UM ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE A FÍSICA NUCLEAR E A FÍSICA DE PARTÍCULAS ELEMENTARES

Ana Paula Wenk da Silva[1], Maria Simone Kugeratski Souza[2]

[1]Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil (paula.wenk@grad.ufsc.br)
[2]Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil

Resumo: Este trabalho explora conceitos fundamentais da física nuclear e de partículas elementares, abordando tópicos como forças nucleares, energia de ligação, modelos teóricos, fissão e fusão, cromodinâmica quântica e colisores de hádrons. O estudo também aborda a aplicação desses conhecimentos na engenharia aeroespacial, especialmente no desenvolvimento da propulsão nuclear. Consolidando uma base teórica para futuras pesquisas.

Palavras-chave: Energia Nuclear; Engenharia Aeroespacial; Física Moderna;

INTRODUÇÃO

A física nuclear como um dos principais tópicos de estudo deste projeto de pesquisa, teve início no final do século XIX, com a descoberta da radioatividade natural por Wilhelm Roentgen (1895) e Henri Becquerel (1896) e os estudos subsequentes de Marie e Pierre Curie. Ademais, em 1909 Ernest Rutherford propôs o modelo nuclear do átomo após seus experimentos de espalhamento.

Durante o século XX, a física nuclear avançou com a descoberta do nêutron por Chadwick em 1932, da fissão nuclear por Hahn e Meitner (1938) e do desenvolvimento de reatores nucleares e aplicações, tanto civis quanto militares.

Já a física de partículas, também conhecida como física de altas energias, emergiu como um desdobramento da física nuclear. Pode-se dizer, que sua pesquisa como conhecemos hoje, teve início com a descoberta do elétron em 1897 por J.J. Thomson. Sendo seguida da formulação de teorias por grandes físicos, como Planck e Yukawa, para explicar a dinâmica subatômica, levando ao descobrimento de novas partículas e interações.

A construção de grandes aceleradores de partículas, na segunda metade do século XX permitiu testar essas teorias em alta energia, confirmando a existência de partículas como os quarks, glúons e o bóson de Higgs.

De acordo com Shultis e Faw (2007) na engenharia, desde a segunda metade do século XX, muitos tipos de reatores nucleares foram projetados e construídos para converter a energia térmica produzida por fissão em energia elétrica, principalmente por conta de seu alto desempenho energético.

Além disso, na área de engenharia Aeroespacial, a qual é um dos focos centrais de aplicação futura da presente pesquisa, desde a década de 40 são realizados estudos referente ao desenvolvimento de reatores nucleares planejados como fontes de energia para missões espaciais. Tanto como fonte de energia elétrica, quanto como fonte de propulsão para missões, principalmente tripuladas, no espaço.

MATERIAL E MÉTODOS

De acordo com Gerhardt e Silveira (2009) a presente pesquisa possui uma abordagem qualitativa com objetivo definido como exploratório. Quanto aos procedimentos do projeto, foram escolhidos os procedimentos de Pesquisa Bibliográfica e Documental.

A pesquisa bibliográfica foi realizada com base em livros relevantes no contexto científico e no curso a nível de pós-graduação oferecido pela plataforma do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (em inglês: Massachusetts Institute of Technology, MIT) OpenCourseWare intitulado “Introduction to Nuclear and Particle Physics” (Introdução à Física Nuclear e de Partículas) acerca da fenomenologia e fundamentos experimentais da física nuclear e de partículas.

Alguns livros fundamentais utilizados, disponíveis apenas na versão em língua inglesa, são: *Introduction to elementary particles* (Griffiths, 2008), *Fundamentals of nuclear science and engineering* (Shultis; Faw, 2007) e *Introductory nuclear physics* (Krane, 1988). Além desses, o livro *Introdução à Física Nuclear e de Partículas Elementares* (Menezes, 2002), publicado no Brasil e disponível em português, também foi utilizado como base para esta pesquisa.

Por conseguinte, com base na metodologia citada, foram abordados os seguintes tópicos: história da

física nuclear e da física de partículas; Cinemática relativística; Força nuclear; Estabilidade do núcleo; Modelo de camada; Decaimento gama; Fissão e fusão nuclear; Introdução à cromodinâmica quântica; Força forte; Diagrama de Feynman; Liberdade assintótica e confinamento; Colisores de hádrons e aplicação na engenharia aeroespacial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por se tratar de uma pesquisa de caráter exploratório, este estudo não tem como objetivo apresentar resultados experimentais ou conclusões definitivas. O intuito está direcionado à ampliação do conhecimento teórico sobre a Física Nuclear e a Física de Partículas Elementares, buscando compreender os conceitos fundamentais, as principais interações e as aplicações relacionadas à engenharia.

O desenvolvimento da pesquisa seguiu uma linha progressiva, iniciando com um resgate histórico fundamental para compreender a evolução dos conceitos e experimentos que estabeleceram a física moderna. Em seguida, abordou-se a cinemática relativística e o seu princípio, essencial para descrever o comportamento de partículas em velocidades próximas à da luz, proporcionando base para a análise das forças nucleares.

No âmbito da força nuclear, foi abordado a energia de ligação, a qual representa a quantidade de energia necessária para separar completamente todos os nucleons que compõem o núcleo. Essa energia é resultado da interação da força nuclear forte, que atua superando a repulsão eletrostática entre os prótons.

O cálculo da energia de ligação está diretamente relacionado ao chamado "defeito de massa", que é a diferença entre a soma das massas dos nucleons livres e a massa do núcleo efetivamente constituído. Tal diferença de massa é convertida em energia que mantém o núcleo coeso.

De acordo com Krane (1988) A energia de ligação, B, de um núcleo é a diferença na energia de massa entre um núcleo e seus constituintes Z prótons e N nêutrons, descrita pela equação 1:

$$B = \left\{ Zm_{\mathrm{p}} + Nm_{\mathrm{n}} - \left[m(^{A}\mathrm{X}) - Zm_{\mathrm{e}} \right] \right\} c^2 \qquad (1)$$

Na qual, m_p é a massa do próton, m_n é a massa do nêutron, $m(^AX)$ é a massa do núcleo constituído, m_e é a massa do elétron e c a velocidade da luz.

Como a energia de ligação total tende a crescer com o número de massa A, é comum representar a energia de ligação média por nucleon (B/A) em função de A. A figura 1 mostra essa representação:

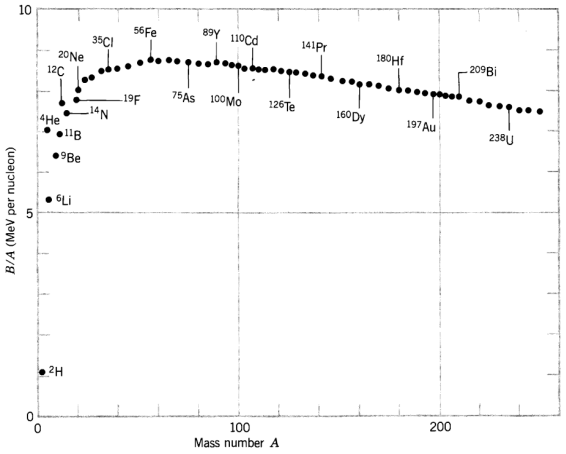


Figura 1. A energia de ligação por nucleon.
Fonte: (Krane, 1988).

Ao analisar este comportamento, observa-se que a relação entre B/A e o número de nucleons apresenta algumas características. Uma delas é a relativa constância da energia de ligação média para a maior parte dos núcleos, com exceção dos núcleos muito leves. Além disso, observa-se que a curva atinge um valor máximo próximo de $A = 60$, indicando que os núcleos nesta faixa apresentam a maior estabilidade, ou seja, possuem a maior energia de ligação por nucleon.

Esse comportamento sugere duas possibilidades distintas para a liberação de energia nuclear: para núcleos com A inferior a 60, é possível obter energia ao combinar núcleos leves e formar núcleos mais pesados; por outro lado, para núcleos com A superior a 60, a divisão de núcleos pesados em fragmentos menores também resulta na liberação de energia. Em ambos os casos, o sistema evolui para estados mais estáveis com maior energia de ligação por nucleon.

Com base nesses aspectos, a investigação prosseguiu com o estudo da estabilidade do núcleo e dos modelos teóricos para a força nuclear que explicam a organização das partículas dentro do núcleo atômico. Os modelos abordados foram: Modelo da Gota Líquida (Liquid Drop Model); Potencial de Yukawa; e Modelo de Camadas (Shell Model).

O Modelo da Gota Líquida, proposto inicialmente por George Gamow e posteriormente trabalhado por Niels Bohr e John Archibald Wheeler, fornece uma analogia macroscópica para descrever o comportamento coletivo dos nucleons no interior do núcleo atômico. Nesse modelo, o núcleo é tratado como uma gota de líquido incompressível, onde as forças nucleares de curto alcance entre os nucleons são análogas às forças de coesão entre as moléculas de um líquido. O modelo considera contribuições energéticas específicas que explicam as propriedades nucleares, como o termo de volume, de superfície, de repulsão de Coulomb, de assimetria e o termo de

emparelhamento, compondo a chamada fórmula de massa semi-empírica.

O Potencial de Yukawa é um modelo teórico que descreve a interação de curto alcance entre os nucleons e caracteriza-se por apresentar uma rápida diminuição de intensidade à medida que a distância entre os nucleons aumenta, evidenciando que a força nuclear atua de forma significativa apenas em escalas muito pequenas. A teoria introduziu o conceito de partículas mediadoras, posteriormente identificadas como mésons, que seriam responsáveis pela transmissão da interação entre as partículas nucleares.

Já o modelo de camadas (*Shell Model*), fornece informações sobre as configurações de energia e estabilidade nuclear. Este, se baseia no Princípio da exclusão de Pauli e no Acoplamento Spin-Órbita. Onde, cada nucleon ocupa um orbital nuclear discreto, preenchendo os orbitais de maneira parecida com os elétrons nos átomos. O modelo de camadas explica propriedades nucleares como spins, paridades e momentos magnéticos, e é fundamental para a compreensão de fenômenos, como a abundância de certos isótopos na natureza. O esquema completo do modelo de camadas é ilustrado na Figura 2.

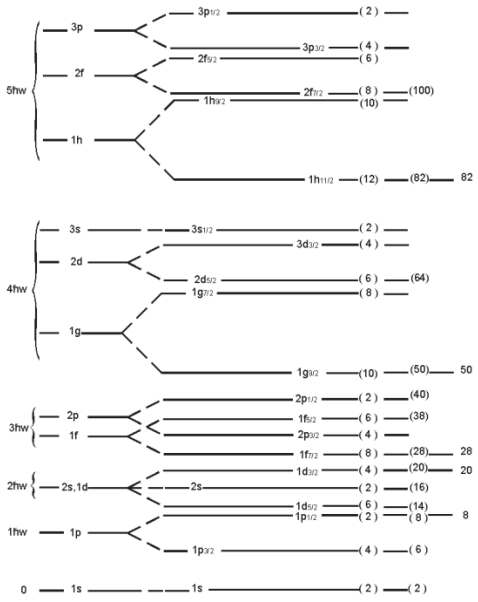


Figura 2. Níveis de energia do modelo de camadas com a interação spin-órbita.
Fonte: (MENEZES, 2002)

Posteriormente, foram explorados os fenômenos de decaimento gama, fissão e fusão nuclear, os quais desempenham papéis fundamentais tanto nos processos naturais quanto em aplicações tecnológicas e de geração de energia.

O decaimento gama é um tipo de decaimento radioativo que, diferentemente do decaimento alfa ou beta, não ocorre a emissão de partículas. Consiste na emissão de fótons de alta energia e com capacidade ionizante por um núcleo excitado que retorna ao seu estado fundamental, sem alteração no número de prótons ou nêutrons. Sendo um mecanismo relevante na dissipação de energia nuclear.

Já a fissão nuclear é um processo complexo que envolve a interação entre a força nuclear forte e a força eletromagnética, além de fenômenos como o efeito túnel. A absorção de um nêutron por um núcleo pesado leva à instabilidade, deformação e, finalmente, à divisão do núcleo em dois fragmentos menores, liberando nêutrons e uma grande quantidade de energia.

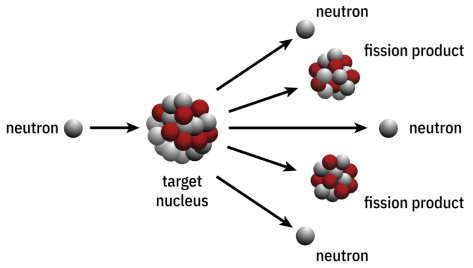


Figura 3. Diagrama simplificado do processo de fissão nuclear.
Fonte: Atomic Archive (2025).

A energia liberada na fissão vem principalmente da diferença nas energias de ligação entre o núcleo original e os produtos de fissão. Essa energia se manifesta como: energia cinética dos produtos de fissão; energia cinética dos nêutrons liberados; radiação gama (fótons de alta energia); e calor, devido à interação dos produtos de fissão com o meio circundante.

Além disso, a fissão induzida apresenta um espectro de nêutrons emitidos que influencia diretamente a dinâmica da reação em cadeia. A compreensão detalhada desses parâmetros, incluindo a probabilidade de fissão e os produtos gerados, é essencial para o projeto de reatores e para o desenvolvimento de modelos que garantam eficiência e segurança nos sistemas de geração de energia.

Os produtos de fissão são fragmentos nucleares resultantes da divisão do núcleo pesado, geralmente compostos por uma ampla variedade de isótopos instáveis que apresentam diferentes tempos de meia-vida e modos de decaimento radioativo. Esses fragmentos emitem radiação beta e gama durante seu processo de estabilização, contribuindo para a radioatividade residual dos materiais fissionados. A caracterização desses produtos é fundamental para o

manejo seguro dos resíduos nucleares e para o desenvolvimento de estratégias de descarte, além de influenciar o projeto de reatores e a análise dos impactos ambientais associados à fissão nuclear.

Por outro lado, a fusão nuclear ocorre quando dois núcleos atômicos leves se aproximam o suficiente para que a força nuclear forte supere a repulsão eletrostática e os una em um único núcleo mais pesado, acompanhado de uma liberação significativa de energia.

Sendo este o princípio das reações que fornecem energia às estrelas, que ocorre predominantemente por meio da cadeia próton-próton (pp-chain) e do ciclo carbono-nitrogênio-oxigênio (CNO). A cadeia próton-próton, representada na figura 4, é o mecanismo dominante em estrelas de massa semelhante ou inferior à do Sol, caracterizando-se pela fusão direta de prótons para formar núcleos de hélio, com a emissão de pósitrons, neutrinos e raios gama. Já o ciclo CNO, relevante em estrelas de maior massa, utiliza elementos mais pesados como catalisadores para converter hidrogênio em hélio de forma eficiente em altas temperaturas. Esses processos determinam a vida útil das estrelas e influenciam a distribuição de elementos no universo.

Em contrapartida, em reatores experimentais de fusão, a reação mais estudada é a fusão entre deutério e trítio, a qual libera um nêutron e uma grande quantidade de energia (17,6 MeV por reação).

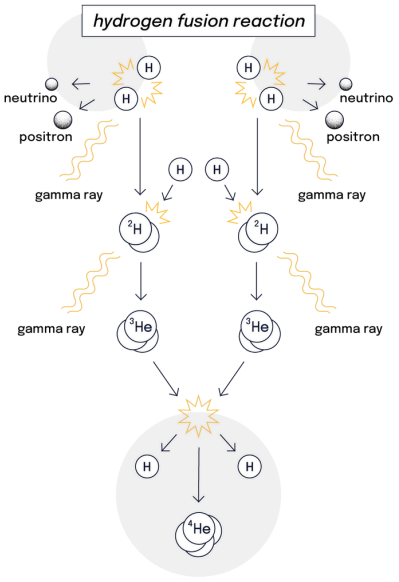


Figura 4. Representação gráfica da Cadeia Próton-Próton.
Fonte: ITER (2025).

A energia liberada na fusão é consequência da diferença de massa entre os reagentes e os produtos, sendo diretamente relacionada ao conceito de energia de ligação nuclear por nucleon. Este processo representa uma das mais promissoras alternativas para a geração de energia limpa na Terra, devido ao seu elevado rendimento energético e à ausência de subprodutos de longa meia-vida radioativa.

No entanto, a reprodução controlada da fusão em condições laboratoriais enfrenta consideráveis desafios técnicos, principalmente relacionados ao confinamento eficaz do plasma, à necessidade de temperaturas extremamente elevadas e a utilização de materiais resistentes à tais condições.

Por fim, o estudo se aprofundou no estudo das partículas elementares, introduzindo conceitos como a cromodinâmica quântica, os diagramas de Feynman, a liberdade assintótica, o confinamento e a importância dos colisores de hádrons para a investigação experimental.

A Cromodinâmica Quântica (do inglês Quantum Chromodynamics, QCD) é a teoria que descreve a interação que ocorre entre quarks e glúons, as partículas fundamentais que compõem os prótons, nêutrons e outros hádrons. Nela, os quarks interagem por meio da força forte trocando partículas chamadas glúons. A QCD é uma teoria de campo quântico baseada no grupo de simetria $SU(3)_C$, onde o "c" refere-se à carga de cor e é descrita matematicamente pela densidade Lagrangiana.

Na QCD, as interações entre os glúons emitidos por cargas coloridas impedem que essas cargas sejam separadas. Em vez disso, se energia suficiente for investida na tentativa de tirar um quark de um próton, por exemplo, o resultado é a criação de um par quark-antiquark, em outras palavras, um méson. Esse aspecto incorpora a natureza de curto alcance observada da força forte, que é limitada a uma distância de cerca de 10^{-15} metros.

Os Diagramas de Feynman constituem uma representação gráfica formal das interações fundamentais entre partículas no contexto da teoria quântica de campos. Introduzidos por Richard Feynman, esses diagramas são ferramentas que codificam as contribuições das amplitudes de probabilidade de processos físicos, conforme descrito pela eletrodinâmica quântica (QED) e estendido para outras teorias de gauge, como a cromodinâmica quântica (QCD).

Cada linha e vértice do diagrama possui uma correspondência matemática precisa dentro das regras de Feynman, derivadas da lagrangiana da teoria, permitindo o cálculo sistemático de amplitudes de espalhamento por meio de integrais de caminho. Os diagramas também evidenciam a troca de partículas mediadoras, como fótons ou glúons, responsáveis pelas interações fundamentais, e possibilitam a visualização de processos de primeira ordem e de ordens superiores.

Os diagramas de Feynman desempenham um papel central na representação das interações descritas pela cromodinâmica quântica, particularmente na análise de processos de espalhamento, representado na Figura 5.



Figura 5.Espalhamento entre dois nucleons representado pelo Diagrama de Feynman.
Fonte: (MENEZES, 2002).

É no contexto dessas interações que emerge o conceito de liberdade assintótica, uma característica da QCD que modifica o comportamento das partículas fundamentais em diferentes regimes de energia.

A liberdade assintótica é um fenômeno característico das interações descritas pela cromodinâmica quântica. Este conceito, formulado por David Gross, Frank Wilczek e David Politzer, descreve a propriedade pela qual a constante de acoplamento forte diminui à medida que a energia da interação aumenta, ou, equivalentemente, quando a distância entre os quarks se reduz. A mesma, é fundamental para explicar os resultados experimentais obtidos em colisores de altas energias e está intrinsecamente ligada à estrutura dos grupos de simetria da QCD, diferenciando-a das demais interações fundamentais.

Embora a liberdade assintótica explique o comportamento quase livre dos quarks em altas energias, é importante destacar que este fenômeno é complementado pelo conceito de confinamento, que rege o regime de baixas energias. À medida que a distância entre os quarks aumenta, a constante de acoplamento forte cresce rapidamente, intensificando a interação de tal forma que os quarks permanecem permanentemente ligados, impossibilitando sua separação individual.

O confinamento de quarks é um fenômeno da cromodinâmica quântica que impede a observação isolada de quarks e glúons, restringindo-os ao interior dos hádrons. Esse comportamento pode ser interpretado por meio da formação de tubos de fluxo de campo de cor, estruturas que conectam quarks. Na QCD o campo de cor permanece confinado dentro desses tubos, o que faz com que a energia potencial entre os quarks aumente com a distância.

A compreensão da interação forte, a partir da QCD, da liberdade assintótica e do confinamento, ganha relevância prática no contexto dos colisores de hádrons. Como exemplo o Large Hadron Collider (LHC) da Organização Europeia para a Investigação Nuclear conhecida como CERN (antigo acrônimo para Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), representado na Figura 6.

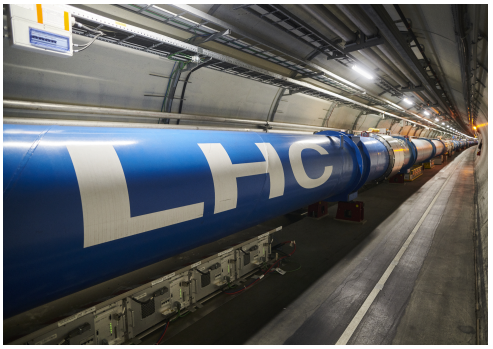


Figura 6. Fotografia do Large Hadron Collider, o maior acelerador de partículas existente.
Fonte: CERN (2021).

Nessas máquinas de altíssima energia, os quarks e glúons que compõem os hádrons são momentaneamente submetidos a condições extremas, permitindo sondar o regime perturbativo da QCD, onde a liberdade assintótica se manifesta.

Devido ao confinamento, os quarks e glúons livres não podem ser detectados diretamente; em vez disso, o que se observa nos detectores são os jatos hadrônicos, estruturas resultantes da fragmentação e hadronização das partículas elementares, coerentes com as previsões teóricas da QCD.

A análise detalhada desses jatos, associada a outras assinaturas experimentais, foi fundamental para a identificação de eventos complexos no Large Hadron Collider (LHC), incluindo a descoberta do bóson de Higgs em 2012, o qual tem sua representação na Figura 7.

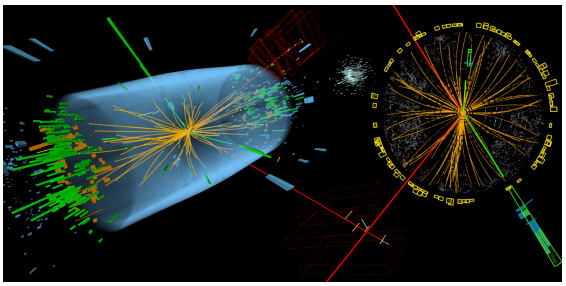


Figura 7. Eventos candidatos ao bóson de Higgs no experimento CMS (à esquerda) e no experimento ATLAS (à direita).
Fonte: CERN (2024).

Portanto, os experimentos realizados em colisores de hádrons oferecem uma ponte entre os aspectos teóricos fundamentais das interações fortes e os fenômenos observáveis, consolidando o entendimento experimental do modelo padrão.

Dessa forma, a interface entre a física nuclear e de partículas elementares e a engenharia aeroespacial é cada vez mais relevante no desenvolvimento de tecnologias avançadas. O entendimento das interações nucleares e subatômicas contribui diretamente para áreas como a propulsão nuclear para missões espaciais de longa duração, o desenvolvimento de materiais resistentes à radiação em ambientes fora da atmosfera e a otimização de sistemas de geração e gerenciamento de energia em sondas e satélites.

Um exemplo dessa aplicação é a propulsão nuclear espacial, uma tecnologia que vem ganhando destaque como alternativa viável para missões de longa duração, como as que visam Marte. Isso ocorre ao oferecer maior eficiência de impulso e reduzir significativamente o tempo de viagem em comparação com a propulsão química convencional. Entre os conceitos estudados, destacam-se a propulsão térmica nuclear (NTP), representada na Figura 8, e a propulsão elétrica nuclear (NEP), ambas fortemente dependentes do conhecimento em física nuclear para seu desenvolvimento seguro e eficaz.

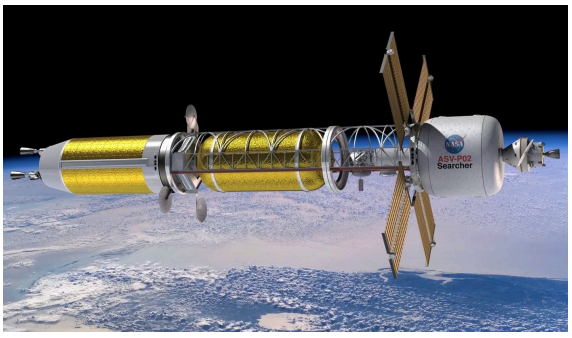


Figura 8. Ilustração de uma nave espacial movida por propulsão térmica nuclear.
Fonte: NASA (2021).

Além disso, experimentos de física de partículas, como os realizados em grandes aceleradores, frequentemente utilizam sistemas de detecção, controle térmico e estruturas com requisitos similares aos encontrados na indústria aeroespacial, evidenciando a correlação entre essas áreas.

CONCLUSÃO

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foi possível identificar e organizar informações relevantes que contribuem para a construção de uma base de entendimento, servindo como suporte para estudos futuros teóricos e experimentais na engenharia aeroespacial.

Dentre os principais pontos abordados, destacam-se a compreensão das forças nucleares, a estrutura do núcleo atômico, os modelos teóricos como o modelo de camadas e o modelo da gota líquida, além da importância dos diagramas de Feynman na descrição das interações fundamentais. O estudo também evidenciou a relevância dos conceitos de liberdade assintótica e confinamento, especialmente no contexto das colisões de hádrons de alta energia, como as realizadas no LHC.

Por fim, a pesquisa permitiu reconhecer a crescente aplicação da física nuclear e de partículas elementares na engenharia aeroespacial, com destaque para o desenvolvimento de tecnologias emergentes, como a propulsão nuclear. Dessa forma, o trabalho cumpre seu papel exploratório ao consolidar uma base teórica e conceitual essencial para investigações futuras e aplicações tecnológicas avançadas.

REFERÊNCIAS

ATOMIC ARCHIVE. Nuclear Fission. Disponível em: https://www.atomicarchive.com/science/fission/index.html. Acesso em: 14 jun. 2025.

CERN. Announcing the Higgs boson discovery. Disponível em: https://home.cern/news/series/cern70/cern70-announcing-higgs-boson-discovery. Acesso em: 15 jun. 2025.

CERN. LHC images gallery. Disponível em: https://home.cern/resources/image/accelerators/lhc-images-gallery. Acesso em: 15 jun. 2025.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (org.). Métodos de pesquisa. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GRIFFITHS, David. Introduction to elementary particles. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

ITER. What is fusion? Disponível em: https://www.iter.org/fusion-energy/what-fusion. Acesso em: 14 jun. 2025.

KRANE, Kenneth S. Introductory nuclear physics. New York: John Wiley & Sons, 1988.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Metodologia científica. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MIT. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. 8.701 – Introduction to Nuclear and Particle Physics. Disponível em: https://ocw.mit.edu/courses/8-701-introduction-to

-nuclear-and-particle-physics-fall-2020/pages/syllabus/. Acesso em: 15 jun. 2025.

MENEZES, Débora Perez. Introdução à Física Nuclear e de Partículas Elementares. Florianópolis: Editora da Ufsc, 2002.

NASA. NASA Announces Nuclear Thermal Propulsion Reactor Concept Awards. Disponível em: https://www.nasa.gov/news-release/nasa-announces-nuclear-thermal-propulsion-reactor-concept-awards/. Acesso em: 15 jun. 2025.

SHULTIS, J. Kenneth; FAW, Richard E. Fundamentals of nuclear science and engineering. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.