

Cálculo das Eficiências e Fatores de Escala para o *Trigger* de Elétrons do ATLAS no LHC

André M. Lopes¹

UESC, Ilhéus, BA e UERJ, Nova Friburgo, RJ

Bernardo S. Peralva²

UERJ, Nova Friburgo, RJ

Edmar E. P. Souza,³ Eduardo F. S. Filho⁴

UFBA, Salvador, BA

Jose M. Seixas⁵

UFRJ, Rio de Janeiro, RJ

Resumo. Este estudo é fruto de pesquisa de doutorado realizado na UERJ e está inserido no contexto do CERN (Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear), mais especificamente no âmbito do experimento ATLAS, onde a identificação eficiente de elétrons desempenha papel fundamental na análise de processos físicos raros. Essa identificação ocorre diretamente no sistema de *trigger*, que precisa tratar rapidamente grandes volumes de dados e selecionar somente os eventos relevantes. Por isso, conhecer com precisão as eficiências associadas a esse sistema é essencial para diversas análises físicas, além de influenciar diretamente o desenvolvimento de novos algoritmos e estratégias para seleção e identificação de partículas. Entretanto, simulações feitas com técnicas de Monte Carlo não conseguem reproduzir completamente todos os efeitos reais do hardware do detector observados nos dados experimentais, exigindo, portanto, a utilização de fatores corretivos. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo central calcular a eficiência do sistema de *trigger* utilizando o método *Tag-and-Probe* em eventos contendo decaimentos do bóson Z, permitindo determinar fatores de escala que alinham as simulações Monte Carlo aos dados reais. Esses fatores são fundamentais para corrigir as eficiências obtidas nas simulações, aumentando consideravelmente a confiança e a precisão dos resultados físicos obtidos posteriormente.

Palavras-chave. Física de Altas Energias, CERN, Fatores de Escala, Sistema de *Trigger*, Simulação Monte Carlo

1 Introdução

O trabalho apresentado neste estudo foi desenvolvido no âmbito da *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire* (CERN), reconhecido internacionalmente como o maior e mais sofisticado laboratório dedicado à física de partículas. O experimento ATLAS, um dos quatro principais detectores do *Large Hadron Collider* (Grande Colisor de Hádrons - LHC), faz parte dessas instalações que abrigam o mais potente acelerador de partículas já construído.

Neste trabalho, serão discutidos alguns dos principais desafios enfrentados pelo experimento ATLAS na busca por processos físicos raros previstos pelo Modelo Padrão e além dele. Esses

¹amlopes@uesc.br

²bernardo@iprj.uerj.br

³edmar.egidio@ufba.br

⁴eduardo.simas@ufba.br

⁵seixas@lps.ufrj.br

processos frequentemente incluem elétrons em seus estados finais, o que torna essencial a precisão na identificação desses elétrons, uma tarefa complicada devido ao elevado ruído de fundo gerado principalmente por jatos hadrônicos e elétrons resultantes de conversões de fótons em cada colisão. Isso dificulta consideravelmente a tarefa dos algoritmos dedicados à filtragem e identificação de elétrons.

Geralmente, as estratégias para desenvolvimento e aperfeiçoamento dos algoritmos de *trigger*, assim como as especificações técnicas para análises físicas, utilizam dados simulados (Monte Carlo) para avaliar o desempenho do sistema de seleção de eventos. No entanto, tais simulações não conseguem reproduzir perfeitamente todos os efeitos práticos do hardware dos detectores, efeitos esses que podem ser melhor investigados com dados experimentais reais. Portanto, torna-se fundamental compreender as diferenças entre as eficiências obtidas com dados simulados e com dados experimentais, bem como as incertezas estatísticas envolvidas, as quais devem ser cuidadosamente consideradas em diversos canais físicos durante as análises. Por fim, serão apresentados alguns resultados obtidos na aquisição de dados durante o período da *Run3* no ano de 2022.

O *Large Hadron Collider* (LHC), localizado no CERN, é atualmente o acelerador de partículas mais poderoso em operação no mundo. Ele consiste em um túnel circular subterrâneo de 27 quilômetros, formado por ímãs supercondutores projetados para acelerar e colidir partículas com energias extremamente altas, alcançando luminosidades da ordem de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. As colisões ocorrem em pontos estratégicos ao redor do anel, onde estão posicionados os quatro principais experimentos: ATLAS, CMS, Alice e LHCb.

Entre os experimentos mencionados, o ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) destaca-se por ser o maior detector do LHC. Seu objetivo principal é investigar processos raros do Modelo Padrão e também buscar novos fenômenos físicos que extrapolam esse modelo. O experimento ATLAS é composto por diversos sistemas de detecção, incluindo detectores de rastreamento, calorímetros e espectrômetros para múons. O rastreador central reconstrói trajetórias das partículas carregadas, enquanto os calorímetros medem as energias depositadas pelos produtos das colisões. O calorímetro eletromagnético mede elétrons e fótons, enquanto os jatos hadrônicos são medidos pelo calorímetro hadrônico, que inclui o calorímetro de telhas (*TileCal*) e os calorímetros hadrônicos das extremidades (*Hadronic Endcap*, HEC).

Um conceito importante utilizado nas análises do ATLAS é a pseudo-rapidez (η), definida como função do ângulo polar θ em relação ao eixo do feixe, pela expressão:

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}. \quad (1)$$

Outra variável frequentemente utilizada para determinar a proximidade angular entre duas partículas detectadas é a distância angular ΔR , dada por

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}, \quad (2)$$

onde ϕ é o ângulo azimutal ao redor do feixe.

2 Sistema de *Trigger* e de Aquisição De Dados (TDAQ) Do Atlas

O sistema de *trigger* do ATLAS desempenha uma função crucial durante a coleta de dados, selecionando eventos de interesse para análise futura. Ele deve reduzir a taxa de colisão de 40 MHz para uma taxa média de eventos de saída de 1 kHz. O processo de *trigger* tem o objetivo de identificar uma ou mais partículas de um determinado tipo e acima de um determinado limite de energia ou momento transversal. Ele é composto por uma estrutura de dois níveis: o *First-Level*

(L1), implementado em hardware personalizado, e o *High Level Trigger* (HLT), que é implementado em software. O *First-Level* (L1) é baseado em objetos reconstruídos dentro das regiões de interesse (ROIs), regiões essas geradas pelo L1Calo e que serão posteriormente utilizadas pelo HLT. O HLT por sua vez, realiza a construção e identificação das partículas de interesse, levando em consideração *clusters* eletromagnéticos (EM) e a reconstrução de trajetórias (*tracks*) das partículas carregadas. Os objetos finais são então classificados como fótons, representados por *clusters* EM isolados, ou elétrons, caracterizados pela associação de um *cluster* EM a uma *track*.

O fluxo do sistema do *High-Level Trigger* (HLT) é composto por duas etapas principais: a primeira (*Fast step*), que antecipadamente rejeita eventos indesejados através de algoritmos rápidos, e a segunda etapa (*Precise step*), que aplica algoritmos mais detalhados, semelhantes aos utilizados na análise offline, para identificar eficientemente os objetos. Os algoritmos rápidos incluem a identificação baseada em redes neurais (*Ringer ID*), utilizando informações dos anéis do calorímetro, a reconstrução rápida de *clusters* em combinação com o método Ringer, e a associação das trajetórias (*tracks*) aos *clusters* eletromagnéticos. Já os algoritmos precisos empregam técnicas avançadas de análise multivariada (MVA), como o método *Likelihood* (LH), que avalia simultaneamente várias propriedades do elétron candidato a partir de PDFs para sinal e ruído de fundo, além de técnicas baseadas em Redes Neurais Profundas (DNN), que exploram múltiplas propriedades para a identificação dos elétrons.

Além disso, o Sistema de Aquisição de Dados (DAQ) é responsável por levar os dados dos componentes eletrônicos para o processamento *off-line*, de acordo com a decisão do *trigger*.

2.1 Determinação das Eficiências e Cálculo dos Fatores de Escala

No experimento ATLAS, a identificação e a reconstrução de elétrons são realizadas a partir de duas informações fundamentais: a energia depositada no calorímetro eletromagnético (EM) e a trajetória obtida pelo detector interno. Para determinar as eficiências desse processo, utiliza-se o método conhecido como *Tag-And-Probe*, que explora eventos contendo ressonâncias Z. Nesse método, é exigido um elétron altamente confiável (*Tag*) que passa por critérios rigorosos de isolamento e identificação. Outro elétron candidato (*Probe*) é então utilizado para medir as eficiências, aplicando critérios adicionais que garantem uma amostra limpa e robusta.

Para interpretar corretamente a eficiência dos *triggers*, é necessário conhecer os detalhes da identificação e do isolamento de elétrons. Durante o processo inicial de reconstrução, nem todos os objetos detectados são elétrons verdadeiros, já que o ruído de fundo pode conter jatos hadrônicos e elétrons provenientes de conversões de fótons.

Para garantir uma identificação precisa dos elétrons, o ATLAS combina diversas variáveis discriminantes, aplicando técnicas distintas que incluem abordagens baseadas em cortes fixos (*cut-based*) e em métodos probabilísticos (*likelihood*, LH). O método baseado em cortes utiliza limites específicos em variáveis discriminantes, organizados em diferentes níveis de exigência: *loose*, *medium*, *tight*, e *multilepton*, conforme descrito em [3, 4]. Já a abordagem baseada em LH aproveita funções de densidade de probabilidade (PDFs) que distinguem sinal de ruído. Semelhantemente ao método por cortes, o LH possui regimes denominados *loose*, *medium* e *very tight*, detalhados em [1, 2].

Uma etapa adicional é a aplicação de critérios de isolamento, essenciais para prevenir a identificação errônea de jatos hadrônicos como elétrons. Dois critérios principais são adotados pelo ATLAS: um baseado na energia transversa ($E_T^{\text{cone}\Delta R}$) e outro baseado no momento transverso ($P_T^{\text{cone}\Delta R}$), ambos avaliados em torno do elétron dentro de um cone definido pelo parâmetro ΔR .

A eficiência total para detectar elétrons no ATLAS pode ser representada por:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{EM\text{-cluster}} \times \varepsilon_{\text{reco}} \times \varepsilon_{ID} \times \varepsilon_{\text{iso}} \times \varepsilon_{\text{trigger}}. \quad (3)$$

Cada uma dessas componentes de eficiência é definida individualmente. A eficiência do *cluster*

eletromagnético ($\varepsilon_{EM-cluster}$) corresponde à razão entre o número de *clusters* eletromagnéticos encontrados no calorímetro ($N_{cluster}$) e o número total de elétrons produzidos (N_{all}). Já a eficiência da reconstrução (ε_{reco}) é a fração de *clusters* EM que são reconstruídos efetivamente como elétrons. Por sua vez, a eficiência de identificação (ε_{ID}) mede a capacidade de rejeição do ruído de fundo, calculada como a razão entre elétrons identificados e elétrons reconstruídos. A eficiência do isolamento (ε_{iso}) indica quantos elétrons identificados passam também pelos critérios adicionais de isolamento, enquanto a eficiência do *trigger* ($\varepsilon_{trigger}$), que é o foco central deste estudo, é dada pela proporção entre os elétrons que ativam corretamente o *trigger* específico e aqueles que cumpriram todos os critérios anteriores. Em termos simplificados:

$$\varepsilon_{trigger} = \frac{\text{Número de elétrons } probe \text{ aceitos pelo trigger}}{\text{Número total de elétrons } probe}. \quad (4)$$

Essas eficiências são aplicadas tanto em simulações Monte Carlo quanto em análises experimentais reais. Devido a discrepâncias conhecidas entre simulação e dados reais, é necessário introduzir fatores de correção para assegurar que a simulação seja fiel aos dados experimentais. Esses fatores corretivos, chamados de fatores de escala (*Scale Factors*, SF), são definidos como razões entre eficiências observadas nos dados reais (ε_{data}) e nas simulações de Monte Carlo (ε_{MC}).

3 Metodologia

Para a determinação das eficiências e dos fatores de escala (SF), foi utilizado o método conhecido como *Tag-and-Probe*, implementado através do *framework* específico para este fim. Esse método utiliza eventos contendo a assinatura característica do decaimento $Z \rightarrow ee$, onde pares de elétrons são examinados. Cada par de elétrons contém um elétron denominado *tag*, que precisa atender a critérios mais rigorosos, e outro elétron denominado *probe*, que é utilizado para o cálculo efetivo da eficiência após cumprir certos requisitos, normalmente menos restritivos. Um elétron pode desempenhar o papel de *tag* em um par e ser considerado *probe* em outro. Um requisito crucial é que a massa invariante do par deve estar dentro da janela de massa ao redor do pico do bóson Z.

Para esse trabalho, foram utilizados os dados experimentais coletados pelo detector ATLAS durante o ano de 2022 (Data22), em colisões próton-próton com energia de centro de massa de 13,6 TeV e espaçamento entre feixes de 25 ns, resultando em uma luminosidade integrada acumulada de 94 fb^{-1} [5]. Os resultados experimentais foram comparados à simulação correspondentes, denominadas MC23a. Os *triggers* analisados seguem uma nomenclatura específica, descrevendo claramente todas as condições aplicadas: tipo de partícula (por exemplo, 'e' para elétron), limiar de energia transversa exigido (ex.: e26), critérios de identificação (ex.: *lhmedium*, *lhtight*), isolamento (ex.: *ivarloose*), e itens de nível L1 utilizados como sementes para o *trigger*. Por exemplo, o item L1EM22VHI representa um *trigger* eletromagnético L1 com corte em $p_T > 22 \text{ GeV}$, com ajuste variável em função de η (V), além de aplicar isolamento tanto hadrônico (H) quanto eletromagnético (I). Inicialmente, foram estudados os seguintes *triggers*: [`'HLT_e26_lhtight_ivarloose_L1EM22VHI'`, `'HLT_e60_lhmedium_L1EM22VHI'`, `'HLT_e140_lhloose_L1EM22VHI'`]. Cada um desses *triggers* possui suas exigências específicas: o primeiro demanda E_T acima de 26 GeV com critérios *tight* para identificação e *loose* para isolamento, o segundo exige energia acima de 60 GeV com critérios médios para identificação, e o último necessita de energia acima de 140 GeV com critérios mais relaxados (*loose*). Foram também calculadas as eficiências e fatores de escala para *triggers multi-electrons*, onde um elétron deve ser aprovado por uma perna do *trigger* e o outro elétron deve ser aprovado pela segunda perna do *trigger*.

Os elétrons candidatos (*probe*) analisados devem possuir uma energia transversa mínima de 8 GeV e estar localizados na região central do calorímetro ($|\eta| < 2,47$). Entre os critérios exigidos para a seleção dos elétrons do tipo *tag* pode-se destacar o requisito do *trigger* específico

'HLT_e26_lhtight_ivarloose_L1EM22VHI', energia transversa (E_T) acima de 27 GeV, além da aplicação rigorosa de isolamento ($ptcone20_over_pt_max$), exigindo que a soma dos momentos transversos das partículas próximas (em um cone de $\Delta R = 0,2$) não ultrapasse 10% do momento transverso do elétron analisado.

Podem ser consideradas também variações consideradas para estimar o ruído de fundo, para que um elétron seja classificado como ruído de fundo em uma determinada variação, ele deve falhar nos critérios específicos de identificação ou isolamento definidos por aquela variação.

Neste trabalho, as eficiências e os fatores de escala foram obtidos para cinco (*working points*) que levam em consideração requisitos mais rígidos ou mais relaxados para identificação e isolamento.

4 Resultados

Nesta seção são apresentados parte dos resultados obtidos para as eficiências e os fatores de escala descritos anteriormente. Inicialmente, na Figura 1, são exibidos os mapas de calor das eficiências do *trigger* (e26e60e140) no *working point Tight*, tanto para os dados reais à esquerda quanto para as simulações de Monte Carlo à direita. Nesses gráficos, o eixo horizontal representa o momento transverso (p_T), o eixo vertical representa a coordenada η , e a eficiência é indicada pela escala de cores. É importante destacar que, para esse conjunto de *triggers*, concentramos nossos esforços em valores de p_T superiores a 25 GeV, região onde ocorre o início da curva conhecida como *turn-on curve*. Ao comparar os resultados dos dados reais com os de Monte Carlo, é possível notar claramente diferenças significativas, o que reforça a importância dos fatores de escala calculados neste trabalho.

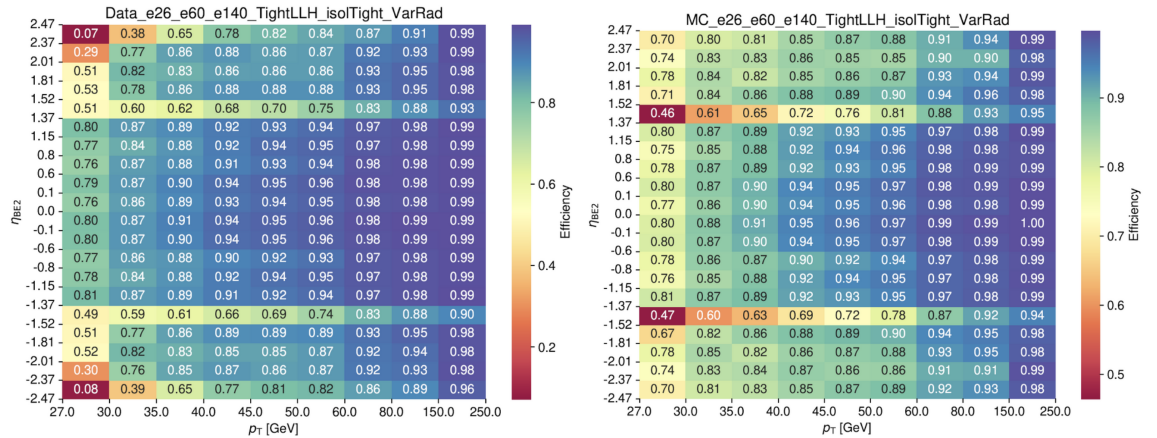


Figura 1: Eficiências do *trigger* e26e60e140 e *working point tight*. Fonte: O Autor, 2024.

Ao focarmos em apenas uma variável (momento transverso ou pseudo-rapidez) conseguimos ter uma visão geral da eficiência em todo intervalo utilizado, na Figura 2 apresentamos as eficiências na parte superior em comparação com os fatores de escala na parte inferior em função da pseudo-rapidez na esquerda e do momento transverso na direita para um dos *triggers multi-electron*. As quedas de eficiência observadas na figura da esquerda acontecem nas regiões do *Endcap* do calorímetro assim como nas regiões de transição denominadas "*crack*". Já na figura da direita podemos observar a *turn-on curve* e o aumento geral da eficiência à medida que o valor de p_T cresce.

As incertezas no cálculo das eficiências e fatores de escala são uma combinação das incertezas sistemáticas e estatística. As incertezas sistemáticas são obtidas ao se inserir variações nas caracte-

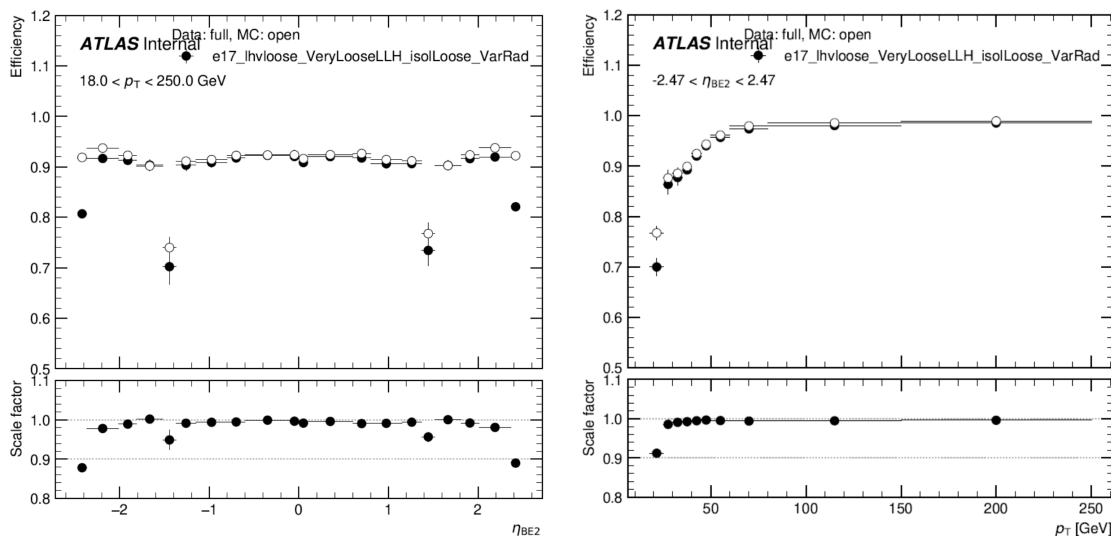


Figura 2: Eficiências e Fatores de Escala. Fonte: O Autor, 2024.

terísticas do *tag*, na janela da massa dos elétrons e também na variação do ruído de fundo, um conjunto com uma escolha dessas três variações é escolhida como sendo a "nominal" e a incerteza é calculada ao comparar os valores de eficiência e fatores de escala com a combinação das outras variações.

Uma outra maneira conveniente de visualizar os resultados é por meio de projeções bidimensionais (2-D) das eficiências e dos fatores de escala em relação a uma variável, como o momento transversal (p_T) ou a pseudo-rapidez (η). Essa visualização facilita comparações rápidas e permite identificar claramente tendências ou eventuais reduções da eficiência para valores específicos. Como exemplo, a Figura 3 exibe essa projeção 2-D dos fatores de escala para um *trigger multi-electron*. Esses valores têm grande importância prática, já que são aplicados às eficiências obtidas via Monte Carlo para ajustá-las às eficiências reais observadas nos dados experimentais. Dessa forma, os fatores de escala garantem que futuras análises físicas e desenvolvimentos em algoritmos de seleção (*trigger*) utilizem eficiências realistas e confiáveis.

5 Considerações Finais

Neste trabalho, investigamos em detalhe as eficiências associadas ao sistema de *trigger* do detector ATLAS e determinamos os fatores de escala correspondentes, essenciais para ajustar as simulações Monte Carlo aos dados reais. Como elétrons são partículas fundamentais previstas em diversos processos raros do Modelo Padrão e em cenários de física além do modelo padrão, garantir uma representação fiel dessas partículas nas simulações é um requisito crucial para o sucesso das análises físicas do experimento. Assim, empregamos o método *Tag-and-Probe* para obter as eficiências e os fatores de escala em diferentes *working points* e para diferentes *triggers*. Esses resultados são de grande relevância prática, permitindo que todas as análises que utilizam os dados do ano de 2022 incorporem correções realistas, resultando em conclusões físicas robustas e confiáveis.

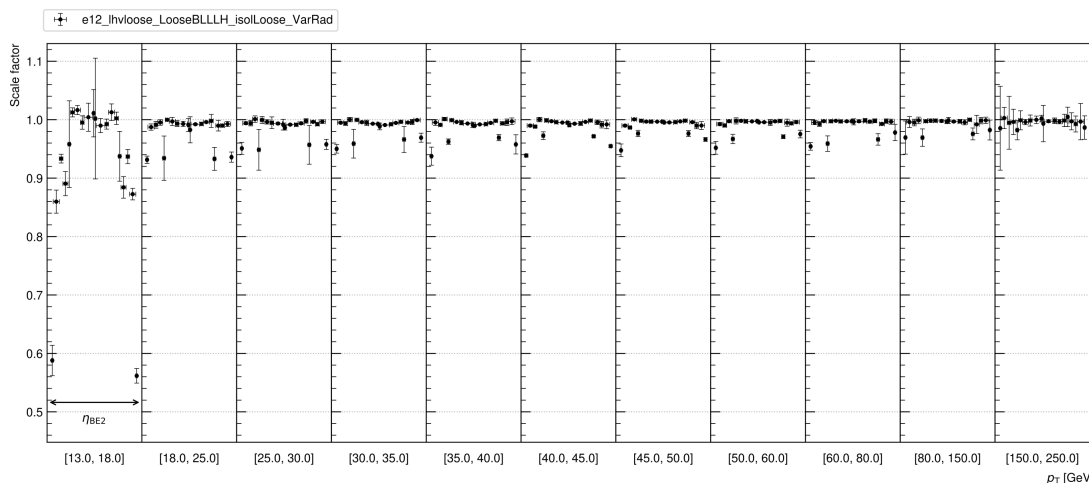


Figura 3: Eficiências do *trigger* e12 no *working point* Loose. Fonte: Autor, 2024.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à UESC e à CAPES por seu apoio financeiro. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] ATLAS Collaboration. **Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2012 LHC proton-proton collision data**. Rel. técn. Acessado em 10/11/2025. Geneva: CERN, 2014. URL: <https://cds.cern.ch/record/1706245>.
- [2] ATLAS Collaboration. **Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2015 LHC proton-proton collision data**. Rel. técn. Acessado em 10/11/2025. Geneva: CERN, 2016. URL: <https://cds.cern.ch/record/2157687>.
- [3] ATLAS Collaboration. “Electron performance measurements with the ATLAS detector using the 2010 LHC proton-proton collision data”. Em: **The European Physical Journal C** 72.3 (mar. de 2012). ISSN: 1434-6052. DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-1909-1.
- [4] ATLAS Collaboration. **Expected electron performance in the ATLAS experiment**. Rel. técn. Acessado em 10/11/2025. Geneva: CERN, 2011. URL: <https://cds.cern.ch/record/1345327>.
- [5] ATLAS Collaboration. **Preliminary analysis of the luminosity calibration of the ATLAS 13.6 TeV data recorded in 2022**. Rel. técn. Acessado em 10/11/2025. Geneva: CERN, 2023. URL: <https://cds.cern.ch/record/2853525>.