Apunte Física 1

Luca Di Bene

5 de septiembre de 2025

Índice

1. Unidades, Cantidades Físicas y Vectores

1.1. La Física

La Física es una **ciencia experimental** que busca explicar fenómenos naturales a través de la observación y la experimentación. Los físicos formulan teorías mediante **modelos ideales, leyes y principios físicos**. Estas teorías se desarrollan con creatividad, pruebas y observaciones, como hizo Galileo al investigar la caída de los cuerpos.

Resolución de problemas

Resolver problemas permite aplicar conceptos. El proceso incluye:

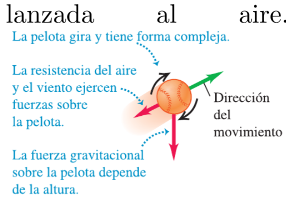
1. Identificar conceptos: Elegir qué principios físicos son relevantes.
2. Plantear el problema: Traducirlo a ecuaciones.
3. Ejecutar la solución: Sustituir valores y hacer cálculos.
4. Evaluar la respuesta: Verificar si tiene sentido físico.

Modelos idealizados

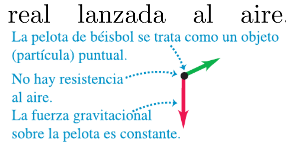
En física, simplificamos los sistemas complejos creando **modelos idealizados** que omiten detalles irrelevantes. Estos modelos son válidos dentro de ciertos límites, como el modelo de caída libre de Galileo que omite la resistencia del aire.
La física describe el mundo mediante **modelos matemáticos**, que permiten hacer predicciones razonables sobre el comportamiento de los sistemas.

Para simplificar el análisis de a) una pelota de béisbol lanzada al aire, usamos b) un modelo idealizado.

a) Una pelota real lanzada al aire.



b) Un modelo idealizado de una pelota real lanzada al aire.



1.2. Mediciones, magnitudes y unidades

Magnitudes físicas y unidades

Las **magnitudes físicas** son propiedades medibles como masa, longitud o tiempo. El **Sistema Internacional (SI)** define unidades básicas:

- **Longitud**: metro (**m**)
- **Masa**: kilogramo (**kg**)
- **Tiempo**: segundo (**s**)

Las unidades derivadas (como velocidad o energía) se forman combinando unidades básicas.

Conversión de unidades

1. Identificar: qué unidades hay que convertir.
2. Plantear/Ejecutar: usar factores de conversión.
3. Evaluar: comprobar que tenga sentido.

$$3\cancel{min} \times \frac{60s}{1\cancel{min}} = 180s$$

Incertidumbre

Toda medición tiene **incertidumbre**, que refleja el límite del instrumento. Se expresa como:

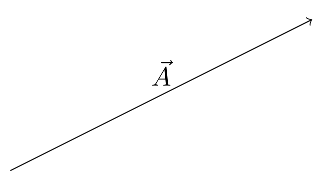
$$\text{valor medido} \pm \text{error}$$

1.3. Vectores y Suma de Vectores

Cantidades escalares y vectoriales

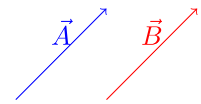
En física, algunas cantidades pueden ser descritas solo con un número y una unidad (**escalares**), como el tiempo, la masa o la temperatura. Otras, en cambio, requieren una dirección además de una magnitud (**vectores**). La velocidad y la fuerza son ejemplos típicos: no basta con saber cuánto valen, también es esencial saber **hacia dónde** actúan o se mueven.

Un vector se representa con una **flecha**. La **longitud** indica la magnitud y la **orientación** muestra su dirección. Por convención, los vectores se nombran con letras negritas y con una **flecha arriba**, como $\vec{A}$, para diferenciarlos de los escalares.

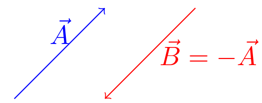


Magnitud: A o $|\vec{A}|$ indican cuánto mide $\vec{A}$, sin dirección.

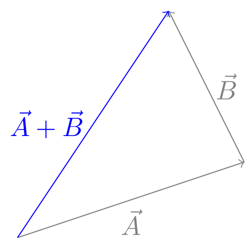
Dos vectores son **iguales** si tienen la misma **magnitud** y **dirección**, aunque estén ubicados en lugares diferentes.



Un vector **opuesto** tiene igual magnitud pero direción contraria, lo llamamos el negativo del vector original.



<u>Suma de vectores</u>: Para sumar vectores gráficamente, se usa el metodo "**cola con punta**": se coloca el origen del segundo vector en el extremo del primero.



No importa el orden en que sumes los vectores, siempre da el mismo resultado.

$$\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$$

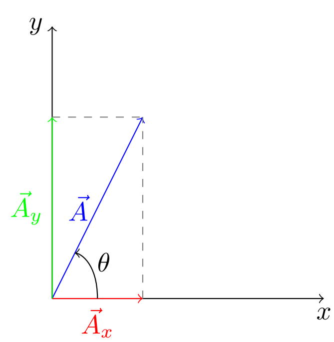
<u>Resta de vectores</u>: Restar vectores significa sumar el **opuesto**. Si queremos calcular $\vec{A} - \vec{B}$, lo que realmente hacemos es sumar $\vec{A}$ con el negativo de $\vec{B}$.

$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B})$$

1.4. Componentes de vectores

Cuando sumamos vectores, muchas veces es más fácil descomponerlos en **componentes** sobre un sistema de ejes perpendiculares.

Un vector $\vec{A}$ puede descomponerse en dos vectores: uno paralelo al eje x ($\vec{A}_x$) y otro paralelo al eje y ($\vec{A}_y$). La suma de estos dos vectores da como resultado el vector original: $\vec{A} = \vec{A}_x + \vec{A}_y$.



Podemos calcular la magnitud de las componentes de $\vec{A}$ si conocemos la magnitud A y su dirección. Describimos la direccion de un vector como el angulo θ formado por le eje x positivo con el vector en sentido anti horario. Entonces por definición de trigonométricas:

$$|\vec{A}_x| = |\vec{A}| \cos\theta$$

$$|\vec{A}_y| = |\vec{A}| \sin\theta$$

2. Movimiento en dos o en tres dimensiones

3. Leyes del movimiento de Newton

En los dos capítulos anteriores estudiamos la cinemática, el lenguaje para describir el movimiento. Ahora estamos en condiciones de pensar en qué hace que los cuerpos se muevan como lo hacen.

En este capítulo usaremos dos conceptos nuevos, la fuerza y la masa, para analizar los principios de la dinámica, los cuales están establecidos en solo tres leyes que fueron claramente enunciadas por Sir Isaac Newton:

- Primera ley (ley de la inercia): Si la fuerza neta sobre un cuerpo es cero, su movimiento no cambia.
- Segunda ley: Relaciona la fuerza con la aceleración cuando la fuerza neta no es cero.
- Tercera ley: Es una relación entre las fuerzas que ejercen dos cuerpos que interactúan entre sí.

Las leyes de Newton no son producto de deducciones matemáticas, sino una síntesis que los físicos han descubierto al realizar un sinnúmero de experimentos con cuerpos en movimiento.

3.1. Fuerza e interacciones

En la vida cotidiana hablamos de fuerza como un empujón o un tirón. En física, una fuerza se define mejor como una interacción entre dos cuerpos o entre un cuerpo y su entorno. Esta interacción tiene dirección y magnitud, por lo que se representa como un vector.

Fuerzas de contacto

Son fuerzas que requieren interacción directa entre cuerpos. Se distinguen principalmente tres tipos:

- Fuerza normal: Es la fuerza ejercida por una superficie sobre un objeto en contacto con ella. Siempre actúa perpendicular a la superficie.
- Fuerza de fricción: También es ejercida por una superficie, pero actúa paralela a ella y en dirección opuesta al movimiento relativo entre el objeto y la superficie.
- Fuerza de tensión: Es la fuerza transmitida por cuerdas, cables o cordeles estirados. Actúa a lo largo del cordel y en la dirección de la tracción, como cuando se tira de una cuerda.

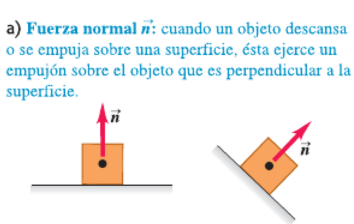


Figura 1: Fuerza normal

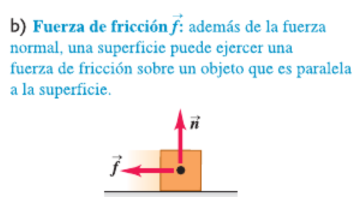


Figura 2: Fuerza de fricción

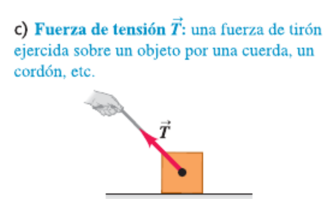


Figura 3: Fuerza de tensión

Fuerzas a distancia

Estás actuar sin contacto física Ejemplos comunes son la gravedad, el magnetismo y las fuerzas eléctricas. La fuerza gravitatoria que la tierra ejerce sobre un objetto se llama **peso**.

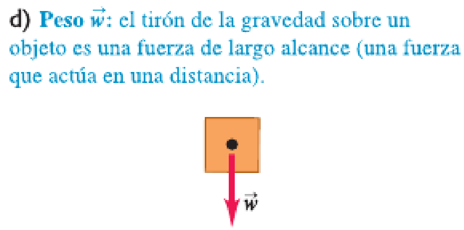


Figura 4: Fuerza a distancia

Medición de fuerzas

La magnitud de una fuerza se mide en ”newtons”, que se abrevia N. (Daremos una definición precisa del newton más adelante) Un instrumento tipico para medirla es la **balanza de resorte** que aprovecha la relación entre estiramento de un resorte y la fuerza aplicada.

Superposición de fuerzas

Cuando varias fuerzas actúan sobre un cuerpo, su efecto combinado es igual al de una única fuerza resultante obtenida mediante la suma vectorial de todas ellas. Esto se conoce como el Principio de superposición. La fuerza neta o resultante total sobre un cuerpo es, la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre él. Se denota:

$$\vec{R} = \sum \vec{F}$$

Cada fuerza puede descomponerse en componentes vectoriales, entonces la fuerza neta tambien:

$$\vec{R_x} = \sum \vec{F_x} \quad , \quad \vec{R_y} = \sum \vec{F_y}$$

3.2. Primera ley de Newton

Primera ley: Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.

En esta ley se introduce el concerto de **inercia**, que es la resistencia de un cuerpo a cambiar su estado de movimiento.

Esta ley rompe con la idea aristotélica de que se necesita una fu constante para mantener el movimiento. Newton muestra que en r lo que se necesita es una fuerza para cambiar el movimiento.

Si empujás una caja y después dejas de hacerlo, eventualmente se detiene. No porque .el movimiento se gasta”, sino porque existen fuerzas Como la fricción y el rozamiento con el aire que actúan en sentido Contrario al movimiento y Provocan que se frene.

Marcos de referencia inerciales

Un **marco de referencia** es un sistema desde el cual se observa y describe el movimiento de los cuerpos.

Un **marco de referencia inercial** es aquel en el cual se cumple la Primera Ley de Newton, es decir que si un objeto cambia su Velocidad, entonces desde el marco se ve una fuerza actuando.

3.3. Segunda ley de Newton

Podemos ver que existe una relación proporcional entre la fuerza y la aceleración. Si empujamos una caja con una fuerza neta constante, la caja tendra una acelarión constante igual a $a = \vec{a}$.

Si utilizamos una balanza de resorte Para aplicar una fuerza $\vec{F_1}$ obtenemos una aceleración $\vec{a}$, para $2\vec{F_1}$, obtenemos $2\vec{a}$ y para $\frac{1}{2}\vec{F_1}$ $\frac{1}{2}\vec{a}$. Muchos experimentos semejantes muestran que para un cuerpo dado, la magnitud de la aceleración es directamente propor-cional a la magnitud de la fuerza neta que actúa sobre él.

Masa y fuerza

Nuestros resultados indican que para un cuerpo dado, el cociente $\left|\Sigma\vec{F}\right|$ entre $|\vec{a}|$ es constante. Llamamos a este cocient **masa inercial** del cuerpo y la denotamos con **m**. Es decir,

$$m = \frac{|\Sigma\vec{F}|}{|\vec{a}|} \quad , \quad |\Sigma\vec{F}| = m|\vec{a}| \quad o \quad |\vec{a}| = \frac{|\Sigma\vec{F}|}{m}$$

La ultima de las ecuaciones indica que cuanto mayor sea su masa, más se resisteün cuerpo a ser acelerado.

La unidad de masa en el SI es el kilogramo. Podemos usar este Kilogramo para definir el newton:

Un Newton es la cantidad de fuerza neta que proporciona una aceleración de 1 metro por segundo al cuadrado a un cuerpo con masa de 1 Kilograma.

Por la forma en que definimos el newton, está relacionado con las unidades de masa, longitud y tiempo.

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Sistema de unidades	Fuerza	Masa	Aceleración
SI	Newton(N)	Kg	m/s^2
cgs	dina(din)	g	cm/s^2
Imperial	libra(lb)	slug	ft/s^2

Enunciado de la segunda ley de Newton

Segunda ley: si una fuerza externa neta actúa sobre un Cuerpo, éste se acelera. La dirección de aceleración es la mis ma que la dirección de la fuerza neta. El vector de fuerza neta es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración. En símbolos:

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$$

La segunda ley de Newton es una ley fundamental de la naturaleza, la relación básica entre fuerza y movimiento, Casa todo el resto del capítulo, y todo el que sigue, se dedica a aprender a aplicar este principio en diversas situaciones.

Uso de la segunda ley de Newton

Hay al menos cuatro aspectos de la segundo ley de Newton que Merecen atención especial:

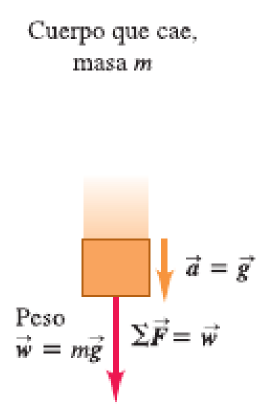
1. **Forma de uso**: La segunda lev de Newton es una ecuación Vectorial, Pero normalmente se usa descompuesta por componentes:

$$\Sigma\vec{F}_x = m\vec{a_x} \quad , \quad \Sigma\vec{F}_y = m\vec{a_y}$$

2. **Fuerzas externes**: La ley se refiere únicamente a Fuerzas externas es decir, ejercidas sobre el cuerpo desde otros cuerpos o el entorno. Un cuerpo no puede moverse por una fuerza que el mismo genera.
3. **Masa constante**: Estas ecuaciones solo son válidas si las masa no cambia. En casos donde la masa varía (cohete que pierda combustible) se necesita un tratamiento especial.
4. **Marcos de referencia inenciales**: La ley solo se aplica en marcos de referencia inerciales. No vale en marcos acelerados, como dentro de un auto que arranca.

3.4. Masa y Peso

Es común usar incorrecta e indistintamente los términos **masa** y **peso** en las conversaciones cotidianas. Es absolutamente indispensable entender claramente las diferencias entre estas dos cantidades físicas. La **masa** Caracteriza las Propiedades inerciales de un cuerpo. A mayor masa, se necesitará más fuerza Para causar una aceleración dada. El **peso**, en cambio, es una fuerza ejercida sobre un cuerpo por la atracción de la Tierra.
Para entender la relación entre masa y peso, note que un cuerpo en caída libre tiene una aceleración igual a gy, Por la segunda ley de Newton, una fuerza produce esa aceleración. Si un cuerpo de masam cae con una aceleración $\vec{g}$ con $|\vec{g}| = 9{,}8\text{m/s}^2$, entonces: $\vec{w} = m\vec{g}$



Variación de g con la ubicación

En la tierra se usa $g \approx 9,80 m/s^2$, Pero varía entre $9,78$ y $9,82 m/s^2$. Esa variación se debe a la forma de la tierra y su rotación. El peso cambia con g, Pero la masa no.

Medición de masa y peso

En la práctica, se mide la masa de un cuerpo midiendo su peso y Comparándolo con un estandar. Por la ecuación $w = mg$, si dos cuerpos tienen el mismo peso en el mismo lugar, entonces tienen la misma masa.

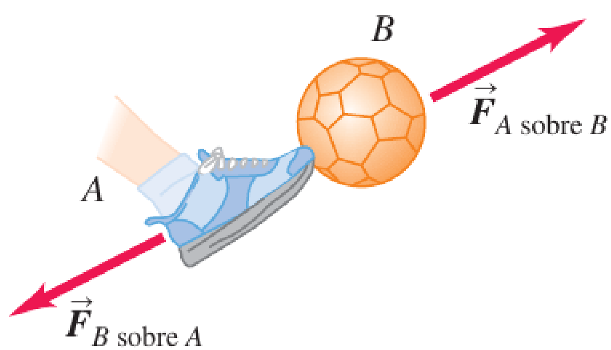
3.5. Tercera ley de Newton

No podemos tirar de una perilla sin que ésta tire de nosotros. Al Patear un balón de fútbol, la fuerza hacia adelante que el rie ejerce sobre él lo lanza en su trayectoria, pero sentimos la fuerza que el balón ejerce sobre el pie.

Los experimentos muestran que, al interactuar dos cuerpos, las fuer-zas que ejercen mutuamente son iguales en magnitud y opuestas en dire-ceión. Ésta es la tercera ley de Newton.

Tercera ley: si el cuerpo A eserce una fuerza sobre el cuerpo. B (”acción”), entonces, B ejerce una fuerza sobre A (”reacción”). Estas dos fuerzas tienen la misma magnitud Pero dirección opuesta, y actúan sobre diferentes cuerpos.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$



Expresando en palabras, en la tercera ley de Newton, .ªcciónz reacción”son las dos fuerzas opuestas, y Podemos llamarlas **Par acción-reacción**.

3.6. Diagramas de cuerpo libre

En esta sección mencionaremos algunas ideas y técnicas que Pueden usarse en cualquier problema en que intervengan las leves de Newton.

1. Las leves de Newton se aplican a un cuerpo específico. Siempre tenés que definir que cuerpo vas a analizar.
2. En la sumatoria de fuerzas F, solo se incluyen las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, no las que el cuerpo ejerce sobre otros. Si analizás a una persona caminando, incluís la fuerzas del suelo sobre la persona, no la que la persona ejerce sobre el suelo.
3. Un diagrama de cuerpo libre muestra el cuerpo aislado con todas las fuerzas externas que actúan sobre el, sin incluir fuerzas que el cuerpo ejerce sobre otros.

4. Aplicación de las leyes de Newton

Este capítulo se enfoca en **aplicar las leyes de Newton** a distintos tipos de situaciones reales, como un velero deslizándose sobre hielo, un trineo bajando una colina y un avión dando una vuelta cerrada. A pesar de que las **leyes de Newton** son simples en su formulación, resolver problemas concretos requiere una buena dosis de análisis y técnica.

4.1. Empleo de la primera ley de Newton: Partículas en equilibrio

El principio físico fundamental es la primera ley de Newton: si una partícula está en reposo o se mueve con velocidad constante en un marco de referencia inercial, la fuerza neta que actúa sobre ella, es decir, la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre ella debe ser cero:

$$\boxed{\Sigma\vec{F} = 0 \qquad \text{(partícula en equilibrio, forma vectorial)}}$$

Esta sección trata sobre el uso de la primera ley de Newton para resolver problemas de cuerpos en equilibrio. Quizás algunos de los problemas parezcan complicados; no obstante, lo importante es recordar que todos los problemas que implican partículas en equilibrio se resuelven igual.

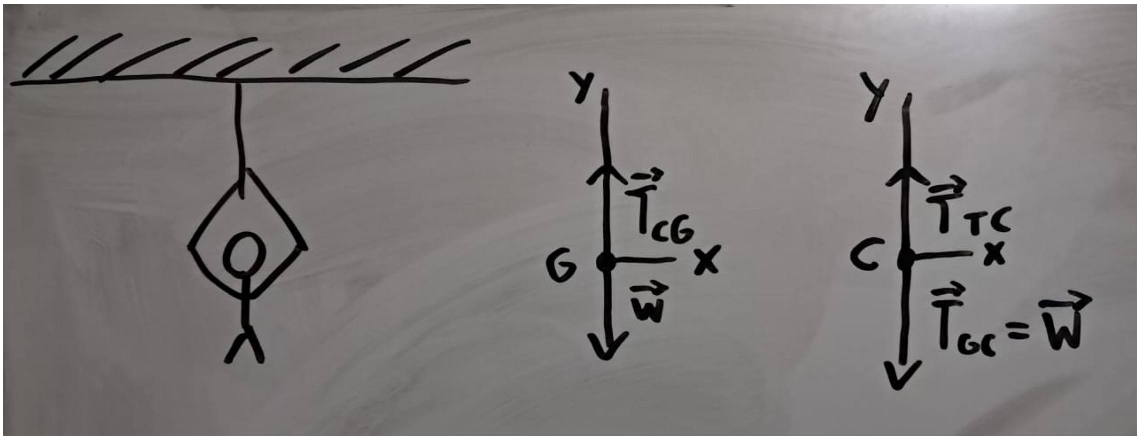
Ejercicio 1. Equilibrio unidimensional: Tensión en una cuerda sin masa

Una gimnasta de masa $m_G = 50{,}0kg$ se cuelga del extremo inferior de una cuerda colgante. El extremo superior está fijo al techo de un gimnasio. Suponga que la masa de la cuerda es despreciable.

1. ¿Cuánto pesa la gimnasta?
2. ¿Qué fuerza (magnitud y dirección) ejerce la cuerda sobre ella?
3. ¿Qué tensión hay en la parte superior de la cuerda?

Solución 1.

Primero identificamos que la gimnasta y la cuerda, ambos estan en equilibrio. Tenemos como incognita el peso de la gimnasta w_G. La cuerda tira de la gimnasta con una fuerza T_{CG} y la gimnasta tira de la cuerda con una fuerza T_{GC}. El techo ejerce otra fuerza sobre la cuerda, T_{TC}, que provoca que la cuerda y la gimnasta esten en equilibrio.



El primer digrama representa la situación en si. El segundo diagrama representa las fuerzas que actúan sobre la gimnasta. El tercer diagrama representa las fuerzas que actúan sobre la cuerda.

Para calcular el peso de la gimnasta ($\vec{w}$), usaremos la ecuación de la gravedad, derivada de la segunda ley de Newton:

$$|\vec{w}| = m \cdot 9{,}8\text{m/s}^2$$
$$w_G = 50\text{kg} \cdot 9{,}8\text{m/s}^2$$
$$w_G = 490\text{N}$$

El peso de la gimnasta es de 490 Newtons.

Entonce la magnitud de la fuerza que ejerce la cuerda sobre la gimnasta es: $T_{CG} = 490\text{N}$. Y su dirección es contraria a la del peso de la gimnasta.

Por el par acción-reacción, existe la fuerza $\vec{T}_{GC} = -\vec{T}_{CG} = \vec{w}$, entonces la gimnasta tira de la cuerda con una fuerza de 490 Newtons con una dirección que apunta hacia abajo. Entonces la fuerza $\vec{T}_{TC}$ es igual en magnitud a $\vec{T}_{GC}$ pero con dirección opuesta, es decir, $\vec{T}_{TC} = -\vec{T}_{GC}$.

La **tensión de la cuerda** es de $T_{TC} = 490\text{N}$ en la parte superior de la cuerda y de $T_{CG} = 490\text{N}$ en la parte inferior de la cuerda.

4.2. Empleo de la segunda ley de Newton: Dinámica de partículas

Ahora podemos analizar problemas de dinámica, donde aplicamos la segunda ley de Newton a cuerpos sobre los cuales la fuerza neta no es cero, de manera que los cuerpos no están en equilibrio sino que tienen aceleración.

$$\boxed{\Sigma\vec{F} = m\vec{a}}$$

Ejercicio 2. Movimiento rectilíneo con una fuerza constante

Un velero para hielo descansa en una superficie horizontal sin fricción (figura 5.7a). Sopla un viento constante (en la dirección de los patines del trineo), de modo que 4.0 s después de soltarse el velero adquiere una velocidad de 6.0 m¿s (unos 22 km/h o 13 mi/h). ¿Qué fuerza constante F_w ejerce el viento sobre el velero? La masa total del velero más el tripulante es de 200 kg.

Solución 2.

Identificamos las variables que se nos dan:

- $m = 200\text{kg}$
- $v(0s) = 0{,}0\text{m/s}$
- $v(4s) = 22{,}0\text{km/h} = 6{,}1\text{m/s}$

Para calcular la fuerza usaremos la segunda ley de Newton: $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$. Pero primero debemos calcular la aceleración. Como tenemos una velocidad incial y otra 4s despues podemos utilizar:

$$a = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0}$$

$$a = \frac{6{,}1\text{m/s} - 0{,}0\text{m/s}}{4{,}0\text{s}} = 1{,}525\text{m/s}^2$$

Por lo tanto, la fuerza constante que ejerce el viento sobre el velero es de $F_w = 200\text{kg} \cdot 1{,}525\text{m/s}^2 = 305\text{N}$

Peso aparente e ingravidez aparente

Cuando un pasajero de masa m viaja en un elevador con aceleración ay , una báscula da como peso aparente del pasajero:

$$w = m \cdot (g + a_y)$$

Cuando el elevador está acelerando hacia arriba, a_y es positiva y n es mayor que el peso del pasajero $w = mg$. Si el elevador acelera hacia abajo, ay es negativa y n es menor que el peso. Si el pasajero no sabe que el elevador está acelerando, sentirá que su peso cambia y, de hecho, la báscula lo indica. El caso extremo sucede cuando el elevador tiene una aceleración hacia abajo $a_y = -g$, es decir, cuando está en caída libre. En este caso, $n = 0$ y el pasajero siente que no tiene peso.

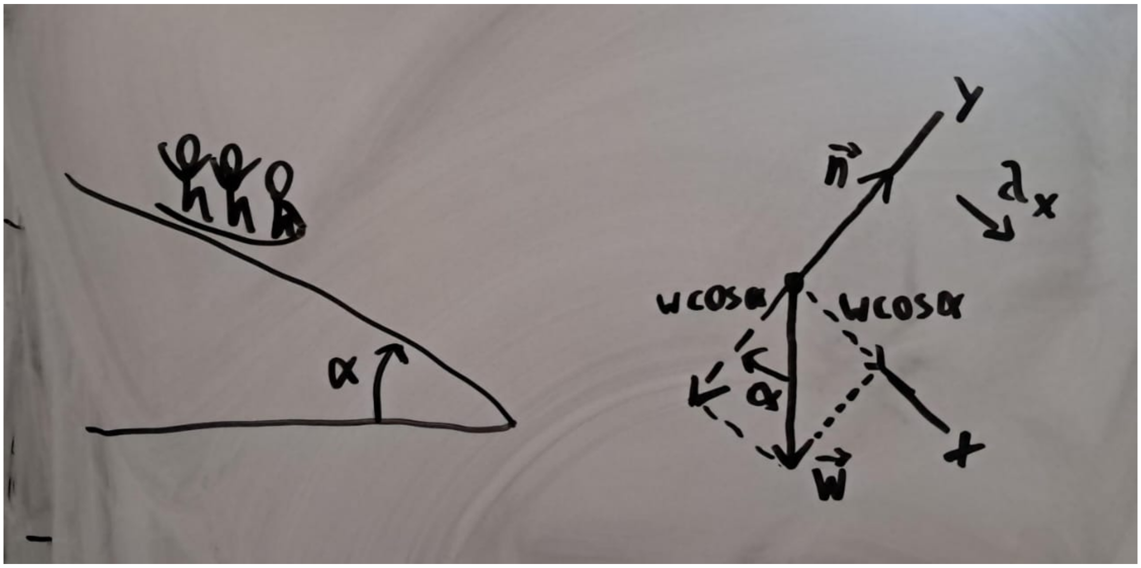
Ejercicio 3. Aceleración cuesta abajo

Un trineo cargado de estudiantes en vacaciones (peso total w) se desliza hacia abajo por una larga cuesta nevada. La pendiente tiene un ángulo constante α, y el trineo está tan bien encerado que la fricción es despreciable. ¿Qué aceleración tiene el trineo?

Solución 3.

Necesitamos averiguar la aceleración a. Sabemos que la unica fuerza que actua sobre el trineo es la gravedad, y que su peso es w.

Para mayor comodidad dibujaremos un diagrama de cuerpo libre inclinado para que el eje x se paralelo a la aceleración a, ahora a_x.



Por segunda ley de Newton dividida en componentes tenemos:

$$\Sigma F_x = ma_x$$

$$\Sigma F_y = ma_y$$

Si sumamos las fuerzas:

$$\Sigma F_y = w\cos(\alpha) + (-w\cos(\alpha)) = 0 = ma_y \quad \Longrightarrow \quad a_y = 0$$

$$\Sigma F_x = w\sin(\alpha) = ma_x$$

Como $w = mg$, tenemos que $\cancel{m}a_x = \cancel{m}g\sin(\alpha)$, dejando como resultado:

$$a_x = g\sin(\alpha)$$

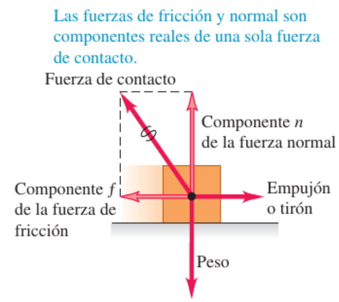
4.3. Fuerzas de fricción

Hemos visto varios problemas en que un cuerpo descansa o se desliza sobre una superficie que ejerce fuerzas sobre el cuerpo. En esta sección, veremos con detenimiento la fuerza de fricción.

Una fuerza importante en muchos aspectos de nuestra vida es la fricción. El aceite de un motor automotriz reduce la fricción entre piezas móviles; no obstante, sin fricción entre los neumáticos y el asfalto, el automóvil no podría avanzar ni dar vuelta.

Fricción cinética y estática

Primero, cuando un cuerpo descansa o se desliza sobre una superficie, podemos representar la fuerza de contacto que la superficie ejerce sobre el cuerpo en términos de componentes de fuerza perpendiculares y paralelos a la superficie (figura). El vector componente paralelo a la superficie (y perpendicualr a n) es la fuerza de fricción, denotada con $\vec{f}$. La dirección de la fuerza de fricción siempre es opuesta al movimiento relativo de las dos superficies.



El tipo de fricción que actúa cuando un cuerpo se desliza sobre una superficie es la **fuerza de fricción cinética** $\vec{f_k}$. La magnitud de esta fuerza suele aumentar al aumentar la fuerza normal. En muchos casos, la magnitud de la fuerza de fricción cinética f_k experimental es aproximadamente proporcional a la magnitud n de la fuerza normal. En tales casos, representamos la relación con la ecuación:

$$f_k = \mu_k \cdot n \qquad \text{(magnitud de la fuerza de fricción cinética)}$$

donde μ_k es una constante llamada coeficiente de fricción cinética. Cuanto más resbalosa sea una superficie, menor será el coeficiente de fricción. Al ser el cociente de dos magnitudes de fuerza ($\frac{f_k}{n}$), μ_k es un número puro sin unidades. (Caso similar a la masa inercial).

DISCLAIMER: La ecuación sólo es una representación aproximada de un fenómeno complejo. En el nivel microscópico, las fuerzas de fricción y la normal se deben a las fuerzas intermoleculares (fundamentalmente eléctricas) entre dos superficies ásperas en los puntos donde entran en contacto.

Las fuerzas de fricción también pueden actuar cuando no hay movimiento relativo. Si tratamos de deslizar por el piso una caja con libros, tal vez no se mueva porque el piso ejerce una fuerza de fricción igual y opuesta sobre la caja. Ésta se llama **fuerza de fricción estática** $\vec{f_s}$.

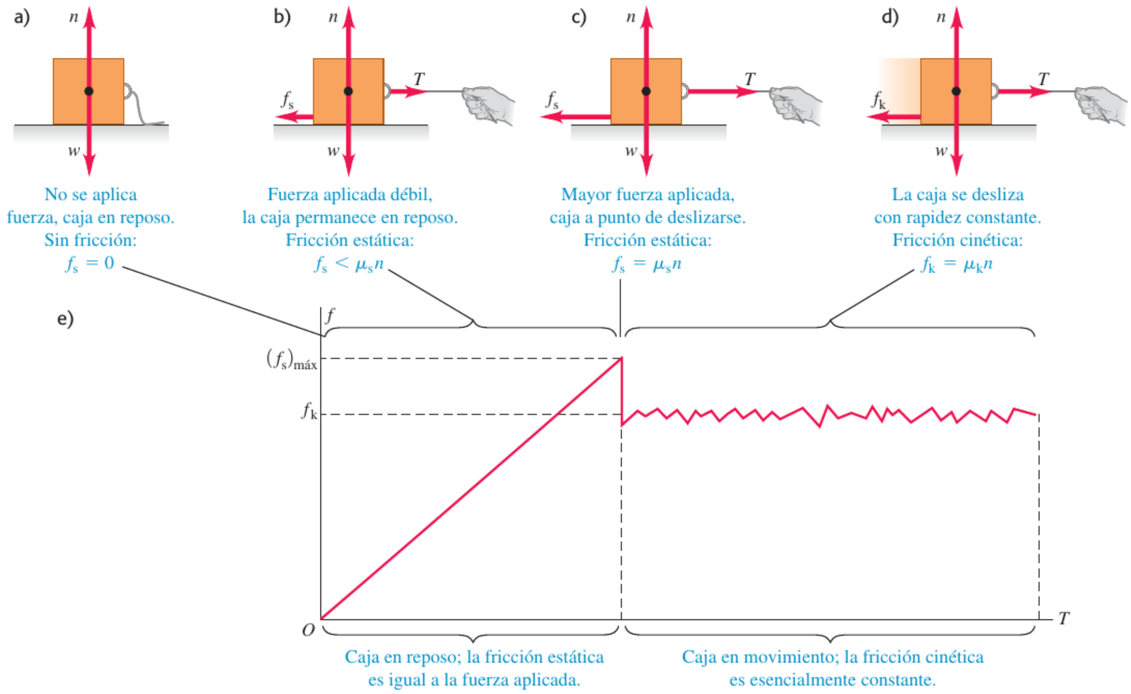


Tabla: Coeficientes de fricción aproximados

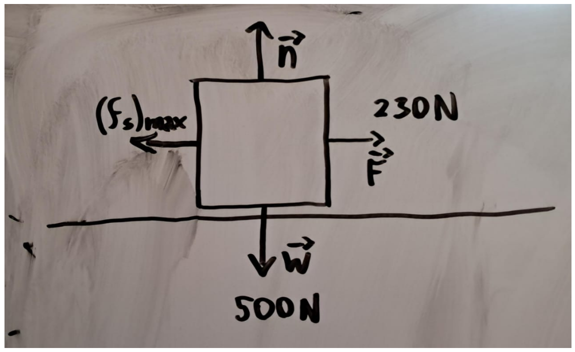
Materiales	Coeficiente de fricción estática, μ_s	Coeficiente de fricción cinética, μ_k
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Latón sobre acero	0.51	0.44
Zinc sobre hierro colado	0.85	0.21
Cobre sobre hierro colado	1.05	0.29
Vidrio sobre vidrio	0.94	0.40
Cobre sobre vidrio	0.68	0.53
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Teflón sobre acero	0.04	0.04

Ejercicio 4. Fricción en movimiento horizontal

Usted intenta mover una caja de $500N$ por un piso horizontal. Para comenzar a moverla, debe tirar con una fuerza horizontal de $230N$. Una vez que la caja "se libera" y comienza a moverse, puede mantenerse a velocidad constante con sólo $200N$. ¿Cuáles son los coeficientes de fricción estática y cinética?

Solución 4.

Sabemos que la caja esta en reposo cuando se le aplica una fuerza de $230N$ en el eje x.



Usando la primera ley de Newton por componentes tenemos:

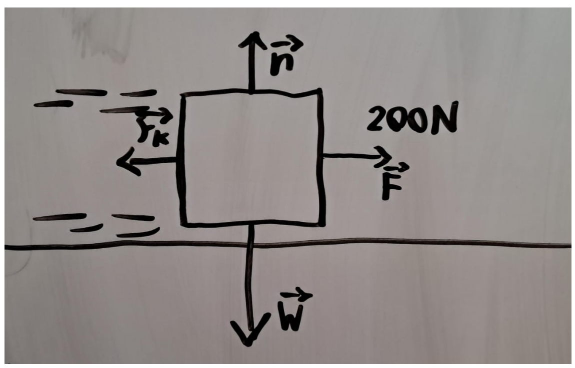
$$\Sigma F_x = n + (-w) = 0 \quad \Longrightarrow \quad n = w = 500N$$

$$\Sigma F_y = F + (-(f_s)_{max}) = 0 \quad \Longrightarrow \quad F = (f_s)_{max} = 230N$$

Entonces podemos calcular el coeficiente de fricción estática:

$$\mu_s = \frac{F}{n} = \frac{230N}{500N} = 0{,}46$$

También sabemos que si la caja esta en movimiento horizontal se mantendra en equilibrio si se le aplica una fuerza de $200N$:



Usando la primera ley de Newton por componentes tenemos:

$$\Sigma F_x = n + (-w) = 0 \quad \Longrightarrow \quad n = w = 500N$$

$$\Sigma F_y = F + (-f_k) = 0 \quad \Longrightarrow \quad F = f_k = 200N$$

Entonces podemos calcular el coeficiente de fricción cinética:

$$\mu_k = \frac{F}{n} = \frac{200N}{500N} = 0{,}4$$

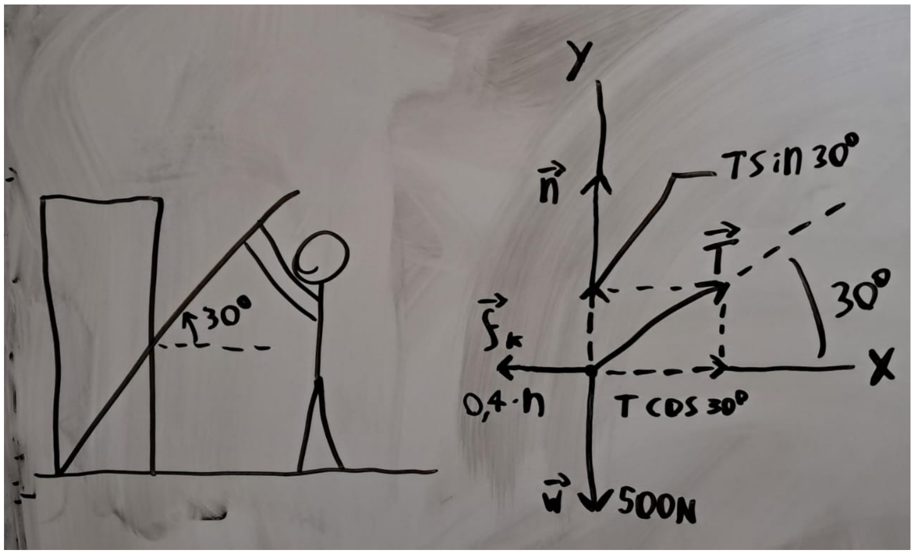
Concluimos que el coeficiente de fricción estática es 0,46 y el coeficiente de fricción cinética es 0,4.

Ejercicio 5. Reducción al mínimo de la fricción cinética

En el ejercicio anterior, suponga que usted intenta mover la caja atando una cuerda a ella y tira de la cuerda hacia arriba con un ángulo de 30° sobre la horizontal. ¿Qué fuerza debe aplicar al tirar para mantener la caja en movimiento con velocidad constante? ¿Esto es más fácil o difícil que tirar horizontalmente? Suponga que $w = 500N$ y $\mu_k = 0{,}40$.

Solución 5.

Sabemos que la caja esta en equilibrio (su velocidad es constante) entonces aplicamos la primera ley de Newton para encontrar la fuerza T que se debe aplicar para mantener la caja en movimiento:
Primero hacemos un diagrama de cuerpo libre:



Usando la primera ley de Newton por componentes tenemos:

$$\Sigma F_x = T\cos(30°) + (-f_k) = 0 \implies T\cos(30°) = f_k$$

$$\Sigma F_y = T\sin(30°) + n + (-w) = 0 \implies n = w - T\sin(30°)$$

Para encontrar la fuerza T tenemos que usar el hecho de que $f_k = T\cos(30°)$:

$$T\cos(30°) = f_k = \mu_k \cdot n$$

Remplazando:

$$T\cos(30°) = \mu_k \cdot (w - T\sin(30°))$$

Despejando T tenemos:

$$T = \frac{\mu_k \cdot w}{cos(30°) + \mu_k \sin(30°)} = \frac{0{,}40 \cdot 500N}{cos(30°) + 0{,}40\sin(30°)} \approx 188N$$

Concluimos que la fuerza T que debe aplicar para mantener la caja en movimiento es de 188N.

Por otro lado, si se intenta mover la caja horizontalmente, entonces la fuerza T que se debe aplicar para mantener la caja en movimiento es de $\mu_k \cdot n = 0{,}40 \cdot 500N = 200N$. Al no ser reducida la fuerza normal f_k no se reduce por lo que la fricción "jode"más al tratar de mover la caja.

Fricción de rodamiento

Es mucho más fácil mover un archivero lleno de documentos sobre un piso horizontal usando un carrito con ruedas que deslizándolo. Podemos definir un **coeficiente de fricción de rodamiento** μ_r, que es la fuerza horizontal necesaria para lograr rapidez constante en una superficie plana, dividida entre la fuerza normal hacia arriba ejercida por la superficie. Cuyo valor suele ser de 0.002 a 0.003 para ruedas de acero sobre rieles de acero, y de 0.01 a 0.02 para ruedas de caucho sobre concreto.

Ejercicio 6. Movimiento con fricción de rodamiento

...

Resistencia de fluidos y rapidez terminal

Si usted saca la mano por la ventanilla de un automóvil que viaja con gran rapidez, comprobará la existencia de la **resistencia de un fluido**, que es la fuerza que un fluido (gas o líquido) ejerce sobre un cuerpo que se mueve a través de él.

La dirección de la fuerza de resistencia de un fluido que actúa sobre un cuerpo siempre es opuesta a la dirección de la velocidad del cuerpo. La magnitud de la fuerza de resistencia de un fluido suele aumentar al incrementarse la rapidez del cuerpo en el fluido. Esto es muy diferente de la fuerza de fricción cinética entre dos superficies en contacto, que casi siempre podemos considerar independiente de la rapidez. A rapidez baja, la magnitud f de la fuerza de resistencia del fluido es aproximadamente proporcional a la rapidez v del cuerpo:

$$\boxed{f = kv \qquad \text{(resistencia del fluido a baja rapidez)}}$$

donde k es una constante de proporcionalidad que depende de la forma y el tamaño del cuerpo, y las propiedades del fluido. Las unidades de este k son $[k] = \frac{N}{m/s} = \frac{kg\cdot\frac{m}{s^2}\cdot s}{m} = \frac{kg}{s}$.

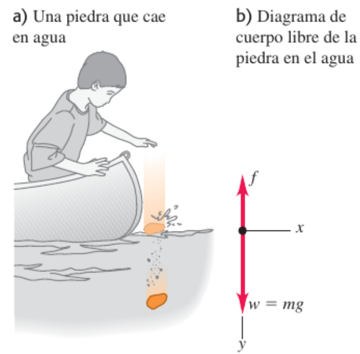
La fuerza de resistencia es aproximadamente proporcional a v^2, no a v, para la rapidez de una pelota de tenis o una rapidez mayor y se denomina **arrastre del aire** o sólo arrastre. En este caso, sustituimos la ecuación por la siguiente:

$$\boxed{f = Dv^2 \qquad \text{(resistencia de fluidos a alta rapidez)}}$$

Por la dependencia de v^2, el arrastre aumenta rápidamente conforme se incrementa la rapidez. Las unidades de este D son $[D] = \frac{N}{m^2/s^2} = \frac{kg\cdot\frac{m}{s^2}\cdot s^2}{m^2} = \frac{kg}{m}$.

Por los efectos de la resistencia de fluidos, un objeto que cae en un fluido no tiene aceleración constante. Para describir su movimiento debemos partir de la segunda ley de Newton.

Consideremos esta situación: suponga que usted suelta una roca en la superficie de un estanque profundo, y cae hasta el fondo (figura). En este caso, la fuerza de resistencia del fluido está dada por la ecuación de resistencia del fluido a baja rapidez. ¿Cómo cambian la aceleración, velocidad y posición de la roca con el tiempo?



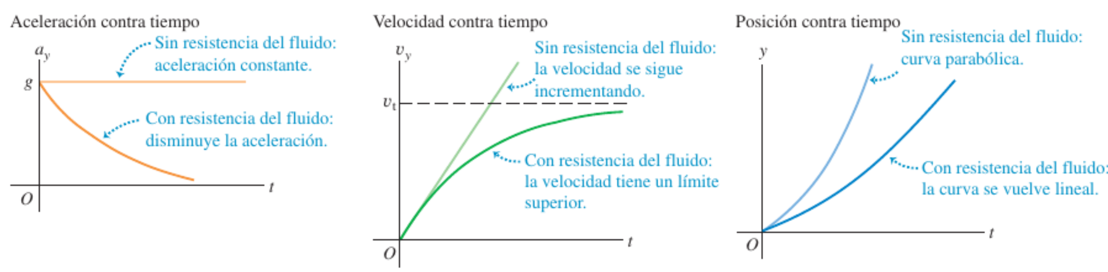
Si observamos el diagrama de cuerpo libre podemos ver que $\Sigma F_x = 0$ entonces solo tomamos en cuenta la componente y:

$$\Sigma F_y = mg + (-f) = mg + (-kv_y) = ma_y$$

Al principio, cuando la roca empieza a moverse, $v_y = 0$, la fuerza de resistencia es cero y la aceleración inicial es $a_y = g$. Al aumentar la rapidez, también se incrementa la fuerza de resistencia hasta ser igual en magnitud al peso. Ahora, $mg - kv_y = 0$, la aceleración se vuelve cero y ya no aumenta la rapidez. A esta rapidez final v_t, se le llama **rapidez terminal**, y esta dada por $mg - kv_t = 0$, es decir:

$$v_t = \frac{mg}{k} \qquad (\textbf{rapidez terminal})$$

La siguiente figura muestra cómo varían la aceleración, la velocidad y la posición con el tiempo.



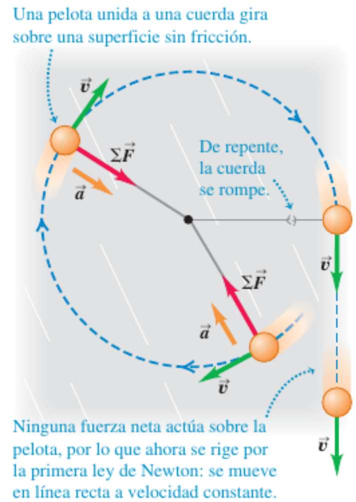
4.4. Dinámica del movimiento circular

Cuando una partícula se mueve en un círculo con rapidez constante, su aceleración siempre es hacia el centro del círculo (perpendicular a la velocidad instantánea). La magnitud a_{rad} de la aceleración es constante y está dada en términos de la rapidez v y el radio R del círculo por

$$a_{rad} = \frac{v^2}{R} \qquad \text{(movimiento circular uniforme)}$$

El subíndice "*rad*" nos recuerda que en cada punto la aceleración siempre es radial hacia el centro del círculo, perpendicular a la velocidad instantánea. Se le denomina **aceleración centrípeta**.

El movimiento circular uniforme, como todos los movimientos de una partícula, se rige por la segunda ley de Newton. Para hacer que la partícula acelere hacia el centro del círculo, la fuerza neta $\Sigma\vec{F}$ sobre la partícula debe estar dirigida siempre hacia el centro. La magnitud de la aceleración es constante, así que la magnitud F_{net} de la fuerza neta también debe ser constante. Si deja de actuar la fuerza neta hacia adentro, la partícula saldrá disparada en una línea recta tangente al círculo (ver figura).



...

4.5. Fuerzas fundamentales de la naturaleza

Hemos visto fuerzas de varios tipos —peso, tensión, fricción, resistencia de fluidos y la fuerza normal— y veremos otras más al seguir estudiando física. Pero, ¿cuántas clases distintas de fuerzas hay? Actualmente, se considera que todas las fuerzas son expresiones de tan sólo cuatro clases de fuerzas o interacciones fundamentales entre las partículas.

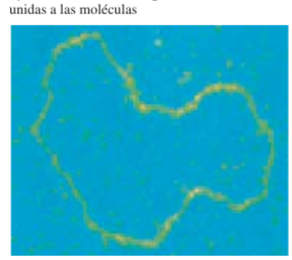
Las **interacciones gravitacionales** incluyen la fuerza familiar del peso, que se debe a la acción de la atracción gravitacional terrestre sobre un cuerpo. La mutua atracción gravitacional entre las diferentes partes de la Tierra mantienen a nuestro planeta unido (figura a).

Las **interacciones electromagnéticas**, incluye las fuerzas eléctricas y magnéticas. Si nos frotamos un peine por el cabello, al final el peine tendrá una carga eléctrica; es posible usar la fuerza eléctrica para atraer trocitos de papel. Todos los átomos contienen carga eléctrica positiva y negativa, así que átomos y moléculas pueden ejercer fuerzas eléctricas unos sobre otros (figura b).

Las otras dos clases de interacciones son menos conocidas. La **interacción fuerte** mantiene unido el núcleo de un átomo. Los núcleos contienen neutrones (eléctricamente neutros) y protones (con carga positiva). La fuerza eléctrica entre protones hace que se repelan mutuamente; la enorme fuerza de atracción entre las partículas nucleares contrarresta esta repulsión y mantiene el núcleo estable. En este contexto, la interacción fuerte también se denomina fuerza nuclear fuerte; tiene un alcance mucho menor que las interacciones eléctricas, pero es mucho más fuerte dentro de ese alcance. La interacción fuerte juega un papel fundamental en las reacciones termonucleares que ocurren en el núcleo del Sol, y que generan el calor y su luz (figura c).

a) Las fuerzas gravitacionales mantienen unidos a los planetas

b) Las fuerzas electromagnéticas mantienen unidas a las moléculas



c) Enormes fuerzas liberan energía del Sol

d) Las fuerzas débiles juegan un papel preponderante en las estrellas que explotan

Por último, tenemos la **interacción débil** cuyo alcance es tan pequeño que es relevante sólo a una escala de núcleo o menor. La interacción débil causa una forma común de radioactividad, llamada desintegración beta, en la que un neutrón de un núcleo radioactivo se transforma en protón al tiempo que expulsa un electrón y una partícula casi sin masa llamada antineutrino electrónico. La interacción débil entre un antineutrino y la materia ordinaria es tan tenue que el antineutrino fácilmente podría atravesar una pared de plomo ¡de un millón de kilómetros de espesor! Incluso cuando una estrella gigante sufrió una explosión cataclísmica llamada supernova, la mayoría de la energía fue liberada mediante la interacción débil (figura d).

5. Trabajo y Energía Cinética

En este capítulo nos concentraremos en la mecánica. Conoceremos una importante forma de energía, la energía cinética o la energía de movimiento, y su relación con el concepto de trabajo. También consideraremos la potencia, que es la rapidez con que se realiza trabajo.

5.1. Trabajo

En esta sección aprenderemos cómo se define el trabajo y cómo se calcula en diversas situaciones que implican fuerzas constantes. Aunque ya sabemos cómo resolver problemas donde las fuerzas son constantes, el concepto de trabajo nos resultará útil. Más adelante en este capítulo deduciremos la relación entre trabajo y energía cinética, y la aplicaremos después en problemas donde las fuerzas no son constantes.

Estos tres ejemplos de trabajo —mover un sofá, levantar una pila libros y empujar un automóvil— tienen algo en común. En ellos realizamos trabajo ejerciendo una fuerza sobre un cuerpo mientras éste se mueve de un lugar a otro, es decir, sufre un desplazamiento. Efectuamos más trabajo si la fuerza es mayor (empujamos más fuerte el auto) o si el desplazamiento es mayor (lo empujamos una mayor distancia).

El físico define el trabajo con base en estas observaciones. Considere un cuerpo que sufre un desplazamiento de magnitud s en línea recta. (Por ahora, supondremos que todo cuerpo puede tratarse como partícula y despreciaremos cualquier rotación o cambio en la forma del cuerpo.) Mientras el cuerpo se mueve, una fuerza constante $\vec{F}$ actúa sobre él en la dirección del desplazamiento $\vec{s}$. Definimos el trabajo W realizado por esta fuerza constante en dichas condiciones como el producto de la magnitud F de la fuerza y la magnitud s del desplazamiento:

$$\boxed{W = Fs \text{ (fuerza constante en dirección del desplazamiento rectilíneo)}}$$

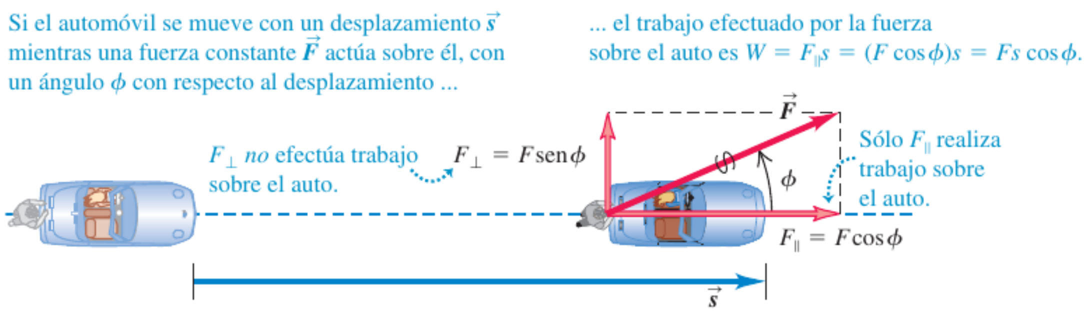
La unidad de trabajo en el SI es el joule (que se abrevia J y se pronuncia “yul”,nombrada así en honor del físico inglés del siglo XIX James Prescott Joule). En el SI la unidad de fuerza es el newton y la unidad de distancia es el metro, así que 1 joule equivale a un new-ton-metro ($N \cdot m$):

$$1J = 1N \cdot m$$

En el sistema británico, la unidad de fuerza es la libra (Ib), la unidad de distancia es el pie (ft), y la unidad de trabajo es el pie-libra ($ft \cdot Ib$). Estas conversiones son útiles:

$$1J = 0{,}7376 ft \cdot 1Ib \qquad 1ft \cdot lb = 1{,}356J$$

Pensemos en una persona que empuja un automóvil averiado. Si lo empuja a lo largo de un desplazamiento $\vec{s}$ con una fuerza constante $\vec{F}$ en la dirección del movimiento, la cantidad de trabajo que efectúa sobre el auto está dada por la ecuación:$W = Fs$. Sin embargo, ¿y si la persona hubiera empujado con un ángulo ϕ con respecto al desplazamiento del auto (figura)?



Entonces $\vec{F}$ tiene una componente $F_{\|} = Fcos\phi$ en la dirección del desplazamiento y una componente $F_{\perp} = Fsin\phi$ que actúa perpendicular al desplazamiento.

En este caso, sólo la componente paralela $F_{\|}$ es eficaz para mover el auto, por lo que definimos el trabajo como el producto de esta componente de fuerza y la magnitud del desplazamiento. Por lo tanto:

$$W = Fscos\phi$$

La ecuación tiene la forma del producto escalar de dos vectores. Ello nos permite escribir la ecuación de forma más compacta:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

Ejercicio 7. Trabajo efectuado por una fuerza constante

a) Esteban ejerce una fuerza constante de magnitud $210N$ sobre el automóvil averiado de la figura anterior, mientras lo empuja una distancia de $18m$. Además, un neumático se desinfló, así que, para lograr que el auto avance al frente, Esteban debe empujarlo con un ángulo de 30° con respecto a la dirección del movimiento. ¿Cuánto trabajo efectúa Esteban?

b) Con ánimo de ayudar, Esteban empuja un segundo automóvil averiado con una fuerza constante $\vec{F} = (160N)\hat{\imath} - (40N)\hat{\jmath}$. El desplazamiento del automóvil es $\vec{s} = (14m)\hat{\imath} + (11m)\hat{\jmath}$ ¿Cuánto trabajo efectúa Esteban en este caso?

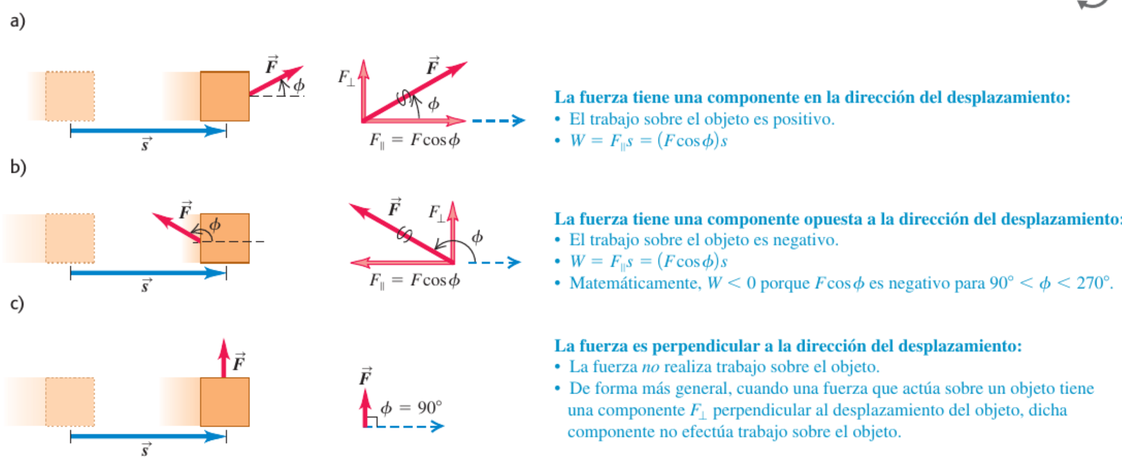
Solución 7.

...

Trabajo: Positivo, negativo o cero

En el ejercicio anterior, el trabajo efectuado al empujar los autos fue positivo. No obstante, es importante entender que el trabajo también puede ser negativo o cero. Ésta es la diferencia esencial entre la definición de trabajo en física y la definición "cotidiana" del mismo.

6.4 Una fuerza constante $\vec{F}$ puede efectuar trabajo positivo, negativo o cero, dependiendo del ángulo entre $\vec{F}$ y el desplazamiento $\vec{s}$.



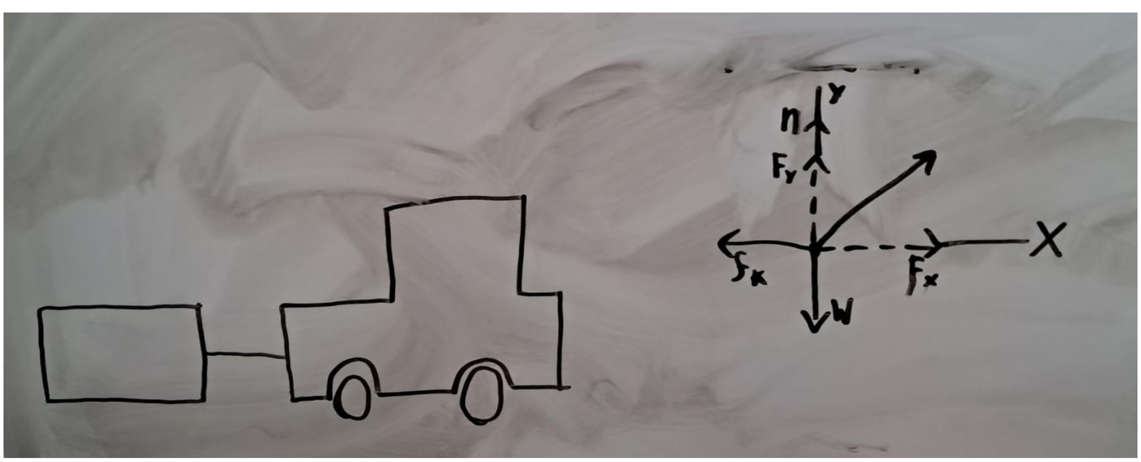
Trabajo total

¿Cómo calculamos el trabajo cuando varias fuerzas actúan sobre un cuerpo? Podemos usar las ecuaciones anteriormente vistas para calcular el trabajo realizado por cada fuerza individual. Puesto que el trabajo es una cantidad escalar, el trabajo total W_{tot} realizado por todas las fuerzas sobre el cuerpo es la suma algebraica de los trabajos realizados por las fuerzas individuales. Otra forma de calcular W_{tot} es calcular la suma vectorial de las fuerzas (es decir, la fuerza neta) y usarla en vez de $\vec{F}$.

Ejercicio 8. Trabajo realizado por varias fuerzas

Un granjero engancha su tractor a un trineo cargado con leña y lo arrastra 20 m sobre el suelo horizontal. El peso total del trineo y la carga es de $14700N$. El tractor ejerce una fuerza constante de $5000N$ a 36,9° sobre la horizontal. Una fuerza de fricción de $3500N$ se opone al movimiento del trineo. Calcule el trabajo realizado por cada fuerza que actúa sobre el trineo y el trabajo total de todas las fuerzas.

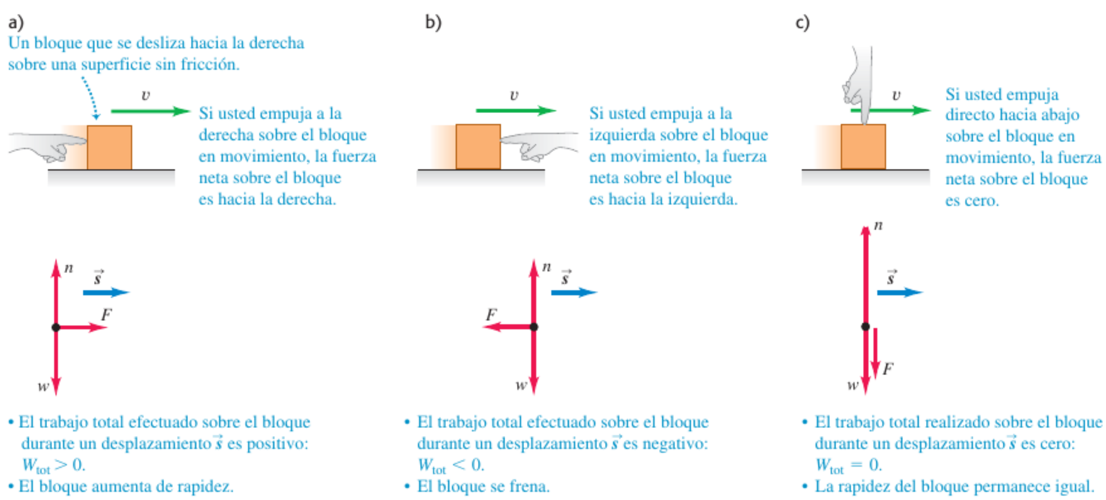
Solución 8.



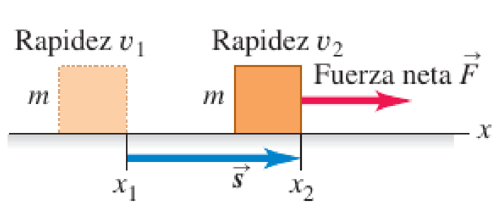
...

5.2. Energía cinética y el teorema trabajo-energía

El trabajo total realizado por fuerzas externas sobre un cuerpo se relaciona con el desplazamiento de éste (los cambios en su posición), pero también está relacionado con los cambios en la rapidez del cuerpo. Para comprobarlo, considere la siguiente figura, que muestra tres ejemplos de un bloque que se desliza sobre una mesa sin fricción. Las fuerzas que actúan sobre el bloque son su peso $\vec{w}$, la fuerza normal $\vec{n}$ y la fuerza $\vec{F}$ ejercida por la mano.



Hagamos más cuantitativas tales observaciones. Considere una partícula con masa m que se mueve en el eje x bajo la acción de una fuerza neta constante de magnitud F dirigida hacia el eje $+x$ (figura). La aceleración de la partícula es constante y está dada por la segunda ley de Newton, $F = ma_x$. Suponga que la rapidez cambia de v_1 a v_2 mientras la partícula sufre un desplazamiento $s = x_2 - x_1$ del punto x_1 al x_2.



Primero buscamos una ecuación que solo relaciona v, a_x y s (el desplazamiento). Para ello utilizamos estas ecuaciones de MRUA:

$$1. \quad v = v_1 + a_x t$$

$$1. \quad x = x_1 + v_1 t + \frac{1}{2} a_x t^2$$

Eliminamos el tiempo t (utilizando 1.):

$$t = \frac{v - v_1}{a_x}$$

Sustituyendo en la ecuación de posición:

$$s = x - x_1 = v_1 t + \frac{1}{2} a_x t^2$$

$$s = v_1 \left(\frac{v - v_1}{a_x} \right) + \frac{1}{2} a_x \left(\frac{v - v_1}{a_x} \right)^2$$

Multiplicamos y simplificamos:

$$s = \frac{v_1(v - v_1)}{a_x} + \frac{(v - v_1)^2}{2a_x}$$

Multiplicamos todo por $2a_x$

$$2a_x s = 2v_1(v - v_1) + (v - v_1)^2$$

Expandimos:

$$2a_x s = 2v_1 v - 2v_1^2 + v^2 - 2v_1 v + v_1^2$$

Se cancelan los términos $2v_1 v - 2v_1 v$, y queda:

$$2a_x s = v^2 - v_1^2$$

Obeniendo una ecuación para la aceleración en función de la rapidez y el desplazamiento:

$$a_x = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s}$$

Al multiplicar esta ecuación por m y sustituir ma_x por la fuerza neta F, obtenemos

$$F = ma_x = m\frac{v_2^2 - v_1^2}{2s}$$

$$(5.2\text{-}1) \quad Fs = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

El producto Fs es el trabajo efectuado por la fuerza neta F y, por lo tanto, es igual al trabajo total W_{tot} efectuado por todas las fuerzas que actúan sobre la partícula. Llamamos a la cantidad $\frac{1}{2}mv^2$ la **energía cinética** K de la partícula (definición de energía cinética):

$$\boxed{K = \tfrac{1}{2} m v^2 \qquad \text{(definición de energía cinética)}}$$

Igual que el trabajo, la energía cinética de una partícula es una cantidad escalar; sólo depende de la masa y la rapidez de la partícula, no de su dirección de movimiento. Un automóvil (visto como partícula) tiene la misma energía cinética yendo al norte a $10m/s$ que yendo al este a $10m/s$. La energía cinética nunca puede ser negativa, y es cero sólo si la partícula está en reposo.

Ahora podemos interpretar la ecuación (5.2-1) en términos de trabajo y energía cinética.

El trabajo efectuado por la fuerza neta sobre una partícula es igual al cambio de energía cinética de la partícula:

$$W_{tot} = K_2 - K_1 = \Delta K$$

Éste es el resultado del **teorema trabajo-energía**.

Ejercicio 9. Uso de trabajo y energía para calcular rapidez

Supongamos que un trineo tiene una rapidez inicial v_1 de $2{,}0m/s$. ¿Cuál es la rapidez final del trineo después de avanzar 20 m? Con $w = 14700N$ y $W_{tot} = 10000J$

Solución 9.

Para calcular v_2, usaremos el hecho de que $K = \frac{1}{2}mv^2$

$$K_2 = W_{tot} + K_1$$

Para calcular K_2, necesitamos calcular K_1:

$$K_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$$

Para calcularla buscamos el valor de la masa:

$$m = \frac{w}{g} = \frac{14700}{9{,}8} \approx 1430kg$$

Luego

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot 1430kg \cdot (2{,}0m/s)^2 = \frac{1}{2} \cdot 1430kg \cdot 4{,}0m^2/s^2 \approx 2860J$$

Ahora estamos listos para calcular K_2:

$$K_2 = W_{tot} + K_1 = 10000J + 2860J = 12860J \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow 12860J = \frac{1}{2}mv_2^2 \Longrightarrow v_2^2 = \frac{12860J}{1/2 \cdot 1430kg} \approx 18m^2/s^2$$

$$v_2 = \sqrt{18m^2/s^2} \approx 4{,}2m/s$$

Ejercicio 10. Fuerzas sobre un martillo

En un martinete, un martillo de acero con masa de $200kg$ se levanta $3{,}00m$ sobre el tope de una viga en forma de I vertical, que se está clavando en el suelo. El martillo se suelta, metiendo la viga-I otros $7{,}4cm$ en el suelo. Los rieles verticales que guían el martillo ejercen una fuerza de fricción constante de $60N$ sobre éste. Use el teorema trabajo-energía para determinar

a) la rapidez del martillo justo antes de golpear la viga-I y

b) la fuerza media que el martillo ejerce sobre la viga-I. Ignore los efectos del aire.

Solución 10.

a) Primero calculamos el trabajo realizado por la caida del martillo:

$$W_{tot} = (mg - f_k) \cdot 3{,}00m = (200 \cdot 9{,}8N - 60N) \cdot 3{,}00m = 5700J$$

Sabemos que en el punto P_1 la velocidad es 0, entonces:

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot 200kg \cdot 0^2 = 0$$

Entonces tenemos una ecuación para descubrir K_2:

$$K_2 = W_{tot} + K_1 = 5700J + 0 = 5700J$$

Y por definición de energía cinética:

$$5700J = \frac{1}{2} \cdot 200kg \cdot v_2^2$$

$$v_2^2 = \frac{5700J}{1/2 \cdot 200kg} = 57m^2/s^2$$

$$v_2 = \sqrt{57m^2/s^2} \approx 7{,}55m/s$$

Por lo que la rapidez del martillo justo antes de golpear la viga-I es de $7{,}55m/s$.

b) Ahora para calcular la fuerza que el martillo ejerce sobre la viga-I, usaremos el teorema trabajo-energía:

$$W_{tot} = (w - f_k - n) \cdot s_{23} = K_3 - K_2$$

K_3 es igual a 0 ya que el martillo se detiene, para calcular la fuerza ejercida por el martillo despejaremos la fuerza normal n:

$$n = w - f - \frac{K_3 - K_2}{s_{23}} = 1960N - 60N - \frac{0 - 5700J}{0{,}0074m} = 79000N$$

Por lo tanto, por el par acción-reacción, la fuerza media que el martillo ejerce sobre la viga-I es igual que la fuerza normal que la viga ejerce sobre el martillo ($79000N$).

Significado de la energía cinética

El ejercicio 10 ilustra el significado físico de la energía cinética. El martillo se deja caer del reposo y, al golpear la viga-I, su energía cinética es igual al trabajo total realizado hasta ese punto por la fuerza neta. Esto se cumple en general: para acelerar una partícula de masa m desde el reposo (cero energía cinética) hasta una rapidez v, el trabajo total efectuado sobre ella debe ser igual al cambio de energía cinética desde 0 hasta $K = \frac{1}{2}mv^2$:

$$W_{tot} = K - 0 = K$$

Así, **la energía cinética de una partícula es igual al trabajo total que se efectuó para acelerarla desde el reposo hasta su rapidez actual**. La definición $K = \frac{1}{2}mv^2$, no se eligió al azar: es la única definición que concuerda con esta interpretación de la energía cinética.

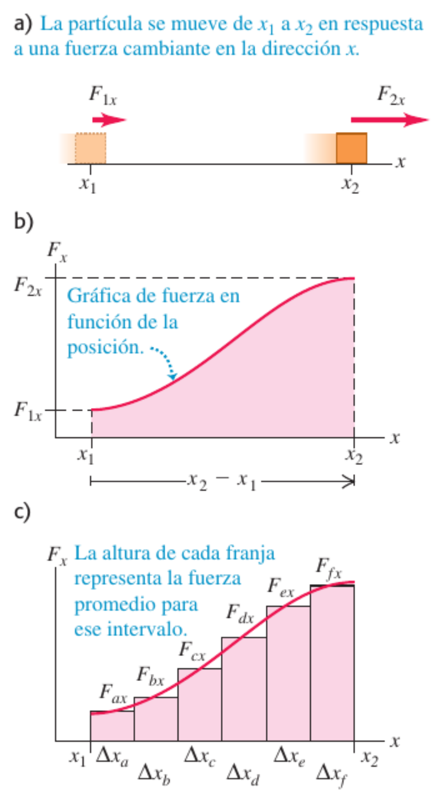
5.3. Trabajo y energía con fuerza variable

Hasta ahora hemos considerado sólo trabajo efectuado por fuerzas constantes. También analizamos únicamente movimiento rectilíneo. Podemos imaginar muchas situaciones en las que una fuerza que varía en magnitud, dirección o ambas cosas actúa sobre un cuerpo que sigue una trayectoria curva. Necesitamos poder calcular el trabajo realizado por la fuerza en estos casos más generales. Por fortuna, veremos que el teorema trabajo-energía se cumple aun cuando las fuerzas varían y la trayectoria del cuerpo no es recta.

Trabajo efectuado por una fuerza variable, movimiento rectilíneo

Agreguemos sólo una complicación a la vez. Consideremos un movimiento rectilíneo en el eje x con una fuerza cuya componente x Fx varía conforme se mueve el cuerpo. (Un ejemplo de la vida cotidiana es conducir un automóvil en una carretera recta, pero el conductor está acelerando y frenando constantemente.) Suponga que una partícula se mueve sobre el eje x de x_1 a x_2 (figura). La figura b es una gráfica de la componente x de la fuerza en función de la coordenada x de la partícula. Para determinar el trabajo realizado por esta fuerza, dividimos el desplazamiento total en segmentos pequeños, Δx_a, Δx_b, etcétera (figura c). Aproximamos el trabajo realizado por la fuerza en el segmento Dxa como la componente x media de fuerza F_{ax} en ese segmento multiplicada por el desplazamiento Δx_a. El trabajo realizado por la fuerza en el desplazamiento total de x_1 a x_2 es aproximadamente:

$$W = F_{ax}\Delta x_a + F_{bx}\Delta x_b + \dots$$



En el límite donde el número de segmentos se hace muy grande y su anchura muy pequeña, la suma se convierte en la integral de F_x de x_1 a x_2:

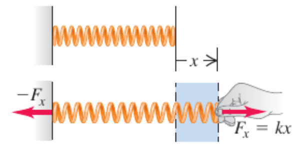
$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x \, dx \quad \text{(componente x de fuerza variable, desplazamiento rectilíneo)}$$

Si F_x, la componente x de la fuerza, es constante puede sacarse de la integral de la ecuación:

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x \, dx = F_x \int_{x_1}^{x_2} dx = F_x(x_2 - x_1)$$

Pero $x_2 - x_1 = s$, el desplazamiento total de la partícula. Así, en el caso de una fuerza constante F, la ecuación indica que $W = Fs$, lo cual coincide con la anterior ecuación de trabajo.

Apliquemos ahora lo aprendido al resorte estirado. Para mantener un resorte estirado una distancia x más allá de su longitud sin estiramiento, debemos aplicar una fuerza de igual magnitud en cada extremo (figura). Si el alargamiento x no es excesivo, vemos que la fuerza aplicada al extremo derecho tiene una componente x directamente proporcional a x:



$$F_x = kx \quad \text{(fuerza requerida para estirar un resorte)}$$

donde k es una constante llamada constante de fuerza (o constante de resorte) del resorte. Las unidades de k son fuerza dividida entre distancia. La observación de que el alargamiento (no excesivo) es proporcional a la fuerza fue hecha por Robert Hooke en 1678 y se conoce como **ley de Hooke**.

El trabajo realizado por F_x cuando el alargamiento va de cero a un valor máximo X es

$$W = \int_0^X F_x \, dx = \int_0^X kx \, dx = \frac{1}{2}kX^2$$

Esta ecuación indica que el trabajo es la fuerza media $\frac{kx}{2}$ multiplicada por el desplazamiento total X. Vemos que el trabajo total es proporcional al cuadrado del alargamiento final X. Para estirar un resorte ideal 2 cm, necesitamos efectuar cuatro veces más trabajo que para estirarlo 1 cm.

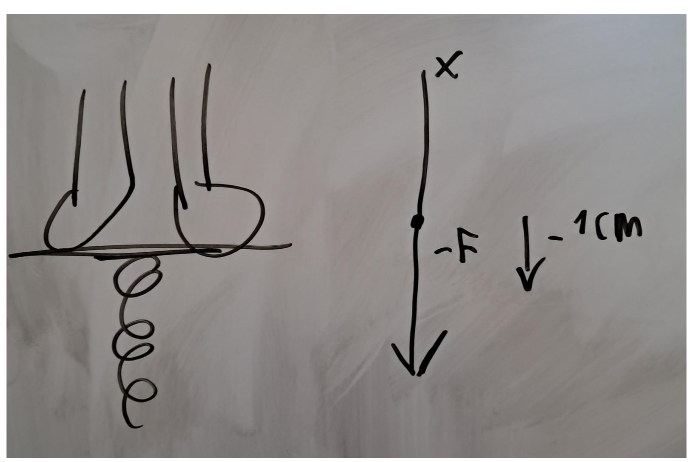
Si el resorte ya está estirado una distancia x_1, el trabajo necesario para estirarlo a una distancia mayor x_2 es

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x \, dx = \int_{x_1}^{x_2} kx \, dx = \frac{1}{2}kx_2^2 - \frac{1}{2}kx_1^2$$

Ejercicio 11. Trabajo sobre una balanza de resorte

Una mujer que pesa $600N$ se sube a una báscula que contiene un resorte rígido. En equilibrio, el resorte se comprime 1.0 cm bajo su peso. Calcule la constante de fuerza del resorte y el trabajo total efectuado sobre él durante la compresión.

Solución 11.



Por la ley de Hooke:

$$F_x = kx \quad \Longrightarrow \quad k = \frac{F_x}{x}$$

Remplazando tenemos:

$$k = \frac{-600N}{-0{,}01m} = 60000N/m$$

Entonces la constante de fuerza de resorte es de $60000N/m$.

Para calcular el trabajo total efectuado sobre el resorte, usaremos la ecuación de trabajo:

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x \, dx = \int_{x_1}^{x_2} kx \, dx = \frac{1}{2}kx_2^2 - \frac{1}{2}kx_1^2$$

Tomando $x_1 = 0$ y $x_2 = -0{,}01m$ tenemos:

$$W = \frac{1}{2} \cdot 60000N/m \cdot (-0{,}01m)^2 - \frac{1}{2} \cdot 60000N/m \cdot 0^2 = 3J - 0 = 3J$$

$$W = 3J$$