

AC 14 13

¿Cuáles son los objetivos que nos proponemos alcanzar con el estudio del presente tema y qué relación tiene su contenido con el de temas anteriores? Al finalizar el estudio de este tema, debe quedar bien clara la importantísima noción de energía mecánica de un sistema físico, en particular de una partícula o de un cuerpo asimilable a un punto material. Igualmente, los esfuerzos del estudiante deben ir encaminados a lograr una perfecta asimilación de la ley de conservación de la energía, ley de gran trascendencia en la física y en la ciencia en general, estando así en condiciones de poder aplicarla a situaciones prácticas concretas. Hemos hablado de la energía mecánica como la magnitud que constituye el núcleo central de este tema.

Lo primero que deberemos hacer será proceder a su definición, diciendo que la energía mecánica de una partícula viene dada por la suma de sus energías cinética y potencial en una posición dada correspondiente a un instante determinado. Tal magnitud, así definida, presenta la sumamente importante propiedad de ser una constante del movimiento, es decir, de permanecer constante en el tiempo siempre y cuando todas las fuerzas actuantes sobre la partícula sean conservativas, fuerzas que, como es sabido, son las únicas para las que puede definirse la función escalar denominada energía potencial. Es interesante observar que la energía cinética, en virtud de su definición, no depende explícitamente del tiempo, pero sí que existe una dependencia temporal implícita a través de la velocidad instantánea de la partícula, que bajo la acción de una fuerza no será constante, sino que en general variará en el tiempo.

Asimismo, la energía potencial depende implícitamente del tiempo al ser función de la posición ocupada por la partícula en el campo de fuerzas en que se encuentra inmersa, como esta posición cambiará en el transcurso del tiempo al desplazarse la partícula en su movimiento bajo la acción de las correspondientes fuerzas conservativas. La energía potencial asociada dependerá implícitamente del tiempo a través de las coordenadas de posición. Según lo anterior, vemos que, aunque no exista una dependencia explícita de las energías cinética y potencial de la partícula respecto de la variable temporal, no por ello ambas magnitudes permanecen en general constantes en el tiempo durante el movimiento de la partícula en el campo de fuerzas, al existir las mencionadas dependencias implícitas a través de la velocidad y de la posición instantáneas, respectivamente.

La importancia de la definición de la energía mecánica radica, pues, en el hecho de que esta magnitud no depende del tiempo ni explícita ni implícitamente en ausencia de fuerzas no conservativas, como las asociadas a fenómenos de fricción o rozamiento. Así pues, disponemos de una magnitud que caracteriza el movimiento y que es una constante del mismo. De esta forma, si conocemos la variación de la energía cinética de la partícula correspondiente a dos posiciones ocupadas por la partícula separadas por un cierto intervalo de tiempo, la variación de la energía potencial de dicha partícula, admitiendo el carácter conservativo de las fuerzas actuantes, será exactamente igual a la variación de la energía cinética.

Así, si ésta aumenta en una cierta cuantía, la energía potencial disminuirá en esa misma

cuantía. Lo contrario ocurrirá, evidentemente, si la energía cinética sufre una disminución en lugar de un aumento, originándose entonces un aumento de la energía potencial equivalente a la disminución de la energía cinética. Estas cuestiones ya fueron apuntadas en la emisión anterior cuando hablábamos del trabajo realizado por las fuerzas de la gravedad durante la caída de un cuerpo en las proximidades de la superficie terrestre.

Ahora aparecen de nuevo como consecuencia de la definición de la energía mecánica de una partícula sometida a interacciones regidas por fuerzas conservativas, lo que se traduce en una constancia en una conservación de la energía mecánica. Vemos, pues, que el calificativo conservativo reservado para fuerzas que matemáticamente derivan de la función energía potencial no es caprichoso, sino que evidencia el hecho de la conservación de la energía mecánica de la partícula siempre que las fuerzas actuantes pertenezcan a esta categoría especial de fuerzas. Ha dicho usted antes que, en general, una partícula sometida a la acción de fuerzas sufre una variación en su energía cinética y, si las fuerzas son conservativas, también variará en la misma cuantía, si bien en sentido opuesto, la energía potencial.

¿No existirá, quizá, algún caso en que la energía cinética y, por consiguiente, la energía potencial permanezcan constantes aun cuando existan fuerzas que actúen sobre la partícula? Bien, cuando mencionaba antes esta cuestión me refería, por supuesto, al caso más general, pero, indudablemente, pueden darse y, de hecho, se darán situaciones en las que ocurra lo que usted dice. Así, por ejemplo, puede suceder que, en todo momento, la resultante de todas las fuerzas actuantes sobre la partícula objeto de estudio se anula. En este caso, la partícula se moverá libremente, obedeciendo a la ley de la inercia o primera ley de Newton de la dinámica.

Puesto que su velocidad, medida desde un cierto sistema de referencia en que se verifique el principio de inercia, será constante, en particular puede ser nula, eligiendo adecuadamente la base de referencia, la energía cinética también lo será. Otro caso, no tan trivial como el anterior, corresponderá al movimiento circular uniforme de una partícula alrededor de un punto dado. En el movimiento circular uniforme, como ustedes ya saben, se mantiene constante el módulo de la velocidad, aun cuando la dirección varía de un instante a otro, de manera que el vector velocidad no permanece constante como en el movimiento libre, rectilíneo y uniforme.

Sin embargo, puesto que la energía cinética incluye el cuadrado del módulo de la velocidad, que dicho sea de paso, es igual al producto escalar del vector velocidad por sí mismo, la energía cinética será constante. Un ejemplo de esta eventualidad correspondería al movimiento de un satélite artificial describiendo una órbita circular en torno a la Tierra, situada ésta en el centro de la circunferencia definida por dicha trayectoria. En este ejemplo, la fuerza que actúa sobre el satélite es la fuerza de atracción gravitatoria ejercida por la Tierra.

Puesto que el satélite, con una energía adecuada, describe una trayectoria circular, la fuerza gravitatoria que expresa la interacción entre la Tierra y el satélite no realiza trabajo durante el movimiento de éste, al ser en todo instante perpendicular al desplazamiento elemental según

la órbita circular. Acudiendo al teorema del trabajo y de la energía cinética, éste nos asegura entonces que la energía cinética no varía de acuerdo con el resultado obtenido anteriormente, considerando únicamente la cinemática del problema. Por supuesto, hemos considerado que sobre el satélite no obran otras fuerzas que las ejercidas por la Tierra en las distintas posiciones ocupadas sucesivamente durante el movimiento.

Si no fuese así, y actuasen otras fuerzas no conservativas, como por ejemplo las asociadas a la fricción con la atmósfera, la energía cinética no permanecería ya constante. Recordando ahora el teorema del trabajo y de la energía potencial, aplicable en éste caso, puesto que las fuerzas gravitatorias son conservativas, vemos que la energía potencial tampoco varía en el transcurso del tiempo. Cabrá esperar la obtención de éste resultado, dado que la energía potencial depende sólo de la distancia de separación de las partículas interactuantes.

En éste caso, ésta distancia es la que media entre el satélite y el centro de la Tierra, igual al radio constante de la órbita circular. En definitiva, en el ejemplo que acabamos de proponer, no sólo la energía mecánica es constante, sino que también las energías cinética y potencial, cuya suma conduce a la definición de la energía mecánica, son igualmente constantes en el transcurso del movimiento. Los razonamientos anteriores evidentemente serán válidos cualquiera que sea el plano de la órbita.

De esta forma, para un radio dado, medido a partir del centro de la Tierra, todos los puntos que equidisten de dicho centro podrán corresponder a posiciones para las cuales la energía potencial gravitatoria del satélite tomará el mismo valor. Dichos puntos definen una superficie esférica, en éste caso, correspondiente a la simetría esférica de la distribución de la masa de la Tierra, que en general recibe el nombre de superficie equipotencial. Esta superficie representa pues el lugar geométrico de todos los puntos para los cuales la energía potencial de una partícula, el satélite en éste caso, localizada indistintamente en cualquiera de ellos, toma el mismo valor.

Así pues, cuando una partícula se desplaza sobre una superficie equipotencial, su energía potencial no varía, de manera que si no actúan sobre la partícula otras fuerzas que las conservativas, su energía cinética tampoco variará. No obstante, como decíamos anteriormente, en el caso más general, la energía cinética y la energía potencial cambiarán durante el movimiento de la partícula en el campo de fuerzas, pero de manera que la suma de ambas energías, es decir, la energía mecánica, será una constante del movimiento. Estamos dando por válida la constancia de la energía mecánica de una partícula siempre que las fuerzas actuantes sean conservativas, pero en realidad no hemos dicho todavía por qué debe ocurrir tal cosa.

Tiene usted razón, pero como puede observar leyendo el apartado 8.2 del texto, la verificación del teorema o ley de conservación de la energía no ofrece ninguna dificultad. En efecto, consideremos una partícula que se desplaza bajo la acción de fuerzas conservativas. El teorema del trabajo y de la energía cinética, válido para cualquier tipo de fuerzas, nos dice que el trabajo

realizado por las fuerzas al desplazar la partícula desde una posición inicial a otra final, correspondientes a sendos instantes de tiempo, viene dado por la diferencia entre los valores de la energía cinética final e inicial.

Por otro lado, según el teorema del trabajo y de la energía potencial, aplicable en el caso de fuerzas conservativas como el que ahora nos ocupa, el trabajo efectuado por las fuerzas al desplazar la partícula de una posición inicial a otra final está dado por la diferencia entre los valores de la energía potencial inicial y final. Puesto que estamos considerando que las fuerzas que actúan sobre la partícula son conservativas, se sigue que el trabajo al que nos referíamos cuando enunciábamos el teorema del trabajo y de la energía cinética es el mismo que el que aparece en el enunciado del teorema del trabajo y de la energía potencial. Observen ustedes, la igualdad 8-5 del texto.

Se deduce entonces inmediatamente la relación 8-6 que expresa que la suma de las energías cinética y potencial correspondientes a la primera posición es igual a la misma suma para la segunda posición. Y puesto que hemos definido tal suma como la energía mecánica de la partícula, vemos que esta es la misma en una y otra posición, lo cual se expresa en el texto por la igualdad 8-7. Ahora bien, dichas posiciones son arbitrarias, por lo que encontramos así la constancia o conservación de la energía mecánica de la partícula o cuerpo, móvil en cualquier punto de su trayectoria, correspondiente a un instante a sí mismo arbitrario.

En el texto se dan unas cuantas aplicaciones de esta importante ley. Recomendamos al estudiante que la asimile perfectamente y que procure hacer cuantas aplicaciones pueda de la misma con el fin de familiarizarse con ella. Desde el punto de vista de la mecánica, la importancia de esta ley o teorema queda claramente de manifiesto al hacer que en un buen número de casos prácticos no tengamos que analizar los detalles de las trayectorias descritas por los móviles.

Así, por ejemplo, si estamos interesados en calcular la velocidad con que llega al suelo un cuerpo situado inicialmente a una cierta altura después de recorrer sin fricción una superficie curvada, la ley de conservación de la energía mecánica permite resolver el problema en una forma harto sencilla. Si optásemos por un procedimiento alternativo para la resolución del problema, a partir de la ecuación de movimiento del cuerpo o segunda ley de Newton de la dinámica, habría que determinar previamente la aceleración del cuerpo en cada punto y proceder a una integración de la función que representa esta magnitud vectorial. Como puede verse, la ventaja del primer procedimiento no deja lugar a dudas.

A pesar de que los razonamientos que conducen a la deducción de la ley de conservación de la energía mecánica de una partícula o de un cuerpo en ausencia de fricción o rozamiento son fácilmente comprensibles, por lo menos desde un punto de vista formal, matemático, uno se siente un tanto confuso por la forma en cómo se ha definido la energía mecánica como suma de energía cinética y de energía potencial. Aunque estén relacionadas, no representan estas dos magnitudes conceptos diferentes. ¿Cómo es posible entonces que podamos sumarlas para

definir la energía mecánica? Realmente no me sorprende su perplejidad.

Debo decirle primeramente que ya el mismo concepto de energía implica un cierto grado de abstracción a pesar de que usted piense que tiene una idea intuitiva acerca de lo que es la energía como algo concreto, en ningún modo abstracto. Si es así, será mejor que abandone sus ideas intuitivas, pues lo más probable es que no sean exactas. En la física, un exceso de intuición puede ser peligroso en ocasiones.

La realidad es que no sabemos exactamente qué es lo que pueda ser la energía. El concepto de energía es de una suma importancia, pero siempre desde una perspectiva puramente operativa y no como una realidad tangible. Como dice el premio Nobel americano Feynman, es importante darse cuenta de que en la física actual no sabemos lo que es la energía.

No tenemos un modelo de energía formada por pequeñas gotas de un tamaño definido, no es así. Sin embargo, hay fórmulas para calcular cierta cantidad numérica que permanece constante. La noción de energía es algo abstracto en el sentido de que no nos informa acerca del mecanismo o las razones para las diversas fórmulas.

Hasta aquí la cita de Feynman. Un segundo motivo de confusión puede radicar en el hecho de la proliferación de los calificativos usados para caracterizar a las diversas formas de energía. Así, por ejemplo, se habla de energía cinética, potencial, química, gravitatoria, eléctrica, nuclear, térmica, elástica, etc.

Debemos congratularnos, sin embargo, de que por fortuna solo existen dos formas de energía fundamentales, la cinética y la potencial. La primera asociada al movimiento de los cuerpos y la segunda debida a su posición en un campo de fuerzas, entendido este como aquella región del espacio en la que el cuerpo experimenta cierta fuerza en función de su posición o localización en el mismo. La energía cinética de un cuerpo representa el trabajo que el cuerpo es capaz de realizar en virtud de su movimiento.

La energía potencial, en cambio, representa el trabajo que el cuerpo puede realizar merced a su localización espacial en un campo de fuerzas. Admitidas estas dos categorías fundamentales de energía, debe quedar, pues, claro que calificativos tales como gravitatoria, eléctrica, nuclear, química o elástica se refieren a otros tantos tipos diferentes de energía potencial asociados a la existencia de campos de fuerzas de distinta naturaleza. En cuanto a la energía térmica dejaremos para la próxima emisión el comentario detallado que merece.

Ciniéndome a su pregunta acerca de por qué la energía cinética y la energía potencial tienen en común la denominación genérica de energía cuando en realidad tales expresiones se refieren a conceptos en principio bien diferentes, tengo que decirle que en efecto la energía cinética, al igual que el momento lineal, es una magnitud que define el estado dinámico de la partícula o del cuerpo considerados, independientemente de que interactúen o no con otros. Si una partícula se mueve libremente, observada la trayectoria desde un cierto sistema de referencia, es decir, si no interactúa con otras, no existe energía potencial por la sencilla razón de que no

hay interacción, de modo que la energía mecánica es simplemente la energía cinética que, por tanto, permanece constante en el tiempo. Se puede hablar de energía potencial, como se ha visto, cuando la partícula está sometida a interacción, viniendo definida esta por fuerzas conservativas.

No obstante su distinto significado conceptual, dichas magnitudes están estrechamente relacionadas y no debe extrañar que se midan con las mismas unidades. Efectivamente, en la definición de energía mecánica se da cuenta simultáneamente del estado instantáneo de movimiento de la partícula, expresado por la energía cinética, y de la causa, la interacción caracterizada por la energía potencial, que va a provocar como efecto un cambio en dicho estado de movimiento. Vemos, por consiguiente, que la energía mecánica va a desempeñar un importante papel en el estudio de la dinámica, que, como sabemos, es la rama de la física que se preocupa de los movimientos de las partículas de los cuerpos en general en relación a las causas que los provocan o modifican.

Evidentemente, de la definición de energía mecánica se desprende que sus dimensiones son las de la energía cinética, la energía potencial o el trabajo. Así, la unidad en el sistema internacional será el Julio. Sabemos que, en virtud de su definición, la energía cinética solo puede tomar valores positivos o nulos, pero nunca negativos, en tanto que la energía potencial, por estar indeterminada en una constante de integración, puede adoptar valores positivos, nulos o negativos.

Si bien el origen de energía potencial se suele tomar de manera que el valor nulo de dicha magnitud corresponde a una fuerza nula, y en su caso los valores positivos a una repulsión y los negativos a una atracción. ¿Qué ocurre en este sentido con la energía mecánica suma de la energía cinética y de la energía potencial? Como usted señala, a diferencia de lo que ocurre con la energía potencial, la energía cinética de una partícula nunca puede tomar valores negativos. En cuanto a la energía mecánica, podrá ser evidentemente positiva, nula o negativa.

Sin embargo, el hecho de que la energía cinética ha de ser siempre positiva o nula, junto con la ley de conservación de la energía mecánica, se traduce en que en cualquier caso se ha de satisfacer que la energía mecánica ha de ser mayor o igual que la energía potencial, pero nunca inferior a ella. Esta condición impone ciertas restricciones al movimiento de las partículas, según sea el valor de su energía mecánica, que a su vez dependerá de las condiciones iniciales, es decir, de las energías cinética y potencial iniciales, respectivamente. Si la energía mecánica es igual a la energía potencial, entonces la energía cinética es nula.

Esta condición determina las posiciones límite de las partículas en su movimiento, los llamados puntos de retorno correspondientes a una energía cinética nula. Consideremos dos ejemplos ilustrativos en el caso de un movimiento unidimensional de una partícula en la dirección de un eje X de referencia. El primero corresponde a lo que se llama pozo de potencial definido por una función de energía potencial que representada en un diagrama en el que los valores de la energía se miden en el eje de ordenadas y los de la coordenada de posición en el de abscisas,

conduce a una parábola cuya concavidad apunta en el sentido negativo del eje de ordenadas.

En tal caso la partícula con una energía mecánica constante mayor que el valor mínimo de la energía potencial no puede moverse fuera del intervalo definido por los dos puntos del eje X que corresponden a la intersección de la recta paralela a dicho eje que representa la energía mecánica con la parábola que representa la energía potencial. La partícula por tanto ejecuta un movimiento periódico llamado oscilación armónica y que será tratado en una emisión posterior con las características de un movimiento limitado o finito. El punto del eje X correspondiente al valor mínimo de la energía potencial es una posición de equilibrio estable según los argumentos que expusimos en la emisión anterior.

En dicho punto no actúa ninguna fuerza sobre la partícula y si inicialmente su energía cinética es nula permanecerá indefinidamente en dicha posición. Al desplazar la partícula de su posición de equilibrio comunicándole una energía cinética adicional el movimiento que describe tiende a llevarla de nuevo a la posición de partida. Recomendamos al estudiante que discuta por sí mismo detalladamente el movimiento de una partícula en un pozo de potencial.

En realidad la figura 8-5 del texto representa una curva de energía potencial semejante a la que nos acabamos de referir si bien algo más sofisticada pero que presenta un gran interés al corresponder a la energía potencial de interacción de dos átomos de una molécula biatómica. Igualmente les aconsejamos como ejercicio de aplicación de la ley de conservación de la energía mecánica que discutan el movimiento de una partícula con una cierta energía mecánica constante en una barrera de potencial que corresponde a una función de energía potencial representada en un diagrama de energías por una parábola invertida con relación a la anterior esto es, con la concavidad dirigida en el sentido positivo del eje de ordenadas. Si recomendamos la realización de tales ejercicios es porque deseamos insistir en el hecho de que el conocimiento de la función que define la energía potencial para la región en la que puede moverse la partícula considerada suministra junto con la ley de conservación de la energía mecánica y el hecho de que la energía cinética nunca será negativa una completa y detallada información acerca de las características del movimiento de la partícula en el campo de fuerzas.

Llegados a este punto quizá convenga recapitular sobre las cuestiones que hemos visto en los últimos temas y que enlazan directamente con nuevos conceptos como el del calor introducidos en el siguiente tema, ¿no le parece? Muy bien, como usted sabe hasta ahora nos hemos referido casi exclusivamente al caso de que las partículas o los cuerpos considerados estuviesen obligados a moverse bajo la acción de fuerzas conservativas representativas por tanto de interacciones susceptibles de ser caracterizadas por la función escalar denominada energía potencial. De esta forma hemos podido llegar a enunciar el teorema del trabajo y de la energía potencial que junto con el teorema del trabajo y de la energía cinética ha servido para deducir la ley de conservación de la energía mecánica previa a la definición de esta magnitud. En el tema siguiente estudiaremos el caso en que además de fuerzas conservativas intervengan también en el movimiento de las partículas fuerzas no conservativas.

Conviene notar a este respecto que la definición de la energía mecánica no queda restringida al caso en que todas las fuerzas actuantes sean conservativas. No obstante, si sobre la partícula considerada obran simultáneamente fuerzas conservativas y no conservativas la energía mecánica ya no permanecerá constante en el tiempo. Esta situación corresponde por ejemplo al movimiento bajo fuerzas de fricción denominación esta que incluye todos los complejos procesos cuyo resultado es la oposición al movimiento ejercida por sistemas exteriores.

Así por ejemplo, cuando disponemos de un péndulo oscilando en un fluido más o menos viscoso la experiencia nos muestra que al cabo de un tiempo más o menos largo el péndulo acabará por detenerse. Analicemos el fenómeno. Si el péndulo se detiene es porque las moléculas de líquido en cuyo seno se desplazaba se oponían a este movimiento que perturbaba su estado de equilibrio térmico de manera que las interacciones de naturaleza eléctrica entre las moléculas de líquido y las de la superficie de la masa pendular tenían como fin parar el péndulo.

Puesto que el estudio microscópico detallado de dichas interacciones sería a todas luces imposible de ser llevado a la práctica describimos el proceso desde un punto de vista macroscópico o fenomenológico definiendo una fuerza de fricción ideal cuyo resultado sería el mismo que el conseguido por la acción conjunta de las moléculas de líquido y así hacemos responsable a dicha fuerza de la detención del péndulo. En todo caso, quedaría una pregunta por contestar y es la referente a qué ha ocurrido con la energía mecánica del péndulo suma de sus energías cinética y potencial. Desde luego tendremos que decir que la energía cinética ha desaparecido, se ha anulado y que la energía potencial ha pasado a tomar un valor mínimo correspondiente a la posición vertical de equilibrio.

En definitiva, bajo la acción de la fuerza de fricción que describe estadísticamente el comportamiento de las moléculas de líquido con respecto al péndulo móvil en su seno ha tenido lugar un proceso de disipación de energía mecánica. Con este apelativo queremos denotar que la energía mecánica macroscópica del péndulo se ha transformado en una nueva forma, si bien degradada de energía que llamamos calor, aumentando así la energía mecánica de las moléculas constitutivas del líquido y de la propia masa pendular y por tanto, como veremos más adelante, aumentando su temperatura. Procesos como el anterior tienen un carácter esencialmente irreversible.

El próximo día desarrollaremos estas ideas y procederemos a la generalización de la ley de conservación de la energía para el caso en que exista algún proceso cuyo resultado como en el ejemplo al que acabamos de aludir sea la degradación o disipación de energía mecánica macroscópica del móvil considerado. Acaban ustedes de escuchar Introducción al curso universitario de Ciencias Fisiconaturales Tema octavo Conservación de la energía por el profesor Don Antonio Rueda de Andrés Nos despedimos de ustedes hasta mañana miércoles a esta misma hora en que podrán escuchar Lengua Española El imperativo por el profesor Don Teodiselo Chacón e Introducción al curso universitario de Derecho por el profesor Don Rafael Giber y Sánchez de la Vega El tercer programa de Radio Nacional de España les ha ofrecido

Universidad Nacional de Educación a Distancia En su emisión diaria Universidad para Todos ha sido un espacio universitario preparado por su claustro de profesores y adaptado y presentado radiofónicamente por el tercer programa de Radio Nacional de España Subtítulos realizados por la comunidad de Amara.org