

Masa nuclear y su relación con la energía de enlace

Nuclear mass and its relationship with binding energy

Cristel M. Navas-Zamora ^a, Kinverling P. Mendoza-Centeno ^b, Clifford J. Herrera-Castrillo ^c

Abstract:

The nuclear mass does not match the sum of the individual masses of protons and neutrons. This difference, known as the mass defect, is directly related to the binding energy that holds the nucleus together. From a relativistic perspective, this relationship is explained by the mass-energy equivalence, which converts the energy released or absorbed into a measurable variation in mass. This essay analyzes the theoretical foundations of mass defect, binding energy, and models describing nuclear stability. It also includes modern applications in fission, fusion, and mass prediction using advanced methods. Finally, it integrates recent sources that show how nuclear mass reflects the internal energy of the system from a relativistic approach.

Keywords:

Energy, linkage, mass, nuclear, relativity

Resumen:

La masa nuclear no coincide con la suma de las masas individuales de protones y neutrones. Esta diferencia, conocida como defecto de masa, está directamente relacionada con la energía de enlace que mantiene unido al núcleo. Desde la perspectiva relativista, esta relación se explica mediante la equivalencia masa-energía, que convierte la energía liberada o absorbida en una variación medible de masa. En este ensayo se analizan los fundamentos teóricos del defecto de masa, la energía de enlace y los modelos que describen la estabilidad nuclear. Además, se incluyen aplicaciones modernas en fisión, fusión y predicción de masas mediante métodos avanzados. Finalmente, se integran fuentes recientes que muestran cómo la masa nuclear refleja la energía interna del sistema desde un enfoque relativista.

Palabras Clave:

Energía, enlace, masa, nuclear, relatividad.

Introducción

El estudio de la masa nuclear y su relación con la energía de enlace constituye un eje fundamental dentro de la Física moderna, ya que permite comprender cómo la energía interna del núcleo determina su estabilidad y el comportamiento que presenta frente a procesos como la fisión y la fusión. Aunque en apariencia un núcleo atómico debería pesar simplemente la suma de sus protones y neutrones, en la práctica su masa es menor debido a la

energía que mantiene unidas a estas partículas (Cordero-Moreno et al., 2026). Esta diferencia, conocida como defecto de masa, revela la estrecha conexión entre masa y energía que explica buena parte de los fenómenos nucleares.

El eje central de este ensayo es analizar cómo se relacionan la masa nuclear y la energía de enlace desde una perspectiva relativista. Para ello, se abordan primero los conceptos fundamentales: el defecto de masa, la energía de enlace por nucleón y su influencia en la

^a Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua | Centro Universitario Regional de Estelí | Estelí-Estelí | Nicaragua, <https://orcid.org/0009-0006-7414-9555>, Email: cristelzamora669@gmail.com

^b Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua | Centro Universitario Regional de Estelí | Estelí-Estelí | Nicaragua, <https://orcid.org/0009-0002-3559-7276>, Email: kinverlingmendoza@gmail.com

^c Autor de Correspondencia, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua | Centro Universitario Regional de Estelí | Estelí-Estelí | Nicaragua, <https://orcid.org/0000-0002-7663-2499>, Email: cliffor.herrera@unan.edu.ni

estabilidad del núcleo. Luego, se estudian aplicaciones modernas como la fisión, la fusión y las predicciones computacionales de masas, que muestran cómo estos principios se manifiestan en situaciones reales. Finalmente, se presentan conclusiones orientadas a comprender la importancia de esta relación y a proponer líneas de análisis que puedan desarrollarse en investigaciones futuras.

A pesar de que la relación entre la masa nuclear y la energía de enlace ha sido ampliamente abordada desde los fundamentos de la física nuclear, aún persisten desafíos en la comprensión integrada de esta relación cuando se consideran enfoques relativistas modernos y herramientas computacionales avanzadas. En particular, resulta relevante analizar cómo los modelos teóricos clásicos dialogan con las predicciones contemporáneas basadas en métodos numéricos y de inteligencia artificial, especialmente en el estudio de núcleos inestables o de difícil medición experimental. Este ensayo busca contribuir a dicha reflexión, enfatizando la masa nuclear como una manifestación directa de la energía interna del núcleo.

A través de este recorrido, se busca no solo exponer las bases teóricas, sino también mostrar cómo pequeñas variaciones en la masa pueden generar grandes transformaciones energéticas, evidenciando que cada núcleo funciona como un sistema dinámico donde la energía interna mantiene el equilibrio de todas sus partes. El presente trabajo se desarrolla bajo un enfoque de ensayo teórico-analítico, basado en la revisión crítica de literatura clásica y contemporánea sobre física nuclear. Las fuentes fueron seleccionadas considerando su relevancia histórica, su impacto en el desarrollo de modelos nucleares y su actualidad, incluyendo investigaciones recientes que emplean métodos computacionales avanzados. El análisis se centra en la interpretación conceptual de la relación entre masa nuclear y energía de enlace, sin recurrir a experimentación directa, priorizando la integración y discusión de aportes teóricos.

Desde la perspectiva de la generación y aplicación del conocimiento, el estudio de la masa nuclear y su relación con la energía de enlace adquiere relevancia directa en áreas como la nanotecnología y el análisis de materiales semiconductores. A escala atómica y subatómica, la comprensión de la interacción energía-materia resulta fundamental para el diseño, caracterización y modelización de materiales avanzados, donde pequeñas variaciones energéticas pueden modificar propiedades físicas esenciales. En este sentido, los principios nucleares analizados en el presente ensayo aportan una base teórica sólida para el desarrollo de tecnologías emergentes en contextos industriales y científicos.

Desarrollo

El análisis de las masas nucleares y de los principios relativistas de conservación de la energía ha permitido comprender que la estructura de un núcleo atómico depende tanto de la cantidad de protones y neutrones que contiene como de la energía que mantiene unidos a estos componentes. Esta energía interna, conocida como energía de enlace nuclear, se manifiesta como una disminución de la masa total del núcleo respecto a la suma de las masas de los nucleones libres. Esta diferencia, llamada defecto de masa, es una prueba directa de la equivalencia entre masa y energía propuesta por Einstein, (1905) en su célebre relación $E = mc^2$, quien demostró que la energía interna de un sistema puede expresarse como una variación en su masa.

Para ilustrar este fenómeno, es necesario recordar que protones y neutrones, cuando se encuentran de manera aislada, tienen una masa definida. Sin embargo, al formar parte de un núcleo, parte de su energía se convierte en energía de enlace, que actúa como una fuerza de cohesión. Al perder esa energía en forma de radiación u otros mecanismos, la masa del núcleo resulta ser menor que la suma de sus componentes individuales. Esta observación ha sido confirmada en múltiples evaluaciones modernas de masas atómicas. Por ejemplo, Wang et al. (2021), explican que la energía de enlace por nucleón aumenta gradualmente hasta alcanzar un valor máximo en elementos como el hierro-56, lo que explica su extraordinaria estabilidad.

Comprender el defecto de masa también permite relacionar la estabilidad nuclear con la energía interna del sistema. Atkinson et al. (2020) señalan que una forma fundamental de analizar la estabilidad nuclear consiste en estudiar la energía de enlace promedio de cada nucleón, ya que esta medida revela el grado de cohesión que mantiene unido al núcleo. De esta manera, la masa observada en un núcleo refleja directamente la energía que ha sido absorbida o liberada durante su formación.

El mismo principio se encuentra presente en la conservación relativista de la energía, que establece que el total de masa y energía en un sistema se mantiene constante, aunque pueda cambiar su forma. Esto significa que cuando un proceso nuclear libera energía —como ocurre en la fisión o en la fusión— hay simultáneamente una pérdida de masa, puesto que la energía emitida proviene de la disminución de la energía de enlace del sistema. Moscato et al. (2024) demostraron que incluso pequeñas variaciones estructurales dentro del núcleo pueden producir cambios medibles en la energía de enlace, mostrando cómo la configuración interna condiciona la masa final del núcleo.

Además del enfoque experimental, los avances computacionales han permitido estudiar las masas

nucleares desde nuevas perspectivas. Según Zeng et al. (2024), las redes neuronales y otros modelos de inteligencia artificial son capaces de predecir con gran precisión las masas nucleares utilizando patrones aprendidos de datos experimentales. Este tipo de técnicas confirma que la relación entre masa y energía es consistente y modelable, lo cual abre puertas a métodos más sofisticados para estudiar núcleos inestables o difíciles de medir directamente.

Desde un punto de vista comparativo, los modelos nucleares tradicionales, como los presentados por Krane (1988) y Greiner y Maruhn (1996), ofrecen una base sólida para entender la estabilidad nuclear y la energía de enlace mediante interacciones fundamentales. Sin embargo, estos métodos tienen limitaciones al tratar con núcleos muy inestables o áreas que se encuentran lejos de la línea de estabilidad. Por otro lado, los modelos informáticos modernos que se fundamentan en inteligencia artificial posibilitan el reconocimiento de patrones complejos en extensos conjuntos de datos experimentales, aumentando así la capacidad de predicción de las masas nucleares. La unión entre la teoría clásica y técnicas modernas muestra un desarrollo en los métodos que mejora la comprensión actual del fenómeno.

En el ámbito tecnológico, estos principios encuentran aplicación en el estudio y desarrollo de materiales avanzados, particularmente en nanotecnología y semiconductores. La energía interna asociada a la estructura nuclear influye en técnicas de caracterización basadas en interacciones energéticas, como la irradiación controlada y el análisis estructural de materiales a escala nanométrica. Comprender la relación entre masa, energía y estabilidad nuclear permite optimizar procesos industriales y experimentales donde la precisión energética resulta determinante para el comportamiento final del material (Gutiérrez-Cruz et al., 2024).

El marco teórico que conecta masa y energía también explica los procesos más energéticos del universo. En la fusión nuclear, los núcleos ligeros se combinan hasta formar estructuras más estables, liberando grandes cantidades de energía provenientes de la diferencia entre la masa inicial y la masa final, tal como señalan nuevamente Wang et al. (2021). Estos procesos alimentan el interior de las estrellas, incluyendo el Sol, que ha mantenido su actividad energética durante millones de años.

Asimismo, la modelización precisa de la masa nuclear y de la energía de enlace constituye un insumo teórico relevante para la ingeniería y la tecnología industrial, especialmente en contextos donde se requiere controlar procesos energéticos de alta precisión. Los modelos computacionales avanzados que integran datos nucleares contribuyen a la simulación de sistemas complejos, favoreciendo la toma de decisiones en el diseño de

materiales, dispositivos y procesos tecnológicos que operan bajo condiciones extremas de energía.

Por otro lado, en la fisión nuclear, núcleos pesados como el uranio-235 se dividen en fragmentos más ligeros, generando energía debido al aumento total de energía de enlace en el sistema, lo cual ha sido analizado por Atkinson et al. (2020). Aunque la pérdida de masa parece mínima en términos absolutos, su impacto energético es enorme debido al factor de conversión establecido por la ecuación relativista de Einstein.

Las investigaciones tradicionales también han aportado una comprensión profunda del comportamiento del núcleo. Krane (1988) explica que la estabilidad de un núcleo no depende únicamente de las fuerzas internas que lo componen, sino también de cómo la energía de enlace compensa las fuerzas repulsivas entre los protones. De manera complementaria, Greiner y Maruhn (1996) destacan que los modelos nucleares modernos permiten analizar de forma detallada cómo la configuración del núcleo determina su masa y su energía de enlace, lo que contribuye a predecir comportamientos y transiciones nucleares.

En conjunto, todo este conocimiento permite afirmar que la masa nuclear no es una propiedad fija, sino una consecuencia directa del equilibrio interno del núcleo y de su energía de enlace. La comprensión de estas relaciones no solo ha transformado la física nuclear, sino que también ha permitido el desarrollo de tecnologías actuales como los reactores nucleares, los métodos de datación y la investigación astrofísica. La energía nuclear, ya sea liberada en procesos de fisión controlada o en reacciones naturales dentro de las estrellas, se basa siempre en diferencias de masa extremadamente pequeñas, pero capaces de generar efectos energéticos inmensos.

Por lo tanto, la estabilidad del átomo es el resultado de un equilibrio entre las fuerzas que actúan en su interior, la magnitud de su energía de enlace, el defecto de masa y los principios relativistas de conservación. Comprender este equilibrio es indispensable para avanzar tanto en la investigación científica como en la toma de decisiones relacionadas con el uso responsable y seguro de la energía nuclear (Blandón Tinoco & Herrera-Castrillo, 2025; Herrera Castrillo et al., 2026).

Conclusiones

El estudio realizado permitió comprender que las masas nucleares no corresponden simplemente a la suma de protones y neutrones y si no que está condicionada por la energía necesaria para mantenerlos unidos. Esta idea que al inicio parecía abstracta se vuelve más clara al analizar como pequeñas variaciones en la más se traducen en cantidades significativas de la energía.

El análisis realizado permitió evidenciar que la estabilidad nuclear es el resultado de un delicado equilibrio energético interno, donde la energía de enlace desempeña un papel determinante. Los procesos de fusión en núcleos ligeros y de fisión en núcleos pesados ilustran de manera concreta cómo pequeñas variaciones en la masa generan transformaciones energéticas significativas, explicando tanto fenómenos naturales, como la producción de energía en las estrellas, como aplicaciones tecnológicas desarrolladas por el ser humano.

A partir de este análisis, se sugiere que futuras investigaciones exploren predicciones más precisas de la energía de enlace y masas nucleares mediante modelos computacionales avanzados, incluyendo inteligencia artificial y técnicas de aprendizaje automático. Además, sería valioso aplicar estos conocimientos a la optimización de procesos de energía nuclear segura y a estudios astrofísicos sobre la nucleosíntesis en estrellas y supernovas.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados de este análisis refuerzan la importancia de los fundamentos nucleares en áreas tecnológicas contemporáneas como la nanotecnología y el estudio de materiales semiconductores. La comprensión de la relación masa-energía no solo tiene implicaciones teóricas, sino que también sustenta el desarrollo de materiales avanzados y procesos industriales que dependen del control preciso de la energía a escala atómica.

En conclusión, la masa nuclear depende de la energía de enlace, mostrando que la materia y la energía están profundamente interrelacionadas. Comprender esta relación no solo fortalece nuestro conocimiento teórico, sino que abre líneas de análisis para aplicaciones futuras en Física nuclear, tecnología energética y educación científica.

Referencias

- [1] Atkinson, M. C., & Schunck, J. D. (2020). Reexamining the relation between the binding energy of finite nuclei and the equation of state of infinite nuclear matter. <https://doi.org/10.1103/102.044333>
- [2] Blandón Tinoco, D. M., & Herrera-Castrillo, C. J. (2025). Prácticas de laboratorio en la unidad de Electromagnetismo en Educación Superior. *Revista Científica Tecnológica*, 8(3), 23-38. <https://doi.org/10.5377/recientec.v8i3.21859>
- [3] Cordero-Moreno, A., Alarcón-Martínez, A., & Herrera-Castrillo, C. (2026). Propuesta innovadora de generación de energía mediante baldosas de presión para espacios educativos. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 13(25), 9-19. <https://doi.org/10.29057/estr.v13i25.15470>
- [4] Einstein, A. (1905). *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Vol. 322). *Annalen der Physik*. Recuperado el Noviembre de 2025, de https://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/einstein-papers/1905_17_891-921.pdf
- [5] Greiner, W., & Maruhn, J. (1996). *Nuclear models*. Springer-Verlag. Obtenido de [https://es.scribd.com/document/917595087/Greiner-W-](https://es.scribd.com/document/917595087/Greiner-W-Maruhn-J-Nuclear-Models-Springer-1996-ISBN-354059180X-600dpi-T-399s-K-PQft)
- [6] Gutiérrez-Cruz, H. T., Olivas-Carrasco, Y. K., Salazar-Rivera, G. L., & Herrera-Castrillo, C. J. (2024). Experimento para el análisis del tema objeto rígido bajo aceleración angular constante Experiment for the analysis of the subject rigid object under constant angular acceleration. *researchgate.net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Cliffor-Herrera-Castrillo/publication/390099244_Experimento_para_el_analisis_del_tema_objeto_rigido_bajo_aceleracion_angular_constante/links/67df89ee3ad6d174c4b81fde/Experimento-para-el-analisis-del-tema-objeto-rigido-
- [7] Herrera Castrillo, C. J., Bustillo Flores, G. N., & Espinoza Huete, H. E. (2026). Guiones de Laboratorio para el Trabajo Práctico Experimental en la asignatura de Física de Secundaria por encuentro. *Boletín Científico de la Escuela Superior Atotonilco de Tula*, 13(25), 1-9. <https://doi.org/10.29057/esat.v13i25.14178>
- [8] Krane, K. S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. n, Nueva York: John Wiley & Sons. Obtenido de <https://archive.org/details/introductorynuc00kran>
- [9] Maruhn, W. G. (1996). *Nuclear Models*. Berlín: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61405-8>
- [10] Moscato, P., Koc, N., & Esteban, J. N. (2024). Approximating the Nuclear Binding Energy Using Analytic Continued Fractions. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-61389-5>
- [11] Wang, M., Audi, G., Huang, W. J., & F.G Kondev, S. N. (2021). The AME 2020 Atomic Mass Evaluation. (C. P. C, Ed.) *The AME 2020 Atomic Mass Evaluation*, 25-190. Obtenido de https://pure.mpg.de/pubman/item/item_3293403_1
- [12] Zeng, L. X., & J. B. Ma, H. L. (2024). Nuclear Binding Energies in Artificial Neural Networks. Obtenido de <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.109.034318>