

14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

Construindo estimativas de energia e massa do neutrino do elétron em decaimentos $W^- \rightarrow e \bar{\nu}_e$ utilizando o CERN Open Data

D. M. V. MAIA¹, A. B. NORONHA², S. F. BARROS³

1 Estudante do curso técnico integrado ao ensino médio em Informática para Internet no IFSP campus avançado São Paulo/São Miguel Paulista. deryk.maia@aluno.ifsp.edu.br.

2 Doutor em Ciências, professor EBTT do IFSP campus avançado São Paulo/São Miguel Paulista. noronha@ifsp.edu.br.

3 Doutora em Ciências, professora EBTT do IFSP campus Itaquaquecetuba. suelen.barros@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.05.03.00-5 Física das Partículas Elementares e Campos

RESUMO: Objetiva-se neste projeto, trabalhado no nível de ensino médio, construir estimativas da energia e massa do neutrino do elétron utilizando dados abertos de experimentos no CERN. Utilizou-se recursos acessíveis, como um computador com acesso à internet e programas de edição de planilhas para tratamento de dados. São apresentadas as metodologias utilizadas no projeto, os fundamentos teóricos, e finalmente são apresentadas as estimativas da energia e massa do neutrino do elétron com base nos eventos coletados em plataforma online (*ISpy WebGL Interactive Analysis in Python*). Do ponto de vista educacional, o projeto priorizou o desenvolvimento de habilidades científicas importantes, como a análise crítica de dados, a construção e avaliação de hipóteses, entre outras estratégias defendidas na literatura de ensino de Física. O desenvolvimento do projeto procurou ou também evidenciar características de atividades experimentais científicas, seus alcances e limitações para a construção do conhecimento científico sobre a realidade, proporcionando uma compreensão mais sensata das características dos saberes e fazeres científicos.

PALAVRAS-CHAVE: neutrino; CERN; massa; energia.

Constructing estimates of energy and mass of the electron neutrino in $W^- \rightarrow e \bar{\nu}_e$ decays using CERN Open Data

ABSTRACT: The objective of this project, carried out at the high school level, is to construct estimates of the energy and mass of the electron neutrino using open data from experiments at CERN. Accessible resources such as a computer with internet access and spreadsheet editing programs were used for data processing. The methodologies used in the project are presented, along with the theoretical foundations. Finally, estimates of the energy and mass of the electron neutrino are presented based on the events collected on an online platform (*ISpy WebGL Interactive Analysis in Python*). From an educational perspective, the project prioritized the development of important scientific skills, such as critical data analysis, hypothesis construction and evaluation, and other strategies advocated in the physics education literature. The project's development also sought to highlight characteristics of scientific experimental activities, their scope, and limitations for constructing scientific knowledge about reality, providing a more nuanced understanding of the characteristics of scientific knowledge and practices.

KEYWORDS: neutrino; CERN; mass; energy.

INTRODUÇÃO

Atualmente é um consenso na área de ensino de ciências a importância da experimentação e seu papel essencial na formação dos sujeitos, tanto em relação à sua postura frente ao conhecimento científico quanto ao desenvolvimento de habilidades para lidar com novas situações. Embora a importância da experimentação na educação científica seja amplamente reconhecida, é lugar comum que a adoção de atividades experimentais pelos docentes tende a ser esporádica e assistemática na maioria das escolas públicas, devido à carência de material, equipamento, local adequado para realizar as atividades, tempo para o seu preparo, e insuficiente número de aulas na carga horária (Gaspar, 2014). Nesse sentido, urge procedimentos acessíveis para realizar atividades envolvendo experimentos ou dados experimentais no ensino de Física. Paralelamente, o apelo à inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no nível básico de ensino de física marcou presença constante nas últimas décadas, tanto na literatura especializada como em propostas e estratégias didáticas concretas (Pietrocola, 2010; Etknia *et al* 2019). Na intersecção destes dois eixos, mostra-se como extremamente promissora a iniciativa do CERN (Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear) na disponibilização aberta de dados de experimentos atuais na área de Física de partículas.

O CERN tem um importante papel na divulgação e popularização da ciência em todo o mundo. Entre suas atividades, destacam-se as masterclasses, que são eventos educacionais realizados em diversos países, com a participação de estudantes do ensino médio e superior. Essas masterclasses são importantes porque permitem que os estudantes tenham acesso a dados reais de experimentos realizados no LHC (Grande Colisor de Hádrons), e possam trabalhar com eles em projetos científicos escolares. Tal iniciativa facilita o acesso à informação e a discussão de FMC e Física experimental em projetos científicos escolares sem a necessidade de recursos caros e inviáveis, bastando apenas computadores com conexão à internet. Essa facilidade de acesso à informação tem possibilitado a geração de discussões didáticas e enriquecedoras no nível escolar médio sobre temas atuais e de fronteira da Física, tais como a detecção do bóson de Higgs, a existência de matéria escura, a teoria das cordas, entre outros. Dessa forma, os estudantes têm a oportunidade de se familiarizar com a ciência de ponta e de desenvolver habilidades científicas importantes, como a análise crítica de dados e a construção de hipóteses (CERN, 2023a, 2023b; Ould-Saada, 2012).

Nesse projeto, visando mais uma estratégia de aproximação da FMC no ensino de Física por meio de recursos relativamente acessíveis, propõe-se ao uso dos recursos e dados disponibilizados pelo CERN para obter-se estimativas de energia e massa do neutrino do elétron. Teorizado na década de 1970, juntamente com os neutrinos do tau e do múon, como parte do Modelo Padrão da Física de Partículas, o neutrino do elétron foi confirmado em experimentos realizados na década de 1990, que detectaram sua interação com a matéria por meio da emissão de elétrons e outros sinais característicos. Ainda há muitas incertezas sobre sua natureza, incluindo sua massa, que tem sido objeto de intensos debates e pesquisas experimentais. Os resultados experimentais mais recentes indicam que sua massa é da ordem de poucos eV/c² (KATRIN, 2022). Um dos intuitos desse projeto foi o de verificar se com os dados abertos do CERN é possível se obter resultados com ordem de grandeza compatível.

MATERIAL E MÉTODOS

Fundamentos teóricos

O evento de interesse nesse projeto é o decaimento leptônico do bóson W^- , que resulta em um elétron e um neutrino do elétron:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e \quad (1)$$

Da conservação da energia e momento relativísticos, e adotando a condição ultrarrelativística ($E^2 \approx p^2$, com $c = 1$), podemos deduzir a seguinte relação para o momento longitudinal do neutrino $p_{\nu L}$:

$$p_{\nu L}^2 (p_{eL}^2 - E_e^2) + p_{\nu L} (m_W^2 + 2 p_{eL} (\mathbf{p}_{eT} \cdot \mathbf{p}_{\nu T})) + \frac{m_W^4}{4} + (\mathbf{p}_{eT} \cdot \mathbf{p}_{\nu T})^2 + m_W^2 (\mathbf{p}_{eT} \cdot \mathbf{p}_{\nu T}) - E_e^2 \mathbf{p}_{\nu T}^2 = 0, \quad (2)$$

sendo p_{eL} a componente longitudinal do momento do elétron, $\mathbf{p}_{eT}$ o vetor do momento transversal do elétron, E_e a energia do elétron, m_W a massa do bóson W^- e $\mathbf{p}_{\nu T}$ o vetor do momento transversal do neutrino. Como se explicitará posteriormente, a relação (2) é particularmente útil à análise de dados

devido à não detecção do neutrino. Seu momento longitudinal contribui como a ‘energia faltante’ (ou ‘missing energy’) no processo, ao passo que seu momento transversal (devido à conservação do momento) é inferido pelos valores de momento e energia do elétron.

Uma vez obtido o valor $p_{\nu L}$, pode-se então encontrar o valor da energia do neutrino para cada evento específico analisado, ainda considerando a condição ultrarrelativística:

$$E_{\nu}^2 = p_{\nu L}^2 + \mathbf{p}_{\nu T}^2, \quad (3)$$

A princípio, é possível construir estimativas da massa do neutrino do elétron utilizando (3), a relação de energia total relativística e medidas cinemáticas da velocidade do neutrino em cada evento:

$$m_{\nu} = \frac{E_{\nu}}{\gamma} \quad (4)$$

Contudo, o CERN não dispõe em sua plataforma online dados ou medidas sobre as velocidades dos neutrinos em cada registro. Por outro lado, a quantidade de medidas suficiente precisas e amplas (em termos de correspondência com determinados valores de energia) para a velocidade dos neutrinos ainda é relativamente modesta (ICECUBE, 2017).

Outra equação particularmente útil neste trabalho advém da chamada técnica da massa transversal, M_T . Para casos como (1), adotando a condição ultrarrelativística, deriva-se a relação da massa transversal como:

$$M_T = \sqrt{|\mathbf{p}_{eT}| |\mathbf{p}_{\nu T}| (1 - \cos \phi)}, \quad (5)$$

sendo ϕ o ângulo entre $\mathbf{p}_{eT}$ e $\mathbf{p}_{\nu T}$. Tal técnica foi crucial na detecção dos bósons W e Z décadas atrás (Lella & Rubbia, 2015). Resumidamente, no método original a distribuição de massas para M_T assume um valor máximo em m_W . Todavia, nesse projeto utilizamos (5) como uma ‘critério de escolha de eventos’, considerando:

$$|\mathbf{p}_{eT}| |\mathbf{p}_{\nu T}| < \frac{m_W^2}{2}, \quad (6)$$

selecionando eventos nos quais $\phi \approx 180^\circ$ e em que a desigualdade acima seja válida. Adicionalmente, adotamos o mesmo critério utilizado nos experimentos UA1 e UA2 em que os bósons W e Z foram pioneiramente detectados (*idem*):

$$p_{\nu L} > 25 \text{ GeV}, \quad (7)$$

É oportuno sublinhar que por (2) se tratar de uma equação quadrática em $p_{\nu L}$, é preciso estabelecer um critério para a ‘escolha’ da solução a ser considerada (Grossi *et al.* 2020). Para o escopo mais pragmático deste projeto, adotamos a escolha indicada como ‘seleção tipo 2’ por Grossi (*idem*), no qual adotamos soluções com:

$$p_{\nu L} < 50 \text{ GeV}, \quad (8)$$

sendo que, se ambas as soluções de (2) obedecerem a este critério, uma das duas é selecionada aleatoriamente para compor o grupo de dados. Nenhuma das seleções apresentadas por Grossi é totalmente efetiva, por outro lado, um mais adequado tratamentos dos dados exigiria um formalismo teórico que transcenderia as possibilidades de execução desse trabalho com estudantes do nível médio.

Enfim, a consideração das condições acima implica em uma coleção de eventos com análises factíveis e compatíveis para com o escopo do projeto.

Obtenção dos dados

Para se alcançar o objetivo deste trabalho foram utilizados um computador com acesso à internet e programas de edição de planilhas para tratamento de dados (tais como *Microsoft Excel* ou *LibreOffice Calc*). Os dados experimentais foram retirados da plataforma Ispy (ISpy WebGL Interactive Analysis in Python, <https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#>, ver figura 1), uma ferramenta disponibilizada e associada ao CERN Open Data que permite acessar seus dados abertos de experimentos. Por meio da plataforma, os usuários podem acessar os dados brutos de detectores do LHC, e usá-los para estudar e analisar partículas envolvidas no evento e suas características.

Uma vez dentro da plataforma, o prosseguimento natural envolve seleção de eventos correspondentes ao decaimento (1). Para isso, identificou-se visualmente eventos que continuam apenas um ‘traço’ verde (referente a elétrons) e outro rosa (etiquetados como ‘missing energy’, por não estarem associados a detecções, sendo potencialmente neutrinos do elétron). Eventos com ‘traços’ vermelhos identificam a presença de múons, apontando para outros decaimentos ou processos que não (1). Além disso, excluiu-se eventos com mais de um jato de energia (‘energy jets’), uma vez que sua multiplicidade em um mesmo evento pode também indicar outros tipos de decaimentos ou processos.

Após a seleção dos eventos de interesse, obteve-se os dados dispostos da interface da plataforma. Em cada evento, em uma aba inferior (ver figura 1), são expostas as medidas da energia do elétron, das componentes do seu momento, seus ângulos transversal e polar, as componentes transversais do momento do neutrino e seu ângulo transversal ($E_e, p_{eX}, p_{eY}, p_{eL}, \theta_e, \phi_e, p_{\nu X}, p_{\nu Y}$, e ϕ_ν respectivamente). Esses valores foram inseridos em uma tabela para se calcular, caso a caso, a componente longitudinal do momento do neutrino, $p_{\nu L}$, por meio da relação (2). Foram coletados dados de 1183 eventos potencialmente referentes ao decaimento (1), e destes, 447 obedecem aos critérios (6), (7) e (8).

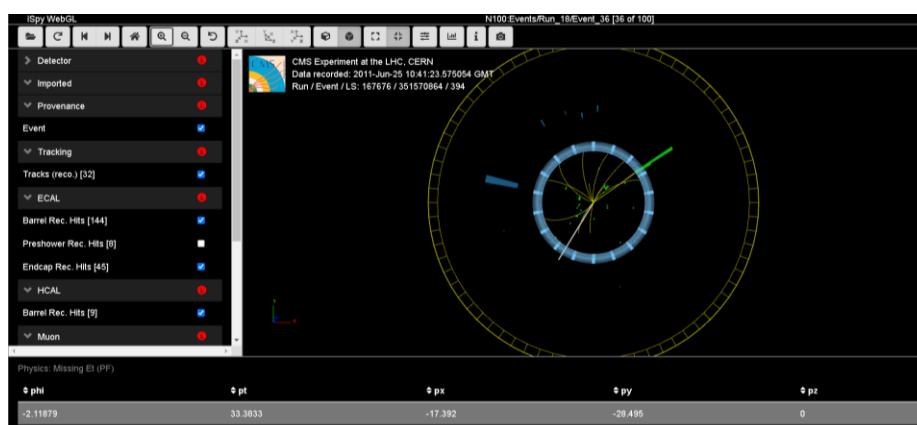
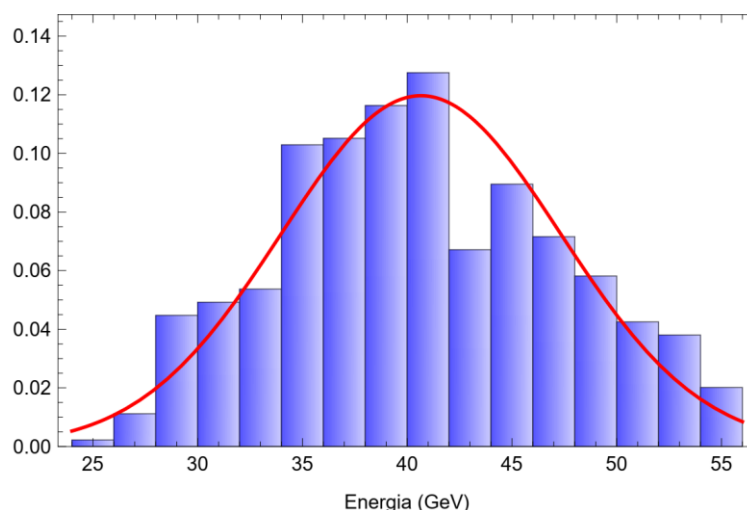


FIGURA 1. Interface da plataforma Ispy. Exemplo de um evento de tipo do decaimento (1). A plataforma permite que o usuário acesse as medidas para partícula de maneira direta. No caso da imagem acima, ilustra-se na linha de baixo as informações do ângulo transversal e componentes do momento do neutrino (etiquetado como ‘missing energy’). Acesso em <https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#>, em abril de 2023.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados dos eventos selecionados, construiu-se um histograma de energia para o neutrino do elétron, apresentado na figura 2.



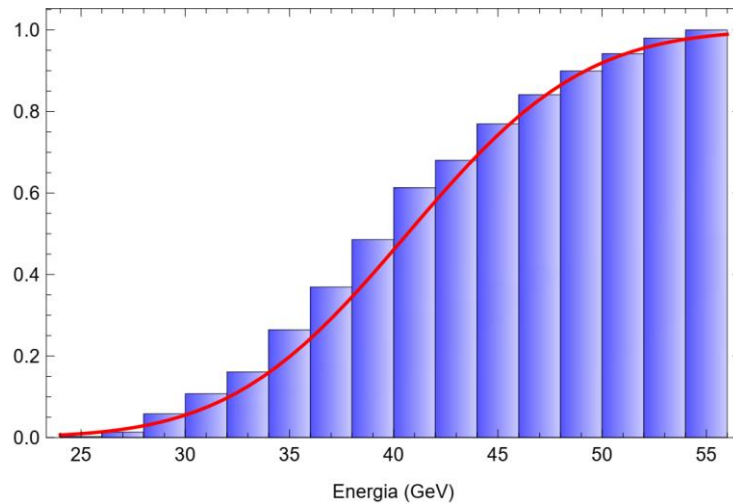


FIGURA 2. Acima, histograma com 447 eventos de decaimentos do tipo (1) analisados no trabalho, em vermelho a comparação com uma distribuição gaussiana. Abaixo, figura com a integral da função densidade de probabilidade, que é cumulativa, e tende a 1.

Os testes realizados evidenciam que a distribuição de energia do neutrino se aproxima de uma distribuição normal, sendo assim a sua energia pode ser estimada pelo cálculo usual de média, e a incerteza dessa estimativa pode ser calculada por $\sigma/\sqrt{N}$. Desta forma, a energia média do neutrino é $\langle E_\nu \rangle = 40,5 \pm 0,3$ GeV. Com os dados é possível estimar também a energia média dos bósons W antes do decaimento, sendo $\langle E_W \rangle = 110,5$ GeV. Para o caso dos elétrons, encontramos sua energia média como $\langle E_e \rangle = 58,8$ GeV. É importante salientar que critérios semelhantes a (7) ou (8) não foram adotados nestas breves duas últimas análises, sendo que seus histogramas não se aproximam ao de uma gaussiana. Importante salientar que as estimativas acima são condizentes com a conservação da energia, uma vez que $\langle E_e \rangle + \langle E_\nu \rangle \approx \langle E_W \rangle$. Um possível desdobramento deste trabalho é a análise mais centrada sobre a energia dos elétrons no decaimento e um possível exercício didático (e de pesquisa) de estimativa da sua massa.

Por fim, é possível construir estimativas de massa do neutrino do elétron. Medidas de velocidade dos neutrinos são problemáticas devido à baixa seção de choque dos mesmos, isto é, por interagirem muito fracamente com a matéria. Porém, alguns processos e eventos forneceram elementos importantes à questão. Um deles é o SN1987A, referente à supernova ocorrida na Grande Nuvem de Magalhães e detectada no ano de 1987. Na ocasião, foi possível comparar o tempo de chegada dos fótons com aquele dos neutrinos (Agafanova *et al.* 2012), e concluiu-se que, para neutrinos do elétron com energia da ordem de 10 MeV, a diferença entre sua velocidade e a da luz foi de $\delta v < 2.10^{-9}$. A título de comparação, podemos considerar que, para neutrinos do elétron com energia da ordem de dezenas de GeV, temos que $\delta v < 2.10^{-15}$. Assim, podemos estipular um limite de massa para os neutrinos do elétron, utilizando a relação (4), como $m_\nu < 1,81$ keV. Resultados experimentais mais recentes apontam para limites pelo menos 10^3 vezes mais restritos do que este (KATRIN, 2022), contudo, a estimativa aqui apresentada é da mesma ordem de grandeza das primeiras propostas de limite superior de massa dos neutrinos, estabelecidas nos anos 1960s. Considerando ainda que os dados foram retirados de experimentos não diretamente destinados as medidas de massa dessa partícula, pode-se assim considerar a razoabilidade da estimativa tendo em vista os objetivos e contexto de aplicação do projeto.

CONCLUSÕES

Em síntese, este projeto teve como objetivo a obtenção da massa invariante do neutrino do elétron a partir da coleta e análise de dados do decaimento do bóson W, organizados e disponibilizados pelo CERN Open Data. Para tanto, a pesquisa foi delimitada com foco na aplicação de recursos da física experimental e do estudo teórico da FMC, dentro das restrições impostas pelos instrumentos matemáticos disponíveis aos alunos do Ensino Médio. Tendo em vista o número de

eventos analisados e considerando os escopos e limitações deste trabalho, a estimativa do limite de massa do neutrino do elétron mostra-se bastante razoável e sugere que, com o aprimoramento no número e na qualidade dos dados, as estimativas de massa e energia do neutrino do elétron se tornem ainda mais aceitáveis. Por fim, vislumbra-se a possibilidade da aplicação da metodologia empregada neste trabalho no estudo de outras partículas elementares na plataforma ISpy, como por exemplo o neutrino do múon. Futuros trabalhos com a mesma temática podem reforçar como o ambiente digital e as coleções de dados do CERN, se submetidos à adequado tratamento matemático de medidas, são úteis para a compreensão de aspectos fundamentais da Física de partículas.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Os autores D.M.V.M. e A.B.N. contribuíram com a fundamentação teórica, metodologia, coleta e análise de dados. Autora S.F.B. contribuiu com a construção do histograma e análise de dados. Todos os autores contribuíram nas discussões e conclusões, assim como atuaram na redação do trabalho. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

REFERÊNCIAS

- AGAFONOVA, N. Y. *et al.* Measurement of the Velocity of Neutrinos from the CNGS Beam with the Large Volume Detector. *Physical Review Letters*, 109, 070801, 2012.
- CERN. (s.d.). *Masterclasses*. Acesso em 4 mar/2023. Disponível em: <https://home.cern/science/education/masterclasses>. 2023a.
- CERN. (s.d.). *Open Data*. Acesso em 4 mar/2023. Disponível em: <https://home.cern/science/physics/open-data>. 2023b.
- ETKINA, E., VAN HEUVELEN, A., & BROOKES, D. T. Physics teaching in the 21st century: From 'physics for all' to the challenges of contemporary science education. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 2019
- GASPAR, A. *Atividades experimentais no ensino de Física*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2014.
- GROSSI, M., NOVAK, J., KERSEVAN, B. & REBUZZI D. Comparing traditional and deep-learning techniques of kinematic reconstruction for polarization discrimination in vector boson scattering. *Eur. Phys. J. C.*, 80:1144, 2020.
- ICECUBE Collaboration. The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems. *JINST*, 12, 2017. Acesso à versão pré-publicação em 4 de mar/2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1612.05093>.
- KATRIN Collaboration. Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nat. Phys.*, 18, 160–166, 2022.
- LELLIA, L. & RUBBIA, C. The Discovery of the W and Z Particles. *Adv.Ser.Direct.High Energy Phys.*, 23, 137-163, 2015.
- OULD-SAADA, F. International Particle Physics Masterclasses – Bringing LHC data into the Classroom. *36th International Conference on High Energy Physics Proceedings*, Melbourne, Australia. 2012.
- PIETROCOLA, M. *Inovação Curricular e Gerenciamento de Riscos Didático-Pedagógicos: o ensino de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea na escola média*. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo (publicação interna), texto para concurso de professor titular. São Paulo, 2010.