

# Explorando os dados abertos do experimento CMS em colisões de íons pesados: Um ensaio didático em física moderna e computacional ao nível de iniciação científica

Exploring Open Data from the CMS Experiment in Heavy-Ion Collisions:  
A Didactic Essay in Modern and Computational Physics at the Undergraduate Research Level

Thiago de Andrade Rangel Monteiro<sup>1</sup>, Patricia Rebello Teles<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup>Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 08 de agosto de 2025. Revisado em 17 de novembro de 2025. Aceito em 15 de dezembro de 2025.

Apresentamos neste artigo um ensaio didático para cursos extracurriculares de Física Moderna e Contemporânea. A proposta é voltada para alunos de graduação e baseia-se na exploração de dados abertos do experimento Solenóide Compacto de Múon (CMS – *Compact Muon Solenoid*), do Grande Colisor de Hádrons (LHC – *Large Hadron Collider*). Utilizando eventos reais de colisões de íons pesados, em particular chumbo-chumbo (PbPb) disponibilizados publicamente pelo CERN (do francês *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), desenvolvemos um roteiro investigativo que permite reconstruir as variáveis cinemáticas de pares múon-antímúon e identificar ressonâncias conhecidas do Modelo Padrão da Física de Partículas (MP). O projeto integra conhecimentos de relatividade restrita, física de partículas de altas energias, métodos computacionais e história da ciência, promovendo ciclos iterativos de aprendizagem, nos quais conceitos teóricos são aplicados e testados continuamente em problemas reais e atuais da física. Além disso, enfatizamos a formação ampla do estudante, destacando o desenvolvimento da análise crítica, da autonomia investigativa e da familiaridade com ferramentas utilizadas em colaborações científicas internacionais. Recursos pedagógicos extracurriculares desse tipo podem tornar mais acessível o conhecimento científico de fronteira e estimular o interesse por diferentes áreas, como física nuclear, teoria quântica de campos e ciência de dados. Essa proposta de estudo orientado extracurricular evidencia como o uso contextualizado de dados experimentais pode contribuir para o ensino de física, aproximando teoria e prática.

**Palavras-chave:** Dados Abertos do Experimento CMS, Modelo Padrão da Física de Partículas, Grande Colisor de Hádrons, Educação em Física Moderna e Contemporânea.

In this article, we present a didactic essay designed for extracurricular courses in Modern and Contemporary Physics. The proposal is aimed at undergraduate students and is based on the exploration of open data from the Compact Muon Solenoid (CMS) experiment at the Large Hadron Collider (LHC). Using real events from heavy-ion collisions, in particular lead-lead (PbPb) collisions, publicly released by CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), we develop an investigative framework that enables the reconstruction of kinematic variables of muon-antimuon pairs and the identification of well-known resonances of the Standard Model of Particle Physics (SM). The project integrates knowledge from special relativity, high-energy particle physics, computational methods, and the history of science, promoting iterative learning cycles in which theoretical concepts are continuously applied and tested in real and contemporary physics problems. Furthermore, we emphasize the students' comprehensive training, highlighting the development of critical analysis, investigative autonomy, and familiarity with tools used in international scientific collaborations. Extracurricular pedagogical resources of this kind can make frontier scientific knowledge more accessible and stimulate interest in different areas, such as nuclear physics, quantum field theory, and data science. This proposal for guided extracurricular study demonstrates how the contextualized use of experimental data can contribute to physics education by bridging theory and practice.

**Keywords:** CMS Open Data, Standard Model of Particle Physics, Large Hadron Collider, Education in modern and contemporary physics.

\*Endereço de correspondência: [patricia.rebello.teles@cern.ch](mailto:patricia.rebello.teles@cern.ch)

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

## 1. Introdução

O Modelo Padrão da Física de Partículas é, até o momento, a descrição teórica mais bem-sucedida das interações fundamentais e da estrutura da matéria em escalas subatômicas [1], com exceção da gravitação. Ele organiza as partículas elementares em dois grandes grupos: os bósons e os férmions.

Os bósons são partículas de spin inteiro e atuam como mediadores das interações fundamentais. A interação eletromagnética é mediada pelo fóton ( $\gamma$ ), a interação fraca pelos bósons carregados e neutros,  $W^\pm$  e  $Z^0$ , e a interação forte pelos glúons ( $g$ ), que agem sobre partículas portadoras de carga de cor, como os quarks. Além desses, o MP prevê o bóson de Higgs ( $H$ ), uma partícula escalar de spin 0, que desempenha papel central no mecanismo de geração de massa para as partículas elementares, por meio do campo de Higgs.

Os férmions, por sua vez, são partículas de spin semi-inteiro e são os blocos fundamentais da matéria. Eles se dividem em duas famílias: os quarks e os léptons, cada qual composta por três gerações com partículas de massas crescentes.

Os quarks são seis: *up* ( $u$ ), *down* ( $d$ ), *charm* ( $c$ ), *strange* ( $s$ ), *top* ( $t$ ) e *bottom* ( $b$ ). Eles possuem carga elétrica fracionária ( $+2/3$  ou  $-1/3$ ), interagem pelas forças forte, fraca e eletromagnética e nunca são observados isoladamente na natureza, devido ao confinamento, estando sempre ligados em bárions, como prótons e nêutrons compostos por três quarks, e mésons como o  $J/\psi$  formado por um par quark-antiquark<sup>1</sup>, que terá um papel central nesse artigo.

Os léptons também são seis: o elétron ( $e^\pm$ ), o múon ( $\mu^\pm$ ), o tau ( $\tau^\pm$ ) e seus respectivos neutrinos ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ). Diferentemente dos quarks, os léptons não interagem pela força forte, participando somente das interações eletromagnética e fraca, enquanto os neutrinos, eletricamente neutros, interagem exclusivamente pela força fraca, tornando sua detecção notoriamente difícil.

Dentre os léptons, o múon se destaca por possuir propriedades semelhantes às do elétron, porém com uma massa cerca de 200 vezes maior. Essa massa elevada, combinada à sua vida média relativamente longa de aproximadamente  $2,2 \mu\text{s}$  faz do múon uma sonda experimental particularmente valiosa<sup>2</sup>. Embora esse intervalo de tempo pareça extremamente curto, no contexto da

<sup>1</sup> Uma antipartícula tem a mesma massa de sua partícula correspondente, mas cargas opostas (ex: elétron tem carga negativa, pósitron tem carga positiva). Um antiquark é simplesmente a antipartícula de um quark, possuindo carga elétrica e carga de cor opostas.

<sup>2</sup> Nos grandes aceleradores de partículas, múons são frequentemente produzidos pelo decaimento de partículas instáveis, como o méson  $J/\psi$ . A descoberta desse méson, em 1974 [2, 3], marcou um ponto de inflexão na Física de Partículas, episódio que ficou conhecido como a ‘Revolução de Novembro’. Esse resultado foi decisivo para a consolidação do modelo dos quarks, ao fornecer evidências experimentais diretas da existência do quark *charm*, até então apenas proposto teoricamente. Antes disso, a ideia de quarks

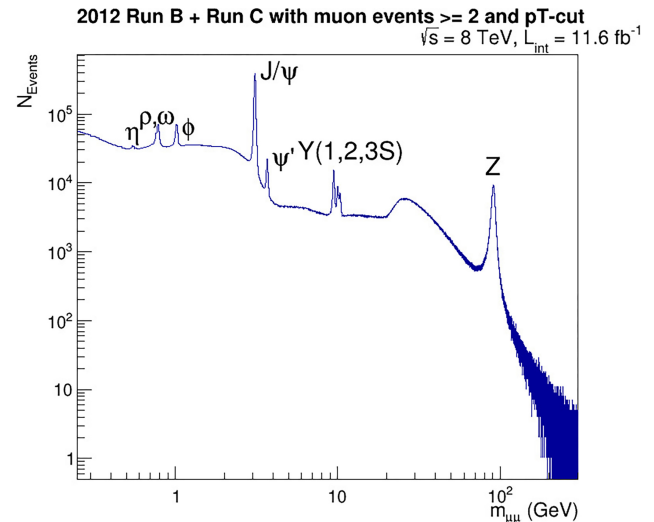


**Figura 1:** Distribuição da massa invariante de pares de múons ( $\mu^+\mu^-$ ) produzida durante o Workshop de Dados Abertos do CMS em 2022 [4]. Os picos identificados no espectro correspondem a diferentes partículas que decaem em pares de múons, constituindo exemplos clássicos do que se convencionou chamar de *standard candles*.

física de partículas – onde os múons se deslocam a velocidades relativísticas, como será discutido na seção seguinte – ele é suficiente para que atravessem várias camadas do detector antes de decair. Essa característica resulta em uma assinatura bem definida nos detectores, permitindo sua identificação com alta eficiência.

Consequentemente, mésons como o  $J/\psi$ , ao se manifestarem como picos estreitos e bem pronunciados no espectro de massa invariante (Fig. 1), são observados experimentalmente na forma de ressonâncias sendo frequentemente usados como “velas-padrão” (*standard candles*). Eles são utilizados para calibrar detectores e validar algoritmos de reconstrução, servindo como referências precisas para avaliar o desempenho do sistema de rastreamento, a resolução em momento e a eficiência de detecção de múons em experimentos.

Os conceitos fundamentais discutidos até este ponto, como o Modelo Padrão e a História da Ciência, podem servir como base teórica e motivacional para o objetivo principal do trabalho: propor uma atividade didática baseada na análise de dados experimentais e na reprodução de resultados clássicos, por exemplo, o espectro mostrado na Fig. 1. Um rascunho inicial para esta atividade extracurricular em nível de iniciação científica pode ser encontrado no Apêndice. As seções seguintes irão descrever detalhadamente as bases teórica e experimental que recomendamos ao professor desenvolver.

ainda encontrava resistência em parte da comunidade científica. A observação do  $J/\psi$  foi, portanto, um marco que fortaleceu o Modelo Padrão em formação e impulsionou o desenvolvimento da cromodinâmica quântica (QCD) como a teoria fundamental da interação forte

## 2. Conceitos de Relatividade Restrita

Após a introdução aos conceitos básicos do Modelo Padrão (Seção 1), o passo seguinte é apresentar a Relatividade Restrita [5]. Essa teoria, um dos pilares da física moderna, é fundamental para compreender a técnica de reconstrução da massa invariante empregada em experimentos de altas energias.

A motivação para estudá-la surge do próprio comportamento das partículas produzidas em colisores: muitas delas se movem a velocidades muito próximas à velocidade da luz, e, nessas condições extremas, as equações da mecânica clássica deixam de ser válidas. A Relatividade Restrita fornece exatamente as ferramentas conceituais e matemáticas necessárias para descrever com precisão tais situações. Essa teoria apoia-se em dois postulados fundamentais. O primeiro afirma que as leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. O segundo, igualmente crucial, estabelece que a velocidade da luz no vácuo – aproximadamente  $3,0 \times 10^8$  metros por segundo – é constante para qualquer observador, independentemente do movimento da fonte emissora ou do detector. Esses princípios, quando combinados, levam a conclusões profundas sobre a natureza do espaço e do tempo, fundamentais para a análise relativística das partículas elementares.

Os dois postulados da Relatividade Restrita têm consequências importantes para a descrição de sistemas físicos, dando origem a efeitos como dilatação temporal, contração de comprimentos e relatividade da simultaneidade. Antes de avançarmos para suas implicações práticas na física de partículas, é útil esclarecer uma convenção amplamente utilizada na área: a adoção das chamadas unidades naturais. Nessa convenção, define-se a velocidade da luz como  $c = 1$  que simplifica diversas expressões relativísticas<sup>3</sup>. No regime relativístico, relevante para os experimentos realizados no LHC, a energia total de uma partícula  $E$  é relacionada ao seu momento linear  $p$  (a magnitude do vetor  $\vec{p}$ ) e à sua massa de repouso  $m$  pela relação energia–momento:

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad (1)$$

Essa expressão, consequência direta da relatividade especial, é fundamental na identificação de partículas em detectores de altas energias. Além disso, ela pode ser aplicada de forma natural a sistemas compostos por múltiplas partículas. Por exemplo, ao analisarmos um par de múons,  $\mu_1$  e  $\mu_2$ , produzidos em um evento, podemos utilizar suas energias e momentos medidos para reconstruir propriedades do sistema original que os gerou.

A grandeza obtida dessa forma, chamada massa invariante,  $m_{\text{inv}}$ , é um escalar relativístico: seu valor é o

mesmo em qualquer referencial inercial. Ela é definida aplicando-se a Eq. 1 ao sistema como um todo, com energia total  $E_{\text{total}} = E_1 + E_2$  e momento total  $\vec{p}_{\text{total}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ :

$$m_{\text{inv}}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (|\vec{p}_1 + \vec{p}_2|)^2 \quad (2)$$

A Eq. 2 corresponde ao quadrado da energia de repouso do sistema (em unidades onde  $c = 1$ ), permitindo obter diretamente sua massa invariante  $m_{\text{inv}}$ . Aqui  $E_1$  e  $E_2$  são as energias individuais dos dois múons, e  $\vec{p}_1$  e  $\vec{p}_2$  são seus respectivos vetores momento.

Essa técnica é fundamental para a reconstrução de partículas instáveis em experimentos de altas energias. Muitas das partículas de interesse físico vivem por um tempo extremamente curto e decaem quase imediatamente após serem produzidas, tornando impossível medi-las diretamente. O que os detectores registram, na prática, são apenas os sinais deixados pelos produtos do decaimento, que por serem mais estáveis conseguem atravessar o detector. Ao medir as energias ( $E_1, E_2$ ) e os momentos ( $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ ), podemos calcular a massa invariante  $m_{\text{inv}}$  da partícula que os originou – a chamada partícula-mãe. Quando esse valor de massa calculada aparece repetidamente agrupado em torno de um mesmo número, ele indica a presença de uma partícula instável específica. No espectro de dados, essa presença se manifesta como um pico (“ressonância”), revelando sua existência e sua massa, como na Fig. 1.

## 3. O LHC e o experimento CMS

A produção das partículas estudadas neste trabalho ocorre no Grande Colisor de Hádrons (LHC – *Large Hadron Collider*), o maior e mais energético acelerador de partículas já construído, localizado na fronteira entre a Suíça e a França. O LHC consiste em um anel subterrâneo de 27 km de circunferência no qual feixes de prótons são acelerados e colididos a energias de até 13–14 TeV no centro de massa. Além de colisões próton–próton, o LHC também opera com íons pesados, alcançando energias por nucleon de até 2,76 TeV no centro de massa por par de núcleons  $\sqrt{s_{NN}}$ .

O principal objetivo do LHC é explorar as interações fundamentais da natureza em escalas de energia nunca antes alcançadas, permitindo testes rigorosos do Modelo Padrão e a busca por sinais de física além desse modelo, como supersimetria, dimensões extras e possíveis candidatos a matéria escura. Ao longo do anel de 27 km, quatro grandes experimentos foram instalados nos principais pontos de colisão. Um deles é o Solenóide Compacto de Múons (CMS, Compact Muon Solenoid) [6], projetado para estudar uma ampla variedade de fenômenos em física de altas energias – desde medições de precisão do Modelo Padrão até buscas por novas partículas e interações.

A arquitetura do CMS consiste em um conjunto de subsistemas dispostos em camadas concêntricas ao redor

<sup>3</sup> Para preservar a clareza conceitual e manter explícitas as unidades físicas ao longo da discussão, este artigo adotará o Sistema de unidades naturais, fixando  $c = 1$  em todas as equações enquanto seguimos enfatizando seu significado físico.

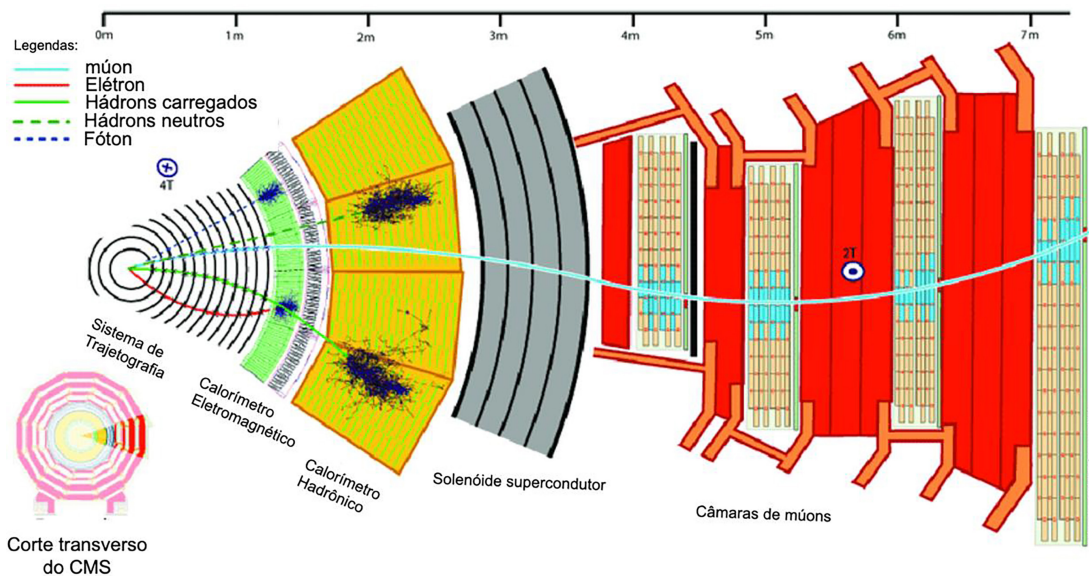


**Figura 2:** Vista em corte transversal do detector CMS, destacando seus principais subsistemas e como diferentes partículas interagem com cada um deles. A partir do centro, o sistema de rastreamento de silício registra a passagem de partículas carregadas; em seguida, o calorímetro eletromagnético (ECAL) mede a energia de elétrons e fótons; o calorímetro hadrônico (HCAL) absorve e mede a energia de hádrons; o solenóide supercondutor gera um forte campo magnético que curva partículas carregadas, permitindo determinar seu momento; e, na região mais externa, as câmaras de múons identificam os múons, que atravessam todas as camadas anteriores devido à sua baixa interação com a matéria. A combinação desses subsistemas permite reconstruir com precisão as partículas produzidas nas colisões [7].

do ponto de colisão, como ilustrado na Fig. 2. Esses subsistemas incluem: um sistema interno de rastreamento de silício, calorímetros eletromagnético e hadrônico, e um sistema externo dedicado à detecção de múons. Todo o detector é imerso em um intenso campo magnético de 3,8 T, produzido por um grande solenóide supercondutor que confere ao experimento sua capacidade de medir com precisão o momento das partículas carregadas.

Para descrever o movimento das partículas produzidas nas colisões, utilizam-se variáveis cinemáticas adaptadas ao referencial do laboratório e à simetria cilíndrica do detector (como mostra a Fig. 3). Entre as mais importantes estão:

- **Momento transversal ( $p_T$ ):** componente do momento da partícula perpendicular ao eixo do feixe ( $z$ ). Como as colisões no LHC ocorrem ao longo desse eixo, o  $p_T$  é diretamente relacionado à energia detectável no plano transversal, tornando-se uma das quantidades centrais na análise de eventos.
- **Pseudo-rapidez ( $\eta$ ):** variável angular definida em termos do ângulo polar  $\theta$  pela relação  $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ . é amplamente utilizada porque permanece aproximadamente invariante sob transformações de Lorentz ao longo do eixo do feixe, o que a torna especialmente conveniente em colisores de altas energias.
- **Ângulo azimutal ( $\phi$ ):** ângulo medido no plano transversal ( $x-y$ ), tomado a partir de um eixo de referência fixo. Em conjunto com o  $p_T$  e  $\eta$ , o

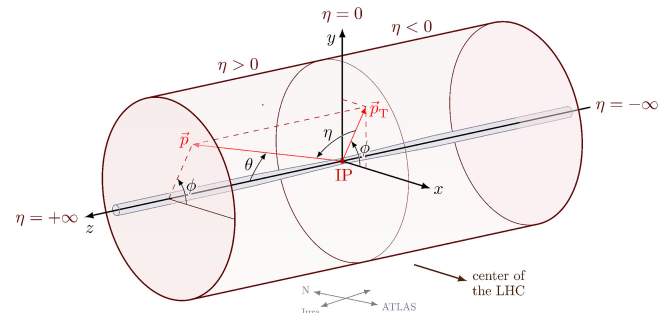


**Figura 3:** Esquema do sistema de coordenadas usado em detectores de colisões como o CMS. O eixo  $z$  acompanha a direção dos feixes que se colidem. No plano perpendicular a esse eixo (plano  $x-y$ ), mede-se o momento transversal  $p_T$ , que indica quanta energia a partícula tem na direção visível ao detector. Nesse mesmo plano define-se o ângulo azimutal  $\phi$ , que especifica a orientação da partícula em torno do feixe. Já o ângulo polar  $\theta$  é medido a partir do eixo  $z$ . A variável pseudorapidez  $\eta$  muito utilizada nas análises, é calculada a partir de  $\theta$  e ajuda a descrever a direção das partículas de forma conveniente para experimentos de altas energias.

ângulo azimutal descreve completamente a direção de propagação da partícula no detector.

Essas grandezas são fundamentais para a reconstrução de vários observáveis físicos, entre eles a massa invariante de pares de partículas. Para o caso específico de dois múons, a massa invariante  $m_{\mu\mu}$  pode ser reescrita em

termos das variáveis cinemáticas usadas nos detectores:

$$m_{\mu\mu}^2 = 2p_{T_1}p_{T_2} [\cosh(\Delta\eta) - \cos(\Delta\phi)], \quad (3)$$

onde  $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$  e  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  são as diferenças de pseudorrapidez e de ângulo azimutal entre os dois múons. Essa forma é particularmente prática porque utiliza apenas quantidades diretamente medidas pelo detector.

Ao expressar a massa invariante em termos dessas variáveis ( $p_T, \eta, \phi$ ), adota-se frequentemente a aproximação de que as partículas detectadas são quase massivas desprezíveis comparadas às suas energias, isto é,  $E \approx p$ . Essa aproximação simplifica a expressão, mas introduz um pequeno viés que tende a subestimar o valor real da massa invariante – um efeito mais perceptível em eventos de baixo momento.

## 4. Colisões de íons Pesados

Além das colisões próton–próton, o CMS também realiza colisões de íons pesados em altas energias. Essa modalidade de operação é diretamente relevante para este trabalho, pois os dados analisados e discutidos ao longo do artigo foram produzidos justamente em condições de colisões núcleo–núcleo, o que exige apresentar ao leitor o contexto físico associado. Assim, esta seção fornece a fundamentação mínima necessária para compreender a natureza dos eventos estudados.

No LHC, núcleos de chumbo podem colidir a energias suficientemente altas para criar condições extremas de temperatura e densidade, nas quais se espera a formação do Plasma de Quarks e Glúons (QGP). Nesse estado, os quarks e glúons – normalmente confinados em hádrons – passam a se mover de maneira coletiva em um meio fortemente interagente, tornando-se possível investigar aspectos fundamentais da Cromodinâmica Quântica (QCD) em regime não perturbativo [8].

Uma característica central dessas colisões é a geometria do evento, determinada pelo parâmetro de impacto. Colisões centrais, com grande sobreposição entre os núcleos, produzem volumes maiores de QGP e densidades de energia mais elevadas. Já colisões periféricas resultam em sistemas menores e menos “quentes”. Esse aspecto geométrico tem impacto direto na multiplicidade de partículas produzidas, na anisotropia angular dos jatos e hádrons, e nos fenômenos de supressão de estados ligados, como o  $J/\psi$ .

Essas colisões também permitem investigar a opacidade do meio e mecanismos de perda de energia dos partons, como o *jet quenching*. Um observável amplamente utilizado para quantificar esses efeitos é o fator de modificação nuclear  $R_{AA}$ <sup>4</sup>

<sup>4</sup> O fator  $R_{AA}$  compara o rendimento de partículas em colisões núcleo–núcleo com o rendimento esperado a partir da superposição de colisões  $pp$ . Valores de  $R_{AA} < 1$  indicam supressão, como no caso do estado  $J/\psi$  [9].

Para os objetivos deste artigo – que utiliza dados abertos do CMS para fins didáticos – é essencial apresentar essas ideias:

- as colisões de íons pesados são o ambiente físico onde os dados analisados foram produzidos;
- muitos dos observáveis reconstruídos (como a massa invariante de pares de múons) têm interpretação direta nesse contexto;
- a discussão introdutória do QGP e da física de núcleo–núcleo permite aos estudantes compreender que tais medidas não são apenas exercícios computacionais, mas inserem-se em questões científicas reais e em aberto.

Assim, as colisões de íons pesados constituem uma parte indispensável da contextualização física deste estudo. Elas fornecem o pano de fundo necessário para a análise dos dados abertos do CMS e ampliam o alcance formativo da proposta, permitindo o desenvolvimento de projetos de iniciação científica, oficinas e estudos avançados sobre o comportamento da matéria em condições extremas.

## 5. A Política de Dados Abertos do CERN

A ciência aberta tornou-se, nas últimas décadas, um dos pilares do avanço científico e da democratização do conhecimento. Em sintonia com esse movimento, a Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN – *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) adotou, em 2014, uma política formal de Dados Abertos (*Open Data*), estabelecendo diretrizes para que os experimentos do LHC disponibilizassem publicamente parte de seus dados após um período inicial de uso exclusivo pelas colaborações [10]. Essa iniciativa busca ampliar o acesso ao conhecimento, estimular o reuso dos dados em contextos educacionais e de pesquisa, e reforçar a transparência e a reprodutibilidade científica.

Entre os experimentos do LHC, o CMS tem sido um dos mais ativos na implementação dessa política [11]. Desde 2014, o experimento tem liberado ao público diversos conjuntos de dados reais e simulados, cobrindo diferentes anos e tipos de colisões, incluindo colisões próton–próton e, mais recentemente, colisões de íons pesados ( $PbPb$ ).

Para facilitar o uso por diferentes perfis de usuários – desde estudantes iniciantes até analistas experientes – os dados são disponibilizados em níveis de processamento distintos, que variam em complexidade e quantidade de informação [12]. Os principais formatos são:

- MiniAOD (*Mini Analysis Object Data*): formato compacto derivado diretamente dos dados reconstruídos (RECO). Inclui informações de alto nível, como trajetórias de partículas, vértices e identificações já realizadas pelos algoritmos do CMS. É

utilizado dentro da estrutura oficial de software do experimento, o CMSSW [13], plataforma empregada para análises profissionais dentro da colaboração.

- **NanoAOD** (*Nano Analysis Object Data*): formato ainda mais reduzido e voltado para análises rápidas e em larga escala. Contém apenas as variáveis estritamente necessárias para a análise física, sendo adequado para usuários que desejam trabalhar com arquivos mais leves e acessíveis.
- **GEN-SIM** (*Generation – Simulation*): conjunto de dados totalmente simulados. Na etapa GEN, modelos teóricos geram um evento de colisão e os decaimentos das partículas. Em seguida, na etapa SIM, um modelo detalhado do detector reproduz como essas partículas interagiriam com os materiais e sensores do CMS, gerando uma resposta semelhante àquela dos dados reais.

Além dos dados, o CMS disponibiliza códigos de exemplo, tutoriais, exercícios, documentação detalhada e ambientes de análise *online*, recursos que tornam o material acessível mesmo para usuários com pouca experiência inicial [14]. Esses materiais são fundamentais para quem deseja reproduzir análises já publicadas ou desenvolver novos estudos de forma independente.

A política de Dados Abertos reflete, assim, um compromisso com a educação científica global. Ela permite que instituições de qualquer parte do mundo tenham acesso aos dados de um dos principais experimentos da atualidade, promovendo tanto a difusão do conhecimento quanto a formação de novos pesquisadores em física de altas energias [15].

## 6. Metodologia e Análise de Dados

### 6.1. Estrutura didática do projeto

A estrutura do projeto foi concebida de forma progressiva, alternando momentos de introdução conceitual com atividades práticas de programação. Essa integração entre teoria e computação tem como objetivo promover uma aprendizagem contínua, na qual cada novo conceito físico é acompanhado de uma aplicação imediata em código. A proposta pode ser organizada da seguinte forma:

- **Fundamentos Teóricos + Programação Básica:** Os conceitos introdutórios do Modelo Padrão (Seção 1) e da cinemática relativística (Seção 2) são apresentados em paralelo ao aprendizado dos comandos básicos de Python [16]. O estudante aprende inicialmente a manipular variáveis, listas e funções simples e, em seguida, utiliza esses elementos para calcular quantidades físicas como momentos ou energias de partículas em situações teóricas.
- **Conceito-Chave + Ferramenta Específica:** O conceito central de massa invariante (Eq. 2) é introduzido juntamente com o uso das ferramentas

adequadas para sua implementação, como as bibliotecas do PyROOT[17] e o objeto `TLorentzVector`. Nesse formato, o estudante não aprende ROOT de maneira isolada, mas como a ferramenta necessária para resolver o problema físico da reconstrução de partículas.

Com essa abordagem integrada, o conhecimento teórico é continuamente aplicado à prática computacional, reforçando ambos os aspectos em um ambiente investigativo. Esse processo deve ocorrer com acompanhamento e orientação constantes, permitindo ao estudante construir autonomia enquanto desenvolve raciocínio físico e competência técnica.

### 6.2. Etapas da análise de dados

A análise seguiu uma sequência estruturada, combinando preparação do ambiente computacional, processamento dos dados abertos do CMS e aplicação dos critérios de seleção utilizados em análises típicas de física de partículas.

Inicialmente, foi necessária uma breve familiarização com comandos básicos do sistema *Linux* [18] e com o uso de contêineres via *Docker* [19], que permitem configurar o ambiente computacional de forma padronizada e reproduzível. Em seguida, utilizou-se a estrutura de software oficial do CMS (*CMSSW*) para converter os dados no formato *MiniAOD* para *NanoAOD*, formato mais leve e adequado para análises no nível de usuário.

Todos os códigos utilizados na análise, bem como instruções detalhadas para instalação, configuração do ambiente e execução dos scripts, estão disponíveis no repositório público do autor no GitHub [20, 21], permitindo a reprodução completa dos resultados apresentados.

#### 6.2.1. Análise exploratória e aplicação de cortes

Com os conjuntos de *nTuples* – isto é, arquivos tabulares contendo, para cada evento, apenas as variáveis necessárias à análise – preparados, iniciou-se a análise exploratória dos dados. Essa etapa consiste em aplicar filtros sucessivos – chamados de “cortes” – que reduzem o conjunto inicial de eventos, removendo ruído e fundo (*background*) e restando apenas os candidatos compatíveis com o sinal físico de interesse. Esses cortes seguem a lógica usual de análises experimentais e foram organizados em três categorias:

- **Gatilhos** (*Triggers*): Os *triggers* constituem o primeiro nível de filtragem e são aplicados em tempo real pelo detector durante a coleta dos dados. Como esta análise busca identificar pares de múons, foram selecionados os *triggers* apropriados a esta topologia. A Tabela 1 mostra os conjuntos de dados analisados, os *triggers* correspondentes e o número de eventos restantes após sua aplicação.

**Tabela 1:** *Triggers* utilizados para selecionar, ainda durante a coleta, os eventos contendo pares de múons nos diferentes conjuntos de dados, com o número de eventos antes e após essa filtragem.

| Ano  | Colisão | Trigger                    | Eventos Iniciais | Eventos Pós-Trigger |
|------|---------|----------------------------|------------------|---------------------|
| 2010 | PbPb    | HLT_HIL1DoubleMu0pen       | 10097            | 8705                |
| 2011 | PbPb    | HLT_HIL1DoubleMu0_HighQ_v2 | 26097            | 14099               |
| 2011 | pp      | HLT_L2DoubleMu0_v2         | 17962            | 12992               |

- **Cortes Cinemáticos:** Após o pré-selecionamento pelo sistema de *trigger*, aplicam-se filtros baseados nas variáveis cinemáticas ( $p_T$  e  $\eta$ ), de modo a selecionar partículas bem medidas e evitar regiões do detector com menor eficiência. Exige-se, por exemplo, que os múons possuam um momento transverso mínimo, reduzindo a contribuição de partículas de baixo momento, que são mais suscetíveis a efeitos de múltiplas colisões e ruído.
- **Seleções de Qualidade:** Por fim, aplicam-se critérios que verificam se a trajetória reconstruída do múon é consistente e se a partícula se origina do vértice principal da colisão. Esses cortes utilizam informações do sistema de rastreamento, como o número de *hits* válidos e a qualidade do ajuste da trajetória.

A Tabela 2 resume os principais critérios de qualidade e cortes cinemáticos utilizados.

**Tabela 2:** Principais critérios de seleção aplicados aos múons para assegurar a qualidade da reconstrução. O parâmetro *MuTrackChi* representa o  $\chi^2$  do ajuste da trajetória, onde valores baixos indicam maior consistência; *MuDistPVz* mede a distância em  $z$  entre o traço do múon e o vértice primário, assegurando que a partícula tenha se originado da colisão principal; e os cortes em  $p_T$  e  $\eta$  correspondem às seleções cinemáticas utilizadas na análise.

| Variável      | Corte            | Descrição                                                  |
|---------------|------------------|------------------------------------------------------------|
| MuHitsV       | $> 12$           | Número mínimo de <i>hits</i> válidos no detector de múons. |
| MuHitsP       | $> 2$            | Número mínimo de <i>hits</i> no detector de pixels.        |
| MuTrackChi    | $< 4,0$          | Qualidade do ajuste do traço (trajetória).                 |
| MuDistPVz     | $< 0,05$ cm      | Distância (em $z$ ) ao Vértice Primário (PV).              |
| Múon $p_T$    | $> 3,0$ GeV/ $c$ | Momento transverso mínimo (corte cinemático).              |
| Múon $ \eta $ | $< 2,4$          | Faixa de pseudo-rapidez permitida (corte cinemático).      |

6.2.2. Construção dos histogramas

Após a aplicação de todos os cortes, os eventos selecionados são utilizados para construir os histogramas de massa invariante dos pares de múons, com largura de bin de 1 GeV/ $c^2$ , isto é, cada barra do histograma representa o número de eventos cuja massa se encontra em um intervalo de 1 GeV/ $c^2$ . Essa etapa permite identificar ressonâncias conhecidas e comparar os resultados com as expectativas da física de partículas.

6.3. Ferramentas computacionais utilizadas

A análise foi realizada em um ambiente integrado que combina interatividade, reprodutibilidade e ferramentas

especializadas em física de partículas. Para a etapa de exploração dos dados, foram utilizados notebooks Jupyter [22], que permitem executar código de forma incremental e visualizar resultados de maneira imediata – uma característica particularmente útil em um projeto de caráter formativo. A manipulação dos arquivos e a produção dos histogramas foram feitas por meio da interface Python do ROOT (PyROOT), enquanto o processamento de maior desempenho, incluindo operações sobre grandes coleções de eventos, foi executado em C++ [23], linguagem nativa do framework.

Para etapas mais avançadas da análise, como o ajuste das distribuições de massa invariante, utilizou-se o pacote RooFit [24], amplamente empregado nos experimentos do LHC para modelagem estatística de sinais e fundos. O uso dessas ferramentas reflete práticas reais de análise adotadas pela colaboração CMS, permitindo que o estudante tenha contato com fluxos de trabalho próximos aos utilizados em análises profissionais.

Com o objetivo de garantir a reprodutibilidade dos resultados, o ambiente computacional e as versões específicas dos softwares utilizados estão resumidos na Tabela 3. Esse detalhamento é fundamental, dado que diferentes versões do CMSSW e do ROOT podem apresentar mudanças sutis no comportamento das ferramentas.

**Tabela 3:** Componentes do ambiente computacional e versões dos softwares utilizados na análise, essenciais para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

| Componente                 | Versão / Especificação                                        |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Sistema Operacional        | Ubuntu 22.04                                                  |
| Ambiente CMS               | CMSSW_4_4_7 (para dados de 2011) e 3_5_2 (para dados de 2010) |
| Framework de Análise       | ROOT v5.34/38                                                 |
| Pacote de Ajuste           | RooFit (Incluso no ROOT)                                      |
| Linguagem Interface        | Python 3.9.x                                                  |
| Hardware (Típico)          | Intel Core i5, 8 GB RAM                                       |
| Tempo de Execução (Típico) | ~10 minutos por conjunto de dados                             |

7. Resultados e Discussão

A análise foi realizada utilizando dados de colisões PbPb (2010 e 2011) [25, 26] e pp (2011) [27] do experimento CMS. Após a aplicação dos critérios de seleção descritos anteriormente, foram identificados os pares de múons candidatos, a partir dos quais se construiu a distribuição da massa invariante do sistema  $\mu^+\mu^-$ . A reconstrução foi realizada somando-se os quadrimomentos dos dois múons, conforme a Eq. 3.

Os histogramas resultantes exibem estruturas claras associadas a ressonâncias bem estabelecidas na física de partículas. Observa-se um pico proeminente correspondente ao méson  $J/\psi$ , com massa em torno de 3,1 GeV/ $c^2$ , e, em menor intensidade, estruturas na região entre 9 e 10 GeV/ $c^2$  compatíveis com estados da família  $\Upsilon$ . Esses resultados estão apresentados na Figura 4.

Ao analisar os espectros de massa invariante obtidos a partir dos dados de colisões PbPb de 2010 (Fig. 4a),

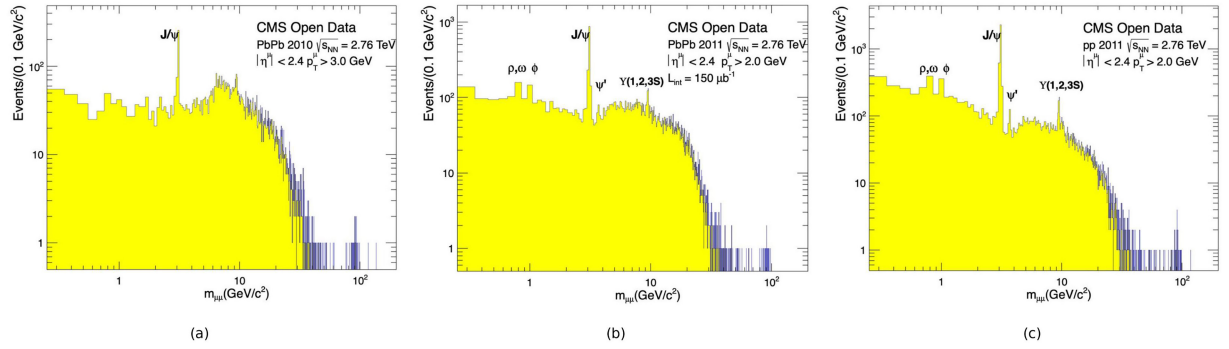


**Figura 4:** Distribuições da massa invariante dos pares de múons reconstruídos a partir dos dados reais do CMS: (a) dados de 2010 em colisões PbPb a  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV; (b) dados de 2011 em colisões PbPb a  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV; (c) dados de 2011 em colisões pp a  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV. O pico mais destacado corresponde ao méson  $J/\psi$ , enquanto estruturas menos intensas na região de 9–10 GeV indicam estados da família  $\Upsilon$ .

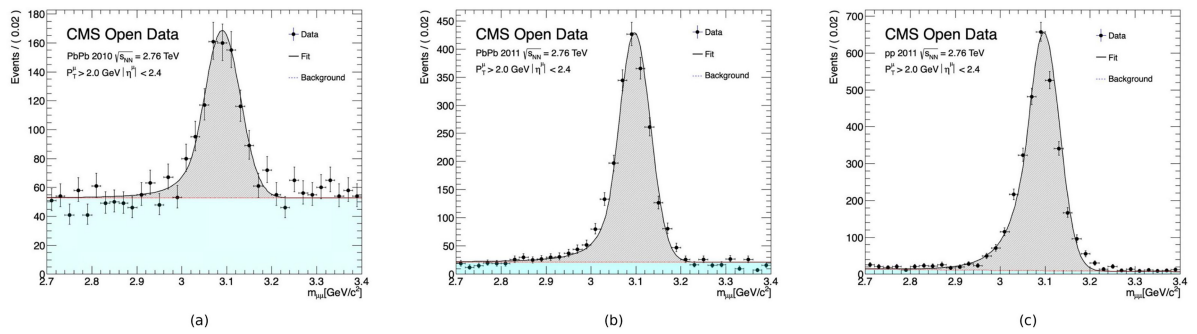


**Figura 5:** Distribuições da massa invariante de pares de múons, com ajuste estatístico do pico correspondente ao  $J/\psi$ , utilizando dados reais do CMS: (a) dados de 2010 em colisões PbPb a  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV; (b) dados de 2011 em colisões PbPb a  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV; (c) dados de 2011 em colisões pp a  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV. As variações nos parâmetros obtidos do ajuste evidenciam diferenças entre os sistemas de colisão e os períodos de coleta dos dados.

observa-se com clareza apenas uma ressonância: o méson  $J/\psi$ . A ausência de estruturas adicionais está diretamente relacionada à baixa estatística desse conjunto de dados, especialmente quando comparado aos registros mais numerosos de 2011 (Figs. 4b e 4c). Embora o *trigger* aplicado em 2010 apresente eficiência superior a 80%, o número limitado de eventos reduz a probabilidade de observar estados de maior massa e menor taxa de produção.

Em contraste, os dados PbPb de 2011 (Fig. 4b) exibem uma distribuição de massa invariante mais detalhada, revelando não apenas o pico do  $J/\psi$ , mas também estruturas associadas à família  $\Upsilon$ . Esse ganho deve-se principalmente ao aumento significativo da estatística, apesar da menor eficiência do *trigger* (cerca de 50%).

Nas colisões pp de 2011 (Fig. 4c), as ressonâncias aparecem ainda mais definidas. Todos os picos esperados – do  $J/\psi$  e dos estados  $\Upsilon$  – são visíveis com excelente resolução. Isso ocorre porque o ambiente experimental em colisões próton–próton é significativamente menos denso e menos ruidoso do que em colisões PbPb: apenas dois prótons interagem, produzindo um número muito menor de partículas no estado final e evitando a

formação de um meio coletivo denso. Assim, há menos sobreposição de traços no detector, menor fundo combinatório e vértices mais limpos, fatores que favorecem a reconstrução precisa dos múons. Além disso, os *triggers* empregados nesses dados apresentaram eficiência superior (cerca de 84%), contribuindo para a qualidade geral dos espectros obtidos.

Além da identificação visual das ressonâncias, foram realizados ajustes sobre o pico do  $J/\psi$ , ilustrados na Fig. 5. O objetivo desses ajustes é estimar parâmetros relevantes – como a posição central e a largura do pico – e compará-los com os valores de referência do *Particle Data Group* (PDG) [28]. As modelagens foram efetuadas com o pacote *RooFit*, utilizando funções adequadas ao formato do sinal, como a *Crystal Ball* [29], além de termos apropriados para o fundo (por exemplo, exponencial).

Os resultados dos ajustes (Figs. 5a, 5b e 5c), obtidos com largura de bin de 0,02 GeV/c², mostraram boa concordância com a massa tabulada do  $J/\psi$ , 3,097 GeV/c². A largura extraída é compatível com a resolução do sistema de detecção do CMS, indicando reconstrução de múons de boa qualidade e validando os critérios de seleção empregados.

Entretanto, a análise dos espectros de massa fornece apenas uma visão qualitativa das diferenças entre sistemas de colisão. Para quantificar, de forma rigorosa, os efeitos do meio nuclear sobre a produção de estados pesados – como a possível supressão induzida pela formação do QGP – é indispensável recorrer ao fator de modificação nuclear  $R_{AA}$ . Essa variável permite comparar diretamente os rendimentos observados em PbPb com aqueles esperados a partir das colisões pp, possibilitando identificar e caracterizar com precisão os mecanismos de supressão que não podem ser inferidos apenas pela inspeção dos espectros de massa. No entanto, a determinação desse fator não foi realizada no presente trabalho devido a limitações técnicas dos conjuntos de dados utilizados – em particular, a necessidade de amostras com alta estatística e normalizações apropriadas, que excedem o escopo deste projeto.

### 7.1. Avaliação Formativa

Esta seção apresenta a trajetória do estudante participante como um estudo de caso ilustrativo do potencial formativo da atividade. O trabalho constitui um ensaio que evidencia, por meio dessa experiência individual, as oportunidades de aprendizagem promovidas pela metodologia adotada.

Além dos resultados obtidos na análise dos dados e do desenvolvimento de habilidades técnicas, o impacto formativo da atividade pôde ser observado em desdobramentos concretos na trajetória acadêmica do estudante.

A familiaridade adquirida com ferramentas profissionais – como ROOT, CMSSW e RooFit – e o trabalho direto com dados reais do CMS contribuíram para que o estudante fosse selecionado para o Programa de Verão do CERN, ainda durante a graduação. Trata-se de um programa altamente competitivo, que demanda conhecimentos prévios em física de partículas e computação científica, o que reforça o caráter formativo da atividade desenvolvida.

Posteriormente, o estudante foi aprovado no Programa de Mestrado em Física da UERJ, indicando que a experiência não apenas consolidou conteúdos da graduação, mas também incentivou a continuidade de sua formação acadêmica na área de pesquisa.

Embora não tenham sido aplicados instrumentos formais de avaliação, esses resultados funcionam como um indicador qualitativo do potencial formativo da proposta. Eles sugerem que a metodologia adotada favorece o desenvolvimento da autonomia investigativa, da capacidade de análise crítica e da apropriação de práticas autênticas da pesquisa científica, elementos essenciais em processos de formação no contexto da iniciação científica.

### 7.2. Generalização da Experiência

A proposta apresentada neste trabalho é modular e adaptável, podendo ser implementada em diferentes

níveis de complexidade de acordo com a infraestrutura disponível e com o perfil dos estudantes. O roteiro original – baseado em contêineres Docker e no ambiente CMSSW – representa a trilha completa, adequada para atividades de iniciação científica ou disciplinas avançadas. No entanto, trilhas mais leves podem ser facilmente adotadas.

Para contextos de curta duração, como semanas acadêmicas, cursos intensivos ou clubes de ciência, a atividade pode ser simplificada por meio do uso de *nTuples* previamente processadas e *scripts* prontos, priorizando a visualização e interpretação dos espectros de massa invariante. Esse formato reduz a carga técnica inicial e facilita o primeiro contato com dados reais de física de partículas.

Em disciplinas de graduação – como Física Moderna, Métodos Computacionais ou Laboratórios Avançados – a proposta pode ser incorporada como projeto final ou unidade temática. Nesses casos, os estudantes podem percorrer o ciclo completo: acesso aos dados abertos, reconstrução de observáveis, análise estatística e interpretação crítica dos resultados.

A experiência relatada foi desenvolvida como um projeto extracurricular de iniciação científica. Durante o período de aprendizado, o estudante envolvido atuou como monitor na atividade Masterclass Hands-on em Física de Partículas promovida pelo CBPF, o que reforçou sua compreensão dos conceitos e ampliou o alcance da proposta. A iniciativa internacional dos Masterclasses, amplamente adotada por centros como o CERN e por instituições brasileiras, demonstra o potencial de atividades baseadas em dados reais para despertar o interesse científico e incentivar novas vocações.

As ferramentas utilizadas – Python, Jupyter, ROOT e GitHub – são de uso livre e alinhadas às políticas de ciência aberta, facilitando sua adoção por instituições de ensino públicas e privadas. Alternativamente, os dados podem ser disponibilizados em formato CSV, contendo variáveis cinemáticas pré-selecionadas. Essa abordagem permite a execução da atividade em softwares amplamente acessíveis, como Excel, LibreOffice ou a biblioteca Pandas.

Para turmas com limitações de infraestrutura, recomenda-se o uso de ambientes em nuvem, como Google Colab ou Binder. Esses serviços permitem carregar arquivos `.root` e analisá-los diretamente com bibliotecas como *uproot*, sem necessidade de instalar Docker ou CMSSW. Essas trilhas alternativas ampliam a aplicabilidade da proposta, permitindo que cada docente ajuste o nível de profundidade e as ferramentas às condições de seu laboratório e ao perfil dos estudantes.

## 8. Conclusões

Este trabalho apresentou um ensaio didático que demonstra a viabilidade e o potencial pedagógico do uso de dados reais do experimento CMS no ensino de física de

partículas ao nível de graduação. A análise desenvolvida permitiu integrar, de forma prática, conceitos centrais da física moderna – como massa invariante, quarks, bósons vetoriais, mésons pesados e efeitos de supressão em meio nuclear – ao desenvolvimento de competências técnicas em análise de dados.

A experiência proporcionou ao estudante contato direto com ferramentas amplamente utilizadas na pesquisa em física de altas energias, incluindo o ambiente **Linux**, os *frameworks* **ROOT**, **PyROOT** e **RooFit**, bem como as linguagens **Python** e **C++**. Essa combinação favoreceu uma formação interdisciplinar, articulando fundamentos teóricos, práticas computacionais e métodos estatísticos empregados em colaborações internacionais.

Os ajustes realizados sobre o pico do  $J/\psi$  mostraram-se consistentes com os valores tabulados pelo PDG, ilustrando como técnicas profissionais de análise podem ser reproduzidas em um contexto educacional. O leitor interessado é, portanto, incentivado a explorar extensões naturais da metodologia, como o estudo de ressonâncias adicionais, especialmente os estados excitados da família  $\Upsilon$ .

Para além dos resultados físicos, a atividade mostrou-se eficaz em promover autonomia investigativa, pensamento crítico e familiaridade com práticas autênticas da pesquisa científica. Os desdobramentos acadêmicos observados – incluindo a participação do estudante em um programa internacional de pesquisa e sua continuidade na pós-graduação – constituem um exemplo qualitativo do potencial formativo associado ao uso de dados abertos.

O caráter modular e progressivo da proposta permite sua aplicação em diferentes níveis de formação e em variados contextos institucionais, desde oficinas de curta duração até projetos de iniciação científica ou disciplinas avançadas. Ao oferecer acesso a dados reais, ferramentas profissionais e problemáticas atuais da física contemporânea, a abordagem favorece tanto a aprendizagem conceitual quanto o desenvolvimento de competências investigativas e tecnológicas.

Com o objetivo de facilitar sua adoção por docentes interessados, apresentamos no Apêndice A um roteiro didático estruturado que pode servir de guia para a implementação da proposta em oficinas, disciplinas de graduação ou atividades extracurriculares.

## Agradecimentos

Agradecemos à iniciativa *CMS Open Data* pela disponibilização dos dados e materiais de apoio, bem como à Dra. Kati Lassila-Perini, ao Prof. Gilvan Augusto Alves (CBPF) e à Profa. Eliza Melo da Costa (UERJ) pelo suporte acadêmico e científico. Este trabalho resulta de uma iniciação científica vinculada ao projeto Física de íons Pesados e Operações no Calorímetro Eletromagnético do CMS, realizada com apoio da FAPERJ (processo E-26/200.598/2022). Reconhecemos, ainda, o

apoio institucional do CBPF e da UERJ, fundamentais para a realização deste estudo.

## Material Suplementar

O seguinte material suplementar está disponível online: Apêndice – Roteiro Didático Estruturado

## Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi disponibilizado em um Repositório de Dados.

Nome do repositório: CERN Open Data Portal (CMS Open Data)

DOIs:

- 10.7483/OPENDATA.9S5F.BY3B – HICorePhysics primary dataset (PbPb,  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, 2010).
- 10.7483/OPENDATA.3XX5.FRZS – HIDIMuon primary dataset (PbPb,  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, 2011).
- 10.7483/OPENDATA.V439.NXZC – AllPhysics2760 primary dataset (pp,  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV, 2011).

Data do depósito: Dados disponibilizados publicamente pelo CERN em 2020.

## Referências

- [1] M.A. Moreira, Rev. Bras. Ensino Fís. **31**, 1306 (2009).
- [2] J.J. Aubert, U. Becker, P.J. Biggs, J. Burger, M. Chen, G. Everhart, P. Goldhagen, J. Leong, T. McCorriston, T.G. Rhoades et al., Rev. Lett., **33**, 1404 (1974).
- [3] J.E. Augustin, A.M. Boyarski, M. Breidenbach, F. Bulos, J.T. Dakin, G.J. Feldman, G.E. Fischer, D. Fryberger, G. Hanson, B. Jean-Marie et al., Phys. Rev. Lett. **33**, 1406 (1974).
- [4] CMS Collaboration, *CMS Open Data Workshop 2022*, disponível em: <https://indico.cern.ch/event/1139022/>, acessado em 21/06/2025.
- [5] A. Einstein, Annalen der Physik **332**, 891 (1905).
- [6] The CMS Collaboration, S. Chatrchyan, G. Hmayakyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, W. Adam, T. Bauer, T. Bergauer, H. Bergauer, M. Dragicevic et al., JINST **3**, S08004 (2008).
- [7] The CMS Collaboration, D. d’Enterria, M. Ballintijn, M. Bedjidian, D. Hofman, O. Kodolova, C. Loizides, I.P. Lokthin, C. Lourenço, C. Mironov et al., J. Phys. G **34**, 2307 (2007).
- [8] L. Santos, Rev. Bras. Ensino Fís. **45**, e20230127 (2023).
- [9] The CMS collaboration, S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam, T. Bergauer, M. Dragicevic, J. Erö, C. Fabjan et al., J. High Energ. Phys. **2012**, 63 (2012).
- [10] CMS Collaboration, *2020 CMS data preservation, re-use and open access policy*, disponível em: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.CMS.1BNU.8V1W>, acessado em 21/06/2025.

- [11] CMS Open Data Group, *CMS celebrates a decade of Open Data* (2024), disponível em: <https://cms.cern/news/cms-celebrates-decade-open-data>, acessado em 21/06/2025.
- [12] CMS Collaboration, *About CMS*, disponível em: <http://opendata.cern.ch/docs/about-cms>, acessado em 21/06/2025.
- [13] CMS Collaboration, *CMSSW*, disponível em: <https://opendata.cern.ch/glossary/CMSSW>, acessado em 21/06/2025.
- [14] A. Bylinkin, *Usage example for CMS 2011 heavy-ion data* (2020), disponível em: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.I22M.2PTE>, acessado em 21/06/2025.
- [15] K. Lassila-Perini, C. Lange, E.C. Jarrin e M. Bellis, EPJ Web of Conferences **251**, 01004 (2021).
- [16] Python, disponível em: <https://www.python.org/>.
- [17] ROOT Software Team (CERN), *ROOT: A Data Analysis Framework v6.32.12*, disponível em: <https://root.cern/releases/release-63212/>, acessado em 21/06/2025.
- [18] The Linux Foundation, disponível em: <https://www.linux.org/>.
- [19] Docker Inc., disponível em: <https://www.docker.com>.
- [20] T.A. Rangel Monteiro, *2010 PbPb software Versão 0.1.1.*, disponível em: <https://github.com/Thiago-Rangel45/HIOpenDataAnalysis/tree/2010>, acessado em 22/06/2025.
- [21] T.A. Rangel Monteiro, *2011 PbPb and pp dataset Versão 0.1.2.*, disponível em: <https://github.com/Thiago-Rangel45/HIOpenDataAnalysis/tree/2011>, acessado em 22/06/2025.
- [22] Project Jupyter, *Project Jupyter*, disponível em: <https://jupyter.org/>, acessado em 21/06/2025.
- [23] B. Stroustrup, *The C++ Programming Language* (Addison-Wesley, Boston, 2013), 4 ed.
- [24] W. Verkerke e D. Kirkby, arXiv:physics/0306116 (2003).
- [25] CMS Collaboration, *HIAAllPhysics primary dataset in RECO format from the 2.76 TeV PbPb run of 2010* (2020), disponível em: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.305G.POEC>.
- [26] CMS Collaboration, *HIDiMuon primary dataset in RECO format from the 2.76 TeV Pb-Pb run of 2011* (2020), disponível em: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.3XX5.FRZS>.
- [27] CMS Collaboration, *AllPhysics2760 primary dataset in RECO format from the 2.76 TeV proton-proton run of 2011* (2020), disponível em: <https://doi.org/10.7483/OPENDATA.V439.NXZC>.
- [28] M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa, K. Nakamura, Y. Sumino, F. Takahashi, J. Tanaka, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler et al., Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).
- [29] ROOT Software Team (CERN), *RooCrystalBall Class Reference* (2024), disponível em: <https://root.cern.ch/doc/master/classRooCrystalBall.html>, acessado em 15/07/2024.