

# Física

para la ciencia  
y la tecnología

6ª edición

Tipler | Mosca

Volumen 1C

Termodinámica

EDITORIAL REVERTÉ

## Abreviaturas de unidades

A	ampère	H	henry	nm	nanómetro (10 <sup>-9</sup> m)
Å	ångström (10 <sup>-10</sup> m)	h	hora	pt	pinta
atm	atmósfera	Hz	hertz	qt	quart
Btu	unidad térmica inglesa	in	pulgada	rev	revolución
Bq	becquerel	J	joule	R	roentgen
C	coulomb	K	kelvin	Sv	sievert
°C	grados centígrados	kg	kilogramo	s	segundo
cal	caloría	km	kilómetro	T	tesla
Ci	curie	keV	kilo-electronvolt	u	unidad de masa unificada
cm	centímetro	lb	libra	V	volt
dyn	dina	L	litro	W	watt
eV	electronvolt	m	metro	Wb	weber
°F	grados Fahrenheit	MeV	mega-electronvolt	y	año
fm	femtometro, fermi (10 <sup>-15</sup> m)	Mm	megametro (10 <sup>6</sup> m)	yd	yarda
ft	pie	mi	milla	μm	micrometro (10 <sup>-6</sup> m)
Gm	gigametro (10 <sup>9</sup> m)	min	minuto	μs	microsegundo
G	gauss	mm	milímetro	μC	microcoulomb
Gy	gray	ms	milisegundo	Ω	ohm
g	gramo	N	newton		

## Factores de conversión

### Longitud

$$1 \text{ m} = 39,37 \text{ in} = 3,281 \text{ ft} = 1,094 \text{ yd}$$

$$1 \text{ m} = 10^{15} \text{ fm} = 10^{10} \text{ Å} = 10^9 \text{ nm}$$

$$1 \text{ km} = 0,6214 \text{ mi}$$

$$1 \text{ mi} = 5280 \text{ ft} = 1,609 \text{ km}$$

$$1 \text{ año-luz} = 1 \text{ c} \cdot \text{a} = 9,461 \times 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ in} = 2,540 \text{ cm}$$

### Volumen

$$1 \text{ L} = 10^3 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,057 \text{ qt}$$

### Tiempo

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ ks}$$

$$1 \text{ a} = 365,24 \text{ d} = 3,156 \times 10^7 \text{ s}$$

### Velocidad

$$1 \text{ km/h} = 0,278 \text{ m/s} = 0,6214 \text{ mi/h}$$

$$1 \text{ ft/s} = 0,3048 \text{ m/s} = 0,6818 \text{ mi/h}$$

### Ángulo y velocidad angular

$$1 \text{ rev} = 2\pi \text{ rad} = 360^\circ$$

$$1 \text{ rad} = 57,30^\circ$$

$$1 \text{ rev/min} = 0,1047 \text{ rad/s}$$

### Fuerza-presión

$$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dina} = 0,2248 \text{ lb}$$

$$1 \text{ lb} = 4,448 \text{ N}$$

$$1 \text{ atm} = 101,3 \text{ kPa} = 1,013 \text{ bar} = 76,00 \text{ cmHg} = 14,70 \text{ lb/in}^2$$

### Masa

$$1 \text{ u} = [(10^{-3} \text{ mol}^{-1})/N_A] \text{ kg} = 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ tonelada} = 10^3 \text{ kg} = 1 \text{ Mg}$$

$$1 \text{ slug} = 14,59 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} \approx 2,205 \text{ lb}$$

### Energía-Potencia

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 0,7376 \text{ ft} \cdot \text{lb} = 9,869 \times 10^{-3} \text{ atm} \cdot \text{L}$$

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J} = 4,129 \times 10^{-2} \text{ atm} \cdot \text{L}$$

$$1 \text{ atm} \cdot \text{L} = 101,325 \text{ J} = 24,22 \text{ cal}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb} = 252 \text{ cal} = 1054 \text{ J}$$

$$1 \text{ caballo de vapor} = 550 \text{ ft} \cdot \text{lb/s} = 746 \text{ W}$$

### Conductividad térmica

$$1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} = 6,938 \text{ Btu} \cdot \text{in}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F)}$$

### Campo magnético

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

### Viscosidad

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ poise}$$

**SEXTA EDICIÓN**

# **FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA**

---

**VOLUMEN 1C**  
**Termodinámica**



**SEXTA EDICIÓN**

# **FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA**

---

**VOLUMEN 1C**  
**Termodinámica**

**Paul A. Tipler**  
**Gene Mosca**



**EDITORIAL  
REVERTÉ**

Barcelona • Bogotá • Buenos Aires • México

*Título de la obra original:*

**Physics for Scientists and Engineers, Sixth Edition.**

*Edición original en lengua inglesa publicada por*

**W. H. FREEMAN AND COMPANY, New York and Basingstoke**

41 Madison Avenue, New York (NY) – U.S.A.

Copyright © 2008 by W. H. Freeman and Company. All Rights Reserved

*Edición en español:*

© Editorial Reverté, S. A., 2010

Edición en papel

© Editorial Reverté, S. A., 2010

ISBN: 978-84-291-4423-9 Volumen 1C

ISBN: 978-84-291-4428-4 Obra completa

Edición e-book (PDF)

© Editorial Reverté, S. A., 2021

ISBN: 978-84-291-9600-9

*Versión española:*

COORDINADOR Y TRADUCTOR

**Dr. José Casas-Vázquez**

Catedrático de Física de la Materia Condensada

TRADUCTORES

**Dr. Albert Bramon Planas**

Catedrático de Física Teórica

**Dr. Josep Enric Llebot Rabagliati**

Catedrático de Física de la Materia Condensada

**Dr. Fernando M. López Aguilar**

Catedrático de Física Aplicada

**Dr. Vicenç Méndez López**

Profesor Agregado de Física de la Materia Condensada

Departamento de Física

Universidad Autónoma de Barcelona

España

MAQUETACIÓN: REVERTÉ-AGUILAR

CORRECCIÓN DE ESTILO: CARLOS CISTUÉ SOLÁ

**Propiedad de:**

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.**

Loreto, 13-15. Local B

Tel: (34) 93 419 33 36

08029 Barcelona. ESPAÑA

reverte@reverte.com

**www.reverte.com**

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

PT: Para Claudia

GM: Para Vivian



# Índice abreviado de la obra completa

## VOLUMEN 1

### Volumen 1A

---

#### PARTE I MECÁNICA

---

- 1 Medida y vectores / 1
- 2 El movimiento en una dimensión / 27
- 3 Movimiento en dos y tres dimensiones / 63
- 4 Leyes de Newton / 93
- 5 Aplicaciones adicionales de las leyes de Newton / 127
- 6 Trabajo y energía cinética / 173
- 7 Conservación de la energía / 201
- 8 Conservación del momento lineal / 247
- 9 Rotación / 289
- 10 Momento angular / 331
- 11 Gravedad / 363
- 12 Equilibrio estático y elasticidad / 397
- 13 Fluidos / 423



*Thinkstock/Alamy*

### Volumen 1B

---

#### PARTE II OSCILACIONES Y ONDAS

---

- 14 Oscilaciones / 457
- 15 Movimiento ondulatorio / 495
- 16 Superposición y ondas estacionarias / 533

### Volumen 1C

---

#### PARTE III TERMODINÁMICA

---

- 17 Temperatura y teoría cinética de los gases / 563
- 18 Calor y primer principio de la termodinámica / 591
- 19 Segundo principio de la termodinámica / 629
- 20 Propiedades y procesos térmicos / 665
- R Relatividad especial / R.1

## VOLUMEN 2

### Volumen 2A

---

#### PARTE IV ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

---

21	Campo eléctrico I: distribuciones discretas de carga / 693
22	Campo eléctrico II: distribuciones continuas de carga / 727
23	Potencial eléctrico / 763
24	Capacidad / 801
25	Corriente eléctrica y circuitos de corriente continua / 839
26	El campo magnético / 887
27	Fuentes del campo magnético / 917
28	Inducción magnética / 959
29	Circuitos de corriente alterna / 995
30	Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas / 1029

### Volumen 2B

---

#### PARTE V LUZ

---

31	Propiedades de la luz / 1055
32	Imágenes ópticas / 1097
33	Interferencia y difracción / 1141

## FÍSICA MODERNA

---

#### PARTE VI MECÁNICA CUÁNTICA, RELATIVIDAD Y ESTRUCTURA DE LA MATERIA

---

34	Dualidad onda-partícula y física cuántica / 1173
35	Aplicaciones de la ecuación de Schrödinger / 1203
36	Átomos / 1227
37	Moléculas / 1261
38	Sólidos / 1281
39	Relatividad / 1319
40	Física nuclear / 1357
41	Las partículas elementales y el origen del universo / 1389

## APÉNDICES Y RESPUESTAS

Apéndice A Unidades SI y factores de conversión / AP.1

Apéndice B Datos numéricos / AP.3

Apéndice C Tabla periódica de los elementos / AP.6

Apéndice de matemáticas / M.1

Respuestas de los problemas impares del final de los capítulos / A.1

# Índice analítico

## Volumen 1C

Prefacio	xi
Acerca de los autores	xxii

\* Materias opcionales

### PARTE III TERMODINÁMICA

#### Capítulo 17

#### TEMPERATURA Y TEORÍA CINÉTICA DE LOS GASES / 563

17.1	Equilibrio térmico y temperatura	564
17.2	Termómetros de gas y escala de temperaturas absolutas	566
17.3	Ley de los gases ideales	569
17.4	La teoría cinética de los gases	574

##### Temas de actualidad en Física:

##### Termómetros Moleculares / 584

Resumen	585
Problemas	586

#### Capítulo 18

#### CALOR Y PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA / 591

18.1	Capacidad calorífica y calor específico	592
18.2	Cambio de fase y calor latente	595
18.3	El experimento de Joule y el primer principio de la termodinámica	598
18.4	La energía interna de un gas ideal	601

18.5	Trabajo y diagrama PV para un gas	602
18.6	Capacidades caloríficas de los gases	606
18.7	Capacidades caloríficas de los sólidos	611
18.8	Fallos del teorema de equipartición	611
18.9	Compresión adiabática cuasiestática de un gas	615

##### Temas de actualidad en Física:

##### Respirometría: respirando el calor / 619

Resumen	620
Problemas	622

#### Capítulo 19

#### SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA / 629

19.1	Máquinas térmicas y el segundo principio de la termodinámica	630
19.2	Refrigeradores y segundo principio de la termodinámica	634
19.3	La máquina de Carnot	637
*19.4	Bombas de calor	643
19.5	Irreversibilidad, desorden y entropía	645
19.6	Entropía y disponibilidad de la energía	652
19.7	Entropía y probabilidad	653

##### Temas de actualidad en Física:

##### La perpetua batalla por el movimiento perpetuo / 655

Resumen	656
Problemas	657

**Capítulo 20****PROPIEDADES Y PROCESOS  
TÉRMICOS / 665**

20.1	Dilatación térmica	666
20.2	Ecuación de Van der Waals e isotermas líquido-vapor	670
20.3	Diagramas de fase	673
20.4	Transferencia de calor	674

**Temas de actualidad en Física:****Islas urbanas de calor:  
noches cálidas en la ciudad / 686**

Resumen	687
Problemas	688

**ÍNDICE ALFABÉTICO / I.1**

# Prefacio

La sexta edición de *Física para la ciencia y la tecnología* presenta un texto y herramientas *online* completamente integrados que ayudarán a los estudiantes a aprender de un modo más eficaz y que permitirá a los profesores adaptar sus clases para enseñar de un modo más eficiente.

El texto incluye un nuevo enfoque estratégico de resolución de problemas, un apéndice de matemáticas integrado y nuevas herramientas para mejorar la comprensión conceptual. Los nuevos temas de actualidad en física destacan temas innovadores que ayudan a los estudiantes a relacionar lo que aprenden con las tecnologías del mundo real.

## CARACTERÍSTICAS CLAVE



### ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

En la sexta edición destaca una nueva estrategia de resolución de problemas en la que los Ejemplos siguen un formato sistemático de **Planteamiento**, **Solución** y **Comprobación**. Este formato conduce a los estudiantes a través de los pasos implicados en el análisis del problema, la resolución del problema y la comprobación de sus respuestas. Los Ejemplos a menudo incluyen útiles secciones de **Observación** que presentan formas alternativas de resolución de problemas, hechos interesantes, o información adicional relativa a los conceptos presentados. Siempre que se considera necesario, los Ejemplos van seguidos de **Problemas Prácticos** para que los estudiantes puedan evaluar su dominio de los conceptos.

En esta edición, las etapas de resolución de problemas siguen contando con las ecuaciones necesarias al lado, de manera que a los estudiantes les resulte más fácil seguir el razonamiento.

Después de cada enunciado del problema, los estudiantes van al **Planteamiento** del problema. Aquí, el problema se analiza tanto conceptualmente como visualmente.

En la sección **Solución**, cada paso de la solución se presenta con un enunciado escrito en la columna de la izquierda y las ecuaciones matemáticas correspondientes en la columna de la derecha.

La **Comprobación** recuerda a los estudiantes que han de verificar que sus resultados son precisos y razonables.

La **Observación** sugiere una forma distinta de enfocar un ejemplo o da información adicional relevante para el ejemplo.

A la solución le sigue normalmente un **Problema Práctico**, lo que permite a los estudiantes comprobar su comprensión. Al final del capítulo se incluyen las respuestas para facilitar una comprobación inmediata.

En casi todos los capítulos se incluye un recuadro llamado **Estrategia de resolución de problemas** para reforzar el formato **Planteamiento**, **Solución** y **Comprobación** para solucionar satisfactoriamente los problemas.

**Ejemplo 3.4 Tomando una curva**

Un coche se mueve hacia el este a 60 km/h. Toma una curva y 5 s más tarde viaja hacia el norte a 60 km/h. Determinar la aceleración media del coche.

**PLANTEAMIENTO** Calculamos la aceleración media a partir de su definición,  $\vec{a}_m = \Delta\vec{v}/\Delta t$ . Primero calculamos  $\Delta\vec{v}$  que es el vector que sumado a  $\vec{v}_i$  nos da  $\vec{v}_f$ .

**SOLUCIÓN**

1. La aceleración media es el cociente entre la variación de velocidad y el intervalo de tiempo: 
$$\vec{a}_m = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$
2. Para hallar  $\Delta\vec{v}$ , debemos especificar primero  $\vec{v}_i$  y  $\vec{v}_f$ . Dibujemos  $\vec{v}_i$  y  $\vec{v}_f$  (figura 3.7a), y tracemos el diagrama de suma vectorial (figura 3.7b) correspondiente a  $\vec{v}_f = \vec{v}_i + \Delta\vec{v}$ :
3. El cambio de velocidad viene determinado por las velocidades inicial y final: 
$$\vec{v}_f = \vec{v}_i + \Delta\vec{v}$$
4. Sustituya los resultados anteriores para determinar la aceleración media: 
$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \frac{60 \text{ km/h } \hat{j} - 60 \text{ km/h } \hat{i}}{5,0 \text{ s}}$$
5. Convierta 60 km/h a metros por segundo: 
$$60 \text{ km/h} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 16,7 \text{ m/s}$$
6. Exprese la aceleración en metros por segundo al cuadrado: 
$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \frac{16,7 \text{ m/s } \hat{j} - 16,7 \text{ m/s } \hat{i}}{5,0 \text{ s}} = \boxed{-3,4 \text{ m/s}^2 \hat{i} + 3,4 \text{ m/s}^2 \hat{j}}$$

**COMPROBACIÓN** La componente de la velocidad en dirección este disminuye de 60 km/h a cero, de tal forma que cabría esperar que la componente x de la aceleración fuese negativa. Así mismo, la componente de la velocidad en dirección norte aumenta de cero a 60 km/h, de forma que cabría esperar que la componente y de la aceleración fuese positiva. El resultado del apartado 6 concuerda con estas expectativas.

**OBSERVACIÓN** Obsérvese que el coche sigue acelerando aunque el módulo de su velocidad se mantenga constante.

**PROBLEMA PRÁCTICO 3.1** Determinar el módulo y la dirección del vector aceleración media.

**FIGURA 3.7**

### ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

#### Velocidad relativa

**PLANTEAMIENTO** El primer paso para la resolución de problemas de velocidad relativa es identificar y marcar los sistemas de referencia relevantes. Aquí les llamaremos sistema de referencia A y B.

#### SOLUCIÓN

1. Utilizando  $\vec{v}_{pb} = \vec{v}_{pa} + \vec{v}_{ab}$  (ecuación 3.9), relacione la velocidad del objeto móvil (partícula p) relativa al sistema A con la velocidad de la partícula relativa al sistema B.
2. Trace un diagrama de suma vectorial para la ecuación  $\vec{v}_{pb} = \vec{v}_{pa} + \vec{v}_{ab}$ . Incluya ejes de coordenadas en el dibujo.
3. Calcule la incógnita en cuestión. Utilice la trigonometría cuando sea necesario.

**COMPROBACIÓN** Asegúrese de que obtiene la velocidad o posición del cuerpo respecto del sistema de referencia correcto.



## APÉNDICE DE MATEMÁTICAS INTEGRADO

Esta edición ha mejorado el apoyo matemático a los estudiantes que estudian Matemáticas al mismo tiempo que introducción a la Física o a los estudiantes que requieren repasar las Matemáticas.

### El Apéndice de Matemáticas completo

- revisa resultados básicos de álgebra, geometría, trigonometría y cálculo,
- relaciona conceptos matemáticos con conceptos físicos del libro,
- proporciona Ejemplos y Problemas Prácticos para que los estudiantes puedan comprobar su comprensión de los conceptos matemáticos.

**Ejemplo M.13 Desintegración radiactiva del cobalto-60**

El período de semidesintegración del cobalto-60 (<sup>60</sup>Co) es 5,27 años. A  $t = 0$  se tiene una muestra de <sup>60</sup>Co de masa 1,20 mg. ¿Cuánto tiempo  $t$  (en años) habrá de transcurrir para que 0,400 mg de la muestra de <sup>60</sup>Co se hayan desintegrado?

**PLANTEAMIENTO** En la deducción del período de semidesintegración pusimos  $N/N_0 = 1/2$ . En este ejemplo, hemos de hallar el tiempo de permanencia de dos tercios de la muestra, es decir, cuando la fracción  $N/N_0$  sea de 0,667.

**SOLUCIÓN**

- Expresar la fracción  $N/N_0$  como una función exponencial:  $\frac{N}{N_0} = 0,667 = e^{-\lambda t}$
- Obtener los valores recíprocos de ambos miembros:  $\frac{N_0}{N} = 1,50 = e^{\lambda t}$
- Despejar  $t$ :  $t = \frac{\ln 1,50}{\lambda} = \frac{0,405}{\lambda}$
- La constante de desintegración está relacionada con el período de semidesintegración por medio de  $\lambda = (\ln 2)/t_{1/2}$  (ecuación M.70). Sustituir  $(\ln 2)/t_{1/2}$  por  $\lambda$  y calcular el tiempo:  $t = \frac{\ln 1,5}{\ln 2} t_{1/2} = \frac{0,405}{\ln 2} \times 5,27 \text{ años} = 3,08 \text{ años}$

**COMPROBACIÓN** Para que la masa de una muestra de <sup>60</sup>Co decreciese hasta el 50% de su masa inicial habrían de transcurrir 5,27 años. Por lo tanto, es de esperar que la muestra tardase menos de 5,27 años para perder el 33,3% de su masa. Por tanto, el resultado obtenido (3,08 años), concuerda con lo esperado.

**PROBLEMAS PRÁCTICOS**

- La constante de tiempo de descarga de un condensador en un circuito RC es el tiempo que tarda el condensador en descargarse hasta  $e^{-1}$  (o sea 0,368) veces su carga a  $t = 0$ . Si  $\tau = 1$  s para un condensador, ¿cuánto tiempo  $t$  (en segundos) habrá de transcurrir para descargarse hasta el 50% de su carga inicial?
- Si la población de coyotes en un determinado lugar está creciendo a un ritmo del 8,0% por década y continúa creciendo al mismo ritmo indefinidamente, ¿en cuántos años se alcanzará una población 1,5 veces la actual?

**M.12 CÁLCULO INTEGRAL**

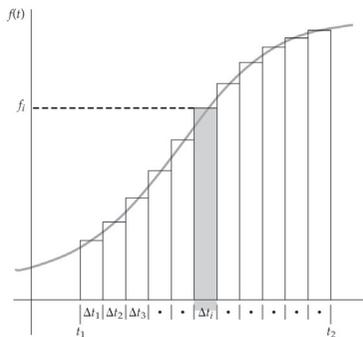
El **cálculo integral** se puede considerar el inverso del cálculo diferencial. Si una función  $f(t)$  se integra, se obtiene una función  $F(t)$ , de forma que  $f(t)$  es la derivada de  $F(t)$  con respecto a  $t$ .

**LA INTEGRAL COMO UN ÁREA BAJO UNA CURVA. ANÁLISIS DIMENSIONAL**

La integración está relacionada con el problema de hallar el área bajo una curva. La figura M.27 muestra una función  $f(t)$ . El área del elemento sombreado es aproximadamente  $f_i \Delta t_i$ , en donde  $f_i$  se calcula en un punto cualquiera del intervalo  $\Delta t_i$ . Esta aproximación mejora si  $\Delta t_i$  es muy pequeño. Se halla el área total desde  $t_1$  hasta  $t_2$  sumando todos los elementos de área desde  $t_1$  a  $t_2$  y tomando el límite cuando  $\Delta t_i$  tiende a cero. Este límite se denomina la **integral** de  $f$  extendida al intervalo  $t_1$ ,  $t_2$  y se escribe

$$\int f dt = \text{área}_f = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i f_i \Delta t_i \quad \text{M.74}$$

Las dimensiones físicas de una integral de una función  $f(t)$  se hallan multiplicando las dimensiones del integrando (la función que se ha de integrar) por las dimensiones de la variable de in-



**FIGURA M.27** Función general  $f(t)$ . El área del elemento sombreado es aproximadamente  $f_i \Delta t_i$ , en donde  $f_i$  se calcula para un punto cualquiera del intervalo.



**Véase el Apéndice de matemáticas para más información sobre Cálculo diferencial**

Además, las notas al margen permiten a los estudiantes ver fácilmente la relación entre los conceptos físicos del texto y los conceptos matemáticos.

**NUEVO! PEDAGOGÍA PARA ASEGURAR LA COMPRENSIÓN CONCEPTUAL**

Se han añadido herramientas prácticas para los estudiantes para facilitar un mejor comprensión conceptual de la física.

- Se han introducido nuevos **Ejemplos conceptuales**, para ayudar a los estudiantes a comprender en profundidad conceptos físicos esenciales. Estos ejemplos utilizan la estrategia **Planteamiento, Solución y Comprobación**, de modo que los estudiantes no sólo obtienen una comprensión conceptual básica sino que tienen que evaluar sus respuestas.

**Ejemplo 8.12 Colisiones con masilla**

*Conceptual*

María tiene dos bolas de la misma masa, una bola de masilla y otra de goma. Lanza la bola de masilla contra un bloque suspendido por dos cuerdas como se muestra en la figura 8.20. La bola impacta contra el bloque y cae al suelo. Como consecuencia, el bloque asciende hasta una altura máxima  $h$ . Si hubiera lanzado la bola de goma con la misma velocidad, ¿el bloque habría ascendido a una altura mayor que  $h$ ? La goma, a diferencia de la masilla, es elástica y hubiera rebotado contra el bloque.

**PLANTEAMIENTO** Durante el impacto, el cambio de momento del sistema bola-bloque es cero. Cuanto mayor es el cambio de momento de la bola, mayor será el cambio de momento del bloque. ¿Aumenta más el cambio de momento de la bola si rebota en el bloque que si no lo hace?

**SOLUCIÓN**  
La bola de masilla pierde una fracción importante de su momento inicial. La bola de goma perdería todo el momento inicial para ganar momento en la dirección opuesta. Por tanto, la bola de goma perdería mayor cantidad de momento que la bola de masilla.

El bloque ascendería hasta una mayor altura después de ser impactado con la bola de goma que si hubiese sido impactado por la bola de masilla.

**COMPROBACIÓN** El bloque ejerce un impulso hacia atrás sobre la bola de masilla hasta hacerla parar. El mismo impulso hace detener la bola de goma, pero además el bloque ejerce un impulso adicional que la hacer retroceder. Así, el bloque ejerce un mayor impulso sobre la bola de goma que sobre la de masilla. Según la tercera ley de Newton, el impulso de la bola sobre el bloque es igual y opuesto al impulso del bloque sobre la bola. Entonces, la bola de goma ejerce un impulso mayor sobre el bloque confiriéndole un mayor cambio de momento.



**FIGURA 8.20**

- Las nuevas **Comprobaciones de conceptos** facilitan a los estudiantes comprobar su comprensión conceptual de conceptos físicos mientras leen los capítulos. Las respuestas están situadas al final de cada capítulo para permitir una comprobación inmediata. Las comprobaciones de conceptos se colocan cerca de temas relevantes, de modo que los estudiantes puedan releer inmediatamente cualquier material que no comprendan del todo.
- Los nuevos **avisos de errores frecuentes**, identificados mediante signos de exclamación, ayudan a los estudiantes a evitar errores habituales. Estos avisos están situados cerca de los temas que habitualmente causan confusión, de manera que los estudiantes puedan resolver de inmediato cualquier dificultad.



## COMPROBACIÓN CONCEPTUAL 3.1

La figura 3.9 es el diagrama del movimiento de la saltadora antes, durante y después del instante de tiempo  $t_c$  cuando se halla momentáneamente en reposo en el punto más bajo de su descenso. En la parte de su ascenso mostrada en el esquema, la velocidad de la saltadora aumenta. Utilice este diagrama para determinar la dirección de la aceleración de la saltadora ( $a$ ) en el instante  $t_c$  y ( $b$ ) en el instante  $t_g$ .

donde  $U_y$  la constante arbitraria de integración, es el valor de la energía potencial para  $y = 0$ . Como sólo definimos la variación de energía potencial, el valor real de  $U$  no es importante. Por ejemplo, si a la energía potencial gravitatoria del sistema Tierra-esquiador se le asigna un valor igual a cero cuando el esquiador está en el fondo de la pista, su valor a la altura  $h$  sobre este nivel es  $mgh$ . También podemos asignar el valor cero de energía potencial al momento en que el esquiador está en un punto  $P$  a medio camino de la pendiente, en cuyo caso su valor en cualquier otro punto sería  $mgy$ , donde  $y$  es la distancia del esquiador respecto al punto  $P$ .

Tenemos libertad para dar a  $U$  el valor cero en cualquier punto de referencia.



## TEMAS DE ACTUALIDAD EN FÍSICA

Los **temas de actualidad en Física**, que aparecen al final de ciertos capítulos, tratan de aplicaciones actuales de la Física y relacionan estas aplicaciones con conceptos descritos en los capítulos. Estos temas van desde un parque eólico hasta termómetros moleculares y motores de detonación pulsar.

### Soplando aire cálidos

Los parques eólicos están desperdigados por la costa danesa, las planicies del alto medio-oeste de EE.UU. y las montañas desde California hasta Vermont. El aprovechamiento de la energía cinética del viento no es nada nuevo. Durante siglos, los molinos de viento se han utilizado para bombear agua, ventilar minas<sup>1</sup> y moler el grano.

En la actualidad, las turbinas de viento hacen funcionar generadores eléctricos. Esas turbinas transforman energía cinética en energía electromagnética. Las turbinas modernas tienen precios, tamaños y rendimientos muy variados. Algunas de ellas son pequeñas y sencillas máquinas que cuestan unos 500 dólares y producen unos 100 watts de potencia.<sup>2</sup> Otras son gigantes y complejas y cuestan unos 2 millones de dólares pero generan hasta 2,5 MW por turbina.<sup>3</sup> Todas ellas funcionan gracias a una fuente de energía fácilmente disponible —el viento.

La teoría que hay detrás de la conversión de energía cinética en electromagnética es simple. Las moléculas de aire golpean sobre las aspas de la hélice y hacen girar la turbina. Las aspas hacen girar unos engranajes que hacen aumentar la velocidad de rotación que a su vez hace girar el rotor generador. El generador envía energía electromagnética a cables que soportan alta tensión.

Sin embargo, la conversión de la energía cinética del viento en energía electromagnética no es perfectamente eficiente; de hecho, no puede ser 100% eficiente. Si las turbinas convirtieran completamente la energía cinética del viento en energía eléctrica, el aire saldría de las turbinas sin energía cinética. Es decir, las turbinas pararían el aire. Si la turbina parase completamente el aire, éste fluiría alrededor de la turbina en lugar de fluir a través de ella.

Así, la turbina debe ser capaz de capturar la energía cinética del aire en movimiento y de evitar el flujo de aire a su alrededor. Las turbinas propulsadas por hélices son las más comunes y su eficiencia teórica varía de 30% a 59%.<sup>4</sup> (Las eficiencias teóricas varían en función de cómo el aire fluye alrededor de la turbina y a través de las hélices.)

En resumen, ni la más eficiente de las turbinas puede convertir el 100% de la energía disponible. ¿Qué sucede? Antes de llegar a la turbina el aire fluye de forma laminar mientras que al dejar atrás la turbina el aire se vuelve turbulento. La componente rotacional del movimiento del aire de detrás de la turbina, aumenta su energía aunque también hay alguna disipación debida a la viscosidad del aire. Si un determinado volumen de aire se mueve más lentamente, aparecerá un rozamiento entre este aire y el aire más veloz que fluye a su alrededor.<sup>5</sup> Las hélices se calientan y el aire también. Los engranajes de la turbina también disipan energía debido al rozamiento. Las hélices vibran individualmente —la energía absorbida para producir estas vibraciones también hace disminuir la eficiencia. Finalmente, la turbina necesita corriente para hacer funcionar los motores que lubrican los engranajes y el motor que orienta la turbina en la dirección más apropiada para la captura del viento.

En definitiva, la mayoría de turbinas funcionan con una eficiencia de entre un 10 y un 20 por ciento,<sup>6</sup> pero siguen siendo un recurso energético más limpio que el petróleo. Uno de los propietarios de turbinas eólicas decía, “Lo fundamental del negocio de las turbinas radica en que nos ayuda a controlar nuestro futuro”.<sup>7</sup>

### Temas de actualidad en Física



Un parque eólico que convierte la energía cinética del aire en energía eléctrica. (Image Slate.)

<sup>1</sup> Agricola, Georgius, *De Re Metallica*. (Herbert and Lou Henry Hoover, Transl.) Reprint Mineola, NY: Dover, 1950, 200–203.

<sup>2</sup> Conally, Abe, and Conally, Josie, “Wind Powered Generator,” *Make*, Feb. 2006, Vol. 5, 90–101.

<sup>3</sup> “Why Four Generators May Be Better than One,” *Modern Power Systems*, Dec. 2005, 30.

<sup>4</sup> Gorban, A. N., Gorlov, A. M., and Silantyev, V. M., “Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow,” *Journal of Energy Resources Technology*, Dec. 2001, Vol. 123, 311–317.

<sup>5</sup> Roy, S. B., S. W. Pacala, and R. L. Walko, “Can Large Wind Farms Affect Local Meteorology?” *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, Oct. 16, 2004, 109, D19101.

<sup>6</sup> Gorban, A. N., Gorlov, A. M., and Silantyev, V. M., “Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow,” *Journal of Energy Resources Technology*, December 2001, Vol. 123, 311–317.

<sup>7</sup> Wilde, Matthew, “Colwell Farmers Take Advantage of Grant to Produce Wind Energy,” *Waterloo-Cedar Falls Courier*, May 1, 2006, B1+.