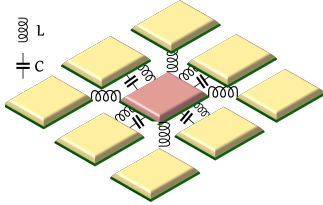


Figura 8: Modelo de acoplamento de XT capacitivo e indutivo para a célula de interesse.

Expandindo a Eq. (3) para a célula 1, por exemplo, mostra a relação detalhada com a energia na célula vizinha, ver Eq. (4). A função g_1 é a função de transferência direta para a célula de interesse, E_k^{truth} é o valor verdadeiro da energia registrada na célula vizinha k , $g_{k \rightarrow 1}^{XT}$ resume a função de transferência para acoplamento entre a célula k e a célula 1.

$$E_1^{rec}(t_i) = E_1^{truth} g_1(t_i - \tau) + \sum_{k=2}^n E_k^{truth} g_{k \rightarrow 1}^{XT}(t_i - \tau) + b_1(t_i) \quad (4)$$

III. SIMULADOR - EMSHOWER

Para permitir uma estimativa realista da energia depositada nas células, foi criado um simulador de chuva eletromagnético. O objetivo é ter uma ferramenta para investigar a melhor técnica para tratar a influência do XT, melhorar a resolução do detector e rejeitar os eventos de empilhamento para aumentar a sensibilidade do ATLAS à nova física.

Um simulador é uma ferramenta importante no campo da física das partículas e sua aplicação ajuda a avaliar novas teorias em física, como um primeiro passo, antes da experimentação. Para ser útil, o simulador deve apresentar dados consistentes com os dados experimentais.

Diferentes níveis de simulação podem ser desenvolvidos para estimar a energia depositada nas células do LAr. Um programa de simulação comumente usado é o GEANT4 (*Geometry ANd Tracking*) [16], uma estrutura de código aberto

para simular a passagem de partículas através da matéria, baseada em algoritmos MC (Monte Carlo). Tal ferramenta implementa uma vasta compreensão do processo físico e um grande número de parâmetros associados a campos magnéticos no detector ATLAS, bem como da estrutura física de cada sensor.

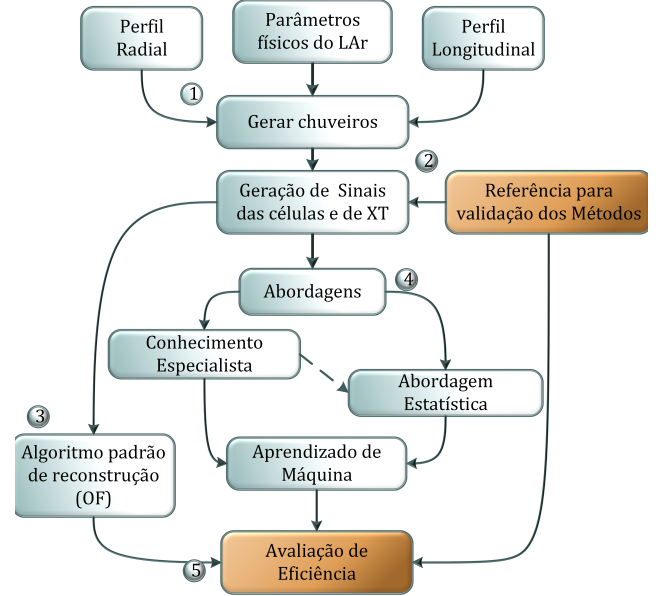


Figura 9: Fluxograma para o desenvolvimento do simulador de chuva de partículas eletromagnéticas e a abordagem em aprendizado de máquina para mitigar os efeitos do XT.

O simulador EMShower é uma ferramenta rápida de configuração e execução, em comparação com o GEANT4, e nos permite simular o desenvolvimento do chuva EM em calorímetros LAr com base em um modelo que descreve os perfis de chuva e a geometria do detector ATLAS [17], [18], ver Fig. 9.

Este simulador, EMShower, leva em conta o desenvolvimento longitudinal e radial do chuva, e suas flutuações típicas, de partículas eletromagnéticas (elétrons, pósitrons e fótons) em uma faixa de energia representativa, conforme observado no LHC, e os parâmetros realistas do LAr [19]–[21], como descrito pelo balão 1 na Fig. 9.

O segundo balão corresponde à geração de sinais elétricos induzidos em uma célula do LAr e de sinais XT. Esses sinais são usados para estudar novos algoritmos para extrair energia e tempo em cada célula enquanto mitigam os efeitos XT usando as abordagens estatísticas ou de aprendizagem de máquina. Um ponto a mencionar é que os métodos não supervisionados (PCA e NLPCA) foram avaliados mas não produziram resultados significativos para reconstruir a informação de energia sem a influência XT.

O terceiro balão descreve o método de reconstrução de referência usado hoje no ATLAS para reconstruir energia e tempo para validar qualquer novo método em desenvolvimento.

IV. REDES NEURAIAS PARA TRATAR O XT

Uma abordagem usando redes neurais (RN) foi desenvolvida para mitigar a influência XT. Esta abordagem é usada em HEP (*High Energy Physics*), em trabalhos anteriores a 1988, para um conjunto de tarefas como o filtragem, rastreamento de partículas e reconstrução da energia de colisões [22]–[24].

Para tratar o problema com XT em células, construímos um conjunto de dados simulados com 4000 *clusters* usando o simulador EMshower (seção III) com as seguintes características:

- Sinal de cada uma das células do *cluster*;
- Elétron com 50 GeV de energia de amplitude em uma distribuição normal em um ponto com η , ϕ fixos;
- Sinal de ruído com distribuição normal e 50 MeV de amplitude;
- Modelo de função de transferência para o acoplamento capacitivo entre duas células num canal de leitura com amplitude de 4,2% [14] do nível de energia da célula vizinha (definição de pico-a-pico);
- Função de transferência do acoplamento indutivo com 2,7% (definição pico a pico) do sinal das células vizinhas também foi desenvolvida.

A. Método

Na tabela I é exibida a organização dos dados vindos do *cluster* 5×5 construídos em torno da célula de impacto. Pode-se ver que a energia máxima foi depositada em quatro células (amarelas), com distribuição simétrica de energia ao redor do centro dessas quatro células. Em laranja, é indicado o ponto de impacto escolhido.

$\phi \backslash \eta$	-0.025	0.000	0.025	0.050	0.075
$\frac{\pi}{128}$	0.65e-03	2.30e-03	2.30e-03	0.65e-03	0.17e-03
0.000	2.43e-03	9.85	9.85	2.43e-03	0.30e-03
$\frac{\pi}{128}$	2.43e-03	9.85	9.85	2.43e-03	0.30e-03
$\frac{2\pi}{128}$	0.65e-03	2.30e-03	2.30e-03	0.65e-03	0.17e-03
$\frac{3\pi}{128}$	0.17e-03	0.28e-03	0.28e-03	0.17e-03	0.08e-03

Tabela I: Energia nas células da segunda camada do LAr, em um *cluster*, típico, simulado para um chuveiro eletromagnético de um elétron com ruído e XT. Neste *cluster*, a energia máxima foi depositada em quatro células (amarelas), e a distribuição de energia é simétrica ao redor do centro destas quatro células, e a cor laranja indica o ponto de impacto escolhido.

A célula central define o centro de um *cluster* de 3×3 , levando em conta as primeiras células vizinhas, cada uma com suas respectivas 4 amostras temporais, conforme implementado na eletrônica da placa *front-end* ATLAS (cada amostra é tomada 25 ns após a anterior) com contribuição de ruído e XT capacitivo e indutivo. Este vetor, com 36 sinais, foi usado como entrada para redes neurais para treinamento e reconstrução do valor energético de cada célula, Fig. 10.

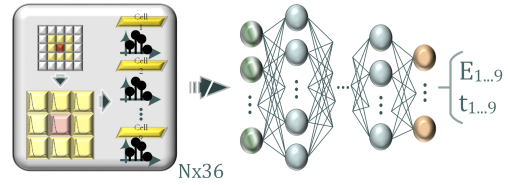


Figura 10: Diagrama para organização de dados e a abordagem usada para avaliar uma RN para a tarefa de regressão da energia depositada nas células sem XT.

Os parâmetros utilizados no treinamento das redes para reconstruir a energia das partículas a partir das amostras foram os seguintes:

- 4000 eventos foram produzidos com o EMshower;
- Camada de Entrada: 36 neurônios;
- Camada de Saída: 9 neurônios;
- N° de camadas ocultas avaliadas: [1, 2, 3];
- N° de neurônios na camada oculta avaliados: [5, 10, 15, 20, 25];
- N° máximo de épocas: 5000;
- Critério de parada: Mínimo MSE avaliado entre a saída da rede e os valores alvo de referência;
- Validação cruzada: *k-fold* - 9 subconjuntos para treinamento e um subconjunto para teste;
- Arquitetura: MLP;
- Função de ativação: Entrada e camada oculta - relu, e camada de saída - sigmoid;

V. RESULTADOS

A seguir, será mostrada a estrutura de rede neural que reconstruiu a energia das células do *cluster* construído em torno da célula que registrou a maior energia.

	Ref.	FO	[36 - 20 - 9] Neur.	
	Energia [GeV]	Energia [GeV]	Energia [GeV]	MSE
C1	9,86E+00 ± 1,42E-01	1,01E+01 ± 1,50E-01	9,86E+00 ± 1,27E-01	2,92E-03
C2	9,86E+00 ± 1,40E+02	1,01E+01 ± 1,47E-01	9,84E+00 ± 1,27E-01	2,44E-03
C3	2,43E-03 ± 3,35E-05	2,49E-03 ± 3,53E-05	2,09E-03 ± 5,21E-04	4,40E-07
C4	9,86E+00 ± 1,45E-01	1,01E+01 ± 1,52E-01	9,86E+00 ± 1,16E-01	2,88E-03
C5	9,86E+00 ± 1,42E-01	1,01E+01 ± 1,52E-01	9,86E+00 ± 1,31E-01	3,59E-03
C6	2,44E-03 ± 3,37E-05	2,49E-03 ± 3,59E-05	2,08E-03 ± 5,30E-04	4,65E-07
C7	2,31E-03 ± 3,31E-05	2,35E-03 ± 3,57E-05	1,97E-03 ± 4,95E-04	4,03E-07
C8	2,30E-03 ± 3,12E-05	2,35E-03 ± 3,36E-05	1,96E-03 ± 5,04E-04	4,19E-07
C9	6,52E-04 ± 9,47E-06	6,66E-04 ± 9,87E-06	5,30E-04 ± 1,65E-04	4,91E-08

Tabela II: A primeira coluna são as células do *cluster*, a segunda, energias alvo, a terceira, a resposta do FO, a quarta, a saída da melhor RN usando 36 neurônios de entrada, uma camada oculta com 20 neurônios, 9 neurônios de saída. A última coluna é a MSE entre RN e os alvos.

As Figs. 11 and 12 mostram os histogramas para a energia reconstruída em cada célula pela melhor RN avaliada, em comparação com o método padrão FO usado para reconstruir a energia das células. As Figs. 13 and 14 mostram, os gráficos de dispersão para o alvo e a saída da RN para cada célula. Para as células com alta energia, a RN reconstrói a energia da célula sem a influência XT próxima aos alvos.

Quando a energia da célula é baixa, a RN não alcança bons resultados em comparação com as altas energias. Em baixas

energias, a RN mostra uma grande dispersão que pode ser vista nas Figs. 13 and 14. Outro fato interessante é a diferença na ordem de magnitude entre as energias altas e baixas, até 3 ordens de magnitude que poderiam acrescentar mais dificuldade para a RN otimizar seus pesos e evitar enviesamento. Este ponto será investigado na sequência dos estudos para melhorar estes resultados. Portanto, para reconstruir valores de energia elevados sem a influência do XT, esta estrutura de RN poderia ser uma opção interessante, mas, para as energias mais baixas, é necessário desenvolver um método específico como uma etapa de pré-processamento para processar os sinais das baixas energias com a mesma resposta das altas energias, reduzindo a flutuação e espalhamento observados nos histogramas e gráficos de dispersão [25].

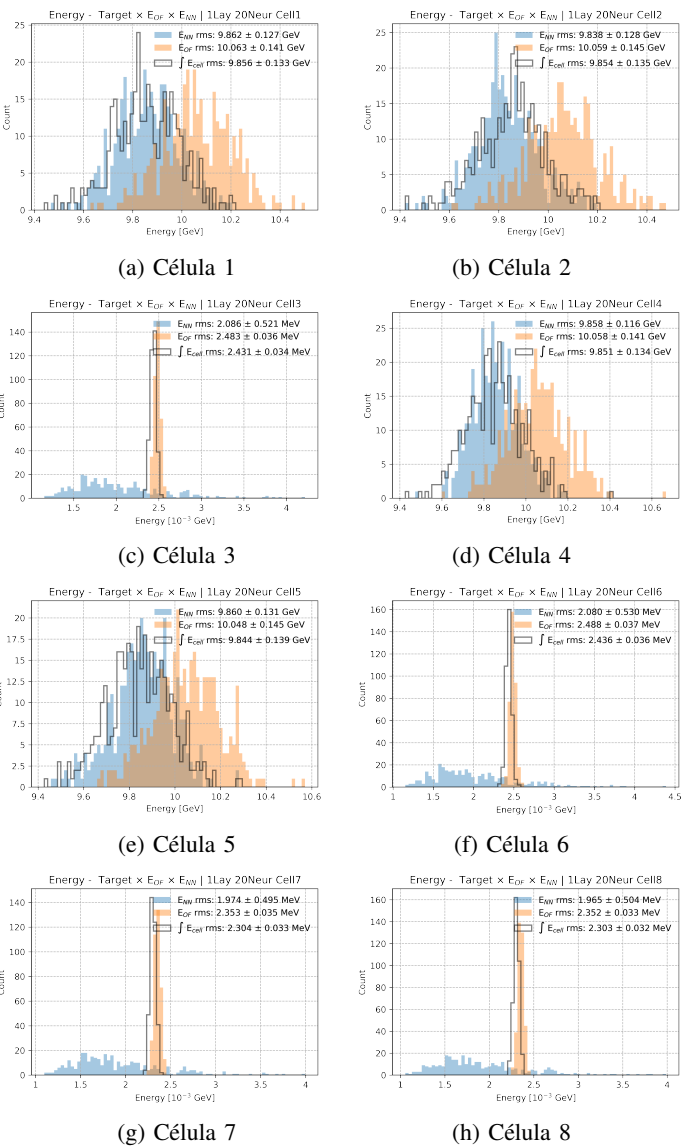


Figura 11: Histogramas para reconstrução da energia nas células do *cluster* 3×3. Em azul a saída da RN, em laranja a saída do Filtro Ótimo e a linha preta os valores alvo de energia

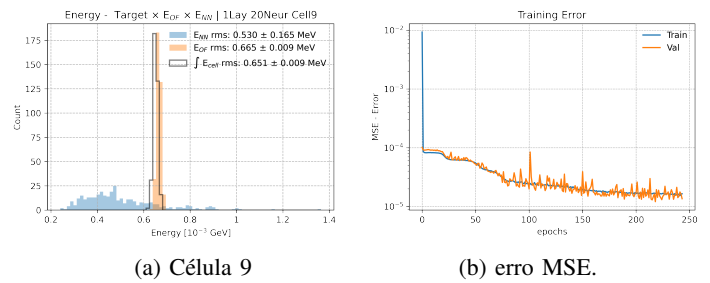


Figura 12: Histogramas para reconstrução da energia na célula 9 do *cluster* 3×3. Em azul a saída da RN, em laranja a saída do Filtro Ótimo e a linha preta os valores alvo de energia. E curva de MSE para o treinamento e teste da RN.

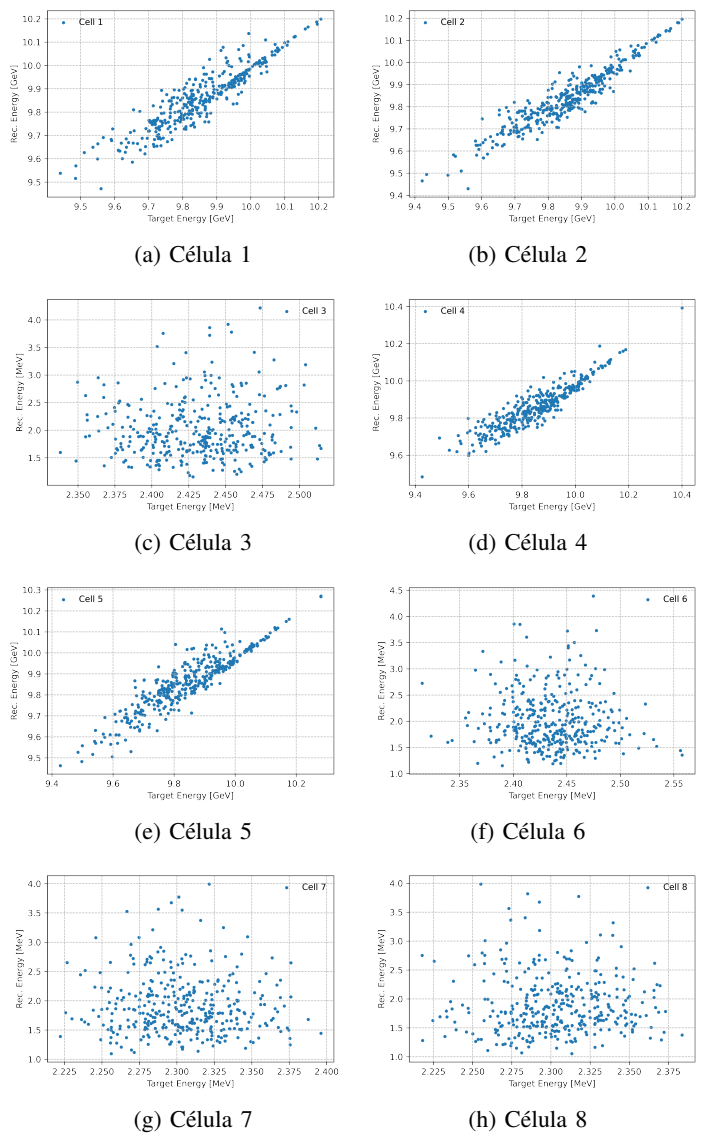


Figura 13: Gráfico de dispersão para a energia reconstruída nas células do *cluster* 3×3.

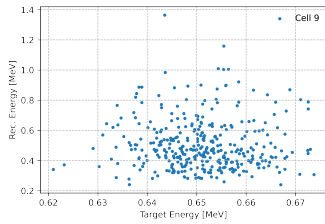


Figura 14: Gráfico de dispersão para a energia reconstruída na célula 9 do *cluster* 3×3 .

Como é mostrado nas Figs. 13 and 14, para as células com baixa energia os valores de reconstrução têm uma grande dispersão que indica que a RN não consegue reconstruir bem baixos valores de energia (ver Figs. 11c, 11f, 11g, 11h and 12a), como em células com alta energia (ver Figs. 11a, 11b, 11d and 11d).

VI. CONCLUSÃO

Desenvolver um método para mitigar a influência XT no calorímetro do ATLAS LAr é um desafio de engenharia interessante. Para tratar este problema foi necessário desenvolver um simulador de chuva de partículas eletromagnéticas, EMshower, que tem a flexibilidade de testar um conjunto de configurações para reproduzir as situações encontradas no detector ATLAS. Uma abordagem em avaliação usando RN para reconstruir a energia registrada em cada célula gerou resultados promissores para reconstruir altas energias, mas tem um desempenho limitado no trabalho com baixas energias. Os resultados da RN sugerem que é necessário acrescentar uma etapa específica de pré-processamento para tratar e normalizar as energias para níveis que forneçam informações à RN para remover o XT e reconstruir níveis baixos de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da FAPESB, FAPERJ, RENAFAP, CNPq e CAPES. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Evans and P. Bryant, “LHC machine,” *Journal of Instrumentation*, vol. 3, no. 08, pp. 1–158, aug 2008.
- [2] M. A. Moreira, “O modelo padrão da física de partículas,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 31, no. 1, pp. 1–158, 2009.
- [3] W. S. Freund, “Algoritmo neural para detecção de partículas em um calorímetro de altas energias,” 2011. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11422/8148>
- [4] ATLAS Collaboration, “Observation of an excess of events in the search for the Standard Model Higgs boson in the gamma-gamma channel with the ATLAS detector,” CERN, Geneva, Tech. Rep. ATLAS-CONF-2012-091, Jul 2012. [Online]. Available: <http://cds.cern.ch/record/1460410>
- [5] N. Nikiforou, “Performance of the atlas liquid argon calorimeter after three years of lhc operation and plans for a future upgrade,” in *2013 3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA)*, June 2013, pp. 1–12.
- [6] G. Aad, B. Abbott *et al.*, “Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC run 1,” *Eur. Phys. J.*, vol. C77, p. 490, 2017.

- [7] B. Aubert, J. Ballansat *et al.*, “Development and construction of large size signal electrodes for the atlas electromagnetic calorimeter,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A*, vol. 539, no. CERN-PH-EP-2004-019, pp. 558–594, 43 p, May 2004. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/737956>
- [8] R. Wigmans, *Calorimetry: Energy Measurement in Particle Physics*, 2nd ed., ser. International Series of Monographs on Physics, 107. Oxford Scholarship Online, 2017.
- [9] V. Hedberg, (2009) The ATLAS experiment. [Online]. Available: <http://hedberg.web.cern.ch/hedberg/home/atlas/atlas.html>
- [10] H. Chen, “Readout electronics for the atlas lAr calorimeter at hl-lhc,” *Physics Procedia*, vol. 37, pp. 1720–1729, 2012, proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2011).
- [11] W. Cleland and E. Stern, “Signal processing considerations for liquid ionization calorimeters in a high rate environment,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 338, no. 2, pp. 467 – 497, 1994.
- [12] J. Colas, C. de La Taille *et al.*, “Crosstalk in the ATLAS electromagnetic calorimeter; preliminary version,” CERN, Geneva, Tech. Rep. ATL-LARG-2000-004, Oct 1999. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/683952>
- [13] F. Hubaut, “Crosstalk measurements in the em barrel module 0 from 99’, may 00’ and july 00’ beam tests,” CERN, Geneva, Tech. Rep. ATL-LARG-2000-009, Oct 2000.
- [14] A. LOPEZ SOLIS, “Contribution to the energy and time measurement of electrons and photons in the atlas experiment and search for dark matter production in association to a higgs boson,” Jul 2017, CERN-THESIS-2017-214. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2291698>
- [15] J. LABBÉ and R. Ishmukhametov, “Crosstalk Measurements in the Electromagnetic Calorimeter during ATLAS Final Installation,” CERN, Geneva, Tech. Rep. ATL-LARG-INT-2009-004. ATL-COM-LARG-2008-012, Dec 2008.
- [16] S. Agostinelli *et al.*, “Geant4—a simulation toolkit,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 506, no. 3, pp. 250 – 303, 2003.
- [17] ATLAS Collaboration, *ATLAS detector and physics performance: Technical Design Report, 1*, ser. Technical Design Report ATLAS. Geneva: CERN, 1999. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/391176>
- [18] Particle Data Group *et al.*, “Review of particle physics,” *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2020, no. 8, 08 2020, 083C01. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
- [19] G. Grindhammer, M. Rudowicz, and S. Peters, “The fast simulation of electromagnetic and hadronic showers,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 290, no. 2, pp. 469 – 488, 1990.
- [20] G. Grindhammer and S. Peters, “The parameterized simulation of electromagnetic showers in homogeneous and sampling calorimeters,” in *International Conference on Monte Carlo Simulation in High-Energy and Nuclear Physics - MC 93 Tallahassee, Florida, February 22-26, 1993*, 1993.
- [21] ATLAS Collaboration, *ATLAS calorimeter performance: Technical Design Report*, ser. Technical Design Report ATLAS. Geneva: CERN, 1996. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/331059>
- [22] J. Damgov and L. Litov, “Application of neural networks for energy reconstruction,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 482, no. 3, pp. 776–788, 2002. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201018514>
- [23] B. Denby, “Neural networks in high energy physics: A ten year perspective,” *Computer Physics Communications*, vol. 119, no. 2, pp. 219–231, 1999. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465598001994>
- [24] B. Humpert, “On the use of neural networks in high-energy physics experiments,” *Computer Physics Communications*, vol. 56, no. 3, pp. 299–311, 1990.
- [25] P. V. M. da Silva, “Processamento de sinais para calibração, teste e estimação de energia com um calorímetro cintilante de alta velocidade.” p. 151, July 2007. [Online]. Available: <http://pee.ufjr.br/teses/index.php?Resumo=2007073001>