

Energía: una cuenta conservada, no una sustancia

IDE-001 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.8 ES · 17 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: Multiescala, de la mecánica y la química a la cosmología

Límite: La energía como magnitud de balance definida y conservada; la entropía y la disponibilidad se desarrollan solo hasta donde exige la sección 6 y corresponden a IDE-003

Trabajos relacionados: IDE-003, IDE-005, IDE-022

Perfil epistémico: Conocimiento establecido en conjunto; la sección 7 lleva una afirmación de Interpretación científica actual

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

La energía es una de las magnitudes unificadoras más potentes de la ciencia, pero el lenguaje cotidiano la convierte con facilidad en una sustancia engañosa. Este ensayo examina qué entienden físicos y químicos por energía: una propiedad calculable de un sistema especificado, cuyos cambios se siguen a través del movimiento, la configuración, la radiación, los grados internos de libertad y la masa. Distingue las magnitudes de estado de transferencias como el trabajo y el calor, explica por qué la conservación exige definir bien la frontera del sistema y muestra cómo el teorema de Noether relaciona la energía conservada con la simetría de traslación temporal. Después marca dos límites. Conservar energía no significa que toda esté igualmente disponible para producir cambios útiles, y la relatividad general no ofrece una energía global única para cualquier espaciotiempo. El resultado es un concepto que unifica muchas descripciones sin convertirse en un fluido material ni en una sustancia universal.

En 60 segundos

La energía no es una sustancia escondida dentro de los objetos ni un conjunto de paquetes idénticos que circulan entre ellos. Es una magnitud física que distintas teorías calculan de formas diferentes pero compatibles. Un objeto en movimiento puede aportar energía cinética; la configuración de un sistema, energía potencial; la materia posee energía interna; la radiación transporta energía; y la masa contribuye a la energía relativista. El trabajo y el calor se entienden mejor como maneras en que la energía cruza la frontera de un sistema, no como sustancias almacenadas en su interior. La ley de conservación solo funciona después de especificar el sistema y sus interacciones. La energía mecánica puede disminuir por rozamiento mientras la cuenta energética más amplia sigue equilibrada porque aumenta la energía interna. El teorema de Noether aporta una razón estructural más profunda en muchas teorías físicas: la invariancia frente a traslaciones temporales se asocia a una energía

conservada. Pero el lema tiene límites. La entropía restringe la utilidad de la energía y, en un espaciotiempo curvo y evolutivo, puede no existir una única energía total global bien definida. La energía es, por tanto, un concepto disciplinado de balance con un alcance extraordinario, no un fluido universal.

Por qué importa esta pregunta

La energía aparece en casi todos los relatos científicos: piedras que caen, reacciones químicas, estrellas, baterías, metabolismo y expansión del universo. Esa amplitud invita a tratar la palabra como si nombrara una materia oculta. De ahí nacen confusiones persistentes: el calor parece algo que un objeto «contiene», el rozamiento parece destruir energía, el ATP se imagina como un paquete energético y el corrimiento cosmológico al rojo parece hacer desaparecer energía. Una definición rigurosa hace más que ordenar el vocabulario: obliga a indicar qué se mide, qué frontera se ha elegido, qué magnitud se conserva y cuándo el lema habitual de conservación necesita una condición adicional.

1. Un número que sobrevive al cambio

La energía debe su importancia a que permanece restringida a través de las transformaciones en un sentido preciso y acotado. En mecánica elemental, los términos cinético y potencial pueden intercambiarse. En termodinámica, la energía interna cambia cuando la energía cruza una frontera mediante calor o trabajo. En descripciones electromagnéticas y cuánticas, campos y cuantos transportan energía. La relatividad vincula la masa de un cuerpo con su contenido energético. No son definiciones rivales de sustancias distintas, sino maneras específicas de cada dominio de calcular contribuciones a una estructura común de balance.[1,7-9]

Por eso la lista habitual de «formas de energía» puede inducir a error. La idea útil no es que una materia llamada energía cambie repetidamente de disfraz. La idea útil es que distintas variables de estado y términos dinámicos contribuyen a una magnitud cuyos cambios obedecen relaciones exactas. La famosa analogía de los bloques de Feynman captura el balance, pero también su límite: el número conservado es físicamente significativo aunque no exista una imagen única de cómo «se ven» todas sus contribuciones.[1,7]

El SI refuerza esa abstracción. Energía, trabajo y cantidad de calor se miden en julios, unidad derivada coherente $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$. [5] Compartir unidad no los convierte en el mismo tipo de concepto. Una magnitud de estado puede describir un sistema en un instante; una magnitud de transferencia describe un proceso a través de una frontera. La ecuación y el procedimiento experimental determinan cuál de las dos se quiere decir, no la unidad por sí sola.

En qué punto estamos

La energía se entiende mejor como una magnitud calculable sometida a restricciones de conservación, no como un ingrediente material. Distintas teorías muestran contribuciones distintas y el julio aporta una unidad común. La siguiente pregunta no es dónde «está realmente» la energía, sino qué sistema se ha definido y qué términos pertenecen a su balance.[1,5,7,8]

2. La frontera del sistema hace el trabajo oculto

Las afirmaciones de conservación siempre se refieren a un sistema. Si dejamos caer una pelota a través del aire, su energía mecánica no permanece exactamente constante: el arrastre reduce la

suma de energía cinética y potencial gravitatoria de la pelota. Si ampliamos el sistema para incluir el aire, la pelota y sus grados microscópicos de libertad, la aparente pérdida reaparece sobre todo como energía interna y movimiento en el entorno. No se ha recuperado nada misterioso. Ha cambiado la contabilidad porque cambió la frontera.[8]

Esta es una razón por la que «la energía potencial pertenece al objeto» suele ser una mala frase. Cerca de la Tierra, la energía potencial gravitatoria se asigna de forma natural a la configuración del sistema Tierra-objeto; la energía potencial elástica pertenece a un sistema deformado; la energía potencial electrostática pertenece a una configuración de cargas y campos. En muchos cálculos asignamos términos a un subsistema por conveniencia, pero esa asignación es en parte una elección de modelo. Las predicciones observables permanecen invariantes si la contabilidad se transforma de forma coherente.[14]

La misma disciplina importa en química y biología. Un recipiente de reacción, una célula y un ecosistema intercambian materia y energía con su entorno de maneras diferentes. Antes de afirmar que se produjo, consumió, almacenó o desperdició energía, hay que declarar la frontera y las variables retenidas. Muchas paradojas verbales desaparecen en ese punto.[8]

En qué punto estamos

Un balance energético nunca carece de frontera. Una creación o destrucción aparente suele indicar que la cuenta elegida omitió una transferencia, una interacción o grados internos de libertad. Definir el sistema forma parte de la física y prepara la distinción entre la energía que caracteriza un estado y la que cruza su frontera.[8]

3. Calor y trabajo son transferencias, no fluidos almacenados

La termodinámica afina la distinción. La energía interna es una función de estado: una vez fijado el estado termodinámico, su valor no depende del camino seguido para alcanzarlo. El calor y el trabajo, en cambio, describen transferencias durante un proceso. IUPAC define el calor como energía transferida debido a una diferencia de temperatura, mientras que el trabajo mecánico puede representarse mediante la integral fuerza-desplazamiento.[3,4] Un cuerpo puede tener energía interna; suele ser engañoso decir que «contiene calor» en el mismo sentido técnico.

La primera ley los conecta. Con la convención en la que el trabajo realizado sobre el sistema es positivo, $\Delta U = q + w$. Otras disciplinas usan a veces el signo opuesto para el trabajo, por lo que la convención debe declararse. Lo que no cambia es la estructura: el cambio de la energía almacenada se relaciona con la energía transferida a través de la frontera.[2]

Esto también aclara el rozamiento. No viola la conservación.[8] Redirige energía mecánica organizada hacia movimiento microscópico menos organizado y otros grados internos de libertad. Esa distinción se vuelve crucial cuando preguntamos no solo cuánta energía existe, sino cuánta puede impulsar un cambio especificado.

En qué punto estamos

La energía interna caracteriza un estado; calor y trabajo caracterizan transferencias. Confundirlos crea la falsa imagen del calor como sustancia y hace que el rozamiento parezca destructivo. Al separar estado y transferencia, la primera ley se convierte en una relación de balance y no en un relato sobre

fluidos invisibles. Esa distinción prepara la pregunta siguiente: ¿por qué deben conservarse esos balances?[2]

4. La conservación es más profunda que un truco de cálculo

En muchas teorías físicas, la conservación de la energía está vinculada a una simetría. El primer teorema de Noether muestra que las simetrías continuas de una acción corresponden a magnitudes conservadas. Cuando las leyes que gobiernan un sistema cerrado no cambian al desplazar el origen de la coordenada temporal, la magnitud conservada asociada es la energía. La traslación espacial se relaciona de forma análoga con el momento lineal y la rotación con el momento angular.[6]

Esto no significa que cada ejercicio escolar de conservación requiera resolver un problema variacional. Explica por qué las leyes de conservación están incorporadas estructuralmente en amplias clases de teorías modernas. También evita una exageración frecuente: «la energía se conserva porque existe el tiempo». La condición relevante no es la mera existencia del tiempo, sino una invariancia concreta de la dinámica frente a traslaciones temporales.[6]

El teorema revela además por qué sigue importando definir el sistema. Si una influencia externa explícitamente dependiente del tiempo actúa sobre un subsistema, la energía de ese subsistema puede no conservarse. La teoría más amplia puede poseer una magnitud conservada una vez incluidos los grados de libertad externos, pero la conservación no nos autoriza a ignorar lo que hemos dejado fuera del modelo.

En qué punto estamos

El teorema de Noether relaciona la conservación de la energía con la simetría de traslación temporal en teorías variacionales.[6] Es más preciso que afirmar que la energía se conserva «por definición».

También fija el límite: un subsistema abierto o explícitamente dependiente del tiempo puede no poseer por sí solo una energía conservada. El paso siguiente es ver cómo sobrevive esa estructura cuando relatividad y cuantos amplían la cuenta.

5. Masa, luz y ampliación de la cuenta

La relatividad especial amplió la contabilidad clásica. Un cuerpo masivo en reposo posee energía de reposo $E_0 = mc^2$, y su energía relativista total incluye además el movimiento.[1] Esto no significa que la masa sea una sustancia separada que pueda verse en energía. Masa y energía son propiedades relacionadas de un sistema físico,[9] y los cambios en la energía de enlace pueden modificar la masa de un sistema compuesto.

La luz transporta energía aunque los fotones tengan masa en reposo nula. Para un fotón, $E = h\nu$, de modo que la frecuencia está directamente relacionada con la energía. La radiación puede transferir energía y momento, calentar materia, impulsar transiciones y ejercer presión. La imagen clásica según la cual la energía debe pertenecer a partículas masivas es demasiado estrecha.[1,15]

La lección metodológica es que cada ampliación de la física conservó el papel contable de la energía modificando qué términos debían incluirse. La conservación sobrevivió haciéndose más amplia, no forzando fenómenos nuevos dentro de una imagen mecánica antigua.[1,7,9,15]

En qué punto estamos

La relatividad y la física cuántica no abolieron la energía: ampliaron lo que entra en el balance. La masa en reposo contribuye a la energía y la radiación sin masa en reposo la transporta mediante su frecuencia. Lo duradero es la estructura de conservación, no una imagen clásica única de sus términos. Esa ampliación plantea otra pregunta: incluso si la energía total cuadra, ¿cuánta queda disponible para realizar trabajo útil?[1,15]

6. Conservada no significa disponible

Si la energía se conserva, ¿por qué se agota una batería, se enfría una bebida caliente o una máquina pierde capacidad para realizar trabajo? Porque la cantidad total de energía y la capacidad de impulsar un proceso concreto son preguntas distintas.[7] La segunda ley de la termodinámica restringe el cambio espontáneo mediante la entropía, magnitud cuyo cambio IUPAC define como el calor aportado al sistema en un proceso reversible a temperatura constante, dividido por esa temperatura.[12] Los potenciales como la energía de Gibbs, definida como la entalpía menos el producto de la temperatura termodinámica por la entropía,[13] se construyen para condiciones ambientales especificadas.

Un océano a temperatura ambiente contiene una enorme energía interna, pero un dispositivo en equilibrio con ese mismo océano no puede convertirla toda en trabajo dirigido sin producir otros cambios.[7] A la inversa, una diferencia energética modesta mantenida en forma de gradiente puede ser muy eficaz porque está organizada con respecto al proceso que puede aprovecharla. Este es el punto en el que el lenguaje de «alta energía» y «baja energía» pasa a depender del contexto.

Este ensayo no desarrolla todavía una teoría completa de la entropía. La frontera esencial es que la conservación responde a cómo cierra el balance energético, mientras que la termodinámica pregunta qué transformaciones son posibles, en qué dirección y con qué capacidad de impulso disponible.

En qué punto estamos

La conservación de la energía no garantiza su utilidad. La entropía y las restricciones termodinámicas determinan con qué facilidad las diferencias energéticas pueden impulsar cambios. Un proceso puede conservar perfectamente la energía total y, al mismo tiempo, reducir irreversiblemente la fracción convertible en el trabajo deseado. El último límite es geométrico: ¿qué ocurre con el lema cuando el propio espaciotiempo es dinámico?[7]

7. El límite cosmológico del lema

La precaución más fuerte aparece en relatividad general. La materia se describe mediante un tensor de energía-momento cuya divergencia covariante se anula, lo que expresa una estructura local de conservación. Pero el espaciotiempo curvo complica la idea de una densidad única de energía gravitatoria, y no existe en todo espaciotiempo una única energía total global conservada. Las definiciones globales funcionan limpiamente solo bajo condiciones geométricas adicionales, como simetrías adecuadas o determinada estructura asintótica.[10,11]

Esto importa en cosmología. En un universo de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker en expansión, las longitudes de onda de los fotones se estiran y sus energías medidas disminuyen. Preguntar «¿adónde fue esa energía?» supone de antemano que el universo evolutivo completo

posee el mismo tipo de escalar global conservado familiar en sistemas de laboratorio invariantes bajo traslaciones temporales. La relatividad general no ofrece ese objeto en general.[10,11] Las ecuaciones locales siguen siendo coherentes; lo que se ha llevado más allá de su dominio es la intuición del balance global.

No es una prueba de que la conservación sea aproximada u opcional. Es una prueba de que las leyes de conservación poseen condiciones matemáticas. Un lema aprendido en sistemas aislados y en un espaciotiempo casi plano no debe elevarse a un teorema más fuerte que el que la propia teoría sostiene.[10,11]

En qué punto estamos

La relatividad general conserva una estructura local de energía-momento, pero no garantiza una energía global única y conservada para cualquier espaciotiempo.[10,11] Por eso el corrimiento cosmológico al rojo no debe interpretarse exigiendo un depósito global de energía desaparecida. La condición de contorno forma parte de la ley, no es un estorbo añadido después. Ese límite prepara la síntesis final: separar el balance robusto de las condiciones que permiten formular una conservación global.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La energía es una propiedad definida cuantitativamente y utilizada en mecánica, termodinámica, electromagnetismo, física cuántica y relatividad.[1,5,7]
- Experimentos y teoría respaldan relaciones exactas de balance cuando se especifican el sistema y las transferencias relevantes.[8]
- Calor y trabajo son magnitudes de proceso; la energía interna es una magnitud de estado.
- El teorema de Noether conecta la invariancia bajo traslaciones temporales con una energía conservada en teorías variacionales.[6]
- La relatividad especial exige incluir la energía de reposo y las contribuciones relativistas, y la radiación transporta energía.[1,15]
- La conservación por sí sola no determina cuánta energía está disponible para realizar trabajo útil.[7]
- La relatividad general conserva localmente energía-momento, pero no proporciona una energía global única en todo espaciotiempo.[10,11]

Lo que todavía no sabemos

- Cómo definir de la forma más útil la energía gravitatoria cuasilocal en relatividad general, y cuál de las definiciones disponibles conviene en un espaciotiempo concreto.[10,11]
- Cómo conectarán las futuras teorías de gravedad cuántica sus magnitudes conservadas con las descripciones de baja energía ya familiares.
- Nada de esto es una duda empírica abierta sobre el funcionamiento de los balances energéticos ordinarios de sistemas cerrados dentro de sus dominios probados. Estas preguntas no debilitan las leyes de conservación de laboratorio; marcan el punto donde el concepto se encuentra con la estructura del propio espaciotiempo.[10,11]

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un fallo reproducible del balance energético en un sistema genuinamente aislado, después de incluir todas las partículas, campos, radiación y transferencias de frontera conocidas, exigiría una revisión profunda.[6]
- También lo haría demostrar que una teoría fundamental invariante bajo traslaciones temporales carece sistemáticamente de la magnitud conservada correspondiente cuando se cumplen los supuestos de Noether.[6]
- En gravitación, un nuevo marco fundamental podría cambiar qué definiciones globales o cuasilocales de energía se prefieren, pero tendría que recuperar los límites locales y de campo débil ya medidos con enorme éxito.[10,11]

Si solo recuerdas una cosa

La energía es una magnitud de balance cuyo significado depende del sistema y la teoría; no es una sustancia, y su conservación global tiene límites geométricos.

Artículos relacionados

- IDE-003 — Entropía
- IDE-005 — Simetría
- IDE-022 — Masa

Referencias

- [1] International Union of Pure and Applied Chemistry. Energy. Gold Book, 5th ed. (2025). DOI 10.1351/goldbook.E02101.
- [2] International Union of Pure and Applied Chemistry. Internal energy. Gold Book, 5th ed. (2025). DOI 10.1351/goldbook.I03103.
- [3] International Union of Pure and Applied Chemistry. Heat. Gold Book, 5th ed. (2025). DOI 10.1351/goldbook.H02752.
- [4] International Union of Pure and Applied Chemistry. Work. Gold Book, 5th ed. (2025). DOI 10.1351/goldbook.W06684.
- [5] Bureau International des Poids et Mesures. The International System of Units (SI), 9th edition, updated 2026. DOI 10.59161/AUEZ1291.
- [6] Emmy Noether. Invariant Variation Problems. English translation by M. A. Tavel. Transport Theory and Statistical Physics 1, 186-207 (1971). DOI 10.1080/00411457108231446.
- [7] Richard P. Feynman; Robert B. Leighton; Matthew Sands. The Feynman Lectures on Physics, New Millennium Edition, Vol. I, chapter 4 (Conservation of Energy). Basic Books, ISBN 978-0-465-02414-8.
- [8] William Moebs; Samuel J. Ling; Jeff Sanny. University Physics Volume 1, section 8.3 (conservation of energy). OpenStax (2016).
- [9] Albert Einstein. Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy-Content? Annalen der Physik 18, 639-641 (1905). DOI 10.1002/andp.19053231314.
- [10] László B. Szabados. Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in General Relativity. Living Reviews in Relativity 12, 4 (2009). DOI 10.12942/lrr-2009-4.
- [11] Patrick M. Dürr. Fantastic Beasts and where (not) to find them: Local gravitational energy and energy conservation in general relativity. Studies in History and Philosophy of Modern Physics 65, 1-14 (2019). DOI 10.1016/j.shpsb.2018.07.002.

- [12] International Union of Pure and Applied Chemistry. Entropy. Gold Book, 5th ed. (2025). DOI 10.1351/goldbook.E02149.
- [13] International Union of Pure and Applied Chemistry. Gibbs energy. Gold Book, 5th ed. (2025). DOI 10.1351/goldbook.G02629.
- [14] William Moebs; Samuel J. Ling; Jeff Sanny. University Physics Volume 1, section 8.1 (potential energy of a system). OpenStax (2016).
- [15] International Union of Pure and Applied Chemistry. Photon. Gold Book, 5th ed. (2025). DOI 10.1351/goldbook.P04627.